



МАТЕРИАЛЫ

XVIII ВСЕРОССИЙСКОЙ
МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИИ

ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ

(МКПУ — 2025)

ТОМ 1

РОБОТОТЕХНИКА
И МЕХАТРОНИКА

ТУЛА, 15 — 20 СЕНТЯБРЯ 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российская академия наук

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
ПИШ «Тульская инженерная школа «Интеллектуальные
оборонные системы»
ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского» РАН
НИИ многопроцессорных вычислительных систем
им. академика А.В. Каляева ЮФУ

НПО Специальных материалов
Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО КФУ
ФАУ Центральный аэрогидродинамический институт
им. профессора Н.Е. Жуковского

**ХVIII ВСЕРОССИЙСКАЯ
МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ
(МКПУ–2025)**

(15 сентября – 20 сентября 2025 г.)

Том 1

***РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА
(РИМ–2025)***

Тула
Издательство ТулГУ
2025

УДК 621.865.8;681.527(062)

ББК 32.816;32.966я431

P58

Редакционная коллегия

академик РАН Ф.Л. Черноушко – ответственный редактор
академик РАН И.А. Каляев; член-корр. РАН И.Л. Ермолов;
д-р техн. наук Е.С. Брискин; профессор РАН Ю.В. Визильтер;
член-корр. РАН З.А. Годжаев; д-р техн. наук О.В. Даринцев;
д-р техн. наук С.Г. Капустян; д-р техн. наук А.Ф. Кононов;
д-р техн. наук А.В. Лопота; профессор РАН Р. В. Мещеряков;
профессор РАН А.Л. Ронжин; канд. техн. наук В.В. Серебрен-
ный; член-корр. РАН Е.Н. Семашкин; д-р техн. наук
С.В. Феофилов; д-р техн. наук В.Ф. Филаретов; д-р техн.
наук Н.Б. Филимонов; д-р техн. наук С.П. Хрипунов; д-р
техн. наук С. Г. Цариченко; член-корр. РАН А.Ф. Щербатюк

P58

XVIII Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ–2025) : материалы мультиконференции (Тула, 15 сентября – 20 сентября 2025 г.) : в 4 т. Т. 1 Робототехника и мехатроника (РиМ – 2025) / под ред. академика РАН Ф.Л. Черноушко. — Тула : Изд-во ТулГУ, 2025. — 300 с.

ISBN 978-5-7679-5716-3

ISBN 978-5-7679-5709-5 (Т. 1)

В Томе 1 материалов XVIII Всероссийской мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2025 представлены материалы докладов локальной научно-технической конференции «Робототехника и мехатроника» (РиМ-2025)».

При содействии Научного совета по робототехнике
и мехатронике РАН

УДК 621.865.8;681.527(062)

ББК 32.816;32.966я431

ISBN 978-5-7679-5716-3

ISBN 978-5-7679-5709-5 (Т. 1)

© Авторы тезисов, 2025

© Издательство ТулГУ, 2025

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблемы управления актуальны практически для всех сфер человеческой деятельности. Создание и развитие современных авиационно-космических комплексов, робототехнических, мехатронных и транспортных систем, распределенных и сетевых структур, автоматизированных производств, социально-экономических систем и т.д., работающих в условиях неопределенности и комплексного воздействия множества факторов, включая человеческий, требует решения сложных задач управления такими системами. Поэтому основной целью XVIII Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2025) является объединение усилий российских ученых для решения актуальных научно-технических проблем в области теории и процессов управления, а также их практического использования в ключевых отраслях экономики России.

Проведение XVIII Всероссийской мультиконференции по проблемам управления позволит:

- российским ученым и специалистам представить широкой научной общественности результаты своих фундаментальных, поисковых и прикладных исследований в области теории и систем управления;

- выявить основные направления фундаментальных и прикладных исследований по проблемам управления, обсудить сценарные прогнозы их дальнейшего развития;

- обеспечить обмен научными результатами между различными научными школами России;

- передать молодым ученым накопленные современной наукой знания в области теоретических и практических аспектов процессов управления;

- выработать рекомендации по повышению интеллектуализации и конкурентоспособности создаваемых в России образцов техники;

- обсудить проблемы образования и подготовки кадров высшей квалификации в области теории и процессов управления;

- издать материалы и лучшие доклады участников конференции для ознакомления широкой научной общественности и повышения уровня подготовки специалистов в высшей школе в данной предметной области.

Научная программа конференции объединяет широкий круг тематических направлений в рамках пяти локальных научно-технических конференций:

- **Робототехника и мехатроника (РиМ-2025)**, председатель Программного комитета – академик РАН Ф.Л. Черноусько, сопредседатель – академик РАН И.А. Каляев;

- **Управление в распределенных и сетевых системах (УРСС-2025)**, председатель Программного комитета – академик РАН И.А. Каляев, сопредседатель – академик РАН Д.А. Новиков;

- **Управление аэрокосмическими системами (УАКС-2025)**, председатель Программного комитета – академик РАН С.Ю. Желтов, сопредседатель – член-корреспондент РАН К.И. Сыпало;

- **Управление в перспективных наземных транспортных системах (УПНТС-2025)**, председатель Программного комитета – член-корреспондент РАН В.М. Приходько, сопредседатель – член-корреспондент РАН Г.О. Котиев;

- **IV Всероссийская научно-техническая конференция им. Д.В. Коноплева «Перспективы создания и применения высокоточного оружия» (ПСВО-2025)**, председатель Программного комитета – член-корреспондент РАН Е.Н. Семашкин, сопредседатель – д-р техн. наук О.А. Кравченко.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	14
РАЗДЕЛ 1. КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА РОБОТОВ	15
<i>Андропова А.А., Савин С.И.</i> МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ С АДДИТИВНЫМИ НЕОПРЕДЕЛЁННО- СТЯМИ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ	16
<i>Артемьев К.С., Брискин Е.С.</i> О ВЛИЯНИИ ПОХОДКИ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ДВИЖИТЕ- ЛЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ША- ГАЮЩЕГО РОБОТА	21
<i>Балакина Е.В., Брискин Е.С.</i> ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНОЙ СВОБОДНОГО РАДИУСА КОЛЕСА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ РАВНОМЕРНОМ КАЧЕНИИ ПО НЕДЕФОР- МИРУЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ	23
<i>Безусов С.О., Брискин Е.С., Серов В.А., Устинов С.А., Вершинина И.П.</i> НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ПОМОЩЬЮ ТРОСО- ВОЙ СИСТЕМЫ	28
<i>Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНО- СТИ СЦЕПЛЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ	31
<i>Бобцов А.А., Козачёк О.А.</i> СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ НОГИ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННО- СТИ	35

<i>Болотник Н.Н., Фигурина Т.Ю.</i> УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ТРЕХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ТЕЛ В СРЕДЕ С КВАДРАТИЧНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ	43
<i>Глущенко А.И., Ласточкин К.А.</i> УПРАВЛЕНИЕ УГЛАМИ ЭЙЛЕРА КВАДРОКОПТЕРА НА ОСНОВЕ КОНПЕНСАЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	46
<i>Голубев Ю.Ф., Корянов В.В.</i> ВОЗМОЖНОСТЬ ПРЕОДОЛЕНИЯ МНОГОНОГИМ РОБОТОМ ВПАДИН МАКСИМАЛЬНОЙ ШИРИНЫ	50
<i>Григорьев И.М., Юхимец Д.А.</i> МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ШАРНИРА МАНИПУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ	53
<i>Дементьев Е.В., Брискин Е.С.</i> УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВОДНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ НА КАНАТНО-РЕЛЬСОВОЙ ДОРОГЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕСТЕСТВЕННЫХ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	57
<i>Иванов Е.В., Лесков А.Г.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТРОСОВЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ.	65
<i>Костин Г.В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ДВИЖЕНИЙ ЛИНЕЙНОЙ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ	68
<i>Красавин Н.А., Коноплин А.Ю.</i> МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АНПА ДЛЯ АВТОНОМНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ СИЛОВЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ В РЕЖИМЕ ЗАВИСАНИЯ	72
<i>Мухин К.С., Брем И.В, Антонов А.В, Фомин А.С.</i> ШЕСТИПОДВИЖНЫЙ РОБОТ ОТНОСИТЕЛЬНОГО МАНИПУЛИРОВАНИЯ, СОСТОЯЩИЙ ИЗ МОДУЛЕЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ	75

<i>Насибуллаев И.Ш., Даринцев О.В.</i> АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОДУЛЬНОГО КОЛЕСНОГО РОБОТА С ФИКСИРОВАН- НОЙ И ПОДВИЖНОЙ КОЛЕСНОЙ ПАРОЙ	78
<i>Пыркин А.А., Михальков Н.В.</i> АДАПТИВНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ В МЕХАНИ- ЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С НЕЛИНЕЙНЫМИ МОДЕЛЯМИ ТРЕ- НИЯ	81
<i>Смирная Л.Д. Вершинина И.П. Артемьев К.С., Брискин Е.С.,</i> ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ДВИЖИТЕЛЯМИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИМИ ИХ ИДЕАЛЬ- НУЮ МАНЕВРЕННОСТЬ	84
<i>Суханов А.Н.</i> АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМИОГРАММЫ ПЛЕЧЕ- ВОГО ПОЯСА ОПЕРАТОРА ДЛЯ ЭКЗОСКЕЛЕТА ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ	88
<i>Тарабукин И.М., Гусев С.В.</i> СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ НЕПОЛНО- ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ПРИВОДА, ОТСЛЕЖИВАЮЩЕГО ЗАДАННУЮ СКОРОСТЬ	91
<i>Филаретов В.Ф., Зуев А.В. Юхимец Д.А., Тимошенко А.А.,</i> <i>Горностаев И.В.</i> МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМ ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЗВЕННЫМ ПОДВОДНЫМ МАНИ- ПУЛЯТОРОМ	94
<i>Хачатрян А.А., Брискин Е.С., Серов В.А.</i> ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ ТРЕХСЕКЦИОННОГО РО- БОТА ПО РАЗЛИЧНО ОРИЕНТИРОВАННЫМ ПОВЕРХНО- СТЯМ	97
<i>Хорошева А.А., Черноусько Ф.Л.</i> ПОСТРОЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ КВАДРОКОПТЕРОВ В ВЕР- ТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ	101

<i>Хорошева А.А., Черноусько Ф.Л.</i> ПОСТУПАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА С ВНУТРЕННЕЙ ПОДВИЖНОЙ МАССОЙ В СРЕДЕ С КВАДРАТИЧНЫМ СО- ПРОТИВЛЕНИЕМ	104
<i>Шаронов Н.Г., Брискин Е.С</i> МОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ С ПЕРСПЕКТИВНЫМИ ДВИЖИТЕ- ЛЯМИ: МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ПРИМЕ- НЕНИЕ	107
РАЗДЕЛ 2. ПРИМЕНЕНИЕ И УСТРОЙСТВО РОБОТОВ	112
<i>Анцев Г.В.</i> РАЗВИТИЕ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ВЕРТОЛЁТНОГО ТИПА ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗАДАЧ В УНИФИЦИ- РОВАННЫХ УСЛОВИЯХ УПРАВЛЕНИЯ	113
<i>Бельченко Ф.М., Ермолов И.Л., Нагайцев Г.Н., Суханов А.Н., Остриков П.П.</i> АЛГОРИТМЫ НАДВОДНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ПОИСКА ПРО- МЫСЛОВЫХ РЫБ	115
<i>Бирин Д.А., Мещеряков Р.В., Туровский Я.А</i> ТРЕБОВАНИЯ К РТК ПРИ УПРАВЛЕНИИ ОПЕРАТОРОМ ГРУППОЙ РТК	118
<i>Ветлицын М.Ю., Шаронов Н.Г.</i> ПРОБЛЕМА ОЧУВСТВЛЕНИЯ ЭЛАСТИЧНЫХ ПАЛЬ- ЦЕВ АДАПТИВНЫХ ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ	123
<i>Годжаев З.А., Соколов С.М., Сенькевич С.Е., Судаков В.А.</i> ГРУППОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНОЛО- ГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА	126
<i>Грузликов А.М.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ В АУДИОДАННЫХ	130

- Казakov Ю.Н., Нгуен Тхай Ха, Лю Ифань, Ло Юань,
Савин Л.А.*
РАДИАЛЬНООСЕВЫЕ И УПРУГОДЕМПФЕРНЫЕ ОПОРЫ
РОТОРОВ С АКТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ 133
- Колпащиков Д.Ю., Гергет О.М.*
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО РО-
БОТА 136
- Коноплин А.Ю.*
ПОДХОД К УВЕЛИЧЕНИЮ СТЕПЕНИ АВТОНОМНОСТИ
ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПОД-
ВОДНЫМИ РОБОТАМИ 139
- Родионов О.А., Малолетов А.В.*
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ДЕМОНСТРАТОРА БОРТО-
ВОГО АППАРАТНОПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА БЕС-
ПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ 142
- Ронжин А.Л., Дашевский В.П., Крестовников К.Д.*
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНЫХ ДРОНОВ С НАЗЕМ-
НЫМИ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ СРЕДСТВАМИ 145
- Хисамутдинов М.В., Каляев А.И.*
СОЗДАНИЕ МАЛОГАБАРИТНОЙ АВТОНОМНОЙ
САМОХОДНОЙ СИСТЕМЫ ПОИСКА ОБЪЕКТОВ С
ПРИМЕНЕНИЕМ ПОВОРОТНОЙ ВИДЕОСИСТЕМЫ С
БОРТОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ДАННЫХ 148
- Шалюхин К.А., Мельников И.К., Филиппов Г.С.,
Чернецов Р.А.*
ТЕЛЕМАНИПУЛЯТОР С КИНЕМАТИЧЕСКИМ ПОДОБИЕМ
ДЛЯ МИКРОХИРУРГИИ 155
- Ющенко А.С.*
ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РОБОТОТЕХНИКЕ –
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ 158

<i>Ющенко А.С.</i> ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНЫХ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ СИСТЕМ	161
РАЗДЕЛ 3. УПРАВЛЕНИЕ И НАВИГАЦИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ И МЕХАТРОНИКЕ	164
<i>Антипов В.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РОБАСТНОСТИ МЕТОДОВ НЕЯВНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КАРТ В ЗАДАЧЕ ОДНОВРЕМЕННОГО КАРТИРОВАНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ	165
<i>Берлин Л.М., Галяев А.А., Лысенко П.В.</i> ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО ПО ВРЕМЕНИ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ НЕСИНХРОННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ	168
<i>Берлин Л.М., Галяев А.А., Лысенко П.В.</i> ГИБРИДНАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ АРХИТЕКТУРА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ	171
<i>Близно М.В., Пикалёв Я.С.</i> АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИБЛИОТЕКИ SANI ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАТАХ НАРЕЗКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ДЕТЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ	174
<i>Бузиков М.Э.</i> ПРИМЕРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА	177
<i>Быков А.С., Кошман А.М., Леонард А.В., Шурыгин В.А.</i> СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ ДВУМЕРНЫХ ДАННЫХ О СРЕДЕ И ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ	180
<i>Васильев П.В., Даринцев О.В., Мунасыпов Р.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ АССОЦИАТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ	183

- Васильев П.В., Мунасыпов Р.А., Фецак С.И.**
 РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
 РОБОТОМ-СТАНКОМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНО-
 СТИ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК 186
- Вилейко И.В., Котов К.Ю.**
 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЗИЦИО-
 НИРОВАНИЯ ДЕТЕКТОРА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕ-
 НИЯ 188
- Галина С.Б., Вольф Д.А., Галин Р.Р.**
 ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДРОНОМ НА ОСНОВЕ ЭМГ-
 СИГНАЛОВ С ЗАМКНУТЫМ КОНТУРОМ ОБРАТНОЙ
 СВЯЗИ 192
- Губанков А.С., Горностаев И.В.**
 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММ-
 НОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ БПЛА РАЗЛИЧНЫХ
 ТИПОВ 195
- Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю.**
 ПРОБЛЕМЫ СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ
 И ИХ ПРЕОДОЛЕНИЕ МЕТОДОМ СИМВОЛЬНОЙ РЕГРЕС-
 СИИ 198
- Жиравок А.Н., Зуев А.В.**
 ОЦЕНИВАНИЕ ВЕЛИЧИН ДЕФЕКТОВ В ДАТЧИКАХ ЭЛЕК-
 ТРОПРИВОДОВ РОБОТОВ 200
- Зайцев И.А.**
 АППАРАТНЫЙ СИНТЕЗ ФАЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ В
 СЛЕДЯЩИХ МИМО-СИСТЕМАХ СВЯЗИ РОБОТОВ 203
- Каретников В.В. Волкова Т.А.**
 УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНЫХ И ТРАДИЦИ-
 ОННЫХ СУДОВ В ГРАНИЦАХ ТРАНСПОРТНОГО КОРИ-
 ДОРА «СЕВЕР-ЮГ» 208
- Кожин М.А., Филимонов Н.Б.**
 МУЛЬТИАГЕНТНОЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ-
 РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРЕПЯТСТВИЯМИ ГРУППОЙ МО-
 БИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СРЕДЕ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРЕ-
 ПЯТСТВИЯМИ 211

Котов К.Ю., Потатуркин О.И., Ходатович Е.В. НЕЛИНЕЙНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ КВАДРОРОТОРНОГО АППАРАТА	214
Кошман А.М., Быков А.С, Леонард А.В., Шурыгин В.А. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ $VC/ARF+VC_r^1$ ПРИ НАЛИЧИИ ДВУХ СТАТИЧНЫХ ПРЕПЯТ- СТВИЙ	218
Кулешов С.В., Зайцева А.А., Аксенов А.Ю. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ UWB INDOOR-НАВИГАЦИИ С СИ- СТЕМОЙ ВИДЕОМОНИТОРИНГА ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕК- ТОВ	222
Лаговский Б.А., Рубинович Е.Я. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГАР- МОНИЧЕСКОГО РАДАРА	225
Майер А.М. ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЕРЕХВАТА	229
Мартынова Л.А. ВЫБОР ВРЕМЕНИ ОБСЕРВАЦИИ АНПА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ПО СИГНАЛАМ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОН- НЫХ СИСТЕМ	232
Носков В.П., Курьянов А.Н. НАВИГАЦИЯ ПО ПЛОСКИМ ДЕСКРИПТОРАМ В УСЛО- ВИЯХ ИНДУСТРИАЛЬНО-ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ	235
Носков В.П., Гойдин О.П., Вазаев А.В. СОВМЕСТНАЯ ВИДЕОНАВИГАЦИЯ РОБОТОВ ВОЗДУШ- НОГО И НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ	238
Потапов А.П., Галяев А.А. О ЗАДАЧЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ АЛГОРИТМУ НАВЕДЕ- НИЯ В ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЕ	241
Прокопов А.С., Брискин Е.С. ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ МНОГОСЕКЦИОННЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С МЕЖСЕКЦИОННЫМИ АКТУА-	

ТОРАМИ И РЕГУЛИРУЕМЫМИ ТОРМОЗНЫМИ СТОЙКАМИ	244
<i>Решмин С.А., Бектыбаева М.Т.</i> АСИМПТОТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАКОНА ЛИНЕЙНОГО ТАНГЕНСА В СЛУЧАЕ БОЛЬШОЙ ТЯГИ	247
<i>Смирнов А.В, Пономарев А.В, Шилов Н.Г., Левашова Т.В.</i> ДИНАМИЧЕСКОЕ КОНФИГУРИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЭРГАТИЧЕСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ПРИНЦИПЫ И КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ	252
<i>Соколов С.М., Богуславский А.А.</i> СОГЛАСОВАННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАДИЦИОННЫХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБРАБОТКЕ ЗРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ В БОРТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ	255
<i>Старостин И.Е., Халютин С.П.</i> ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННОЕ МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	259
<i>Степанов О.А., Исаев А.М, Васильев В.А., Торопов А.Б.</i> МЕТОДЫ МОНТЕ-КАРЛО ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	262
<i>Степанов О.А. Исаев А.М, Васильев В.А.</i> РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАНИЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ О ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ	265
<i>Степочкин А.О., Становов А.В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПОМОЩИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОЙ МОДЕЛИ	268
<i>Устенко В.Ю., Павленко Б.В.</i> СРАВНЕНИЕ СТРАТЕГИЙ МОЗАИЧНОЙ АУГМЕНТАЦИИ	

ДЛЯ ОЦЕНКИ УГЛА КРЕНА БЕСПИЛОТНИКА ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ С КАМЕРЫ	271
Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Проценко А.А., Горностаев И.В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ СИНТЕЗА САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ И МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ	274
Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Проценко А.А., Горностаев И.В. МЕТОД СИНТЕЗА САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	277
Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Зуев А.В., Тимошенко А.А., Горностаев И.В. МЕТОД СИНТЕЗА РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ВЫСОКОТОЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЮ АВТОНОМНЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ	281
Феофилов Д.С. ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	284
Фомин И.С., Корсаков А.М. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ НАБОРА ОРИЕНТИРОВ К ИЗМЕНЕНИЯМ ПОЛОЖЕНИЯ И ОРИЕНТАЦИИ КАМЕРЫ	287
Шмалько Е.Ю., Прокопьев И.В., Дивеев А.И. МЕТОД НЕЙРОСЕТЕВОГО ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО СИНТЕЗА МОДЕЛИ В НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИИ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ	290
Юрманов А.П., Коноплин А.Ю., Василенко Р.П. МЕТОД ГИБРИДНОГО УПРАВЛЕНИЯ АНПА, ОСНАЩЕННЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ КАНАЛАМИ СВЯЗИ	292

ВВЕДЕНИЕ

Том 1 материалов XVIII мультikonференции по проблемам управления МКПУ-2025 представляет доклады локальной научно-технической конференции «Робототехника и мехатроника» (РиМ-2025).

Одним из приоритетных направлений фундаментальных исследований по робототехнике и мехатронике, запланированных для обсуждения на локальной конференции РиМ-2025, является повышение эффективности применения робототехнических и мехатронных систем. В рамках этого приоритета на конференции будут рассмотрены следующие проблемы и задачи управления робототехническими и мехатронными комплексами:

- Кинематика и динамика роботов и мехатронных систем
- Средства очувствления и навигации роботов
- Алгоритмы и системы управления роботов и мехатронных систем
- Планирование поведения роботов в недетерминированных средах
- Групповое управление роботами
- Беспилотные наземные робототехнические средства
- Применение роботов в промышленности
- Морская робототехника
- Беспилотные летательные аппараты
- Роботизация в сельскохозяйственном производстве
- Взаимодействие человека и роботов, коллаборативные роботы
- Роботы в медицине, биотехнологии
- Прикладные аспекты проектирования и применения роботов и мехатронных систем

Доклады, представленные на локальную конференцию РиМ-2025, сгруппированы по трем разделам:

1. Кинематика и динамика роботов;
2. Управление и навигация в робототехнике и мехатронике;
3. Применение и устройство роботов.

Также в рамках локальной конференции РиМ-2025 запланировано проведение выездного заседания Научного совета по робототехнике и мехатронике РАН совместно с Научным советом по машиностроению РАН и Научным советом по метрологическому обеспечению и стандартизации РАН.

Важной особенностью данной конференции является участие в ней представителей академической науки, вузов, отраслевых разработчиков и производителей роботов, а также органов исполнительной власти, имеющих отношение к развитию отечественной робототехники.

Программный комитет РиМ-2025.

РАЗДЕЛ 1
КИНЕМАТИКА
И ДИНАМИКА РОБОТОВ

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ С АДДИТИВНЫМИ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЯМИ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

*АНО ВО «Университет Иннополис», г. Иннополис,
a.andronova@innopolis.university*

Введение

В последние десятилетия разработка шагающих роботов занимает большую часть исследований мобильных роботов [1]. Преимущества шагающих роботов включают в себя: возможность передвижения на сложной местности; возможность адаптации походки и высокая эффективность передвижения [2]. Управление шагающими роботами может быть затруднительным из-за недостаточной информации о динамике тела во время ходьбы, а также из-за ограничений, возникающих при контакте с поверхностью [3; 4].

При описании моделей реальных роботов необходимо учитывать неопределённости, которые могут возникать из-за изменений окружающей среды, шум и задержки информации у датчиков, сложной механической конструкции робота и др. Разработка робастного управления шагающими роботами была рассмотрена с разных сторон [5; 6], и оптимальное робастное управление с помощью линейных матричных неравенств является одним из преобладающих методов благодаря гарантии устойчивости [7].

В последнее время оптимизационные методы управления и построения траекторий для шагающих роботов вызывают большой интерес у исследователей [8]. Значительное разнообразие оптимизационных методов и программного обеспечения для решения задач выпуклой оптимизации позволяют эффективно решать предложенные задачи полуопределённого программирования, выраженного с помощью линейных матричных неравенств [9]. Наблюдатели в законах оптимального робастного управления используются для оценки состояния системы [10].

В данной работе был разработан метод автоматического синтеза регулятора с динамической обратной связью, снимая ограничения на структуру наблюдателя состояния.

Численный метод нахождения оптимального робастного управления для системы с аддитивными неопределёнными и динамической обратной связью

Рассмотрим следующую систему:

$$\begin{cases} \dot{z} = A_N z + A_r \zeta + Bu, \\ y = C N z + C R \zeta, \end{cases} \quad (1)$$

где матрицы A_N , B и C являются матрицами состояния, управления и наблюдения соответственно. z – координаты состояния, изменяющиеся со временем, а ζ – статичные, матрицы N и R -- ортонормированные базисы в подпространстве нулей и подпространстве строк матрицы ограничений. Матрица A_r отвечает за статическую часть матрицы. Такая система получается в результате применения ортогональной декомпозиции, следуя [11].

Рассмотрим следующий закон управления с динамической обратной связью:

$$\begin{cases} \dot{z}_K = A_K z_K + B_K u, \\ u = C_K z_K + D_K y. \end{cases} \quad (2)$$

Мы можем переписать предыдущие системы уравнений как:

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{z}_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_N & 0 \\ 0 & A_K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ z_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & B_K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_R \\ 0 \end{bmatrix} \zeta, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} I & -D_K \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C_K \\ C_N & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ z_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_R \end{bmatrix} \zeta, \quad (4)$$

где матрица $\begin{bmatrix} I & -D_K \\ 0 & I \end{bmatrix}$ должна быть невырожденной, и данная матрица всегда будет невырожденной, следуя:

$$\begin{bmatrix} I & -D_K \\ 0 & I \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} I - I \cdot D_K(I + 0 \cdot I \cdot D_K)^{-1} \cdot 0 \cdot I & I \cdot D_K(I + 0 \cdot I \cdot D_K)^{-1} \\ -(I - 0 \cdot I \cdot D_K)^{-1} \cdot 0 \cdot I & I + (0 \cdot I \cdot D_K)^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & D_K \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (5)$$

Подставим уравнение (4) в (3) и упростим:

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{z}_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_N + B D_K C_N & B C_K \\ B_K C_N & A_K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ z_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_R + B D_K C_R \\ B_K C_R \end{bmatrix} \zeta. \quad (6)$$

Система (6) асимптотически устойчива, если существуют положительно определённые матрицы $Q_1 > 0$, $P_1 > 0$, матрицы \hat{A}_K , \hat{B}_K , \hat{C}_K и D_K и положительный скаляр $\alpha > 0$ такие, что выполняется следующие линейные матричные неравенства:

$$\begin{bmatrix} \Theta_1 & A_N + \hat{A}_K^T + BD_K CN & A_R + BD_K CR \\ \dots & \Theta_2 & P_1 A_R + P_1 BD_K CR + P_1 B_K CR \\ \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \alpha I \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} Q_1 & I \\ I & P_1 \end{bmatrix} > 0, \quad (8)$$

где

$$\Theta_1 = A_N Q_1 + Q_1 A_N^T + B \hat{C}_K + \hat{C}_K^T B^T, \quad (9)$$

$$\Theta_2 = P_1 A_N + A_N^T P_1 + \hat{B}_K CN + N^T C^T \hat{B}_K^T. \quad (10)$$

И коэффициенты регулятора находятся следующим образом:

$$P_2 = (I - P_1 Q_1) Q_2^{-T}, \quad (11)$$

$$C_K = (\hat{C}_K - D_K CN Q_1) Q_2^{-T}, \quad (12)$$

$$B_K = P_2^{-1} (\hat{B}_K - P_1 BD_K), \quad (13)$$

$$A_K = P_2^{-1} (\hat{A}_K - P_1 (A_N + BD_K CN) Q_1 - P_2 B_K CN Q_1 - P_1 B C_K Q_2^T) Q_2^{-T}. \quad (14)$$

Для формулировки оптимизационной задачи целевая функция формулируется как сумма следов переменных. Оптимизационная задача будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \min_{Q_1, P_1, \hat{A}_K, \hat{B}_K, \hat{C}_K, D_K, \alpha} \quad & tr(Q_1^T Q_1) + tr(P_1^T P_1) + tr(\hat{A}_K^T \hat{A}_K) + tr(\hat{B}_K^T \hat{B}_K) + \\ & + tr(\hat{C}_K^T \hat{C}_K) + tr(D_K^T D_K), \end{aligned} \quad (15)$$

при ограничениях условия (7), (8).

где $tr()$ – след матрицы.

Задача (15) является задачей оптимизации с переменными матрицам $Q_1, P_1, \hat{A}_K, \hat{B}_K, \hat{C}_K, D_K$ и скаляром α . Для вычисления значений переменных данной задачи используется решатель выпуклой оптимизации.

В данной работе численные эксперименты выполнены на примере модели робота Unitree A1. Робот описывается в одном вертикальном и в одном горизонтальном измерении (плоская модель), следуя [12]. Данная модель объединяет ноги в пары: две одинаковые координаты для передних ног и две для задних. Модель робота линеаризуется вокруг координат, следуя [13].

На рисунке 1 показана зависимость значения целевой функции от параметра α .

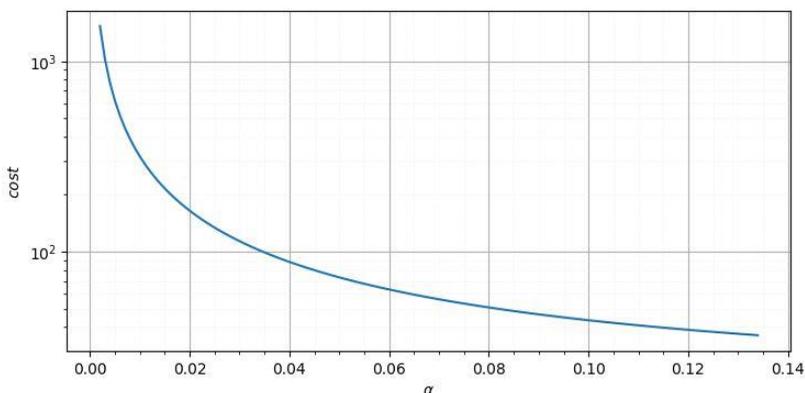


Рис. 1. Целевая функция для задачи оптимального управления (15), решённой для плоского четвероногого робота, построенная относительно параметра α ; вертикальная ось масштабирована логарифмически, обе оси без единиц

На графике можно увидеть, что данная оптимизационная проблема имеет решения, и существует оптимальное значение параметра, при котором существует минимальное значение целевой функции.

Заключение

Таким образом, нами представлен численный метод для нахождения оптимального робастного управления для систем с аддитивными неопределённостями и динамической обратной связью. В работе приведен численный эксперимент, подтверждающий верность разработанного метода. Использование линейных матричных неравенств для решения задач оптимального управления может расширить границы применения робастного управления для моделей, описывающих динамику шагающих роботов.

1. **Silva, M.** A literature review on the optimization of legged robots / M. Silva, J. Tenreiro Machado // *Journal of Vibration and Control*. – 2012. – № 18. – С. 1753–1767.
2. **Zhong, Y.** Analysis and research of quadruped robot's legs: A comprehensive review / Y. Zhong, W. Runxiao, F. Huashan, Y. Chen // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. — 2019. — № 3.
3. **Sergiu, B.** An approach to walking robots planning and control / B. Sergiu, Cononovici, A. Curaj // *Proceedings of the Romanian Academy Series A – Mathematics Physics Technical Sciences Information Science*.

- 2010.
4. **Katayama, S.** Whole-body model predictive control with rigid contacts via online switching time optimization / S. Katayama, T. Ohtsuka // 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). — IEEE. 2022. — С. 8858—8865.
 5. **Cheng, S.** Robust stability and stabilization for descriptor systems with uncertainties in all matrices / S. Cheng, Q. Zhang // International Journal of Robust and Nonlinear Control. — 2018. — № 3. — С. 753—766.
 6. **Furieri, L.** Robust control of constrained systems given an information structure / L. Furieri, M. Kamgarpour //. — 12.2017. — С. 3481—3486.
 7. **F. Amato, M.A.** Robust finite-time stabilisation of uncertain linear systems / M.A.F. Amato, C. Cosentino // International Journal of Control. — 2011. — № 12. — С. 2117—2127.
 8. **Boyd, S.** Convex Optimization /S. Boyd, L. Vandenberghe. — Cambridge University Press, 2004.
 9. **Gritli, H.** On LMI conditions to design robust static output feedback controller for continuous-time linear systems subject to norm-bounded uncertainties/ H. Gritli, A. Zemouche, S. Belghith // International Journal of Systems Science. — 2021. — № 1. — С. 12–46.
 10. **Раецкая, Е.В.** Построение управления для получения заданного выхода в системе наблюдения / Е.В.Раецкая, С.П.Зубова// Вестник российских университетов. Математика. — 2015. — № 5.
 11. **Mistry, M.** Inverse Dynamics Control of Floating Base Systems Using Orthogonal Decomposition / M. Mistry, J. Buchli, S. Schaal, A. // IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2010.
 12. **Li, H.** Model Hierarchy Predictive Control of Robotic Systems. / H. Li, R. Frei, P. Wensing // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2021.
 13. **Savin, S.** State Observer for Linear Systems with Explicit Constraints: Orthogonal Decomposition Method/ S.Savin, O. Balakhnov, R. Khusainov, A. Klimchik // Sensors. — 2024. — № 21.

О ВЛИЯНИИ ПОХОДКИ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА*

*ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет», г. Волгоград,
ksartemevv@gmail.com*

Введение

При исследовании и проектировании транспортных машин, движителями в которых являются шагающие механизмы, одной из задач является обеспечение оптимального соотношения между силой тяги и силой сопротивления движению [1,2]. Эти силы определяют не только энергоэффективность системы, но и ее устойчивость, плавность хода, способность преодолевать препятствия и др.

Постановка задачи

Отличительной чертой шагающих движителей от традиционных, таких как гусеничные или колесные, является дискретное взаимодействие с опорной поверхностью, обладающей различными физико-механическими и геометрическими характеристиками. При таком виде движения мобильного робота одними из характерных параметров являются походка (расписание перехода движителей из фазы контакта в фазу переноса) и их расположение относительно корпуса.

Таким образом, ставится задача оценки влияния походки шагающего робота и конструктивного расположения движителей относительно его корпуса на реализующиеся силу тяги и силу сопротивления движению, способ количественного определения которых известен [2,3].

Для оценки влияния исследуемых параметров рассматривается несколько известных походок [4,5], в частности попарно-параллельная, последовательная бортовая походка и последовательная походка, расписание движения которой для робота с шестью ногами представлено на графике (рис. 1).

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>

Также для каждой из рассматриваемых походок предполагается возможность изменения точки закрепления движителей относительно корпуса мобильного робота в некотором диапазоне от базового положения, для моделирования движения при различном конструктивном расположении движителей.

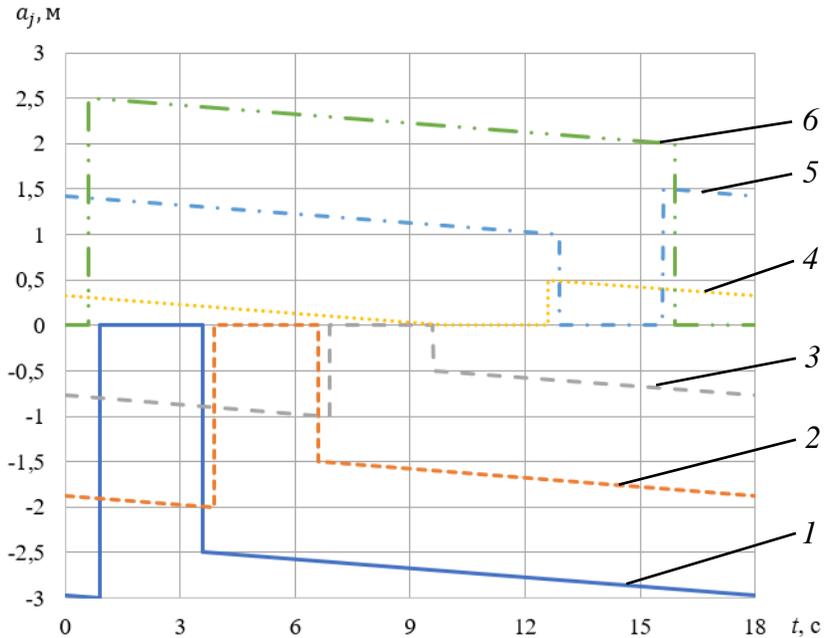


Рис. 1. Диаграмма перемещения движителей относительно корпуса робота при последовательной походке.
1, 2, 3, 4, 5, 6 – номера движителей

Сформулирована гипотеза о зависимости силы тяги и силы сопротивления движению от среднеквадратичного отклонения σ нормальных реакций от среднего значения \overline{P}_j .

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^N \left(\frac{P_j - \overline{P}_j}{P_j} \right)^2}, \quad (1)$$

где N – количество движителей

Введенный показатель подтверждает гипотезу с точностью до 10 %.

Представленный подход позволяет сравнить различное расположение шагающих движителей на корпусе, типы походок шагающего робота для поиска оптимального решения в зависимости от задач.

Установлено, что с ростом введенного показателя линейно возрастают сила сопротивления движению и сила тяги.

1. **Брискин, Е.С.** Тяговая динамика шагающих машин с ортогональными движителями / Е.С. Брискин, В.М. Соболев // Проблемы машиностроения. № 3. – М., 1990. – С.28–34.
2. **Игнатьев, М. Б.** Алгоритмы управления роботами-манипуляторами / М. Б. Игнатьев, Ф. М. Кулаков, А. М. Покровский. – М.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1972. – 248 с.
3. **Брискин, Е. С.** Об общей динамике и повороте шагающих машин / Е. С. Брискин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1997. – № 6. – С. 33–39.
4. **Охоцимский, Д.Е.** Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата / Д.Е. Охоцимский, Ю.Ф. Голубев – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 312 с.
5. **Бессонов, А.П.** К вопросу о систематике походок шагающих машин / А.П. Бессонов, Н.В. Умнов // Машиноведение. – 1975. – № 6. – С. 23

Е.В. Балакина, Е.С. Брискин

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНОЙ СВОБОДНОГО РАДИУСА КОЛЕСА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ РАВНОМЕРНОМ КАЧЕНИИ ПО НЕДЕФОРМИРУЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ *

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, fahrgestell2011@yandex.ru

Постановка задачи

Задача о качении деформируемого или недеформируемого колеса

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>

транспортного средства (ТС) по недеформируемой поверхности рассматривалась неоднократно разными авторами. Изучалось явление горизонтально-угловых колебаний управляемых колес [1-3]. Известны математические модели ТС, в которых вводятся неголономные связи, накладываемые на движение колес [4,5]. Существуют модели силового взаимодействия колес с опорной поверхностью, в том числе особое внимание уделяется силам трения и влиянию проскальзывания в пятне контакта на движение колеса [6-10]. Рассматривались колеса круглой, эллипсоидной и произвольной формы [9-12]. Известны устройства, которые в процессе движения могут изменять радиус колеса [13-16]. Этот процесс рассматривается как средство для улучшения некоторых эксплуатационных свойств ТС: устойчивости движения, тормозной динамики, проходимости. Как правило, в работах, связанных с непостоянством радиуса, подразумевается его дискретное изменение [17]. Необходимость осуществления непрерывного изменения радиуса объясняется возможностью улучшения энергетических показателей ТС по сравнению со случаем дискретного изменения. В основе этого улучшения – отсутствие многократных остановок и разгонов машины с целью изменения радиуса опорных колес, например, за счет увеличения или уменьшения давления в шинах или другими известными способами.

Так, если ТС массой m_a движется со скоростью v_a , а для преодоления препятствия заданной высоты необходимо увеличить радиус его колес на величину z , то необходимо совершить работу A . В отсутствие остановки при сохранении скорости движения $A = m_a g z$. С остановкой и последующим разгоном до той же скорости эта работа увеличивается до $A = m_a g z + m_a v_a^2 / 2$.

Целью исследования было установление закономерностей равномерного движения колеса, в процессе которого происходит изменение его свободного радиуса при минимизации тепловых потерь в исполнительном приводе.

Методы и подходы

Деформированное колесо ТС имеет следующие виды расчетных радиусов: свободный r_0 , статический r_{st} , динамический r_d , качения r_r и его разновидности. В данном исследовании введено обобщенное обозначение радиуса колеса r . Колесо принято условно жестким, поэтому $r \approx r_0 \approx r_r \approx r_{st} \approx r_d$. При этом его радиус непрерывно изменяется от своего начального значения r_0 до конечного значения R и $r = f(t)$, т.е.

$$r = r_0 + z,$$

где z – приращение радиуса ($z = f(t)$).

Условно принято, что центр масс колеса, имеющего геометрическую форму круга, совпадает с его геометрическим центром, через который проходит ось вращения. В начальный момент времени колесо имеет радиус $r = r_0$ и момент инерции J_0 относительно оси вращения, зависящий от этого радиуса, т.е. $J_0 = J(r_0)$. При изменении радиуса колеса r изменяется и его момент инерции в соответствии с конструктивными особенностями.

Ставилась задача определения закона изменения радиуса r колеса, обеспечивающего минимальные тепловые потери в механизме изменения радиуса, если за время τ ось его вращения, двигаясь с постоянной продольной скоростью v_x вдоль оси x , перемещается вертикально вдоль оси z на конечную величину $z = R - r_0$. Расчетная схема представлена на рис. 1.

Уравнения Лагранжа составлены с учетом неголономной связи $v_x = \omega(r_0 + z)$, накладываемой на движение колеса:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial E}{\partial q_j} = \frac{\delta A}{\delta q_j} + \lambda B_j \quad (j = 1, 2, 3),$$

где q_j – обобщенные координаты x, z, φ ; B_j – функции, стоящие перед обобщенными скоростями ($B_1 = 1; B_2 = 0; B_3 = -(r_0 + z)$); λ – неопределенный множитель Лагранжа.

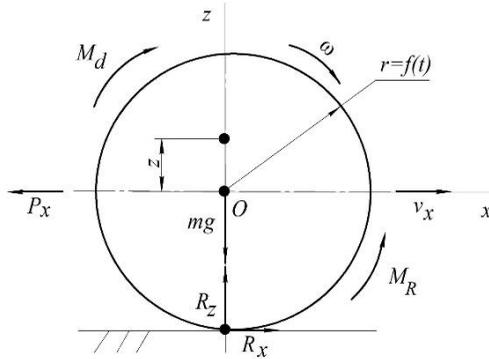


Рис. 1. Расчетная схема

Получено искомое решение в форме:

$$z = C_1 \cos(kt) + C_2 \sin(kt) + C_3 t \cos(kt) + C_4 t \sin(kt) + \frac{d}{e};$$

$$\dot{z} = -C_1 k \sin(kt) + C_2 k \cos(kt) + C_3 \cos(kt) - C_3 k t \sin(kt) + C_4 \sin(kt) + C_4 k t \cos(kt),$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – произвольные постоянные, определяемые из граничных условий.

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = -\frac{d}{e}; \quad C_2 = \frac{R - r_0 + \frac{d}{e} [\cos(k\tau) + \chi - 1]}{\sin(k\tau) - k\tau \cos(k\tau) - \chi k\tau}; \\ C_3 = -C_2 k; \quad C_4 = \frac{\chi}{\tau \sin(k\tau)} \left(-\frac{d}{e} - C_2 k\tau \right); \\ k = \sqrt{\frac{\alpha v_x^2}{m r_0^3}}; \quad d = \frac{\alpha^2 v_x^4}{2 r_0^5}; \quad e = \frac{\alpha^2 v_x^4}{r_0^6}; \\ \chi = \frac{k\tau \sin^2(k\tau)}{\sin(k\tau) + k\tau \cos(k\tau)}. \end{array} \right.$$

Анализ полученного решения показывает, что на оптимальный режим работы привода изменения радиуса колеса до заданного значения по критерию минимума тепловых потерь в приводе изменения радиуса колеса оказывают влияние следующие параметры: масса колеса m , продольная скорость его центра v_x , время τ изменения радиуса и параметр α , характеризующий изменение момента инерции колеса при изменении его радиуса. Полученные для разных колес кривые $z = f(t)$ имеют вид, показанный на рис.2.

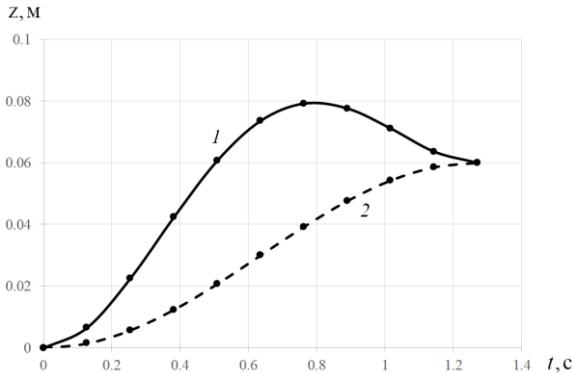


Рис. 2. Результаты расчета $z = f(t)$ при управлении:
1 – оптимальном; 2 – произвольном

Полученные при разных условиях кривые $z = f(t)$ характеризуются наличием экстремума, приблизительно на 25 % превышающего по

величине конечное значение этого параметра.

Заключение

Предложена математическая модель, описывающая динамику равномерного плоскопараллельного движения жесткого колеса с непрерывно изменяемым свободным радиусом по плоской горизонтальной недеформируемой опорной поверхности. В ее основе лежит гипотеза об отсутствии проскальзывания в контакте колеса с опорной плоскостью. Полученные математические зависимости позволяют определять оптимальный режим управления изменением радиуса по критерию минимума тепловых потерь в приводе, обеспечивающем это изменение. Анализ расчетов, проведенных при разных условиях, показал полученную эффективность применения оптимального закона управления 36 % по сравнению с выбранным произвольным управлением, а также отсутствие влияния на эту эффективность конструктивных параметров колеса (масса, момент инерции, радиус, приращение радиуса) и скорости поступательного движения его оси вращения. При этом кривые $z = f(t)$ характеризуются наличием экстремума, приблизительно на 25 % превышающего по величине конечное значение этого параметра.

1. **Келдыш, М.В.** Шимми переднего колеса трехколесного шасси: Избранные труды. Механика. – М.: Наука, 1985. – С. 491-530.
2. **Кручинин, П.А.** Математическая модель автомобильного колеса на антиблокировочных режимах движения / П.А. Кручинин, М.Х. Магомедов, И.В. Новожилов // Известия РАН. МТТ. – 2001. – №6. – С. 63-69.
3. **Журавлев, В.Ф.** Теория явления шимми / В.Ф. Журавлев, Д.М. Климов // Известия РАН. МТТ. – 2010. – №3. – С. 22-29.
4. **Добронравов, В.В.** Основы механики неголономных систем. – М.: Высшая школа, 1970. – 271 с.
5. **Ларин, В.В.** Теория движения полноприводных колесных машин: Учебник для вузов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 396 с.
6. **Журавлев, В.Ф.** Закономерности трения при комбинации скольжения и верчения / В.Ф. Журавлев // Известия РАН. МТТ. – 2003. – №4. – С. 81-89.
7. **Карапетян, А.В.** О движении трехколесного робота при наличии проскальзывания ведущих колес / А.В. Карапетян, К.А. Катасонова // Прикладная математика и механика. – 2019. – Т. 83. – № 4. – С. 608-614.
8. **Балакина, Е.В.** Расчёт коэффициента сцепления устойчивого эластичного колеса с твёрдой опорной поверхностью при наличии боковой силы / Е.В. Балакина // Трение и износ. – 2019. – Т. 40. – № 6. – С. 756-765.
9. **Балакина, Е.В.** Универсальные зависимости параметров фрикционного взаимодействия в опорном контакте упругого колеса / Е.В. Балакина // Трение и износ. – 2023. – Т. 44. – № 2. – С. 122-134.

10. Pacejka, H.V. Tire and Vehicle Dynamics. – USA: Published by Elsevier Ltd, 2012. – 672 p.
11. **Павлов, А.Е.** Плоскопараллельное качение эллипсоида по плоскости и цилиндру / А.Е. Павлов // Проблемы механики и управления. Нелинейные динамические системы: сб.тр. – №36. – Ижевск, 2004. – С. 94-118.
12. **Мартыненко, Ю.Г.** О движении мобильного робота с роликонесущими колесами / Ю.Г. Мартыненко, А.М. Формальский // Известия РАН. ТИСУ. – 2007. – № 6. – С. 142-149.
13. **Патент SU 929467.** МПК В60В 19/00. Ищеин В.К., Лапотко О.П., Бойков В.П. Колесо с изменяемым диаметром, 1982.
14. **П. м. 153154 РФ.** МПК А61G5/00. Брискин Е.С., Фоменко С.С., Шаронов Н.Г., Серов В.А. Транспортное средство для инвалидов, 2015.
15. **П. м. 180692 РФ.** МПК В60В3/00, В60В15/00, В60В23/12. Сердобинцев Ю.П., Иванюк А.К., Карлов В.И. Адаптивное колесо с раздвижным ободом, 2018.
16. **А. с. 439414 СССР.** МПК В60В3/02, В60В23/12. Вахрамеев Л.П., Карлов В.И., Матлин М.М. Колесо с раздвижным ободом, 1972.
17. **Балакина, Е.В.** Методика выбора размеров колес на разных осях автомобиля с АБС по критерию улучшения траекторной устойчивости при торможении / Е.В. Балакина, И.В. Сергиенко // Автомобильная промышленность. – 2022. – № 1. – С. 12-15.
18. **Брискин, Е.С.** Об оценке эффективности цикловых механизмов / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, А.В. Малолетов // Известия РАН. МТТ. – 2017. – № 2. – С. 13-19.

***С.О. Безусов, Е.С. Брискин,
В.А. Серов, С.А. Устинов, И.П. Вершинина***

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ПОМОЩЬЮ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ *

*ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический
университет», г. Волгоград, seleron@list.ru*

Введение

Одной из основных задач робототехники является управление роботами для переноса полезной нагрузки. В последнее время для этих целей

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20213, <https://rscf.ru/project/25-29-20213>

активно применяются одиночные мобильные роботы. Это и наземные колесные роботы-доставщики, грузовые гусеничные и шагающие роботы, беспилотные дроны [1]. Одними из ограничений применения таких роботов являются массово-габаритные характеристики переносимого груза. Для перемещения большего по весу или размерам груза необходимо увеличить тяговые характеристики мобильного робота или его габариты. Зачастую, изменение указанных характеристик в большую сторону кратно увеличивает стоимость производства мобильных роботов. В некоторых случаях, в целях безопасности на мобильные роботы законодательно накладываются ограничения по массе и габаритам.

Постановка задачи

Одним из вариантов выхода из сложившейся ситуации является применение группы роботов для переноса полезной нагрузки [2, 3]. Регулируя размер группы, можно расширить номенклатуру переносимых грузов, создать дополнительный резерв, применить методы стабилизации груза при внешних воздействиях. Серийное производство однотипных роботов позволит сократить их стоимость и снизить амортизационные затраты.

Для группового переноса полезной нагрузки применяются различные виды связей – жесткая фиксация груза неподвижными связями, различные тросовые системы [4]. Последние применяются в системах обезвешивания, позиционирования, строительных принтерах [5]. Благодаря возможности применения тросовых систем в труднодоступных местах, данное решение применяется в системах доставки грузов коммерческими БПЛА.

Рассматривается метод группового управления мобильными роботами, переносящими связанную с ними тросами полезную нагрузку.

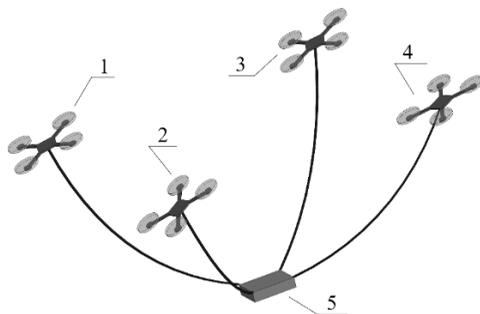


Рис. 1. Схема перемещения груза 5 группой мобильных роботов типа БПЛА 1, 2, 3, 4

Полученные результаты

Рассмотрена задача переноса груза группой из трех мобильных роботов по плоскости [6]. При задании уравнений движения переносимого груза определены оптимальные уравнения движения БПЛА. Критерий оптимальности включает два показателя: максимальное расстояние между БПЛА и минимальных тяговых усилий при известной длине тросов.

Для проведения экспериментов и отработки алгоритмов управления разработан имитатор мобильного робота, позволяющий перемещать точку крепления троса в трехмерном пространстве.

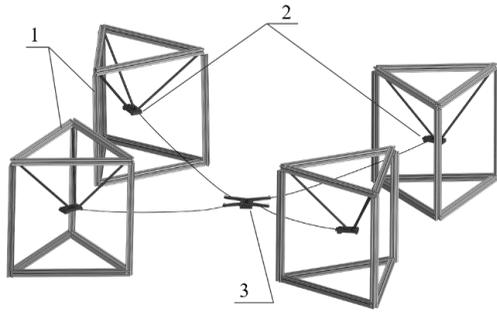


Рис. 2. Схема стенда с четырьмя имитаторами БПЛА 1, подвешенным на тросах к подвижным платформам 2 грузом 3

Лабораторный стенд позволяет отработать технические решения для реализации системы управления в условиях ограничений, наложенных на применение БПЛА.

Заключение

Проведённые исследования подтверждают возможность перемещения груза группой мобильных роботов за счёт согласованного управления их движением.

1. **De Angelis, E. L.** Stability and control issues of multirotor suspended load transportation: An analytical closed-form approach / E. L. De Angelis, F. Giulietti // *Aerospace Science and Technology*. – 2023. – Vol. 135. – P. 108201. – DOI 10.1016/j.ast.2023.108201. – EDN PAOVHI.
2. Управление движением группы сочленённых роботов в анизотропной и неоднородной среде / К. Ю. Лепетухин, Я. В. Калинин, А. В. Малолетов, Е. С. Брискин // *Материалы XII мультikonференции по*

- проблемам управления (МКПУ-2019) : Материалы XII мультиконференции. В четырех томах, Дивноморское, Геленджик, 23–28 сентября 2019 года. Том 2. – Дивноморское, Геленджик: Издательство Южного федерального университета, 2019. – С. 17-19. – EDN AYBFLQ.
3. **Su, Yu. H.** A robust adaptive formation control methodology for networked multi-UAV systems with applications to cooperative payload transportation / Yu. H. Su, P. Bhowmick, A. Lanson // Control Engineering Practice. – 2023. – Vol. 138. – P. 105608. – DOI 10.1016/j.conengprac.2023.105608. – EDN QPDZWY.
 4. **Goodman, Ja. R.** Geometric Control for Load Transportation With Quadrotor UAVs by Elastic Cables / Ja. R. Goodman, T. Beckers, L. J. Colombo // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2023. – Vol. 31, No. 6. – P. 2848-2862. – DOI 10.1109/tcst.2023.3296730. – EDN CDHNNN.
 5. Опыт разработки алгоритма управления параллельным восьмитростовым роботом / Д.Н. Нуртдинов, А.С. Михайлов, Е.А. Марчук, А.В. Малолетов // XXXV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2023): Сборник трудов конференции, Москва, 13–14 ноября 2023 года. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2023. – С. 371-377. – EDN LLZCVV.
 6. **Безусов, С.О.** Управление тросовыми движителями при перемещении груза / С.О. Безусов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2024. – № 9(292). – С. 10-14. – DOI 10.35211/1990-5297-2024-9-292-10-14. – EDN UZCRBZ.

*Ф.М. Бельченко, М.М. Князьков,
П.П. Остриков, Е.А. Семенов, А.Н. Суханов*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ*

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлунского РАН,
г. Москва, Ipt_labrobotics@mail.ru*

Объектом исследования в данной статье являлись вакуумные за-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФН в рамках научного проекта № 23-11-00067.

хватные устройства, в которых генератором вакуума выступал воздушный эжектор. Использование воздушного эжектора как генератора вакуума под контактной поверхностью вакуумного хватного устройства позволяет получать значимые нагрузочные характеристики при использовании их в воздушной среде при их использовании на роботах вертикального перемещения. Ранее были получены экспериментальные характеристики, которые выявили значительное увеличение времени создания достаточного уровня разрежения под контактной поверхностью вакуумного хватного устройства при его работе в водной среде. Для оценки скорости срабатывания в водной среде был разработан стенд, который погружался на различную глубину в бассейн (Рис. 1) и с его помощью снимались временные характеристики.

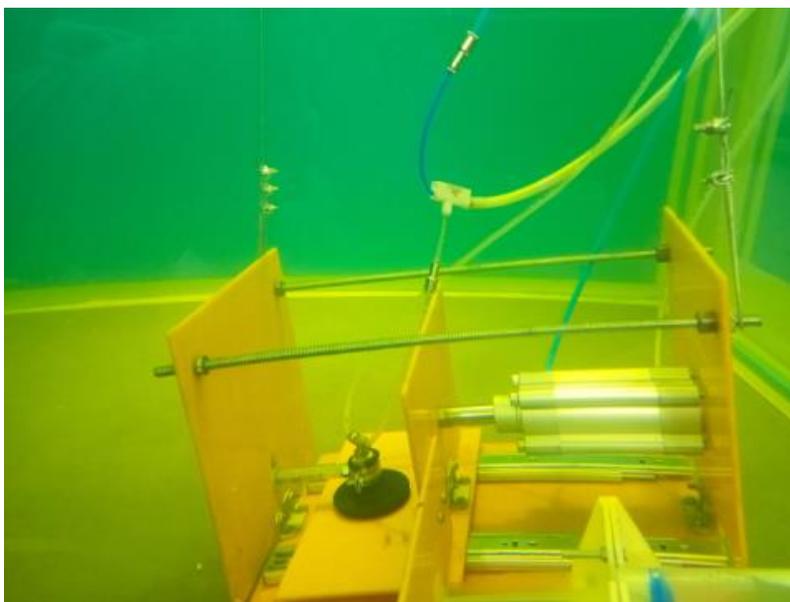


Рис. 1. Экспериментальный стенд на дне бассейна (глубина 2 м.)

Из полученных характеристик следовало, что при глубине погружения два метра, скорость создания разрежения увеличивалась в десять раз. Для оценки надежности сцепления хватного устройства под водой были проведены серии экспериментов на сдвиг при различном значении входного давления (Рис. 2).

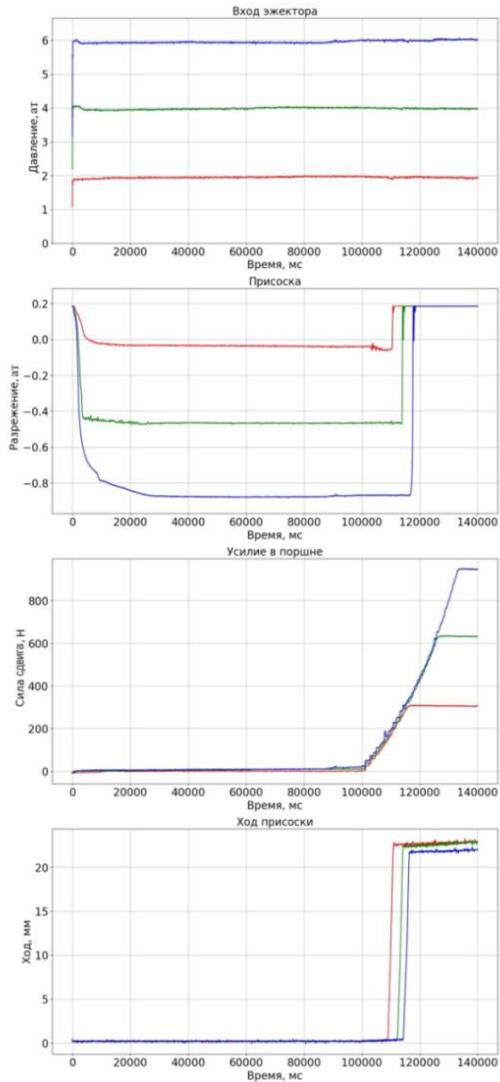


Рис. 2. Экспериментальные характеристики полученные на глубине 2 метра

Рисунок 2 содержит результаты серии экспериментов при давлении питания эжектора 2 ат (отмечено красными графиками). Разрежение в присоске в начале эксперимента было достигнуто на уровне $-0,08$ ат.

Начало сдвига присоски в водной среде при 2 ат давления питания эжектора приходится на момент, когда усилие, развиваемое пневмоприводом, составляет 237 Н. Полная потеря удерживающей связи с образцом поверхности происходит при аналогично приложенном усилии пневмопривода, равном 274 Н.

При питании эжектора в 4 ат были получены результаты, изображённых графиками зелёного цвета. Разрежение в присоске было достигнуто на уровне $-0,53$ ат. Начало сдвига присоски в водной среде при 4 ат давления питания эжектора приходится на момент, когда усилие, развиваемое пневмоприводом, составляет 296 Н. Полная потеря удерживающей связи с образцом поверхности происходит при аналогично приложенном усилии пневмопривода, равном 341 Н.

При питании эжектора в 6 ат, графики синего цвета. В этом случае разрежение в присоске было достигнуто на уровне $-0,8$ ат. Начало сдвига присоски в водной среде при 6 ат давления питания эжектора приходится на момент, когда усилие, развиваемое пневмоприводом, составляет 306 Н. Полная потеря удерживающей связи с образцом поверхности происходит при аналогично приложенном усилии пневмопривода, равном 352 Н.

Проведенные исследования позволяют понять, какие нагрузочные характеристики могут быть получены при использовании подобных захватных устройств на роботах вертикального перемещения в водной среде.

1. **Man Hyung Lee**, Yu Dark Park, Hyung Gyu Park, et. al. Hydrodynamic design of an underwater hull cleaning robot and its evaluation // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering — # 4, — p. 335-352, DOI:10.3744/JNAOE.2012.4.4.335, 2012.
2. **Houssam Albitar**, Kinan Dandan, Anani Ananiev and Ivan Kalaykov. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems // International Journal of Advanced Robotic Systems. — 2016. <https://doi.org/10.5772/62060>.
3. **И. Л. Ермолов**, М. М. Князьков, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов Исследования надежности сцепления пневматического робота вертикального перемещения с вакуумными захватными устройствами на корпусе судна // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2023. — № 4. — С. 40–45.
4. **Градецкий В.Г.**, Князьков М.М., Семёнов Е.А., Суханов А.Н. Адаптивные захватные устройства мобильных роботов с миниатюрными

- эжекторами // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2016. — Т. 17. — № 3 — С. 172-177. DOI:<https://doi.org/10.17587/mau/17.172-177>.
5. **Градецкий В.Г.**, Князьков М.М., Кравчук Л.Н., Крюкова А.А., Семенов Е.А., Суханов А.Н., Чащухин В.Г. Управляемое формирование вакуума в устройствах сцепления с поверхностями при движении мобильных роботов с аэродинамическим прижимом // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2017.—Т.18. — № 7.—С. 447-452. DOI:<https://doi.org/10.17587/mau/18.447-452>.
 6. **Ф. М. Бельченко**, М. М. Князьков, Е. А. Семенов и др. Исследования газодинамических и гидродинамических процессов в полостях и каналах вакуумных захватных устройств // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2023. — № 9. — С. 15–21.

А.А. Бобцов, О.А. Козачёк

СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ НОГИ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ*

*Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург,
oakozachek@itmo.ru*

Введение

При решении задач управления важным этапом является получение информации о состоянии систем. Для этого могут использоваться первичные измерительные преобразователи (датчики). Однако не во всех случаях полный вектор состояния возможно измерить. Более того, наличие дополнительных датчиков в системе может увеличивать её стоимость, а также снижать надёжность системы и вносить дополнительные помехи, вызванные самими датчиками. В тех случаях, когда невозможно или нецелесообразно размещать набор измерительных средств, позволяющий измерять весь вектор состояния, для оценки неизвестных переменных состояния применяются наблюдатели.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2025-0002).

Для линейных стационарных систем известно множество эффективных методов синтеза наблюдателей (см., например, [1, 2]). Однако и в этой области интерес к проблеме синтеза наблюдателей для нестационарных систем не угасает, в изданиях, посвященных анализу и синтезу систем автоматического управления, активно публикуются новые исследования. В [2] был рассмотрен синтез эллипсоидных наблюдателей и алгоритмов, позволяющих обеспечить оптимальные эллипсоидные оценки переменных состояния системы и её неизвестных параметров.

Проблема разработки наблюдателей состояния для нелинейных систем на данный момент изучена меньше, что вызвано сложностью этого класса систем и большим разнообразием математических моделей. В связи с этим в научном сообществе сохраняется интерес к развитию исследований в области синтеза наблюдателей для нелинейных систем (см., например, [3, 4]).

Наблюдатели состояния (в том числе состояния нелинейных нестационарных систем) находят применение не только при синтезе законов управления. Их использование имеет также самостоятельное значение, например, при разработке средств контроля технического состояния [5].

Существуют некоторые наиболее распространенные подходы, применяемые при построении наблюдателей. Одним из таких подходов является приведение исходной математической динамической модели системы к виду регрессионного статического уравнения (см., например, [6]) с последующей идентификацией неизвестных параметров и восстановлением неизвестного вектора состояния на основе полученных оценок.

В данной работе ставится задача разработки адаптивного наблюдателя состояния для модели роботизированной ноги, содержащей неизвестный параметр. Данная система относится к классу билинейных и описывается уравнениями Эйлера-Лагранжа [7]. Задача решена с применением описанного выше подхода, то есть путем сведения исходной модели к виду линейной регрессии.

Постановка задачи

Рассматривается математическая модель роботизированной ноги [8], представленной на рисунке 1 и описанной системой уравнений Эйлера-Лагранжа:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{q}_1 = m_1 q_1 \dot{q}_2^2 + u_1, \\ m_1 q_1^2 \ddot{q}_2 = -2m_1 q_1 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + u_2, \\ m_2 \ddot{q}_3 = u_2, \end{cases} \quad (1)$$

где q_1, q_2, q_3 – измеримые обобщенные координаты (в стандартной постановке задачи в отношении систем Эйлера-Лагранжа), m_2 – известный по-

стоянный параметр, m_1 – неизвестный постоянный параметр, u_1, u_2 – известные управляющие сигналы.

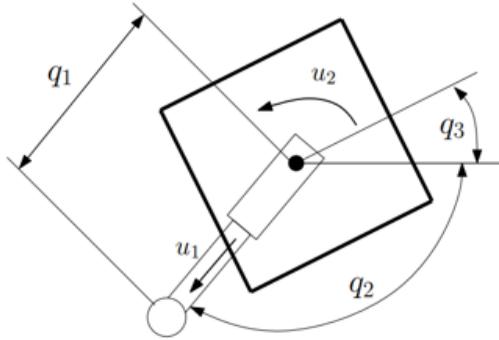


Рис. 1. Внешний вид роботизированной ноги

В работе ставится задача разработки адаптивного наблюдателя, обеспечивающего выполнение следующего целевого равенства:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\hat{q} - \dot{q}\|_2 = 0, \quad (2)$$

где \hat{q} – оценка вектора \dot{q} .

Основной результат

Задача синтеза наблюдателя будет решена с применением метода, описанного в [9]. Общая идея метода заключается в следующем.

Рассматривается нелинейная нестационарная система вида:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0 x(t) + B_0 \phi(x(t)) x(t) + B(\theta) u(t), \\ y(t) &= C^T(t) x(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^n$ – неизвестный вектор состояния, $u(t) \in \mathbb{R}$ – известный входной сигнал, $y(t) \in \mathbb{R}$ – измеряемый выходной сигнал, матрицы $A_0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ и $C^T \in \mathbb{R}^n$ являются известными и постоянными, $B(\theta) \in \mathbb{R}^n$ – вектор неизвестных параметров $\theta(t) \in \mathbb{R}^n$, $\phi(x(t)) \in \mathbb{R}$ – неизвестная функция.

Считается, что функция $\phi(x(t))$ является линейной относительно аргумента $x(t)$, а также интеграл для $\phi(x(t))$ является известным или измеряемым, то есть

$$\Phi_{int} = \int_0^t \phi(x(s), \theta_0(s)) ds - \text{известная функция.}$$

Также допускается, что матрицы системы имеют вид:

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix}, B_0 = [0_{n \times (n-1)} \quad B_I],$$

$$B(\theta) = B_1 \theta,$$

где $B_I = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ и $B_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – известная матрица.

Так как в текущей работе неизвестным считается постоянный параметр m_1 , будем рассматривать систему в предположении, что вектор неизвестных параметров $\theta(t)$ – постоянный.

В соответствии с предложенным методом вводится функция:

$$\Phi = \Lambda x, \quad (4)$$

где $\Phi \in \mathbb{R}^n$ – вектор-функция, а $\Lambda = \Lambda(t) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – некоторая матричная функция, которая будет определена далее.

Из уравнения (4) вектор состояния x может быть получен путем умножения обеих частей равенства на Λ^{-1} :

$$x = \Lambda^{-1} \Phi. \quad (5)$$

Производная Φ имеет вид:

$$\dot{\Phi} = \dot{\Lambda} x(t) + \Lambda (A_0 x(t) + B_0 \phi(x(t)) x(t) + B(\theta) u(t)). \quad (6)$$

Пусть матричная функция $\Lambda(t)$ определяется как решение дифференциального уравнения:

$$\dot{\Lambda} = -\Lambda (A_0 + B_0 \phi(x(t))). \quad (7)$$

Решением данного уравнения будет известная функция $\Lambda(y(t), t)$.

Кроме того, с учетом (7), вне зависимости от начальных условий $\Lambda(0)$, уравнение (6) примет вид:

$$\dot{\Phi} = \Lambda B(\theta) u(t). \quad (8)$$

Для (8) имеем:

$$\dot{\Phi} = \Lambda B_1 \theta u(t). \quad (9)$$

Решением уравнения (9) является функция:

$$\Phi = \Phi_0 + \left(\int_0^t \Lambda B_1 u(s) ds \right) \theta, \quad (10)$$

где Φ_0 – постоянный вектор неизвестных начальных условий вектора Φ .

Тогда, подставляя (4) в (10), получим:

$$\Lambda x = \Phi_0 + \left(\int_0^t \Lambda B_1 u(s) ds \right) \theta, \quad (11)$$

Умножив уравнение (11) на Λ^{-1} и применив линейный фильтр $\frac{\lambda}{(p+\lambda)^{n-1}}$ (где число $\lambda > 0$ и $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования) можно получить линейную регрессионную модель, содержащую неизвестные постоянные параметры Φ_0 и θ .

Для оценки параметров линейной регрессионной модели можно использовать любой удобный способ, в зависимости от ограничений, налагаемых на систему. А после получения оценок $\hat{\Phi}_0$ и $\hat{\xi}_0$ оценку вектора состояния можно найти, воспользовавшись уравнением (5).

Вернемся к исходной задаче. Запишем систему (1) в новых координатах, введя новый вектор состояния:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $x_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_i \\ \dot{q}_i \end{bmatrix}, i = \overline{1,3}$. Полученная многоканальная система описывается тремя системами уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_{11} = x_{12}, \\ \dot{x}_{12} = x_{11}x_{22}^2 + \frac{1}{m_1}u_1, \\ y_1 = C^T x_1, \end{cases} \begin{cases} \dot{x}_{21} = x_{22}, \\ \dot{x}_{22} = -2\frac{1}{x_{11}}x_{12}x_{22} + \frac{1}{m_1x_{11}^2}u_2, \\ y_2 = C^T x_2, \end{cases} \begin{cases} \dot{x}_{31} = x_{32}, \\ \dot{x}_{32} = -\frac{1}{m_2}u_2, \\ y_3 = C^T x_3. \end{cases} \quad (13)$$

где $C^T = [1 \ 0]$.

Можно заметить, что при построении наблюдателя ключевой переменной является $x_{22} = \dot{q}_2$. Другими словами, после восстановления значения $x_{22} = \dot{q}_2$ для оценки остальных неизвестных переменных состояния могут быть применены стандартные техники синтеза наблюдателей. Поэтому рассмотрим отдельно систему уравнений

$$\begin{cases} \dot{x}_{21} = x_{22}, \\ \dot{x}_{22} = -2\frac{1}{x_{11}}x_{12}x_{22} + \frac{1}{m_1x_{11}^2}u_2, \\ y_2 = x_{21}. \end{cases} \quad (14)$$

Данную систему можно также рассмотреть, как систему вида (3) со следующими параметрами:

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \phi(x(t)) = -2\frac{x_{12}}{x_{11}}, u = \frac{1}{x_{11}^2}u_2, B(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ m_1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Введем функцию Φ в соответствии с уравнение (4).

Её производная имеет вид:

$$\dot{\Phi} = \dot{\Lambda}x + \Lambda \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -2 \frac{x_{12}}{x_{11}} \end{bmatrix} + \Lambda \begin{bmatrix} 0 \\ \theta \end{bmatrix} u. \quad (16)$$

Для расчета матрицы Λ необходимо найти частное решение уравнения:

$$\dot{\Lambda} = -\Lambda \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -2 \frac{x_{12}}{x_{11}} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Тогда функция Λ может быть определена как:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & x_{11}^2 \\ 0 & x_{11}^2 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Подставив (18) в (16) можно получить уравнение:

$$\dot{\Phi} = \Lambda \begin{bmatrix} 0 \\ \theta \end{bmatrix} u = \Lambda \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \theta u. \quad (19)$$

Решение данного уравнения можно записать в виде:

$$\Phi = \Phi_0 + \theta \int_0^t \begin{bmatrix} ux_{11}^2 \\ ux_{11}^2 \end{bmatrix} d\tau. \quad (20)$$

После подстановки (4) в (20) имеем:

$$\Lambda x = \Phi_0 + \theta \int_0^t \begin{bmatrix} ux_{11}^2 \\ ux_{11}^2 \end{bmatrix} d\tau. \quad (21)$$

Для дальнейшего упрощения записи введем обозначение:

$$V = \int_0^t \begin{bmatrix} ux_{11}^2 \\ ux_{11}^2 \end{bmatrix} d\tau = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Применяя линейный фильтр вида $\frac{\lambda}{p+\lambda}$, где $\lambda > 0$, $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования, к уравнению (21), можно получить линейную регрессионную модель вида:

$$Y = \Psi^T \Theta, \quad (23)$$

где

$$\Theta = [\Phi_{01} \quad \theta \quad \Phi_{02} \quad \theta]^T,$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{p+\lambda} \begin{bmatrix} 1 \\ x_{11}^2 \end{bmatrix} & \frac{\lambda}{p+\lambda} \begin{bmatrix} V_1 \\ x_{11}^2 \end{bmatrix} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\lambda}{p+\lambda} \begin{bmatrix} 1 \\ x_{11}^2 \end{bmatrix} & \frac{\lambda}{p+\lambda} \begin{bmatrix} V_2 \\ x_{11}^2 \end{bmatrix} \end{bmatrix}^T,$$

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{\lambda p}{p+\lambda} [y_2] \\ \frac{\lambda p}{p+\lambda} [y_2] \end{bmatrix}.$$

Неизвестные параметры регрессионной модели можно оценить с

помощью градиентного алгоритма:

$$\hat{\Theta} = \gamma \Psi(Y - \Psi^T \hat{\Theta}), \quad (24)$$

где $\hat{\Theta}$ – оценка вектора неизвестных постоянных параметров, $\gamma > 0$ – коэффициент адаптации.

После нахождения постоянных неизвестных параметров можно рассчитать оценку неизвестной переменной состояния \hat{x}_{22} .

$$\hat{x}_{22} = \frac{1}{x_{11}^2} \hat{\Phi}_{01} + \hat{\theta} \frac{V_1}{x_{11}}. \quad (25)$$

Как было сказано ранее, для наблюдения переменных состояния x_{12} и x_{32} после получения оценок \hat{x}_{22} и $\hat{\theta}$ могут быть использованы классические методы построения наблюдателей. Например, обобщенный наблюдатель, основанный на оценке параметра (GREBO – generalized parameter estimation based observer) [10].

Для подтверждения работоспособности алгоритма было проведено компьютерное моделирование.

Параметры системы и входные сигналы были выбраны следующим образом:

$$m_1 = 3, m_2 = 1, u_1 = 0.01 \sin(0.7t) - 1, \\ u_2 = 0.5 \sin(0.5t) + 0.01 \sin(t) + 0.1 \sin(0.7t) + 0.1 \sin(0.1t) + 4.5.$$

Оценка переменной $x_{22} = \hat{q}_2$ найдена с помощью предложенного в статье алгоритма. На основе полученной оценки восстановлены переменные $x_{12} = \hat{q}_1$ и $x_{32} = \hat{q}_3$ с применением метода GREBO.

График евклидовой нормы вектора ошибок наблюдения \tilde{q} представлена на рисунке 1. Норма ошибки сходится к нулю, что подтверждает корректную работу наблюдателя.

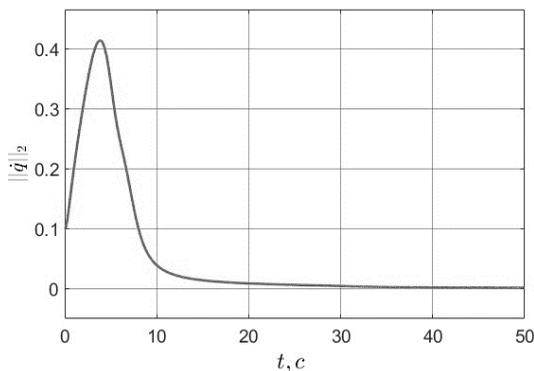


Рис. 2. График нормы ошибки наблюдения переменных состояния \dot{q}

Заключение

В работе предложен новый метод синтеза адаптивного наблюдателя переменных состояния для математической модели роботизированной ноги. Данная модель относится к классу нестационарных билинейных систем. Задача решена в предположении, что модель содержит неизвестный постоянный параметр. Работа предложенного алгоритма была проиллюстрирована с помощью компьютерного моделирования. Графики, приведенные в работе, подтверждают работоспособность алгоритма.

1. **Каленова В. И.** Линейные нестационарные системы и их приложения к задачам механики: учебное пособие / В. И. Каленова, В. М. Морозов. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 208 с.
2. **Баландин Д. В.** Управление и оценивание в линейных нестационарных системах на основе эллипсоидальных множеств достижимости/ Баландин Д. В., Коган М. М. // Автоматика и телемеханика, 2020, № 8, С. 8–28.
3. **Буй, В.** Синтез наблюдателя переменных состояния и синусоидального возмущения для линейной нестационарной системы с неизвестными параметрами / В. Буй, А. Маргун, Б. А.А. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2024. — Т. 67, № 3. — С. 209—219.
4. **Беспалов, В.** Адаптивные наблюдатели для нелинейных систем на основе процедуры динамического расширения и смешивания/ В. Беспалов, А. Ведяков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение — 2023. — Т. 66, № 10. — С. 157—166.
5. **Wang F.** Fault diagnosis of linear time-varying system based on high gain adaptive compensation sliding mode observer/ Wang F., Zong M., Chen W. // 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2017, p. 1688-1691
6. **Bobtsov A.** Adaptive state estimation of state-affine systems with unknown time-varying parameters/ Bobtsov A., Ortega R., Yi B., Nikolaev N. // International Journal of Control, 2021, p. 1-13
7. **Mark W.** Vidyasagar Robot Dynamics and control/ Mark W. Spong, M. // John Wiley & Sons, USA, 1989
8. **Bullo F.** Geometric Control of Mechanical Systems/ Bullo F., Lewis A. // Springer Science-Bussiness Media, New York, 2005
9. **Козачёк, О. А.** Синтез адаптивного наблюдателя состояния для класса нестационарных билинейных систем в условиях частичной параметрической неопределенности / О. А. Козачёк, А. Бобцов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2025. —

Т. 68, № 5. —С. 398—406.

10. **Ortega R.** Generalized parameter estimation-based observers: Application to power systems and chemical–biological reactors/ Ortega R., Bobtsov A., Nikolaev N., Schiffer J., Dochain D. // Automatica. 2021. Vol. 129. P. 109635

Н.Н. Болотник, Т.Ю. Фигурина

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ТРЕХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ТЕЛ В СРЕДЕ С КВАДРАТИЧНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ*

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва
bolotnik@ipmnet.ru, t_figurina@mail.ru*

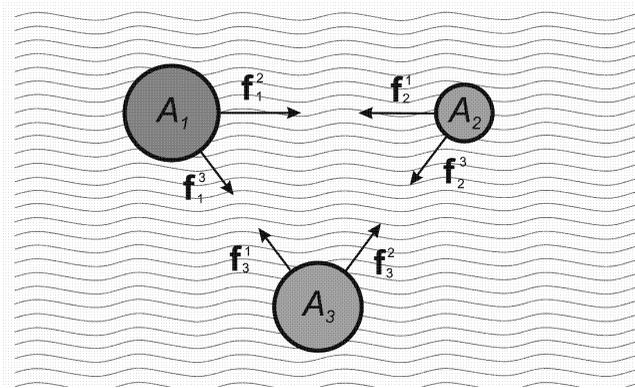


Рис.1. Система трех взаимодействующих тел

Рассматривается система трех взаимодействующих точечных тел A_i , $i = 1, 2, 3$, которые движутся в среде с квадратичным сопротивлением (рис.1). Обозначим через f_i^j силу, приложенную телом A_j к телу A_i , действующую вдоль прямой $A_i A_j$. Силы f_i^j служат управляющими переменными, ограничения на них не налагаются. Предполагается, что в начальный момент времени все тела покоятся и не находятся на одной прямой;

* Данное исследование относится к мобильным системам с управляемой конфигурацией [1]; наиболее близко оно примыкает к [2, 3].

в этом случае движение системы будет происходить в плоскости, содержащей начальные положения тел. Тела могут проходить друг сквозь друга. Уравнения движения системы имеют вид

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{v}_i, \quad m_i \dot{\mathbf{v}}_i = \sum_{j \neq i} \mathbf{f}_i^j - c_i |\mathbf{v}_i| \mathbf{v}_i, \quad \mathbf{f}_i^j = -\mathbf{f}_j^i, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где m_i , \mathbf{r}_i и \mathbf{v}_i - масса, радиус-вектор и скорость тела A_i , c_i - коэффициент сопротивления среды движению тела A_i .

Задача

Построить движение и найти соответствующие ему управляющие силы, которые переводят систему (1) из начального состояния покоя

$$\mathbf{r}_i(0) = \mathbf{r}_i^0, \quad \mathbf{v}_i(0) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

в конечное состояние покоя

$$\mathbf{r}_i(T) = \mathbf{r}_i^*, \quad \mathbf{v}_i(T) = 0, \quad i = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Время T окончания процесса управления не фиксировано. Обозначим через A_i^0 и A_i^* начальное и конечное положения тела A_i .

Доказаны следующие два утверждения.

Утверждение 1

Пусть тела A_i и A_j взаимодействуют друг с другом, не взаимодействуют с третьим телом и в начальный момент времени неподвижны. Если $m_i^2 c_j \neq m_j^2 c_i$, то эти тела могут быть приведены в любые положения на прямой, их соединяющей, с нулевой скоростью в конце процесса. Если $m_i^2 c_j = m_j^2 c_i$, то тела A_i и A_j могут быть приведены в любые такие и только такие положения на этой прямой, в которых их центр масс совпадает с начальным положением.

В алгоритме, осуществляющем такое движение, моменты времени, в которые импульс системы мгновенно перераспределяется между телами, чередуются с интервалами свободного движения тел.

Утверждение 2

Если хотя бы для одной пары тел A_i и A_j выполнено неравенство $m_i^2 c_j \neq m_j^2 c_i$, то можно привести систему в любое терминальное состояние покоя на плоскости. Если для любой пары тел выполнено равенство

$m_i^2 c_j = m_j^2 c_i$, можно привести систему в сколь угодно малую окрестность любого терминального состояния покоя.

Алгоритм движения, если неравенство $m_i^2 c_j \neq m_j^2 c_i$ выполнено хотя бы для одной пары тел, состоит из нескольких этапов, на каждом из которых движутся два тела в соответствии с Утверждением 1, а третье покоится. Если для всех пар тел выполнено равенство $m_i^2 c_j = m_j^2 c_i$, то алгоритм усложняется, а именно, появляются интервалы времени, на которых движутся все три тела.

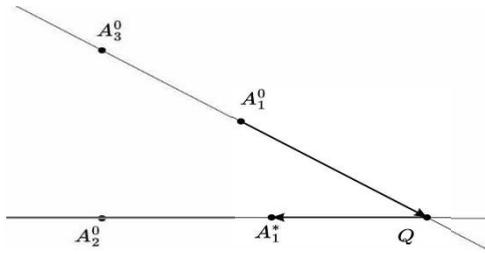


Рис. 2. Перемещение тела A_1 между положениями A_1^0 и A_1^* .

Опишем алгоритм движения в случае, когда неравенство $m_i^2 c_j \neq m_j^2 c_i$ выполнено для всех пар тел системы и конечные положения A_i^* тел не лежат на одной прямой (рис 2). Будем считать, что прямые $A_3^* A_1^*$ и $A_3^0 A_2^*$, $A_2^0 A_3^0$ и $A_2^* A_1^*$, $A_3^0 A_1^0$ и $A_2^0 A_1^*$ пересекаются и не совпадают. В противном случае последовательно сдвинем (за счет взаимодействия с любым другим телом) тела A_3 , A_2 и A_1 , чтобы это условие выполнилось.

Вначале переместим тело A_1 из положения A_1^0 в положение A_1^* . Назовем точку пересечения прямых $A_3^0 A_1^0$ и $A_2^0 A_1^*$ точкой Q . Переместим тело A_1 в точку Q за счет взаимодействия с телом A_3 , оставляя его в положении A_3^0 , а затем из положения Q в положение A_1^* за счет взаимодействия с телом A_2 , оставляя его в положении A_2^0 . После этого, аналогично перемещению тела A_1 , переместим тело A_2 в положение A_2^* , вначале переместив его из положения A_2^0 в точку пересечения прямых $A_2^0 A_3^0$ и $A_2^* A_1^*$ за счет взаимодействия с телом A_3 , а затем в точку A_2^* за

счет взаимодействия с телом A_1 . Наконец, аналогично предыдущему, переместим тело A_3 из положения A_3^0 в точку пересечения прямых $A_3^*A_1^*$ и $A_3^0A_2^*$ и затем в точку A_3^* . Таким образом, тела системы окажутся в положениях A_1^* , A_2^* , A_3^* .

1. **Черноусько, Ф.Л.** Динамика мобильных систем с управляемой конфигурацией / Ф.Л. Черноусько, Н.Н. Болотник – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2022. – 464 с.
2. **Борисенко, И.Н.** О квазистатических движениях системы трех тел на плоскости / И.Н. Борисенко, Т.Ю. Фигурина, Ф.Л. Черноусько // Прикладная математика и механика. – 2014. – Т. 78. – № 3. – С. 316–327.
3. **Mosenkov, T.A.** On the movement of two interacting bodies in a medium with quadratic resistance / T.A. Mosenkov, T.Yu. Figurina // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2024. – Vol. 63. – No. 3. – P. 3–9.

А.И. Глущенко, К.А. Ласточкин

УПРАВЛЕНИЕ УГЛАМИ ЭЙЛЕРА КВАДРОКОПТЕРА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ И КОМПЕНСАЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
aiglush@ipu.ru*

Введение

Проблема повышения качества управления квадрокоптерами привлекла в последние годы значительное внимание исследователей в области теории управления [1] в связи с многочисленными гражданскими применениями таких аппаратов: сельское хозяйство, мониторинг дорожного движения, доставка грузов, картография и т.д. Задача заключается в компенсации влияния параметрической/функциональной (момент инерции, масса, аэродинамические силы) и сигнальной (воздушные потоки) неопределенностей на качество переходных процессов.

В данной работе предлагается компенсировать влияние упомянутых неопределенностей на качество управления углами Эйлера квадрокоптера с помощью формирования динамической оценки неопределен-

ностей без (а) априорного знания параметров объекта или их верхних/нижних оценок, (б) коррекции параметров алгоритма при изменении углов Эйлера в широком диапазоне.

Постановка задачи

Кинематика и динамика углов Эйлера относительно центра масс квадрокоптера описывается следующими уравнениями (зависимость от времени опущена) [2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = R_\alpha \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = I_b^{-1} \begin{bmatrix} (J_y - J_z)qr \\ (J_z - J_x)pr \\ (J_x - J_y)pq \end{bmatrix} + I_b^{-1} \begin{bmatrix} \tau_\psi \\ \tau_\theta \\ \tau_\varphi \end{bmatrix} + \bar{\Delta}(\xi). \quad (1)$$

Здесь $\xi = [\psi \ \theta \ \varphi]^T$ – вектор углов Эйлера (крен, тангаж, рыскание), J_x, J_y, J_z – моменты инерции вдоль осей неинерциальной системы отсчета (НСО), p, q, r – угловые скорости относительно НСО, $\tau_\psi, \tau_\theta, \tau_\varphi$ – крутящие моменты (управления), R_α – матрица преобразования координат (см. (5) в [1]), $I_b = \text{diag}(J_x, J_y, J_z)$, $\bar{\Delta}(\xi)$ – неопределенность неизвестной структуры. Величины $p, q, r, \psi, \theta, \varphi$ – измеряемы, $J_x, J_y, J_z, \bar{\Delta}(\xi)$ – неизвестны.

Проведя тривиальные преобразования, для каждой из координат состояния ψ, θ, φ квадрокоптера можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_0 b(u(t) + \Delta(t)), \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_1(t)$ – конкретный угол Эйлера (ψ, θ, φ), $x_2(t)$ – скорость изменения угла Эйлера, $u(t)$ – управляющий сигнал ($\tau_\psi, \tau_\theta, \tau_\varphi$), b – неизвестный коэффициент усиления, $\Delta(t)$ – неопределенность.

Цель. Разработать робастную систему управления углами ψ, θ, φ , которая способна компенсировать неопределенность и обеспечить выполнение следующих условий, где эталонная траектория $x_{ref}(t)$ будет определена в дальнейшем:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - x_{ref}(t)\| \leq \varepsilon_{UB}(l), \quad \lim_{l \rightarrow \infty} \|\varepsilon_{UB}(l)\| = 0. \quad (3)$$

Основной результат

Пусть коэффициент усиления записан в виде $b = \Delta_b + \bar{b}$, где величина \bar{b} известна, а Δ_b – неизвестна. Тогда (2) приводится к виду:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_0 \bar{b} (u(t) + \Lambda(t)), \quad (4)$$

где $\Lambda(t) = \Delta(t) + \frac{\Delta_b}{b} (u(t) + \Delta(t))$ – новая неопределенность.

Выберем сигнал управления в следующем виде:

$$\begin{aligned} u(t) &= u_b(t) + u_{ad}(t), \quad u_b(t) = k_x x(t) + k_r r(t), \\ k_x &= [k_{1x} \quad k_{2x}] \in R^2, \quad k_r = -k_{1x}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $A + B_0 \bar{b} k_x$ – гурвицева матрица, $r(t)$ – задание по углу, а $u_{ad}(t)$ будет определен в дальнейшем. Подставив (4) в (5), имеем:

$$\dot{x}(t) = (A + B_0 \bar{b} k_x) x(t) + B_0 \bar{b} k_r r(t) + B_0 \bar{b} (u_{ad}(t) + \Lambda(t)). \quad (6)$$

Тогда идеальное качество управления определяется как:

$$\dot{x}_{ref}(t) = A_{ref} x_{ref}(t) + B_{ref} r(t), \quad (7)$$

где $A_{ref} = A + B_0 \bar{b} k_x$, $B_{ref} = B_0 \bar{b} k_r$. Для достижения (3) необходимо оценить и компенсировать $\Lambda(t)$ с помощью $u_{ad}(t)$. Компенсатор и свойства замкнутой системы оценивания показаны в следующей теореме.

Теорема. Пусть существуют $c_1 > 0$, $c_2 > 0$ такие, что:

$$|\dot{\Lambda}(t)| \leq c_1 \|x(t)\| + c_2. \quad (8)$$

Тогда существует $l_0 > 0$ такое, что для всех $l \geq l_0 > 0$ закон управления (5) совокупно с:

$$\begin{aligned}
 u_{ad}(t) &= \left[0 \quad \frac{1}{b} \right] \left(\chi(t) + (A + B_0 \bar{b} k_x) \bar{x}(t) \right) + k_r \bar{r}(t) + \bar{u}_{ad}(t), \\
 \chi(t) &= l(\bar{x}(t) - x(t)), \quad \dot{\bar{x}}(t) = -l(\bar{x}(t) - x(t)), \\
 \dot{\bar{r}}(t) &= -l(\bar{r}(t) - r(t)), \quad \dot{\bar{u}}_{ad}(t) = -l(\bar{u}_{ad}(t) - u_{ad}(t))
 \end{aligned} \tag{9}$$

гарантирует достижение цели (3).

Натурные эксперименты

Для экспериментов использовался квадрокоптер на базе рамы F450 (габариты – 35см x 35 см x 28 см, масса – 1,6 кг) с полетным контроллером, созданным в ИПУ РАН на базе микросхемы MDR32F9Q2I. Параметры предложенной системы управления для всех углов выбраны как:

$$k_{1x} = -10, k_{2x} = -1,5, k_r = 10, l = 8, \bar{b} = 60. \tag{10}$$

Необходимо было отслеживать ступенчатый задающий сигнал для углов Эйлера $0^\circ \rightarrow 10^\circ \rightarrow -10^\circ \rightarrow 0^\circ$. Полет проходил в помещении. На рис. 1 приведены переходные процессы по крену ψ для систем управления: а) с ПИД-регулятором, настроенным вручную, б) с компенсатором неопределенности. По θ и φ получены аналогичные результаты.

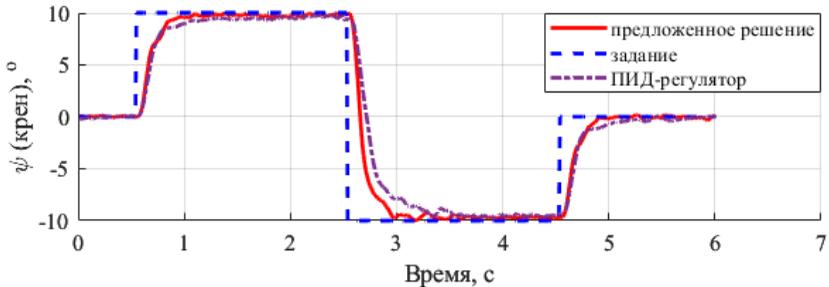


Рис. 1. Переходные процессы по углу крена

Предложенная робастная система позволила улучшить качество переходных процессов, сократив время переходных процессов и не требуя при этом знания параметров объекта или перебора (10) для различных значений/амплитуд изменения задания.

1. Nascimento T.P., Saska M. Position and attitude control of multi-rotor aerial vehicles: A survey // Ann. Rev. in Control. – 2019. – Vol. 48. – P. 129-146.

2. Jeon H. et al. Modeling quadrotor dynamics in a wind field // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2020. – Vol. 26. – No. 3. – P. 1401-1411.

Ю.Ф. Голубев, В.В. Корянов

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРЕОДОЛЕНИЯ МНОГОНОГИМ РОБОТОМ ВПАДИН МАКСИМАЛЬНОЙ ШИРИНЫ

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва,
golubev@keldysh.ru, korianov@keldysh.ru*

Введение

В работе приводится решение задачи о максимальной ширине зоны, запрещенной для наступания, которую n -ногий симметричный шагающий робот с прямоугольным шасси может преодолеть в режиме статической устойчивости. Дана не улучшаемая аналитическая оценка сверху максимальной ширины преодолимой зоны [1-3]. Разработаны методы построения следового расписания [1-3], обеспечивающие достижение максимальной ширины зоны препятствия как для шестиногого, так и для четырехногого роботов. Соответствующие алгоритмы были проверены [1, 3] в среде программного комплекса «Универсальный механизм» [4] с учетом полной динамики робота.

Постановка задачи

Рассматриваются изолированные препятствия, расположенные на равнинной горизонтальной местности, для преодоления которых достаточно через них перешагнуть.

Шасси шагающего робота имеет форму прямоугольного параллелепипеда, а ноги имеют инсектоморфную структуру [1, 3] и расположены симметрично относительно продольной оси корпуса. Возникает задача о нахождении максимально возможной ширины d зоны препятствия, которое робот может преодолеть.

Позиция робота называется статически устойчивой, если его центр масс, рассчитанный с учетом массивности корпуса и всех ног, проектируется строго внутрь опорного многоугольника.

Из множества всех последовательностей постановки ног и движений корпуса требуется указать последовательность, которая позволит роботу достичь максимальной ширины зоны препятствия при выполнении условия статической устойчивости с заданным запасом ε .

Максимальная ширина зоны препятствия

Расстояние между последовательными точками опоры в координатах $Oxuz$, связанных с корпусом, будем называть длиной относительного шага. Из-за конструктивных особенностей длина относительного шага i -ой ноги ограничена величиной $2L_i$. Вопрос о возможности опоры i -й стопы о точку на грунте с абсциссой ξ , направленной перпендикулярно зоне препятствия, связан с анализом справедливости включения

$$(\xi - \xi_0 - x_i) \in [-L_i, L_i], \quad (1)$$

где ξ_0 — ξ -координата центра корпуса, x_i — продольная координата точки подвеса i -й ноги

Назовем передней границей опорного многоугольника отрезок прямой, образованный ближайшими к зоне препятствия двумя точками опоры ног, одна из которых находится с правой, а другая с левой стороны корпуса, если смотреть в направлении оси Ox . Обозначим ξ -координаты правой и левой точек опоры передней границы опорного многоугольника через ξ_r и ξ_l соответственно. Согласно принятым ограничениям на конфигурацию робота, точка O проектируется в середину отрезка между следовыми колеями. Обозначим m — масса одной ноги, M — масса всего аппарата.

Теорема 1. Максимальная ширина Δ зоны препятствия, преодолимого рассматриваемым многоногим роботом, ограничена неравенством

$$\Delta \leq \max_{\xi_r \leq \xi_m, \xi_l \leq \xi_m} \frac{\xi_r + \xi_l}{2} - \xi_m - \frac{m}{M} \sum_{i=1}^n q_{xi}^c + a \frac{k-1}{2} + L_M, \quad (2)$$

т.е. многоногий робот описанной выше конструкции в режиме статической устойчивости не может преодолеть зону препятствия, ширина которой на момент окончания переноса передних ног превосходит сумму половины длины корпуса робота и максимально возможного выноса L_M стоп передних ног в направлении оси Ox за вычетом минимально дости-

жимого расстояния от середины передней границы опорного многоугольника до переднего края ξ_m зоны препятствия и x -координаты центра масс всех ног относительно корпуса робота.

Походка «след в след» возникает, когда точки опоры соседних ног одной стороны для последовательных шагов совпадают. Для простоты последующего анализа обратимся к варианту, когда движение происходит по ровной горизонтальной плоскости. В таком случае максимальные длины относительных шагов будут одинаковы для всех точек опоры и для всех ног. Обозначим через L длину максимально возможного относительного полушага для этого случая. Тогда условие реализуемости походки след в след можно записать следующим образом

$$a \leq a_e = 2L, \quad (3)$$

где a – расстояние между точками подвеса ног.

Представим половину длины корпуса a для шестиногого робота в виде

$$a = a_e + \sigma. \quad (4)$$

Допустим, что найдется число μ , такое, что $0 < \mu < a_e$, для которого неравенство $\sigma \geq -\mu$ исключает возможность взаимного пересечения звеньев соседних ног.

Т е о р е м а 2. Пусть $-a_e < -\mu \leq \sigma \leq 0$, $\mu > 0$. Тогда при выполнении условия статической устойчивости максимальная ширина Δ зоны препятствия, которую шестиногий робот может преодолеть при движении по плоскости, выражается равенством

$$\Delta = a_e + \sigma - \varepsilon + L, \quad (5)$$

где ε – запас статической устойчивости.

Т е о р е м а 3. При выполнении условия статической устойчивости и $\sigma > 0$ максимальная ширина зоны препятствия выражается формулой

$$\Delta = a_e + L - \varepsilon, \quad \sigma \geq 0. \quad (6)$$

Для четырехногого аппарата неравенство (2) с учетом требования ε -сбалансированности позы принимает вид

$$\Delta < \max_{\xi_r \leq \xi_m, \xi_l \leq \xi_m} \frac{\xi_r + \xi_l}{2} - \xi_m - \varepsilon + \frac{a}{2} + L_M. \quad (7)$$

По-прежнему обозначим $a_e = 2L$, $a = a_e + \sigma$.

Т е о р е м а 4. Пусть применяется условие статической устойчивости и

$$-a_e < -\mu \leq \sigma \leq -2\varepsilon, \quad \mu > 0, \quad a \geq 4\varepsilon, \quad L \geq \varepsilon.$$

Тогда максимальная ширина Δ зоны препятствия в этом случае:

$$\Delta = \frac{a_e + \sigma}{2} - \varepsilon + L. \quad (8)$$

Представленные результаты могут быть полезными при решении задач планирования движения робота по пересеченной местности.

1. **Голубев, Ю.Ф., Корянов, В.В.** Преодоление шагающим роботом препятствий, характерных для равнины // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2024. № 21. 35 с. DOI: 10.20948/prepr-2024-21.
2. **Golubev, Yu.F.** Getting over Wide Obstacles by a Multi-Legged Robot. ISSN 1064-5624 // Doklady Mathematics, 2024. DOI: 10.1134/S1064562424601136.
3. **Голубев, Ю.Ф., Корянов, В.В.** Перешагивание многоногим инсектоморфным роботом препятствий максимальной ширины // Изв. РАН. ТиСУ. 2025. № 2. С. 140-165. DOI: 10.31857/S0002338825020106.
4. URL: <http://www.umlab.ru> (дата обращения: 10.03.2020).

И.М. Григорьев^{1,2}, Д.А. Юхимец^{1,2}

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ШАРНИРА МАНИПУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ*

¹ Институт проблем морских технологий им. академика М. Д. Агеева ДВО РАН, ² Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, glozastyi2@gmail.com

Как правило, каждый вращательный шарнир промышленного манипулятора (ПМ) состоит из двигателя, который через редуктор шарнира приводит в движение звено манипулятора [1] (рис. 1). На двигателе располагается высокоточный датчик угла поворота вала (энкодер), по измерениям которого можно точно рассчитать положение рабочего инструмента манипулятора. Однако редуктора в шарнирах обладают эластично-

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №25-41-00044)

стью, которая при действии на манипулятор внешних сил приводит к значительным смещениям его рабочего инструмента. Для расчета и компенсации этих смещений нужно знать параметры жесткости шарниров. Часто эластичность всех компонентов шарнира описывают одной виртуальной торсионной пружиной, подчиняющейся закону Гука и расположенной между редуктором и звеном [2].

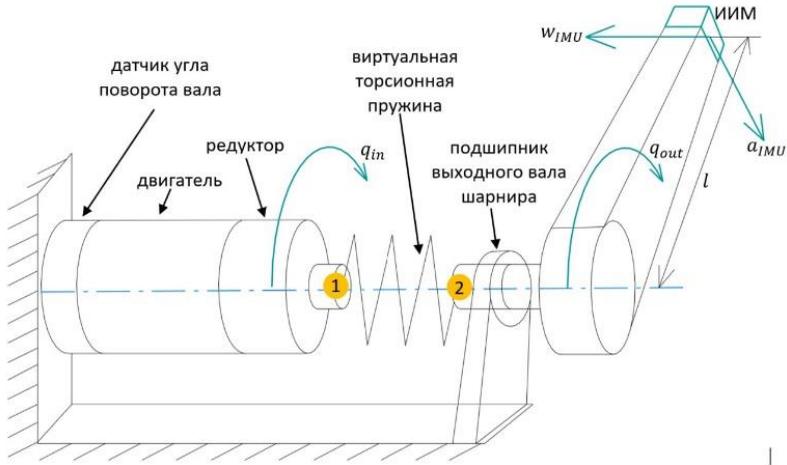


Рис. 1. Схема шарнира и звена одностепенного манипулятора

В докладе предлагается метод для экспериментального определения коэффициента k_{stf} торсионной жесткости вращательного шарнира одностепенного манипулятора с использованием информации с двух датчиков: энкодера на валу двигателя и микроэлектромеханического инерциального измерительного модуля (ИИМ), закрепленного на звене и состоящего из акселерометра и датчика угловых скоростей (ДУС).

Экспериментальная часть идентификации состоит из i экспериментов, при каждом из которых на двигатель шарнира подается гармонический сигнал с частотой w_i . При каждом эксперименте записывается амплитуда $A_{i,q_{in}}$ и фаза $\varphi_{i,q_{in}}$ колебаний вала двигателя q_{in} при помощи энкодера, а также амплитуда $A_{i,q_{out}}$ и фаза $\varphi_{i,q_{out}}$ колебаний звена q_{out} при помощи акселерометра и ДУС. Таким образом, строятся экспериментальные амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазово-частотная характеристика (ФЧХ) системы.

При помощи ДУС и акселерометра можно измерить только амплитуду и фазу первой \dot{q}_{out} и второй \ddot{q}_{out} производных положения звена, но не сам исходный сигнал q_{out} . Однако численного интегрирования можно

избежать за счет использования гармонических сигналов: известно, что амплитуда первой и второй производных гармонического сигнала в w_i и w_i^2 больше исходного сигнала, а их фазы сдвинуты на $\frac{\pi}{2}$ и π . Сигнал q_{out} рассчитывается на основе \dot{q}_{out} и \ddot{q}_{out} с использованием этих отношений.

Далее рассматриваемая механическая система описывается при помощи передаточной функции (ПФ) $W(s)$ с входным сигналом q_{in} и выходным q_{out} . ПФ $W(s)$, ее АЧХ $A(w_i)$ и ФЧХ $\varphi(w_i)$ имеют вид:

$$W(s) = \frac{q_{out}(s)}{q_{in}(s)} = \frac{1}{(T_2 s^2 + T_1 s + 1)}, \quad T_2 = \frac{I}{k_{stf}}, \quad T_1 = \frac{k_{vis}}{k_{stf}}, \quad (1)$$

$$A(w_i) = \frac{A_{i,q_{out}}}{A_{i,q_{in}}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - T_2 w_i^2)^2 + T_1^2 w_i^2}}, \quad (2)$$

$$\varphi(w_i) = \varphi_{i,q_{out}} - \varphi_{i,q_{in}} = -\arctg \frac{T_1 w_i}{1 - T_2 w_i^2}. \quad (3)$$

где T_1, T_2 – постоянные времени ПФ, k_{vis} – коэффициент вязкого трения в подшипниках выходного вала шарнира, I – известный момент инерции звена (рассчитан, например, по его САД- модели).

Как видно из (1), постоянные времени ПФ зависят от искомого k_{stf} . Сопоставляя экспериментальные данные с видом АЧХ и ФЧХ, подберем при помощи численной оптимизации постоянные времени T_1, T_2 таким образом, чтобы минимизировать разницу между измеренными и полученными по модели (2), (3) значениями. На основе найденного T_2 и заранее известного I рассчитывается искомый коэффициент торсионной жесткости шарнира k_{stf} (1).

Предложенный метод был проверен на одностепенном манипуляторе с ременным редуктором (рис. 2, сверху), в качестве ИИМ использован MPU6500. Относительное среднеквадратичное отклонение после расчета T_1, T_2 между экспериментальными данными и моделью для АЧХ (2) составило $\delta_{amp}^{\%} = 0.0525$, для ФЧХ (3) – $\delta_{phase}^{\%} = 0.0191$. Значение k_{stf} составило 829.16 Нм/рад. Как правило, параметры жесткости используются для компенсации провисаний манипулятора под нагрузкой. Для проверки рассчитанного k_{stf} к шарниру был приложен момент 1.53 Нм, а на конце звена закреплена игла. На основе k_{stf} рассчитано смещение иглы под нагрузкой, равное 1.24 мм. На рис. 2 снизу показано начальное положение иглы и ее смещение под нагрузкой. Видно, что смещение предсказано достаточно точно.

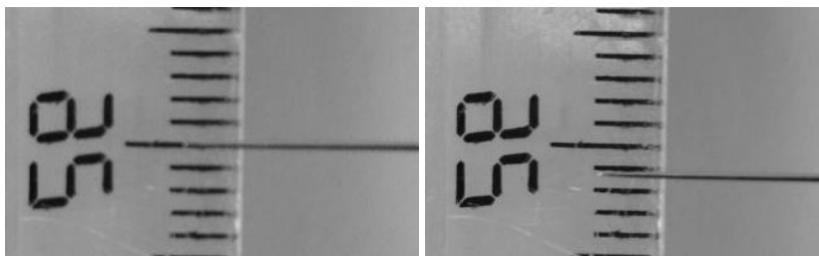
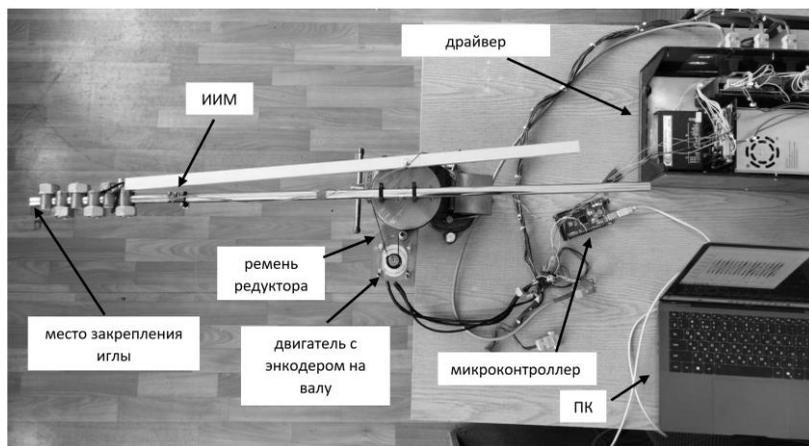


Рис. 2. Одностепенной манипулятор для проведения эксперимента и его смещение под нагрузкой

1. **Wang, C.** Robust Two-Degree-of-Freedom Iterative Learning Control for Flexibility Compensation of Industrial Robot Manipulators / C. Wang, M. Zheng, Z. Wang, M. Tomizuka. – IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2016. P. 2381-2386.
2. **Klimchik, A.** Stiffness Modeling of Parallel Robots / A. Klimchik, A. Pashkevich, D. Chablat. – Springer, 1, 248 p., 2025, Parallel Robots: Theory and Applications, 978-3031763199.

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВОДНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ НА КАНАТНО-РЕЛЬСОВОЙ ДОРОГЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕСТЕСТВЕННЫХ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

*ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический
университет», г. Волгоград, dtm@vstu.ru*

Рассматриваются различные способы управления подводной роботизированной платформы, содержащей воздушные понтоны, перемещающейся под водой по канатно-рельсовой дороге, используя естественные силовые воздействия. Введен критерий эффективности, состоящий из двух противоречивых показателей: максимальное горизонтальное перемещение платформы и наименьшее время ее движения. Рассмотрено три способа управления, обеспечивающие достижение заданного критерия.

Введение

Разработка мобильных роботов - одно из активных развивающихся направлений в робототехнике, перемещающихся по дну водоему [1,2]. Их преимущество перед плавающими роботами является возможность выполнения технологических операций с опорой на грунт. Это обеспечивает их достаточно надежное позиционирование. Однако перемещение по грунту, тем более под водой, может оказаться достаточно сложной задачей в силу непредсказуемости как геометрических, так и физико-механических свойств опорной поверхности [3]. В этих случаях известен опыт применения гусеничных движителей, обеспечивающих приемлемую профильную и опорную проходимость [4,5,6]. Используется и шагающе-подобные движители различных типов, обеспечивающих более высокую проходимость и маневренность [7,8,9,10]. Однако наилучшая проходимость обеспечивается с помощью заранее организованной трассы, например, за счет перемещения робота по рельсовой или канатной дороге. Однако укладка рельсового пути на грунте под водой представляется достаточно сложной задачей. Она упрощается, если рельсовую или канатную дорогу монтировать на достаточно массивных опорах, предварительно установленных на дне водоема с регулируемой длиной несущих мачт (рис.1). Отличие рассматриваемой дороги от рельсовой, уложенной на

грунте состоит в объеме подготовительных грунтовых работ и специфическом профиле рельсовых или канатных направляющих.

Для обеспечения движения подводной роботизированной платформы (ПРП) необходимо предусматривать двигатель, обеспечивающий реализацию тягового усилия.

В качестве источника энергии в этих условиях возможно предусматривать резервуары со сжатым воздухом, установленных (ПРП) [11,12]. Тогда, управление движением таких роботов осуществляется за счет дискретного регулирования расхода воздуха на каждом отрезке рельсового или канатного пути. Воздух, вытесняя жидкость из жестких воздушных понтонов (понтонов), обеспечивает положительную плавучесть ПРП, что в совокупности с реакцией восходящего рельсового или канатного пути вызывает его движение и в горизонтальном направлении. При выпуске воздуха из балластных емкостей и их заполнением жидкостью плавучесть становится отрицательной и поэтому на нисходящей ветви рельсового или канатного пути движение в горизонтальном направлении продолжается.

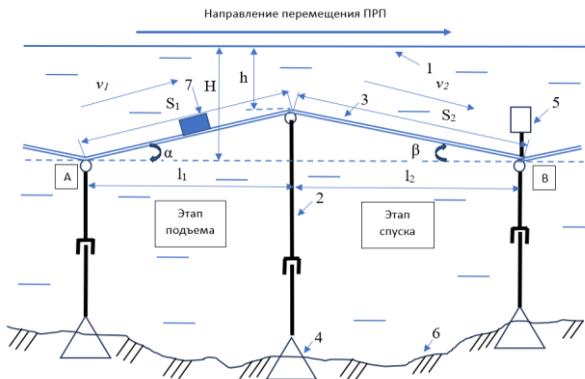


Рис. 1. Кинематическая схема передвижения ПРП, где 1 – поверхность водоема; 2 – несущая мачта; 3 – рельсовый путь; 4 – опора мачты; 5 – дополнительный баллон со сжатым воздухом; 6 – рельеф дна; 7 – подводная роботизированная платформа (ПРП)

Принцип работы канатно-рельсовой дороги за счет управления величиной выталкивающей силы

Возможны несколько вариантов схем управления, обеспечивающих

регулирование величиной выталкивающей силы за счет опорожнения или заполнения балластных емкостей. Общая конструктивная схема и этапы работы системы представлены на рис. 2.

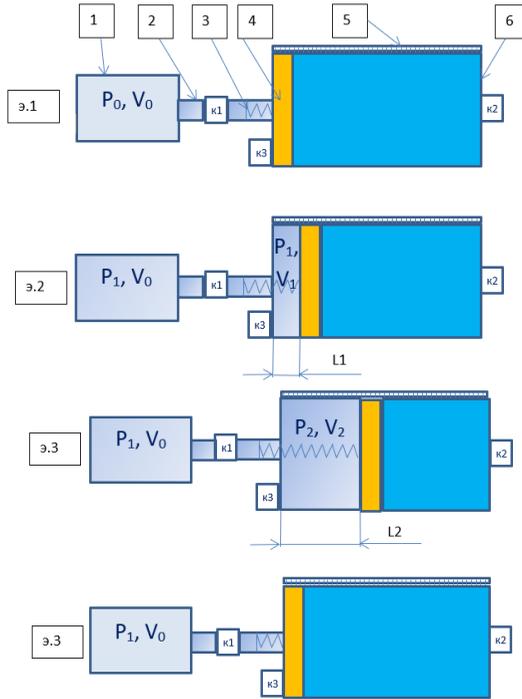


Рис. 2. Принцип работы системы с жестким воздушным понтоном, где, 1 – Резервуар высокого давления (РВД); 2 – воздушный трубопровод; 3 – возвратная (дисциплинирующая) пружина; 4 – поршень; 5 – контактная линейка; 6 – жесткий воздушный понтон с изменяющейся плавучестью; K1, K2, K3 – управляемые клапаны; P_0 – начальное давление в РВД; V_0 – объем РВД; $P_{окр}$ – давление окружающей среды; L_1 , L_2 – перемещение поршня; P_1 – давление в РВД и в понтоне на втором этапе управления; P_2 – давление в понтоне на третьем этапе управления; V_1 , V_2 – объемы вытесненной воды на 2 и 3 этапе управления

Система состоит из резервуара высокого давления 1, системы клапанов и жесткого балластного понтона 6, представляющего собой пнев-

моцилиндр. При подаче воздуха в пневмоцилиндр поршень 4 перемещается на заданную длину цилиндра L , образуя объем V , необходимый для получения требуемой выталкивающей силы $F_{\text{выт}}$. Контактная линейка 5 необходима для контроля положения поршня.

На первом этапе (рис.1) поршень 4 находится в исходном нулевом положении, понтон заполнен водой, клапаны $K1$ и $K3$ закрыты, $K2$ в безразличном положении (открыт/закрыт), ПРП имеет отрицательную плавучесть. ПРП, взаимодействуя с направляющей, перемещается в горизонтальном направлении и одновременно погружается.

Управление подъемом ПРП

Рассматриваются следующие способы управления подъемом ПРП.

В способах управления 1 и 2 клапаны $K1$, $K2$, $K3$ работают по принципу «открыт/закрыт».

Способ управления №1

На следующем 2 этапе при подходе ПРП к восходящей ветви канатно-рельсовой дороги, клапан $K1$ открывается вместе с клапаном $K2$, из РВД, воздух поступает в жесткий воздушный понтон, поршень через клапан $K2$ выталкивает воду в окружающую среду, перемещается на заданное расстояние L_1 вдоль контактной линейки, останавливается посредством закрывания клапана $K2$, давления P_1 в РВД и получившемся объеме V_1 выравниваются, система получает положительную плавучесть. Давление в резервуаре уменьшается до $P_1 < P_0$. ПРП, взаимодействуя с направляющей, перемещается в горизонтальном направлении и одновременно всплывает.

Способ управления №2

Возможен третий этап, позволяющий уменьшить расход воздуха из резервуара высокого давления. После этапов 1 и 2, соответствующих схеме управления №1 клапаны $K1$ и $K3$ закрыты, открывается клапан $K2$, вследствие избыточно высокого давления P_1 в воздушном отсеке по отношению к давлению окружающей среды ($P_1 > P_{\text{окр}}$) поршень 4 начинает перемещаться до расстояния L_2 , увеличивая объем воздушной камеры до V_2 , пока установившееся давление P_2 не сравняется с $P_{\text{окр}}$. Клапан $K2$ закрывается. Система, приобретая положительную плавучесть при меньшем расходе воздуха. ПРП, взаимодействуя с направляющей, перемещается в горизонтальном направлении и одновременно всплывает.

Способ управления №3.

Клапан $K1$ в данной схеме является регулируемым. На его выходе настраивается давление $P_{\text{вых}} = P_{\text{окр}}$. Клапан $K1$ открывается вместе с клапаном $K2$, из РВД воздух с определенным давлением поступает в жесткий воздушный понтон, поршень через клапан $K2$ выталкивает воду в

окружающую среду, перемещается на заданное расстояние L_2 (рис.2, э.3) вдоль контактной линейки, увеличивая объем воздушной камеры до V_2 , останавливается посредством закрывания клапана К2. ПРП, взаимодействуя с направляющей, перемещается в горизонтальном направлении и одновременно всплывает.

Управление спуском ПРП

Управление спуском одинаково для всех трех схем. При достижении максимальной высоты подъема ПРП на канатно-рельсовой дороге и необходимости продолжения движения по нисходящей ветви на следующем этапе клапан К1 остается закрытым, открываются клапаны К2 и К3, воздух начинает выходить в окружающую среду через К3, а вода заполняет понтон через клапан К2. Дисциплинирующая пружина 4 необходима для гарантированного перемещения поршня в исходное состояние.

Первый цикл завершен, далее начинается этап 1 второго цикла и т.д.

Равномерность движения на продолжительных наклонных участках трассы достигается путем баланса движущих сил и сил сопротивления. При формировании сцепки из нескольких ПРП с помощью жестких кинетических связей и включение в состав трассы горизонтальных участков в верхних и нижних точках достигаются минимальные потери в скорости движения при переходе с восходящего на нисходящий участок трассы и наоборот за счет инерции движения всего состава ПРП [13]

Постановка задачи

Ставится задача максимизации количества циклов накачивания воздухом, а соответственно и циклов перемещения, при минимальном времени перемещения ПРП до заданной точки, ввести рассчитать и критерий эффективности работы системы при разных схемах управления.

Метод решения поставленной задачи

Вводится критерий эффективности:

$$I = (k_1\xi - k_2N) \rightarrow \min \quad (1),$$

где $\xi = \frac{\tau}{\tau_*}$ - безразмерная величина, показывающая отношение времени прохождения одного цикла τ к требуемому технико-экономическими (коммерческими) условиями времени τ_* , k_1 и k_2 – весовые коэффициенты ($k_1+k_2=1$), определяемые также технико-экономическими (коммерче-

скими) условиями, N – количество циклов. Работа системы тем эффективнее, чем меньше I .

Для всех способов управления

$$\xi = \frac{\tau}{\tau_*} = \frac{l_1 v_*}{(l_1 + l_2) \cos \alpha} \times \frac{\mu}{(\rho g \delta V - P)(\sin \alpha - f \cos \alpha)} + \frac{l_2 v_*}{(l_1 + l_2) \cos \beta} \times \frac{\mu}{P(\sin \beta - f \cos \beta)} \quad (2),$$

где v_* - требуемая скорость, определяемая технико-экономическими условиями; μ -коэффициент сопротивления среды; P -отрицательная плавуемость платформы; f – коэффициент трения между направляющими и опорными элементами ПРП; δV – вытесненный регулируемый объем жидкости за цикл, необходимый для осуществления движения ПРП на восходящей ветви трассы со скоростью v_l .

При способе 1 управление и техническая реализация системы самые простые – единичное перемещение поршня на требуемое расстояние, обеспечивая δV , управление клапанов через контроллер (на рис. 2 не показан), контроль перемещения через контактную линейку. Количество циклов, пройденное на одной заправке РВД составляет:

$$N_1 \leq \frac{\ln \frac{P_0}{\rho g H + P_{\text{атм}}}}{\ln \frac{V_0 + \delta V}{V_0}} \quad (3),$$

где P_0 – начальное давление сжатого воздуха в РВД; V_0 – объем сжатого воздуха в РВД, H – глубина погружения ПРП – конструктивные параметры.

При способе 2 – двухступенчатое управление клапанами и поршнем, это усложняет алгоритм, но существенно увеличивает количество циклов и способно изменять значения δV в ходе работы по мере необходимости. Количество циклов, пройденное на одной заправке РВД составляет:

$$N_2 = \frac{(P_0 - (\rho g H + P_{\text{атм}})) V_0}{(\rho g H + P_{\text{атм}}) \delta V} \quad (4)$$

При способе 3 – управление аналогично управлению по схеме 1, однако при существенном преимуществе по количеству циклов, имеется техническое усложнение системы – включение в схему регулируемого клапана. Количество циклов будет таким же, как в способе 2.

Для расчета значений I применяется численное моделирование.

Учитывается равенство значений аргументов во всех схемах. Задаются численные значения:

Таблица 1

Значения коэффициентов

ξ	$\frac{P_0}{\rho gH + P_{\text{атм}}}$	$\frac{\delta V}{V_0}$	k_1	k_2
1	40	1	0,9	0,1

Рассчитываются значения I для каждой схемы:

$$I_1 = 0,369;$$

$$I_2 = -3;$$

$$I_3 = -3.$$

Отношение количества циклов движения при прочих равных условиях в схеме управления 2 (или 3) по отношению к схеме 1 составляет:

$$\eta = \frac{N_2}{N_1} = (5)$$

Учитывая значения коэффициентов из таблицы 1:

$$\eta = 7,33$$

т.е. количество циклов движения при схемах управления 2 и 3 больше, чем при схеме 1 на порядок, а значит и дальность перемещения больше в это же число раз.

Выводы

Проведенный анализ позволяет обосновать целесообразность применения различных способов управления, рассчитать для них значения критериев эффективности. Выбор между схемами управления позволяет добиться максимального технико-экономического эффекта от применения системы.

1. **Ляхов, Д.Г.** Современные задачи подводной робототехники. // Подводные исследования и робототехника – 2012 – №1 – С.15-23
2. **Чернышев, В.В., Арыканцев, В.В.** Робототехника и техническая кибернетика. // МАК-1 – Подводный шагающий робот – 2015 – №2(7) – С.45-50
3. Технология применения подводных шагающих роботизированных платформ при освоении подводных (подлёдных) месторождений углеводородов / В.А. Шурыгин, В.А. Серов, И.В. Ковшов, С.А.

- Устинов // Седьмая всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана» (2-6 октября 2017 г.) : матер. конф. / ФАНО Российской Федерации, РФФИ (грант № 17-08-20517), ФГБУН «Ин-т проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН (ИПМТ ДВО РАН)». - Владивосток, 2017. - С. 43-47.
4. **Hong S., Kim H.W., Choi J.S.** Comparative study on tracked Vehicles on Extremely soft Cohesive soil // The 5th ISO PE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium.-2002-P.132-138
 5. **Гулевский, В.В., Брискин, Е.С.** XVI ВСЕРОССИЙСКАЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ-2023) // Управление ориентацией гусеничной цепи мобильных роботов с якорно-тросово-гусеничными движителями – 2023 – Т.1 – С.145-148
 6. Гусенично-якорно-тросовый движитель для подводных мобильных платформ Гулевский В.В. В книге: XXIV Региональная конференция молодых учёных и исследователей Волгоградской области. Сборник материалов конференции. 2020. С. 353-354
 7. Патент RU 217486 U1. Движитель для мобильной платформы : № 2022133985 : заявл. 23.12.2022 : опубл. 04.04.2023 / Е.С. Брискин, И.С. Пеньшин, Н.Г. Шаронов; заявитель, патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолГТУ) (RU) // ФИПС : [сайт]. – URL: <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=09611e742cf396060ed5d9ef337f1a13>
 8. **Пеньшин, И.С., Брискин, Е.С.** XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023) // Об управлении роботов-понтон с якорно-тросовыми – 2023 – С.201-203
 9. **Тимофеев, И.П.** Шагающие машины для освоения ресурсов морского дна. - Л. ЛГИ. 1987. - 176с
 10. **Охоцимский, Д.Е.** Шагающие машины / Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Кирильченко А.А., Лапшин В.В. // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, 1989, 36 с.
 11. Патент RU 2829977 C1. Способ подводного перемещения грузов: № 2024126776 : заявл. 11.09.2024 : опубл. 06.02.2025 / Е.В. Дементьев, Е.С. Брискин, А.Е.Гаврилов, заявитель, патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолГТУ) (RU) // ФИПС : [сайт]. – URL: https://fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=ad70925b5d3488562471db21ca95f5fb_

12. Патент RU 231713 U1. Подводная колея для транспортировки грузов: № 2024111146 : заявл. 23.04.2024 : опубл. 11.11.2024 // Е.В. Дементьев, Е.С. Брискин, А.Е.Гаврилов, заявитель, патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолгГТУ) (RU) // ФИПС : [сайт]. – URL: https://fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=c_b4f6d64f54ee16d69f9f6faca3898db_
13. **Дементьев, Е.В., Брискин, Е.С.** О пространственной ориентации направляющих трассы подводной роботизированной транспортной системы // Известия Волгоградского государственного технического университета – 2024 - №9(292) – С.25-31.

Е.В. Иванов, А.Г. Лесков

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТРОСОВЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, egorvladivanov@mail.ru*

Тросовые манипуляторы – область робототехники, которая в настоящее время получила существенное развитие. Эти системы активно используются в строительстве, в сельском хозяйстве (орошения и обработка полей), при для проведения телерепортажей со стадионов и др. Достоинство тросовых систем – возможность работать в широком диапазоне площадей, в том числе – при перемещении рабочего инструмента на расстояние, превышающее 10 м. Тросовые манипуляторы способны перемещать массивные полезные грузы. Они быстро развёртываются.

В литературе по робототехнике тросовые манипуляторы носят название плоскопараллельных тросовых манипуляторов, а также манипуляторов с тросовым приводом [1].

Можно проследить развитие тросовых систем, сначала в виде системы блоков и полиспастов для подъема и перемещения грузов, вплоть до грузовых и пассажирских канатных дорог, кабельных кранов, роботизированных манипуляционных систем.

Понятие механизма параллельной структуры с гибкими звеньями впервые возникло в США в 1989 году и получило название «кран с контролируемыми тросами» или «робот кран». Стоит отметить значительный вклад в развитие технологии кабельных кранов советских ученых,

которые уже к концу 70-ых годов получили патенты устройств - аналогов современные манипуляторы с гибкими звеньями.

Как отмечалось выше, достоинством тросовых манипуляторов является простота монтажа и демонтажа при развертывании на различных объектах, значительные и варьируемые в зависимости от конкретной задачи размеры рабочей зоны. Основные недостатки – невысокая жесткость звеньев. Вследствие этого могут возникать колебания платформы с рабочим инструментом; имеют место погрешности позиционирования рабочего инструмента, особенно заметные в крупногабаритных манипуляторах. Достоинства и недостатки напрямую связаны с физической природой тросов, их способностью передавать только силы и только в одном направлении и невозможностью передавать моменты. Поэтому управление тросовыми манипуляторами – сложный процесс, включающий одновременно управление силами натяжения тросов и перемещением рабочего инструмента.

В этой связи исследования в области кинематики, динамики и управления тросовыми манипуляторами представляются актуальными. Основные направления, определяются практической целесообразностью. Так, например, в области кинематики стали появляться работы, посвященные изучению реконфигурируемой кинематической схемы, когда приводы лебедок могут перемещаться вдоль края рабочей зоны. Такие разработки направлены на внедрение плоскопараллельных тросовых манипуляторов в производственный процесс, для транспортирования тяжелых грузов и деталей [2][3]. Известны исследования, в которых изучается возможность использования вспомогательных устройств внутри рабочей зоны для обхода неподвижных препятствий, что повышает маневренность [4]. Особое место занимают исследования, направленные на повышение грузоподъемности и точности позиционирования, что очень важно при работе на складских помещениях больших логистических центров [5]. Также в последнее время все чаще встречаются работы, в которых рассматривается применение таких систем в сельском хозяйстве и строительстве.

В настоящее время тросовые системы используются в репортажах со спортивных соревнований, концертов, в кинематографе и пр. Особый интерес вызывает использование тросовых систем в изобразительном искусстве, робот «Albert Muralist» и в быту - домашний робот «Scribit». В научном направлении рассматриваемые технологии используются для создания различных симуляторов [6], применения в медицине для восстановления подвижности конечностей после серьезных травм [7], в астрономии для передвижения приемника радиотелескопа [8] и т.д. Мы провели анализ современной области применения плоскопараллельных тросовых манипуляторов, из которого можно сделать заключение, что

наибольшая доля применения технологии тросовых систем приходится на промышленность, но с каждым годом увеличивается область применения данных систем в сфере услуг и в быту. Таким образом, учитывая тенденцию развития, можно считать перспективным развитие данного класса манипуляционных систем в направлении автоматизации и замены тяжелого и опасного труда человека, в областях, связанных с погрузкой-разгрузкой и работой на высоте.

На сегодняшний день класс плоскопараллельных тросовых манипуляционных систем, после небольшой паузы в 20 лет, начал активно развиваться в России. На сегодняшний день эта область робототехники не такая большая по научным материалам и области применения, по сравнению с другими направлениями, поэтому она требует собственного подхода к изучению и развитию. До сих пор нет широкого освещения о данном классе манипуляторов в учебных материалах. Однако, позитивным видится то, что в учебных заведениях все-таки стали вестись работы в этом направлении: создаются прототипы тросовых манипуляторов лабораториях, на которых студенты, могут проводить исследования, проводятся курсы и лекции, с каждым годом появляется больше научных работ посвящённых данной тематике. Для развития этого научного направления в нашей стране, необходимо также развитие производства таких систем, что в целом тоже на сегодняшний день имеет положительную тенденцию, так как с каждым годом появляется все больше компаний, нацеленных на использовании технологии тросовых манипуляторах в новых отраслях экономики. Стоит также отметить, что именно отечественные тросовые системы «Robusam 3D» для видеотрансляций крупных мероприятий, являются одними из лучших в мире и активно применяются за рубежом, что говорит о высоком технологическом потенциале России в данной отрасли. Возрастающий интерес исследователей и изобретателей к данному классу манипуляторов, а также технологическое преимущество и конкурентная способность во многих областях рынка, подтверждает эффективность и целесообразность их дальнейшего развития.

1. **Алепко А.В., Яковенко Д.М., Дубовсков В.В.** Механизмы параллельной структуры: обзор современного состояния, область применения манипуляторов в промышленности и анализ перспектив развития// Фундаментальные исследования. – 2016. – № 2-1. – С. 13-17
2. **Nguyen D.Q., Gouttefarde M.** On the Analysis of Large-Dimension Reconfigurable Suspended Cable-Driven Parallel Robots// 2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA) Hong Kong Convention and Exhibition Center May 31 -. Hong Kong, China, June 7, 2014 – pp.5729-5735.

3. **Anson M., Alamdari A., Krovi V.** Orientation Workspace and Stiffness Optimization of Cable-Driven Parallel Manipulators with Base Mobility// Journal of Mechanisms and Robotics,- ASME, July 07, 2017 – pp.1-25.
4. **Rushton, M., Khajepour, A.** Planar Variable Structure Cable-Driven Parallel Robots for Circumventing Obstacles //J. Mechanisms Robotics, ASME –2020 - vol.13, № 2.
5. **Torres-Mendez S., Khajepour A.** Desing optimization of a warehousing cable-based robot// Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE , Buffalo, New York, USA - Aug .17-20 2014 –pp. 1-9.
6. **Miermeister P., Lachele M., Boss R., Masone C.** The CableRobot simulator large scale motion platform based on cable robot technology// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS),- Daejeon, Korea, Oct 9-14, 2016-pp.3024-3029.
7. **Kino H., Kawamura S.** Mechanism and Control of Parallel-Wire Driven System// Journal of Robotics and Mechatronics - Vol.27, No.6, 2015 – pp.599-607.
8. **Kozak K., Zhou Q., Wang J.** Static analysis of cable-driven manipulators with non-negligible cable // IEEE Transactions on Robotics , Vol. 22, June, 2006 – pp.425-433.

Г.В. Костин

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ДВИЖЕНИЙ ЛИНЕЙНОЙ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва,
kostin@ipmnet.ru*

Рассмотрены линейные механические системы, движение которых происходит на интервале времени $t \in \mathcal{T} = (0, T)$ под воздействием управления $\mathbf{u}: \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{R}^M$ и возмущающих сил $\mathbf{w}: \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{R}^N$, где N – число степеней свободы и $M \leq N$. Для обобщенных координат $\mathbf{q}: \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{R}^N$ и импульсов $\mathbf{p}: \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{R}^N$ сформулирована обобщенная задача Коши [1].

Задача 1. Для заданных функций $\mathbf{u} \in L^2(\mathcal{T}; \mathbb{R}^M)$, $\mathbf{w} \in L^2(\mathcal{T}; \mathbb{R}^N)$, $\mathbf{M}, \mathbf{C} \in L^\infty(\mathcal{T}; \mathbb{R}^{N \times N})$, $\mathbf{V} \in L^\infty(\mathcal{T}; \mathbb{R}^{N \times M})$ найти движение $\bar{\mathbf{q}}, \bar{\mathbf{p}} \in H^1(\mathcal{T}; \mathbb{R}^N)$, которое удовлетворяет начальным условиям $\mathbf{q}(0) = \mathbf{q}^0$, $\mathbf{p}(0) = \mathbf{p}^0$ и доставляет минимум функционалу состояния

$$\Phi[\bar{\mathbf{q}}, \bar{\mathbf{p}}, \mathbf{u}] = \min_{\mathbf{q}, \mathbf{p}} \Phi[\mathbf{q}, \mathbf{p}, \mathbf{u}] = 0, \quad \Phi = \frac{1}{2} \int_0^T (\mathbf{r}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{r} + \mathbf{s}^T \mathbf{C} \mathbf{s}) dt,$$

$$\mathbf{s} = \mathbf{q} + \mathbf{C}^{-1}(\dot{\mathbf{p}} - \mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{w}), \quad \mathbf{r} = \mathbf{p} - \mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}.$$

Здесь $\mathbf{M}: \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{R}^{N \times N}$ – матричные функции масс, $\mathbf{C}: \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{R}^{N \times N}$ – жесткости и $\mathbf{B}: \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{R}^{N \times M}$ – управления. Матрицы $\mathbf{M}(t)$ и $\mathbf{C}(t)$ симметрические и положительно определенные для всех $t \in \mathcal{T}$.

Решается обобщенная задача оптимального управления с минимизацией функционала на фиксированном интервале времени и с заданным терминальным состоянием [2].

Задача 2. Пусть фазовая траектория $\bar{\mathbf{q}}(t, \mathbf{u})$, $\bar{\mathbf{p}}(t, \mathbf{u})$ – решение Задачи 1 для заданных функций \mathbf{w} , \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{B} , начальных векторов \mathbf{q}^0 , \mathbf{p}^0 и любого допустимого управления $\mathbf{u} \in L^2(\mathcal{T}; \mathbb{R}^M)$. Требуется найти оптимальную вектор-функцию $\mathbf{u}^* \in L^2(\mathcal{T}; \mathbb{R}^M)$ и соответствующие траектории движения системы $\bar{\mathbf{q}}^*(t) = \bar{\mathbf{q}}(t, \mathbf{u}^*)$, $\bar{\mathbf{p}}^*(t) = \bar{\mathbf{p}}(t, \mathbf{u}^*)$, которые удовлетворяют терминальным условиям $\mathbf{q}(T) = \mathbf{q}^1$, $\mathbf{p}(T) = \mathbf{p}^1$ и за фиксированное время T доставляют минимум функционалу цены

$$J[\mathbf{z}^*] = \min_{\mathbf{u}} J[\mathbf{z}] = 0, \quad J = \int_0^T \left(\frac{1}{2} \mathbf{z}^T \mathbf{H} \mathbf{z} + \mathbf{h}^T \mathbf{z} \right) dt,$$

$$\mathbf{z}(t) = [\bar{\mathbf{q}}^T(t, \mathbf{u}), \bar{\mathbf{p}}^T(t, \mathbf{u}), \mathbf{u}(t)]^T.$$

Здесь $\mathbf{h} \in L^\infty(\mathcal{T}; \mathbb{R}^{2N+M})$, $\mathbf{H} \in L^\infty(\mathcal{T}; \mathbb{R}^{(2N+M) \times (2N+M)})$ и $\mathbf{H}(t) = \mathbf{H}^T(t) > 0$ при любом $t \in \mathcal{T}$.

Для численного построения фазовых траекторий, а также оптимального управления предложен алгоритм, который заключается в последовательной условной минимизации двух функционалов. Поставим фазовым переменным и управлению базисы $\{\mathbf{q}_i\}_{i=1}^\infty \subset H^1(\mathcal{T}; \mathbb{R}^N)$, $\{\mathbf{p}_i\}_{i=1}^\infty \subset H^1(\mathcal{T}; \mathbb{R}^N)$ и $\{\mathbf{u}_i\}_{i=1}^\infty \subset L^2(\mathcal{T}; \mathbb{R}^M)$ и будем искать приближенные движения и управления в виде конечных сумм

$$\tilde{\mathbf{q}} = \sum_{i=1}^{N_q} x_i \mathbf{q}_i, \quad \tilde{\mathbf{p}} = \sum_{i=1}^{N_p} x_{i+N_q} \mathbf{p}_i, \quad \tilde{\mathbf{u}} = \sum_{i=1}^{N_u} v_i \mathbf{u}_i, \quad N_u, N_q, N_p \in \mathbb{N}.$$

Подставим суммы $\tilde{\mathbf{u}}(t, \mathbf{v})$, $\tilde{\mathbf{q}}(t, \mathbf{x})$, $\tilde{\mathbf{p}}(t, \mathbf{x})$ в функционал состояния Φ и проинтегрируем по времени. С учетом начальных условий можно записать минимизацию функционала состояния Φ в виде

$$\tilde{\Phi}(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{v}) = \min_{\mathbf{x}} \tilde{\Phi}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \geq 0, \quad \tilde{\Phi}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = \Phi[\tilde{\mathbf{q}}, \tilde{\mathbf{p}}, \tilde{\mathbf{u}}], \quad \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}(0, \mathbf{x}) \\ \tilde{\mathbf{p}}(0, \mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}^0 \\ \mathbf{p}^0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{v} = [v_i]_{i=1}^{N_u} \in \mathbb{R}^{N_u}, \quad \mathbf{x} = [x_i]_{i=1}^{N_x} \in \mathbb{R}^{N_x}, \quad N_x = N_q + N_p.$$

Используя полученные приближенные траектории $\tilde{\mathbf{q}}(t, \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{v}))$, $\tilde{\mathbf{p}}(t, \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{v}))$ и конечномерное управление $\tilde{\mathbf{u}}(t, \mathbf{v})$ в функционале цены J , после интегрирования получим задачу условной минимизации параметров управления:

$$\begin{aligned} \tilde{J}(\mathbf{v}^*) &= \min_{\mathbf{v}} \tilde{J}(\mathbf{v}), \quad \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}(T, \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{v})) \\ \tilde{\mathbf{p}}(T, \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{v})) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}^1 \\ \mathbf{p}^1 \end{bmatrix}, \\ \tilde{J}(\mathbf{v}) &= J[\tilde{\mathbf{q}}(\cdot, \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{v})), \tilde{\mathbf{p}}(\cdot, \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{v})), \tilde{\mathbf{u}}(\cdot, \mathbf{v})]. \end{aligned}$$

В качестве базисных функций $\mathbf{q}_i(t)$, $\mathbf{p}_i(t)$, $\mathbf{u}_i(t)$ в (4.2) можно выбрать кусочно-полиномиальные функции (сплайны), заданные на интервале $t \in \bar{\mathcal{T}}$, причем сплайны обобщенных координат и импульсов должны согласно лемме Соболева принадлежать классу непрерывных функций: $\mathbf{q}_i, \mathbf{p}_i \in H^1(\mathcal{T}; \mathbb{R}^N) \subset C^0(\mathcal{T}; \mathbb{R}^N)$.

Приведем пример оптимального управления колебаниями цепочки осцилляторов. Система состоит из трех масс $m_i(t)$, $i = 1, 2, 3$ ($N = 3$), перемещающихся вдоль оси x . Первая масса прикреплена пружиной жесткости $c_1(t)$ к неподвижному основанию и к второй массе пружиной жесткости $c_2(t)$. Вторая и третья массы соединены пружиной жесткости $c_2(t)$. К второй массе приложена известная возмущающая сила $w(t)$, а к третьей — управляющая сила $u(t)$, т.е. $M = 1$. Все параметры системы в этом разделе представлены в безразмерном виде.

В качестве переменных выберем отклонения каждой массы от положения равновесия $q_i(t)$, $i = 1, 2, 3$, и соответствующие им импульсы $p_i(t)$, $i = 1, 2, 3$. Выберем для определенности начальное и терминальное состояния: $\mathbf{q}^0 = [0, 0, 1]^T$, $\mathbf{p}^0 = 0$, $\mathbf{q}^1 = 0$, $\mathbf{p}^1 = 0$. Зафиксируем время управления $T = 10$. Возмущение задается как $w(t) = 4|2t - T|^{-1/4}/T$. Пусть первая масса уменьшается с течением времени, а остальные массы не меняются: $m_1(t) = e^{-t/T}$, $m_2(t) = m_3(t) = 1$. Допустим также, что вторая и третья пружина не изменяют свою жесткость со временем, а первая имеет кусочно-постоянный коэффициент жесткости:

$$c_1(t) = \begin{cases} 1, & t < 0.5, \\ 0.5, & t \geq 0.5, \end{cases} \quad c_2(t) = c_3(t) = 1.$$

Для приближенного решения Задач 1,2 выберем однородную сетку по времени, общую для фазовых переменных и управления с узлами в

моменты времени $t_i = Ti/K$, $i = \overline{0, K}$. На каждом интервале $\mathcal{T}_j = (t_{j-1}, t_j)$, $j = \overline{0, 2K}$, задаются полиномы одинаковой степени L для компонент обобщенных координат и импульсов, а для функции управления полиномы степени $L - 1$. Выберем $K = 12$ и $L = 7$.

На рис. 1 показаны результаты решения Задач 1,2 для выбранной аппроксимации. В верхней левой части рисунка сплошной кривой приведен график оптимального управления $\tilde{u}^*(t)$, а штриховой — возмущение $w(t)$. В верхней правой части изображены аппроксимации координаты $\tilde{q}_1^*(t)$ (сплошной) и импульса $\tilde{p}_1^*(t)$ (штриховой). Внизу слева показаны соответствующие аппроксимации $\tilde{q}_2^*(t)$ (сплошной) и $\tilde{p}_2^*(t)$ (штриховой), а справа — $\tilde{q}_3^*(t)$ (сплошной) и $\tilde{p}_3^*(t)$ (штриховой).

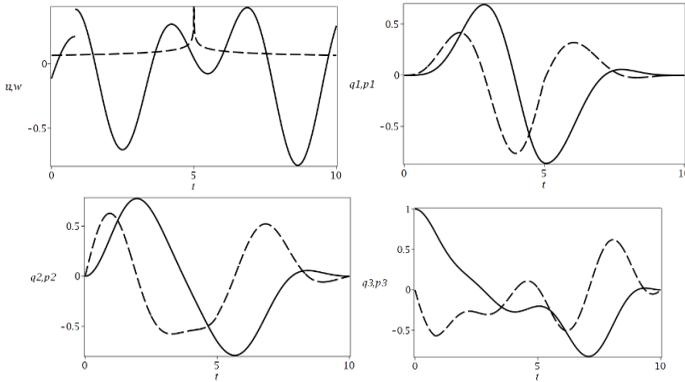


Рис. 1. Вверху слева $\tilde{u}^*(t)$ (сплошная) и $w(t)$ (штриховая). Координаты (сплошная) и импульсы (штриховая): вверху справа $\tilde{q}_1^*(t)$ и $\tilde{p}_1^*(t)$, внизу слева $\tilde{q}_2^*(t)$ и $\tilde{p}_2^*(t)$, внизу справа $\tilde{q}_3^*(t)$ и $\tilde{p}_3^*(t)$

1. **Костин, Г.В.** Вариационные формулировки задачи об управляемых движениях системы с упругими элементами // ПММ. – 2016. – Т. 80, Вып. 5. – С. 525–534.
2. **Костин, Г.В.** Вариационные подходы к решению начально-краевых задач динамики линейных упругих систем / Г.В. Костин, В.В. Саурин // ПММ. – 2009. – Т. 73, Вып. 6. – С. 934–953.

МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АНПА ДЛЯ АВТОНОМНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ СИЛОВЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ В РЕЖИМЕ ЗАВИСАНИЯ*

*Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
г. Владивосток, nakrasavin@yandex.ru*

Введение

Одной из перспективных задач подводной робототехники является повышение эффективности выполнения контактных манипуляционных работ в режиме стабилизируемого зависания необитаемых подводных аппаратов (НПА) с многозвенными манипуляторами (ММ) за счет увеличения степени их автономности. При этом в мировой практике все еще нет случаев автономного выполнения реальных силовых технологических операций ММ НПА в режиме зависания, а известные исследования в основном ограничиваются бассейновыми экспериментами в режиме удержания аппаратов вблизи объектов работ с помощью специальных устройств [1, 2]. Это обусловлено ограниченной точностью существующих систем стабилизации НПА в заданной точке пространства (ошибки достигают нескольких сантиметров), а также ошибками построения трехмерных моделей объектов работ с помощью бортовых систем технического зрения (СТЗ). Также в процессе выполнения контактной операции на аппарат и его ММ действуют заранее неизвестные силы и моменты, обусловленные воздействием вязкой среды и силовым контактом с объектом работ. Все перечисленные факторы приводят к соударениям рабочего инструмента с поверхностью объекта и затрудняют использование в режиме зависания НПА методов [3], основанных на подходах, применяющихся для промышленных ММ.

Процесс осуществления подводных контактных работ

Для решения вышеуказанной проблемы в докладе описывается метод синтеза системы позиционно-силового управления НПА с ММ, находящимися в режиме стабилизируемого зависания. Предложенная система

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038

обеспечивает компенсацию тягами двигателей НПА идентифицируемых воздействий со стороны работающего ММ, а также формирует дополнительные перемещения инструмента этого манипулятора для компенсации отклонений НПА и непрерывного оказания заданного силового воздействия на объект работ. Для этого аппарат должен быть оснащен развитым движительно-рулевым комплексом и СТЗ для визуальной навигации вблизи целевого объекта [4, 5].

Определять величину силового воздействия инструмента ММ на объект работ предложено с помощью аналитических соотношений на основе информации об обусловленных контактом с объектом работ составляющих векторов внешних моментов в степенях подвижности ММ. Для этого рассчитывается разница между действующими на приводы степеней подвижности ММ величинами полных моментов нагрузки и рассчитываемыми с помощью обратной задачи динамики (ОЗД) моментами, обусловленными взаимовлияниями звеньев ММ и воздействием вязкой среды на эти звенья. При этом разработанная модификация алгоритма решения ОЗД позволяет учитывать влияние соседних звеньев на скорость потока жидкости, набегающего на звено, а также влияние срыва потока на торцах звеньев. Что в результате повышает точность расчета величины силового воздействия рабочего инструмента на объект работ. Для непрерывного поддержания заданной величины этого воздействия регулятором формируются дополнительные перемещения инструмента ММ в направлении вектора желаемого усилия. Поскольку системы стабилизации не обеспечивают жесткую фиксацию НПА, его неизбежные угловые и линейные отклонения в плоскости, перпендикулярной желаемому вектору усилия, компенсируются дополнительным вектором смещения инструмента, формируемым на основе измеряемых с помощью СТЗ смещений аппарата относительно объекта.

Важно отметить, что находящийся в толще воды НПА обладает значительной инерцией и обеспечивает податливость, необходимую для управления оказываемым усилием за счет перемещения рабочего инструмента ММ.

На основе разработанного метода была синтезирована и программно реализована система позиционно-силового управления НПА с ММ. Эффективность ее работы была исследована с помощью полунатурного моделирования в среде Matlab/Simulink и натурных испытаний с реальным подводным ММ, имеющим подвижное основание (Рис. 1).

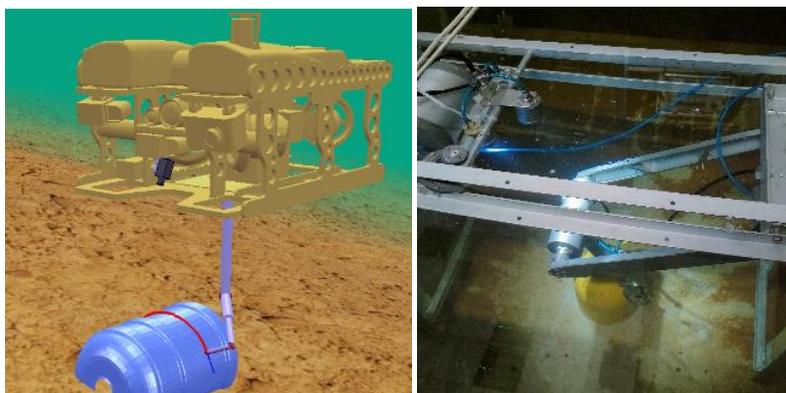


Рис. 1. Исследование системы с помощью полунатурного моделирования (слева) и натуральных испытаний (справа)

Заключение

Результаты проведенных исследований подтвердили высокую эффективность предложенной системы, которая в режиме стабилизации НПА обеспечивает движение рабочего инструмента ММ по поверхности объекта работ с непрерывным оказанием заданной величины силового воздействия инструмента на эту поверхность. В настоящее время система проходит подготовку к внедрению и тестированию на автономном НПА ММТ-3500, разработанном в ИПМТ ДВО РАН и оснащённом подводным ММ.

1. **Palomeras, N.** I-AUV Docking and Panel Intervention at Sea / N. Palomeras, A. Peñalver, M. Massot-Campos, P.L. Negre, J.J. Fernández, P. Ridao, P.J. Sanz, G. Oliver-Codina // *Sensors*. – 2016. – № 16. – P. 1673.
2. **Pi, R.** Compliant manipulation with quasi-rigid docking for underwater structure inspection/ R. Pi, P. Cieślak, J. Esteba, N. Palomeras, P. Ridao // *IEEE Access*. – 2023. – № 11. – С. 128957–128969.
3. **Филаретов В. Ф.** Особенности выполнения технологических операций с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов, оснащаемых многозвенными манипуляторами/ В. Ф. Филаретов, А. В. Зуев, А. А. Тимошенко // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. – 2024. – № 3. – С. 165–177.

4. **Konoplin, A.** Development of a control system for multilink manipulators on unmanned underwater vehicles dynamically positioned over sea-floor objects / A. Konoplin, A. Yurmanov, N. Krasavin, P. Piatavin // Applied Sciences. – 2022. – №. 3. – С. 1666.
5. **Коноплин А. Ю.** Разработка комплекса методов для автономного выполнения технологических операций манипуляционными подводными аппаратами/ А. Ю. Коноплин, Н. А. Красавин, А. П. Юрманов, П. А. Пятавин, В. В. Костенко, А. Ю. Быканова //Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2024. – №. 1. – С. 54–71.

*К.С. Мухин, И.В. Брем,
А.В. Антонов, А.С. Фомин*

ШЕСТИПОДВИЖНЫЙ РОБОТ ОТНОСИТЕЛЬНОГО МАНИПУЛИРОВАНИЯ, СОСТОЯЩИЙ ИЗ МОДУЛЕЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва,
ksmikhin@yandex.ru, antonov.av@imash.ru, ilyabrem@gmail.com,
alexey-nvkz@mail.ru*

Введение

Роботы относительного манипулирования представляют собой механические системы, состоящие из нескольких модулей, как правило, последовательной или параллельной структуры [1]. Такие модули независимо размещаются на неподвижном основании и работают совместно [2]. Данная компоновка позволяет получить функциональные характеристики, которые были бы недостижимы при использовании модулей по отдельности или при их объединении в единую конструкцию. К таким характеристикам относятся увеличенные размеры рабочей зоны и возможность реконфигурации. Благодаря этим преимуществам роботы относительного манипулирования получили широкое распространение в процессах, связанных с обработкой материалов [3], сборкой [4], также они используются в аддитивных технологиях [5] и медицине [6].

В связи с этим разработка и исследование таких устройств является

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10304, <https://rscf.ru/project/22-79-10304/>.

весьма актуальной задачей, имеющей широкую практическую реализацию. В настоящей работе рассматривается новый конструктивный дизайн шестиподвижного робота относительного манипулирования, образованного двумя модулями параллельной структуры.

Конструкция робота

Рассмотрим конструкцию данного робота. Он состоит из двух модулей, расположенных друг над другом (рис. 1). Верхний модуль представляет собой механизм параллельной структуры семейства Delta с типом движения 3T1R, представленный в работе [7]. Он включает в свой состав четыре кинематические цепи, соединяющие подвижную платформу 2 с основанием 1: две центральные и две боковые цепи. Каждая цепь состоит из каретки 3, которая перемещается по линейной направляющей 4. Центральные цепи включают стержень 5, соединенный с кареткой 3 и платформой 2 сферическими шарнирами. Боковые цепи включают два аналогичных стержня, которые образуют параллелограммную часть. Приводы 6, размещенные на основании, приводят в действие каретки 3 и передают им движение через винты 7. Такая структура обеспечивает подвижной платформе 2 четыре степени свободы с типом движения Шенфлиса (3T1R) [7].

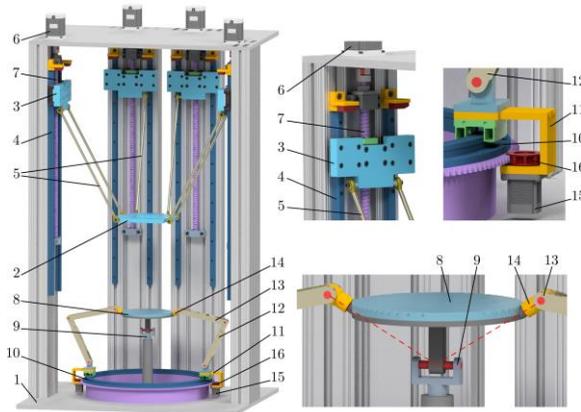


Рис. 1. Конструкция предлагаемого робота относительного манипулирования (рисунок слева) и отдельные элементы и узлы робота (рисунки справа)

Нижний модуль представляет собой двухподвижный механизм параллельной структуры с круговой направляющей, разработанный по типу

устройств, представленных в [8, 9]. Механизм имеет три цепи, которые соединяют подвижную платформу 8 с основанием 1: одну центральную и две боковые цепи. Центральная цепь включает в себя Y-образное звено 9, вращающееся вокруг вертикальной оси, которая совпадает с осью круговой направляющей 10. Звено 9 крепится к платформе 8 с помощью вращательного шарнира, ось которого остается параллельной горизонтальной плоскости. Каждая боковая цепь включает каретку 11, нижнюю штангу 12, верхнюю штангу 13 и шатун 14. Все эти звенья соединены друг с другом вращательными шарнирами, а их оси параллельны друг другу и горизонтальной плоскости. Шатун 14 крепится к платформе 8 с помощью вращательного шарнира, ось которого проходит через центр звена 9. Приводы 15 кареток 11 приводят их в действие через зубчатые колеса 16. Такая структура обеспечивает подвижной платформе 8 две вращательные степени свободы: неограниченное вращение вокруг оси круговой направляющей и наклон вокруг горизонтальной оси центральной цепи (тип движения 2R).

Заключение

Строение рассмотренного робота обеспечивает ему шесть степеней свободы в относительном движении подвижных платформ. Это позволяет ему использоваться, например, в качестве координатно-измерительной машины. Верхняя подвижная платформа может позиционировать измерительный инструмент или систему обработки визуальных данных, в то время как нижняя платформа может ориентировать измеряемый объект. В то же время такое объединение двух модулей улучшает вращательные возможности робота, которые обычно ограничены при использовании одного шестиподвижного механизма параллельной структуры.

1. **Wang, B.** Robotica: decoupled elastostatic stiffness modeling of hybrid robots / B. Wang, P. Li, C. Yang, X. Hu, Y. Zhao // *Robotica*. – 2024. – Vol. 42(7). – P. 2309–2327.
2. **Wu, Y.** Quotient kinematics machines: concept, analysis, and synthesis / Y. Wu, H. Wang, Z. Li // *Journal of Mechanisms and Robotics*. – 2011. – Vol. 3(4). – P. 041004.
3. **Liu, Q.** Open-architecture of CNC system and mirror milling technology for a 5-axis hybrid robot / Q. Liu, H. Liu, J. Xiao, W. Tian, Y. Ma, B. Li // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2023. – Vol. 81. – P. 102504.
4. **He, Y.** A cooperative optimization strategy for distributed multi-robot manipulation with obstacle avoidance and internal performance maximization / Y. He, M. Wu, S. Liu // *Mechatronics*. – 2021. – Vol. 76. –

- P. 102560.
5. **Isa, M.A.** Five-axis additive manufacturing of freeform models through buildup of transition layers / M.A. Isa, I. Lazoglu // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2019. – Vol. 50. – P. 69–80.
 6. **Saeidi, H.** Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis / H. Saeidi, J.D. Opfermann, M. Kam, S. Wei, S. Leonard, M.H. Hsieh, J.U. Kang, A. Krieger // *Science Robotics*. – 2022. – Vol. 7(62). – P. eabj2908.
 7. **Laryushkin, P.** Kinematic and singularity analysis of a 4-DOF Delta-type parallel robot / P. Laryushkin, A. Fomin, A. Antonov // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*. – 2023. – Vol. 45(4). – P. 218.
 8. **Xu, C.C.** A novel 2R parallel mechanism for alt-azimuth pedestal / C.C. Xu, C. Xue, X.C. Duan // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 428(1). – P. 012053.
 9. **He, S.** Kinematic modeling and motion control of a parallel robotic antenna pedestal / S. He, X. Duan, X. Qu, J. Xiao // *Robotica*. – 2023. – Vol. 41(11). – P. 3275–3295.

И.Ш. Насибуллаев, О.В. Даринцев

АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОДУЛЬНОГО КОЛЕСНОГО РОБОТА С ФИКСИРОВАННОЙ И ПОДВИЖНОЙ КОЛЕСНОЙ ПАРой

*Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа,
nasibullaevish@uust.ru*

Введение

В настоящее время активно развиваются робототехнические системы, имеющие транспортную и инспекционную функцию в средах со сложной топологией, например, пересеченная местность или система трубопроводов [1-3]. Использование модульной конструкции повышает универсальность робота (выбор оснастки, подстройка под исследуемую среду) [4]. Компьютерное моделирование позволяет подобрать параметры конструкции разрабатываемого прототипа робота, а также провести предварительную оценку эффективности его работы [5, 6].

В докладе представлены алгоритмы перемещения модульного колесного мобильного робота [7] для двух типов конструкции модулей, с

фиксированной и подвижной колесной парой. Модули соединены последовательно с помощью шарового шарнира. Компьютерная модель робота с фиксированной колесной паров была представлена ранее в [8, 9].

Математическая модель

Положение j -го модуля в i -й момент времени t_i задается координатами $(x_{j,i}, y_{j,i})$. Траектория движения первого (ведущего) модуля задана в параметрической форме: $x_{1,i} = x_{1,i}(t_i), y_{1,i} = y_{1,i}(t_i)$. Положение каждого следующего (ведомого) модуля определяется по положению предыдущего при соблюдении условия неразрывности связи в шарнирном соединении.

Для модуля с фиксированной колесной парой модуль перемещается вдоль своей продольной оси на величину $\lambda L_{l,j}$ ($0 < \lambda < 1$). Затем осуществляется поворот на угол $\beta_{j,i}$ таким образом, чтобы продольная ось проходила через шарнирное соединение предыдущего модуля. Далее модуль перемещается до восстановления связи в шарнирном соединении. Траектории ведомых модулей при перемещении по криволинейному участку будет отличаться от траектории ведущего модуля.

При перемещении модуля с подвижной колесной парой, траектории ведомых модулей и ведущего совпадают. В параметрическом уравнении перемещения $x_{j,i} = x_{j,i}(t_{j,i}), y_{j,i} = y_{j,i}(t_{j,i})$ параметр времени $t_{j,i}$ определен только для ведущего модуля. Для определения положения ведомых модулей строится окружность радиусом L_b (вынос шарнира) и определяется параметр $t_{l,i}$, при котором окружность пересекает траекторию ведущего модуля. Точка пересечения новое положение ведомого модуля. Угол поворота β_j колесной пары относительно вертикальной оси определяется из геометрии. Иллюстрация алгоритмов приведена рис. 1.

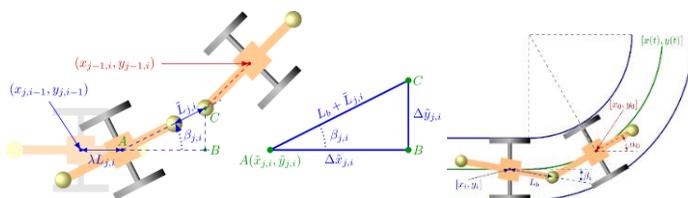


Рис. 1. Алгоритм расчета положения модулей с фиксированной (слева) и подвижной (справа) колесной парой

Компьютерная модель

Представленные алгоритмы были реализованы на C++. Для визуализации результатов моделирования был дополнительно разработан

скрипт для Blender Python API. Результаты компьютерного моделирования показаны на рис. 2. Сравнение предложенных компьютерных моделей с моделированием в среде ROS/Gazebo [10], а также прототип робота представлены в работе [11].

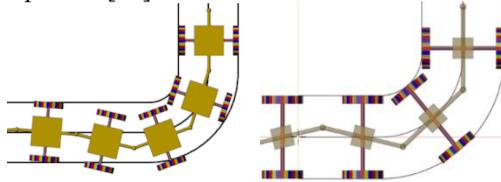


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования для модулей с фиксированной (слева) и подвижной (справа) колесной парой
Заключение

Представлены алгоритмы расчета перемещения последовательно связанных модулей мобильного колесного робота с фиксированной и подвижной колесной парой. Модуль с фиксированной колесной парой является более простой конструкцией, но при движении ведущего модуля по криволинейной траектории ведомые модули будут перемещаться со смещением. При более сложной конструкции модулей с подвижной колесной парой, траектории всех модулей совпадают, но в системе управления требуется рассчитывать углы поворота колесной пары каждого модуля в реальном времени.

1. **Ogai, H., Bhattacharya, B.:** Pipe Inspection Robots for Structural Health and Condition Monitoring, 1st edn. Springer, New Delhi (2018). DOI: 10.1007/978-81-322-3751-8
2. **Jang, H., Kim, T.Y., Lee, Y.C. et al.** A Review: Technological Trends and Development Direction of Pipeline Robot Systems. *J Intell Robot Syst* 105, 59 (2022). DOI: 10.1007/s10846-022-01669-2
3. **Sun, B., Yang, J., Li, B. et al.** Wire Rope Inspection Robots: A Review. *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.)* (2023). DOI: 10.1007/s12204-023-2641-8
4. **Dai, Y., He, S., Nie, X. et al.** Research on Reconfiguration Strategies for Self-reconfiguring Modular Robots: A Review. *J Intell Robot Syst* 110, 47 (2024). DOI: 10.1007/s10846-024-02067-6
5. **Pavlovskiy, V.E., Petrovskaya, N.V., Evgrafov, V.V.** Research of dynamics of movement of a chain of ‘Robotrain’. Equations of movement, particular solutions. Prepr. KIAM RAS, **117**, 1–31 (2005)
6. **Evgrafov, V.V., Pavlovskiy, V.E., Petrovskaya, N.V.** Research of dynamics of movement of a chain of “Robotrain”. Controlled movement. Prepr. KIAM RAS **120**, 1–31 (2005)

7. **Nasibullayev I., Darintsev O., Bogdanov D.** (2022) In-Pipe Modular Robot: Configuration, Displacement Principles, Standard Patterns and Modeling. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 232, pp 85-96. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_8
8. **Nasibullayev, I., Darintsev, O.** (2023). Algorithm of Trajectories Synthesis for Modular Wheeled Inspection Robot. In: Ronzhin, A., Pshikhopov, V. (eds) Frontiers in Robotics and Electromechanics. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 329. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-19-7685-8_7
9. **Nasibullayev, I., Darintsev, O.** (2024). Algorithms for Planning Trajectory of a Modular Wheeled In-Pipe Robot. In: Ronzhin, A., Savage, J., Meshcheryakov, R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 14898. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-71360-6_19
10. Gazebo simulator homepage <https://gazebo.org/>.
11. **Круглов Н.О., Богданов Д.Р., Насибуллаев И.Ш.** Синтез конструкции инспекционного модульного робота // Многофазные системы. 2025. Т. 20, № 1. С. 33–44. DOI: 10.21662/mfs2025.1.006

А.А. Пыркин, Н.В. Михальков

АДАПТИВНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ В МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С НЕЛИНЕЙНЫМИ МОДЕЛЯМИ ТРЕНИЯ

*Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург,
apyrkin@itmo.ru*

Введение

Для обеспечения прецизионного управления современными мехатронными комплексами в различных условиях окружающей среды, а также оценки степени износа оборудования, необходимы подходы, способные обеспечить оценку параметров трения в шарнирах актуаторов в реальном времени. В настоящей работе предлагается метод на основе процедуры динамического расширения регрессора и смешивания (DREM), применимый для некоторых практически значимых моделей трения.

Постановка задачи и решение

Класс механических систем с трением можно описать, используя

следующее уравнение движения:

$$m\dot{v}(t) = u(t) - F(t), \quad (1)$$

в котором m – масса тела, $u(t)$ – управляющее воздействие, $F(t)$ – сила трения, $v(t)$ – скорость движения тела.

В инженерной практике существует большое количество моделей, описывающих поведение силы трения $F(t)$, как статических, так и динамических.

Характерным примером динамической модели, описывающей трение, в том числе при наличии гистерезиса, является модель ЛуГре [1]:

$$F(t) = \sigma_0 z(t) + \sigma_1 \dot{z}(t) + \sigma_2 v(t) \quad (2)$$

$$\dot{z}(t) = v(t) - \frac{|v(t)|}{g(\dot{v}(t))} \sigma_0 z(t), \quad (3)$$

где σ_0 – «жёсткость» микровыступов, σ_1 – коэффициент демпфирования, σ_2 – коэффициент вязкого трения, $z(t)$ – деформация микровыступов. В данной модели функция $g(t)$ имеет вид:

$$g(v(t)) = F_C + (F_S - F_C)e^{-(v(t)/v_S)^2}. \quad (4)$$

в котором F_C – коэффициент сухого трения, F_S – максимальная величина трения покоя. В установившемся режиме ($\dot{z}(t) \equiv 0$) уравнение (2) упрощается до следующего вида:

$$F(t) = F_C \text{sign}(v) + \sigma_2 v(t) + (F_S - F_C) \text{sign}(v) e^{-(v(t)/v_S)^2} \quad (5)$$

Так как нелинейные эффекты, связанные с трансцендентной частью, наиболее явно различимы в окрестности $v(t) \equiv 0$, то применима аппроксимация следующего вида:

$$e^{-v^2/v_S^2} \approx \frac{1}{1 + v^2/v_S^2}$$

В таком случае, механическая система с параметризованной моделью трения может быть представлена в виде:

$$m\dot{v} = u - \left(\theta_1 \text{sign}(v) + \theta_2 v + \text{sign}(v) \frac{\theta_3}{1 + \theta_4 v^2} \right), \quad (6)$$

где $\theta_1 := F_C$, $\theta_2 := \sigma_2$, $\theta_3 := (F_S - F_C)$, $\theta_4 := 1/v_S^2$.

Применяя к (6) линейный ограниченный оператор, а также Лемму о замене [2], можно получить представление (5) как линейного регрессионного уравнения:

$$y(t) = \eta^T \varphi(t), \quad (7)$$

где η содержит комбинации искоемых $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$. Такое уравнение разрешимо относительно η для получения оценки $\hat{\eta}$, в том числе современными методами, такими как процедура динамического расширения регрессора и смешивания [3]. За счет применения леммы о замене в таком подходе получается избавиться от неизмеримого сигнала \dot{v} . Результаты численного моделирования, демонстрирующие сходимость ошибки оценки параметров θ для системы (6) представлены на рис. 1.

Более сложная модель, называемая моделью Даля [4], может быть описана посредством уравнений (2)-(3), но использует упрощение для функции $g(v(t))$ относительно (3):

$$g(v(t)) = F_c. \quad (8)$$

Для такого упрощения характерен гистерезис, однако эффект Штрибека нивелируется. Тем не менее, такое приближение также позволяет свести уравнения (2)-(3) к виду (6) и применять к нему методы разрешения линейной регрессии. Для построения наблюдателя \hat{z} можно воспользоваться методом DREМBAO [2] используя полученную оценку параметров $\hat{\theta}$.

Более того, комбинация предложенных подходов позволяет произвести оценку трения и для динамической модели (2)-(3), однако в рамках такого подхода необходимо измерение полного вектора состояния системы $y = [v, \dot{v}]^T$.

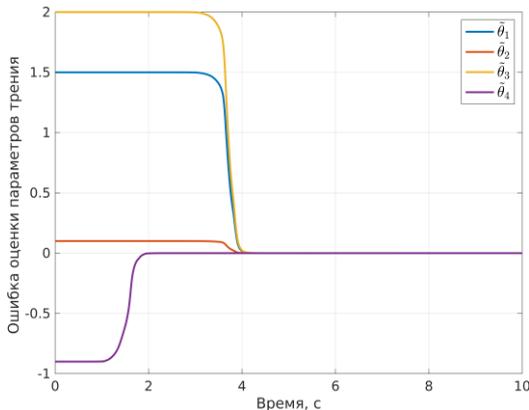


Рис. 1. График ошибки параметров трения в (6) по результатам численного моделирования

Заключение

В работе представлен новый метод адаптивной идентификации параметров для механической системы с классической моделью трения, использующий процедуру динамического расширения регрессора и смешивания.

1. **De Wit, C.C.** A new model for control of systems with friction / C.C. De Wit, H. Olsson, K.J. Astrom, P. Lischinsky // *IEEE Transactions on automatic control*. – 1995. – Т. 40. – №. 3. – С. 419-425.
2. **Pyrkin, A.** Adaptive state observers using dynamic regressor extension and mixing / A. Pyrkin, A. Bobtsov, R. Ortega, A. Vedyakov, S. Aranovskiy // *Systems & Control Letters*. – 2019. – Т. 133. – С. 104519.
3. **Aranovskiy, S.** Parameters estimation via dynamic regressor extension and mixing / S. Aranovskiy, A. Bobtsov, R. Ortega, A. Pyrkin // 2016 American Control Conference (ACC): IEEE, 2016. – С. 6971–6976.
4. **Piatkowski, T.** Dahl and LuGre dynamic friction models—The analysis of selected properties / T. Piatkowski // *Mechanism and Machine Theory*. – 2014. – Т. 73. – С. 91-100.

Л.Д. Смирная, И.П. Вершинина, К.С. Артемьев, Е.С. Брискин

ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ДВИЖИТЕЛЯМИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИМИ ИХ ИДЕАЛЬНУЮ МАНЕВРЕННОСТЬ*

*Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград, dtm@vstu.ru*

Введение

Существует достаточно большое количество определений маневренности как для механизмов [1], так и для транспортно-технологических машин [2, 3] и роботов [4].

Введено определение «идеальной» маневренности. Под этим определением понимается возможность осуществления роботом движения с любой, наперед заданной траекторией любой его точки, в частности центра масс, и любой поворот его корпуса вокруг этой точки без проскальзывания по этой поверхности. Это определение допускает формализацию в форме аналитических зависимостей

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20213, <https://rscf.ru/project/25-29-20213>

$$\begin{aligned}y &= y(x), \\ \varphi &= \varphi(x),\end{aligned}\tag{1}$$

где x, y – координаты производной точки робота, совершающего плоское движение, φ – угол поворота его корпуса.

Особенность введенных функций состоит в том, что они могут быть любыми в классе непрерывных функций. Такими свойствами могут обладать роботы с шагающими и «шагающеподобными» движителями [5-10]. Близкими к ним относятся и роботы, осуществляющие движение за счет движения внутренних тел с согласованным управлением накладываемых и снимаемых голономных связей с опорной поверхностью, например, тормозных стоек [11].

Постановка задачи

Рассматриваются два режима движения мобильного робота с движителями, опорные элементы которых, могут совершать любое пространственное движение, например, с шагающими ортогонально-поворотными движителями (рис. 1). Первый режим – поворот робота на месте, а второй – движение боком, причем в обоих случаях без проскальзывания опор на грунте (рис. 2). В плоском движении привода обеспечивают изменение ориентации опор движителей относительно осей на корпусе робота и изменение расстояния до этих осей.

Ставится задача установления законов управления приводами относительно опор движителей, обеспечивающих устойчивое программное движение необходимое при выполнении тех или иных технологических операций.



Рис. 1. Шагающий робот «Ортоног»

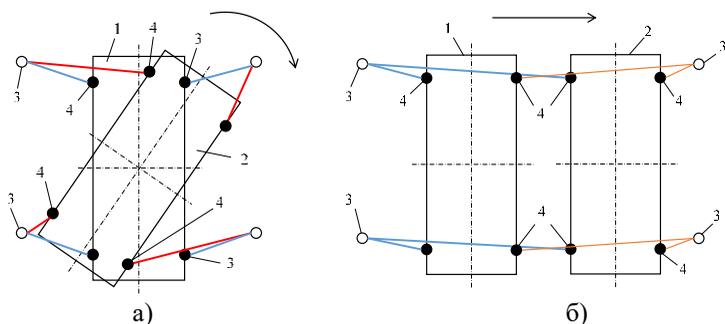


Рис. 2. Кинематическая схема специальных режимов движения: а) поворот на месте, б) движение боком, 1 – исходное положение корпуса робота, 2 – конечное положение корпуса робота, 3 – положение опор движателей на грунте, 4 – положение осей поворота движателей

Особенности сопровождающие изучаемое движение

Основная особенность рассматриваемых режимов движения состоит в том, что приводы движателей могут работать в различных режимах: «тянущем» и «толкающем». Известен анализ, когда все движатели работают в одинаковом режиме и сформулированы условия устойчивости такого движения [12]. Для сформулированной задачи устойчивость движения рассматривается как по Ляпунову [13], так и сточки зрения технической устойчивости. В этом случае изучается малое отклонение в движении от программного за заданный промежуток времени (время одного шага) [14].

Заключение

Полученные результаты обобщаются, как и на другие возможные схемы шагающих машин, так и на роботы с «шагающеподобными» движателями, например, «якорно-тросовыми» [15] и тросовыми в составе группы, выполняющей общую операцию.

1. **Крайнев, А.Ф.** Словарь-справочник по механизмам / Крайнев А.Ф. // – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. – 1987. – 560с.
2. **Смирнов, Г.А.** Теория движения колесных машин: учебник для втузов / Смирнов Г. А. – М.: Машиностроение. – 1990. – 352 с.
3. **Гуськов, В.В.** Тракторы: Теория: [Учеб. для вузов по спец. "Автомобили и тракторы" / В.В. Гуськов, Н.Н. Велев, Ю.Е. Атаманов и др.]; Под общ. ред. В. В. Гуськова. – М.: Машиностроение. – 1988.

– 374 с.

4. **Брискин, Е. С.** Некоторые проблемы при разработке мобильных роботов с шагающими и «шагающеподобными» движителями / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023): Материалы мультиконференции. В 4-х томах, Волгоград, 11–15 сентября 2023 года / Редколлегия: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. Том 1. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. – С. 49-54.
5. **Охоцимский, Д. Е.** Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата / Д.Е. Охоцимский, Ю.Ф. Голубев. – М.: Наука. – 1984. – 309 с.
6. **Павловский, В. Е.** О разработках шагающих машин / В.Е. Павловский // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2013. – № 101. – С. 1-32.
7. **Артоболевский, И.И.** Некоторые проблемы создания шагающих машин / И.И. Артоболевский, Н.В. Умнов // Вестник Академии наук СССР. – 1969. – № 2. – С. 22..
8. **Тартаковский, И.И.** О выборе структурной схемы шагающей машины / И.И. Тартаковский, Н.В. Умнов // Машиноведение. 1985. № 6. С.60–66.
9. **Брискин, Е.С.** Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Е.С. Брискин, И.П. Вершинина, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 168.
10. **Брискин, Е.С.** Об особенностях управления движением мобильных роботов с движителями якорно-тросового типа / Е. С. Брискин, В. А. Серов, Н. Г. Шаронов, И. С. Пеньшин // Экстремальная робототехника. – 2017. – № 1(28). – С. 336-343..
11. **Бордюгов, Д.В.** Патент на полезную модель № 230052 U1 Российская Федерация, МПК В25J 9/10. Мобильный робот: № 2024125221: заявл. 28.08.2024: опубл. 12.11.2024 / Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов; заявитель ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет.
12. **Брискин, Е.С.** Об устойчивости плоского движения мобильных роботов с шагающими движителями, работающими в "тянущем" режиме / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, К. С. Артемьев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Т. 22, № 1. – С. 28-34.
13. **Меркин, Д.Р.** Введение в теорию устойчивости движения. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., – 1987. – 304 с.

14. **Моисеев, Н.Н.** Асимптотические методы нелинейной механики / Н.Н. Моисеев. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука. – 1981. – 400 с.
15. **Брискин, Е.С.** Определение усилий в движителях якорно-тросового типа / Е.С. Брискин, И.С. Пеньшин, Л.Д. Смирная, Н.Г. Шаронов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 14(209). – С. 87-90.

А.Н. Суханов

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМИОГРАММЫ ПЛЕЧЕВОГО ПОЯСА ОПЕРАТОРА ДЛЯ ЭКЗОСКЕЛЕТА ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ *

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
г. Москва, sukhanov-artyom@yandex.ru*

Разработка активного экзоскелета верхних конечностей, инициируемого к движению биопотенциалами мышц, отведёнными с поверхности кожи человека, связана с решением ряда задач, которые должны учитывать индивидуальные психофизиологические особенности оператора. В предыдущих работах было предложено решение, основанное на применении алгоритмов настройки чувствительности на базе оценки качества сигнала и задействования метода построения кривой Фурье, что решало некоторые задачи управления с помощью отведённого потенциала при наличии усталости или тремора, повышая при этом безопасность управления.

В данной работе предложен алгоритм формирования задания для плечевого модуля экзоскелета, который должен учитывать физиологические особенности человека-оператора и особенности метода неинвазивного получения информации об активности мышечных групп.

Предложенное решение

Применение методов управления, основанных на анализе электрической активности мышечных групп человека, к формированию движения манипуляторов со сложной кинематикой, в числе которых можно вы-

*Работа выполнена по теме государственного задания 124012500443-0 «Динамика сложных механических систем, управление движением летательных аппаратов и подвижных объектов, робототехника и биомеханика, микромеханика, механика навигационных и гироскопических систем»

делить экзоскелеты, протезы, а также телеуправляемые системы, обусловлено стремлением разработчиков подобных систем к повышению интуитивности взаимодействия элементов в рамках работы человеко-машинной системы. Стремление к естественному, привычному для человека движению и восприятию повышает качество взаимодействия и эффективность выполнения целевой задачи. Особенно это важно учитывать на этапе обучения оператора, а также при возникновении нештатных ситуаций, способных повлиять на безопасность оператора или окружения. Помимо этого, применение биопотенциалов мышечных групп к управлению позволяет снизить вычислительные мощности системы управления благодаря децентрализации. В данном случае это больше подходит к системам антропоморфного типа, например экзоскелетам.

Для повышения качества сигнала отведённого потенциала с мышцы применяют инвазивный метод, основанный на внедрении или вживлении материала электродов непосредственно в мышечную ткань. Однако требования к атравматичности не позволяют широко использовать данный способ получения сигнала задания, что приводит к необходимости применения неинвазивных методов и средств получения данного сигнала. Среди таких методов можно выделить поверхностную электромиографию, суть которой заключается в размещении ряда электродов на поверхности кожи над залегающими мышцами и получении разности напряжения между соответствующими электродами. Данные электромиограммы мускульных групп, полученные таким способом, будут зашумлены ввиду наличия подкожных проводящих слоёв, а также вариации их проводимости, зависящей от индивидуальных особенностей человека.

Применение алгоритмов фильтрации и предложенных ранее методов настройки чувствительности, как было показано, позволяет убрать ненужные шумы в сигнале и повысить качество управления локтевым звеном экзоскелета, однако применимость данных методов к плечевому звену не оправдана в силу специфики сложного строения плеча человека и расположения мышц в зоне плечевого пояса. В данном случае, применение подобных алгоритмов приводит к получению комплексного сигнала от нескольких мышц, расположенных друг под другом и ориентированных с некоторой вариативностью, зависящей от индивидуальных особенностей оператора – рост, комплекция, тонус и пр.

Помимо этого, кинематика плечевого сочленения экзоскелета должна позволять совершать движения в широком диапазоне отклонения углов, чтобы не создавать коллизий тела человека с элементами конструкции при выполнении сложных движений. Поэтому многие существующие предложения по реализации кинематики плечевого сочленения экзоскелетного устройства предполагают наличие дополнительных

степеней подвижности для организации избыточности. Всё это вкуче создаёт основную сложность задания для системы управления при формировании движения плечевого звена.

Предлагаемый метод состоит в том, чтобы создать на этапе калибровки системы управления с помощью трёхмерного устройства лазерного сканирования плечевого пояса оператора с привязкой к реперным меткам, расположенным на теле. Затем, полученное множество точек при помощи алгоритмов триангуляции и аппроксимации сшивается и переводится в так называемую меш-модель, характеризующую конкретного оператора.

Следующим этапом в алгоритме наступает упрощение детализации модели, который состоит в итеративном подходе к удалению геометрии и заполнению пробелов для достижения оптимального набора полигонов, которое будет соответствовать количеству зон, где и будут располагаться электроды. После этой процедуры выполняется развёртка модели для создания наглядной карты сигналов с ячейками полигонов. Теперь данную двумерную карту можно представить в виде матрицы, столбцы и строки которой будут отвечать за координаты, а параметры в ячейках будут векторами управления, которые формируются на основе данных, полученных с соответствующих датчиков электромиограммы.

Аналогичным образом можно поступить с представлением матрицы векторов состояния для некоторой точки, принадлежащей плечевому звену экзоскелета. Карта, которая создаётся в таком случае, будет описывать положение и ориентацию звена экзоскелета в пространстве в зависимости от выполняемых в процессе обучения движений оператора.

После выполнения калибровочных упражнений возможно применение нейросети, которая по параметрам матрицы управления выявит соответствия текущих намерений оператора и вектора состояния для привода плечевого звена экзоскелета для конкретного оператора.

Выводы

В данной работе предложен алгоритм формирования задания для плечевого модуля экзоскелета, который может учитывать физиологические особенности человека-оператора. Предложенный алгоритм сочетает в себе применение технологий трёхмерного сканирования и создания карты поверхности сложной топологии с применением нейросети для оценки качества сигнала и формирования управления для привода плечевого звена экзоскелета.

1. **Ermolov, I., Knyazkov, M., Semenov, E., & Sukhanov, A. (2021).** The

- Sensitivity Adjustment Technique within the Exoskeleton Control System. *Journal of Artificial Intelligence and Technology*, 1(3), 146–152. <https://doi.org/10.37965/jait.2021.0002>
2. **Stebulyanin M.M.**, Ermolov I.L., Sukhanov A.N., On the Influence of the Moment of Inertia on the Mechatronic Drive Control Quality within the Exoskeleton, IFAC-PapersOnLine, Volume 53, Issue 2, 2020, Pages 10162-10167, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2743>.
 3. **Дерюгина, А. В.** Электрофизиология. Физиология возбудимых тканей : учебно-методическое пособие / А. В. Дерюгина, М. А. Шабалин. — Нижний Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2020. — 80 с
 4. **Cimolato, A.**, Driessen, J.J.M., Mattos, L.S. *et al.* EMG-driven control in lower limb prostheses: a topic-based systematic review. *J NeuroEngineering Rehabil* 19, 43 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01019-1>.

И.М. Тарабукин, С.В. Гусев

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ НЕПОЛНОПРИВОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ПРИВОДА, ОТСЛЕЖИВАЮЩЕГО ЗАДАННУЮ СКОРОСТЬ*

*АНОО ВО «Университет «Сирiuс», Сирiuс
tarabukin.im@talantiuspeh.ru, gusev.sv@talantiuspeh.ru*

Доклад посвящен задаче стабилизации положения равновесия механических систем, у которых имеется один управляющий вход и две или более обобщенные координаты. Механические системы, у которых число обобщенных координат больше числа управляющих входов называются неполноприводными (underactuated), задачам управления такими системами посвящены многочисленные публикации (см. обзор [1]). При управлении неполноприводными системами в качестве модели обычно используются уравнения Лагранжа второго рода. В этой модели управляющим воздействием является сила или момент силы, прикладываемые исполнительным механизмом к системе.

На практике во многих случаях отсутствует возможность непосредственно задавать развиваемые приводами силы или моменты сил.

*Работа поддержана РФГ грант № 23-79-10213 (<https://www.rscf.ru/project/23-79-10213/>).

Обычно управляющим воздействием является линейная или угловая скорости имеющей привод обобщенной координаты. В связи с чем возникает проблема применения законов управления, построенных с использованием уравнений Лагранжа, в системах, где приводы обеспечивают отслеживание заданной скорости, а не прикладываемой силы или момента.

Пусть линеаризованная в окрестности положения равновесия динамика системы имеет вид

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t), \quad (1)$$

где $X \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – вектор состояния, состоящий из отклонений обобщенных координат от положения равновесия и обобщенных скоростей, $u \in \mathbb{R}$ – обобщенная сила, создаваемая приводом системы, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – известные матрицы, $t \in [0, \infty)$ – время.

Обобщенная сила u создается приводом, который зададим абстрактным операторным уравнением

$$u(t) = \mathcal{G}(X(\cdot), v(\cdot), t), \quad (2)$$

где $X(\cdot)$ – состояние системы как функция времени, $v(\cdot)$ – управляющий сигнал, подаваемый на вход привода. Абстрактная форма описания привода использована потому, что при предлагаемом подходе динамики привода несущественна. Требуется только, чтобы привод с достаточной точностью отслеживал заданный сигнал. Уравнение (2) описывает широкий круг электромеханических и других устройств, имеющих собственную внутреннюю динамику.

В дальнейшем объектом исследования является система (1), (2), управляющим входом которой является $v(t)$. Предполагается, что для этой системы при произвольном непрерывном управлении $v(\cdot)$ и любом начальном состоянии $X(0)$ существует единственное решение.

Пусть задан выход системы (1)

$$y(t) = CX(t),$$

где $C \in \mathbb{R}^{1 \times n}$. Для приложений наиболее интересен случай, когда выход y является одной из обобщенных скоростей механической системы, в этом случае вектор C имеет только одну ненулевую компоненту, соответствующую этой скорости. Однако это условие необязательно.

Будем предполагать, что управление v , подаваемое на привод представляет собой желаемое значение выхода y . В частности, если y – обобщенная скорость, то v – желаемое значение этой скорости.

Управления системой (1), (2) строится в виде линейной обратной связи по состоянию системы (1)

$$v(t) = LX(t), \quad (3)$$

Основное требование, накладываемое на привод (2), состоит в том, что привод обеспечивает отслеживание заданного сигнала $v(t)$ в замкнутой системе (1), (2), т.е. обеспечивает «малость» ошибки отслеживания

$|y(t) - v(t)|$. В работе рассматриваются две формулировки этого требования.

Первая описывает «идеальный» привод. В этом случае предполагается, что начиная с некоторого момента времени выход замкнутой системы $y(t)$ совпадает с заданным значением $v(t)$. Хотя это предположение выглядит нереалистичным, теоретически построение такого привода возможно с использованием скользящих режимов, как показано [2]. В случае «идеального» привода предлагаемый регулятор (3) обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы.

Вторая формулировка приближена к практическим задачам: предполагается, что ошибка отслеживания равномерно ограничена

$$|y(t) - v(t)| \leq \delta,$$

где $\delta > 0$ – заданная оценка шибки привода. Доказано, что в этом случае построенный регулятор (3), обеспечивает стабилизацию системы в некоторой ε -окрестности нуля

$$|X(t)| \leq \varepsilon,$$

при всех достаточно больших t . При этом можно гарантировать, что ошибка ε линейно убывает с уменьшением δ .

Предлагаемый подход основан на одновременном синтезе регулятора и квадратичной функции Ляпунова, обеспечивающей стабилизацию.

Результат иллюстрируется экспериментом по стабилизации свободно перемещающегося шарика в верхней точке круговой направляющей, закрепленной в схвате промышленного манипулятора ABB IRB 1600. Требуется, вращая диск, стабилизировать шар в верхнем неустойчивом положении равновесия. Фото установки приведено на рисунке 1.



Рис. 1. Манипулятор с системой «шар на диске»

Сигнал поворота схвата с диском осуществляется с помощью интерфейса EGM (external guided motion) компании АВВ, позволяющего реализовывать управление роботом от компьютера. Привод манипулятора отслеживает задаваемую угловую скорость вращения схвата. Желаемое значение угловой скорости рассчитывается компьютером на основании предложенного подхода с использованием обратной связи от видеокамеры. Эксперименты подтвердили работоспособность реализованной системы.

1. **Yang Liu and Hongnian Yu.** A survey of underactuated mechanical systems // IET Control Theory Applications. 2013. Vol. 7. Issue 7. P.921-935.
2. **I.M. Tarabukin and S.V. Gusev.** An Approach to Sliding Mode Control of Linear Systems with Periodic Coefficients // 17th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS). 2024 P. 29-33.

*В.Ф. Филаретов¹, А.В. Зуев^{1,2}, Д.А. Юхимец¹,
А.А. Тимошенко², И.В. Горностаев^{1,2,3}*

МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМ ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЗВЕННЫМ ПОДВОДНЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ*

*¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
г. Владивосток,*

*²Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева
ДВО РАН, г. Владивосток,*

*³Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
г. Владивосток, timoshenko.aal@mail.ru*

Введение

В настоящее время всё большую актуальность приобретает выполнение сложных технологических операций, в том числе силовых, с применением автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащаемых многозвенными подводными манипуляторами (ПМ). Существующие системы управления (СУ) [1] позволяют выполнять операции, не требующие высокой точности, например, отбор бактериальных матов и введение пробоотборников в грунт. Это обусловлено весьма приближенным учет влияния вязкой среды на звенья ПМ, что приводит к ошиб-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00218

кам как позиционирования рабочих инструментов (РИ) ПМ, так и оказания заданного силового воздействия на объекты работ.

В этой работе ставится задача разработки нового метода синтеза комбинированных позиционно-силовых СУ электроприводами многозвенных ПМ, устанавливаемых на АНПА, работающих в режиме посадки на грунт и жесткой фиксации вблизи объектов работ.

Описание метода синтеза

За основу разработки указанного нового метода был взят подход, ранее успешно применяемый в области промышленной робототехники [2], но с дополнительным учетом переменного влияния вязкой среды на звенья ПМ. Этот учет осуществляется за счет использования более полной динамической модели движения ПМ [3], неизвестные параметры которой (связанные с описанием воздействия вязкой среды) точно идентифицируются [4] в реальных рабочих условиях до начала выполнения технологических операций.

Согласно этому подходу для каждого электропривода (ЭП) ПМ будет синтезирована СУ, обобщенная схема которой показана на рис. 1.

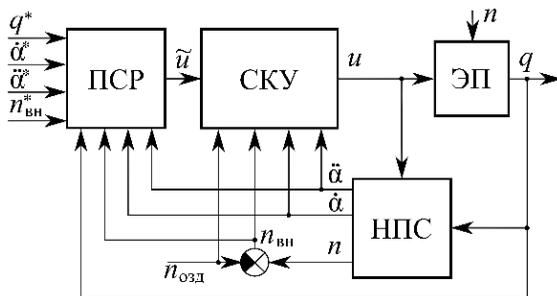


Рис. 1. Обобщенная блок-схема позиционно-силовой СУ ЭП

На рис. 1 введены следующие новые обозначения: ПСР – позиционно-силовой регулятор; СКУ – самоадаптирующееся корректирующее устройство; q, q^* – реальное и программное (желаемое) положения выходного вала редуктора ЭП ПМ; $\dot{\alpha}, \ddot{\alpha}, \dot{\alpha}^*, \ddot{\alpha}^*$ – реальные и желаемые скорости и ускорения вращения ротора ЭП; $n = n_{вн} + n_{озд}$ – суммарный внешний момент, приложенный к выходному валу редуктора ЭП ПМ; $n_{вн}$ и $n_{вн}^*$ – соответственно, реальный и программный моменты, обусловленные воздействием РИ ПМ на объект работ; $n_{озд}$ – составляющая момента n , обусловленная взаимовлияниями между звеньями ПМ и их взаимодей-

ствием с вязкой средой, рассчитываемая с помощью рекуррентного алгоритма решения ОЗД [3]; \tilde{y} , u – сигналы управления, подаваемые соответственно на входы СКУ и ЭП.

Представленная СУ (рис. 1) синтезируются в следующем порядке.

1. Сначала переменные динамические параметры ЭП ПМ стабилизируются на заданном номинальном уровне за счет введения специального СКУ [2], который формирует преобразованный сигнал управления, подаваемый на вход ЭП.

2. Для обеспечения работы этого СКУ и СУ в целом синтезируется НПС [3], позволяющий в реальном масштабе времени производить вычисление текущего значения суммарного внешнего момента n , а также скорости $\dot{\alpha}$ и ускорения $\ddot{\alpha}$ вращения ротора ЭП. За счет этого при реализации предлагаемой СУ необходимо будет измерять только угла поворота q выходного вала редуктора ЭП, что позволяет значительно снизить стоимость реализации системы.

3. Затем для этого ЭП с застabilизированными параметрами выполняется синтез ПСР, позволяющего обрабатывать заданные перемещения при одновременном создании необходимого момента. Для этого используется известный метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) на основе квадратичного критерия качества [2].

Управление, которое формирует указанный ПСР, с учетом использования ранее синтезированных СКУ и НПС имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \tilde{y} = & -D_1^\lambda q + D_1^{\text{BX}} q^* - D_2^\lambda \dot{\alpha} + (D_2^\lambda - D_3^{\text{BX}} k_\omega k_M / L) \dot{\alpha}^* + (D_3^\lambda + D_3^{\text{BX}} R / L) J_n \dot{\alpha}^* - \\ & - D_3^\lambda J_n \ddot{\alpha} - (D_3^\lambda + D_2^{\text{BX}} / J_n) \tilde{n}_{\text{вн}} + (D_3^\lambda + D_2^{\text{BX}} a_{23} + D_3^{\text{BX}} a_{33}) \tilde{n}_{\text{вн}}^* - D_3^{\text{BX}} \dot{\tilde{n}}_{\text{вн}}^*, \end{aligned}$$

где D_1^λ , D_2^λ , D_3^λ , D_1^{BX} , D_2^{BX} , D_3^{BX} – постоянные коэффициенты, которые рассчитываются по методу АКОР [2]; R , L – соответственно сопротивление и индуктивность якорной цепи двигателя ЭП, k_ω , k_M – коэффициенты противо-ЭДС и крутящего момента; J_n – номинальный момент инерции вращающихся частей ЭП.

Проведенное моделирование работы предложенной СУ показало, что при движении ПМ по криволинейной пространственной траектории с непрерывным оказанием заданного силового воздействия динамическая ошибка позиционирования его РИ не превышала 1.5 мм, а относительная ошибка по оказанию силового воздействия – не более 5%.

Заключение

В работе был предложен новый метод синтеза систем позиционно-силового управления ЭП ПМ, устанавливаемых на борту АНПА, которые обеспечивают точное выполнение контактных силовых технологических операций с помощью этих ПМ в режиме посадки или жесткой фиксации АНПА.

1. **Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Юрманов А.П., Пятавин П.А., Кацурин А.А.** Система позиционно-силового управления подводными аппаратами с многозвенными манипуляторами для выполнения контактных манипуляционных операций // Подводные исследования и робототехника. 2022. Т. 42. № 4. С. 40–52.
2. **Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С.** Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций. М.: Наука, 2018. 232 с.
3. **Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Тимошенко А.А.** Идентификация параметров взаимодействия звеньев подводных манипуляторов с вязкой средой для точного автоматического выполнения манипуляционных операций. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2025. Т. 26. № 2. С. 98–108.
4. **Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Тимошенко А.А.** Идентификация параметров взаимодействия звеньев подводных манипуляторов с вязкой средой для точного автоматического выполнения манипуляционных операций. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2025. Т. 26. № 3. С. 128–138.

А.А. Хачатрян, Е.С. Брискин, В.А. Серов

ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ ТРЕХСЕКЦИОННОГО РОБОТА ПО РАЗЛИЧНО ОРИЕНТИРОВАННЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ

*Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград, aram-081097@mail.ru, dtm@vstu.ru*

Введение

В условиях развития робототехники появляется возможность вы-

полнения тех или иных технологических операций на вертикальных и потолочных поверхностях строительных и машиностроительных конструкций [1]. Разрабатываемые для этих целей роботы повышают безопасность выполнения работ на высоте и могут заменить труд человека в экстремальных и опасных для него условиях [2].

Существует большое количество роботов, использующих для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям движители, принцип действия которых основан на взаимодействии с поверхностью посредством постоянных магнитов, электромагнитов, адгезионных сил, крюков и шипов, как захватов [3, 4]. Известны и роботы, перемещающиеся по вертикальным поверхностям за счет тросовых систем [5].

Основными недостатками существующих роботов, использующих перечисленные движители, являются ограничения по виду и ориентации поверхности, по которой необходимо перемещаться [6].

Постановка задачи

В результате проведенного анализа недостатков роботов с известными конструктивными схемами, рассматривается возможность применения трехсекционного робота для перемещения по различно ориентированным поверхностям без ограничения по их видам и ориентациям. Основной задачей является разработка алгоритмов управления линейными приводами и тормозными устройствами трехсекционного робота.

Решение задачи

Разработанный трехсекционный робот, способный перемещаться по различно ориентированным поверхностям, представлен на рисунке 1. Конструктивная схема робота представляет собой одну исполнительную секцию, перемещающуюся по вертикальной поверхности и две опорные секции. При этом каждая секция имеет по три шариковые опоры и три тормозные устройства. Шариковые опоры необходимы для перемещения с минимальным трением. Тормозные устройства обеспечивают надежный контакт секций с поверхностями. Каждая из опорных секций связана с исполнительной секцией посредством линейного привода. Управление движением робота осуществляется изменением длины линейных приводов и выбором заторможенных опор секций робота. Перемещение могут осуществлять как исполнительная секция, при выполнении технологической операции на рабочей поверхности, так и опорные секции, при обеспечении горизонтального перемещения робота вдоль рабочей поверхности.

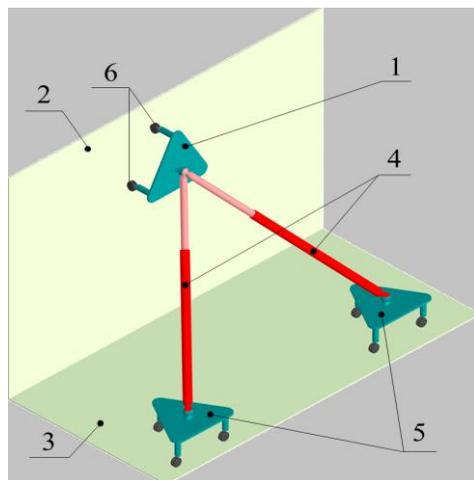


Рис. 1. Модель трехсекционного робота:

- 1 – Исполнительная секция; 2 – Рабочая поверхность;
- 3 – Горизонтальная (опорная) поверхность;
- 4 – Линейные приводы механизма перемещения;
- 5 – Опорные секции; 6 – Шариковые опоры с тормозными устройствами

Предложенная конструктивная схема обладает преимуществами по сравнению с имеющимися разработками роботов, заключающимися в отсутствии ограничений по ориентации, материалу, форме и степени загрязнения поверхности, по которой необходимо перемещаться исполнительной секции робота.

Основным недостатком разработанного робота является ограниченная рабочая зона, что обусловлено концепцией робота, работоспособность которого обеспечивается при наличии двух различно ориентированных поверхностей: опорной – для размещения и перемещения опорных секций; рабочей – для перемещения и удержания исполнительной секции.

Разработана лабораторная модель, для проведения экспериментов, оценки работоспособности робота и адекватности разработанных математических моделей.

Выводы

Определена конструктивная схема мобильного робота, позволяю-

щая перемещаться по различно ориентированным поверхностям посредством управления линейными приводами и тормозными устройствами опор секций робота. Разработана натурная модель робота, подтвердившая его работоспособность и адекватность разработанных математических моделей.

1. **Silva, Manuel & Tenreiro Machado, José.** (2010). A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion. 10.5772/8826.
2. **Градецкий, В.Г.** Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред / В.Г. Градецкий, М.М. Князьков // Робототехника и техническая кибернетика. - 2014. - № 1 (2). - С. 9-16.
3. **Сырых, Н. В.** Роботы вертикального перемещения с контактными устройствами на основе постоянных магнитов: конструкции и принципы управления контактными устройствами / Н. В. Сырых, В. Г. Чашухин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 5. – С. 163-173.
4. **Daltorio, K. Mini-Whegs TM Climbs Steep Surfaces Using Insect-inspired Attachment Mechanisms / Daltorio, Kathryn and Wei, Terence and Horchler, Andrew and Southard, Lori and Wile, Gregory and Quinn, Roger and Gorb, Stanislav and Ritzmann, Roy // I. J. Robotic Res. – Vol. 28 – 2009. – pp. 285-302.**
5. **Шаронов, Н.Г.** О перемещении роботов по вертикальной шероховатой поверхности с помощью тросовых движителей / Н.Г. Шаронов, М.И. Ефимов // Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, мехатроника и робототехнические системы. - Волгоград, 2019. - № 3 (226). - С. 51-54.
6. **Хачатрян, А. А.** Мобильные Робототехнические системы, перемещающиеся по произвольно ориентированным поверхностям: основные недостатки, Достоинства, перспективы использования / А. А. Хачатрян // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2022. – № 4(263). – С. 57-64. – DOI 10.35211/1990-5297-2022-4-263-57-64. – EDN CURQSG.

ПОСТРОЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ КВАДРОКОПТЕРОВ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ*

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
г. Москва
a.khorosheva@yandex.ru, e-mail: chern@ipmnet.ru

Введение

В последние годы исследованию возможных движений квадрокоптеров уделяется большое внимание в научной литературе, см., например, работы [1-2]. В книге [2] излагаются различные подходы к решению задач управления беспилотными летательными аппаратами, в том числе квадрокоптерами. В частности, описывается подход, основанный на обратной задаче динамики.

В данной работе проводится построение возможных траекторий квадрокоптера в вертикальной плоскости. При построении траекторий используется полуобратный подход, при котором задаются некоторые элементы движения, а остальные элементы и управляющие силы определяются в ходе решения.

Математическая модель

Рассматривается математическая модель квадрокоптера, движущегося в вертикальной плоскости Oxz и состоящего из прямоугольной платформы и четырех пропеллеров. Аппарат обладает плоскостью симметрии, которая остается вертикальной при рассматриваемом движении. Симметричные пропеллеры создают одинаковые управляющие силы. На рис. 1 изображены силы, действующие на аппарат: сила тяжести, сила сопротивления R и управляющие силы F_1 и F_2 .

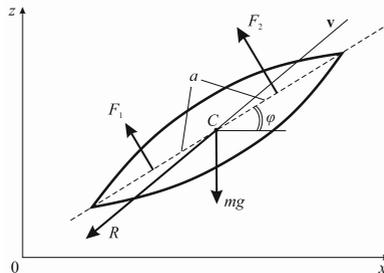


Рис. 1. Силы, действующие на аппарат

*Работа выполнена в соответствии с государственным заданием 124012500443-0.

Уравнения, описывающие движение квадрокоптера в вертикальной плоскости, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v_x, \quad \dot{z} = v_z, \\ m\dot{v}_x &= -cvv_x - (F_1 + F_2) \sin \varphi, \\ m\dot{v}_z &= -cvv_z + (F_1 + F_2) \cos \varphi - mg, \\ J\dot{\omega} &= (F_2 - F_1)a, \quad \dot{\varphi} = \omega, \end{aligned} \quad (1)$$

где точками обозначены производные по времени t ; φ – угол оси аппарата l с горизонтальной осью Ox ; x, z – координаты точки C в плоскости Oxz ; m – масса аппарата; g – ускорение силы тяжести; v_x, v_z – проекции вектора \mathbf{v} на оси системы Oxz ; c – постоянный коэффициент сопротивления; a – расстояние от центра масс аппарата до точки приложения сил F_1, F_2 ; J – момент инерции аппарата относительно горизонтальной оси, проходящей через центр масс C ; ω – угловая скорость аппарата. Моментом аэродинамических сил пренебрегаем.

Построение траекторий

В динамике систем различают прямую и обратную задачи: в прямой задаче задаются силы и определяется движение системы, а в обратной задаче задается движение и определяются потребные для этого силы. В данной работе используется подход, который можно назвать полубратным: некоторые элементы движения задаются, а остальные элементы и необходимые для этого силы подлежат определению.

Рассмотрим сначала подход, при котором задаются две компоненты скорости аппарата $v_x(t), v_z(t), t \in [0, T]$, где T – заданный момент окончания движения. Далее вычисляются скорость $v(t)$ и угол ориентации аппарата $\varphi(t)$. Угловая скорость $\omega(t)$ определяется из второго уравнения (2), далее вычисляются силы $F_1(t)$ и $F_2(t)$. Координаты $x(t), z(t)$ определяются путем интегрирования уравнений (1) при начальных условиях $x(0) = 0, z(0) = 0$.

Рассмотрим другой вариант подхода, при котором задается одна из компонент скорости, например $v_z(t)$, а также угол $\varphi(t)$. Тогда путем интегрирования при условии $v_x(0) = v_0$ найдем функцию $v_x(t)$. Далее определим угловую скорость $\omega(t)$, силы $F_1(t), F_2(t)$ и координаты $x(t)$ и $z(t)$.

Заметим, что задаваемые функции $v_x(t)$, $v_z(t)$ и $\varphi(t)$ могут содержать неизвестные параметры, которые должны определяться в ходе построения движения, исходя из задаваемых краевых условий.

Предложенный подход проиллюстрирован примерами построения траекторий двух типов: смена эшелона, то есть переход от горизонтального полета на одной высоте к горизонтальному полету на другой высоте, и мертвая петля (петля Нестерова).

Для построения траектории при подъеме (спуске) компоненты скорости и угол ориентации могут быть заданы в виде простых квадратичных функций времени, удовлетворяющих заданным краевым условиям.

При выполнении аппаратом мертвой петли вертикальная скорость $v_z(t)$ возрастает от 0 до некоторого максимального значения на участке подъема, затем убывает до нуля в верхней точке петли и продолжает убывать до некоторого отрицательного значения при снижении, после чего снова возрастает до нуля в конце полета. Аппроксимировать вертикальную скорость можно двумя способами: двумя дугами парабол, симметричными друг другу относительно $t = T/2$, или синусоидой. Если вертикальная скорость задана в виде синусоиды, то функция $v_z(t)$ имеет непрерывные производные по времени любого порядка, что приводит к непрерывной зависимости сил F_1 и F_2 от времени.

Приводится ряд построенных траекторий.

Заключение

Предложен полуобратный подход к построению траекторий квадрокоптера. Рассмотрены два типа движений аппарата в вертикальной плоскости: смена высоты горизонтального полета и выполнение мертвой петли. Рассмотрено несколько вариантов реализации траекторий с заданными свойствами. Полученные результаты могут быть полезны для анализа и построения траекторий беспилотных аппаратов.

1. **Hehn, M.** Quadcopter Trajectory Generation and Control / M. Hehn, R. D'Andrea // IFAC Proc. – 2011. – Vol. 44. –P. 1485–1491.
2. **Моисеев В.С.** Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: монография. – Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. –768 с.

ПОСТУПАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА С ВНУТРЕННЕЙ ПОДВИЖНОЙ МАССОЙ В СРЕДЕ С КВАДРАТИЧНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ*

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
г. Москва
a.khorosheva@yandex.ru, e-mail: chern@ipmnet.ru*

Введение

Мобильные роботы, движение которых основано на управляемом перемещении внутренних подвижных масс, называют капсульными роботами или вибророботами. Такие роботы не имеют внешних подвижных элементов и способны перемещаться в различных средах, осуществлять измерения, мониторинг и доставку грузов. Динамика вибророботов в среде с квадратичным сопротивлением изучалась в ряде работ, например [1,2]. Обзор и анализ литературы по данной тематике представлен в книге [3].

Основная часть

Рассматривается управляемая система, состоящая из двух твердых тел: корпуса массы M и внутреннего тела массы m (рис. 1). Система движется поступательно и прямолинейно вдоль оси x в жидкости, которая действует на корпус квадратичной силой сопротивления. Сила взаимодействия между телами реализуется двигателем внутри корпуса.

Уравнения движения системы после перехода к безразмерным переменным имеют вид:

$$\dot{v} = \begin{cases} -c_+ v^2 - u & \text{при } v \geq 0, \\ c_- v^2 - u & \text{при } v < 0, \end{cases} \quad (1)$$
$$\mathfrak{A}(\dot{v} + \dot{\eta}) = u, \quad \dot{x} = v, \quad \dot{\xi} = \eta,$$

где $\mathfrak{A} = m / M$, u – управление, которое принимаем равным ± 1 , x – смещение корпуса относительно некоторой инерциальной системы координат, v – скорость корпуса, ξ – смещение внутренней массы относительно корпуса, η – скорость этой массы относительно корпуса, c_+ и c_- – коэффициенты сопротивления при движении корпуса «вперед» и «назад», соответственно. Полагаем $c_+ < c_-$.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-11-00128, // rscf.ru/project/23-11-00128/

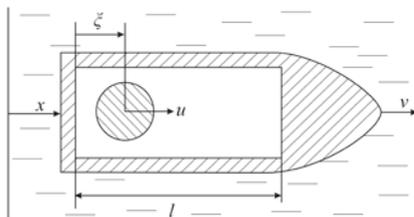


Рис. 1. Механическая система

Рассматриваются поступательные движения тела (корпуса) с внутренней подвижной массой, управляемой силой взаимодействия корпуса с внутренней массой.

Предполагаем, что внутренняя масса совершает колебания относительно корпуса внутри некоторой полости безразмерной длины l . Введем моменты времени: θ – момент достижения внутренней массой конца полости, T – момент возвращения этой массы к началу полости, τ_0 и τ_* – моменты смены знака скорости $v(t)$ с «+» на «-» и с «-» на «+», соответственно. Поведение скорости и смещения внутренней массы характеризуется соотношениями: $\eta(t) \geq 0$ при $t \in [0, \theta]$, $\eta(t) \leq 0$ при $t \in [\theta, T]$, $\eta(0) = \eta(\theta) = \eta(T) = 0$, $\xi(0) = \xi(T) = 0$, $\xi(\theta) = l$.

Чтобы обеспечить желаемое движение (разгон и торможение) внутренней массы, управляющая сила должна чередовать участки положительных и отрицательных значений как при движении массы от 0 до l , так и при движении от l до 0. Моменты изменения значения управляющей силы с «1» на «-1» обозначим τ_1 , а с «-1» на «1» – τ_2 . Характерные моменты времени θ , T , τ_0 , τ_1 , τ_2 , τ_* заранее неизвестны и подлежат определению в процессе решения. Справедливы неравенства: $0 < \tau_1 < \tau_* < \theta < \tau_2 < T$ при $v_0 \leq 0$, $0 < \tau_0 < \tau_1 < \tau_* < \theta < \tau_2 < T$ при $v_0 > 0$. Здесь $v_0 = v(0)$ – начальная скорость корпуса.

Интегрируя уравнения (1) при начальных условиях $v(0) = v_0$, $x(0) = \eta(0) = \xi(0) = 0$ последовательно построим функции $v(t)$, $x(t)$, $\eta(t)$, $\xi(t)$ на всем интервале $[0, T]$.

Моменты τ_* и τ_0 определяются равенствами $v(\tau_*) = 0$, $v(\tau_0) = 0$. Численно решая систему уравнений: $\eta(\theta) = 0$, $\xi(\theta) = l$, находим τ_1 и θ . Неизвестные τ_2 и T находим как решение системы: $\eta(T) = 0$, $\xi(T) = 0$.

Уравнения (1) содержат, помимо параметров c_+ , c_- и \mathfrak{A} , безразмерный параметр l , равный отношению длины полости к расстоянию, на котором скорость корпуса уменьшается в e раз при неподвижной внутренней массе. При движении в сильно вязкой среде параметр l может быть больше 1, но в обычных условиях перемещения аппарата в воде он существенно меньше 1.

Исследовались многократные повторения построенных движений, при которых скорость, достигнутая в конце каждого цикла, принималась в качестве начальной скорости для следующего цикла. Как показали численные расчеты, после многократного повторения движение приближается к режиму, периодическому по скорости, для которого имеет место условие: $v(0) = v(T)$. Такой режим рассмотрен в [2]. Периодические режимы, выработанные в результате многократных повторений, представляют собой движения, которые могут осуществляться длительное время. Важной их характеристикой является средняя скорость перемещения, которая отражает возможности данной системы как транспортного средства. Получены зависимости средней скорости от параметров.

Заключение

Исследованы возможные поступательные движения управляемой системы, состоящей из двух твердых тел: корпуса и внутренней подвижной массы. Система движется прямолинейно в среде, сопротивление которой пропорционально квадрату скорости корпуса и зависит от направления движения. Управление осуществляется при помощи внутренней силы взаимодействия между телами. Построены возможные траектории движения при различных параметрах системы. Показано, что движения приближаются к периодическим режимам, которые могут осуществляться длительное время. Определена средняя скорость перемещения в зависимости от параметров системы.

1. **Ху, Ж.** Improving performance: recent progress on vibration-driven locomotion systems / J. Xu, H. Fang // *Nonlinear Dynamics*. – 2019. – Vol. 98, №4. – P. 2651–2669.
2. **Глазков, Т.В.** Периодические движения в жидкости тела, управляемого силой его взаимодействия с внутренней массой / Т.В. Глазков, Ф.Л. Черноусько // *Доклады РАН. Физика, технические науки*. – 2024. – Т. 518. – С. 35–42.
3. **Черноусько, Ф.Л.** Динамика мобильных систем с управляемой конфигурацией. / Ф.Л. Черноусько, Н.Н. Болотник – М.: Физматлит, 2022. – 464 с.

**МОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ
С ПЕРСПЕКТИВНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ:
МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ, ПРИМЕНЕНИЕ***

*ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград, dpt@vstu.ru*

Введение

Мобильные роботы [1-6], в сравнении с «традиционными» транспортными машинами, отличаются многообразием типов используемых движителей и условий, в которых происходит движение. Каждым условиям движения наилучшим образом соответствует конкретный тип движителей, что требует особых подходов к управлению роботом с учётом условий окружающей среды.

Под движителями понимается несколько механизмов (как однотипных, так и различных по кинематической схеме и / или принципам создания тяговых усилий), согласованное управление приводами которых обеспечивает заданное движение мобильного робота. Особенностью рассматриваемых движителей мобильных роботов является возможность реализации дискретного взаимодействия с поверхностью, относительно которой осуществляется перемещение и управления тягово-цепным свойствами движителя.

В качестве заданного, целевого движения мобильного робота рассматривается прежде всего движение корпуса, однако дискретный характер взаимодействия, обусловленный использованием шагающих и «шагающеподобных» механизмов [7, 8] и обеспечивающий возможность организации наперед заданной походки с переносом опор, позволяет ставить и рассматривать задачи движения по / около поверхности с препятствиями.

Применение новых конструкций движителей и алгоритмов управления движением позволяет создавать мобильные роботы, движение которых осуществляется за счет согласованного управления приводами нескольких движителей с учетом ограничений, накладываемых на движение корпуса и движителей со стороны поверхности или среды перемещения.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-2100477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>.

Механика и алгоритмы управления движителями

Предложены конструкции, алгоритмы управления и исследованы модели движения, прототипы наземных и подводных мобильных роботов с новыми типами движителей (рис. 1):

- с цикловыми и ортогональными механизмами шагания, в том числе двоянные, полноповоротные и с изменяемой геометрией;
- поворотнo-заклинивающие и скользяще-заклинивающие;
- с перемещением внутренних масс и изменяемой за счет опорных стоек структурой связей с опорной поверхностью;
- якорно-тросовые движители подводных платформ и гибридные (различные по своей конструкции и / или физическим принципам) движители роботов вертикального перемещения.

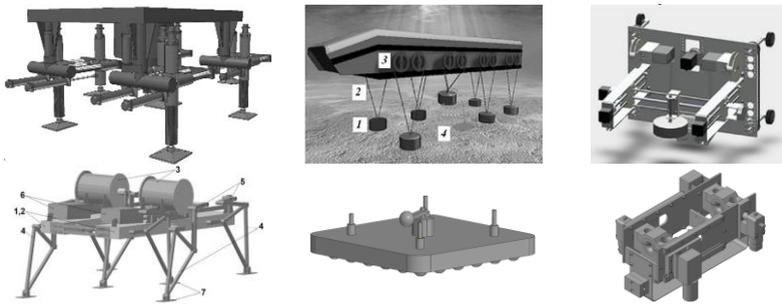


Рис. 1. Мобильные роботы с новыми типами движителей

Проведен [9] анализ способов распределения тяговых усилий в различных движителях, рассмотрены особенности управления механическими системами в случае превышения количества приводов над числом степеней свободы. Решены задачи управления силами для реализации режима движения, обеспечивающего оптимальность по заданному критерию, например, минимума энергозатрат, и управления при заданном режиме движения и функциональной зависимости между ними [10, 11].

Рассмотрено [12] перемещение «капсульного» робота с приводом внутренней массы (груза), движущегося за счет совершаемых грузом стационарных движений и попеременно фиксирующих различные точки корпуса опорных стоек. За счет изменения таких параметров как порядок фиксации опор, соотношения подвижных масс робота и скорости их движения, реализуются различные траектории движения робота, в том числе в заданном коридоре.

Рассмотрены [13] особенности применения якорно-тросовых двигателей и описан принцип их работы. Исследовано равномерное поступательное перемещение подводного робота с помощью якорно-тросовых двигателей, продемонстрирован пример управления силами в тросах при заданной функциональной зависимости между ними.

Разработана и исследована [14] модель и алгоритмы движения по вертикальным поверхностям с неровностями мобильного робота с установленными на корпусе тросовыми приводами, колесными опорами (опорными стойкам) с возможностью блокировки и обеспечивающего управление касательными составляющими реакции опорной поверхности привода перемещения дополнительного груза для изменения центра масс корпуса.

Использование механизмов шагания, попеременно взаимодействующих с окружающим пространством, и дополнительных приводов (например, обеспечивающих управление положением центра масс корпуса) приводит к необходимости рассмотрения мобильного робота как механической системы с переменной структурой, имея ввиду как изменение положения опор, так и потенциально возможное изменение числа находящихся в опоре, количество которых «избыточно» в смысле соотношения между числом степеней свободы мобильного робота как механической системы и числа независимых приводов (двигателей).

Заключение

Применение гибридных (различных по своей кинематической схеме и / или физическим принципам) систем передвижения мобильных роботов и развитие теории оптимизации управления приводами подобных систем, в том числе с учетом экстремальных, неподготовленных условий окружающей среды (например, по неподготовленной поверхности, под водой или около дна водоема, в то числе при взаимодействии с произвольно расположенными объектами), а также одновременной с движением робота работой манипулятора или технологического оборудования позволяет создавать робототехнические системы с новыми возможностями.

1. **Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н.** Динамика мобильных систем с управляемой конфигурацией. М.: Физматлит, 2022. 464 с.
2. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калинин, Л. Н. Кравчук. – М.: Наука, 2001. – 359 с.

3. **Ермолов И. Л.** Применение роботов вертикального перемещения для очистки корпусов судов от обрастаний // Подводные исследования и робототехника. – 2024. – № 3(49). – С. 76-82.
4. Механика миниатюрных роботов / В. Г. Градецкий, Л. Ф. Фомин, В. Г. Чашухин, М. М. Князьков. – М.: Наука, 2010. – 264 с.
5. **Павловский В.Е.** О разработках шагающих машин // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2013. – № 101. – С. 1–32.
6. **Голубев, Ю.Ф.** Экстремальные локомоционные возможности инсекто-морфных роботов / Ю.Ф. Голубев, В.В. Корянов – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2018. – 212 с.
7. **Брискин, Е. С.** Некоторые проблемы при разработке мобильных роботов с шагающими и «шагающеподобными» движителями / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023). – Волгоград: ВолгГТУ, 2023. – С. 49-54.
8. **Брискин, Е. С.** Управляемое движение мобильных роботов с шагающими и "шагающеподобными" движителями / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов // Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019). – Дивноморское: ЮФУ, 2019. – С. 119-121.
9. **Шаронов, Н. Г.** Тягово-динамический расчет и оптимальное управление приводами движителей мобильных роботов, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью / Н. Г. Шаронов, Е. С. Брискин // XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2021. Дивноморское – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2021. – С. 61-63.
10. **Брискин Е.С., Платонов В.Н., Шаронов Н.Г., Устинов С.А.** Об оптимальном распределении тяговых усилий в тросовых движителях мобильных роботов. Мехатроника, автоматизация, управление. 2024; 25(11):596-602.
11. Об управлении движением механических систем с избыточным числом управляющих воздействий / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2019. - № 3. - С. 48-54.
12. Mathematical Model and Design of the Mobile Robot with Propellers Which Working on the Periodic Jamming Effect / D. V. Bordyugov, E. S. Briskin, N. G. Sharonov // Interactive Collaborative Robotics. 9th International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Mexico, 2024. – P. 293-305.

13. **Брискин, Е.С.** Управление движением подводного мобильного робота с якорно-тросовыми движителями / Е.С. Брискин [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2 (19). – С. 39–45.
14. **Шаронов, Н.Г.** О перемещении роботов по вертикальной шероховатой поверхности с помощью тросовых движителей / Н.Г. Шаронов, М.И. Ефимов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 3 (226). – С. 51–54.

РАЗДЕЛ 2
ПРИМЕНЕНИЕ
И УСТРОЙСТВО
РОБОТОВ

**РАЗВИТИЕ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ
ВЕРТОЛЁТНОГО ТИПА ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗАДАЧ
В УНИФИЦИРОВАННЫХ УСЛОВИЯХ УПРАВЛЕНИЯ**

priem_antsev@mail.ru

Беспилотная авиация вносит значительные изменения в текущий технологический уклад в различных сферах, от сельского хозяйства до экологии. Беспилотные авиационные системы (далее - БАС) стали катализатором технологической революции, внося значительные изменения в нашу повседневную жизнь.

Всему миру известны успешные примеры применения БАС в экспресс-логистике — доставка медицинских препаратов в Руанде, курьерские сервисы от Wing (Alphabet), Amazon Prime Air.

В сельском хозяйстве беспилотники повышают продовольственную безопасность через точное земледелие: мониторинг состояния посевов, распределение удобрений и пестицидов, прогнозирование урожая.

Беспилотные авиационные системы позволяют проводить мониторинг экосистем, отслеживать состояние лесов, водоемов и атмосферы. Примеры: использование БАС для борьбы с браконьерством в Кении, контроль загрязнений воздуха в Китае, мониторинг ледников в Арктике. БАС используются для изучения состояния земель, рек и морей, отслеживания популяций животных, для сбора климатических данных и т.п.

Медленно, но верно мы движемся в сторону создания бесшовного цифрового неба, т.е. единой, интегрированной среды управления воздушным движением, которая объединяет данные и процессы всех участников воздушного пространства без технических и административных границ. Именно такая парадигма позволяет над создать унифицированные условия управления.

Принцип «бесшовного неба» состоит в том, что летательные аппараты (пилотируемые и беспилотные воздушные суда (далее - БВС), аэростаты, космические спутники и т.д.), которые находятся на разных высотах, движутся на разных скоростях и в различных направлениях, находятся в одном информационном пространстве. Они могут друг друга идентифицировать, обмениваться данными, пользоваться друг другом как промежуточными станциями хранения и передачи информации. Таким образом, всё воздушное и безвоздушное пространство становится «бесшовным» — единым, не имеющим разграничений по высотам.

Для реализации принципов «бесшовного неба» необходима унифицированная, построенная на исключительно российском ПО, цифровая

платформа с широким внедрением функций искусственного интеллекта, способная анализировать колоссальные объемы данных, поступающих от всех участников и элементов «бесшовного воздушного пространства», от наземной инфраструктуры до спутников, находящихся на геостационарной орбите.

Необходимы также:

- информационная инфраструктура, включая гибридные сети навигации и связи, без которых невозможно создание коммерческих сервисов и услуг, формирующих сам принцип «бесшовности»;

- системы обеспечения безопасности полетов (повышение уровня надежности самых БВС, системы выявления и уклонения от препятствий, системы «анти-дрон»);

- искусственный интеллект и машинное обучение – для обработки данных с датчиков, принятия решений и адаптации к меняющимся условиям;

- сенсоры и системы восприятия – камеры, лидары, радары и GPS, обеспечивающие сбор информации об окружающей среде и положении объекта;

- системы навигации и позиционирования – точное определение местоположения и маршрута без участия оператора;

- автоматическое управление полетом – программное обеспечение и системы, позволяющие выполнять маневры и миссии без вмешательства человека;

- кибербезопасность – защита от взломов и несанкционированного доступа.

Эти технологии в совокупности обеспечивают автономность, безопасность и эффективность беспилотных авиационных систем, открывая перед ними новые горизонты. Вероятно, через уже через несколько лет бесшовное цифровое небо станет реальностью, а не концепцией. За эти годы нам предстоит преодолеть множество ограничений - разнородность систем и стандартов в разных странах, юридические и суверенные барьеры, кибербезопасность, высокая стоимость модернизации и необходимость координации множества участников. Это сложный процесс, в котором участвуют государственные авиационные власти, операторы воздушного движения, авиакомпании, поставщики технологий, разработчики программного обеспечения и международные организации.

Для снятия ограничений важны международные соглашения по стандартам и оперативному взаимодействию, инвестиции в обновление инфраструктуры и повышение квалификации персонала, а также разработка унифицированных протоколов безопасности и обмена данными.

Среди всего разнообразия аэродинамических схем БВС следует выделить вертолётный тип, имеющий огромные перспективы применения

вследствие своих неоспоримых преимуществ: длительного времени полёта, хорошей грузоподъёмности и возможности вертикального взлёта и посадки на неподготовленную поверхность.

Уже сегодня БАС вертолётного типа широко используются в различных отраслях промышленности, таких как нефтегазовая, транспортная, строительная, сельское хозяйство. Они применяются для доставки грузов, решения задач мониторинга, выполнения аэрофотосъёмки и картографирования, проведения геологоразведочных работ, контроля состояния трубопроводов и ЛЭП, поддержки поисково-спасательных операций.

Беспилотные вертолёты трансформируют промышленное производство за счет автоматизации инспекций, мониторинга оборудования, контроля качества и доставки материалов на труднодоступные площадки. Это сокращает издержки, повышает безопасность и ускоряет процессы. В добыче ресурсов БАС помогают оценивать состояния карьеров и нефтепроводов без риска для людей.

Ожидается, что благодаря развитию технологий «бесшовного неба» в скором будущем беспилотные вертолёты получат еще большее распространение. Их начнут применять в страховании для оценки ущерба, в архитектуре и строительстве для 3D-моделирования объектов, в поисково-спасательных операциях для ретрансляции сигналов и организации сетей связи.

*Ф.М. Бельченко, И.Л. Ермолов, Г.Н. Нагайцев,
А.Н. Суханов, П.П. Остриков*

АЛГОРИТМЫ НАДВОДНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ПОИСКА ПРОМЫСЛОВЫХ РЫБ*

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва,
ipt@iptnet.ru, philepp@mail.ru*

Введение

В настоящей работе рассматриваются возможности надводной съёмки с БПЛА при поиске косяков промысловых рыб. В последние годы проводились различные работы по использованию беспилотных летательных аппаратов для рыборазведки [1]. Одним из простых способов обнаружения рыб является оптическое наблюдение с воздуха. Но применение данного метода осложняется различными явлениями на воде, которые зависят от скорости ветра (рябь, волны), солнечного света (блики),

*Работа выполнена по гранту РНФ № 24-61-00025 "Разработка методов поиска скоплений промысловых рыб с помощью беспилотных летательных аппаратов"

влажность и время суток (туман, сумеречные условия). Далее предлагаются несколько алгоритмов обработки фото- и видеоизображений, которые в комбинации могут дать положительный результат.

Предлагаемые решения

Основными требованиями к алгоритмам для выборозведки оптическими методами являются:

- Простота реализации и комбинирования.
- Возможность запуска на вычислителях беспилотников.
- Возможность работы без дополнительного оборудования.

Основными паразитными эффектами, возникающими при съемке промышленных объектов (не учитывая негативные эффекты, вызванные погодными условиями), являются поглощение и рассеивание водой света, отраженного с поверхности воды и тел рыб. При относительно большой глубине скопления рыб данные паразитные эффекты вызывают размытие границ скопления с окружающей толщей воды, а затем практически полное слияние с ней [2].

В некоторых случаях данный эффект можно исправить методом нормализации гистограммы яркости изображения. Данный метод применяется для задач подводной съемки и позволяет увеличить контрастность изображения (рис. 1).



Рис. 1. Метод эквализации гистограмм при съемке в бассейне

Значительно сложнее вести наблюдение при небольших просветах, создающих на воде чередование темных и светлых пятен. Так же яркое солнечное освещение при штилевом море также затрудняет наблюдения из-за бликов па поверхности воды. Для решения данных проблем предлагается использовать алгоритмы Навье-Стокса (при большом количестве рассеянных бликов) и алгоритм интерполяции (для устранения еди-

ничных резких бликов). Для идентификации количества бликов на поверхности воды можно применять адаптивные пороговые фильтры для изображения оттенков серого с настройкой порога для белого отраженного света (рис. 2).



Рис. 2. Алгоритм Навье-Стокса для уменьшения бликов на видеоизображении

Для уменьшения отображения ряби на воде был использован алгоритм FFT-фильтрации, который:

- Преобразует изображение в частотную область.
- Обнуляет высокие частоты (круговая маска).
- Возвращает обратно в пространственную область.

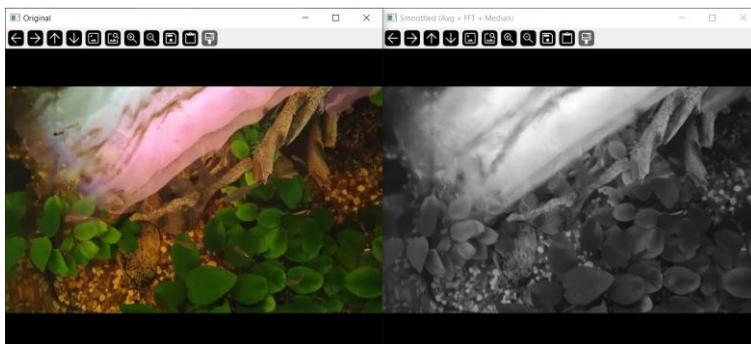


Рис. 3. FFT-фильтр при съемке аквариума над водой

Рассмотренные алгоритмы имеют низкие требования к вычислительным устройствам и могут применяться совместно с интеллектуальными алгоритмами распознавания промысловых рыб.

Заключение

В настоящей работе подбираются алгоритмы для улучшения видимости косяков рыб, находящихся близко к поверхности воды. Далее будут производиться испытания алгоритмов для автономной идентификации косяков по известным аэровизуальным признакам [3].

Применение подобных алгоритмов, позволяющих оперативно получать информацию о параметрах скоплений промысловых рыб с помощью беспилотных летательных аппаратов, позволит улучшить прогнозирование локализации выбранных косяков с учётом временных интервалов, необходимых для планирования траектории сейнеров и траулеров.

1. **Свиридов В.В., Коцюк Д.В., Подорожнюк Е.В.** Беспилотный фотограмметрический учет тихоокеанских лососей посредством БПЛА потребительского класса // Изв. ТИНРО. — 2022. — Т. 202, вып. 2. — С. 429–449. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-429-449. EDN: CNQNAF.
2. **Юдович Ю. Б.**, Промысловая разведка, издательство «Пищевая промышленность» 1974 г.
3. **Бельченко Ф.М., Ермолов И.Л., Нагайцев Г.Н., Остриков П.П.** Об особенностях передачи видеоизображений в подводной робототехнике, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4 часть 3, С. 62—67. DOI: 10.37220/МТ.2023.62.4.066.

Д.А. Бирин¹, Р.В. Мещеряков², Я.А. Туровский^{2,3}

ТРЕБОВАНИЯ К РТК ПРИ УПРАВЛЕНИИ ОПЕРАТОРОМ ГРУППОЙ РТК

¹НИИ «Квант», г. Санкт-Петербург,

²Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г.Москва

³Воронежский государственный университет, г.Воронеж, trv@ipu.ru

Введение

Развитие систем управления РТК неизменно приводит к созданию перспектив управления не только одиночными РТК, но их группами [1].

Это связано с необходимостью повышения эффективности их использования при решении конкретных задач, в том числе специального назначения. Для полноценного управления требуется не только использовать конкретные РТК, поддерживающие функции группового управления, но и учитывать возможности (характеристики) и состояние человека-оператора [2,3] с последующим проектированием РТК для работы в группе.

Состояние человека-оператора существенно влияет не только на время принятия решений, но и на другие характеристики определяющие эффективность управления [4,5]. Так, например, неправильно поставленная задача может привести к нарушению работоспособности всей группы. С другой стороны, неправильная организация интерфейса также влияет на корректность управления группой, так и одиночным РТК. Кроме предъявления требований к человеку- оператору [5] необходимо предъявлять требования и к самим РТК.

Требования к человеку- оператору

Определяющее требование к человеку-оператору является наличие возможностей у человека к использованию интерфейса управления. Это требование не только определяет возможности управление, но собственно наличие канала с учетом того, что канал должен быть двунаправленным – РТК должно не только выполнять команды, но и давать обратную связь о возможности выполнения команд, подтверждения получения команд, состояние выполнения команд и подтверждения выполненной команды. Отсутствие обратной связи не позволяет полноценно управлять и может приводить к неправильным сценариям применения.

Человек-оператор должен быть готов в конечное время, задаваемой системой управления РТК или группой РТК выдавать команду, получать обратную связь и принимать решение.

Таким образом, можно сделать вывод, что человек-оператор должен иметь доступ и возможности к двунаправленному каналу управления (наличие органов управления, сенсорной системы для восприятия и «опыт» управления). Вместе с тем, даже при наличии указанных элементов человек-оператор может быть не готов к управлению ни одиночным РТК, ни, тем более, группой РТК.

Требования к РТК

Очевидно, что даже при наличии каналов управления человек-оператор не в полной мере может быть включен в управление группой РТК. Большое значение имеет его психофизиология и когнитивные возможности по восприятия информации. Например, при проведении разработок

интерфейса требуется изучение распределения внимания оператора, исходя из архитектуры группы РТК и, естественно, выполняемых ею задач.

Даже подготовленные операторы будут не в состоянии обеспечивать должный уровень контроля и мониторинга за одиночным РТК, и, там более, за каждым из членов группы РТК. Мониторинг в реальном времени показал распределение внимания оператора/групп операторов с обратной связью, обеспечивающую поддержание внимания на нужных объектах, а также ряд сложностей, связанных как с утомлением оператора, так и с ненадлежащей «концентрацией внимания» всей группы операторов на каком-либо объекте их группы, что приводило к утрате контроля над остальными объектами.

Таким образом, на первом этапе требуется необходимость разработки формализованного описания группы РТК, которые должны быть представлены различными элементами в различных представлениях: организационном, функциональном, техническом, информационном и пр.

Получаем, что на первом этапе были отобраны выполняемые функции, которыми обладают базовыми функциями РТК и, что важно, группами РТК. На втором этапе требуется оценить возможность сочетания указанных функций РТК.

Третий этап требует проведения исследований соотношения, поставленных индивидуальных особенностей человека-оператора уже применительно к группе и возможности постановки задачи группе. Известно, что управление различным количеством объектов требует различной степени сосредоточенности и соотношения с поставленными функциями. Управление группой, как правило, сложнее управления одиночными РТК, хотя в исследованиях встречались индивидуумы, у которых управление группой РТК было более эффективным, чем одиночным РТК. При этом требуется наличие у РТК соответствующих возможностей для принятия групповых команд

Требования к интерфейсам управления группой РТК.

Система управления группой РТК не должна ограничиваться использованием обычных пультовых интерфейсов, т.к. имеются иные, кроме верхних и нижних конечностей, источники генерации управляющих команд. При этом расширение числа управляемых элементов, расширение их функционала приводит к тому, что имеющихся способов генерации команд в разумные интервалы времени будет критически не хватать. В качестве примера можно привести сравнение управления БПЛА по классическому каналу и методом электромиографии. В работе проведено исследование индивидуально-психологических особенностей операторов, выполняющих управление БПЛА квадрокоптерного типа

(дрона) с использованием как традиционного клавиатурного интерфейса, так и миографического интерфейса (МИ), генерирующего дискретные команды (рис 1, а, б). Определено, что испытуемые использовали число команд клавиатурного управления существенно более активно, совершая при этом и большее абсолютное количество ошибок. Однако при рассмотрении относительного числа ошибок число ошибок было статистически значимо больше для миографического интерфейса. Установлена обратная связь выраженности визуального канала перцепции с числом ошибок вне зависимости от типа используемого интерфейса. При этом выраженная экстраверсия приводила к большему числу ошибок при использовании миографического интерфейса, не влияя на работу с клавиатурой. Выявлено, что наиболее значимыми предикторами для МИ являются показатели рабочей памяти и экстраверсии. При этом не удалось установить доминирование предикторов при управлении с БПЛА с клавиатуры устройства.

Первичное требование к интерфейсу определяется системой команд для группы РТК – они должны быть интуитивно-понятным и «ненапрягающим». Оценку такого интерфейса проводят экспертным методом опроса экспертной группы и в результате получается приемлемый базовый интерфейс.

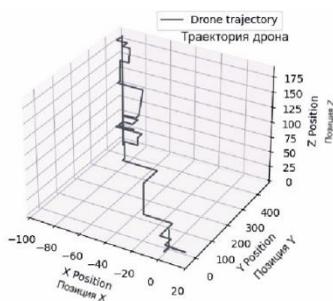


Рис. 1а. Траектория полета дрона под управлением с клавиатуры

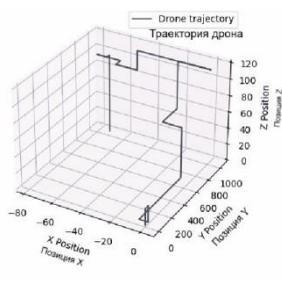


Рис. 1б. Траектория полета дрона под управлением на основе мышечной активности.

Вторым требованием к интерфейсу является возможность обеспечения соответствия между каналом передачи информации и вычислительными возможностями РТК, которые должны делать дешифровку команд и соотнесение их своим функциям в группе.

Следующим требованием, учитывающим уже специфику управления группой РТК – это требования по повышению скорости отображе-

ния информации (при наличии быстропротекающих процессов) и распределения задач в составе группы. Полноценный интерфейс, который дублирует интерфейс управления одиночным РТК нецелесообразен – он ориентирован на одиночное управления и объединение нескольких однотипных интерфейсов в один будет слишком сложен для реализации операций управления в отличии, например, от интерфейса управления АСУТП при наличии одинаковых установок или типовых процессов.

Таким образом получаем последовательные требования по «усовершенствованию» требований к интерфейсам и их возможностям.

Заключение

Представленные требования к РТК представляют собой последовательность сформированных требований по наличию различных функциональных свойств РТК, предназначенных к работе в группе РТК. Важным требованием является согласованность интерфейса управления между человеком-оператором и группой РТК, а также выбор наиболее эффективных (рациональных) режимов его использования.

Особое внимание необходимо уделить на наличие функций распределения/перераспределения задач в группе РТК, позволяющим работать по единой задаче, а также соотношения пропускной способности канала и вычислительных возможностей РТК.

1. **Кутахов В.П., Мещеряков Р.В.** Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта // Проблемы управления. 2022. № 1. С. 67-74.
2. **Туровский Я.А., Бирин Д.А., Мещеряков Р.В.** Концепция использования биологических интерфейсов в управлении техническими устройствами // Перспективные системы и задачи управления. Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции и XIII молодёжной школы-семинара. Таганрог, 2022, с. 137-139.
3. **Бирин Д.А., Мещеряков Р.В., Туровский Я.А.** Оператор управления группой РТК как элемент системы управления // В сборнике: Перспективные системы и задачи управления. Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции и XV молодёжной школы-семинара. Таганрог, 2024. С. 50-52.
4. **Бирин Д.А., Мещеряков Р.В., Туровский Я.А.** Требования к оператору управления группой РТК// В сборнике: Перспективные системы и задачи управления. Материалы XX Всероссийской

- научно-практической конференции и XVI молодежной школы-семинара. Таганрог, 2025. С. 9-11.
5. **Туровский Я.А., Борзунов С.В., Вахтин А.А.** Алгоритм оценки результатов статистического анализа данных биомедицинской природы в условиях эффекта множественных сравнений // Программная инженерия. 2021. Т.12, №9. С. 470-474.

М.Ю. Ветлицын, Н.Г. Шаронов

ПРОБЛЕМА ОЧУВСТВЛЕНИЯ ЭЛАСТИЧНЫХ ПАЛЬЦЕВ АДАПТИВНЫХ ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ*

*Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград,
mikhail.vetlitsyn@mail.ru*

Введение

Автоматический захват объекта нестрого определенной формы является недостаточно исследованной областью, в том числе, из-за трудности оценки точности позиционирования, и сложности моделирования контактного взаимодействия между звеньями захватного устройства и объекта, а также определения усилия захвата. Усилие, прикладываемое эластичными рабочими органами к объекту нестрого определенной формы, приводит к изменению геометрии контактных областей, значения и направления сил контактного взаимодействия между поверхностью объекта и звеньями захватного устройства. Эффективность захвата объекта нестрого определенной формы возможно повысить за счет обеспечения наибольшей площади охвата с контролем усилия и путем адаптации геометрии рабочих органов [1,2].

Интегрированная конструкция датчика усилия с пальцем захватного устройства

Современные требования к датчикам усилия предполагают не только контроль тока электропривода, но и непосредственное измерение усилия взаимодействия рабочего органа с объектом, даже если поверхность объектов имеют различную структуру и форму [2]. Существуют

* Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолГТУ (из средств программы развития «Приоритет 2030» по соглашению № 075-15-2025-063) в рамках научного проекта № 35/637-24

попытки создания не дорогих пьезорезисторных датчиков на основе проводящих волокон или полимеров, они обладают требуемой эластичностью и могут быть выполнены компактными в пределах площади рабочего органа [3]. Многие исследователи отмечают, что площадь и время нажатия разительно влияют на показания преобразователя усилия, и отмечают перспективность разработки интегрированной конструкции датчика усилия и пальца захватного устройства [4,5, китайская статья].

Предложена реализация пьезорезисторного датчика на основе материала (Velostat), обладающего свойством изменять сопротивление при изгибе и механическом воздействии [5]. Подобные материалы обладают вязкоупругим поведением, проявляют свойства квантового туннелирования. Особенностью эластичного материала из углеродного волокна является очень малая номинальная толщина графитного насыпного слоя, расположенного между эластичными пленочными оболочками, что существенно влияет на характер изменения сопротивления. Из таких материалов можно выполнить датчики усилия в виде элементов различной формы, но для интегрированной конструкции требуется достаточно точное определение математической связи сопротивления с усилием.

Конструкция датчика разрабатывалась для захватного устройства с параметрами: ход пальцев 40-155 мм; время полного раскрытия/закрытия 1,5 с; грузоподъемность 400 г; с двумя микродвигателями постоянного тока; треугольные пальцы 135 мм/128 мм/34 мм шириной 10 мм. Зависимости установившегося выходного напряжения (сигнала датчика) от характера нагружения получены установкой образцовых грузов массой 5-150 грамм на датчик (рис. 1в) в разных зонах (рис. 1а-б) рабочего органа, при неизменном образцовом напряжении 5В [6]. Эксперимент проводился на жестком и эластичном рабочем органе. Площади контакта ограничивались размерами груза и шириной рабочего органа. В эксперименте отмечено, что на площадь контакта влиял прогиб эластичной части рабочего органа.

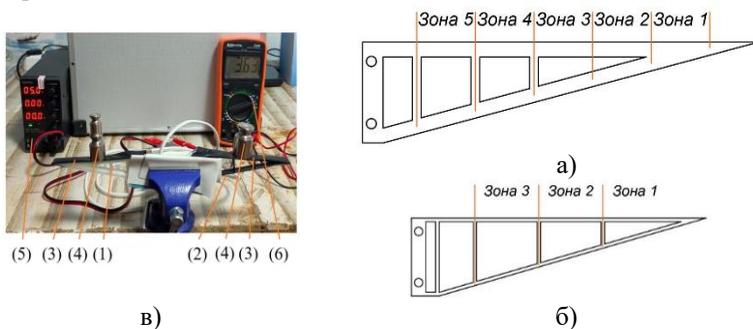


Рис. 1. Зоны установки грузов: а) Эластичный РО; б) Жесткий РО

Основными зонами захвата объекта манипулирования для эластичного пальца являются участки 2,3,4 (рис. 1а). На участке 5 при размещении грузов свыше 50 грамм имело место искажение зоны контакта с датчиком очувствления, что снижало качество измерения. На участке 1 нагружение вызывает значительный изгиб эластичного рабочего органа, что приводит к возникновению колебаний и к падению грузов свыше 100 грамм.

Для жесткого пальца (рис. 1б) хорошей чувствительностью обладают все зоны рабочего органа. На участке 3 площадь контакта объекта с датчиком несколько ограничена размерами пальца. На участках 1 и 2 отличие измерений усилия обусловлено особенностями установки грузов и результирующей площадью контакта. На жестком пальце наблюдается меньшая чувствительность и большее время реакции датчика на грузы массой 5-15 грамм.

Заключение

Зависимости установившегося выходного напряжения от характера нагружения выражены математической моделью вида:

$$U_{\text{изм}} = U_{\text{нач}} - (A/m^C + Bm^D);$$

где $U_{\text{изм}}$ – выходное напряжение пьезометрического датчика; $U_{\text{нач}} = 4.5 - 4.7\text{В}$ – начальное напряжение на ненагруженном датчике; m – масса от объекта манипулирования на один палец; A, C – коэффициенты, учитывающие изгиб эластичных участков РО и площадь контакта датчика с объектом; B, D – коэффициенты, учитывающие нагружение РО с датчиком.

Тестирование эластичного датчика в разных зонах подтвердило необходимость размещения, в зоне ожидаемой поверхности охвата объекта. Конструкция эластичного рабочего органа с пьезометрическим датчиком позволяет идентифицировать в системе управления грузы массой 10-150г на один палец с точностью выше 7 %.

1. **Макарова, Е. А.** Адаптивные захваты робототехнических систем / Е. А. Макарова, М. Ю. Ветлицын, Н. Г. Шаронов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2023. – № 4(275). – С. 57-63.
2. ГОСТ Р 60.3.0.2-2020. Роботы и робототехнические устройства. Роботы промышленные манипуляционные. Перемещение объектов с помощью захватного устройства зажимного типа. Термины, определения и представление характеристик : дата введения 2021-03-01. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 27 с.

3. Системы оцувствления и адаптивные промышленные роботы / В.Б. Брагин, Ю.Г. Войлов, Ю.Д. Жаботинский и др.; под общ. Ред. Е.П. Попова, В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с., ил.
4. **Буличев, О. В.** Исследование характеристик датчика силы на основе материала "Velostat" для мобильного шагающего робота / О. В. Буличев, К. В. Полеткин, А. В. Малолетов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2022. – № 4(263). – С. 6-12.
5. **Saranli, U.** RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot / U. Saranli, M. Buehler, D. E. Koditschek // The International Journal of Robotics Research. – 2001. – № 7 (20). – Рр. 616–631.
6. **Ветлицын, М. Ю.** Об оптимальном управлении электроприводом реконфигурируемых устройств / М. Ю. Ветлицын // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2024. – № 9(292). – С. 14-19.

*З.А. Годжаев¹, С.М. Соколов², С.Е. Сенькевич¹,
В.А. Судаков²*

ГРУППОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

*¹ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
²Институт прикладной математики им М.В. Келдыша РАН
fic51@mail.ru*

Одной из областей человеческой деятельности, в которой активно требуется внедрение средств автоматизации, является сельское хозяйство. Но в отличие от промышленных областей, здесь требуется работа в недостаточно подготовленной инфраструктуре, в меняющихся условиях и с изменчивыми объектами интереса. С развитием технологий повышения степени автономности (ПСА) робототехнических комплексов (РТК), особенно интеллектуальной [1-11], стало возможным в значительной степени обеспечить создание РТК, удовлетворяющих указанным требованиям. Ещё одной стороной, требованием сельскохозяйственной области, является разнообразие и большие объёмы работ, что требует группового использования разнотипных и разнородных технических устройств. От-

сюда встаёт задача планирования сельскохозяйственных работ, координации различной техники, формирования маршрутов перемещений минимизирующих затраты ГСМ, числа используемых роботов, времени. Требуется обеспечение комплексного подхода, максимизирующего эффективность применения средств автоматизации. По сути, эта задача является многокритериальной и критерии носят противоречивый характер. В этой области известно много работ [12, 13], в частности, исследования ФГБНУ ФНАЦ ВИМ [12, 13]. Данная оптимизационная задача поиска рационального решения обладает рядом особенностей: высокой размерностью (большим числом оптимизационных переменных), необходимостью учета неопределённостей (особенно сложны неопределённости обусловленные эксплуатацией новой сельскохозяйственной техники, для которой не достоверных статистических данных по прошлой эксплуатации), наличием дискретных переменных, которые в случае большого количества не дают возможности гарантированно получить оптимальное решение за приемлемое время. Для работы с указанными неопределённостями подходит математический аппарат мягких вычислений, который применительно к задачам выбора также успешно разрабатывается в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [14 – 17]. В ИПМ им. М.В. Келдыша РАН есть опыт решения задач как повышения степени интеллектуальной автономности РТК [7 – 12], так и оптимизационных задач в транспортной логистике [12, 13, 14]. Практика их решения показала, что при высокой размерности задач необходимо либо ее понижать либо использовать метаэвристические подходы, в том числе роевого интеллекта [15].

Наиболее перспективной в данной предметной области видится разработка моделей машинного обучения с подкреплением, нейросетевых технологий и гибридного искусственного интеллекта [16, 17]. Гибридность обусловлена тем, что необходимо сочетать модели физических процессов для описания среды, в которой функционируют сельскохозяйственные роботы, и модели нейронных сетей определяющих стратегию поведения агентов управляющих данной средой.

1. **Кайснер Э., Раффо Д., Вунш-Винсент С.** Робототехника: прорывные технологии, инновации, интеллектуальная собственность. //Форсайт. 2016 № 2. Т.2.
2. **Murphy Robin**, Introduction to AI robotics / Robin R. Murphy. (Intelligent robotics and autonomous agents. A Bradford Book.) The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, London, England ISBN 0-262-13383-0
3. **Ермолов И.Л.** Повышение автономности мобильных роботов, как важнейшее направление развития современной робототехники // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2010, №2.

4. **Васильев И.А., М.В., Горюнов В.В., Плавинский М.Н.** ОРГАНИЗАЦИЯ АВТОНОМНОЙ РАБОТЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ГРУППЕ. Санкт-Петербург, ЦНИИ РТК
5. **Huang Hui-Min, Pavel Kerry, Novak Brian, Albus James, Messina Elena.** A Framework For Autonomy Levels For Unmanned Systems (ALFUS) Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America 2005, June 2005, Baltimore, MD.
6. **Knichel David,** Position Presentation for the Maneuver Support Center, Directorate of Combat Development, U.S. Army, the First Federal Agencies Ad Hoc Working Group Meeting for the Definition of the Autonomy Levels for Unmanned Systems, Gaithersburg, MD, July, 18, 2003.
7. **James Albus,** Position Presentation for National Institute of Standards and Technology, Intelligent Systems Division, the First Federal Agencies Ad Hoc Working Group Meeting for the Definition of the Autonomy Levels for Unmanned Systems, Gaithersburg, MD, July, 18, 2003.
8. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений [Текст] / Л. Заде. - М.: Мир, 1976.
9. **Kosko B.** Fuzzy cognitive maps [Text] / B. Kosko // International Journal of Man-Machine Studiens. - 1986. Vol. 24. - P. 65-75.
10. **Заграновская А.В.** Системный анализ на основе нечетких когнитивных карт. Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2018;(4):152-160. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2018-4-152-160>.
11. **Вовк, С.П., Гинис, Л.А.** Моделирование переходов между эталонными ситуациями в сложных системах в условиях неопределенности // Известия ЮФУ. Технические науки. –2013. – №2. – С. 116 – 122.
12. **Z A Godzhaev, S E Senkevich, V A Zubina and T Z Godzhaev.** Determination of the significance of quality criteria and functional limitations affecting the effectiveness of robotization of mobile energy means in crop production. 2023. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1138 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/1138/1/012045 ...
13. **Годжаев З.А.** Концепция создания адаптивных ходовых систем сельскохозяйственных мобильных энергосредств с применением элементов искусственного интеллекта / З.А. Годжаев, С.Е. Сенькевич, В.А. Кузьмин, И.С. Малахов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 5(361). – С. 159-164. – DOI: 10.33979/2073-7408-2023-361-5-159-164 ...
14. (12+x) Sokolov S., Sudakov V. Multicriteria Analysis of the Robotic Systems Autonomy Using Fuzzy Calculations // In Proceedings of the 16th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART

- 2024) - Volume 3, pp. 916-920 ISBN: 978-989-758-680-4; ISSN: 2184-433X.
15. **Нестеров В.А., Судаков В.А., Обносов Б.В.** Многокритериальная оценка военной техники с использованием гибридной функции предпочтений на примере беспилотных летательных аппаратов // Вооружение и экономика. 2015. № 4 (33). С. 55-66.
 16. **Осипов В.П., Судаков В.А.** Многокритериальный анализ решений при нечетких областях предпочтений // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 6. С. 1-16.
 17. **Nechaev Y., Osipov V., Sudakov V.** Dynamic neuro-fuzzy model of traffic control of the transport stream // В сборнике: Proceedings - 2018 Ivanikov Isp Ras Open Conference, ISPRAS 2018. 2019. С. 116-121.
 18. **Посадский А.И., Сивакова Т.В., Судаков В.А.** Агрегирование нечетких суждений экспертов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 101. С. 1-12
 19. **Соколов С.М.** Сравнительный анализ степени автономности робототехнических комплексов //Известия ЮФУ. Технические науки. - 2023. - № 1(231). - С.65 - 76. - DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-65-76.
 20. **Соколов С.М., Богуславский А.А., Романенко С.А.** Программно-аппаратные средства для бортовых систем информационного обеспечения подвижных средств с использованием СТЗ //Известия ЮФУ. Технические науки. - 2020. - № 1. - С. 246-257. - DOI: 10.18522/2311-3103-2020-1-246-257.
 21. **Соколов С.М., Кирильченко А.А.** Информационное обеспечение автономных наземных транспортных средств на основе интерпретирующей навигации. //ДЕСЯТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ МКПУ-2017 Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции. В 3-х томах. Ответственный редактор: И.А. Каляев. - 2015. - Т. 1. - С. 332-345.
 22. **Соколов С.М., Богуславский А.А.** СТЗ в составе автономных навигационных комплексов //Сборник докладов научно-технической конференции "Техническое зрение в системах управления". - 2020.
 23. **Богуславский А.А., Соколов С.М.** Технология изготовления программного обеспечения СТЗ автономных РТК //Труды 34-ой международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника" (ЭР-2023). - 2023. - С.32 - 33.
 24. **Бахтин В.А., Богданов И.П., Осипов В.П., Рыков Ю.Г., Смирнов А.А., Судаков В.А.** Оптимизация перевозок однородной продукции между оптовыми складами // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 65. С. 1-26.

25. **Б. Н. Четверушкин, В. А. Судаков, Ю. П. Титов.** Моделирование высокоразмерных систем на основе конденсации графов // Математическое моделирование. – 2025. – Т. 37, № 3. – С. 59-74. – DOI 10.20948/mm-2025-03-04.

А.М. Грузликов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ В АУДИОДАННЫХ

*ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург,
agruzlikov@yandex.ru*

Введение

Обнаружение аномалий представляет собой процесс машинного обучения, предназначенный для распознавания аномальных закономерностей в заданном наборе входных данных. Этот процесс находит применение в различных областях, включая, помимо прочего, обнаружение мошенничества в банковской отрасли, определение отказа компрессоров с использованием информации с аудиодатчика и т.д. Темой настоящей работы является обнаружения аномалий в аудиоданных для решения задачи классификации объектов.

Например, основным источником шумов, при приеме сигнала пассивными гидроакустическими средствами, являются надводные цели. Решение по принадлежности объекта к классу автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), в виду редкости их наблюдения, можно сформулировать как обнаружение аномалий по аудиоданным. Т.е. задача состоит в выделении таких особенностей первичного шумового поля АНПА в звуковом диапазоне частот, которые не будут соответствовать особенностям поля надводных объектов.

В работе приводится модель первичного поля источника шумоизлучения, описание функции передаточной среды, модель наблюдения, определена постановка задачи обнаружения аномалий и её решение с использованием методов глубокого обучения, а именно вариационных автоэнкодеров (англ. Variational Autoencoders, VAE) [1, 2].

Постановка задачи обнаружения аномалий в аудиоданных

Модель первичного поля [3]. Источники шума можно разделить на

две группы: машинные источники, находящиеся внутри корпуса, и гидродинамические источники, внешние относительно корпуса объекта. Машинные шумы связаны с работой различных устройств, например вращением винта. Гидродинамические источники связаны либо с обтеканием корпуса. Значение гидродинамических источников возрастает с ростом скорости носителя.

Первичное поле от источника шумоизлучения во временной области представляет промодулированный случайный процесс с нулевым средним значением и заданным спектром мощности. Спектр сигнала вне рабочей полосы аппроксимируются спадающей функцией. Дискретные составляющие в сплошной части спектра сигнала моделируются узкополосными случайными процессами. Модулирующие сплошную часть сигнала вально-лопастной модуляции и модуляцией качкой определяется в виде суммы гармонических составляющих.

Модель среды распространения первичного поля [3]. Передаточная функция среды моделируется на основе лучевого представления, с заданной функцией затухания сигнала в зависимости от частоты и фазового сдвига по времени распространения луча от источника первичного поля до элементов приёмной антенны. Параметры лучей формируются на основе гидроакустических условий, в том числе вертикального разреза скорости звука, модели дна и поверхности.

Модель наблюдения [3]. В состав тракта шумопеленгования гидроакустического комплекса входят антенные решётки, которые позволяют формировать веер характеристик направленности в горизонтальной и вертикальной плоскости. Учитывая, что основные информационные признаки находятся вне рабочей полосы частот, после решения задачи обнаружения выполняется сбор временных отсчетов с направления на объект. Далее, по накопленному сигналу, выполняется задача оценки параметров амплитудных огибающих. Поскольку, входной сигнал является нестационарным, на практике применяется представление аудиоданных в частотной области, в том числе изменение спектра сигнала во времени, что и является исходной информацией для решения задачи обнаружения аномалий.

Задача обнаружения аномалий. Дано множество аудиоданных $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, где $x_i \in \mathbb{R}^d$ (признаковое пространство). Известно подмножество $X_{norm} \subseteq X$ – сигналы первичного поля, соответствующие надводным объектам и известным на этапе обучения. Подмножество $X_{anom} \subseteq X$ – сигналы от мало представленных объектов.

Цель: построить функцию $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \{0, 1\}$, которая классифицирует объекты, т.е. для $\forall x_i \in X_{anom}: f(x_i) = 1$, иначе 0.

Алгоритм решения задачи обнаружения аномалий

Рассмотрим алгоритм решения задачи с использованием вариационного автоэнкодера. VAE относится к классу генеративных моделей и состоит из двух нейронных сетей (рис. 1). Первая сеть E (кодер) – переводит входной сигнал x в некоторое пространство признаков z (латентное пространство), вторая сеть D (декодер) – на основе информации из z пытается восстановить сигнал близкий к x , модули Gx , Gz , $Loss$ отвечают за оценку качества восстановления, форму z и суммарную ошибку соответственно.

Дополнительно, на этапе обучения на вход VAE подается сигнал, сформированный на основе нормального закона распределения, в задачу которого входит штрафование латентного пространство за отклонение от требуемой формы с использованием оценки на основе дивергенции Кульбака – Лейблера.

Алгоритм соотношения аудиоданных к аномальному сигналу, состоит в запуске кодера, т.е. выполнение перевода аудиоданных в некоторую точку в латентном пространстве, и далее оценка расстояния от полученной точки до границы множества эталонных сигналов.

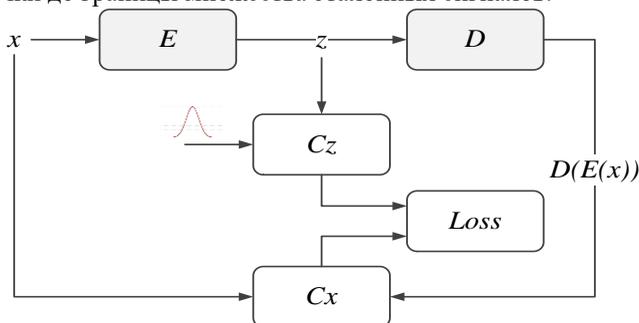


Рис.1. Архитектура сети обнаружения аномалий

Для выполнения обучения VAE были сформированы эталонные сигналы с параметрами, которые соответствуют модели сигнальных портретов надводных объектов. После свертки со средой, полученные временные отсчёты первичного поля поступали на модель наблюдения.

Заключение

В работе приведена постановка задачи обнаружения аномалий в аудиоданных. В качестве примера рассмотрен вопрос классификации АНПА по данным первичного поля с использованием метода глубокого обучения – вариационного автоэнкодера.

Приведена модель первичного поля объекта шумоизлучения, модель среды распространения и наблюдения сигнала, архитектура нейронной сети.

1. Гудфэллоу Я., Бенжио Й., Курвилль А. Глубокое обучение / Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 652 с.
2. Принс С. Понимание глубокого обучения / Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2024. – 510 с.
3. Грузликов А.М. Фреймворк для алгоритмов траекторного сопровождения морских объектов по угломерной информации / Грузликов А.М., Караулов В.Г. // В сборнике: Перспективные системы и задачи управления. Материалы XIX Всероссийской научно практической конференции и XV молодежной школы-семинара. Таганрог. – 2024. – С. 321 – 329.

Ю.Н. Казаков, Нгуен Тхай Ха, Лю Ифань, Ло Юань, Л.А. Савин

РАДИАЛЬНО-ОСЕВЫЕ И УПРУГО-ДЕМПФЕРНЫЕ ОПОРЫ РОТОРОВ С АКТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ*

*Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева,
г. Орел,
KazakYurii@yandex.ru*

В настоящее время наблюдается быстрое развитие производства ветровых энергетических установок, при этом отмечается достижение определенного предела в совершенствовании отдельных компонентов, в частности, приводных турбин, конструкций генераторов, тормозных устройств и т.д. В установках большой мощности целесообразно применять приводы вращения с планетарными мультипликаторами, в которых в качестве опор осей сателлитов целесообразно использовать гидродинамические подшипники (ГДП). В настоящее время в ветровых установках также актуальным является использование пары подшипников радиального и упорного для восприятия радиальных и осевых нагрузок соответственно. Это приводит к значительному увеличению массогабаритных характеристик всего объекта. Переход к радиально-осевым опорам жидкостного трения может позволить улучшить характеристики ветрогенераторов, повысить их ресурс и надежность, а также уменьшить массогабариты [1-3].

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00789-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00789/>

Одним из ярких примеров радиально-осевых опор жидкостного трения являются конические подшипники (КПЖТ). Для повышения их эффективности работы применяются различные модификации: использование конической поверхности совместно с цилиндрической или внедрение дополнительных демпфирующих элементов (Рис. 1).

Стоит отметить, что представленные модификации КПЖТ на рисунке 1, хотя позволяют улучшить их работоспособность, в тоже время накладывают новые ограничения. Использование конической и цилиндрической поверхностей позволяет увеличить грузоподъемность таких опор, однако не решает проблемы стабильности роторов в конических подшипниках. В свою очередь, использование демпфирующих элементов, увеличивает стабильность роторных систем и уменьшает амплитуду колебаний, в тоже время это приводит к значительному увеличению потерь энергии на трение.

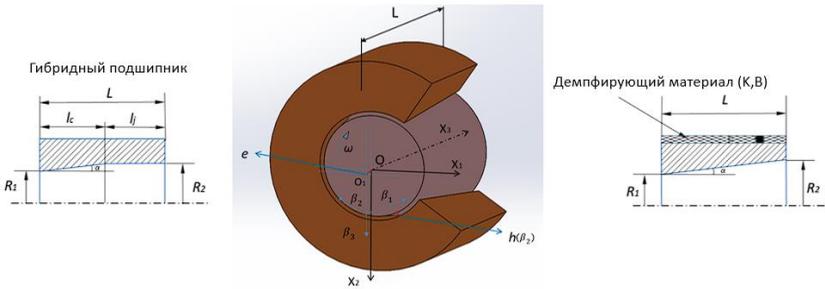


Рис. 1. Схема конического подшипника жидкостного трения с вариантами модификаций

Для решения данных проблем, актуальным является внедрение системы активного управления в устройство подшипникового узла. В качестве одной из основных концепций активного конического подшипника жидкостного трения, является коническая опора с изменяемой геометрией смазочного слоя. Где регулирование осуществляется за счет изменения осевого положения конической втулки относительно вала, что приводит к изменению величины среднего зазора (Рис. 2).

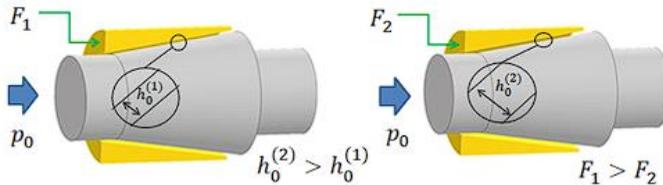


Рис. 2. Схема работы активного конического подшипника жидкостного трения

Толщина смазочного слоя является определяющим параметром, когда речь идет о таких характеристиках подшипников жидкостного трения, как несущая способность и момент трения. В тоже время, имея возможность регулирования величины зазора смазочного слоя возможно не только изменение динамических характеристик ротора, но и управление положением ротора в пространстве по трем координатам, при этом регулирование происходит только по осевой составляющей. Внедрение второй конической опоры позволяет осуществлять регулирование в двух опорах одновременно, изменяя осевое положение только одной из них.

Что касается подшипников с демпфирующими элементами, то наиболее простым вариантом активного управления является использование дискретного управления. Где конструктивно предусмотрено включение и отключение демпфера из структуры работы роторной системы. Это позволяет использовать снизить энергетические потери на стабильно работающей системе и уменьшить амплитуды колебаний ротора на переходных режимах.

Проведенные исследования по анализу работоспособности активных конических опор жидкостного трения, показывают преимущества использования активного управления, в сравнении вариантов без управления. Активные КПЖТ позволяют уменьшить момент трения [4], а также добиться минимизации амплитуд колебаний роторной системы, для некоторых режимов работы, практически, на 40% и повысить стабильность работы таких систем [5].

1. **Polinder, H.** Overview of and trends in wind turbine generator systems // IEEE Power and Energy Society General Meeting. - 2011. - С. 1–8.
2. **Diepeveen, N. F. B.** On the application of fluid power transmission in offshore wind turbines. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2013.
3. **Wang, X. F.** Design, Modeling and Simulation of a Geared Infinitely Variable Transmission // Journal of Mechanical Design. - 2014. - Т.136 (7). - С. 1–9.

4. **Kazakov, Y.N.** Active Fluid-Film Bearing With Deep Q-Network Agent-Based Control System/ Kazakov, Y.N., Kornaev, A. V., Shutin, D. V., Li, S., Savin, L.A. // J. Tribol. – 2022. - № 144. <https://doi.org/10.1115/1.4053776>.
5. **Kazakov, Y.N.** Reducing Rotor Vibrations in Active Conical Fluid Film Bearings with Controllable Gap / Kazakov Y.N., Kornaev A. V., Shutin D., Kornaeva E., Savin L. // Rus. J. Nonlin. Dyn. – 2022. - Т. 18. - №5. – С. 873-883

Д.Ю. Колпашиков, О.М. Гергет

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО РОБОТА

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва,
d.y.kolpashchikov@gmail.com*

Введение

Непрерывные роботы — гибкие механизмы, совершающие движение за счёт упругой деформации изгиба собственного тела [1]. Они обладают высокой маневренностью, что позволяет использовать их в пространствах со сложной неструктурированной геометрией. Например, такие роботы применяются для неразрушающего контроля и ремонта сложных устройств [2], а также в диагностике и малоинвазивной хирургии [3].

Один из наиболее распространённый подход к описанию формы изгиба нейтральной линии — допущение о постоянной кривизне [4]. Согласно этому допущению, при оптимальных конструктивных параметрах секция изгибается таким образом, что кривизна нейтральной линии остаётся неизменной вдоль всей длины секции. Однако в реальности конструкция робота редко соответствует этому условию, что приводит к погрешностям в моделировании.

Более точно форму изгиба описывает допущение о кусочно-постоянной кривизне [5], при котором секция представляется как последовательность подсекций, каждая с постоянной кривизной. Проблема такого подхода — невозможность определить параметры кривой изгиба без анализа конструкции. При этом анализ конструкции не дает гарантий, что полученные параметры дадут точную модель.

Работы по кинематической калибровке немногочисленны и используют менее точные модели: допущение о постоянной кривизне [6] или аппроксимацию жёсткими звеньями [7].

В данной работе рассматривается постановка задачи определения

параметров непрерывного робота, описанного допущением о кусочно-постоянной кривизне. Предложены подходы к идентификации параметров модели на основе анализа рабочей области и нейтральной линии.

Постановка задачи и способы решения

Используя допущение о кусочно-постоянной кривизне, кинематика непрерывного робота может быть описана следующим образом:

$$T_0^N = T_0 \cdot \prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) & S_i \cdot (1 - \cos(\theta_i)/\theta_i) \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & S_i \cdot \sin(\theta_i)/\theta_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\theta_i = \frac{W_i \cdot \theta}{\sum W_i} \quad (2)$$

где T_0^N – матрица, описывающая положение и ориентацию N -й подсекции относительно базы робота, T_0 – база робота, θ_i – угол изгиба i -й подсекции, S_i – длина i -й подсекции (для упрощения модели длина всех подсекций одинакова), θ – общий угол изгиба робота, $W_i > 0$ – весовой коэффициент i -й подсекции по углу изгиба.

Задача идентификации параметров заключается в определении такого набора весов W для фиксированного числа подсекций, при котором результирующая модель наилучшим образом аппроксимирует поведение реального непрерывного робота. Для этого решается задача условной оптимизации с ограничениями на значения весовых коэффициентов. Задача оптимизации может быть решена следующими способами:

1. Минимизация ошибки E_{WS} между реальной WS^{real} и теоретической WS^{model} рабочей областью робота. Реальная рабочая область может быть получена путем отслеживания кончика робота во время изгиба через системы технического зрения. Теоретическая рабочая область может быть получена через прямую кинематику (1)-(2) для текущих весов W при углах изгиба от 0 до θ_{max} . Поскольку определить угол изгиба для точек реальной рабочей области не представляется возможным, то функцию потерь для минимизации следует определить как:

$$E_{WS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min_j \|WS_i^{real} - WS_j^{model}\| \quad (3)$$

Следует отметить, что данный подход может приводить к неоднозначности параметров: различные комбинации весов могут приводить к близкой форме рабочей области, но с существенно различной геометрией нейтральной линии.

2. Минимизация ошибки E_{NL} между реальной NL^{real} и теоретической NL^{real} нейтральной линией робота. Для этого следует достичь максимального допустимого изгиба робота и используя системы технического зрения определить реальную нейтральную линию изгиба робота. Теоретическая нейтральная линия может быть получена из уравнения прямой кинематики (1)-(2) для каждой подсекции при постоянном угле изгиба секции. В данном случае угол изгиба секции θ имеет критическое значение, поэтому во время поиска весов стоит также искать и угол изгиба. Функция потерь формулируется аналогично:

$$E_{NL} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min_j \|NL_i^{real} - NL_j^{model}(\theta)\| \quad (4)$$

Этот подход может быть чувствителен к ошибкам в извлечении формы реальной нейтральной линии и точности определения угла изгиба.

3. Для повышения устойчивости идентификации предлагается комбинированный подход, одновременно учитывающий ошибки как по рабочей области, так и по одной или нескольким нейтральным линиям. Итоговая функция потерь принимает вид:

$$E = E_{WS} + \sum E_{NL} \quad (5)$$

Предложенные методы идентификации параметров модели непрерывного робота могут быть использованы в алгоритмах калибровки для повышения точности моделирования поведения реального робота.

Заключение

В работе рассмотрена задача идентификации параметров модели непрерывного робота, описываемой в рамках допущения о кусочно-постоянной кривизне. Предложены три подхода к определению параметров: на основе соответствия рабочей области, нейтральной линии и их комбинации. Представленные методы могут служить основой для разработки эффективных алгоритмов калибровки, обеспечивающих более высокую точность моделирования поведения реального робота.

1. **Robinson G., Davies J. B. C.** Continuum robots-a state of the art //Proceedings 1999 IEEE international conference on robotics and automation (Cat. No. 99CH36288C). – IEEE, 1999. – Т. 4. – С. 2849-2854.
2. **Pistone A. et al.** Modelling and control of manipulators for inspection and maintenance in challenging environments: A literature review //Annual Reviews in Control. – 2024. – Т. 57. – С. 100949.
3. **Dupont P. E. et al.** Continuum robots for medical interventions //Proceedings of the IEEE. – 2022. – Т. 110. – №. 7. – С. 847-870.

4. **Hannan M.W., Walker I.D.** Novel Kinematics for Continuum Robots, *Advances in Robot Kinematics*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2000, pp. 227–238.
5. **Mahl T., Hildebrandt A., Sawodny O.** A Variable Curvature Continuum Kinematics for Kinematic Control of the Bionic Handling Assistant, *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, Vol. 30, no. 4, pp. 935–949.
6. **Escande C. et al.** Kinematic calibration of a multisection bionic manipulator // *IEEE/ASME transactions on mechatronics*. – 2014. – Т. 20. – №. 2. – С. 663-674.
7. **Murphy R. J. et al.** Design and kinematic characterization of a surgical manipulator with a focus on treating osteolysis // *Robotica*. – 2014. – Т. 32. – №. 6. – С. 835-850.

А.Ю. Коноплин

ПОДХОД К УВЕЛИЧЕНИЮ СТЕПЕНИ АВТОНОМНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПОДВОДНЫМИ РОБОТАМИ *

*Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
г. Владивосток, kayur-prim@mail.ru*

Введение

Повышение эффективности выполнения манипуляционных операций в глубинах Мирового океана с помощью необитаемых подводных роботов (НПР), оснащаемых многозвенными манипуляторами (ММ), является очень актуальной проблемой. Для обследования больших полигонов, обнаружения объектов и выполнения с ними рабочих действий целесообразно использовать автономные или гибридные НПР. Работа таких аппаратов-роботов не требует использования специализированных обслуживающих судов, многочисленного обслуживающего персонала, их перемещения не ограничены длиной кабель-троса, и они способны преодолевать десятки километров в поисках целевых объектов. Манипуляторы значительно расширяют функциональные возможности НПР, обеспечивая забор грунта с определенных участков, сбор морских организмов, установку маячков и различного оборудования, а также их очистку и обслуживание. Эти операции во многих случаях требуется выполнять

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038

быстро в режиме зависания НПП над или вблизи объекта работ, так как время подводных работ часто ограничено, а их стоимость очень высока.

На сегодняшний день уже существует значительный задел в области проектирования и создания систем управления (СУ) НПП с установленными на них ММ, большой вклад в который внесли отечественные и зарубежные ученые В.В. Вельтищев, В.В. Костенко, В.Ф. Филаретов, G. Antonelli, J. Yuh и др.

Однако имеющийся задел в этой области науки все еще не позволяет обеспечить качественное выполнение НПП распространенных подводных манипуляционных операций в автономном режиме. Причиной этому являются нерешенные проблемы управления этими сложными динамическими объектами в экстремальных и неопределенных морских условиях, когда невозможно точно определить параметры воздействия вязкой среды на НПП и ММ, а навигационная информация поступает от бортовых сенсоров и систем технического зрения (СТЗ) с неизбежными ошибками и задержками. При этом крайне затруднено распознавание окружающей подводной обстановки и идентификация целевых объектов работ, которые в агрессивной среде подвержены заиливанию, обрастанию, коррозии и деформации. Таким образом, для увеличения степени автономности выполнения манипуляционных операций с помощью НПП требуется разработка новых методов и СУ, обладающих улучшенными функциональными возможностями.

Описание полученных научных результатов

Цель исследования является разработка комплекса новых методов синтеза СУ НПП с ММ, согласованная работа которых обеспечит в неопределенных условиях морской среды распознавание окружающей обстановки и объектов работ, формирование целевых программных сигналов и управление перемещениями НПП и рабочих инструментов (РИ) ММ для автономного выполнения манипуляционных операций в режиме стабилизируемого зависания НПП в заданной точке пространства. Предложенный подход заключается в создании следующих новых методов.

1. Метод синтеза комбинированной автоматической системы стабилизации НПП в режиме зависания, включающей в себя разомкнутый контур, обеспечивающий подачу на движители НПП сигналов, пропорциональных вычисленному силовому и моментному воздействию со стороны работающего ММ, и следящую систему, компенсирующую неточности указанных вычислений. Эти вычисления выполняются алгоритмом решения обратной задачи динамики, учитывающим линейную и квадратичную зависимости силовых воздействий вязкой среды на звенья ММ

от скорости движения этих звеньев. При этом параметры воздействия вязкой среды на звенья ММ определены экспериментально.

2. Методы синтеза СУ подводными ММ, которые за счет введения самонастраивающихся корректирующих устройств электроприводов ММ компенсируют негативные влияния вязкой среды на точность его работы, при этом за счет введения дополнительных контуров управления программными сигналами обеспечивается корректирование конфигурации ММ, компенсирующее влияние ошибок системы стабилизации НПП на положение и ориентацию РИ ММ, а также достигается увеличение скорости движения этого инструмента с сохранением требуемой точности обработки траекторий.

3. Методы формирования программных (целевых) сигналов управления НПП, обеспечивающие оценку пригодности рельефа дна в зоне работ, подход к донной поверхности в удобном для манипулирования положении, а также точное управление перемещениями аппарата, имеющего нежелательные крен и (или) дифферент под воздействием захваченных манипулятором объектов, посредством коррекции тяг движителей НПП.

4. Метод формирования желаемых траекторий движения и желаемой ориентации РИ подводного ММ по заранее неизвестным рабочим поверхностям, позволяющий учитывать взаимное расположение этих поверхностей и имеющей сложную форму рабочей зоны манипулятора, в которой его РИ может подойти к объекту работ с требуемым углом сервеса.

5. Метод идентификации объектов работ известной формы, обеспечивающий выделение целевого объекта из облака точек, получаемого от СТЗ НПП, и проверку достоверности выполненной идентификации путем проецирования проверочной траектории на триангуляционные поверхности отсканированного объекта и совмещенной с ним эталонной модели. При этом желаемые траектории движения РИ ММ, изначально построенные для эталонной модели объекта, переносятся на триангуляционную поверхность реального объекта, подверженного различным деформациям в морской среде.

Заключение

На основе предложенного подхода синтезированы эффективные СУ НПП, позволяющие не только добиться качественного решения существующих на сегодняшний день манипуляционных задач, но и значительно расширить круг работ, выполняемых НПП, оснащенными ММ. Работоспособность и высокое качество работы этих систем подтверждены результатами численного и полунатурного моделирования, а также

натурных испытаний с использованием АНПА ММТ-3500, оснащенного ММ (рис. 1).



Рис. 1. Испытания АНПА ММТ-3500, оснащенного ММ и разработанной СУ

О.А. Родионов, А.В. Малолетов

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ДЕМОНСТРАТОРА БОРТОВОГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ*

*АНО ВО Университет Иннополис, г. Иннополис,
a.maloletov@innopolis.ru*

В докладе представлен опыт, полученный в Университете Иннополис при реализации первых этапов проекта «Разработка технологии и демонстратора бортового аппаратно-программного комплекса на базе нейросетевых алгоритмов для автономного управления и навигации БВС и групп БВС». Описаны основные подходы к реализации программного комплекса для конкретного БВС с переходом к группе БВС с описанием актуальных проблем, ограничивающих их применение в определенных сферах эксплуатации, обоснована целесообразность применения нейросетевых алгоритмов в рамках решения точечных задач для повышения качественных показателей и преодоления ограничений. В работе реализуется комплексный подход к разработке программного комплекса

* Работа выполнена при поддержке Фонда поддержки проектов НТИ по проекту «Разработка технологии и демонстратора бортового аппаратно-программного комплекса на базе нейросетевых алгоритмов для автономного управления и навигации БВС и групп БВС».

для БВС с использованием нейросетевых алгоритмов для повышения надежности модулей навигации и управления конкретного БВС, а также переход к рассмотрению задач навигации и управления в составе группы.

Значительная часть теоретических вопросов группового управления были решены достаточно давно [1]. Однако практическая реализация этих методов сопряжена с рядом сложностей. Одной из актуальных современных проблем является задача навигации БВС в средах с нестабильной спутниковой связью [2]. Альтернативным подходом к построению задачи локализации является использование группы сенсоров технического зрения в связке с инерциальной системой, например визуальный SLAM [3] – задача одновременного картирования и локализации с использованием визуально-инерциальной одометрии, основная идея которых заключается в использовании положения окружающих объектов для уточнения собственного, однако, и эти подходы имеют свои ограничения при отсутствии признаков объектов.

Другим классом проблем является неустойчивость классических алгоритмов, таких как ПИД-управление, к изменяющимся условиям эксплуатации (порывистый ветер, изменение погодных условий), а также трудности планирования пути для гетерогенных групп аппаратов с учётом их различий [4]. Задачи планирования и координатного управления могут пересекаться по смыслу и объединяться, например в методе прогнозного управления по модели (model predictive control) [5], в основу которого заложено использование геометрических характеристик ближайшего сегмента траектории и предсказания исполняемой траектории, что позволяет контроллеру более плавно проходить резкие повороты.

Перспективным методом решения вышеперечисленных проблем является внедрение нейросетевых алгоритмов. Современный уровень развития технологии уже позволяет эффективно применять нейросетевые алгоритмы для решения некоторых сложных задач управления роботами, а их комбинация с классическими методами может дать синергетический эффект.

Как правило, нейронные модели используются системой технического зрения и модулем распознавания для обработки визуальной или лидарной информации с целью извлечения геометрических признаков, например, определения глубины изображения по изображениям камеры, для распознавания объектов, определения их координат, скоростей и т.д. Извлеченные характеристики передаются в модули планирования и локализации.

Другой областью нейронных сетей является увеличение стабильности алгоритмов, зависящих от значений параметров. Так, например, классический ПИД регулятор с динамическими параметрами может адапти-

роваться к изменяющимся условиям при помощи нейронной сети для исполнения траектории движения [6]. Однако, качество адаптируемости нейронной сети к изменяющимся условиям напрямую зависит от качества обучающего набора данных и его разнообразности.

Наконец, комплексные нейронные архитектуры могут быть использованы для выполнения ролей нескольких модулей программного комплекса БВС или всех модулей одновременно. Например, глобальный [7] подход, начинающийся с системы восприятия и заканчивающийся генерацией управляющих сигналов. Такая нейронная модель полностью отвечает за анализ окружающей среды, определение положения БВС, поведенческую систему и управление. Преимуществом такого подхода является универсальность и эффективность, а основными недостатками можно выделить сложность процесса обучения в условиях ограниченных вычислительных ресурсов на бортовом компьютере БВС.

Исходя из перечисленного выше, внедрение нейросетевых подходов является целесообразным в рамках решения точечных задач модулей из программного комплекса для повышения надежности эксплуатации с заданными ограничениями.

Таким образом, в рамках данной работы используется комплексный подход к созданию программного комплекса для БВС для решения задач локализации, планирования и координатного управления с формулированием перехода от их реализации для конкретного БВС к группе.

Итоговым результатом проекта станет реализация демонстратора полетной группы из лидер-БВС и группы ведомых в симуляторе и в виде реального прототипа. Полученные на первых этапах работы результаты включают в себя:

- Разработку системы локализации с двумя режимами работы – со спутниковой навигацией и без неё. В рамках решения без спутниковой навигации используется комплексирование данных на основе визуальной и инерциальной одометрии.
- Разработку нейросетевого модуля планирования для лидер-БВС, который отвечает за генерацию траекторий облета препятствий и движение к цели. Подход реализован на базе нейронной архитектуры и адаптирован к выполнению маневров в лесной местности.
- Разработку модуля координатного управления с акцентом на адаптивность к изменяющимся условиям внешней среды, которая выражается в изменении внутренних параметров системы при регистрации внешних изменений.
- Разработку алгоритма группового управления следования ведомых БВС за лидер-БВС. При этом каждый член группы использует свою независимую систему локализации и управления.

1. **Каляев, И. А.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – Москва : ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2009. – 280 с.
2. **Chang, Y.** A review of UAV autonomous navigation in GPS-denied environments / Chang Y., Cheng Y., Manzoor U., Murray J. // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2024. – Vol. 170.
3. **Mur-Artal, R.** ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras / Mur-Artal R., Tardós J.D. // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2017. – Vol. 33, № 5. – P. 1255–1262.
4. **Zhou, X.** Swarm of micro flying robots in the wild / Zhou, X., Wen, X., Wang, Z., etc. // *Science Robotics* – 2022 – 7(66).
5. **Lindqvist, B.** Nonlinear MPC for collision avoidance and control of UAVs with dynamic obstacles / Lindqvist, B., Mansouri, S. S., Aghamohammadi, A. A., & Nikolakopoulos, G. // *IEEE robotics and automation letters* – 2020 – 5(4), – P. 6001-6008.
6. **Matthews M.T.** Neural Network Based Adaptive Flight Control of UAVs. / Matthews M.T., Yi S. – 2023.
7. **Polvara, R.** Toward end-to-end control for UAV autonomous landing via deep reinforcement learning / Polvara, R., Patacchiola, M., Sharma, S., Wan, J., Manning, A., Sutton, R., & Cangelosi, A. // In 2018 International conference on unmanned aircraft systems (ICUAS) – 2018. – P. 115-123.

А.Л. Ронжин, В.П. Дашевский, К.Д. Крестовников

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНЫХ ДРОНОВ С НАЗЕМНЫМИ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ СРЕДСТВАМИ

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, ronzhin@iias.spb.su*

Введение

С переходом от мониторинга к физическому взаимодействию воздушных дронов с наземными объектами и роботизированными средствами возникают новые научно-технические задачи по координации действий роботов разных сред. Наиболее актуальными направлениями интеграции воздушных и наземных роботов является решение транспортных задач, а также обслуживания дронов на сервисных роботизированных платформах. Далее проанализируем современные подходы по этим двум направлениям.

В работе [1] рассматривается задача маршрутизации транспортных средств на основе интеграции автономных наземных и воздушных систем доставки. Грузовые автомобили имеют большую грузоподъемность и способны передвигаться на большие расстояния, но имеют низкую скорость и требуют разветвленной системы дорог. Воздушные дроны имеют большую скорость, но их аккумуляторы не долговечны и их энергоресурсы недостаточны для транспортировки грузов на большие расстояния. Совмещение двух типов транспорта позволяет решить проблему последней мили, применяя наземную технику при проезде основных расстояний, а воздушные дроны при распределении грузов адресатов в конечном пункте.

В работе [2] также обсуждаются преимущества воздушных дронов по сравнению с наземным транспортом. Они могут перемещаться в переполненной городской среде, независимо от сложности городского ландшафта и условий дорожного движения, сокращая как городские заторы на дорогах, так и расходы на доставку, особенно в случае небольших посылок. Они обеспечивают доставку в районы, труднодоступные для обычных наземных транспортных средств, или пострадавшие от стихийных бедствий. Они обеспечивают динамические услуги доставки по запросу с сокращенным временем ожидания для клиентов, одновременно собирая данные в реальном времени и обеспечивая непрерывную оптимизацию самой службы доставки, а также улучшая возможности принятия решений в контексте умного города.

В работе [3] для расширения зоны функционирования беспилотных летательных аппаратов спроектирован капсюльный аэропорт, обеспечивающий взлет, посадку подзарядку аккумуляторов. Рассмотрено несколько алгоритмов оптимизации размещения аэропортов для покрытия всей территории обслуживания группой воздушных дронов, выполняющих задачи мониторинга.

В работе [4] при разработке дронопорта преследовалось решение следующих задач: автоматическая зарядка и замена аккумуляторов без вмешательства человека, увеличение времени работы дрона с минут до часов, обеспечение простого протокола связи на основе стандарта MAVLink, создание компактной конструкции дронопорта, обеспечение простоты его эксплуатации, достижение разумной стоимости самого дронопорта и его обслуживания. Созданный дронопорт весит 37 кг, имеет 4 запасных аккумуляторов и производит их замену у дрона за 2 минуты, осуществляющего вертикальную посадку по ArUco маркерам.

Автономная платформа обслуживания агродронов

В рамках исследований СПб ФИЦ РАН по разработке технологических основ и новых технических решений бесшовного управления группой БПЛА в недетерминированных средах была спроектирована автоном-

ная платформа обслуживания агродронов [5]. Она выполнена в виде буксируемого автомобильного прицепа на базе несущей рамы, на которой закреплены три колесные пары и средство крепления к буксирующему транспортному средству.

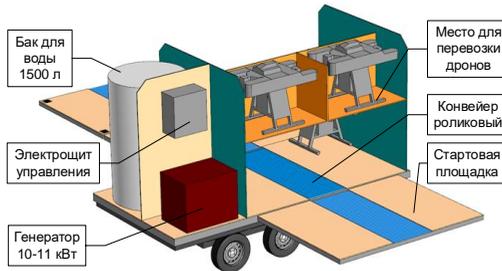


Рис. 1. Эскиз платформы роботизированного обслуживания агродронов

Прицеп выполнен с трансформирующимся кузовом, в котором размещены места для хранения трех дронов, система посадки, маневрирования и транспортировки дронов, средство зарядки аккумуляторных батарей, электроцит управления, бак для воды и средство заправки рабочих растворов. Система посадки, маневрирования и транспортировки дронов включает автоматическую систему выравнивания, содержащую подвижные штанги для точной установки дронов относительно оси движения ленты конвейера. Встроенный манипулятор с кареткой автономно производит замену батарей и заправку рабочих растворов.

Заключение

Решение проанализированных проблем обслуживания воздушных дронов и их взаимодействия с наземными роботизированными средствами требует согласованного функционирования программно-аппаратных средств роботов разных сред. В исследованиях СПб ФИЦ РАН ведется разработка автономной платформы роботизированного обслуживания группы агродронов, обеспечивающей смену аккумуляторов и заправку рабочего раствора, что значительно сокращает работу операторов и ускоряет обработку сельскохозяйственного поля.

Исследование выполнено в рамках бюджетной темы № FFZF-2025-0012.

1. **Kong J., Xie M., Wang H.** Integrating Autonomous Vehicles and Drones for Last-Mile Delivery: A Routing Problem with Two Types of

- Drones and Multiple Visits. *Drones* 2025, 9, 280. <https://doi.org/10.3390/drones9040280>
2. **Rinaldi M., Primatesta S.** Comprehensive Task Optimization Architecture for Urban UAV-Based Intelligent Transportation System. *Drones* 2024, 8, 473. <https://doi.org/10.3390/drones8090473>
 3. **Sun W., Luo Z., Huang K., Shi J.** Joint Deployment and Coverage Path Planning for Capsule Airports with Multiple Drones. *Drones* 2023, 7, 457. <https://doi.org/10.3390/drones7070457>
 4. **Blaha L., Severa O., Goubej M., Myslivec T., Reitingner J.** Automated Drone Battery Management System—Droneport: Technical Overview. *Drones* 2023, 7, 234. <https://doi.org/10.3390/drones7040234>
 5. **Савельев А.И., Лебедева В.В., Лебедев И.В., Камынин К.В., Кузнецов Л.Д., Ронжин А.Л.** Управление группой БПЛА при отработке кризисных полетных ситуаций в решении транспортных задач // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 1 (225). С. 110-120.

М.В. Хисамутдинов, А.И. Каляев

СОЗДАНИЕ МАЛОГАБАРИТНОЙ АВТОНОМНОЙ САМОХОДНОЙ СИСТЕМЫ ПОИСКА ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОВОРОТНОЙ ВИДЕОСИСТЕМЫ С БОРТОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ДАННЫХ

*ООО «Научно-исследовательский институт многопроцессорных
вычислительных и управляющих систем», г. Таганрог,
L-V-P@yandex.ru*

Введение

Одной из наиболее актуальных задач сельского хозяйства остаётся борьба с сорными растениями, которые существенно снижают урожайность сельскохозяйственных культур, ухудшают качество почвы и требуют значительных ресурсов на ручную или химическую обработку. Особенно остро эта проблема стоит на малых и средних сельхозугодьях, где содержание тяжёлой техники нецелесообразно или невозможно. При этом проблемой является и химическая обработка почв для борьбы с сорняками, так как сложно оценить влияние такой обработки на качество выращиваемых культур, поэтому актуальной задачей становится точная

идентификация сорняков и их точечное уничтожение, например с применением лазеров [1,2].

В данной работе описываются решения, примененные во время разработки малогабаритной автономной самоходной платформы поиска и идентификации сорных растений. Основу технической реализации составляет поворотная телеавтоматическая видеосистема [3,4] с соосным лазером, обеспечивающая точную локализацию цели и направленное воздействие. Особенностью предлагаемого решения является использование нейросетевых алгоритмов обработки видеопотока [5,6], реализованных непосредственно на борту устройства, без необходимости передачи данных на внешние серверы, что обеспечивает автономность, снижает задержки и повышает надёжность системы.

Внедрение подобных систем может стать значительным шагом в направлении цифровизации сельского хозяйства и формирования устойчивых, экологичных технологий борьбы с сорняками без применения химической обработки [2].

Цели и задачи самоходной системы

Целью данной работы является поиск, распознавание и идентификацию сорных растений с последующей их локализацией с высокой точностью при помощи поворотной телеавтоматической видеосистемы с соосным лазером, базирующейся на автономной самоходной движущейся платформе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка архитектуры мехатронного комплекса, включающей модуль перемещения, систему позиционирования, блок энергообеспечения и вычислительный модуль;

2. Проектирование и реализация поворотной телеавтоматической видеосистемы с соосным лазерным указателем для точной локализации объектов;

3. Разработка и обучение нейросетевой модели для классификации и идентификации сорных растений в различных условиях съёмки;

4. Аппаратная реализация алгоритмов обработки изображений и управления на встраиваемой платформе с ограниченными вычислительными ресурсами;

5. Проведение экспериментальных испытаний системы в приближённых к реальным условиям с целью оценки точности распознавания и автономности работы комплекса.

Архитектура системы

В ходе работы была разработана следующая архитектура системы:

- Макет самоходной системы состоит из трёх основных узлов: управляющий персональный компьютер (ноутбук), мобильная платформа на базе вычислителя Rock5B и стандартный Wi-Fi роутер 2.4 ГГц.

- Связь между наземным управляющим ПК и самоходной платформой осуществляется по Wi-Fi-каналу передачи данных. Максимальная дистанция между узлами системы не превышает 50 метров при условии прямой радиовидимости.

- С платформы на ПК в реальном времени передаётся трёхканальный видеосигнал с разрешением 1280×768 . Витопоток сжимается покрупно по протоколу MJPG (UDP), типичный объём трафика составляет порядка 10 Мбит/с.

- На передаваемое изображение накладывается телеметрическая информация, включающая: температуру вычислителя, параметры состояния бортовой сети, уровень сигнала Wi-Fi, напряжение питания, текущую частоту обработки видеокрупов (fps), углы крена и тангажа платформы, а также автоматический вывод сигнализирующих сообщений при достижении критических значений [8].

- Возможность переключения между обзорным и узкоугольным каналами видеонаблюдения: обзорный канал с полем зрения 75×59 градусов, узкоугольный — 25×21 градус.

- Ручное управление платформой осуществляется с ПК посредством джойстика.

- Поддерживается удалённая настройка параметров курсового ПИ-регулятора для стабилизации движения.

- Имеется возможность дистанционной настройки алгоритмов управления тяговым приводом, включая установку граничных значений скоростей.

- Реализовано удалённое включение и отключение нейросетевого детектора.

- Поддерживается обновление весовой матрицы нейродетектора на борту для настройки на распознавание требуемых объектов (например, сорняков).

- Возможна ручная инициализация корреляционного захвата интересующей области изображения (ROI) с дальнейшей обработкой.

- Система способна удерживать в кадре и сопровождать выбранный объект при помощи поворотного видеомодуля и автоматического управления движением.

- Также доступна функция включения/отключения стабилизатора видеопотока в удалённом режиме.

Реализация системы на борту платформы

Для реализации предложенной архитектуры было решено, что на борту самоходной платформы управление направлением движения осуществляется посредством сервомеханизма, управляющего поворотом передней оси (либо привода гусеничного или дифференциального типа). Тяговое движение обеспечивается шаговым двигателем. Управляющие сигналы формируются на одноплатном нейропроцессорном модуле на базе Rock5B с использованием GPIO-выводов. В качестве датчика обратной связи используется цифровая камера (трёхканальный выходной видеопоток 8 Мп, 30 Гц), позволяющая реализовать автоматическую установку курса в сторону цели (Рисунок 1).



Рис. 1. Внешний вид самоходной системы

Оператор может дистанционно управлять движением платформы и получать цифровой видеосигнал по Wi-Fi-соединению. Также предусмотрен запуск алгоритма автоматического наведения на объект, выделение которого осуществляется обученной искусственной нейронной сетью (ИНС). Для этого используется предварительно подготовленный файл весов формата RKNN, что позволяет выполнять вывод ИНС в ре-

В процессе испытаний системы на пересечённой местности выявлено влияние вибраций и наклонов корпуса на устойчивость видеосопровождения объекта. В связи с этим была оперативно разработана и реализована система стабилизации видеопотока, основанная на данных с бортового акселерометра и магнитометра. Стабилизатор компенсирует крен и тангаж устройства путём динамического смещения и поворота видеокадров в режиме реального времени. Для выполнения операций стабилизации используется встроенный видеоускоритель Mali-G610, обеспечивающий необходимую производительность на платформе Rock5B.

Заключение

В ходе выполненной работы была разработана малогабаритная автономная самоходная система для поиска и идентификации объектов растительного происхождения на примере сорных растений. Система обеспечивает автономную работу, передачу видеосигнала и телеметрических данных, автоматическое наведение на объект и стабилизацию изображения при внешних воздействиях.

Научная значимость работы заключается в создании архитектуры системы, подходов, аппаратной и программной баз, которые позволили создавать автономное малогабаритное мобильное решение. Предложенный подход демонстрирует возможность применения маломощных одноплатных вычислительных модулей для решения задач точного позиционирования и классификации объектов в реальном времени.

Практическая ценность заключается в потенциальной применимости системы в агропромышленном комплексе, особенно на участках, где использование тяжёлой техники затруднено. Разработка может быть адаптирована под различные условия эксплуатации и модифицирована для решения смежных задач, таких как мониторинг состояния культур, определение биомассы или точечная обработка почвы. Полученные результаты могут быть использованы как основа для дальнейших исследований и внедрения интеллектуальных робототехнических систем в сельском хозяйстве и других отраслях.

Перспективные направления доработки включают реализацию дальнобойного канала связи (вне Wi-Fi) для передачи аналогового видеосигнала и управляющего цифрового сигнала малой пропускной способности (~кбит/с) на дистанциях свыше 50 метров. Также возможна адаптация системы под колесные или гусеничные платформы с дифференциальным управлением для повышения маневренности в условиях пересечённой местности.

1. **Мусин, А. М.** Экспериментальная оценка возможности использования лазера на диоксиде углерода для срезания сорняков; опыты с марью белой, горчицей полевой и плевелом многолетним. (Дания) / А. М. Мусин // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал. – 2003. – № 3. – С. 748. – EDN FNXOCR.
2. **Лисковец Д. В., Станкевич А. Ф.** Безопасное и эффективное устранение сорняков: переход к лазерной технологии при обработке сельскохозяйственных культур. – 2024.
3. **Шипунов А. Г., Кисляк В. А.** СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫМ ВООРУЖЕНИЕМ И КОМПЛЕКС ВЫСОКОТОЧНОГО ВООРУЖЕНИЯ. – 2012.
4. **Швецов А. В. и др.** Прогнозирование движения цели по данным телеавтомата сопровождения // Труды НГТУ им. ПЕ Алексеева. – 2014. – №. 5 (107). – С. 147-150.
5. **Kalyaev A., Khisamutdinov M.** ALGORITHM OF SEARCH AND TRACK OF STATIC AND MOVING LARGE-SCALE OBJECTS / ITM Web of Conferences. 2017. Т. 12. № 3. С. 05014.
6. **Хисамутдинов, М. В.** Улучшение показателя psnr цифрового изображения / М. В. Хисамутдинов, Я. С. Коровин, А. И. Каляев // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2014. – № 1. – С. 558-560. – EDN UKRYDF.
7. **Ульянов С. В., Решетников А. Г., Кошелев К. В.** Разработка системы стереозрения для мобильного робота // Программные продукты и системы. 2017. №3. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/gazrabotka-sistemy-sterеozreniya-dlya-mobilnogo-robota](https://cyberleninka.ru/article/n/gazrabotka-sistemy-sterეozreniya-dlya-mobilnogo-robota) (дата обращения: 05.06.2025).
8. Метод организации интеллектуального интерфейса дистанционного управления системой стереозрения робота на основе айтрекинга / М. В. Хисамутдинов, Я. С. Коровин, А. И. Каляев, Д. Я. Иванов // Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019) : Материалы XII мультиконференции. В четырех томах, Дивноморское, Геленджик, 23–28 сентября 2019 года. Том 2. – Дивноморское, Геленджик: Издательство Южного федерального университета, 2019. – С. 108-112. – EDN TPLOLA.
9. **Одинцов Д. М., Отекина Н. Е.** Нейронные сети в сельском хозяйстве // Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения. – 2019. – С. 466-471.
10. **Мостаков Н. А., Захарова А. А.** Разработка метода локализации в замкнутой и насыщенной объектами среде // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2024. – Т. 28. – №. 3. – С. 214-227.

ТЕЛЕМАНИПУЛЯТОР С КИНЕМАТИЧЕСКИМ ПОДОБИЕМ ДЛЯ МИКРОХИРУРГИИ

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва,
constmeister@gmail.com*

Введение

В микрохирургии, основным предназначением которой является сшивание кровеносных, лимфатических сосудов и нервных волокон, хирурги в основном оперируют вручную, под операционным микроскопом.[1] Растущие требования к качеству операций, снижению послеоперационных осложнений, обуславливают поиск путей автоматизации процесса сшивания. Появившиеся в последние годы робототехнические системы такие как «Symani»[2] и «Musa»[3], позволяют повысить качество швов и облегчить труд оперирующего хирурга. Актуальной является разработка российского образца подобной техники, что приведет к повышению уровня технического оснащения отечественной микрохирургии. В докладе описаны задачи и проблемы, возникающие в процессе создания прототипа пространственного телеманипулятора, использующего стандартный инструментарий микрохирургии и позволяющий дистанционно проводить операции по сшиванию сосудов и волокон с размерами от 0,3 до 1,5 миллиметров. Прототип в стадии разработки находится в лаборатории Института машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук.

Базовый механизм

- В основе конструкции лежит поступательно-направляющий дельта-механизм [4-6]. Структурная схема одинакова для задатчика движения и исполнительного механизма. В первом вместо шаговых двигателей установлены энкодеры, на конечном звене установлен джойстик – имитатор пинцета. Во втором на конечном (выходном звене) установлен зажим для закрепления и приведения в действие микрохирургического пинцета. Для минимизации габаритов механизма в сложенном состоянии приводные шарниры М1, М2, М3 приподняты над основанием. В сложенном состоянии концы кривошипов размещаются в непосредственной близости от основания (рисунок 1).

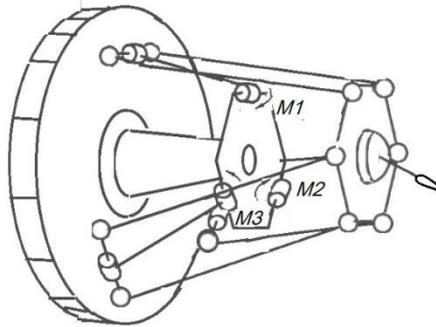


Рис. 1. Структурная схема базового механизма

- Кинематическое подобие механизмов задатчика и исполнительного заключается в том, угол поворота энкодера, соответствующий одному импульсу и угол, соответствующий одному микрошагу двигателя, приведенные к конечному звену, равны. Подобная кинематика позволяет создать упрощенный закон управления, не требующий обратных связей, и один и тот же каждой из трех обобщенных координат. При различающейся структуре задатчика и манипулятора потребовалось бы решение прямой и обратной задач кинематики для обоих механизмов и значительно более сложное преобразование сигналов задатчика в импульсы управления двигателями на основе этих решений.

- Программа работает следующим образом: при получении импульса с энкодера, свидетельствующего о движении задатчика, определяется направление движения по смещению фаз энкодера, и в драйвер двигателя поступает команда на один шаг в нужном направлении. После чего происходит возврат к началу цикла и ожидание следующего импульса. Система не содержит обратной связи, однако при штатном режиме работы двигателя (без потери шагов) все три пары энкодер-двигатель позволяют точно отслеживать манипулятором движения конечного звена задатчика.

- Закон управления реализован с применением процессоров Arduino uno [7-9], по одному на каждый привод, и драйверов DRV8825 в режиме дробления шага 1:16.

Заключение

- Закон управления манипулятором тривиален при наличии кинематически подобного задатчика движения и не требует обратных и перекрестных связей между приводными координатами.

- Кинематическое подобие состоит в равенстве дискретностей задатчика и манипулятора, приведенных к конечному(выходному) звену и обеспечивается подбором передаточных чисел в приводных шарнирах.

- Управляющая программа одна и та же для каждой из приводных координат

- Проведенные исследования показали эффективность принятых технических и программных решений в ходе создания пространственного телеманипулятора для микрохирургии. Научная и практическая значимость заключается в создании трехкоординатного телеманипулятора, который войдет в целевой прототип манипулятора с шестью пространственными координатами и одной координатой работы пинцета.

1. **Rodriguez C., Suominen S., Van Landuyt K., Farhadi J., Hamdi M., Santamaria E., Kolb F., Leymari N., Innocenti M., Garusi C., Pons G., Vega C., Masia J.** Issues of reconstructive and plastic surgery. – 2021 vol.24 issue 1(76). pp.81-91,.
2. **Enzinger S.** 1-year experience with the Symani microsurgery robot. an overview of the procedures performed// International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. 2024. Т. 52. С. 112.
3. **Debeij G., Jonis Ya., Karavolia E., Hulst R.V.D., Qiu Sh.Sh., Mulken T.V.** Robotic-assisted microsurgery using the MUSA-robot: evaluation of the learning curve in three clinical pilot trials// Plastic and Aesthetic Research. 2024. OAE Publishing Inc.
4. **Portillo-Vélez R.De.J., Burgos-Castro I.A., Vásquez-Santacruz J.A., Marín-Urías L.F** Integrated conceptual mechatronic design of a delta robot Machines. 2022. Т. 10. № 3. С. 186.
5. **McClintock H., Temel F.Z., Doshi N., et al.** 2018. The milliDelta: A high-bandwidth, high-precision, millimeter-scale Delta robot. Science Robotics 3 (14).
6. **Chablat D., Kong X., Zhang C.** 2018. Kinematics, Workspace, and Singularity Analysis of a Parallel Robot With Five Operation Modes. Journal of Mechanisms and Robotics 10 (3).
7. **John-David Warren, Josh Adams & Harald Molle** Arduino for Robotics. In: Arduino Robotics. Apress, Berkeley, CA.2011
8. **Iskandar D.1, Sunandar A.** Utilization of Arduino Uno technology and Arduino Ide to create electrical disconnect products for electronic equipment Jurnal AKSI (Akuntansi dan Sistem Informasi). 2022. Т. 6. № 1.
9. **Меньшиков С.В., Ващук Е.С.** Осуществление программирования на платформе Arduino: способы и возможности использования платы Arduino UnoВ сборнике: Современные вопросы естествознания и экономики. Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции. Прокопьевск, 2022. С. 256-262.

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РОБОТОТЕХНИКЕ – СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, г. Москва
yusch@bmstu.ru*

Введение

Перед Высшей школой РФ поставлены амбициозные задачи, связанные с необходимостью выйти в число ведущих стран по уровню роботизации ТОП-25 к 2030 году (Указ Президента РФ от 07.05.2004 г. №309). Для этого потребуются подготовить необходимое количество специалистов, способных разрабатывать робототехнику на современном уровне, учитывая, что роботизация сегодня охватывает не только промышленность, но и другие области деятельности человека, включая медицину, освоение космоса и мирового океана. Современное состояние образования в области робототехники не полностью удовлетворяет поставленным задачам. Необходимо усовершенствовать программу подготовки и переподготовки инженерных кадров в области робототехнике в системе Высшего Образования (ВО), отвечающую современным вызовам.

Эволюция ВО в области робототехники в РФ

Специальность «Мехатроника и робототехника» была введена в РФ в 1982 г. одновременно с созданием профильных кафедр в ведущих Университетах, в том числе, в МГТУ им. Н.Э.Баумана, МГТУ Станкин, МИРЭА, С-Пб Политехническом Университете. Организованы Научный Центр Робототехники и Координационный Совет по робототехнике РАН. В дальнейшем к подготовке инженеров по этой специальности присоединились около 60 Технических Университетов (ТУ). К 2014 г. было открыто примерно 15 специализаций в области промышленной и специальной робототехники, а общий выпуск специалистов составлял примерно 3000 в год. В период с 2012 по 2014 г.г. ТУ были переориентированы на двухуровневую (Болонскую) систему подготовки, включающую два уровня – «бакалавр» - «магистр», а сама специальность была отнесена к укрупненной группе специальностей «Машиностроение». Подготовка специалистов, способных разрабатывать новые робототехнические си-

стемы, по существу, прекратилась, поскольку 4 года бакалавриата для такой наукоёмкой специальности было недостаточно, а магистранты, в основном, были ориентированы на научную деятельность. Кроме того, соотношение окончивших магистратуру и бакалавриат было примерно таким же как в Европейских странах 1:3, т.е. существенно уменьшился и выпуск инженерных кадров. Наконец, объем учебных программ в магистратуре, изучаемых в течении года, был существенно меньше объема программ специалитета. Предполагалось, что магистранты будут активно работать в промышленности, но последняя была к этому не готова. Косвенным следствием перехода на двухуровневую подготовку была потеря ряда робототехнических кафедр, потеря уже сложившихся инженерных школ. Учитывая все возрастающую роль роботов военного применения, был нанесен ущерб и обороноспособности государства. В связи с этим в 2018 г. в соответствии с Приказом Минобрнауки РФ №210 была создана программа специалитета 15.05.02 «Робототехника военного и специального назначения». По этому направлению был оперативно разработан и утвержден ФГОС и начат выпуск специалистов.

Состояние подготовки инженеров-робототехников

Указом Президента РФ от 12.05.2023. №343 «О некоторых вопросах совершенствования системы ВО» восстановлено инженерное образование как базовое высшее с сохранением магистратуры как специализированное высшее. В перечне направлений ВО по программам базового ВО в укрупненной группе специальностей «Машиностроение» предусмотрено направление 21.04 «Мехатроника и робототехника» с уровнями базового ВО и магистратуры, и 21.08 «Робототехника военного и специального назначения» с уровнем базового ВО. К сожалению ФГОС по направлению 21.04 до сих пор находится в процессе обсуждения, хотя макет стандарта был опубликован 02.05.23. Пилотный проект базового ВО реализуется в шести Университетах, однако он не коснулся обсуждаемого направления подготовки. В связи с этим ряд гражданских Университетов, давно ведущих подготовку по направлению «Мехатроника и робототехника» заявили предложения по набору студентов по направлению 21.08, в том числе, МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва), Балтийский ГТУ (С-Пб). Такое решение является своевременным и обоснованным, но не может в полной мере решить проблему подготовки специалистов-робототехников по другим специализациям. В остальных ТУ, ведущих подготовку таких специалистов, в этом году проведен набор по устаревшей схеме «бакалавр – магистр» 3++ Учитывая, что подготовка по программе базового ВО составляет не менее 5 лет, это означает, что специалистов-

робототехников, мы получим как раз к 2030 году, когда необходимо достичь уровня ТОП-25. Возникшее противоречие требует принятия неотложных мер для совершенствования подготовки специалистов в области робототехники.

Проблемы и перспективы

Робототехника быстро развивается, охватывая все новые области деятельности человека. Поэтому, прежде всего, необходимо определить современные тенденции развития робототехники в мире. Наряду с разработкой элементной базы и программного обеспечения, сегодня на первый план выходят проблемы группового управления роботами. Активно развивается робототехника экстремальных сред, в том числе, подводная и космическая робототехника. Все более актуальной становится проблема взаимодействия человека с роботами, организация коллаборативных систем управления роботами и группами роботов. Необходимо восстановить утраченные в последние годы тесные связи ТУ, ведущих подготовку специалистов по робототехнике, с учеными НИИ РАН. В том числе с целью создания новых научно-исследовательских программ в магистратуре по перспективным направлениям исследовательских работ в области робототехники.

Для ускорения процесса подготовки специалистов целесообразно обеспечить возможность перехода на программу специалитета тех студентов, которые поступили в этом году на программу бакалавриата после первого или второго курса. Особую роль в настоящих условиях играет возрождение программ переподготовки специалистов с высшим инженерным образованием по родственным специальностям. Это позволило бы уже через 2 года получить определенный контингент специалистов.

Заключение

Уровень развития робототехники сегодня определяет как уровень экономического государства, так и уровень его обороноспособности. В связи с этим совершенствование подготовки специалистов - робототехников в современных условиях настоятельно требует участия в ней как промышленных предприятий, так и научных работников РАН и отраслевых НИИ.

ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНЫХ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ СИСТЕМ

*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, г. Москва
yusch@bmstu.ru*

Введение

Развитие робототехники на современном этапе привело к радикальному изменению характера взаимодействия человека и робототехнической системы. От непосредственного участия робота в производственных процессах на конвейере совместно с человеком это взаимодействие перешло в стадию интеллектуального взаимодействия, когда робот становится полноправным помощником человека, обладающим определенной самостоятельностью. Главная задача, которая должна быть решена при создании интерактивной коллаборативной робототехнической системы (ИРТС), заключается во взаимном согласовании возможностей человека и соответствующих возможностей робота. При создании такой системы радикально меняются и принципы её проектирования.

Структура ИРТС с применением нечеткой логики

Основная особенность ИРТС состоит в том, что робот является партнером человека, обладающим полноценной информационно-системой, способностью к автономному взаимодействию с объектами внешнего мира, и к поддержанию речевого диалога с пользователем на профессионально-ориентированном языке. Со своей стороны пользователь должен обладать способностью на основе полученной информации составить представление о ходе выполнения операции, о внешней обстановке, а также о возможностях робота. Отсюда следуют требования психологического характера, предъявляемые к пользователю. Используя аппарат нечеткой логики определяются естественные пространственно-временные отношения в восприятии внешнего мира человеком [1], которые вводятся в базу знаний робота, что даёт возможность вести диалог на профессионально-ориентированном языке [2]. Действия робота определяются с помощью методов нечеткого логического вывода на основе продукционных правил, определяющих его поведение. Часть этих правил закладывается в базу нечетких правил априори (Рис.1). Другая часть приобретается в процессе работы робота с помощью обучаемых нейронных

сетей. В тех случаях, когда это целесообразно, речевой диалог может быть дополнен, и даже заменен жестикulyацией [3]. Для «взаимного» контроля состояния может быть использован метод анализа выражения лица пользователя FACS [4].

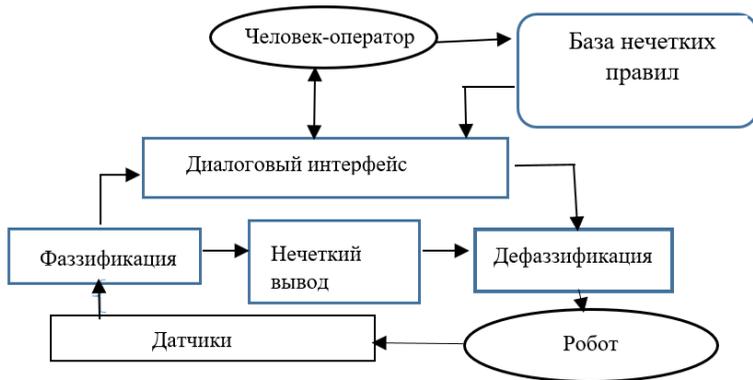


Рис. 1. Функциональная схема ИРТС с применением нечеткой логики
Принципы эргономического проектирования интерактивной РТС

Основной принцип эргономического проектирования ИРТС заключается в согласовании возможностей человека и робота. Проектируя ИРТС необходимо наряду с разработкой технической части системы одновременно разрабатывать и модель деятельности человека. Модель деятельности человека сегодня достаточно полно может быть описана в терминах нечеткой логики. Известны шкалы восприятия человеком наблюдаемых размеров объектов и расстояний между ними [1]. Аналогичные шкалы в дальнейшем были построены для восприятия сил и моментов, цвета объектов, и по другим признакам. Применяя продукционные правила и методы нечеткого вывода, оператор формирует сигналы управления. Предложены также методы моделирования мышления человека при решении задач планирования действий [5]. Таким образом, сегодня может быть построена модель оператора как «цифрового человека», взаимодействующего с ИРТС. Задача эргономического проектирования теперь сводится к коррекции характеристик технической части системы, либо характеристик оператора на этапе отбора и обучения. Необходимые качества для данного вида деятельности заранее определяются экспертами и по ним назначаются уровни значимости данного качества [6]. Процесс эргономического проектирования является двусторонним, включая как этапы коррекции технической части системы, так и возможностей человека [7].

Заключение

Широкое внедрение робототехники в процессы профессиональной деятельности предполагает доступность управления роботами для человека, не обладающего специальной подготовкой в области робототехники. Теперь оператор управляет не движениями робота, а поведением робота путем постановки задач и контроля за их выполнением. Большое значение для обеспечения эффективности управления приобретает анализ психологических проблем взаимодействия человека и «интеллектуальной» робототехнической системы.

1. **Кандрашина Е.Ю., Литвинцева И.В., Поспелов Д.А.** Представление знаний о пространстве и времени в интеллектуальных системах. Изд-во: Наука, М., 1989
2. **Инь Шуай, Ющенко А.С.** Диалоговое управление коллаборативными роботами с помощью искусственных нейронных сетей. Мехатроника, автоматизация, управление, т.22, №11, 2021, с.567-576.
3. **Gruber I., Ryumin D., Hruz M., Karpov A.** Sign Language Numerical Gestures Recognition Using Convolutional Neural Network. // ICR 2018 // Ed. by A.Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 11097 P. 70-77.
4. **Yuschenko A., Vorotnikov S., Konyshev D., Zhonin A.** Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication. // ICR 2016 // Ed. by A.Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812 - P. 133-14
5. **Магазов С.С.** Когнитивные процессы и модели. – М.: Изд. ЛКИ, 2007, 248с.
6. **Фрумкин А.А., Зинченко Т.П., Винокуров Л.В.** Методы и средства эргономического обеспечения проектирования. СПб: Петербург. Гос. Университет путей Сообщения, 1999, 180 с.
7. **Shuai Yin, Arkady Yuschenko** The application of the convolutional neural network to organize the work of a collaborative robot - surgeon assistant. //ICR-2019/Ed. by A.Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI11659, August 2019. P. 287-297.

РАЗДЕЛ 3
УПРАВЛЕНИЕ
И НАВИГАЦИЯ
В РОБОТОТЕХНИКЕ
И МЕХАТРОНИКЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ РОБАСТНОСТИ МЕТОДОВ НЕЯВНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КАРТ В ЗАДАЧЕ ОДНОВРЕМЕННОГО КАРТИРОВАНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ

*Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург,
antipov.vl.a@yandex.ru*

Введение

Локализация и картирование являются важными составляющими задачи пространственного восприятия роботов. В решении данной проблемы важная роль отводится методам одновременного картирования и локализации (SLAM). Недавнее развитие нейронных сетей в области компьютерного зрения обеспечило решение более сложной задачи - визуального плотного SLAM. Другой, близкой к задаче SLAM является задача 3D-реконструкции, решение для которой в 2022 году было получено благодаря развитию класса методов неявного представления карт [1], записывающих картируемое пространство компактно в параметрах нейронной сети, и тем самым уменьшая необходимое количество памяти и обеспечивая дифференцируемость представления. Последнее свойство позволяет применить неявное представление карт в задаче SLAM путем оценивания положения робота на карте методами градиентной оптимизации [2]. Разработанные методы, например такие как Co-SLAM [3] хорошо работают на синтетических данных из симуляции или на предобработанных данных с точных камер, но возможность их применения в реальных условиях в работах не освещается. В данном исследовании ставится задача проверки возможности применения методов SLAM с неявным представлением карт в реальных условиях: при наличии шумов измерений, разных уровней освещенности и эффектов дисторсии.

Основная часть

Задача SLAM с использованием неявного представления карт формулируется из двух подзадач [3]:

1. 3D-реконструкция с целью получения знаковой функции расстояния $s_n(p_n)$, а также поиска оценки изображения для новых положений и ориентации камеры: $\hat{I}_t(R, t)$;

2. Визуальная одометрия и локализация положения камеры в пространстве на основе текущего и ранее наблюдаемых изображений: $(R, t)_t = \rho(I_t, I_{t-1...0})$

В данной работе проводится анализ возможности применения методов неявного представления карт в задаче SLAM при наличии шумов, разности освещений, неучтенной дисторсии, а также временного параллакса измерений камеры на примере алгоритма Co-SLAM.

Для неявного представления карт в основе Co-SLAM лежит позиционный энкодер, декодер знаковой функции расстояний, а также декодер цвета, представленные на рисунке 1.

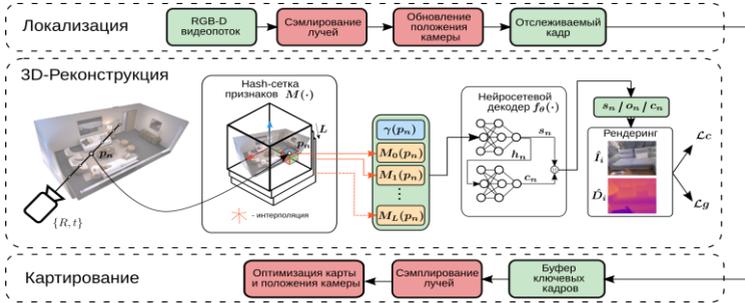


Рис. 1. Схема исследуемого алгоритма Co-SLAM [3]

Для кодирования пространства используется hash-сетка, с записанными в ее вершинах неявными признаками, являющимися обучаемыми параметрами. В качестве входных данных алгоритма используется RGB-D изображение с камеры со скользящим затвором Intel D435. Внутренние параметры камеры определены в ходе предварительной калибровки.

Робастность метода оценивается путем сравнения по приведенным ниже критериям на синтетическом датасете с и без добавления шумов и на данных, полученных с реальной камеры:

1. Соотношение сигнала к шуму на реальных данных должно быть не менее чем в два раза меньше того же показателя на синтетических данных для сгенерированных изображений:

$$PSNR = -10 \log_{10}(\mathcal{L}), \quad \mathcal{L} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\hat{c}_n - c_n)^2 \quad (1)$$

2. Среднеквадратическая ошибка оценивания положения камеры не превышает радиуса робота: 25 см.

Истинная траектория движения камеры определялась посредством применения SFM-алгоритма COLMAP [4]. Результаты проведенного сравнения с синтетическим датасетом для исследуемого метода Co-SLAM приведены в таблице 1.

**Таблица сравнения качества локализации и реконструкции
на синтетических и реальных данных**

Датасет сцены	PSNR, дб	СКО траектории камеры, м	Среднее время цикла, с
Исходная Синт. Replica (room0)	26.712	0.0605	0.102
Реальн. room0	17.593	0.1575	0.202

Заключение

Полученные результаты сравнения подтверждают гипотезу о достаточной робастности метода Co-SLAM к изменению освещения и шумам измерений, а также естественной дисторсии и временному параллаксу камеры D435 для решения задачи одновременного картирования и локализации с ее использованием. Полученные результаты дают подтверждение о возможности использования метода в реальных условиях с допустимой погрешностью оценивания положения робота.

1. **Mildenhall, B., Srinivasan, P. P., Tancik, M., Barron, J. T., Ramamoorthi, R., Ng, R.** NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). – 2020. – С. 405–421.
2. **Zhu, Z., Peng, S., Larsson, V., Xu, W., Bao, H., Cui, Z., Oswald, M. R., Pollefeys, M.** NICE-SLAM: Neural Implicit Scalable Encoding for SLAM // IEEE/CVPR 2022. – 2022. – С.
3. **Wang, H., Wang, J., Agapito, L.** Co-SLAM: Joint Coordinate and Sparse Parametric Encodings for Neural Real-Time SLAM // IEEE/CVPR 2023. – 2023. – С.
4. **Schönberger, J. L., Frahm, J.-M.** Structure-from-Motion Revisited // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2016.

ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО ПО ВРЕМЕНИ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ НЕСИНХРОННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
berlin.lm@phystech.edu, galaev@ipu.ru, pashlys@yandex.ru*

Введение

Задачи управления, где размерность вектора управляющего воздействия меньше размерности всей системы, представляют особый интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения. Задача оптимального скалярного управления двумя несинхронными осцилляторами по критерию быстродействия впервые была сформулирована в монографии [1]. Для задачи наискорейшего успокоения произвольного числа линейных осцилляторов с общим скалярным управлением в [2] было получено асимптотическое оптимальное управление в форме синтеза, где объединяются несколько подходов: оценка множества достижимости и метод обобщенных функций Ляпунова. Оптимальное по времени перемещение платформы с осцилляторами из положения равновесия с гашением колебаний изучено в [3]. Описывать процессы как наискорейшего возбуждения, так и затухания колебаний, не вводя явную модель трения, можно путем задания частоты $\omega(t)$ осциллятора [4]. В докладе рассматривается задача оптимального управления группой, состоящей из произвольного числа несинхронных осцилляторов со скалярным управляющим воздействием, по критерию быстродействия. Приводятся необходимые условия экстремума для исследования управления с произвольным количеством переключений.

Задача оптимального управления осцилляторами

Задача оптимального по времени управления группой из N несинхронных осцилляторов, связанных ограниченным скалярным управлением, формализуется следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{q}_i(t) = p_i(t), \\ \dot{p}_i(t) = -\omega_i^2 q_i(t) + u(t), \quad i = 1, \dots, N, \\ \omega_j \neq \omega_k, \forall j \neq k, j, k = 1, \dots, N. \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{x}(t) = (q_1(t), p_1(t), \dots, q_N(t), p_N(t))^T \in R^{2N},$$

где $q_i(t), p_i(t), \omega_i$ - координата, импульс и собственная частота колебаний i -го осциллятора соответственно. Область значений управления U задается отрезком на прямой

$$u(t) \in [-\varepsilon, \varepsilon] = U. \quad (2)$$

Целью управления является перевод системы (1) с ограничением (2) из заданного положения в начало координат:

$$x(0) = (q_1^*, p_1^*, \dots, q_N^*, p_N^*)^T, x(T^0) = (0, 0, \dots, 0, 0)^T. \quad (3)$$

Время движения системы T^0 – критерий задачи. Оптимальное управление определяется из принципа максимума Понтрягина. В работе [5] для рассматриваемой задачи было доказано свойство глобальной управляемости и получен вид оптимального управления $u^*(t)$

$$u^*(t) = \varepsilon \cdot \text{sign}(\sum_{i=1}^N C_i^1 \cos(\omega_i t) + C_i^2 \sin(\omega_i t)), \quad (4)$$

где $C_i^1, C_i^2, i = 1, \dots, N$ – неизвестные постоянные управления.

Переключения релейного управления (4) происходят в моменты времени $t_m, m = \overline{1, K-1}$. Пусть τ_n – длительности n -го интервала постоянства управления, $n = \overline{1, K}$, тогда решение уравнений динамики (1) при различных значениях K выписывается в виде системы $2N$ нелинейных уравнений: (5)

$$\begin{cases} 2 \sum_{j=1}^K (-1)^{j+1} \cos\left(\omega_i \sum_{k=j}^K \tau_k\right) - \cos\left(\omega_i \sum_{k=1}^K \tau_k\right) = -1^{K-1} + \frac{-1^s \omega_i^2}{\varepsilon} \left(\frac{p_i^*}{\omega_i} \sin \omega_i T^0 + q_i^* \cos \omega_i T^0\right), \\ 2 \sum_{j=1}^K (-1)^{j+1} \sin\left(\omega_i \sum_{k=j}^K \tau_k\right) - \sin\left(\omega_i \sum_{k=1}^K \tau_k\right) = (-1)^s \frac{\omega_i}{\varepsilon} (-p_i^* \cos \omega_i T^0 + q_i^* \omega_i \sin \omega_i T^0), \\ i = 1, \dots, N. \end{cases}$$

Управление на первом интервале может быть выбрано как ε , так и $-\varepsilon$, для чего вводится параметр s , равный 0 и 1 соответственно.

Замечание 1. Решение системы (5), отвечающее управлению $u^*(t)$ для начального вектора $x(0) = (q_1^*, p_1^*, \dots, q_N^*, p_N^*)^T$, соответствует $-u^*(t)$ для $-x(0) = (-q_1^*, -p_1^*, \dots, -q_N^*, -p_N^*)^T$.

Лемма 1. (Необходимые условия экстремума) Для исследования управления с произвольным количеством переключений требуется [5], чтобы всякое решение задачи (1) – (3) с кусочно-непрерывным управлением (4) удовлетворяло системе уравнений (5) и условиям, следующим из невырожденности оптимального управления

$$\det \begin{pmatrix} \cos(\omega_1 t_s) & \dots & \cos(\omega_1 t_s + 2N-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sin(\omega_N t_s) & \dots & \sin(\omega_N t_s + 2N-1) \end{pmatrix} = 0, s = 1, \dots, K - 2N. \quad (6)$$

Замечание 2. Управляемое состояние $(q_1^*, p_1^*, \dots, q_N^*, p_N^*)^T$ с управлением $u^*(t)$ за время T^0 соответствует достижимому состоянию $(q_1^*, -p_1^*, \dots, q_N^*, -p_N^*)^T$ с управлением $u^*(T^0 - t)$ за то же самое время.

Моделирование

Приводится расчет оптимального управления для системы четырех несинхронных осцилляторов со следующими параметрами: $\varepsilon = 0.4$, $\{\omega_i\}_{i=1}^4 = \{1, 1.4, 1.7, 2\}$, $\mathbf{x}(0) = (2, 2.5, 0, \dots, 0, 0)^T$ с использованием Леммы 1, где начальное приближение будет получено по методу Нейштадта – Итона путем определения начального вектора сопряженной системы из принципа максимума Понтрягина. Траектории движения четырех осцилляторов со скалярным управлением с девятью переключениями приводятся на рис. 1.

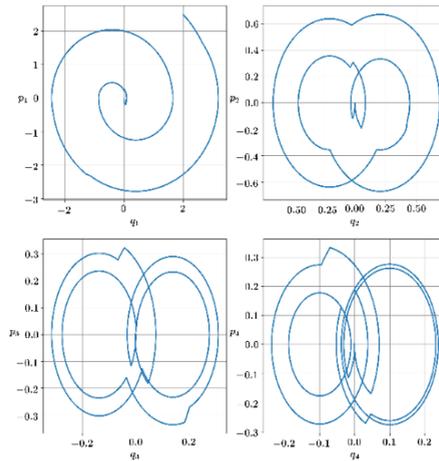


Рис. 1. Фазовые плоскости четырех осцилляторов

Заключение

В данной работе рассмотрена задача оптимального управления группой несинхронных осцилляторов со скалярным управляющим воздействием по критерию быстродействия. Выбранное приближение по методу Нейштадта – Итона в случае 4-х осцилляторов позволяет находить закон оптимального управления и строить траектории успокоения.

1. **Черноустько, Ф.Л.** Управление колебаниями / Ф.Л. Черноустько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – Москва: Наука, 1980. – 384 с.
2. **Овсевиц, А.И.** Асимптотически оптимальное управление в форме синтеза для системы линейных осцилляторов / А.И. Овсевиц, А.К. Федоров // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 452. – № 3.
3. **Kayumov, O.R.** On the Optimal Control Function Diagrams in the Problem of the Movement of a Platform with Oscillators / O.R. Kayumov //

Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2024. – V. 63.– P. 279–297.

4. **Kamzolkin, D.V.** Optimal Control of a Harmonic Oscillator with Parametric Excitation / D.V. Kamzolkin, V.P. Ilyutko, V.V. Ternovski // Mathematics. – 2024. – №12.
5. **Берлин, Л.М.** Необходимые условия экстремума и метод Нейштадта – Итона в задаче оптимального быстрогодействия группой несинхронных осцилляторов / Л.М. Берлин, А.А. Галаев, П.В. Лысенко // Автоматика и телемеханика. – 2024. – №6. – С. 97-114.

Л.М. Берлин, А.А. Галаев, П.В. Лысенко

ГИБРИДНАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ АРХИТЕКТУРА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
berlin.lm@phystech.edu, galaev@ipu.ru, pashlys@yandex.ru*

Введение

Центральную роль в задачах классификации занимает проверка статистических гипотез [1], когда необходимо определить, принадлежит ли наблюдение одному из двух (бинарная) или нескольких (многоклассовая) классов. Решение принимается на основе некоторого статистического критерия, значение которого сравнивается с порогом, выбранным на основе эталонной выборки.

В последние годы, с развитием вычислительных возможностей техники, обрели популярность методы машинного обучения и его подмножества – глубокого (глубинного) обучения, связанного с нейросетевыми алгоритмами. В приложениях к акустическим сигналам традиционно использовались различные спектральные и временные признаки сигналов с такими методами машинного обучения, как метод опорных векторов или градиентный бустинг, использующий решающие деревья в качестве базовых алгоритмов [2], но в последние годы приобрели популярность алгоритмы глубинного обучения, а именно сверточные нейросети, работающие сразу на частотно-временных представлениях сигналов, обычно спектрограммах [3]. Нейросеть при обучении вычисляет признаки, наиболее релевантные для разделения классов. Такой подход демонстрирует превосходство над классическими методами, однако часто уступает им в случае сложной акустической обстановки исследуемых сигналов и

низком отношении сигнала к шуму, что часто наблюдается при исследовании гидроакустических сигналов [4].

В докладе рассматривается задача многоклассовой классификации гидроакустических сигналов кораблей различных типов. Для её решения предложена новая гибридная нейросетевая архитектура, принимающая на вход как частотно-временное представление сигнала, так и спектральные характеристики физической природы. Показано улучшение качества классификации относительно подходов, учитывающих только один тип признаков.

Задача многоклассовой классификации гидроакустических сигналов

Дан набор данных $\mathbf{X} = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}$, представляющий собой множество записанных акустических сигналов \mathbf{X} , в соответствие которым поставлены метки классов объектов \mathbf{Y} , присутствующих на записи. Требуется построить алгоритм $\mathbf{a}: \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y}$, способный определять вероятность принадлежности произвольного объекта $x \in \mathbf{X}$ классам обучающей выборки. При этом алгоритм оперирует не самими сигналами, а их признаковым описанием $\mathbf{f}(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x))$, пытаясь разделить объекты в полученном признаковом пространстве.

Для решения задачи предложена гибридная нейросетевая архитектура, которая принимает на вход как двумерное частотно-временное представление сигнала, в данном случае спектрограмму $\mathbf{S}(t, \omega) = |\mathbf{STFT}(t, \omega)|^2$, так и набор одномерных спектральных признаков, к которым относятся мел-кепстральные коэффициенты **MFCC**, спектральный центроид, энтропия Шеннона и Винера и ряд других классических признаков, традиционно применяемых для классификации акустических сигналов. Использование спектрограммы и спектральных признаков, отражающих физические характеристики как объектов, так и среды, позволяет надеяться на хорошее качество классификации сложных гидроакустических сигналов.

Моделирование

Модель предложенной архитектуры реализована средствами языка Python и библиотеки PyTorch. Для обучения и валидации использован набор данных DeepShip [5], включающий в себя сигналы четырех классов: Cargo (Сухогруз), Passenger Ship (Пассажирский корабль), Tug (Буксир) и Tanker (Танкер), сохраненные в wav-файлах с частотой дискретизации 32 кГц. Элементом выборки x является сигнальное окно длиной в 1 секунду, по которому вычисляется спектрограмма и набор признаков, перечисленных выше. Обучающая и валидационная выборки сигналов

имеют размеры 60000 и 15000 сигнальных окон соответственно и не пересекаются, что особенно важно для получения метрик классификации в эксперименте. Результаты обучения показаны на Рис. 1. График обучения слева демонстрирует отсутствие переобучения, а график справа – ROC-кривые, характеризующие качество классификации обученной модели. Видно, что модель достигает высоких метрик классификации AUC ROC, равных в среднем 0.82.

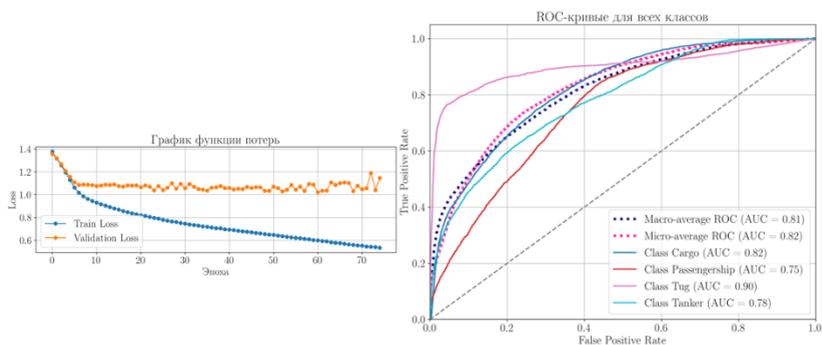


Рис. 2. График зависимости функции потерь при обучении и ROC-кривые после обучения

Заключение

В данной работе рассмотрена задача многоклассовой классификации гидроакустических сигналов кораблей четырех типов. Для её решения предложена новая гибридная нейросетевая архитектура, принимающая на вход как частотно-временное представление сигнала, так и спектральные характеристики физической природы. Обучение модели реализовано средствами языка Python и библиотеки PyTorch. В результате обучения получены высокие метрики разделения классов тестовых сигналов, что показывает перспективность предложенного подхода.

1. **Vapnik, V.** The nature of statistical learning theory / V. Vapnik. Information Science and Statistics. – New York:Springer, 2010. – 314.
2. **Song, G.** A machine learning-based underwater noise classification method / G. Song, X. Guo, W. Wang et al. // Applied Acoustics. – 2021. – Vol. 184.
3. **Shen, S.** Auditory Inspired Convolutional Neural Networks for Ship Type Classification with Raw Hydrophone Data / S. Shen, H. Yang, J. Li et al. // Entropy. – 2018. – Vol. 20.

4. **Aslam, M.A.** Underwater sound classification using learning based methods: A review / M. A. Aslam, L. Zhang, X. Liu et al. // Expert Systems with Applications. – 2024. – Vol. 255.
5. **Irfan, M.** DeepShip: An underwater acoustic benchmark dataset and a separable convolution based autoencoder for classification / M. Irfan, Z. Jiangbin, S. Ali et al. // Expert Systems with Applications. – 2021. – Vol. 183.

М.В. Близно, Я.С. Пикалёв

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИБЛИОТЕКИ SANI ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАТАХ НАРЕЗКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ДЕТЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ

*ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта»,
Донецк, ДНР
bmv.ipai@mail.ru, i@pikalev.ru*

Введение

С развитием технологий видеонаблюдения задачи компьютерного зрения, такие как обнаружение объектов, становятся всё более актуальными. При обработке изображений высокого разрешения, полученных с дронов или спутников, детекторы часто сталкиваются с проблемой обнаружения малых объектов, так как они занимают небольшую площадь в кадре. Современные подходы, например, YOLO [1], испытывают трудности при обработке таких объектов, поскольку свёртка уменьшает их размеры, что приводит к потере данных.

В данной работе рассматривается использование библиотеки SANI [2] для повышения точности и производительности детекторов объектов. Была проведена серия экспериментов с использованием нейросетевой модели YOLOv8n обученной на сформированном наборе данных н базе СОСО.

Исследование библиотеки SANI и анализ результатов

Метод гипервывода с помощью нарезки основан на разделении изображений на фрагменты с возможностью настройки параметров фрагментации [2]. Разделение изображения на перекрывающиеся фрагменты позволяет увеличить площадь объектов на изображении в процессе обнаружения, по сравнению с исходным изображением высокого разрешения.

Для проведения экспериментов была выбрана базовая модель YOLOv8n, которая обучалась на сформированном наборе данных на базе большого набора данных СОСО [3], состоящего из классов, которое с

большой долей вероятности будут встречаться при съемке с дронов и БПЛА

Параметры эксперимента:

- Размеры нарезки: 256×256, 512×512, 768×768

- Коэффициенты перекрытия: 0.0, 0.25, 0.5

- Порог доверия: 0.5

В таблице 1 и 2 представлены результаты проведенных экспериментов.

Таблица 1

Таблица обнаруженных объектов

Размер нарезки	Перекрытие	Количество обнаружений				
		изоб. 1	изоб. 2	изоб. 3	изоб. 4	изоб. 5
Без нарезки	–	0	8	7	8	10
256×256	0.0	9	46	30	21	33
256×256	0.25	11	42	26	21	41
256×256	0.5	19	51	37	29	50
512×512	0.0	17	36	18	19	30
512×512	0.25	17	33	18	19	31
512×512	0.5	22	36	22	19	31
768×768	0.0	1	29	15	17	24
768×768	0.25	2	29	15	18	24
768×768	0.5	3	29	16	18	26

Таблица 2

Таблица средней точности обнаружений

Размер нарезки	Перекрытие	Средняя точность				
		изоб. 1	изоб. 2	изоб. 3	изоб. 4	изоб. 5
Без нарезки	–	0.000	0.634	0.726	0.565	0.728
256×256	0.0	0.645	0.686	0.677	0.721	0.727
256×256	0.25	0.672	0.723	0.679	0.748	0.704

Размер нарезки	Пере- кры- тие	Средняя точность				
		изоб. 1	изоб. 2	изоб. 3	изоб. 4	изоб. 5
256×256	0.5	0.672	0.705	0.685	0.746	0.722
512×512	0.0	0.661	0.687	0.741	0.764	0.771
512×512	0.25	0.670	0.708	0.751	0.752	0.760
512×512	0.5	0.665	0.698	0.726	0.770	0.780
768×768	0.0	0.547	0.692	0.755	0.732	0.782
768×768	0.25	0.636	0.692	0.740	0.738	0.787
768×768	0.5	0.570	0.700	0.744	0.742	0.776

Каждая конфигурация нарезки изображений была протестирована на одних и тех же пяти изображениях из тестовой выборки, содержащих мелкие объекты. Для оценки качества использовались метрики: количество обнаруженных объектов, средняя точность и визуальный анализ детекций.

Лучшие результаты по количеству детекций достигаются при размере нарезки 256×256 и перекрытии 0.5. Однако при увеличении размера нарезки до 768×768 точность возрастает, но общее количество обнаруженных объектов может снижаться из-за уменьшения кратности деления изображения.

Наиболее устойчивое поведение наблюдается при размере слайса 512×512 и перекрытии 0.5. при данных значениях достигается баланс между точностью и количеством детекций.

Выводы

В ходе работы было проанализировано влияние параметров библиотеки SAHИ на эффективность детекции объектов небольшого размера с использованием обученной модели YOLOv8n. Проведённые эксперименты показали, что метод гипервывода с применением нарезки изображений позволяет существенно повысить качество детекции по сравнению с прямой обработкой изображений большого разрешения.

Метод SAHИ может быть применен в системах обработки изображений с дронов и БПЛА, где критически важно обнаружение объектов малой площади. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию параметров скорости работы и тестирование на реальных сценах с высоким уровнем шума и сложности.

1. **Redmon J.** You only look once: Unified, real-time object detection //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2016.
2. **F. C. Akyon, S. Onur Altinuc and A. Temizel,** "Slicing Aided Hyper Inference and Fine-Tuning for Small Object Detection," 2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Bordeaux, France, 2022, pp. 966-970, doi: 10.1109/ICIP46576.2022.9897990.
3. **T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár, and C. L. Zitnick,** "Microsoft COCO: Common objects in context," in ECCV. Springer, 2014, pp. 740– 755.

М.Э. Бузиков

ПРИМЕРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
me.buzikov@physics.msu.ru*

Введение

Задающее воздействие (уставка) является входным сигналом для системы автоматического управления (САУ). Если есть устройство, которое формирует уставку автоматически, то это устройство плюс САУ образуют новую САУ. Современные САУ нередко используют описанное иерархическое наслоение [1, 2].

Например, использование PX4-Autopilot [3] в Offboard Mode для управления коптером, подразумевает, что компьютер-компаньон решает некоторую задачу управления и на основе её решения формирует уставку для коптера в виде желаемого положения (скорости или ускорения) в данный момент времени. Сформированная уставка в реальном времени передается САУ коптера и автопилот использует ПИД-регуляторы для формирования управляющего сигнала (тока) для моторов.

В указанном примере, для получения уставки из решения задачи управления на компьютере-компаньоне существует несколько путей. Самый благоприятный из них – это получение решения в форме оптимального синтеза (управление по обратной связи). В этом случае легко вычислить обобщенные скорости, отвечающие высшим порядкам производных координат, которые позволяет вычислить выбранная модель объекта управления. Менее благоприятным является решение в виде программного управления. Его можно использовать напрямую, пересчитывая в

обобщенные скорости с течением времени и передавая автопилоту нужные компоненты обобщенной скорости. Либо, вычислить на основе программного управления опорную траекторию и дополнительно решать задачу следования опорной траектории [4], для получения уставки.

На практике используют либо оптимальный синтез [5], либо следование опорной траектории [6], т.к. непосредственное использование программного управления приводит к накоплению систематических ошибок. Если вычислительные возможности позволяют в каждый момент времени для новых начальных условий стабильно пересчитывать оптимальное программное управление (хотя бы в текущий момент времени), то можно осуществить оптимальный синтез. Если вычислительных возможностей хватает только на однократное вычисление оптимального программного управления, то остается использовать следование опорной траектории.

Цель этой работы состоит в иллюстрации постановок задач оптимального по быстродействию управления, для которых относительно недавно разработаны эффективные способы решения, позволяющие формализовать уставку в форме оптимального синтеза.

Эффективно решаемые задачи быстродействия

Пусть вектор состояния $s(t; \mathbf{u})$ является абсолютно непрерывным решением $ds/dt = f(s, \mathbf{u})$, при $s(0; \mathbf{u}) = \mathbf{s}_0$ и некотором $\mathbf{u}(t)$ из компакта U . Целевое множество (множество желаемых финальных состояний) будем описывать с помощью $G(t)$. Задача быстродействия заключается в таком выборе \mathbf{u} , удовлетворяющем ограничениям включения в U , чтобы момент времени t , когда впервые $s(t; \mathbf{u})$ попадет в $G(t)$, был минимальным.

Если оптимальное управление $\mathbf{u}^*(t; \mathbf{s}_0)$ можно эффективно вычислять для всех начальных условий \mathbf{s}_0 , то $\mathbf{u}^*(0, \mathbf{s}_0)$ определяет оптимальный синтез, т.к. не трудно осуществлять пересчет начальных условий в реальном времени, в соответствии с уравнением состояния. На практике \mathbf{s}_0 оценивают по фильтрации показаний сенсоров (для простоты мы считаем систему полностью наблюдаемой). Если время расчета $\mathbf{u}^*(0, \mathbf{s}_0)$ мало, то можно в реальном времени использовать это значение в качестве уставки для низкоуровневой САУ. В противном случае необходимо чтобы, хотя бы единожды можно было вычислить параметры, определяющие функцию $\mathbf{u}^*(\cdot; \mathbf{s}_0)$. Если для решения оптимизационной задачи используется принцип максимума, то этими параметрами являются начальные или терминальные значения сопряженных переменных. Тогда, путем интегрирования уравнения состояния можно получить опорную траекторию.

Приведем три примера элементарных моделей, для которых возможно эффективно вычислять оптимальный синтез. Модель простых

движений: $ds/dt = \mathbf{u}$, U – шар. Модель изотропной ракеты: $s = (\mathbf{r}, \mathbf{v})$, $d\mathbf{r}/dt = \mathbf{v}$, $d\mathbf{v}/dt = \mathbf{u} - \mathbf{v}$, U – шар. Модель Дубинса: $s = (x, y, \varphi)$, $dx/dt = \cos \varphi$, $dy/dt = \sin \varphi$, $d\varphi/dt = u$, $U = [-1, +1]$. Для модели простых движений и модели изотропной ракеты размерность пространства состояний может быть любой. Для модели Дубинса и модели изотропной ракеты эффективные алгоритмы синтеза управления в случае движущегося целевого множества разработаны недавно [7, 8].

Приведенные примеры моделей движения показывают, что как только получен оптимальный синтез, уравнения состояния позволяют осуществить пересчет в обобщенные скорости. Для модели простых движений \mathbf{u} можно использовать как уставку по скорости. Для модели изотропной ракеты $\mathbf{u} - \mathbf{v}$ как уставку по ускорению. Для модели Дубинса уставка по ускорению $- (u \sin \varphi, u \cos \varphi)$.

Заключение

Эксперименты показывают, что вычисление уставки для перечисленных моделей можно производить с частотой более 10 кГц на базовом процессоре ноутбука, что является перспективным для использования на бортовом вычислителе. Также можно сделать вывод, что чем больше уставка учитывает маневренные возможности объекта управления, тем лучше низкоуровневая САУ отработывает соответствующую уставку.

Отметим также возможность декомпозиции движений по разным направлениям. Например, в плоскости xy можно использовать управления для машины Дубинса, а по оси z для одномерной изотропной ракеты. Задачи быстрогодействия в этом случае можно решать независимо.

1. **Girard, A., Pappas, G.J.** Hierarchical control system design using approximate simulation // *Automatica*. – 2009. – Vol. 45. – No. 2. – P. 566–571.
2. **Firouzmand, E., Talebi, H. A., Sharifi, I.** Hierarchical control of linear systems using extended robust approximate simulation // *Eur J of Control*. – 2024. – Vol. 78. – Art. No. 100987.
3. **Meier, L. et al.** PX4/PX4-Autopilot: v1.16.0-beta1. – Zenodo, 2025. DOI: 10.5281/zenodo.15243209.
4. **Rubi, B., Ramon, P., Morcego, B.** A Survey of path following control Strategies for UAVs focused on quadrotors // *J Intel and Rob Syst*. – 2020. – Vol. 98. – No. 2. – P. 241–265.
5. **Shkel, A.M., Lumelsky, V.** Classification of the Dubins set // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2002. – Vol. 34. – No. 4. – P. 179–202.
6. **Yao, W., Cao, M.** Path Following Control in 3D Using a Vector Field // *Automatica*. – 2020. – Vol. 117. – Art. No. 108957.

7. **Buzikov, M.** Computing the minimum-time interception of a moving target // *J Optim Theory Appl.* – 2024. – Vol. 202. – No. 2. – P. 975–995.
8. **Buzikov, M.E., Mayer, A.M.** Minimum-time interception of a moving target by a material point in a viscous medium // *Automatica.* – 2024. – Vol. 167. – Art. No. 111795.

А.С. Быков, А.М. Кошман, А.В. Леонард, В.А. Шурыгин

СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ ДВУМЕРНЫХ ДАННЫХ О СРЕДЕ И ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, alexanderbs00@mail.ru, artkoshman@mail.ru, alex-leonard@yandex.ru, au@vstu.ru

Введение

В работе рассматривается вопрос совместного моделирования обработки данных о среде, получаемых от двумерного лидара, и использования этих данных при планировании движения мобильного робота. Представлены результаты интеграция алгоритмов обработки данных о среде с модифицированным алгоритмом планирования движения мобильного робота. Актуальность рассматриваемого вопроса обусловлена активным развитием мобильной робототехники и необходимостью разработки эффективных методов управления мобильными роботами.

1. Постановка задачи

Ранее в работе [1] были предложены алгоритмы обработки данных об окружающей среде мобильного робота. Описанные алгоритмы позволяют обрабатывать данные с двумерного лидара и производить аппроксимацию (расчёт координат x_1 , y_1 центра габаритной окружности для препятствия и её радиуса R_1).

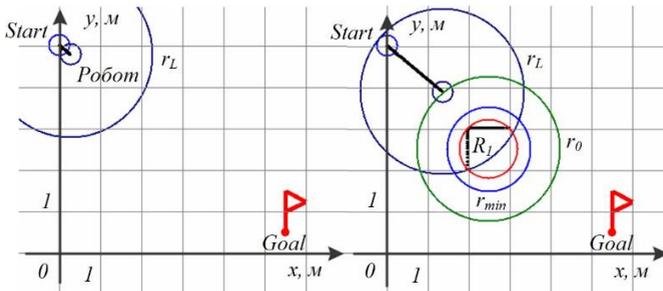
В качестве метода планирования движения центра масс мобильного робота рассматривается способ, основанный на методе $VC/APF+BC_{\tau}^I$ [2]. Данный метод обеспечивает теоретически безударный обход статичных препятствий, используя отталкивающую силу, которая действует в поле препятствия между внешней r_0 и внутренней r_{min} его границами. Алгоритму планирования движения мобильного робота необходима информа-

ция о размерах и расположении препятствий, аппроксимированных окружностями.

Требуется интегрировать указанные алгоритмы друг с другом и проверить работоспособность комбинированного алгоритма с помощью численных экспериментов.

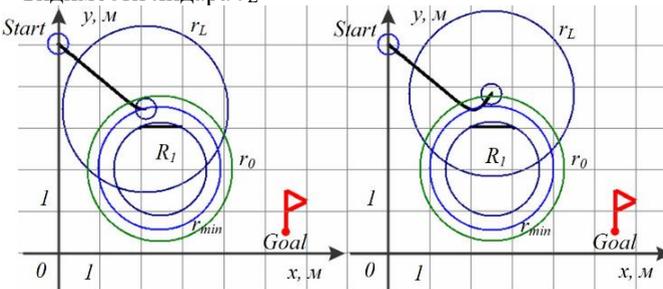
2. Интеграция алгоритмов обработки данных о среде с алгоритмом планирования движения

В данной работе, в отличие от работы [2], параметры препятствия изначально неизвестны, на каждом временном шаге они определяются при нахождении препятствия в зоне видимости лидара r_L и передаются в модифицированный алгоритм планирования движения мобильного робота. На рисунке 1 представлены результаты компьютерного моделирования обхода роботом статического препятствия в виде квадрата со стороной 1 м за заданное время.



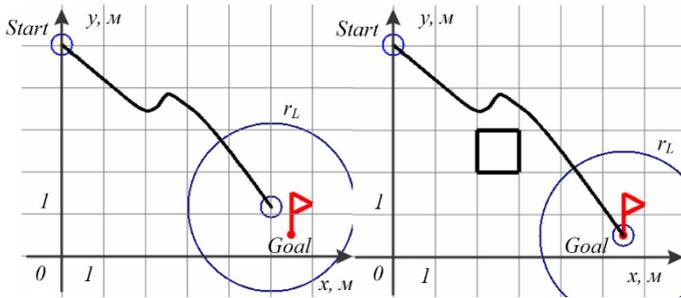
а) свободное движение, препятствие вне зоны видимости лидара r_L

б) обнаружение препятствия, расчет параметров препятствия



в) уклонение от препятствия с переопределением параметров

г) выход из отталкивающего, адаптивного поля препятствия



д) свободное движение к целевой точке за препятствием е) итог объезда препятствия за заданное время

Рис. 1. Целевое движение робота с обходом препятствия

Для оценки влияния расчётных параметров препятствия на результат планирования движения центра масс мобильного робота были проведены численные эксперименты для случаев, когда препятствие направлено углом к роботу (рис. 2, а) и когда препятствие расположено ребром к роботу (рис. 2, б).

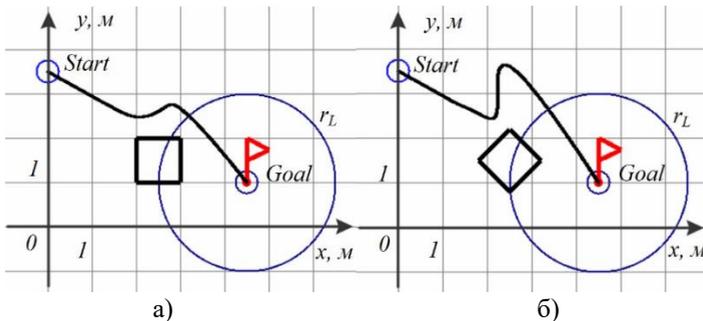


Рис. 2. Синтезированные траектории движения центра масс робота

Заключение

Проведенные численные эксперименты показали, что комбинированный алгоритм, в общем случае, работоспособен. Моделируемый мобильный робот с помощью виртуального сенсора обнаруживает препятствия, рассчитывает их параметры и совершает безударный обход препятствий. Как видно из рисунка 2, при преодолении роботом одного и того же препятствия с разной его пространственной ориентацией, информация об окружающей среде робота существенно влияет на получаемые траектории (законы) движения центра масс мобильного робота к целевой точке.

Комбинированный алгоритм может быть рассмотрен к применению в системах управления мобильных роботов, использующих в качестве основного сенсора двумерный лидар [3].

1. **Быков А. С.** Классификация препятствий и способы их аппроксимации для задач обхода статичных препятствий / А. С. Быков, А. М. Кошман, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2024. – № 4(287).
2. **Леонард А. В.** Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени (VC/APF+BC¹). Ч.1 Теория / А. В. Леонард // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2022. № 9(268). С. 34-42.
3. **Sarkar, Meenakshi & Prabhakar, Manav & Ghose, Debasish.** Avoiding Obstacles with Geometric Constraints on LiDAR Data for Autonomous Robots. Third Congress on Intelligent Systems, Proceedings of CIS 2022, Volume 1, 2023. pp.749-761.

П.В. Васильев¹, О.В. Даринцев², Р.А. Мунасыпов³

ИССЛЕДОВАНИЕ АССОЦИАТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ

¹ Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, г. Уфа, pavel-vasilev-99@bk.ru, ^{2,3} Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, ²oleg_sam@mail.ru, ³ rust40@mail.ru

Современные системы автоматического управления (САУ) мехатронных и робототехнических устройств сталкиваются с нелинейностями и неопределенностью параметров, что снижает эффективность традиционных линейных методов [1]. Актуальна разработка интеллектуальных систем, в частности, использующих ассоциативные регуляторы (АР) [3,4]. Нелинейная природа АР затрудняет анализ их устойчивости. Целью работы является исследование применения метода гармонического баланса Гольдфарба для анализа устойчивости САУ с АР.

АР рассматривается как нелинейный элемент $u(t) = F(\varepsilon(t), \varepsilon(t))$. Для его анализа методом МГЛ [5,6], на вход АР подается гармонический сигнал $x(t) = a \cdot \sin(\omega t)$, а выходной сигнал $u(t)$, являющийся периодическим, раскладывается в ряд Фурье. Принимая гипотезу фильтра и считая, что

постоянная составляющая отклика отсутствует, учитывается только первая гармоника. Коэффициенты гармонической линеаризации $q(a, \omega)$ и $q'(a, \omega)$, характеризующие действительную и мнимую части эквивалентного комплексного коэффициента усиления АР, вычисляются численно методом трапеций по формулам [6]:

$$q(a, \omega) = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} F(a \sin \varphi, a \omega \cos \varphi) \sin \varphi d\varphi,$$

$$q'(a, \omega) = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} F(a \sin \varphi, a \omega \cos \varphi) \cos \varphi d\varphi. \quad (1)$$

Исследование показало, что зависимость коэффициентов от частоты ω для АР проявляется в основном при малых амплитудах входного сигнала a . В первом приближении можно считать $q(a, \omega) \approx q(a)$ и $q'(a, \omega) \approx q'(a)$.

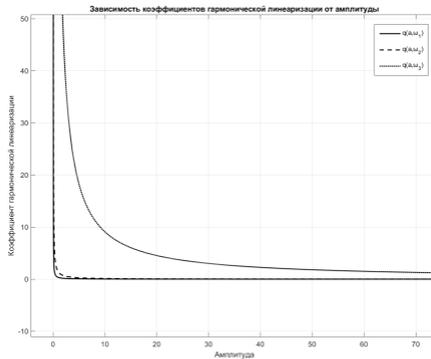


Рис. 1. Зависимость коэффициентов гармонической линеаризации нечеткого регулятора от амплитуды a и частоты ω

Эквивалентная частотная передаточная функция АР $W_{AP}(ja)$ и обратная ей амплитудно-фазовая характеристика с отрицательным знаком $Z(a)$ определяются как:

$$W_{AP}(ja) = q(a) + iq'(a), \quad (2)$$

$$Z(a) = -1/W_{AP}(ja). \quad (3)$$

Устойчивость замкнутой системы анализируется по критерию Гольдфарба: автоколебания в системе возникают, если годограф линейной части системы $W_{ЛЧ}(j\omega)$ пересекается с годографом $Z(a)$ нелинейного элемента, т.е. $W_{ЛЧ}(j\omega) = Z(a)$. Точки пересечения определяют амплитуду и частоту возможных автоколебаний.

Моделирование проводилось в *Matlab/Simulink*. Исследовались системы с ЛЧ, обладающими различным характером устойчивости.

Моделирование показало что, по аналогии с типовыми нелинейными элементами, годограф нелинейного элемента $Z(a)$ не пересекается

с $W_{лч}(j\omega)$, что соответствует устойчивой работе системы. Для неустойчивой ЛЧ может наблюдаться пересечение, указывающее на возникновение автоколебаний.

Продемонстрирована работоспособность метода гармонической линеаризации в сочетании с критерием Гольдфарба для анализа устойчивости замкнутых САУ с АР. Подход позволяет идентифицировать режимы возникновения автоколебаний и оценить устойчивость на основе анализа частотных характеристик, что особенно ценно для систем с нетиповыми нелинейностями. Полученные результаты открывают перспективы для оптимизации параметров АР.

1. Способ моделирования слабоструктурированных задач управления перспективной интеллектуальной системы управления эксплуатацией сложной технической системы / В.В. Ларькин, М.Л. Бегунов, А.А. Вырвич [и др.] // Инновационные идеи в машиностроении: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 27–30 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – С. 185-189. – EDNMKFPNA.
2. **Белов, А.М.** Применение фильтра Калмана в интеллектуальных системах управления электроприводами промышленных систем / А.М. Белов, М.П. Белов // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2024. – Т.1. – С. 134-137. – EDN YOPTNN.
3. **Огнев И.В., Борисов В.В., Сутула Н.А.** Ассоциативные память, среды, системы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2016. – 420 с.
4. **Васильев П.В.** Сравнительный анализ нечеткой логики и ассоциативной памяти в задачах интеллектуального управления / П.В. Васильев, О.В. Даринцев В, Р.А. Мунасыпов // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: электронное издание, Железногорск, 30 ноября 2024 года. – Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2024. – С. 159-163. – EDN RNZSZE.
5. **Негушил А.В., Гольдфарб Л.С., Александровский И.М. и др.** Теория автоматического управления. Ч II. – М.: Высшая школа, 1972. – 430с.
6. **Мунасыпов, Р.А.** Синтез адаптивных многосвязных систем автоматического управления газотурбинными двигателями структурными методами: специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Мунасыпов Рустэм Анварович. – Уфа, 2003. – 32 с. – EDN NHIZAL.

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ-СТАНКОМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК*

¹Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, г.Уфа,
pavel-vasilev-99@bk.ru,

^{2,3} Уфимский университет науки и технологий, г.Уфа, ²rust40@mail.ru,
³format_invest@mail.ru

Введение

Обработка лопаток авиадвигателей на роботах-станках требует применения адаптивных систем управления (АСУ) для компенсации неопределенностей процесса резания и повышения качества [1,2]. Ключевой проблемой являются вибрации шпиндельного узла (ШУ), снижающие точность. Целью работы является разработка АСУ для обработки лопаток, повышающей эффективность за счет подавления вибраций. Анализ показал перспективность беспоисковых АСУ с эталонной моделью [3,4]. Моделирование вибраций ШУ в *MatLab/Simulink* [5] подтвердило их негативное влияние на стабильность скорости вращения.

Для управления асинхронным двигателем (АД) мотор-шпинделя [6] используется пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор. Сигналы управления $u(t)$ для каналов потокосцепления (d) и момента (q) формируются ПИ-регулятором, параметры которого адаптируются. Обобщенный закон управления имеет вид:

$$\begin{cases} u_d = g_d^T e_d = g_{d0} e_{0d} + g_{d1} e_d + g_{d2} \dot{e}_d; \\ u_q = g_q^T e_q = g_{q0} e_{0q} + g_{q1} e_q + g_{q2} \dot{e}_q. \end{cases}$$

Ключевым является синтез беспоискового адаптивного алгоритма управления скоростью резания с учетом вибраций ШУ. Алгоритмы самонастройки параметров ПИ-регулятора g синтезированы на основе прямого метода Ляпунова для системы с эталонной моделью [1], что гарантирует асимптотическую устойчивость. Уравнения настройки вектора параметров g :

$$\Delta g = x^T B B^T S.$$

Структурная схема канала регулирования скорости с контуром адаптации включает блок адаптации, корректирующий коэффициенты

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФ в рамках научного проекта №25-19-20145.

- нелинейные, оптимальные и адаптивные системы — 2-е изд., испр. и доп. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 440 с.
2. **Петухова, С. М.** Разработка адаптивной системы управления с эталонной моделью процессом фрезерования / С. М. Петухова, М. С. Денисов // Проблемы научной мысли. – 2023. – Т. 2, № 9. – С. 32-38. – EDN TBXQMY.
 3. **Карпов, А. В.** Использование прогнозирования внешнего воздействия при адаптивном управлении мехатронными системами в недетерминированных условиях / А. В. Карпов // Повышение эффективной эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве: Материалы I Национальной научно-практической конференции с международным участием имени Г.П. Ерошенко, Саратов, 22 декабря 2023 года. – Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2023. – С. 147-155. – EDN XWAVXB.
 4. **Нгуен, Т. Т.** Адаптивные электромеханические системы управления манипуляционными роботами с упругими свойствами: специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нгуен Тиен Тханг, 2018. – 189 с. – EDN RYXRON.
 5. **Дьяконов В.П.** MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
 6. **Соколовский Г. Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием Москва, «Академия», 2006, 265 с.

И.В. Вилейко, К.Ю. Котов

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЕТЕКТОРА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*ФГБУН Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
г. Новосибирск, i.vileiko@g.nsu.ru*

Введение

Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ) — один из крупнейших инновационных проектов РАН, ориентированный на получение и использование синхротронного излучения в фундаментальных и прикладных исследованиях. В секции «Динамические процессы» станции 1-

3 ЦКП «СКИФ» применяется стойка регистрирующей аппаратуры с высокоскоростными рентгеновскими детекторами типа DIMEX [1–4] для регистрации быстропротекающих процессов методом рентгеноимпульсной съёмки. Для корректной работы необходима система позиционирования детектора, способная работать без вмешательства оператора в настройку системы в «рабочее положение».

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы управления для позиционирования детектора синхротронного излучения.

Основная часть

Разработка автоматизированной системы управления для позиционирования детектора синхротронного излучения предусматривала решение следующих задач:

- Разработать алгоритм позиционирования детектора с использованием информации о положении детектора во время работы алгоритма.
- Разработать программу-эмулятор движения детектора для тестирования работы системы позиционирования.

Система позиционирования включает две взаимосвязанные подсистемы: систему технического зрения (абсолютная система координат) и систему механических приводов (относительная система координат). Поскольку в реальных условиях установки стойки регистрирующей аппаратуры на линии распространения пучка направления осей этих систем могут иметь отклонения в пределах нескольких градусов, было необходимо учитывать неортогональности координатных осей при расчёте перемещений.

На данном этапе стойка регистрирующей аппаратуры находится на этапе проектирования и предварительной сборки, поэтому для того, чтобы максимально ускорить процесс введения её в эксплуатацию, необходимо разработать ПО для управления системой позиционирования детектора без имеющейся аппаратной части. Поэтому для моделирования и визуализации работы системы настройки детектора в «рабочее положение», а также тестирования алгоритма управления была создана программа-эмулятор, максимально приближенная к реальным условиям работы установки. Эмулятор рассчитывает смещения приводов с учетом ранее упомянутых угловых ошибок между осями относительной и абсолютной систем координат, заданных в виде параметров β и γ . Для ортогонализации неортогональной системы координат использовано QR-разложение [7], эквивалентное процессу ортогонализации Грамма–Шмидта [8], что позволило корректно вычислять преобразования координат при

расчетах векторов смещений. Реализация алгоритмических модулей была выполнена на языке Python с использованием библиотек NumPy [9] и SciPy [10], что обеспечило эффективную работу с матрицами и доступ к современным методам численной оптимизации.

Ключевым элементом системы стал алгоритм позиционирования, основанный на модификации квазиньютоновского метода оптимизации L-BFGS-B. Этот метод был выбран ввиду его устойчивости к выбору начального приближения, способности работать в многомерных пространствах и поддержки ограничений на управляемые параметры. Алгоритм реализует итерационную схему, в которой на каждом шаге, используя обратную связь от системы технического зрения (распознавание ArUco-маркера [6]), вычисляются необходимые смещения по линейным и угловым координатам для достижения заданной точки в абсолютной системе координат. Передача данных между алгоритмом и контроллером приводов осуществляется по протоколу MQTT, при этом обмен информацией структурирован в формате JSON.

Экспериментальная апробация системы была проведена в условиях, приближенных к реальным: угловые рассогласования между относительной и абсолютной системами координат составляли 5° по оси Y и 3° по оси Z; начальное положение детектора в абсолютной системе координат было задано вектором (4.0, 5.0, 6.0), целевая точка имела координаты (2.87, 63.91, 28.47), при этом конечная ориентация была определена вектором (0., -4.8, -2.2). Результаты тестирования показали, что система достигла целевых координат с точностью 0,01 мм по линейным перемещениям и $0,1^\circ$ по угловым, что существенно превосходит изначально установленные проектировщиками требования (1 мм и 1°) и соответствует современным стандартам автоматизированных систем прецизионного позиционирования [5].

Заключение

В результате работы был реализован алгоритм позиционирования детектора на основе численного метода нахождения относительных перемещений для достижения требуемого пространственного и углового положения в абсолютной системе координат, представленной системой технического зрения. Также была написана программа-эмулятор движения детектора для визуализации работы системы настройки детектора в «рабочее положение» и тестирования алгоритма позиционирования.

Научная новизна: разработан автоматизированный алгоритм позиционирования детектора синхротронного излучения.

Практическая ценность: разработанная система управления, регистри-

рующая аппаратура и соответствующее ПО обеспечивает точность позиционирования до 100 мкм по поступательным осям и 0.1° по вращательным и будет эксплуатироваться в секции «Динамические процессы» на станции СКИФ.

1. **Жуланов В. В.** Регистрирующая аппаратура для исследования детонационных и ударно- волновых процессов с использованием синхротронного излучения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новосибирск –2011.
2. **Аульченко В. М., Жуланов В. В., Кулипанов Г. Н. и др.** Исследование быстропротекающих процессов рентгенодифракционными методами в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения // УФН. 2018. 188, № 6. С. 577–594.
3. **L.I. Shekhtman et al.** Upgrade of the detector for imaging of explosions./ Physics Procedia 84 (2016) 189 – 196.
4. **В. М. Аульченко, А. А. Глушак, В. В. Жуланов, А. Н. Журавлев, В. А. Киселев, В. Н. Кудрявцев, П. А. Пиминов, В. М. Титов, Л. И. Шехтман.** Микрополосковый кремниевый детектор для изучения быстропротекающих процессов на пучке синхротронного излучения. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.- 2023, № 12.
5. **Y.-M. Abiven, T. Bucaille, L. Chavas, E. Elkaim, P. Gourhant, Y. Liatimi, K. Medjoubi, S. Pierre-Joseph Zephir, V. Pinty, A. Somogyi, F. Thiam,** ROBOTIZING SOLEIL BEAMLINES TO IMPROVE EXPERIMENTS AUTOMATION, Synchrotron SOLEIL, Paris, France S. Bouvel, EFOR, Levallois Perret, France, B. Pilliaud, Mediane Systeme, Le Pecq, France. ICALEPCS 2019, complete volume of paper, p.183.
6. OpenCV documentation, URL: https://gregorkovalcik.github.io/opencv_contrib/tutorial_aruco_detection.html (дата обращения: 20.02.2025).
7. **Roger A. Horn,** Topics in Matrix Analysis, с.114-117 (Cambridge University Press 1994).
9. **Беклемишев Д. В.** Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. — М.: Наука.
10. NumPy documentation, URL: <https://numpy.org/doc/stable/> (дата обращения: 18.01.2024).
11. SciPy documentation, URL: <https://docs.scipy.org/doc/> (дата обращения: 18.01.2024).

ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДРОНОМ НА ОСНОВЕ ЭМГ-СИГНАЛОВ С ЗАМКНУТЫМ КОНТУРОМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, grr@ipu.ru*

Введение

Управление беспилотным летательным аппаратом (БЛА) человеком с использованием различных интерфейсов реализуется в рамках человеко-машинного взаимодействия, при котором восприятие внешней среды осуществляется опосредованно — посредством сенсорных и информационных систем робота. Такое восприятие сопряжено с рядом технических и когнитивных ограничений, как со стороны оператора, так и со стороны самой роботизированной системы. В то же время термин «восприятие», применяемый в контексте робототехники, во многом аналогичен понятию «искусственный интеллект» и отражает совокупность процессов, включающих измерение физических параметров, их интерпретацию и формирование представления о текущем состоянии объекта или среды.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию системы управления БЛА на основе миографического интерфейса. Такой подход позволяет реализовать интуитивное управление аппаратом, приближенное по характеру к естественным двигательным действиям человека, а также исследовать влияние индивидуальных психофизиологических факторов оператора на эффективность управления.

Система управления БЛА с системой обратной связи

Наиболее распространёнными средствами взаимодействия между оператором и системой управления до сих пор остаются традиционные механические интерфейсы – джойстики и клавиатуры. Однако их функциональность ограничена: они требуют от пользователя специальной подготовки и формирования новых моторных навыков, что снижает естественность взаимодействия и может вызывать трудности при управлении сложными техническими системами. В связи с этим возрастающий интерес вызывают мышечно-машинные интерфейсы (ММИ), которые опираются на регистрацию активности мышечной ткани с помощью различных сенсорных модальностей.

К числу таких технологий относятся электромиография (ЭМГ), ультразвуковая визуализация (УЗ), механомиография (ММГ) и ближняя инфракрасная спектроскопия (БИК). Электромиография является одним из наиболее изученных и широко применяемых методов, позволяющим регистрировать биоэлектрическую активность, возникающую в мышцах при их сокращении. Существуют как инвазивные, так и неинвазивные способы регистрации ЭМГ-сигналов. Наиболее распространённым в практическом применении является неинвазивный метод — поверхностная ЭМГ (sEMG), при котором электроды размещаются на коже над мышцей. Основными ограничениями метода являются нестабильность сигнала, перекрёстные помехи между соседними мышцами, а также высокая чувствительность к точности расположения электродов.

Миографический интерфейс управления (МИ) представляет собой систему регистрации электромиографических (ЭМГ) сигналов с последующей интерпретацией их в набор дискретных управляющих команд. Для съёма сигналов применяются поверхностные электроды, размещённые на коже оператора в области активных мышечных групп. Электрическая активность, регистрируемая электродами, поступает в программный модуль первичной обработки, который осуществляет сбор и запись данных. Далее сигнал передаётся через локальный сервер в основную управляющую программу, где производится его анализ и трансформация в управляющее воздействие на объект.

Обработка сигнала начинается с вычисления абсолютных значений, после чего применяется алгоритм сглаживания на основе метода скользящего среднего:

$$y_k = \frac{1}{n} \sum_{i=k-n+1}^k x_i,$$

где n – размер окна сглаживания, k – текущая позиция сигнала, x_i – значение исходного сигнала.

После сглаживания вычисляется разностной сигнал как абсолютная величина разности между исходным и сглаженным значениями. Далее выполняется процедура суммирования этих значений, что позволяет сформировать интегральный показатель активности мышцы, используемый в качестве управляющего признака. Сумма рассчитывается по формуле:

$$S_k = \sum_{i=1}^k |x'_i - \hat{x}_i|,$$

где S_k – накопленная сумма, x'_i – продцимированный сигнал, \hat{x}_i – его сглаженное значение.

В эксперименте приняла участие группа из 32 испытуемых в возрасте от 18 до 27 лет. Для реализации управления беспилотным летатель-

ным аппаратом с использованием миографического интерфейса применялся квадрокоптер DJI Tello EDU. Данный тип БЛА был выбран в связи с его доступностью, стабильностью полета и возможностью интеграции с внешними управляющими системами.

Заключение

При использовании клавиатурного интерфейса положение рук оператора определялось в соответствии с его индивидуальными предпочтениями, не регламентированными экспериментальными условиями. Испытуемому предлагалось пройти полосу препятствий, включающую три ряда ворот, различающихся по размеру и высоте, с максимально возможной скоростью. Участник самостоятельно выбирал оптимальную траекторию движения, принимая решения о прохождении через определённые ворота в каждом ряду. Задание моделирует реальные условия, приближённые к сценариям ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, в частности при проведении поисково-спасательных операций в зонах завалов или разрушенных сооружений.

По результатам проведённого исследования была разработана структурная модель системы управления беспилотным летательным аппаратом на основе миографического интерфейса, обеспечивающего интуитивное и естественное человеко-машинное взаимодействие за счёт использования мышечных сигналов оператора, а также получены экспериментальные данные, касающиеся влияния психологических факторов на эффективность управления.

1. **1. Воротников, С.А.** Информационные устройства робототехнических систем / С.А. Воротников. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2005. – 384 с. – EDN ZCLDWB.
2. **Wang, Z.** Ultrasonography and electromyography based hand motion intention recognition for a trans-radial amputee: A case study / Z. Wang [et. al.] // Med. Eng. Phys. – 2020. Vol. 75, Pp. 45–48. – DOI: 10.1016/j.medengphy.2019.11.005.
3. **Wu, H.** A CNN-SVM combined model for pattern recognition of knee motion using mechanomyography signals / H. Wu [et. al.] // Proceedings of the 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China. – 2019, Pp. 124–131. – DOI: 10.1109/ITNEC.2019.8729426.
4. **Туровский, Я.А.** Алгоритм коррекции статистического оценивания с учетом эффекта множественных сравнений на основе группировки результатов тестов / Я.А. Туровский, С.В. Борзунов, А.А.

А.С. Губанков, И.В. Горностаев

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ БПЛА РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ*

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
г. Владивосток,
Морской государственный университет имени адмирала
Г.И. Невельского, г. Владивосток,
gubankov@dvo.ru*

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят всё более широкое применение в решении прикладных задач в различных областях деятельности. В морских и океанических условиях эти задачи связаны в основном с выполнением осмотровых работ, таких как мониторинг морских и прибрежных территорий для отслеживания популяций редких и промысловых видов, оценка потенциальных объемов биологических ресурсов (за счет анализа размеров косяков рыб), аэрофотосъемка, воздушное лазерное сканирование, мультиспектральная съемка и т.д. Из-за необходимости оперативного осмотра значительных площадей, указанные работы целесообразно осуществлять группой БПЛА, выполняющих движение в общем построении на заданном расстоянии друг от друга. При этом для каждого БПЛА в построении требуется решать задачи планирования траектории и выбора режима движения (скорости) с учетом наличия внешних воздействий в морских условиях.

Решение задачи планирования траекторий движения групп БПЛА рассмотрено во множестве работ. Обычно для задания траекторий используют параметрические сплайны, а для их расположения в пространстве применяют методы потенциальных полей, штрафных функций, генетические алгоритмы и т.д. Однако, как правило, в этих методах предполагается, что скорость движения БПЛА (отдельно взятого или действующего в группе) уже известна, например, постоянна и равна заданному оператором или системой планирования полетов значению. При этом ограничения на величину развиваемого движителями БПЛА суммарного

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 24-29-00489).

вектора тяги не учитываются, что может приводить к тому, что при изменении условий окружающей морской среды, например, силы ветра, один или несколько беспилотников в группе не смогут поддерживать выбранный режим движения [1]. Это может привести к нарушению построения и прерыванию текущей миссии. Возникновение таких аварийных ситуаций над морской поверхностью без наличия соответствующей системы управления может привести к полной потере дорогостоящего оборудования. Из-за этого задача формирования такой программной скорости движения группы БПЛА определенного типа, при которой миссия будет выполнена как можно быстрее, а строй беспилотников не будет нарушен, становится актуальной.

Для задания программной скорости часто используются профили скорости, определяющие зависимость этой скорости от времени. Общим недостатком этих методов является то, что они либо не позволяют учесть ограничения на развиваемый движителями БПЛА суммарный вектор тяги, либо их затруднительно применить для управления группой БПЛА, траектория движения которой и условия окружающей среды могут измениться уже после начала выполнения миссии.

Таким образом, задача автоматического формирования режимов движения группы БПЛА (или в частном случае отдельного БПЛА) по гладкими пространственными траекториям является актуальной, но для ее успешного решения необходимо учитывать тип и параметры не только беспилотного аппарата, но и известные параметры окружающей среды, которые в процессе выполнения миссии могут существенно изменяться.

Метод формирования программной скорости движения группы БПЛА с учетом их типа

Решение этой задачи предлагается начать с формирования программной скорости отдельного БПЛА и получить соотношения, учитывающие их характерные особенности (мультироторный, гибридный, самолетный тип), а затем расширить это решение для группы беспилотников. С целью уменьшения вычислительной сложности разрабатываемого метода расчет программной скорости движения БПЛА будет производиться по упрощенной модели беспилотника. В этой модели БПЛА представлен в виде материальной точки, перемещающейся по траектории в неподвижной абсолютной системе координат (АСК), а его пространственная ориентация в процессе движения не учитывается. Это позволяет исключить из рассмотрения моменты действующих сил, а также влияние гироскопических эффектов со стороны движителей. Это упрощение допустимо при выполнении многих реальных полетных заданий, связанных

с его перемещениями по протяженным траекториям (мониторинг окружающей среды, объектов инфраструктуры и пр.).

Таким образом, вектор равнодействующей всех сил \mathbf{F}_Σ в АСК (см. рис. 1), приложенных к центру масс БПЛА, можно записать как

$$\mathbf{F}_\Sigma = m\mathbf{a} = \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_w + \mathbf{F}_{res}, \quad (1)$$

где m – масса БПЛА; $\mathbf{a} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ – вектор ускорения центра масс БПЛА в АСК; \mathbf{F}_t , \mathbf{F}_g , \mathbf{F}_w и \mathbf{F}_{res} – векторы суммарной силы тяги двигателей БПЛА, силы тяжести, силы воздействия ветра на БПЛА и силы сопротивления воздуха в АСК соответственно.

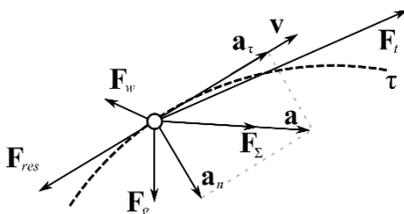


Рис. 1. Силы, действующие на БПЛА при его движении по k -му сплайну пространственной траектории в АСК

Для расчета искомой высокой программной скорости v^* , при движении с которой величина вектора тяги $|\mathbf{F}_t|$ не будет превышать ее максимальное допустимое значение $|\mathbf{F}_{max}|$, сначала перепишем уравнение (1) так, чтобы получить зависимость вектора тяги \mathbf{F}_t от величины скорости v и ускорения dv/dt . Для этого используем известный способ задания пространственных траекторий с помощью параметрических сплайнов третьего порядка, различные типы которых рассмотрены в работе [2]. Далее с учетом типа БПЛА получим выражение, связывающие $|\mathbf{F}_{max}|$ и соответствующее ему значение максимальной скорости v_m . Затем сформируем программную скорость v^* таким образом, чтобы эта скорость на всей траектории не превышала желаемую скорость v_d , определяемую видом выполняемой миссии, и рассчитанную v_m , а на отдельных участках была дополнительно снижена для возможности осуществления движения с нулевым тангенциальным ускорением.

Для исследования предложенного метода было проведено математическое моделирование движения группы БПЛА. Полученные программные скорости движения всех БПЛА либо принимали значения, равные желаемой скорости v_d , либо на участках траектории, где величина $v_d > v_m$, уменьшалась до значения λv_m , где $\lambda \in (0,1]$, при этом неизменно сохраняя заданный строй.

1. **Губанков, А.С.** Разработка метода формирования программной скорости движения группы БПЛА / А.С. Губанков, И.В. Горностаев // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 4 часть 4. – С. 33-41.
2. **Gubankov, A.** Comparison Study of Different Types of Setting Reference Movements for Mechatronic Objects by Means of Parametric Splines/ A. Gubankov, I. Gornostaev // Proc. of IEEE International Conference on Ocean Studies (ICOS 2022). Vladivostok, Russia. – 2022. – P. 35-38.

А.И. Дивеев, Е.Ю. Шмалько

ПРОБЛЕМЫ СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ И ИХ ПРЕОДОЛЕНИЕ МЕТОДОМ СИМВОЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ

*Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление"
РАН, г. Москва,
aidivee@mail.ru, e.shmalko@gmail.ru*

Введение

Рассматривается задача управления группой одинаковых мобильных роботов. Задача встречается часто в реальных условиях. Из-за сложности задачи, которая вызвана большой размерностью модели и выполнением условий отсутствия коллизий, сегодня не имеет эффективны численных или аналитических методов решений. В работе предлагается использовать метод символьной регрессии для автоматического построения универсальной системы стабилизации, одинаковой для всех роботов, и численный эволюционный метод для решения задачи поиска оптимального месторасположения точек стабилизации для каждого робота.

Постановка задачи

Задана математическая модель робота из группы.

$$\dot{\mathbf{x}}^j = \mathbf{f}(\mathbf{x}^j, \mathbf{u}^j), \quad (1)$$

где \mathbf{x}^j – вектор состояния робота j , \mathbf{u}^j – вектор управления робота j , $j = 1, \dots, N$.

Заданы начальные состояния роботов

$$\mathbf{x}^{1,0}, \dots, \mathbf{x}^{N,0}. \quad (2)$$

Заданы терминальные состояния роботов

$$\mathbf{x}^{1,f}, \dots, \mathbf{x}^{N,f}. \quad (3)$$

Необходимо найти управление роботами такое, чтобы переместить всех роботов из начальных состояний в терминальные с учетом выполнения условий отсутствия коллизий,

$$\chi(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j) \leq 0, \quad (4)$$

где $i = 1, \dots, N - 1, j = i + 1, \dots, N$,

и обеспечить минимум заданного функционала

$$J = \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}^1, \dots, \mathbf{x}^N, \mathbf{u}^1, \dots, \mathbf{u}^N) dt \rightarrow \min. \quad (5)$$

Чтобы обеспечить нахождение решения в классе реализуемых функций управления, необходимо решать задачу синтеза управления и находить функции управления как функцию векторов состояний.

$$\mathbf{u}^j = \mathbf{h}^j(\mathbf{x}^{1f} - \mathbf{x}^1, \dots, \mathbf{x}^{Nf} - \mathbf{x}^N), j = 1, \dots, N, \quad (6)$$

Каждый робот имеет свою индивидуальную функцию управления, которая по текущему состоянию всех роботов вычисляет значения вектора управления данным роботом. Такое управление возможно только на моделях и на практике не реализуемо.

Метод решения

Предлагается для решения задачи использовать два подхода. Первый подход основан на методе синтезированного управления. Первоначально строится система стабилизации робота относительно точки в пространстве состояний. Поскольку роботы одинаковые, то такая система стабилизации будет одинаковой для всех роботов

$$\dot{\mathbf{x}}^j = \mathbf{f}(\mathbf{x}^j, \mathbf{g}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}^j)), \quad (7)$$

где \mathbf{x}^* - точка стабилизации в пространстве состояний.

Далее для каждого робота находится множество точек стабилизации,

$$\mathbf{X}^j = (\mathbf{x}^{j,1}, \mathbf{x}^{j,2}, \dots, \mathbf{x}^{j,M_j}), \quad (8)$$

последовательная активация которых через равные заданные интервалы времени для каждого робота обеспечивает решение задачи.

Второй подход основан на применении универсальной системы стабилизации движения вдоль заданной траектории из некоторого класса. Первоначально решается задача синтеза системы стабилизации движения робота относительно любой траектории, например, кусочно-линейной. Поскольку роботы одинаковые, то такая система стабилизации будет одинаковой для всех роботов. На втором этапе решается задача оптимального управления в классической постановке для расширенной модели, которая включает модель робота с системой стабилизации движения и эталонную модель в форме исходной модели робота (1). Решение задачи оптимального управления обеспечивает удовлетворение условий

отсутствия коллизий (4) для всех роботов, а система стабилизации движения перемещает роботы вдоль заданных траекторий в терминальные состояния с оптимальным значением критерия качества.

Для решения задач синтеза управления в обоих подходах предлагается использовать методы символьной регрессии [1,2].

1. **Diveev, A.I., Shmalko, E.Y.** Adaptive Synthesized Control for Solving the Optimal Control Problem// Mathematics 2023, 11, 4035.
2. **Diveev, A.I., Sofronova, E.A.** Universal Stabilisation System for Control Object Motion along the Optimal Trajectory// Mathematics 2023, 11, 3556.

А.Н. Жирабок, А.В. Зуев

ОЦЕНИВАНИЕ ВЕЛИЧИН ДЕФЕКТОВ В ДАТЧИКАХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ РОБОТОВ *

*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,
Институт проблем морских технологий ДВО РАН
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН
zhirabok@mail.ru*

Введение

Рассматривается задача оценивания величин дефектов в датчиках электроприводов роботов при наличии внешних возмущений и шумов измерений. Знание этих величин необходимо для компенсации дефектов в системе управления. Рассматриваемая задача решается на основе интервальных наблюдателей, которые активно исследуются последние годы [1-3]. В работах [1, 2] задача интервальной оценки вектора фазовых координат решается на основе полной модели исходной системы. В [3] интервальные наблюдатели строятся на основе редуцированной модели, нечувствительной или малочувствительной к внешним возмущениям.

Общее решение задачи

Электропривод робота описывается уравнениями

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-19-00590), <https://rscf.ru/project/25-19-00590/>.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= k_1 x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= k_2 x_2(t) + k_3 x_3(t) + k_7 \operatorname{sign}(x_2(t)) + \rho(t), \\ \dot{x}_3(t) &= k_4 x_2(t) + k_5 x_3(t) + k_6 u(t), \\ y_1(t) &= x_2(t) + d_1(t), \quad y_2(t) = x_3(t) + d_2(t),\end{aligned}$$

где $x_1(t)$ – угол поворота выходного вала редуктора; $x_2(t)$ – скорость вращения выходного вала двигателя; $x_3(t)$ – ток цепи якоря; $k_1 \div k_7$ представляют параметры электропривода; возмущение $\rho(t)$ обусловлено наличием неизвестного внешнего нагрузочного момента.

В общем виде электропривод описывается уравнениями $\dot{x}(t) = Fx(t) + Gu(t) + C\varphi(Ax(t), u(t)) + L\rho(t)$, $y(t) = Hx(t) + Dd(t) + v(t)$, (1) где $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ и $y(t) \in R^l$ – векторы фазовых координат, управления и выхода; F, G, H, C, L – известные матрицы; $\rho(t) \in R^q$ – неизвестная функция времени, описывающая возмущения на систему: $\underline{\rho} \leq \rho(t) \leq \bar{\rho}$, где отношение « \leq » понимается покомпонентно; $v(t) \in R^l$ – неизвестная функция времени, описывающая шумы измерений: $\underline{v} \leq v(t) \leq \bar{v}$; A – матрица-строка; φ – нелинейная функция.

Для оценки функции $d(t)$ на основе редуцированной модели системы (1) строится наблюдатель с вектором состояния $x_*(t) = \Phi x(t)$:

$$\begin{aligned}\dot{x}_*(t) &= F_* x_*(t) + J_* H x(t) + G_* u(t) + C_* \varphi(A_{*1} x_*(t), A_{*2} y(t), u(t)), \\ y_*(t) &= H_* x_*(t).\end{aligned}$$

Матрицы J_* , G_* , C_* , H_* , A_{*1} , A_{*2} подчиняются уравнениям

$$\begin{aligned}\Phi F &= F_* \Phi + J_* H, \quad G_* = \Phi G, \quad C_* = \Phi C, \\ (R \quad -H_*) \begin{pmatrix} H \\ \Phi \end{pmatrix} &= 0, \quad A = (A_{*1} \quad A_{*2}) \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix}.\end{aligned}\quad (2)$$

Матрица F_* задается в форме Жордана: $F_* = \operatorname{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$, где собственные числа являются разными и отрицательными. Тогда первое уравнение в (2) может быть представлено в виде k уравнений:

$$(\Phi_i \quad -J_{*i}) \begin{pmatrix} F - \lambda_i I_n \\ H \end{pmatrix} = 0, \quad i = \overline{1, k}.\quad (3)$$

Задавая конкретные значения $\lambda_i < 0$, из (3) необходимо найти минимальное число строк Φ_i матрицы Φ (а также строк J_{*i}) и определить матрицы H_* , R , C_* , R , A_{*1} , A_{*2} из уравнений (2).

Рассмотрим переменную $y_*(t)$:

$$\begin{aligned}
y_*(t) &= H_* x_*(t) = H_*(\Phi x(t) - e(t)) = H_* \Phi x(t) - H_* e(t) = \\
&= RHx(t) - H_* e(t) = R(y(t) - Dd(t)) - H_* e(t),
\end{aligned} \tag{4}$$

где $e(t) = \Phi x(t) - x_*(t)$. Если матрица J_* выбрана так, что $J_* D = 0$, и $L_* = 0$, то из устойчивости модели следует $e(t) \rightarrow 0$, а тогда из (4) при условии $RD \neq 0$ получаем $\hat{d}(t) = (RD)^{-1}(Ry(t) - y_*(t))$. Это выражение дает точную оценку величины дефекта в случае, когда шумами измерений и внешними возмущениями можно пренебречь.

Когда модель чувствительна к возмущениям и присутствуют шумы измерений, может быть получена только интервальная оценка. Для этого на основе редуцированной модели строится интервальный наблюдатель, в общем виде описываемый уравнениями [3]

$$\begin{aligned}
\dot{\underline{x}}_*(t) &= F_* \underline{x}_*(t) + J_* y(t) + G_* u(t) + L_*^+ \underline{\rho} - L_*^- \bar{\rho} + J_*^- \underline{\nu} - J_*^+ \bar{\nu}, \\
\dot{\bar{x}}_*(t) &= F_* \bar{x}_*(t) + J_* y(t) + G_* u(t) + L_*^+ \bar{\rho} - L_*^- \underline{\rho} + J_*^- \bar{\nu} - J_*^+ \underline{\nu}.
\end{aligned}$$

Здесь $L_* = \Phi L$, $A^+ = \max(0, A)$, $A^- = A^+ - A$ для произвольной матрицы A , нетрудно видеть, что $A^+ \geq 0$, $A^- \geq 0$.

Введем нижнюю и верхнюю границы ошибки $e(t) = \Phi x(t) - x_*(t)$:

$$\underline{e}_*(t) = x_*(t) - \underline{x}_*(t), \quad \bar{e}_*(t) = \bar{x}_*(t) - x_*(t).$$

Известно [1], что $\underline{e}_*(t) \geq 0$ и $\bar{e}_*(t) \geq 0$ при всех $t \geq 0$. С учетом этого выражения для нижней и верхней границ оценки величины дефекта принимают вид

$$\begin{aligned}
\underline{d}(t) &= (RD)^{-1}(Ry(t) - y_*(t)) - ((RD)^{-1}R)^+ \bar{\nu} + ((RD)^{-1}R)^- \underline{\nu} - \\
&\quad - ((RD)^{-1}H_*)^+ \bar{e}(t) + ((RD)^{-1}H_*)^- \underline{e}(t), \\
\bar{d}(t) &= (RD)^{-1}(Ry(t) - y_*(t)) - ((RD)^{-1}R)^+ \underline{\nu} + ((RD)^{-1}R)^- \bar{\nu} - \\
&\quad - ((RD)^{-1}H_*)^+ \underline{e}(t) + ((RD)^{-1}H_*)^- \bar{e}(t).
\end{aligned}$$

По аналогии с [1] можно показать, что $\underline{d}(t) \leq \hat{d}(t) \leq \bar{d}(t)$.

Решение для электропривода

Для первого дефекта возможна только приближенная оценка; основной и интервальный наблюдатели с учетом возмущений и шумов измерений описываются уравнениями

$$\dot{x}_*(t) = k_2 x_*(t) + k_3 y_2(t) + k_7 \text{sign}(x_*(t)),$$

$$\dot{\underline{x}}_{*1}(t) = k_2 \underline{x}_{*1}(t) + k_3 y_2(t) + k_7 \operatorname{sign}(x_{*1}(t)) + \underline{\rho} - k_3 \underline{v}_2,$$

$$\dot{\bar{x}}_{*1}(t) = k_2 \bar{x}_{*1}(t) + k_3 y_2(t) + k_7 \operatorname{sign}(x_{*1}(t)) + \bar{\rho} - k_3 \underline{v}_2$$

соответственно; интервальная оценка дефекта имеет вид

$$\underline{d}_1(t) = y_1(t) - \bar{x}_{*1}(t), \quad \bar{d}_1(t) = y_1(t) - 2x_{*1}(t) + \underline{x}_{*1}(t).$$

Для второго дефекта наблюдатель описывается уравнениями

$$\dot{x}_{*2}(t) = k_5 x_{*2}(t) + k_4 y_1(t) + k_6 u(t),$$

оценка имеет вид $\hat{d}_2(t) = y_2(t) - x_{*2}(t)$.

1. **Ефимов, Д.В.**, Построение интервальных наблюдателей для динамических систем с неопределенностями / Д.В. Ефимов, Т. Раисии // Автоматика и телемеханика. – 2016. – № 2. – С. 5-49.
2. **Кремлев, А.С.** Синтез интервального наблюдателя для линейной системы с переменными параметрами / А.С. Кремлев, С.Г. Чеботарев // Изв. вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56. – №. 4. – С. 42-46.
3. **Жирабок, А.Н.** Метод построения интервальных наблюдателей для стационарных линейных систем / А.Н. Жирабок, А.В. Зуев, Ч.Ию Ким // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2022. – № 4. – С. 22-32.

И.А. Зайцев

АППАРАТНЫЙ СИНТЕЗ ФАЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ В СЛЕДЯЩИХ ММО-СИСТЕМАХ СВЯЗИ РОБОТОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург,
ivan-za-2000@mail.ru*

Введение

Для улучшения помехозащищенности систем радионавигации, внешнего управления и связи роботов в последние годы активно применяются многоэлементные антенные системы с технологией ММО. Перспективным направлением технологии ММО является формирование диаграммы направленности мультистатическими ММО – антенными системами, тем самым увеличивая коэффициент направленного действия антенной системы в направлении интереса и уменьшая его для побочных

направлений. Для высокоподвижных роботов необходимо быстро производить перерасчёт фазовых распределений на элементах мультистатической антенной системы. Цифровые программные и аппаратные алгоритмы синтеза фазовых распределений как правило оперируют углами Эйлера, производя расчёты с использованием математического аппарата тригонометрических функций. Для реализации подобных алгоритмов прибегают к последовательным приближенным расчётам синусов и косинусов с плавающей запятой, что является вычислительно затратным. В данном докладе предлагается более простой с вычислительной точки зрения цифровой аппаратный алгоритм синтеза фазовых распределений, основанный на математическом аппарате алгебры кватернионов.

Алгоритм синтеза фазовых распределений

Для начала необходимо выбрать начало координат мультистатической антенной системы. Удобно за центр координат считать фазовый центр антенной системы. Тогда каждый элемент ММО – антенны будет иметь свои координаты. Координатную систему предлагается выбрать Декартову с осями $0x$, $0y$, $0z$, как это показано на рисунке 1.

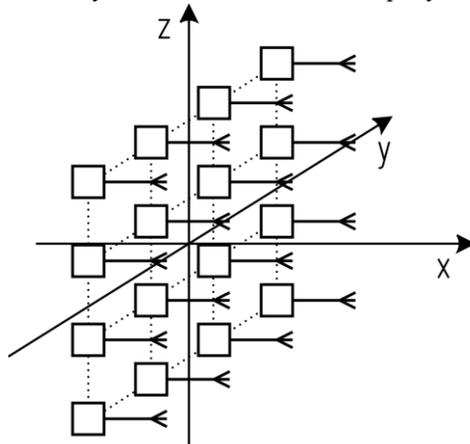


Рис. 1. Ансамбль антенн ММО – системы

Для описания координат элементов ММО – антенны воспользуемся аппаратом алгебры кватернионов. В представлении трёхмерного вектора кватернионом вещественная часть избыточна. Тогда кватернион, описывающий положение n -го элемента многопозиционной антенной системы:

$$q_n = i\beta_n + j\gamma_n + k\delta_n,$$

Где $[\beta_n, \gamma_n, \delta_n] = [x_n, y_n, z_n]$. В то же время, угол сканирования антенны можно представить в виде следующего кватерниона:

$$\tilde{Q} = \tilde{\alpha} + i\tilde{\beta} + j\tilde{\gamma} + k\tilde{\delta},$$

Где $[\tilde{\beta}_m, \tilde{\gamma}_m, \tilde{\delta}_m]$ - Декартовы координаты вектора поворота. В то же время в момент подготовки к запуску необходимо ввести начальные координаты станции (спутника, радиомаяка, станции управления) в декартовой координатной системе ММО антенны. Если принять, что излучение каждой антенны в ММО-системе направлено вдоль оси Ox , то вычислить вектор поворота можно как кватернион разности координат фазового центра антенной системы робота и фазового центра антенной системы станции (спутника, радиомаяка, станции управления) делённый на собственную норму:

$$\tilde{Q} = \frac{q_{роб} - q_{ст}}{\|q_{роб} - q_{ст}\|} = \frac{i(\beta_{роб} - \beta_{ст}) + j(\gamma_{роб} - \gamma_{ст}) + k(\delta_{роб} - \delta_{ст})}{\sqrt{(\beta_{роб} - \beta_{ст})^2 + (\gamma_{роб} - \gamma_{ст})^2 + (\delta_{роб} - \delta_{ст})^2}}$$

Данный вектор показан на рисунке 2 как вектор сканирования.

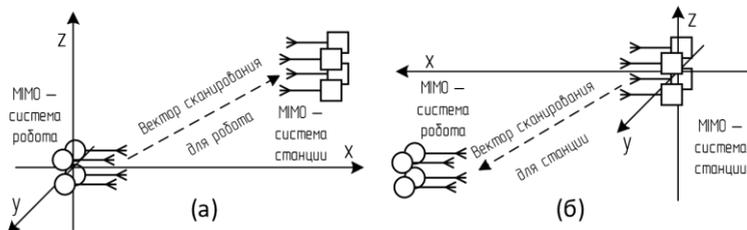


Рис. 2. Векторы сканирования и соответствующие Декартовы системы координат с точки зрения мультистатической антенной системы робота (а), и с точки зрения мультистатической антенной системы станции (б)

Представим, что вся система ММО поворачивается относительно своего фазового центра и размещается перпендикулярно направлению вектора, образуемого кватернионом \tilde{Q} . Поворачиваться будет не физически сама антенная система, а лишь её изображение, назовём её фантомной антенной системой, повернутой согласно вектору \tilde{Q} . Для каждого кватерниона положения элемента повернутой фантомной антенной мультистатической системы q_n' можно рассчитать его координаты:

$$q_n' = \tilde{Q} \cdot q_n \cdot \tilde{Q}^{-1}$$

Где: \tilde{Q}^{-1} – в данном случае комплексно-сопряженный с \tilde{Q} кватернион. В то же время, прямую вектора поворота можно представить в каноническом виде как:

$$\frac{i}{\tilde{\beta}_m} = \frac{j}{\tilde{\gamma}_m} = \frac{k}{\tilde{\delta}_m}$$

После операции «поворота» каждый элемент антенной решётки получил новую β_n' - составляющую. Длина фазового набега, ненормированную к длине волны, можно рассчитать, как длину вектора, лежащего на прямой поворота с координатами кватерниона q_n^ϕ :

$$q_n^\phi = i\beta_n' + j\left(\tilde{\gamma}_m \frac{\beta_n'}{\tilde{\beta}_m}\right) + k\left(\tilde{\delta}_m \frac{\beta_n'}{\tilde{\beta}_m}\right),$$

Графическое обоснование этому приведено на рисунке 3. Можно относительно легко рассчитать расстояние между точкой фазового сдвига и началом координат. В сущности, эту операцию можно представить как норму кватерниона фазового сдвига:

$$D_n = \|q_n^\phi\|$$

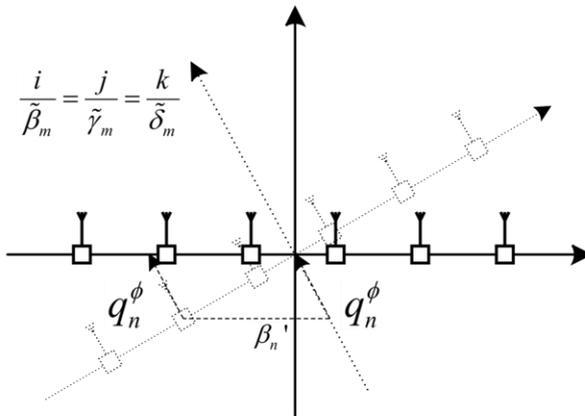


Рис. 3. Векторы сканирования и соответствующие Декартовы системы координат с точки зрения мультистатической антенной системы робота (а), и с точки зрения мультистатической антенной системы станции (б)

Отсюда можно определить модуль набега фазы как число длин волн, уместающихся в норму кватерниона разности:

$$|\Delta\phi_n| = \frac{D_n}{\lambda} = \frac{\|q_n^\phi\|}{\lambda}$$

где λ - длина волны.

Для определения знака набега фазы нужно знать старший разряд, а именно знак разности $\beta'_n - \beta_n$. Тогда знакопеременный набег фазы, нормированный к длине волны будет вычисляться как:

$$\Delta\phi_n = \text{sign}(\beta'_n - \beta_n) \frac{\|q_n^\phi\|}{\lambda}$$

Заключение

В данном случае не рассматриваются методы расчёта коррекции фазового распределения для подавления помеховых составляющих, однако кватернионы — это четырёхмерное обобщение комплексного числа. В начале статьи постулировалось, что вещественный множитель α равен нулю, однако он может быть ненулевым как раз в качестве множителя коррекции фазового распределения, который рассчитывается как:

$$\alpha_n = \frac{\Delta\phi_{correct}}{\lambda}$$

А значит, что и фазовое распределение можно динамически изменять в процессе перестройки угла сканирования, то есть множитель α'_n может быть не равным нулю. В работе приведена система, похожая на ту, что рассматривалась уже в 2011-м году в [1], однако математический аппарат алгебры кватернионов здесь формирует другую модель синтеза фазовых распределений. Основная же часть доклада и развёрнутой статьи в большей степени посвящена синтезу экономичного с точки зрения вычислительных ресурсов аппаратного алгоритма для ПЛИС.

1. **Сивов А. Ю., Алешин М. Г.** Применение математического аппарата кватернионов для расчета фазового распределения в элементах фазированной антенной решетки //Перспективы развития информационных технологий. – 2011. – №. 6. – С. 197-202.
2. **Гордеев В. Н.** Кватернионы и бикватернионы с приложениями в геометрии и механике. – 2016.
3. **Mailloux R. J.** Phased array antenna handbook. – Artech house, 2017.
4. **Хансен Р. С.** Фазированные антенные решетки. Изд. 2-е. – 2012.
5. **Гостюхин В. Л., Трусов В. Н., Гостюхин А. В.** Активные фазированные антенные решетки // Радиотехника. – 2011. – Т. 302.

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНЫХ И ТРАДИЦИОННЫХ СУДОВ В ГРАНИЦАХ ТРАНСПОРТНОГО КОРИДОРА «СЕВЕР-ЮГ»

*ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота
имени адмирала С.О. Макарова»,
г. Санкт-Петербург, spguwc-karetnikov@yandex.ru*

Введение

Значительная часть Международного транспортного коридора «север-юг» (МТК «север-юг») проходит по основной трассе Единой глубоководной системы Европейской части внутренних водных путей Российской Федерации (ЕГС ЕЧ ВВП РФ). Протяжённость «речного» участка МТК «север-юг» Санкт-Петербург–Астрахань составляет более 3600 км. Данный участок в основном обеспечен гарантированной глубиной 4.0 м, на пути располагается 18 судоходных гидротехнических сооружений, с размерами шлюзовых камер длиной более 200 м. Наличие на ЕГС ЕЧ ВВП РФ канала и зарегулированных участков рек приводит к тому, что суда могут накапливаться в верхнем и/или нижнем бьефе для ожидания своей очереди на шлюзование, тем самым нарушается равномерность движения и могут формироваться «пробки». Это существенно образом снижает пропускную способность водного пути, растёт риск возникновения транспортных происшествий и увеличивается время прохождения речной части МТК «север-юг».

В настоящее время наблюдается возросший интерес к внедрению в производственную деятельность и последующую эксплуатацию на реке автономных и полуавтономных судов [2]. Юридических ограничений для совместной эксплуатации традиционных и автономных судов в настоящее время нет. Таким образом актуальность создания на ЕГС ЕЧ ВВП РФ системы управления движением автономных и традиционных судов (СУД АТС) на ЕГС ЕЧ ВВП РФ не вызывает сомнения.

Основная часть

В настоящее время на ЕГС ЕЧ ВВП РФ внедрено достаточно большое количество систем, работа которых направлена на организацию движения и обеспечение безопасности судоходства [3]. К таким системам относятся: речная дифференциальная подсистема ГНСС ГЛОНАСС; ав-

томатическая идентификационная система (АИС); системы диспетчерского регулирования; система уровневых постов; система навигационно-гидрографического обеспечения; система мониторинга береговых и плавающих СНО; система ведомственной радиосвязи и др. Кроме того, большинство судов оснащено системами отображения электронных навигационных карт и информации (СОЭНКИ), что позволяет судоводителю использовать инструментальные методы навигации при обеспечении безопасности плавания практически на любом судоходном участке ВВП РФ [4].

В таком случае используя данные, получаемые от указанных систем и обрабатывая их в береговом центре можно определить прогнозные траектории движения для всех судов, находящихся в зоне действия систем. После чего в зависимости от основных размерений судов, типа, назначения, элементов движения и местной лоции определить ожидаемое место расхождения или подхода к лимитирующему участку. В случае если ожидаемое место расхождения или время подхода не «безопасно», тогда системой должны вырабатываться предложения по изменению элементов движения, как правило скорости. Далее эти предложения перебиваются в автоматическую навигационную систему (АНС) автономного судна или СОЭНКИ традиционного судна.

С учетом концепции создания на ВВП РФ речной инфокоммуникационной триады, строящейся по иерархическому принципу: «единая система контроля и управления судоходством (ЕСКУС)»—«речная информационная служба (РИС)»—«автоматизированная система управления движением судов (АСУ ДС)» [5], можно на основе применения инженерно-кибернетического подхода [6] определить положение СУД АТС на всех иерархических уровнях с учетом целеполагания метасистемы и S_0 системы. Учитывая общее целеполагание триады, можно выделить S_0 систему для СУД АТС, это будет АСУ ДС и метасистему – РИС.

Считая, что АСУ ДС является S_0 -системой, в соответствии с инженерно-кибернетическим подходом, и ее необходимо в дальнейшем исследовать на третьем (системном) методологическом уровне. В тоже время РИС выступает в роли метасистемы по отношению к СУД АТС. Тогда для агрегативного уровня методологического исследования СУД АТС необходимо определить структуру и функции позволяющие обеспечивать контроль параметров движения традиционных и автономных судов при реализации коллективного управления ими [7].

Такое решение позволит формировать для любого судна, находящегося на акватории ЕГС ЕЧ ВВП РФ рекомендации по движению на маршруте с учетом местных условий и особенностей плавания, гидрологических и гидрометеорологических условий, а также текущей дислокации флота. В случае с автономными судами [8] данные рекомендации можно

будет реализовываться путем корректировки рейсового задания, загруженного в АНС, причем эти корректировки будут осуществляться поэтапно, для каждого из последующих сегментов маршрута.

Безусловно, для судоводителей традиционных судов рекомендации по режиму движения от СУД АТС будут обязательными для исполнения только на участках, где установлено диспетчерское регулирование движением или в зоне действия АСУ ДС. Однако отклонение от рекомендуемых СУД АТС параметров движения судна на маршруте будет приводить к нарушению графика движения судов через судоходные гидротехнические сооружения. Если судно будет двигаться на маршруте быстрее чем рекомендовано, ему придется ожидать своей очереди на шлюзование по ранее сформированному расписанию. В такой ситуации будет не рационально следовать с повышенной скоростью.

Заключение

Таким образом при движении автономных и традиционных судов по рекомендованным маршрутам с заданными параметрами элементов движения выработанных в СУД АТС будет обеспечиваться достаточный уровень безопасности судоходства на ЕГС ЕЧ ВВП РФ при условии совместной эксплуатации традиционных и автономных судов. Судоводители традиционных судов будут заблаговременно информироваться об наиболее удобном месте расхождения с автономным судном, что, несомненно, полезно для обеспечения безопасного расхождения с судном, на борту которого отсутствует экипаж, а управленческие решения приниматься оператором удаленно или в АНС. Кроме того, внедрение подобных систем на ЕГС ЕЧ ВВП РФ позволит сгладить и оптимизировать трафик, компенсировать простои судов, обусловленные необходимостью ожидания шлюзования и в результате увеличить среднюю скорость прохода речного участка МТК «север-юг».

1. **Mingyu Kim** Autonomous shipping and its impact on regulations, technologies, and industries / Mingyu Kim, Tae-Hwan Joung, Byongug Jeong, Han-Seon Park // Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping Volume 4, 2020 Pages 17-25. <https://doi.org/10.1080/25725084.2020.1779427>
2. **Каретников В.В.** Цели и задачи системы управления автономными судами на внутренних водных путях / В.И. Дмитриев, В.В. Каретников//Речной транспорт (XXI век). 2023. № 3 (107). – С. 33-35.
3. **Каретников В.В.** Особенности навигационного обеспечения безэкипажных судов внутреннего водного транспорта / В.В. Каретников //

- Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2023) XVI. 2023. – С. 171-174.
4. **Каретников В.В.** Перспективы развития электронных навигационных карт внутренних водных путей Российской Федерации / В.А. Бекряшев, В.В. Каретников // Речной транспорт (XXI век). 2014. №1 (66). – С. 30-33.
 5. **Каретников В.В.** Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях / В.В. Каретников, А.А.Сикарев //– СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. 2013. –525 с.
 6. **Венцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е.С. Венцель // – М.: Наука, 1988. – 208 с.
 7. **Курнос В.И.** Методология проектных исследований и управление качеством сложных технических систем электросвязи / В.И. Курнос, А.М. Лихачев // – СПб. : ТИРЕКС, 1998. – 495 с.
 8. **Guo W** Traffic Organization Service for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) with Different Degrees of Autonomy / Guo W, Zhang X, Wang J, Feng H, Tengecha NA. // Journal of Marine Science and Engineering. 2022; 10(12):1889. <https://doi.org/10.3390/jmse10121889>

М.А. Кожин¹, Н.Б. Филимонов^{1,2}

МУЛЬТИАГЕНТНОЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СРЕДЕ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*

²*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
ojint@mail.ru, nbfilimonov@mail.ru*

Задача автономного управления движением группы мобильных роботов (МР), обеспечивающего безопасное движение всех роботов группы с обходом препятствий для достижения целей является актуальной задачей современной робототехники [1]. При этом среда часто содержит динамические препятствия (ДП). Если известны только положения статических препятствий среды, то ее часто называют частично известной динамической средой. В докладе предлагается алгоритм мультиагентного потенциального управления распределенной группой МР в частично-известной динамической среде, состоящий из *распределения целей в группе МР* на основе аукционного алгоритма [2], *формирования опорной траектории движения МР модифицированным методом жука* (ММЖ) [3-5] и

коррекции опорных траекторий МР стратегией потенциального управления (СПУ) [6, 7], расширенной для применения к группе МР.

Для распределения целей в группе МР используется мультиагентный подход, в котором каждый робот является агентом. В качестве алгоритма распределения используется аукционный алгоритм [2]. Его идея заключается в проведении аукциона, в котором все роботы участвуют в торгах за цели. Целесообразность покупки цели для каждого робота оценивается исходя из выгоды приобретения. В качестве стоимости приобретения цели выступает длина опорной траектории от МР к ней.

Формирование опорной траектории МР ММЖ

Метод потенциальных полей (ПП) [8] является одним из наиболее простых и перспективных подходов к управлению МР. Основной идеей является наделение МР и препятствий среды виртуальным отрицательным зарядом, а цели – виртуальным положительным зарядом. Тогда робот будет отталкиваться от препятствий и притягиваться к цели. В работе [9] было рассмотрено применение метода ПП в динамической среде. Основным недостатком методов ПП является возможность попадания МР в локальные минимумы, из которых он не способен выбраться самостоятельно. Для решения этой проблемы в работе [10] авторы скомбинировали метод ПП с генетическими алгоритмами, в [11] – с методом роя частиц.

Классические методы жука [12] обеспечивают безопасное движение МР в статической среде. Идея классических методов жука заключается в движении МР вдоль вектора градиента, обеспечивающего минимальный путь следования к цели в свободном пространстве, с обходом препятствий.

ММЖ сочетает в себе методы ПП и классические методы жука [3-5]:

- в свободном пространстве МР движется к цели по прямой линии;
- направление движения МР в каждой точке стремится к вектору результирующей виртуальной силы, действующей на робота.

В докладе ММЖ используется для формирования опорной траектории движения МР на основе известных данных о статических препятствиях среды. Поскольку построенная траектория не учитывает наличие ДП и других МР группы, ее необходимо корректировать.

Коррекция опорной траектории МР СПУ. Особенности применения СПУ к группе МР:

- до встречи друг с другом МР группы никак не общаются;
- при встрече они считаются ДП и объединяются в группу встречи;
- выбор направления обхода осуществляет только один из пары МР.

Для обеспечения безопасного движения каждого МР группы к его цели выделяются три режима движения МР:

- режим свободного движения МР;
- режим движения МР с уклонением от ДП;
- режим движения МР назад.

В режиме свободного движения МР движется по заранее построенной опорной траектории. При этом рядом с ним нет ДП или МР группы, мешающих движению.

В режиме движения МР с уклонением от ДП используется алгоритм упреждающего управления, основанный на предсказании столкновения МР с ДП, выборе точки притяжения МР для исключения столкновения с ДП, движения МР с коррекцией опорной траектории для ухода от ДП. Предсказание столкновения МР с ДП осуществляется с помощью оценки скорости ДП на основе двух последовательных показаний датчиков расстояния МР. Выбор точки притяжения МР осуществляется перебором точек опорной траектории робота, начиная с той, в которой МР ее покинул, пока каждая следующая оказывается ближе к нему, чем предыдущая. Движение МР с коррекцией опорной траектории для ухода от ДП осуществляется под действием виртуальных потенциальных сил, задаваемых препятствиями и выбранной точкой притяжения МР.

В режиме движения МР назад на него действует притягивающая сила, направленная от другого МР группы. При этом на него также действуют виртуальные потенциальные силы отталкивания от препятствий. В результате МР корректирует опорную траекторию для разъезда с другими МР группы.

1. **Ismail Z. H., Sariff N., Hurtado E. G.** A survey and analysis of cooperative multi-agent robot systems: challenges and directions // Applications of Mobile Robots. - 2018. - Т. 5. - С. 8-14.
2. **Назарова А. В., Рыжова Т. П.** Методы и алгоритмы мультиагентного управления робототехнической системой // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2012. - №. 6 (6). - С. 29.
3. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Два метода локальной навигации мобильных роботов в статических средах с препятствиями // Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019). - 2019. - С. 105-107.
4. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2019. - Т. 20. - №. 11. - С. 677-685.
5. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Кожин М. А.** Анализ модифицированного метода жука в задачах локальной навигации мобильных роботов // Мехатроника, автоматика и робототехника. -

2021. - №. 7. - С. 4-8.
6. **Кожин М. А.** Стратегия потенциального управления мобильным роботом в динамической среде // Мехатроника, автоматика и робототехника. - 2023. - №. 12. - С. 26-32.
 7. **Кожин М. А., Филимонов Н. Б.** Потенциальное управление мобильным роботом в среде с динамическими препятствиями на основе модифицированного метода жука // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. - 2024. - Т. 8. - №. 1. - С. 189-195.
 8. **Khatib O.** Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // Proceedings. 1985 IEEE international conference on robotics and automation. - 1985. - Vol. 2. - P. 500-505.
 9. **Ge S. S., Cui Y. J.** Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method // Autonomous robots. - 2002. - Vol. 13. - P. 207-222.
 10. **Vadakkepat P., Tan K. C., Ming-Liang W.** Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path planning // Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation. CEC00 (Cat. No. 00TH8512). - IEEE, 2000. - Vol. 1. - P. 256-263.
 11. **Zhou Z. et al.** Tangent navigated robot path planning strategy using particle swarm optimized artificial potential field // Optik. - 2018. - Vol. 158. - P. 639-651.
 12. **Ng J., Bräunl T.** Performance comparison of bug navigation algorithms // Journal of Intelligent and Robotic Systems. - 2007. - Vol. 50. - P. 73-84.

К.Ю. Котов, О.И. Потатуркин, Е.В. Ходатович

НЕЛИНЕЙНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ КВАДРОРОТОРНОГО АППАРАТА*

*Институт Автоматики и Электрoметрии СО РАН, г. Новосибирск,
kotov@idisys.iae.nsk.su, potaturkin@iae.nsk.su, e.khodatovich@g.nsu.ru*

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) активно внедряются в различные сферы деятельности человека, включая логистику, аэрофото-съемку, поисково-спасательные операции и так далее. Особое место

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 124041700067-6)

среди них занимают квадрокоптеры, отличающиеся компактностью, маневренностью в ограниченном пространстве, отсутствием требований к взлетно-посадочным площадкам, а также высокой устойчивостью к внешним воздействиям. Одним из немаловажных факторов, влияющих на процесс управления роторным аппаратом, является наличие переходного процесса установления скорости вращения винтов как реакции на входной управляющий сигнал. В большинстве научных работ при разработке систем управления делается предположение об отсутствии этого переходного процесса, что негативно сказывается на качестве управления.

Целью данной работы является создание системы управления (далее, СУ) квадрокоптером, учитывающей переходный процесс реакции двигателей как звено первого порядка. Для синтеза законов управления был применён метод, основанный на организации вынужденного движения по желаемой траектории [1]. В качестве входных данных использовались показания датчиков инерциального измерительного модуля (далее — ИИМ). Для фильтрации входных данных использовался фильтр Махони [2]. Для компенсации транспортного запаздывания, связанного с конечной скоростью передачи данных между модулями и скоростью вычислений, использовался аналитический экстраполятор [3]. Для оценки состояний, предсказанных экстраполятором, использовался расширенный фильтр Калмана [3]. Разработанная СУ была протестирована на задаче стабилизации угла наклона при его ступенчатом изменении.

Уравнения вращения, вектор управляющих воздействий

В данной работе рассматриваются две вращательные степени свободы: крен (ϕ), т.е. угол вращения вокруг оси x , и тангаж (θ), т.е. угол вращения вокруг оси y . Угол вращения вокруг оси z всегда считается равным нулю. Работа [4] посвящена разработке системы управления аппарата с такими же допустимыми степенями свободы. В ней предложена система дифференциальных уравнений вращения, которые учитывают это смещение центра вращения относительно центра масс, которое возникает при использовании экспериментальных стендов. Воспользуемся соотношением переходного процесса двигателей

$$\dot{\mathbf{u}} = \frac{1}{T}(\mathbf{u}^{in} - \mathbf{u}) \quad (1)$$

где T – постоянная времени звена, $\mathbf{u}^{in} = (u_1^{in}, u_2^{in})$ – вектор управления, соответствующий желаемой траектории, $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$ – выходной вектор

управления. Также воспользуемся методом построения уравнений желаемой траектории [5] для уравнений третьего порядка и получим

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} + 3\alpha_{\varphi}\dot{\varphi} + 3\alpha_{\varphi}^2\varphi + \alpha_{\varphi}^3(\varphi - \varphi_{ref}) = 0, \\ \ddot{\theta} + 3\alpha_{\theta}\dot{\theta} + 3\alpha_{\theta}^2\theta + \alpha_{\theta}^3(\theta - \theta_{ref}) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

где $\alpha_{\varphi}, \alpha_{\theta}$ – постоянные, связанные с переходным процессом управления. С учетом уравнений (1), (2) а также системы дифференциальных уравнений вращения [4], получим уравнения для вектора управляющих воздействий $\mathbf{u}^{[2]}$

$$\begin{cases} u_2^{in} = TI_x \left(-3\alpha_{\varphi}\dot{\varphi} - 3\alpha_{\varphi}^2\varphi - \alpha_{\varphi}^3(\varphi - \varphi_{ref}) \right) - \\ \quad - Tmgh(\dot{\varphi}\cos\varphi\cos\theta - \dot{\theta}\sin\varphi\sin\theta) + \\ \quad + I_x\ddot{\varphi} - mgh\sin\varphi\cos\theta, \\ u_3^{in} = TI_y \left(-3\alpha_{\theta}\dot{\theta} - 3\alpha_{\theta}^2\theta - \alpha_{\theta}^3(\theta - \theta_{ref}) \right) - \\ \quad - Tmgh(\dot{\theta}\cos\varphi\cos\theta - \dot{\varphi}\sin\varphi\sin\theta) + \\ \quad + I_y\ddot{\theta} - mgh\sin\theta\cos\varphi. \end{cases} \quad (2)$$

где I_x, I_y – моменты инерции аппарата вдоль осей вращения; m – масса аппарата; h – смещение центра вращения относительно центра масс; g – гравитационная постоянная.

Результаты моделирования

Для проведения экспериментов был спроектирован программный модуль, симулирующий поведение реального аппарата в режиме Hardware-in-the-loop. HIL-симулятор способен добавлять гауссовский шум с произвольным стандартным отклонением и произвольные временные задержки в виде транспортного запаздывания, кратные периоду работы модуля, к выходным значениям угловых скоростей и линейных ускорений. Физические параметры симуляционной модели (как то: масса, моменты инерции, значения дисперсий в ковариационных матрицах фильтра Калмана) совпадают с параметрами экспериментальной установки, представленной в работе [4]. Постоянная времени звена переходного процесса двигателей $T = 35$ мс; постоянные в законе управления $\alpha_{\varphi} = 10, \alpha_{\theta} = 8$. Временная задержка симулятора – 10 мс, стандартное отклонение шумов угловой скорости – 0,08 рад/с, линейных ускорений – 2,4 м/с²;

При изменении углов крена и тангажа на 20° , время установления 95% заданного угла составило 0.74 с для угла крена и 0.84 с для угла тангажа, что является удовлетворительным для данного переходного процесса.

Заключение

В данной работе предложена система управления квадрокоптером, которая учитывает переходной процесс в двигателях, как реакцию на входной сигнал, в качестве звена первого порядка. Поскольку дальнейшие исследования будут направлены на применение данной СУ на экспериментальной установке с двумя вращательными степенями свободы и центром вращения, смещенным относительно центра масс аппарата, была использована модель аппарата, соответствующая данным условиям. При помощи метода, основанном на вынужденном движении по желаемой траектории, был синтезирован закон управления. Система управления протестирована при помощи НЛ-симуляции, воспроизводящей шум входных данных ИИМ и временные задержки экспериментальной установки. Тестирование показало время установления угла 0.74 с и 0.84 с для углов крена и тангажа. Дальнейшие исследования будут направлены на применение данной СУ на реальном аппарате.

1. **Бойчук, Л.М.** Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. – Рипол Классик, 1971.
2. **Madgwick, S.O.H.** AHRS algorithms and calibration solutions to facilitate new applications using low-cost MEMS / S.O.H. Madgwick: дис. – University of Bristol, 2014.
3. **Мальцев, А.С.** Система управления движением квадрокоптера на основе каскадных фильтров Калмана / А.С. Мальцев, А.П. Ян // Автометрия. – 2022. – Т. 58. – № 4.
4. **Khodatovich, E.V.** Development of a Microprocessor Quadrotor Control System / E.V. Khodatovich, K.Yu. Kotov // 2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2025. [Manuscript submitted for publication]
5. **Белоконь, С.А.** Управление параметрами полёта квадрокоптера при движении по заданной траектории / С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.Н. Филиппов, А.П. Ян // Автометрия. – 2012. – Т. 48. – № 5. – С. 32.

А.М. Кошман, А.С. Быков, А.В. Леонард, В.А. Шурыгин

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ VC/APF+BC_τ^I ПРИ НАЛИЧИИ ДВУХ СТАТИЧНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ

*ФГБОУ ВО Волгоградский государственный
технический университет, г. Волгоград,
alexanderbs00@mail.ru, artkoshman@mail.ru, alex-leonard@yandex.ru,
au@vstu.ru*

Введение

Практическая применимость многих опубликованных методов планирования движения мобильных роботов [1] ограничена следующими их особенностями: полнота и статичность априорной информации о среде; исходно прогнозируется исключительно траектория перемещения центра масс мобильного робота (без синтеза временных законов движения); траектория имеет вид ломанной кривой; большое время выполнения алгоритма планирования движения робота [2]. В работах [3, 4] предложен метод VC/APF+BC_τ^I, и его применение рассмотрено при наличии в оперативном пространстве робота одного статичного препятствия. В рамках настоящей работы рассматривается планирование движения мобильного робота и обход указанным методом двух статичных препятствий с их различным взаимным расположением.

1. Постановка задачи

Необходимо проверить работоспособность предложенного метода VC/APF+BC_τ^I при наличии в оперативном пространстве робота между стартовой и финальной точками двух статичных препятствий с произвольными координатами и размерами. Движение мобильного робота производится из начальной точки O в конечную точку F , в которую необходимо попасть за отведенное время τ с заданными начальными и конечными линейными координатами и скоростями центра масс мобильного робота: $x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0$ и $x_\tau, y_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau$ (Рис. 1).

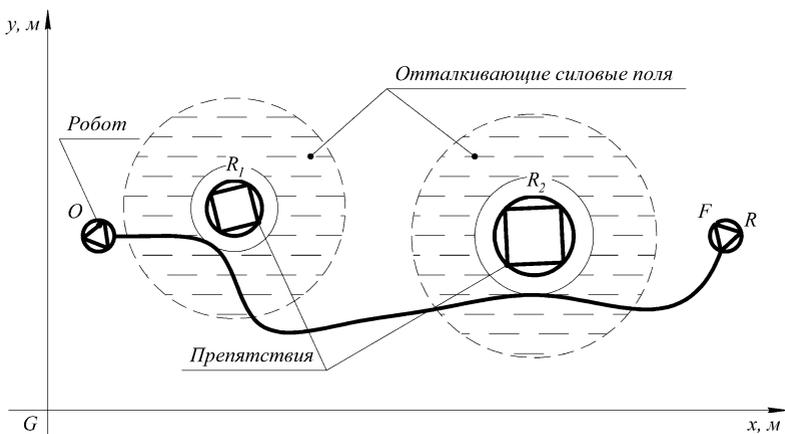


Рис. 1. Постановка задачи

2. Компьютерное моделирование

Исследование возможности применения метода $VC/APF+BC_{\tau}^I$ производилось с использованием авторского программного инструмента, разработанного на языке программирования Visual C#. Для всех численных экспериментов были приняты постоянными следующие параметры: масса робота $m = 1 \text{ кг}$, радиус окружности, описанной вокруг робота $R = 0,5 \text{ м}$, дальность видимости сенсора робота $r_L = 3 \text{ м}$, заданное оперативное время движения робота $\tau = 10 \text{ с}$, временной шаг расчета кинематических характеристик робота (ускорений, скоростей и координат) $dt = 0,01 \text{ с}$.

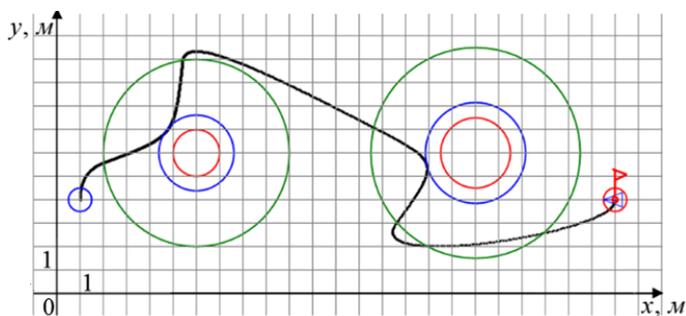
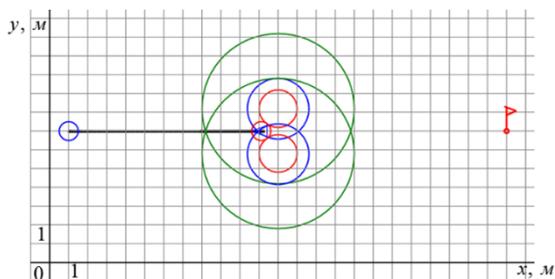
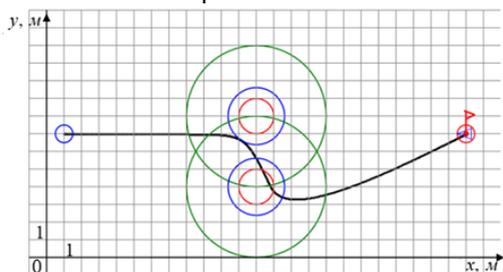


Рис. 2. Результаты численного тестирования при ненулевых начальных и конечных условиях движения робота



а) колебания центра масс робота вдоль одной прямой вблизи двух препятствий



б) пересечение траекторией центра масс робота препятствия при наложении полей

Рис. 3. Экстремальные случаи планирования движения робота

Заключение

Результаты численного тестирования метода $VC/APF+BC_r^I$ демонстрируют (Рис. 2), что при достаточном расстоянии между препятствиями (когда расстояние между их габаритными окружностями значительно больше размера робота), последовательное уклонение от каждого препятствия обеспечивает безударное движение робота к цели за заданное время с соблюдением начальных и конечных условий.

Однако, могут возникать экстремальные случаи:

1. Осцилляция робота (Рис. 3 а). Она возникает, когда линия скорости центра масс робота совпадает или близко расположена к линии отталкивающей силы поля одного препятствия или результирующей силы полей двух препятствий. Этот нежелательный эффект можно устранить, объединив препятствия в одно виртуальное со смещением центра его поля [5].

2. Пересечение внутренней границы поля препятствия (Рис. 3 б). Оно возникает при наложении полей двух препятствий. Для решения

этой проблемы требуется дополнительное прогнозирование столкновения робота со вторым препятствием и корректировка его движения при уклонении от первого.

Предлагаемые пути модификации позволяют усовершенствовать метод $VC/APF+BC_{\tau}^1$ для оптимального планирования движения робота с обходом двух близкорасположенных статических препятствий.

1. **Chunxi Cheng, Qixin Sha, Bo He, Guangliang.** Path planning and obstacle avoidance for AUV: A review. // *Ocean Engineering*. – 2021. – Vol. 235. Article 109355.
2. **Бросалин Д.О., Гуренко Б.В., Медведев М.Ю.** Интеграция локального и глобального планировщиков в систему управления мобильным роботом // *Известия ЮФУ. Технические науки* – 2023. - №6 (236) – С. 8-24.
3. **Леонард А.В.** Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_{\tau}^1$). Ч.1 Теория // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2022. № 9(268). С. 34-42.
4. **Леонард А. В.** Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_{\tau}^1$). Ч. II. Результаты / А. В. Леонард // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2022. – № 9(268). – С. 42-48. – DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-42-48. – EDN AYCRWQ.
5. **Кошман А.М.** Планирование движения мобильного робота со смещением исходного центра потенциального поля статического препятствия / А.М. Кошман, А.С. Быков, А.В. Леонард, В.А. Шурыгин // *Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, мехатроника и робототехнические системы*. - Волгоград, 2024. - № 4 (287). - С. 65-71. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-4-287-65-71.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ UWB INDOOR-НАВИГАЦИИ С СИСТЕМОЙ ВИДЕОМОНИТОРИНГА ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ*

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
РАН, г. Санкт-Петербург,
kuleshov@iias.spb.su*

Введение

В задачах мониторинга состояния биологических объектов (на примере мониторинга крупного рогатого скота на молочных фермах), основанного на круглосуточном видеонаблюдении часто возникает проблема потери отдельных объектов системой видеомониторинга при их взаимном перемещении в случае взаимного перекрытия объектов, либо перекрытия наблюдаемых объектов строительными конструкциями помещения [1]. С целью решения данной проблемы предложен подход локализации и идентификации подвижных объектов с использованием радиосредств (indoor-навигация), и разработана система, включающая набор стационарных базовых станций и носимых радиомодулей.

Система локализации подвижного объекта с использованием UWB-радиомодулей

Известны технологии LoRa, BLE, UWB [2-4], применяемые при разработке средств локализации объектов. При этом использование широко распространенных спутниковых систем глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС) ограничено их невысокой точностью (сравнимой с размером тела животного) и невозможностью их использования в помещениях [5].

В качестве средств локализации также может быть использовано портативное автономное устройство, являющееся комбинацией приемника персонального радиовызова и мощного ИК-излучателя, включаемого в импульсном режиме по команде с базовой станции (БС) [20].

Для повышения продолжительности времени автономной эксплуатации технических средств, находящихся на подвижных объектах, локализация объектов может осуществляться путем применения средств технического зрения с одновременной привязкой их идентификаторам. В это

* Работа выполнена при поддержке бюджетной темы № FFZF-2025-0003

время радиосредства находятся в спящем режиме и активируются в случае возникновения коллизий или потери привязки объекта к его изображению системой видеонаблюдения.

Технология UWB дает возможность точного измерения расстояний между двумя радиомодулями с использованием принципа TOF (time of flight). Технология UWB позволяет базовым станциям получать расстояние до объекта, а не уровень сигнала как в технологиях LoRa и BLE, то есть менее зависит от эффекта ослабления сигнала при прохождении через животных и строительные конструкции. Также существенным недостатком технологии BLE (беспроводная технология Bluetooth с низким энергопотреблением) является низкая точность локализации (обычно с точностью до зоны радиусом 2-3 метра) и низкая радиопрозрачность биологических объектов для сигналов BLE, что в условиях плотного взаимного расположения подвижных объектов снижает ее эффективность. На рисунке 1 приведена функциональная схема предлагаемой системы активной локализации подвижного объекта с использованием описанных технологий.

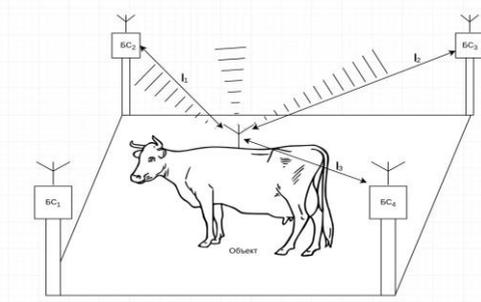


Рис. 1. Функциональная схема системы активной локализации подвижного объекта с использованием радиосредств

Взаимодействие UWB indoor-навигации с системой видеомониторинга состоит в выдаче запроса на проведение локализации подсистеме UWB, с дальнейшим пересчетом точки, полученной в системе координат, связанной с физическим расположением базовых станций в систему координат, связанную с кадром системы технического зрения (рисунок 2).

Прототип системы локализации выполнен на базе модулей BU01 UWB, работающих в диапазоне частот 3.5 ГГц ... 6.5 ГГц совместно с управляющим микроконтроллером STM32F103. Данные модули используются в составе как базовых станций, так и в составе носимых модулей. Разработан протокол, позволяющий использовать временное разделение при передаче сообщений, а также включение в сообщения результатов

измерения от подвижного объекта до каждой базовой станции. Это позволило исключить необходимость дополнительных коммуникационных каналов (проводных или беспроводных) между базовыми станциями.

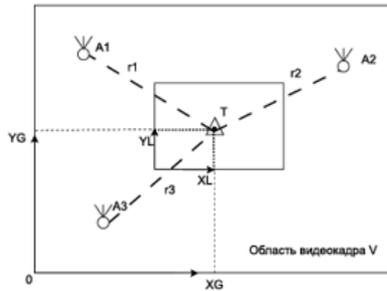


Рис. 2. Иллюстрация постановки задачи определения области на видеокadre, соответствующей объекту, локализованному радиосредствами

Заключение

Предложенный подход позволяет реализовать гибридную схему мониторинга подвижных объектов, включающую в себя подсистему видеонаблюдения с подсистемой in-door локализации с использованием UWB-радиосредств.

1. **Kuleshov S., Zaytseva A. and Shalnev I.** Development of Smart Space Architecture for Dairy Farming Management // 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Vladikavkaz, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCT62929.2024.10875024.
2. **Koundal D., Sharma B.** Cattle health monitoring system using wireless sensor network: a survey from innovation perspective // J. IET Wireless S. Syst. –2018. – vol. 8(4). – pp.143–151.
3. **Nadimi E. S., Jørgensen R. N., Blanes-Vidal V., Christensen S.** Cattle health monitoring system using wireless sensor network: a survey from innovation perspective // J. Comp. and Electr. in Agriculture. –2012. – vol. 82. – pp.44–54.
4. **Chaudhry A., Mumtaz R., Hassan Zaidi S. M., Tahir M. A. and Muzammil School S. H.** Internet of Things (IoT) and Machine Learning (ML) enabled Livestock Monitoring // 2020 IEEE 17th International

- Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life Using ICT, IoT and AI (HONET), Charlotte, NC, USA. – 2020. – pp.151-155.
5. **Chougule S. B. and Abdulhayan S.** Cattle health monitoring system using wireless sensor network: a survey from innovation perspective // Int. J. of Research – Granthaalayah. –2017. – vol. 5(4). – pp.124–129.

Б.А. Лаговский, Е.Я. Рубинович

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГАРМОНИЧЕСКОГО РАДАРА*

*МИРЭА - Российский технологический университет, г. Москва,
robertlag@yandex.ru,*

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
rudinvch@ipu.ru*

Введение

Предложен метод повышения точности измерений и угловой разрешающей способности гармонических радаров (ГР). Практическая реализация метода особенно важна при крупномасштабном поиске профессиональными спасательными командами пропавших людей с применением летательных аппаратов. Показано, что цифровая обработка принятых сигналов позволяет формировать узкую эффективную диаграмму направленности с шириной луча существенно меньшей, чем у реально используемой антенны. Представлены и обсуждены результаты численных экспериментов.

Постановка задачи

При поиске отраженный сигнал на основной частоте f_0 приходит с множества направлений, что делает невозможным определение координат спасаемых. На частотах $2f_0$ и $3f_0$ отражение получаем только от пропавших людей, заранее оснащённых небольшими отражателями. В результате сигнал представляет собой суперпозицию гармоник кратных излучаемой частоте f_0 . При сканировании зоны обзора $\Omega = \Omega(\alpha, \varphi)$ принимаемая амплитуда сигнала $U(\alpha, \varphi)$ выражается в виде интегрального уравнения Фредгольма (ИУ) 1-го рода

* Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 23-29-00074

$$U(\alpha, \varphi) = \int_{\Omega} F(\alpha - \alpha', \varphi - \varphi') I(\alpha', \varphi') d\alpha' d\varphi', \quad (1)$$

где $F(\alpha, \varphi)$ – двумерная диаграмма направленности (ДН) антенны, $I(\alpha, \varphi)$ – искомое угловое распределение амплитуды отраженного сигнала, равное нулю вне области Ω . Поиск $I(\alpha, \varphi)$ – некорректная по Адамару задача (нет единственности и устойчивости относительно исходных данных). Все объекты в пределах ширины ДН без спец. обработки сигнала оказываются неразличимы и изображение в этой области представляет собой единое «пятно». Угловое разрешение по каждой из координат, обеспечиваемое при прямом наблюдении, соответствует критерию Рэля: $\delta\theta \cong \lambda/D$, где D – размер антенны, λ – длина волны используемой гармоника. Точность угловых измерений определяется шириной ДН на уровне половинной мощности – $\theta_{0,5}$.

Требуется создать алгоритм обработки сигналов (1), обеспечивающий увеличение точности и углового разрешения.

Метод решения

Приближенные решения (1) предлагается строить на основе параметризации задач, представляя $I(\alpha, \varphi)$ в виде разложения по заранее выбранной системе двумерных функций $\{g_m(\alpha, \varphi)\}$ [1]

$$I(\alpha, \varphi) = \sum_{m=1}^{\infty} b_m g_m(\alpha, \varphi) \cong \sum_{m=1}^M b_m g_m(\alpha, \varphi), \quad (2)$$

при этом поиск $I(\alpha, \varphi)$ заменяется поиском коэффициентов b_m , которые находятся по МНК путем сравнения с принятым сигналом (1).

На Рис.1 в виде редкой сетки показан двумерный принимаемый сигнал $U(\alpha, \varphi)$ на частоте $2f_0$. Истинное распределение амплитуды излучаемого сигнала представляло собой точечный источник и фоновое излучение на вторичной гармонике.

Для ГР возможно осуществить дальнейшее повышение точности угловых измерений и углового разрешения. Для этого следует одновременно анализировать принимаемые сигналы на второй $U_2(\alpha, \varphi)$ и третьей $U_3(\alpha, \varphi)$ гармониках, складывая амплитуды сигналов при сканировании:

$$U(\alpha, \varphi) = U_2(\alpha, \varphi) + kU_3(\alpha, \varphi) = \int_{\Omega} [F_2(\alpha - \alpha', \varphi - \varphi') I_2(\alpha', \varphi') + kF_3(\alpha - \alpha', \varphi - \varphi') I_3(\alpha', \varphi')] d\alpha' d\varphi'$$

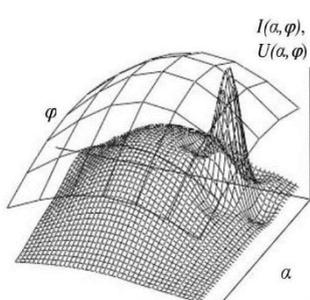


Рис. 1. Решение на частоте $2f_0$

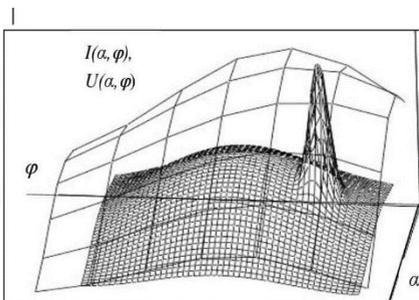


Рис. 2. Решение на частотах $2f_0$ и $3f_0$

k выбирается из условия приблизительного равенства значений максимумов $U_2(\alpha, \varphi)$ и $U_3(\alpha, \varphi)$. Это обеспечивает приблизительно одинаковый вклад гармоник в искомое решение. Дополнительное преимущество суммирования гармоник – шумы, в сигналах $U_2(\alpha)$ и $U_3(\alpha)$, некогерентны, и их сложение обеспечивает повышение ОСШ в $U(\alpha, \varphi)$, по сравнению с ОСШ на каждой из частот $2f_0$ и $3f_0$.

На Рис.2. показаны результаты решения ИУ для той же задачи, что и на Рис.1 и в тех же обозначениях. Точность увеличилась.

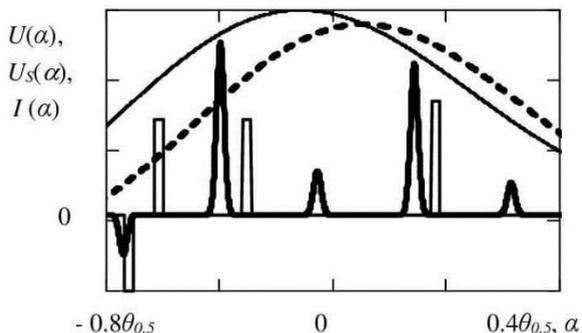


Рис. 3. Отделение одного объекта известного типа

На Рис.3 дано решение задачи определения угловых координат групповой цели из трех близко расположенных точечных объектов – тонкая ступенчатая линия. Исходный сигнал $U(\alpha)$ показан в виде тонкой плавной кривой. Один из объектов, а именно расположенный близко к левой границе зоны Ω , на частотах $2f_0$ и $3f_0$ опознан ГР как объект известного типа. На этих частотах измерена его угловая координата α_l , после чего на частоте f_0 синтезирован компенсирующий сигнал с отрицательной поляриностью (т.к. после опознания объект сам воспринимается как

помеха) $U_S(\alpha) = U(\alpha) - AG(\alpha)$. Коэффициент отражения A на частоте f_0 уточняется в ходе итерационного процесса решения задачи.

Итоговый сигнал $U_S(\alpha)$ показан на Рис.3 в виде жирной штриховой кривой. Для представления решения в качестве функций $g_m(\alpha)$ в (3) использовались функции Гаусса.

Найденное решение без опознанного ранее объекта с угловой координатой α_1 показано в виде жирной кривой. В итоговом решении источник представлен суперпозицией пяти функций Гаусса $g_m(\alpha)$:

$$I(\alpha) \cong \sum_{m=1}^5 b_m g_m(\alpha - \Delta\alpha m)$$

с расстоянием $\Delta = 0,23\theta_{0,5}$ между максимумами соседних $g_m(\alpha)$.

Истинные источники, приведены в виде тонкой ступенчатой линии. Угловое разрешение превысило критерий Рэлея в 5 раз.

Выводы

Алгоритмы на основе предложенных методов относительно просты и могут применяться в режиме реального времени.

1. **Lagovsky B.A., Rubinovich E.Y.** Algebraic methods for achieving super-resolution by digital antenna arrays // Mathematics. 2023. V.11, No 4; P.1-9. <https://doi.org/10.3390/math11041056>

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЕРЕХВАТА*

*Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова, г. Москва,
mayer@ipu.ru*

Изучение и разработка алгоритмов синтеза оптимальных траекторий движения управляемых объектов является актуальной задачей. Особый интерес представляют задачи, связанные с переводом объекта управления на заданное множество, изменяющееся известным образом в зависимости от времени. Сложность решения подобных задач заключается в том, что даже для простых моделей объекта управления получить решение задачи в явном виде оказывается затруднительно.

В данной работе рассматривается задача перевода линейной системы на заданное множество, изменяющееся известным образом в зависимости от времени. Выбор линейной модели связан с возможностью использования многих свойств линейных систем при описании множества достижимости. Известно, что множество достижимости линейной системы выпукло и компактно в каждый момент времени. Также для линейных систем функции управления, удовлетворяющие принципу максимума, порождают траектории, ведущие на границу множества достижимости. Поэтому граница множества достижимости может быть получена интегрированием уравнений движения с экстремальными управлениями.

Динамика системы описывается системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\dot{s} = As + u,$$

где $s(t; u)$ – вектор состояния, принадлежащий пространству состояний S . Значение функции управления подчиняется ограничению типа включения $u(t) \in U$, где множество допустимых значений U является компактным. Обозначим через Λ множество всех измеримых управлений, принимающих значения только из множества U . Начальные условия заданы в виде $s(t; u) = s_0$. Будем считать, что фазовая скорость цели ограничена сверху некоторым максимальным значением. Через $G(t) \subset S$ обозначим целевое множество. Задача заключается в определении $u \in \Lambda$, доставляющего минимум следующему функционалу:

$$J[u] = \inf\{t \in \mathbb{R}_0^+ : s(t; u) \in G(t)\}.$$

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (грант 23-19-00134)

Тогда наименьшее время, необходимое для достижения управляемым объектом целевого множества, может быть выражено следующей формулой:

$$T^* = \inf_{u \in \Lambda} J[u].$$

Существует несколько подходов к решению подобных задач для линейных систем, из которых хотелось бы выделить алгоритмы Нейштадта-Итона [1, 2] и Барра-Гилберта [3]. Метод Нейштадта-Итона основан на максимизации достаточно сложно вычисляемой функции, а метод Барра-Гилберта связан с вычислением расстояния между множеством достижимости управляемого объекта и целевым множеством, что может быть достаточно трудоемким. Поэтому в последнее время появляются конструкции для упрощения алгоритмов решения подобных задач, в том числе функции оценивания снизу для наименьшего времени перехвата [4], идеи которых были использованы при разработке нового алгоритма.

В результате работы был предложен алгоритм, который позволяет вычислять время, необходимое для достижения управляемым объектом целевого множества, и строить оптимальную траекторию движения управляемого объекта. Предложенный алгоритм основан на аналитическом описании границы множества достижимости, вычислении оценок расстояния от множества достижимости до целевого множества, а также специальной функции времени.

Рассмотрим применение предложенного алгоритма для решения задачи перехвата изотропной ракетой движущейся цели. Для модели изотропной ракеты в работе [5] был получен явный параметрический вид границы множества достижимости, что позволяет использовать разработанный алгоритм.

Движение изотропной ракеты происходит в пространстве размерности $n \in \mathbb{N}$ и описывается следующей линейной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{r} = v, \\ \dot{v} = u - v, \end{cases}$$

где $r(t), v(t)$ — векторы, принадлежащие пространству \mathbb{R}^n и описывающие координаты и скорости ракеты соответственно. Для этой задачи $S = \mathbb{R}^{2n}$ — пространство состояний изотропной ракеты, U является единичной сферой пространства \mathbb{R}^n . Начальные условия для модели изотропной ракеты всегда можно выбрать в виде:

$$r(0) = 0, v(0) = v_0, v_0 \in [0, 1].$$

Пусть в качестве примера траектория цели описывается с помощью функции $G(t) = \left\{ \left[1 + \frac{1}{5} \cos 4t, \frac{1}{5} \sin 4t, -\frac{4}{5} \sin 4t, \frac{4}{5} \cos 4t \right]^T \right\}$. Такой выбор траектории движения цели связан с возможностью легко вычислить максимальную фазовую скорость движения цели. На рис. 1 приведены шаги временного цикла предложенного алгоритма при $v_0 = 0.8$.

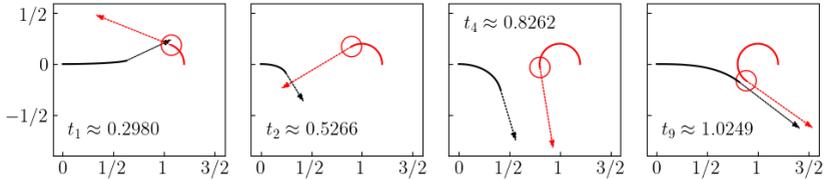


Рис. 1. Шаги временного цикла предложенного алгоритма. Цветовые обозначения: черный — изотропная ракета, красный — цель. Окружности радиуса $l = 0.1$ играют роль радиуса захвата.

На основе полученных результатов было произведено численное моделирование и проведен сравнительный анализ алгоритмов Нейштадта-Итона, Барра-Гилберта и разработанного алгоритма в контексте частоты отказов и эмпирической сложности. Показано, что предложенный алгоритм демонстрирует низкую частоту отказов и относительно небольшую эмпирическую сложность для примера изотропной ракеты.

1. **Neustadt L.W.** Synthesizing time optimal control systems // J. Math. Anal. Appl. 1960. V. 1(3). P. 484–493.
2. **Eaton J.H.** An iterative solution to time-optimal control // J. Math. Anal. Appl. 1962. V. 5(2). P. 329–344.
3. **Barr R.O., Gilbert E.** Some efficient algorithms for a class of abstract optimization problems arising in optimal control // IEEE Trans. Automat. Contr. 1969. V. 14(6). P. 640–652.
4. **Бузиков М.Э.** Построение траектории наискорейшего перехвата движущейся цели»: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2024.
5. **Buzikov M.E., Mayer A.M.** Minimum-time interception of a moving target by a material point in a viscous medium // Automatica. 2024. V. 167:111795.

ВЫБОР ВРЕМЕНИ ОБСЕРВАЦИИ АНПА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ПО СИГНАЛАМ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург,
martynowa999@bk.ru*

Введение

Арктическая зона становится зоной стратегических интересов ведущих мировых держав, в связи с чем в ней ведутся поисковые и исследовательские работы по обследованию льда и дна [1], в том числе с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). При длительной работе под водой АНПА необходимо периодически всплывать на морскую поверхность для проведения обсервации по сигналам спутниковых навигационных систем (СНС) [2]. В настоящее время в связи с глобальным потеплением и землетрясениями в Российской Арктике наблюдается откалывание многометровых айсбергов и их движение по морской поверхности в заранее неизвестном направлении и с неизвестной скоростью. При всплытии АНПА вблизи такого айсберга угол наблюдения навигационных спутников может оказаться выше 45° (рис.1), что способно привести к увеличению времени обсервации АНПА по сигналам СНС и потере точности определения координат его положения, в том числе в месте обнаружения объекта или измерения состояния среды. Уменьшение погрешности определения местоположения необходимо для идентификации места обнаружения объекта или точки измерения параметров морской среды [3].



Рис. 1. Вид айсбергов в Арктической зоне

В связи с перечисленными особенностями актуальной является задача исследования влияния экранирования сигналов СНС части спутников. Поскольку положение айсбергов прогнозировать на этапе формирования маршрутного задания АНПА невозможно, то предлагается

прогнозировать взаимное положение спутников и учитывать возможность появления айсбергов.

Особенности положения спутников в Арктической зоне

В Арктической зоне количество видимых спутников по сравнению со средними широтами меньше, угол места спутников не превышает 70° и большинство спутников расположены преимущественно вблизи горизонта, что приводит к увеличению погрешности определения псевдодальностей до 50 м.

Прогнозировать положение айсбергов в точке всплытия невозможно, тем более, что они постоянно дрейфуют. Поэтому для определения местоположения АНПА с наименьшей погрешностью и минимальным временем целесообразно выбирать такие моменты времени, в которые наблюдается наиболее полная группировка спутников и наибольшее возвышение спутников над горизонтом. Ухудшение спутниковой группировки, по которой происходит определение местоположения, может быть обусловлено: оставшимися высоко расположенными спутниками из-за экранирования сигналов, что приводит к увеличению горизонтального HDOP; оставшиеся видимые спутники могут оказаться на одной линии, что также приводит к большой погрешности определения местоположения. Это означает, что для обсервации целесообразно выбирать такие промежутки времени, в которые расположение спутников наиболее благоприятно по количеству и взаимному положению.

Результаты исследований

Для проведения исследований влияния положения спутников на погрешность определения местоположения АНПА специально разработана математическая модель, включающая в себя математическую модель орбитального движения спутников; алгоритм решения навигационной задачи; алгоритм определения погрешности определения местоположения АНПА.

В ходе проведения численного эксперимента определялись: увеличение погрешности навигационных определений АНПА в условиях экранирования части сигналов СНС на расположенных низко над горизонтом спутников; доля периода времени с недопустимо малым количеством спутников для решения навигационной задачи в длительности периода моделирования; оценка влияния количества спутников на погрешность определения местоположения АНПА. В ходе моделирования рассматривались сигналы спутников только орбитальной группировки ГЛОНАСС, как наиболее достоверной по сравнению с GPS, Бэйдоу, Galileo,

поскольку их использование способно привести к ложному определению местоположения АНПА.

Численный эксперимент длился непрерывно в течение 6 часов, положение спутников соответствовало реальной группировке на эти же моменты времени. На рис. 2 приведено изменение количества спутников с течением времени. Верхняя линия показывает количество всех видимых спутников, нижняя – количество спутников с учетом экранирования и угла наблюдения выше 40° .



Рис. 2. Изменение количества спутников с течением времени

Результаты численного эксперимента показали, что при отсутствии экранирования количество видимых спутников менялось от 9 до 13; при экранировании сигналов спутников, расположенных ниже 40° , наблюдались интервалы, в которых видимых было только 3 спутника (половина времени наблюдения) и кратковременно – 2 спутника, что не позволяло решить навигационную задачу. При использовании сигналов от всей видимой группировки спутников погрешность определения местоположения находилась в пределах метра. При экранировании части спутников погрешность иногда в течение нескольких секунд превышала 395 м. Для проведения исследования влияния ионосферы на погрешность определения местоположения АНПА к псевдодальностям двух произвольно взятых спутников видимой группировки с углом места выше 40° добавлялась погрешность 25 м. В этих условиях погрешность определения местоположения АНПА составила от 410 м до 1.0–4.5 км.

Заключение

Результаты исследований показали влияние количества спутников и взаимного их положения на возможность определения местоположения АНПА и погрешность его определения. Предлагается на этапе формирования маршрутного задания АНПА выбирать моменты времени для обсервации с наиболее благоприятной спутниковой группировкой с максимальным количеством видимых спутников, в том числе в случае экранирования их айсбергами или другими препятствиями.

1. **Мартынова Л.А.** Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // Информационно-управляющие системы. 2017. № 1 (86). С. 83-92.
2. **Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И.** Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1 (162). С. 50-58.
3. **Колесников М.П., Мартынова Л.А., Пашкевич И.В., Шелест П.С.** Метод позиционирования автономного необитаемого подводного аппарата в процессе приведения к причальному устройству // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 11-2. С. 38-49.

В.П. Носков, А.Н. Курьянов

НАВИГАЦИЯ ПО ПЛОСКИМ ДЕСКРИПТОРАМ В УСЛОВИЯХ ИНДУСТРИАЛЬНО-ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, tigr-kur@mail.ru

Работа посвящена решению актуальной проблемы автономной видеонавигации роботов в урбанизированных средах, включающих плотную городскую застройку и здания, где применение традиционных средств дистанционного управления и навигации ограничено наличием экранированных зон [1]. Задачи видеонавигации предлагается решать на основе данных бортовых систем технического зрения (СТЗ) в процессе автономного движения наземных робототехнических комплексов (РТК) или полета беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [2,3]. В основу алгоритмов навигации положены методы и алгоритмы обработки данных бортовой СТЗ, состоящей из комплекса лидара и телекамеры [4], формирующих геометрию окружающего пространства в виде облака точек с распределением на нем яркостно-цветовых полей, позволяющих решать SLAM-задачу (определение текущих координат объекта управления с формированием модели внешней среды) [3], что обеспечивает автономные полеты БПЛА и движение РТК [1,5].

В геометрии урбанизированных сред всегда присутствуют и преобладают линейные плоские объекты в том числе и с индивидуальной текстурой (полы, потолки, стены, тротуары, дороги, ...). Выделение таких объектов [6] в “раскрашенных” облаках точек, формируемых в процессе движения взаимно-юстированными бортовыми лидаром и телекамерой [4], позволяет решать полную навигационную задачу [5]. При этом

навигационная задача сводится к поиску соответствующих друг другу плоских объектов в последовательности, формируемых в процессе движения бортовой СТЗ изображений, и совмещению их текстур путем решения задачи оптимизации. Чтобы исключить требующей достаточно большого объема вычислений решение задачи оптимизации предлагается использовать комплексированные (видео-дальнометрические) дескрипторы [7], а в рассматриваемом случае – плоские комплексированные дескрипторы, принадлежащие выделяемым плоским текстурированным объектам.

Навигация с использованием плоских комплексированных дескрипторов заключается в следующем. Для двух пересекающихся облаков точек, снятых бортовым лидаром соответственно в первом и втором положениях СТЗ (робота)

$$\begin{aligned} W_1 &= \{v_{1i} = \langle x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} \rangle\}, \\ W_2 &= \{v_{2i} = \langle x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} \rangle\}, \\ & i = 1, 2, \dots, n, \end{aligned}$$

где n – число точек в облаке;

выделяются плоскости P и p соответствующие одному плоскому объекту во внешней среде:

$$\begin{cases} P: X \cos(\alpha_1) + Y \cos(\beta_1) + Z \cos(\gamma_1) = \rho_1, \\ p: x \cos(\alpha_2) + y \cos(\beta_2) + z \cos(\gamma_2) = \rho_2. \end{cases}$$

Так как плоскости P и p принадлежат одному и тому же плоскому объекту, то нормали к этим плоскостям параллельны и можно записать векторное уравнение:

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) \\ \cos(\beta_1) \\ \cos(\gamma_1) \end{bmatrix} = A(\Delta\varphi, \Delta\gamma, \Delta\theta) \begin{bmatrix} \cos(\alpha_2) \\ \cos(\beta_2) \\ \cos(\gamma_2) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $A(\Delta\varphi, \Delta\gamma, \Delta\theta)$ – обобщенная матрица поворотов при переходе из системы координат СТЗ во второе в положении систему координат в первом положении;

$\Delta\varphi, \Delta\gamma, \Delta\theta$ – повороты по курсу, дифференту (тангажу) и крену вокруг соответствующих осей;

и линейное уравнение:

$$\Delta X \cos(\alpha_1) + \Delta Y \cos(\beta_1) + \Delta Z \cos(\gamma_1) = \rho_1 - \rho_2, \quad (2)$$

где $\langle \Delta X, \Delta Y, \Delta Z \rangle$ – вектор линейного смещения из первого положения во второе в системе координат первого положения.

В текстуре плоскостей P и p можно выделить соответствующие друг другу инвариантные к перемещениям, поворотам и масштабу видео-дальнометрические дескрипторы [7], в нашем случае – плоские дескрипторы $\vec{D} \in P$ и $\vec{d} \in p$ (рис. а).

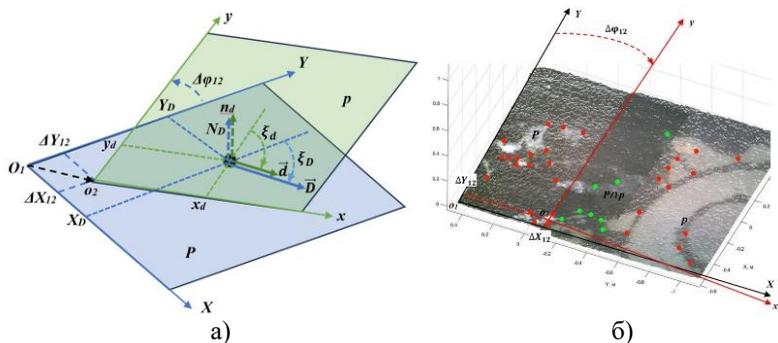


Рис. Использование плоских дескрипторов, снятых из двух разных положений: а – совмещение одной пары плоских дескрипторов; б – совмещение нескольких пар плоских дескрипторов

Совмещение одной пары соответствующих друг другу плоских дескрипторов

$$\begin{cases} \vec{D} = \langle X_D, Y_D, \xi_D, N_D \rangle, \\ \vec{d} = \langle x_d, y_d, \xi_d, n_d \rangle, \end{cases}$$

где, $\langle X_D, Y_D \rangle$ и $\langle x_d, y_d \rangle$ – линейные координаты дескрипторов в соответствующих текстурированных плоскостях;

ξ_D и ξ_d – ориентация градиентов перепада яркости дескрипторов;

N_D и n_d – нормали к дескрипторам (совпадают с нормалью к плоскому объекту);

с учетом уравнений (1) и (2) позволяет решить полную навигационную задачу. При выделении большего количества пар (рис. б) соответствующих друг другу дескрипторов точность решения навигационной задачи возрастает, так как достаточно только совместить особые точки соответствующих друг другу дескрипторов и не нужно использовать ориентацию их градиентов перепада яркости, которая обычно вычисляется с меньшей точностью, чем их координаты [7].

1. Носков В.П., Баричев Ю.С., Гойдин О.П., Курьянов А.Н. Разработка и исследование средств видео-дальнометрической навигации роботов воздушного и наземного применения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. №2. С. 96–108.
2. Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов. // М.: «Новые технологии». Мехатроника, автоматизация, управление. №12. 2005. С. 21–24.
3. Загоруйко С.Н., Казьмин В.Н., Носков В.П. Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ // М.: «Новые

- технологии». Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 8. С. 62-68.
4. **Носков В.П., Рубцов И.В., Романов А.Ю.** Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видекамеры и дальномера // М.: «Новые технологии». Мехатроника, автоматизация, управление». 2007. №8. С. 2-5.
 5. **Носков В.П., Киселев И.О.** Использование текстуры линейных объектов для построения модели внешней среды и навигации // М.: «Новые технологии». Мехатроника, автоматизация, управление». 2019. №8. С. 490-497.
 6. **Носков В.П., Киселев И.О.** Трехмерный вариант метода Хафа в реконструкции внешней среды и навигации. // М.: «Новые технологии». «Мехатроника, автоматизация, управление». 2018. №8. с. 552-560.
 7. **Носков В.П., Курьянов А.Н.** Использование комплексированных дескрипторов в решении SLAM-задачи // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 1. С. 268-278.

В.П. Носков, О.П. Гойдин, А.В. Вазаев

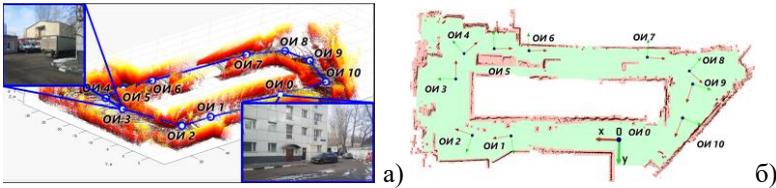
СОВМЕСТНАЯ ВИДЕОНАВИГАЦИЯ РОБОТОВ ВОЗДУШНОГО И НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им. Н.Л. Духова», Москва, noskov_mstu@mail.ru*

Работа посвящена решению актуальных задач совместной автономной видеонавигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и наземных робототехнических комплексов (РТК) в урбанизированных средах, включающих плотную городскую застройку и здания [1], а также в условиях пересеченной местности, включая горную и лесистую местность, где также, как в урбанизированных средах, применение традиционных средств дистанционного управления и навигации может быть ограничено наличием экранированных зон [2]. Задачи групповой навигации предлагается решать на основе данных бортовых систем технического зрения (СТЗ) в процессе оперативной разведки рабочей зоны БПЛА, результаты которой обеспечивают автономные движение и полет, как отдельных гетерогенных робототехнических средств, так и в группе. В основу алгоритмов навигации положены методы и алгоритмы обработки данных бортовой СТЗ, состоящей из комплекса взаимно-юстированных лидара, телекамеры и тепловизора, формирующих геометрию

окружающего пространства в виде облака точек с распределением на нем яркостно-цветовых и температурных полей, позволяющих эффективно решать SLAM-задачу (определение текущих координат объекта управления с формированием модели внешней среды) [3] и классификацию рабочей зоны по критериям геометрической [4] и опорной проходимости [5], что обеспечивает автономные полет БПЛА и движение РТК.

В условиях урбанизированных сред, где изобилуют экранированные зоны, не позволяющие использовать традиционные средства навигации и дистанционного управления, могут быть успешно использованы



методы выделения из объемного облака точек, формируемого бортовым лидаром, опорной горизонтальной поверхности, которая практически всегда присутствует в таких средах (индустриальные территории, поля в зданиях, дороги и тротуары в городской застройке, ...) и горизонтальных сечений (опорных 2D-изображений) внешней среды, позволяющих с высокой точностью и быстродействием определять все шесть координат БПЛА [1]. Объединение фрагментов горизонтальной опорной поверхности, выделяемой в процессе полета, позволяет построить план рабочей зоны для РТК, а множество опорных 2D-изображений с координатами их формирования – обеспечить его автономную навигацию [1]. На рис. 1. а) приведен результат решения SLAM-задачи и формирования опорных изображений (ОИ) БПЛА, а на рис. 1. б) – сформированный по данным СТЗ БПЛА в условиях плотной городской застройки план рабочей зоны РТК с опорными изображениями (ОИ).

Рис. 1. Результат обработки данных СТЗ БПЛА: а – решение SLAM-задачи; б – формирование плана рабочей зоны для наземного робота

В условиях пересеченной местности для классификации рабочей зоны РТК по критерию геометрической проходимости необходимо выделять критические перепады высот между соседними участками, которые могут быть вычислены по данным бортового лидара БПЛА – облаку точек, приведенному к местной вертикали в соответствии с текущими показаниями инерциальных датчиков [5]. На рис. 2. Приведен результат классификации рабочей зоны по критерию геометрической проходимости.

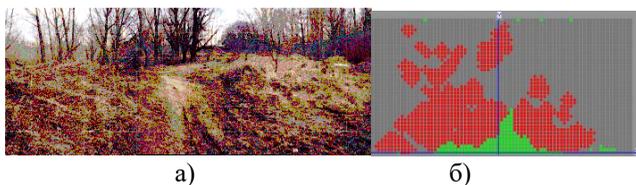
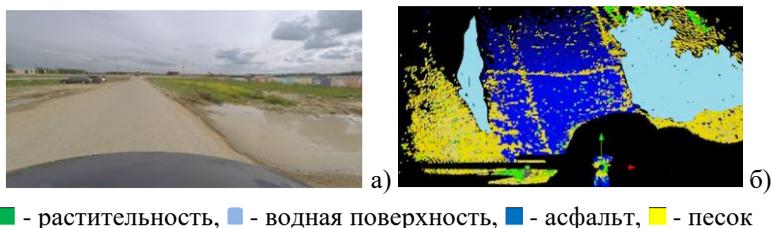


Рис. 2. Классификация рабочей зоны по критерию геометрической проходимости: а – фотопанорама рабочей зоны; б – результат выделения геометрических препятствий по перепаду высот

Для классификации рабочей зоны по критерию опорной проходимости необходимо дополнить данные бортового лидара БПЛА данными, юстированными с ним цветной телекамеры и тепловизора, что обеспечивает уверенное распознавание типов грунтов подстилающей поверхности и определить несущие характеристики участков рабочей зоны [4]. На рис. 3. приведен результат распознавания типов грунтов рабочей зоны по данным комплексированной СТЗ. Навигация и управление БПЛА в данных условиях при отсутствии экранированных зон может выполняться традиционными средствами (спутниковая и инерциальная навигация, дистанционное управление).



■ - растительность, ■ - водная поверхность, ■ - асфальт, ■ - песок

Рис. 3. Классификация рабочей зоны по критерию опорной проходимости: а – фотопанорама рабочей зоны; б – результат распознавания типов грунтов

В экранированных зонах пересеченной местности автономные навигация и управление БПЛА и РТК может выполняться на основе данных бортовых комплексированных СТЗ с использованием исходных облаков точек [2,5] и видео-дальнометрических дескрипторов [6].

1. **Носков В.П., Баричев Ю.С., Гойдин О.П., Курьянов А.Н.** Разработка и исследование средств видео-дальнометрической

- навигации роботов воздушного и наземного применения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. №2. С. 96–108.
2. **Носков В.П., Рубцов И.В.** Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов. // М.: «Новые технологии». Мехатроника, автоматизация, управление. №12. 2005. С. 21-24.
 3. **Загоруйко С.Н., Казьмин В.Н., Носков В.П.** Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ // М.: «Новые технологии». Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 8. С. 62-68.
 4. **Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г.** Распознавание объектов и типов опорной поверхности по данным комплексированной системы технического зрения // Известия ЮФУ. Технические Науки. 2016. № 2 (175). С. 127-139.
 5. **Буйволов Г.А., Носков В.П., Руренко А.А., Распопин А.Н.** Аппаратно-алгоритмические средства формирования модели проблемной среды в условиях пересеченной местности // М.: ИФТП. Сб. научн. тр. Управление движением и техническое зрение автономных транспортных роботов. 1989. С. 61-69.
 6. **Носков В.П., Курьянов А.Н.** Использование комплексированных дескрипторов в решении SLAM-задачи // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 1. С. 268-278.

А.П. Потанов¹, А.А. Галяев²

О ЗАДАЧЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ АЛГОРИТМУ НАВЕДЕНИЯ В ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЕ*

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН^{1,2},
г. Москва, ¹potanov@ipu.ru, ²galaev@ipu.ru*

Задачи группового управления автономными аппаратами могут быть решены и доведены до практического применения благодаря прогрессу как в области автоматических систем управления, так и алгоритмов бортовых средств планирования движения. Одной из распространенных математических моделей, применяемых для решения таких задач, является игра трех игроков: Атакующего, Цели и Защитника. Последний, действуя в коалиции с атакуемым объектом, противодействует Атакующему. Тактика применения Защитника может быть направлена либо на

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (грант 23-19-00134)

перехват Атакующего («жесткое» противодействие) [1], либо на воздействие на его каналы измерений («мягкое» противодействие) [2]. Аналитические методы решения задач «жесткого» противодействия достаточно широко известны [3, 4], тогда как исследования задач «мягкого» противодействия преимущественно опираются на численные подходы, включая методы Монте-Карло [5] и эволюционные алгоритмы [6]. Между тем, теории управления наблюдениями [7] и случайных процессов [8] позволяют анализировать сложные системы, в том числе связанные с противодействием алгоритмам наведения, чему и посвящена настоящая работа.

Рассмотрим линейную систему, состоящую из трех типов игроков – Атакующего (А), Защитника (D) и Цели (Т). Динамику этой системы будем описывать линейными уравнениями Ито:

$$\begin{cases} dx_A(t) = F x_A(t) dt + B_A u(t) dt + \sigma_A dw_A(t), \\ dx_D(t) = F x_D(t) dt + B_D v(t) dt + \sigma_D dw_D(t) \\ dx_T(t) = F x_T(t) dt + \sigma_T dw_T(t). \end{cases}$$

Тогда динамика относительных координат $e(t) = x_A(t) - x_T(t)$, $\varepsilon(t) = x_A(t) - x_D(t)$ описывается уравнениями

$$\begin{cases} d\varepsilon(t) = F \varepsilon(t) dt + B_A u(t) dt - B_D v(t) dt + \sigma_\varepsilon dw_\varepsilon(t), \\ de(t) = F e(t) dt + B_A u(t) dt + \sigma_e dw_e(t). \end{cases}$$

$$x_A, x_D, x_T \in \mathbb{R}^n, \quad F \in \mathbb{R}^{n \times n}, \quad B_D \in \mathbb{R}^{m \times n}, \quad v \in \mathbb{R}^m, \\ B_A \in \mathbb{R}^{r \times n}, \quad u \in \mathbb{R}^r, \quad \beta_e, \beta_\varepsilon \in \mathbb{R}^{n \times c}$$

Пусть также атакующий игрок производит оценку относительного положения Цели. При этом считается, что он не знает о существовании Защитника, а в качестве алгоритма построения этой оценки использует фильтр Калмана. Уравнения состояний и наблюдений, исходя из которых Атакующий производит оценку, запишем в виде

$$\begin{cases} de(t) = F e(t) dt + B_A u(t) dt + \sigma_e dw_e(t), \\ dy(t) = \beta_e e(t) dt + \sigma_y dw_y(t) \end{cases}$$

Закон управления, исходя из которого Атакующий формирует траекторию перехвата, выберем в виде $u = \lambda \hat{e}$, $\lambda \in \mathbb{R}^{n \times r}$. В таком случае, уравнения динамики оценки \hat{e} вектора e формируются согласно уравнениям калмановской фильтрации

$$\begin{cases} d\hat{e} = F \hat{e} dt + B_A u dt + \gamma \beta_e^T (\sigma_y \sigma_y^T)^{-1} \times \\ \quad \times (\beta_e e dt + \beta_\varepsilon \varepsilon dt + \sigma_z dw_z - \beta_e \hat{e} dt) \\ \dot{\gamma} = F \gamma + \gamma F^T + \sigma_e \sigma_e^T - \gamma \beta_e^T (\sigma_y \sigma_y^T)^{-1} \beta_e \gamma^T \end{cases}$$

Таким образом, учитывая динамику всех случайных векторов задачи, можно сформировать следующую систему уравнений

$$\begin{cases} d\varepsilon = F\varepsilon dt + B_A\lambda\hat{e}dt - B_Dvdt + \sigma_\varepsilon dw_\varepsilon, \\ de = Fe, dt + B_A\lambda\hat{e}dt + \sigma_e dw_e, \\ d\hat{e} = \hat{F}(\gamma)\hat{e}, dt + \varphi(\gamma)\beta_\varepsilon\varepsilon dt + \varphi(\gamma)\beta_e e dt + \hat{\sigma}_e(\gamma) dw_z, \\ \dot{\gamma} = F\gamma + \gamma F^T + \sigma_e\sigma_e^T - \gamma\beta_e^T(\sigma_y\sigma_y^T)^{-1}\beta_e\gamma^T, \end{cases} \quad (1)$$

с начальными условиями

$$\mathbb{E}q(0) = \mu(0), \quad (2)$$

где q – любой из символов $\varepsilon, e, \hat{e}, \gamma$. Тогда задача оптимального противодействия формулируется следующим образом.

Для системы, динамика которой описывается уравнениями (1), математические ожидания начальных процессов в начальный момент времени заданы уравнениями (2), $t \in [0, t_*]$, требуется найти управление $v(t): |v(t)| < k$, которое доставляет максимум критерию

$$J[e] = \mathbb{E}(e^T(t_*)e(t_*)).$$

Критерий $J[e]$ носит смысл квадратичного промаха Атакующего. Данная задача сводится к задаче оптимального управления, которая решается при помощи принципа максимума Понтрягина. Пример траекторий объектов, на которых достигается максимальное значение критерия, приведен на рис. 1 в плоскости математических ожиданий их координат.

Таким образом, в работе предложен метод построения оптимальной программной траектории Защитника, наиболее эффективно воздействующую на приемный канал Атакующего и предотвращающую перехват Цели при отсутствии ее допоиска и других способах разделения Защитника и Цели.

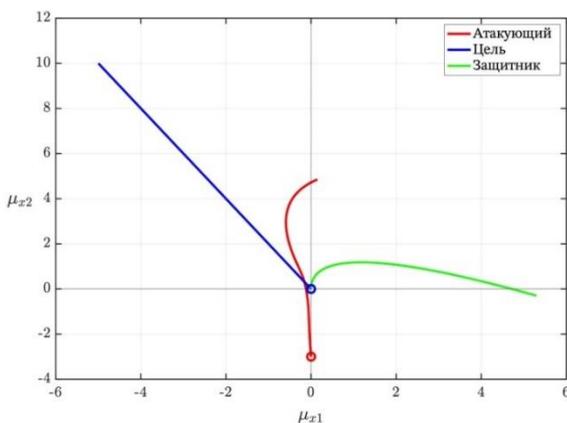


Рис. 1. Траектории движения объектов в плоскости математических ожиданий

1. **Garcia E., Casbeer D.W., Pachter M.** Cooperative aircraft defense from an attacking missile // 53rd IEEE Conference on Decision and Control. – IEEE, 2014. – P. 2926–2931.
2. **Cho H. [et al.]**. A study of the effectiveness analysis for survivability of a surface warship from a torpedo attack // Journal of Simulation. 2019. Vol 13. N 4. P 304-315.
3. **Garcia E., Casbeer D.W., Pachter M.** The Complete Differential Game of Active Target Defense // Journal of Optimization Theory and Applications. 2021. V. 191. P. 1-25.
4. **Потапов А.П., Рубинович Е.Я.** Программная 3D траектория движения защитника в ADT игре при неполной априорной информации у цели // Проблемы управления. 2024. № 5. С. 48-53.
5. **Akhil K.R. [et. al.]** Optimizing deployment of multiple decoys to enhance ship survivability // American Control Conference. – Seattle, WA: IEEE, 2008. P. 1812-1817.
6. **Chen Y. C., Guo Y.H.** Optimal Combination Strategy for Two Swim-Out Acoustic Decoys to Countermeasure Acoustic Homing Torpedo // 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). – Changsha: IEEE, 2017. P. 1061-1065.
7. **Григорьев Ф.Н., Кузнецов Н.А., Серебровский А.П.** Управление наблюдениями в автоматических системах. – М.: Наука, 1986.
8. **Липцер Р.Ш., Ширяев А.Н.** Статистика случайных процессов. – М.: Наука, 1974.

А.С. Прокопов, Е.С. Брискин

ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ МНОГОСЕКЦИОННЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С МЕЖСЕКЦИОННЫМИ АКТУАТОРАМИ И РЕГУЛИРУЕМЫМИ ТОРМОЗНЫМИ СТОЙКАМИ*

*ФГБОУ ВО Волгоградский государственный
технический университет, г. Волгоград,
dtm@vstu.ru*

Введение

Известно, что транспортные средства, использующие традиционные колесные и гусеничные движители, не обладают высокой

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>

маневренностью тем более в составе группы кинематически связанных между собой, например, в составе автопоезда. «Идеальной маневренностью», состоящей в возможности совершать роботу любое наперед заданное плоское движение без проскальзывания движителя по поверхности, обладают роботы и транспортные средства с шагающими движителями [1 - 4]. Применение шагающих движителей для группы мобильных роботов, кинематически связанных между собой, позволяет рассчитывать на обеспечение более их высокой маневренности, близкой к «идеальной».

Постановка задачи

Рассматривается робопоезд, состоящий из двух секций, связанных между собой линейным актуатором и установленными на каждой секции нескольких тормозных стоек, относительно которых и может поворачиваться каждая секция [5]. Совместная работа актуатора, полное торможение одной из секций и торможение одной из стоек другой и обеспечивает движение двухсекционного робота.

Изучается движение двухсекционного мобильного робопоезда, кинематическая схема которого представлена на рис. 1.

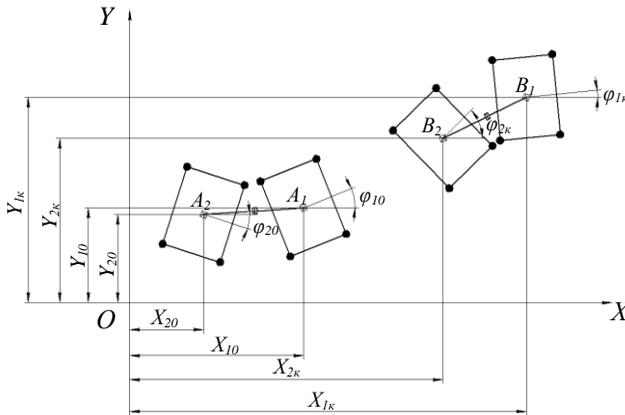


Рис. 1. Кинематическая схема двухсекционного робота.

X_{10} , Y_{10} – начальные координаты первой секции робопоезда; φ_{10} – угол между осью координат и продольной осью первой секции робопоезда; X_{20} , Y_{20} – начальные координаты второй секции робопоезда; φ_{20} – угол между осью координат и продольной осью второй секции робопоезда.

Ставится задача перемещения робопоезда из начального положения, характеризуемое координатами X_{10} , Y_{10} , φ_{10} , X_{20} , Y_{20} , φ_{20} в конечное с

координатами $X_{1к}, Y_{1к}, \varphi_{1к}, X_{2к}, Y_{2к}, \varphi_{2к}$ при задаваемой величине удлинения или укорочения связи между точками A_1A_2 (или B_1B_2) $\pm \Delta$.

Метод решения

Метод решения основан на поэтапной вычислительной процедуре. Каждый этап основывается на последовательном выборе:

1. полностью заторможенной секции робопоезда
2. выбора одной из четырех опорных стоек находящихся в заторможенном состоянии на незаторможенной секции
3. выбора удлинения или укорочения длины связи $A_1A_2(B_1B_2)$ за счет работы актуатора

Таким образом, из 16 возможных вариантов выбирается тот, который наиболее точно воспроизводит задаваемый закон движения робопоезда.

Для этого записываются уравнения прямых, соединяющих точки A_1B_1 и A_2B_2

$$\begin{cases} y = k_1x + b_1 \\ y = k_2x + b_2 \end{cases} \quad (1)$$

и линейное уравнения, устанавливающее зависимости

$$\begin{cases} \varphi_1 = \lambda_1x + \mu_1 \\ \varphi_2 = \lambda_2x + \mu_2 \end{cases} \quad (2)$$

В уравнениях (1), (2) постоянные $k_1, k_2, b_1, b_2, \lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2$ определяются на основе заданных граничных условий.

Тогда из 16 вариантов управления робопоездом выбирается тот, который на каждом шаге обеспечивает минимум критерия

$$S = \sqrt{(y_{1j} - k_1x_{1j} - b_1)^2 + (y_{2j} - k_2x_{2j} - b_2)^2 + (\varphi_{1j} - \lambda_1x_{1j} - \mu_1)^2 + (\varphi_{2j} - \lambda_2x_{2j} - \mu_2)^2}$$

Заключение

Разработанный метод управления движением робопоезда обеспечивает его необходимую маневренность близкую к «идеальной».

1. **Брискин Е.С.** Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными двигателями / Е. С. Брискин, И. П. Вершинина, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 168

2. **Охоцимский, Д. Е.** Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата / Д.Е. Охоцимский, Ю.Ф Голубев. М.: Наука. – 1984. – 309 с.
3. **Павловский, В. Е.** О разработках шагающих машин / В.Е. Павловский //Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2013. – № 101. – С. 1-32.
4. **Артоболевский, И.И.** Некоторые проблемы создания шагающих машин / И.И. Артоболевский. Н.В. Умнов // Вестник Академии наук СССР. - 1969. -№2. – С. 22.
5. **Прокопов, А. С.** Выбор оптимального режима движения двухсекционного робота / А. С. Прокопов, Е. С. Брискин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2024. – № 9(292). – С. 61-67.

С.А. Решин¹, М.Т. Бектыбаева^{1,2}

АСИМПТОТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАКОНА ЛИНЕЙНОГО ТАНГЕНСА В СЛУЧАЕ БОЛЬШОЙ ТЯГИ*

*¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва,
reshmin@ipmnet.ru*

*²Российский университет дружбы народов, г. Москва,
bektybaeva@ipmnet.ru*

Введение

Управлению мобильными механическими системами посвящена большая литература [1-4]. Современные управляемые динамические объекты становятся всё более и более быстрыми. Тяга у них возрастает в связи с развитием робототехники и машиностроения, а, следовательно, развиваемое максимальное ускорение может быть очень большим. Часто динамический объект можно рассматривать как материальную точку. Управление совершается за счёт изменения направления тяги. Поэтому для совершения оптимальных скоростных маневров в плоскости можно использовать так называемый закон линейного тангенса [5], который первоначально использовался для тяжёлых ракет-носителей [6-8], ускорение которых относительно невелико. При этом интересно исследовать асимптотику основных параметров указанного закона управления, получить некоторые предельные соотношения в случае бесконечно большой тяги и построить субоптимальные законы управления на их основе.

*Исследование выполнено в ИПМех РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект 23-11-00128, <https://rscf.ru/project/23-11-00128/>).

В настоящей работе рассматривается движение управляемого точечного объекта в вертикальной плоскости с постоянной ограниченной тягой и в общем случае с ненулевой начальной вертикальной скоростью. Целью является перевод объекта за конечное время на горизонтальную прямую заданной высоты, при этом требуется максимизировать проекцию конечной скорости. Сила тяжести, сопротивление о воздух и возмущения не учитываются.

Работа развивает предыдущие исследования [9, 10], в которых рассматривался аналогичный процесс без учета внешних сил и выполняется асимптотический анализ всех фазовых переменных при большой тяге. Полученные аналитические зависимости и сравнительный анализ различных стратегий показывают высокую эффективность предложенного подхода. Результаты могут быть использованы при проектировании автономных навигационных алгоритмов для беспилотных летательных аппаратов и посадочных платформ, в том числе при скоростных манёврах, требующих точного соблюдения фазовых ограничений.

Основная часть

Рассматривается движение объекта с ограниченной тягой в вертикальной плоскости в прямоугольной системе координат:

$$\dot{x} = v_x, \quad \dot{y} = v_y, \quad \dot{v}_x = a \cos u, \quad \dot{v}_y = a \sin u, \quad (1)$$

где a – постоянное по величине ускорение объекта, u – угол, отсчитываемый от оси абсцисс. Заданы начальные координаты и начальные проекции скорости:

$$\begin{aligned} x(0) = x_0 = 0, & \quad y(0) = y_0 = 0, \\ v_x(0) = v_{x0} = 0, & \quad v_y(0) = v_{y0}. \end{aligned}$$

Нулевые начальные значения взяты ради определенности. В фиксированный момент T задано положительное значение координаты y и нулевая проекция скорости v_y :

$$y(T) = h > 0, \quad v_y(T) = 0, \quad (2)$$

значения $x(T), v_x(T)$ не заданы.

В качестве функционала выступает горизонтальная скорость в конце процесса:

$$J = v_x(T) \rightarrow \max.$$

В качестве закона управления используется закон линейного тангенса [6]:

$$u(t) = \arctg(-Ct + \operatorname{tg} u_0), \quad (4)$$

где C, u_0 – некоторые постоянные.

Задача. Получить предельные функции для фазовой координаты y и асимптотику констант интегрирования C, u_0 для закона линейного тангенса при $a \rightarrow +\infty$.

Методика решения. Для решения задачи используется известное решение $y(t)$ системы (1) (аналогичное решению из [6] в случае с нулевой начальной скоростью)

$$y(t) = v_{y0}t + \frac{a}{2C^2} \left[(\operatorname{tg} u_0 - \operatorname{tg} u) \operatorname{sec} u_0 - (\operatorname{sec} u_0 - \operatorname{sec} u) \operatorname{tg} u - \ln \left(\frac{\operatorname{tg} u_0 + \operatorname{sec} u_0}{\operatorname{tg} u + \operatorname{sec} u} \right) \right].$$

Связь констант интегрирования также известна [9]:

$$C = \frac{2a(aT \sin u_0 + v_{y0})}{\cos u_0 (a^2 T^2 - v_{y0}^2)}. \quad (5)$$

В этом случае второе уравнение (2) автоматически выполнено. Согласно общей теории константа u_0 должна находиться путём численного решения первого уравнения (2). Таким образом, имеем дело с неявной функцией $u_0(a)$, причём, $u_0 \rightarrow 0$ при $a \rightarrow \infty$.

Далее вводятся две новые переменные:

$$\beta = \operatorname{tg} u_0, \quad \alpha = \frac{1}{a}$$

и делается разложение функции $\beta(\alpha)$ по параметру $\alpha \rightarrow 0$:

$$\beta(\alpha) = k_1 \alpha + k_2 \alpha^2 + k_3 \alpha^3 + k_4 \alpha^4 + O(\alpha^5). \quad (6)$$

Для нахождения коэффициентов k_i формула (6) подставляется в первое условие (2) и раскладывается в ряд Тейлора по малому параметру α , после коэффициенты, получающиеся при разных степенях α , поочередно приравниваются к нулю на каждом порядке:

$$k_1 = \frac{6h - 4Tv_{y0}}{T^2}, \quad k_2 = k_4 = 0, \\ k_3 = \frac{2}{5T^6} (162h^3 - 288v_{y0}Th^2 + 189v_{y0}^2T^2h - 44v_{y0}^3T^3).$$

Отметим, что существует особый случай при

$$v_{y0} = \frac{3h}{2T},$$

тогда

$$k_1 = 0, \quad k_3 = \frac{27h^3}{10T^6} \quad (k_2 = k_4 = 0).$$

Результаты. Предельная функция для фазовой переменной y имеет вид кубического полинома и получена после подстановки (6) в $y(t)$ с последующим нахождением предела:

$$\tilde{y}(t) \rightarrow \left(3 - \frac{2t}{T} \right) \left(\frac{t}{T} \right)^2 h + v_{y0}t \left(1 - \frac{t}{T} \right)^2 \quad (a \rightarrow \infty). \quad (7)$$

Производная от (7) имеет вид квадратичного полинома и соответствует предельной функции $\tilde{v}_y(t)$:

$$\tilde{v}_y(t) \rightarrow \left[\left(\frac{3t}{T} - 4 \right) v_{y0} + \left(1 - \frac{t}{T} \right) \frac{6h}{T} \right] \left(\frac{t}{T} \right) + v_{y0} \quad (a \rightarrow \infty). \quad (8)$$

Предельные полиномы (7), (8) удовлетворяют требуемым начальным и конечным условиям. На рис. 1 отражен график функции ошибки $\Delta y(t) = y(t) - \tilde{y}(t)$ с варьированием параметра a . Разность уменьшается вместе с увеличением тяги, подтверждая, что численное решение сходится к формуле (7). Формула справедлива как в общем, так и в особом случае.

Также получена асимптотика для констант интегрирования C, u_0 при $a \rightarrow \infty$, численное моделирование для которых подтвердило точность результатов. В общем случае $\text{tg } u_0 \sim k_1/a$, а в особом случае $\text{tg } u_0 \sim k_3/a^3$. Далее приближённое значение константы C рассчитывается по формуле (5) после подстановки в неё приближённых значений u_0 . Дополнительно построены субоптимальные управления как на основе закона линейного тангенса с использованием асимптотических значений для констант интегрирования (при этом терминальные условия не выполняются точно), так и на основе аппроксимации – как арктангенс отношения предельной вертикальной составляющей тяги к соответствующей горизонтальной, а именно

$$u(t) = \text{arctg} \frac{a_y(t)}{a_x(t)},$$

где

$$a_y(t) = \frac{2}{T} \left(\frac{3tv_{y0}}{T} - \frac{6th}{T^2} + \frac{3h}{T} - 2v_{y0} \right),$$

$$a_x(t) = \sqrt{a^2 - a_y^2(t)}, \quad a = \text{const.}$$

Здесь выражение $a_y(t)$ представляет собой вторую производную от (7) (или первую производную от (8)).

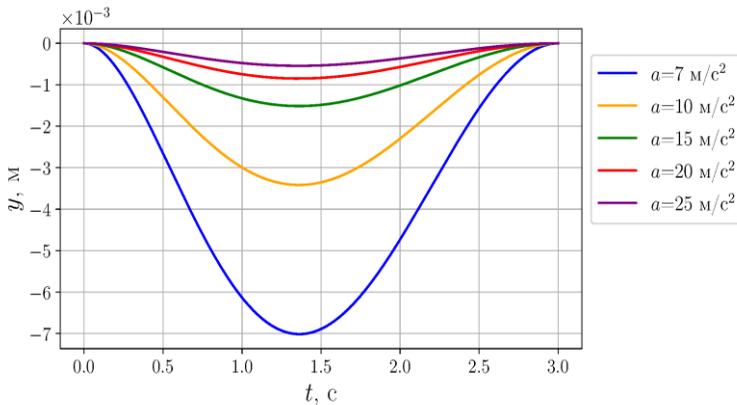


Рис. 1. Зависимость $\Delta y(t)$ при разных значениях параметра a ($h = 1$ м, $T = 3$ с, $v_{y0} = 2$ м/с)

В работе проведен асимптотический анализ управления на основе закона линейного тангенса в случае большой тяги и ненулевой вертикальной скорости. Получено выражение для вертикальной координаты в предельном случае и асимптотика для констант интегрирования. Результаты, касающиеся нахождения разложений в ряды и пределов сложных выражений, получены с использованием системы символьных вычислений (компьютерной алгебры). Также предложены субоптимальные управления, численное моделирование для которых показало хорошие результаты. Планируется проведение аналогичного анализа в случае наличия внешних сил. Результаты могут быть использованы для разработки стратегии управления в задачах разгона, преследования с ограниченной тягой. Также подход применим в задачах с фазовыми ограничениями [9].

1. **Zhou, Y.** Optimal Vehicle Trajectory Planning with Control Constraints and Recursive Implementation for Automated On-Ramp Merging / Zhou Y., Cholette M.E., Bhaskar A., Chung E. // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2018. – Vol. 20, № 9. – P. 3409–3420.
2. **Gu, M.** Trajectory Planning for Automated Merging Vehicles on Freeway Acceleration Lane / Gu M., Su Y., Wang C., Guo Y. // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2024. – Vol. 73, № 11. – P. 16108–16124.
3. **Голубев, А.Е.** Стабилизация программных движений механических систем с учетом ограничений / А.Е. Голубев // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2023. – № 4. – С. 111–125.
4. **Бортаковский, А.С.** Быстродействие группы управляемых объектов / А.С. Бортаковский // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2023. – № 5. – С. 16–42.
5. **Lawden, D.F.** Dynamic problems of interplanetary flight / D.F. Lawden // *Aeronautical Quarterly*. – 1955. – Vol. 6, № 3. – P. 165–180.
6. **Брайсон, А.** Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю-ши. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
7. **Охоцимский, Д. Е.** Некоторые вариационные задачи, связанные с запуском искусственного спутника Земли / Д.Е. Охоцимский, Т.М. Энеев // *Успехи физ. наук*. – 1957. – Т. 63, № 1. – С. 5–32.
8. **Perkins, F.M.** Derivation of Linear-Tangent Steering Laws, Air Force Report No. SSD-TR-66-211 (Air Force Systems Command, Los Angeles, CA, 1966).
9. **Reshmin, S.A.** Accounting for Phase Constraints During Intensive Acceleration / S.A. Reshmin, M.T. Bektybaeva // *Mechanics of Solids*. – 2024. – Vol. 59, № 8. – P. 3913–3928.

10. Решмин, С.А. Учет фазового ограничения при управлении разгоном динамического объекта по модифицированному закону линейного тангенса / С.А. Решмин, М.Т. Бектыбаева // Труды Института математики и механики УрО РАН. – 2024. – Т. 30, № 2. – С. 152–163.

А.В. Смирнов, А.В. Пономарев, Н.Г. Шилов, Т.В. Левашова

ДИНАМИЧЕСКОЕ КОНФИГУРИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЭРГАТИЧЕСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ПРИНЦИПЫ И КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ*

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
г. Санкт-Петербург
{smir, ponomarev, nick, tatiana.levashova}@iias.spb.su*

Введение

Проблемам совместной работы гетерогенных робототехнических систем посвящен широкий спектр научных исследований и практических работ отечественных ученых [1-5]. В последние годы развиваются современные подходы к построению и организации функционирования нового класса подобных систем – гетерогенных эргатических робототехнических систем, являющихся примером социотехнических систем (человеко-машинных комплексов) и объединяющих в себе преимущества человеческого интеллекта (способности к принятию решений в нестандартных ситуациях), интеллектуальных агентов (возможности по обработке больших объемов данных и выполнению рутинных операций с помощью моделей искусственного интеллекта) и роботов.

Динамическое конфигурирование предполагает возможность изменения (цифровой трансформации) существующих конфигураций системы во времени и пространстве (контекстно-управляемое конфигурирование). Данная работа посвящена разработке подхода к динамическому конфигурированию гетерогенных эргатических робототехнических систем (ГЭрПТС) из разнородных элементов (человек, интеллектуальный агент, робот) как одному из важнейших этапов функционирования подобных систем.

* Работа выполнена при поддержке бюджетной темы FFZF-2025-0003 СПб ФИЦ РАН.

Подход к динамическому конфигурированию ГЭрПТС

Подход основан на следующих ключевых принципах:

1. *Мультиаспектное семантически согласованное представление объекта конфигурирования (ГЭрПТС).*

Поскольку задачи конфигурирования ГЭрПТС требуют междисциплинарного подхода (в силу различной природы элементов ГЭрПТС), важно обеспечить совместимость разнородных моделей, описывающих аспекты. Семантическая интероперабельность позволит осуществить интеграцию методов из различных проблемных областей для комплексного решения задач мультиаспектного конфигурирования. Более того, сложность ГЭрПТС, включающих множество взаимосвязанных компонентов (подсистем и элементов) и параметров, делает неэффективным (а зачастую и невозможным) их описание в рамках единой модели из-за высокой размерности. *Предложенный* подход основан на декомпозиции системы на семантически согласованные аспекты, соответствующие ее процессам, подсистемам и элементам. Каждый аспект объединяет элементы и связи, относящиеся к определенной точке зрения (например, производственные процессы, обслуживание оборудования и другие). Для ряда таких аспектов уже существуют специализированные модели и механизмы конфигурирования, которые могут быть использованы в рамках подхода. Таким образом, данный принцип подразумевает представление системы в виде аспектов с поддержкой их семантической согласованности с целью получения совместимой конфигурации всей системы.

2. *Применение накопленных знаний.*

Для рассматриваемого класса систем как правило уже существуют проверенные методы, модели, типовые решения и значительные объемы исторических данных, позволяющие эффективно конфигурировать отдельные аспекты, отказываться от которых было бы нецелесообразно. Данный принцип предполагает сбор этих знаний, представление в унифицированной форме, сохранение и последующее использование для повышения эффективности конфигурирования.

3. *Контекстно-управляемое конфигурирование.*

ГЭрПТС функционирует в динамичной среде и должна адаптироваться к ее изменениям. Данный принцип предполагает использование технологии управления контекстом. При этом под контекстом обычно понимается совокупность информации и знаний о состоянии окружающей среды, процессе конфигурирования (включая цель, требования и ограничения), а также состоянии самого объекта конфигурирования.

4. *Учет предпочтений пользователя.*

Эффективность взаимодействия между человеком с одной стороны и интеллектуальными агентами и роботами с другой критически важна.

Система должна адаптироваться не только к явным предпочтениям человека (заданным им собственноручно), но и выявлять скрытые предпочтения (закономерности) на основе анализа поведения и решений, принимаемых человеком.

5. Использование моделей машинного обучения для генерации и оценки альтернативных конфигураций.

Современные технологии искусственного интеллекта, включая генеративные модели и гибридные подходы, объединяющие методы, ориентированные на работу как с символьными, так и с нейросетевыми знаниями, позволяют повысить не только уровень автоматизации процессов в СППР, но и их эффективность за счет возможности выявления скрытых закономерностей в накопленных наборах данных.

Вышеприведенные принципы были положены в основу концептуальной модели динамического конфигурирования ГЭрРТС как совокупности взаимосвязанных онтологических моделей следующих аспектов динамического конфигурирования (с используемыми в них понятиями) – общий взгляд на задачу (контекст, целевая ситуация, текущая и целевая конфигурации, участники и их роли), планирование конфигурирования (цель, контекст, целевая ситуация, участники переговоров и план их действий), конфигурирование (организационно-технологическая структура системы, участники и их роли, ресурсы и планы действий).

Для частичной апробации вышеописанного подхода решена практическая задача – конфигурирование процессов технического обслуживания роботизированного полупроводникового производства. Реализация предложенного подхода позволила сократить число человеко-зависимых операций на 37%, что ускоряет выявление неисправностей в системе технического обслуживания и повышает общую эффективность системы.

Заключение

Полученные результаты подтверждают эффективность применения предложенного подхода к динамическому конфигурированию ГЭрРТС. Апробация подхода продемонстрировала его значительный потенциал для дальнейшего развития и применения в широком спектре социотехнических систем «человек – интеллектуальный агент - робот».

1. **Гайдук А.Р.** Модели и методы управления большими группами роботов / Гайдук А.Р., Каляев И.А., Капустян С.Г., Кухаренко А.П.; ЮФУ, 2014. 106 с.
2. **Черноусько Ф.Л.** Динамика мобильных систем с управляемой конфигурацией / Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н.; Физматлит, 2022. 464 с.

3. **Граськин С.С.** Концептуальные основы платформенно-модульного подхода к разработке перспективных робототехнических комплексов / Граськин С.С., Ермолов И.Л., Хрипунов С.П. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Том 24, № 12. С. 619-626.
4. **Галин Р.Р.** Эффективное функционирование смешанной неоднородной команды в коллаборативной робототехнической системе / Галин, Р. Р., Широкий, А. А., Магид, Е. А., Мещеряков, Р. В., Мамченко М.В. // Информатика и автоматизация. 2021. 20(6). С. 1224-1253.
5. **Смирнов А.В.** Система организации информационного взаимодействия мобильных роботов в смешанных коалициях: сценарная модель и реализация / Смирнов А.В., Кашевник А.М. // XII Мультиконференция по проблемам управления. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2019. С. 180-184.

С.М. Соколов, А.А. Богуславский

СОГЛАСОВАННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАДИЦИОННЫХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБРАБОТКЕ ЗРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ В БОРТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ

*Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша РАН,
г. Москва,
sokolism@list.ru, anbg74@mail.ru*

Введение

Требование повышения степени автономности робототехнических комплексов (РТК) влечёт необходимость сбора и обработки больших объёмов зрительных данных. При этом требуется учитывать ограниченность бортовых вычислительных ресурсов, их специфику (в частности, применение гетерогенных вычислителей) и желание оставаться в рамках экономической целесообразности предлагаемых решений [1-4].

Нейросетевые подходы демонстрируют высокие результаты в задачах распознавания объектов и семантической сегментации, но классические методы компьютерного зрения сохраняют свою значимость в связи с возможностью обеспечить высокую скорость обработки зрительных данных, оперативно производить настройку и применять менее дорогостоящие вычислительные ресурсы [5-9].

Мы исследуем возможности применения двух этих подходов. В практическом использовании, при тиражировании с возможностью наращивания степени автономности, т.е. обеспечении открытости

архитектуры реализующего программного обеспечения, возникает задача унификации различных технологий использования гетерогенных вычислительных ресурсов и алгоритмов обработки.

Варианты согласования нейросетевых технологий и классических алгоритмов компьютерного зрения

В качестве возможных вариантов согласования двух рассматриваемых технологий в составе бортовой информационно-управляющей системы (БИУС) РТК можно перечислить следующие.

- Последовательное применение с классическим началом - предварительная обработка изображений перед обработкой нейронными сетями (устранение помех, локализация кандидатов на образы объектов интереса признаковыми методами).
- Последовательное применение с применением классических алгоритмов после нейросетевых - постобработка для уточнения результатов, полученных нейросетевым способом, например, нейросетевое обнаружение объекта интереса с последующим прослеживанием методом оптического потока.
- Применение гибридных алгоритмов, предполагающих использование (вычисление традиционными алгоритмами) заранее известных признаков (в частности, в задачах визуальной одометрии и SLAM).
- Адаптивное применение разнотипных алгоритмов с учетом допустимой потери точности (в частности, при недостатке питания частичное отключение вычислительных ресурсов).

Применение перечисленных вариантов выполняется с учетом целевой задачи, вычислительных ресурсов, условий внешней среды и требований к скорости и точности обработки [10-13]. Согласованное использование подходов позволяет реализовать многоуровневую систему обработки зрительных данных.

Выбор программно-аппаратной платформы

Для организации согласованного применения классических и нейросетевых методов в системах компьютерного зрения возможно применение признанных решений, в первую очередь, связующего программного обеспечения (ПО) ROS2 [14]. При этом реализации нейросетевых и классических алгоритмов можно разделить на разные узлы ROS и включать их включение/выключение в зависимости от ресурсоёмкости, условий внешней среды и текущей задачи.

В качестве примера рассмотрим применение перечисленных методов в задаче визуальной одометрии для оценки собственного

перемещения (положения и ориентации) наземного РТК [15, 16]. Решение этой задаче можно разделить на отдельные процессы, реализуемые в виде узлов ROS2:

1) Узел ввода зрительной информации. Выполняет предварительную обработку изображений (фильтрация шумов, нормализация яркости, маскирование областей засветки).

2) Узел для обнаружения и сопоставления признаков нейросетевыми методами. Функционирует при доступности соответствующих аппаратных средств.

3) Узел для обнаружения и отслеживания признаков с использованием точечных детекторов и метода оптического потока. Функционирует на универсальном процессоре.

4) Узел для оценки качества измерений и формирования траектории с учетом результатов, полученных узлами (2) и (3).

5) Узел адаптивного управления вычислениями. Выполняет включение и выключение узлов (2) и (3) в зависимости от текущего состояния РТК, скорости движения и состояния внешней среды.

Приведенная декомпозиция программной системы для решения задачи визуальной одометрии обеспечивает надежность и расширяемость. В частности, надежность повышается за счет возможности использования результатов обработки, полученных двумя различными способами. Расширяемость заключается в возможности добавления новых компонент, в первую очередь, выполняющих получение данных БИНС и их совместных учет с результатами обработки зрительных данных.

Заключение

Согласованное применение классических и нейросетевых методов позволяет построить надежные, эффективные и адаптивные системы компьютерного зрения для БИНС РТК. В нашей практике мы разработали структуру ПО, позволяющую реализовать применять в БИНС разнообразные алгоритмы обработки и гетерогенные вычислительные средства и обеспечивать возможность наращивания степени интеллектуальной автономности БИНС, оставаясь в рамках однотипных интерфейсов. Перспективным направлением дальнейший исследований представляется разработка на базе этого ПО адаптивного программно-аппаратного каркаса, позволяющего выполнять автоматический выбор оптимального метода обработки в зависимости от текущего состояния аппаратной части РТК и доступных данных о состоянии внешней среды.

1. **Bahls, T. et al.** Robotic Demands on On-Board Data Processing / T.Bahls, M.Bihler, J.Klodmann, F.Stulp, G.Grundwald, A.Beyer//

- European Workshop on On-board Data Processing (OBDP2019), 25-27 February 2019. – 2019. – p. 1–4.
2. **Oberhaus, D.** How NASA Built a Self-Driving Car for Its Next Mars Mission / D. Oberhaus // *Wired*, July 2020. – 2020. – URL: https://www.wired.com/story/how-nasa-built-a-self-driving-car-for-its-next-mars-mission/?utm_source=chatgpt.com
 3. **Moon, J. et al.** Enhancing Autonomous Driving Robot Systems with Edge Computing and LDM Platforms. / J. Moon, D. Hong, J. Kim, S. Kim, S. Woo, H. Choi, C. Moon // *Electronics* 2024, №13(2740). – 2024. – p.1–25.
 4. **Богуславский, А.А., Боровин, Г.К., Каргашев, В.А., Павловский, В.Е., Соколов, С.М.** Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления. / А.А. Богуславский, Г.К. Боровин, В.А. Каргашев, В.Е. Павловский, С.М. Соколов – М.: ИПМ им.М.В.Келдыша, 2019. – 228 с.
 5. **Власов, С.О., Гладышев, А.И., Богуславский, А.А., Соколов, С.М.** Решение задачи обнаружения объекта с помощью нейросетевых технологий. / С.О. Власов, А.И. Гладышев, А.А. Богуславский, С.М. Соколов – М.: ИПМ им.М.В.Келдыша, Препринт №16, 2023. – 27 с.
 6. **Zhao, X., Wang, L., Zhang, Y. et al.** A review of convolutional neural networks in computer vision. / X. Zhao, L. Wang, Y. Zhang, X. Han, M. Deveci, M. Parmar // *Artificial Intelligence Review*, Vol. 57 (99). – 2024. – p. 1– 43.
 7. **Jamali, M., Davidsson, P., Khoshkangini, R. et al.** Context in object detection: a systematic literature review. / M. Jamali, P. Davidsson, R. Khoshkangini, M.G. Ljungqvist, R.-C. Mihailescu // *Artificial Intelligence Review*, Vol. 58(175). – 2025. – p. 1– 89.
 8. **Machkour, Z., Ortiz-Arroyo, D., Durdevic, P.** Classical and Deep Learning based Visual Servoing Systems: a Survey on State of the Art. // *J Intell Robot Syst* Vol.104. – 2022. – p. 1–11.
 9. **O'Mahony N. et al.** Deep Learning vs. Traditional Computer Vision / N. O'Mahony, S. Campbell, A. Carvalho, S. Harapanahalli, G. Velasco-Hernandez, L. Krpalkova, D. Riordan, J. Walsh // *Advances in Computer Vision Proceedings of the 2019 Computer Vision Conference (CVC)*, Springer Nature Switzerland. – 2019. – pp. 128–144.
 10. **Azzam, R., Taha, T., Huang, S. et al.** Feature-based visual simultaneous localization and mapping: a survey. / R. Azzam, T. Taha, S. Huang, // *SN Appl. Sci.* Vol.2(224). – 2020. – DOI: 10.1007/s42452-020-2001-3
 11. **Tarkasis, K., Kaparis, K., Georgiou, A.C.** Enhancing Trustworthiness in Real Time Single Object Detection. / K. Tarkasis, K. Kaparis, A.C.

- Georgiou // Information System Frontiers. – 2025. – DOI: 10.1007/s10796-025-10584-4
12. Journal of Intelligent & Robotic Systems (2024) 110:135 <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02171-7> REGULAR PAPER DFT-VSLAM:ADynamicOpticalFlowTrackingVSLAMMethod Dupeng Cai1 · Shijiang Li1 · Wenlu Qi1 · Kunkun Ding1 · Junlin Lu1 · Guangfeng Liu2 · Zhuhua Hu1 110-135
 13. **Contoli, C., Calisti, L., Fabrizio, G.D. et al.** A power-aware vision-based virtual sensor for real-time edge computing. / C. Contoli, L. Calisti, G.D. Fabrizio // Real-Time Image Processing Journal, Vol. 21(103). – 2024. – DOI: 10.1007/s11554-024-01482-0
 14. **Rico, F.** A Concise Introduction to Robot Programming with ROS2. 2nd ed. / F. Rico. – New York: Chapman and Hall/CRC, 2025. – 258 p.
 15. **Nistér, D., Naroditsky, O., Bergen, J.** Visual Odometry for Ground Vehicle Applications / D. Nistér, O. Naroditsky, J. Bergen // Journal of Field Robotics Vol.23(1). – 2006. – p.3–20.
 16. **Scaramuzza, D., Fraundorfer, F.** Visual Odometry. Part I: The First 30 Years and Fundamentals / D. Scaramuzza, F. Fraundorfer // IEEE Robotics and Automation Magazine, December 2011. – 2011. – p.80–92.

И.Е. Старостин, С.П. Халютин

ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННОЕ МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, starostinigo@yandex.ru

В настоящее время методы искусственного интеллекта, в том числе нейронные сети, все чаще применяются для решения серьезных научно-технических задач робототехники и мехатроники [1]. Получить достаточный для обучения объем данных часто представляет собой существенную проблему [1]. Решением данной проблемы является использование физически информированных нейронных сетей (ФИНС), в структуру и в алгоритм обучения которых включены физические модели [1 – 3]. Благодаря этому ФИНС обучаются на существенно меньшем объеме данных, а предсказания ФИНС не противоречат физическим законам [1 – 3]. В каждой из приведенных в [1, 4 – 7] примеров ФИНС в функцию потерь включаются квадраты невязок, полученных из соответствующих физических законов, начальных и граничных условий.

Для учета законов физики предлагается использовать метод математического прототипирования энергетических процессов (ММПЭП) – единый подход описания процессов различной физической и химической природы [8 – 10]. Система динамических уравнений ММПЭП [8]:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \mathbf{B}(\mathbf{x}(t)) \frac{\delta \Delta \mathbf{x}(t)}{dt} + \left(\frac{dx(t)}{dt} \right)_{ext}, \frac{\delta \Delta \mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}(\mathbf{x}(t)) \Delta \mathbf{F}(\mathbf{x}(t)), \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{B}^T(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{F}(\mathbf{x}), \mathbf{F}(\mathbf{x}) = -\nabla_{\mathbf{x}} W(\mathbf{x}), \quad (2)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{Y}(t, \mathbf{a}_y), \mathbf{a}_y = \mathbf{a}_y[\mathbf{x}(t)], \mathbf{z}(t) = \mathbf{Z}[t, \mathbf{x}(t)], \mathbf{a}_z = \mathbf{a}_z[\mathbf{x}(t)], \quad (3)$$

где \mathbf{x} - координаты состояния; $\Delta \mathbf{x}(t)$ - координаты процессов; $\mathbf{B}(\mathbf{x})$ – топологическая матрица (ТМ) системы; $(dx(t)/dt)_{ext}$ - внешние потоки в систему; $\Delta \mathbf{F}(\mathbf{x})$ - динамические силы, движущие процессы в системе; $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ - вектор частных производных функции свободной энергии $W(\mathbf{x})$ по координатам состояния \mathbf{x} ; $\mathbf{A}(\mathbf{x})$ - положительно определенная диссипативная матрица (ДМ); \mathbf{y} , \mathbf{z} - наблюдаемые и контролируемые соответственно характеристики системы.

Для реализации системы уравнений ММПЭП (1) – (3) в численном виде необходимо задать с точностью до постоянных коэффициентов функцию свободной энергии $W(\mathbf{x})$, а также функции состояния независимых составляющих ТМ и ДМ [10]. Независимые составляющие $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ ТМ и ДМ и свободную энергию $W(\mathbf{x})$ запишем в виде [8]:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{a}), W(\mathbf{x}) = W(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{a}), \quad (4)$$

где \mathbf{p} – индивидуальные параметры системы, меняющиеся от ее экземпляра к экземпляру, а \mathbf{a} – общие параметры системы конкретного типа. Правые части (4) представляют собой некоторые модели (например, нейронные сети [11]) [8 – 12]. Индивидуальные параметры \mathbf{p} конкретного экземпляра системы конкретного типа определяются через репрезентативные участки $\mathbf{y}_r(t)$ динамик наблюдаемых параметров $\mathbf{y}(t)$ [9]:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}(\bar{\mathbf{p}}, \mathbf{a}), \bar{\mathbf{p}} = \bar{\mathbf{p}}[\mathbf{y}_r(t)], \quad (5)$$

где $\bar{\mathbf{p}}$ - заданные исследователем характеристики кривых динамик. Согласно (4) и (5) и аналогично для аналитического выражения общего решения дифференциальных уравнений ММПЭП имеем [9]:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \mathbf{H}(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{p}}, \mathbf{a}), W(\mathbf{x}) = W(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{p}}, \mathbf{a}), \mathbf{x}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t, \bar{\mathbf{p}}, \mathbf{b}), \bar{\mathbf{p}} = \bar{\mathbf{p}}[\mathbf{y}_r(t)], \quad (6)$$

где правые части (6) уже представляют собой модели машинного обучения [11, 12], в том числе и нейронные сети [11], причем \mathbf{a} , \mathbf{b} - обучаемые параметры моделей [9].

Для обучения модели (6) необходимо задать, используя (1) – (3), функцию потерь G в виде [1 – 7, 9]:

$$G = \left(\frac{dx(t)}{dt} - \mathbf{B}(\mathbf{x}(t)) \cdot \mathbf{A}(\mathbf{x}(t)) \cdot \Delta \mathbf{F}(\mathbf{x}(t)) \cdot \mathbf{B}^T(\mathbf{x}(t)) \cdot \mathbf{F}(\mathbf{x}(t)) + \left(\frac{dx(t)}{dt} \right)_{ext} \right)^2 + \left(\mathbf{y}_r(t) - \mathbf{Y}_r(t, \mathbf{a}_y[\mathbf{x}(t)]) \right)^2. \quad (7)$$

Обучение моделей (6) с использованием функции потерь (7) и с последующим использованием обученной модели (1) – (3), (6) представляет

собой подход, являющийся развитием изложенного в [1 – 7] подхода, т.к. ММПЭП является обобщением используемых в [1, 4 – 7] моделей физических процессов.

1. **Зрелова Д.П., Ульянов С.В.** Модели физически информированных / осведомленных классических Лагранжевых / Гамильтоновых нейронных сетей в глубоком обучении // Современные информационные технологии и ИТ-образование, 2022. Т. 18, № 2. С. 310 – 325.
2. **Garleo G., et. al.** Machine learning and the physical sciences // Reviews of Modern Physics, 2019. No. 91(4). 045002. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.91.045002>
3. **Raissi M., Perdicaris P., Karniadakis G.E.** Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computation Physics, 2019. No. 378. PP. 686 – 707.
4. **Вершинин В.Е., Зязев Р.Р. Лещенко А.А., Мигманов Р.Р., Ивлев М.И.** Алгоритмы оперативного управления заводнением с применением физико-информированных нейронных сетей // Neftegaz.RU, 2024. № 6 (150). [Электронный ресурс]. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/838247-algoritmy-operativnogo-upravleniya-zavodnieniem-s-primeneniem-fiziko-informirovannykh-neyronnykh-sete/> (дата обращения 30.05.2025)
5. **Кошелев К.Б., Стрижак С.В.** Применение физически информированной нейронной сети для модельных задач гидрологии // Международная конференция «Марчуковские научные чтения 2024» (МНЧ-2024), 7 – 11 октября 2024 г., 2024. С. 104 – 104.
6. **Кузнецов К.С., Амосова Е.В.** Численное решение коэффициентных обратных задач для уравнений диффузии – конвекции – реакции при помощи метода PINN // Международная конференция «Марчуковские научные чтения 2024» (МНЧ-2024), Москва 7 – 11 октября 2024 г., 2024. С. 105 – 105.
7. **Бузаев Ф.А., Деркач Д.А., Ефременко Д.С.** Решение уравнения переноса одномерного излучения с помощью физически информированных нейронных сетей: анализ производительности // Светотехника, 2025. № 2. С. 70 – 76.
8. **Старостин И.Е., Халютин С.П., Париевский В.В.** Виды и формы представления основных уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов // Электропитание, 2022. № 4. С. 4-14.
9. **Старостин И.Е., Гавриленков С.И.** Архитектура математического ядра цифровых двойников различных физико-химических систем на базе метода математического прототипирования энергетических

- процессов // Надежность и качество сложных систем, 2024. № 4. С. 160–168. DOI: 10.21685/2307-4205-2024-4-17
10. **Старостин И.Е.** К вопросу применения методов символьной регрессии для построения цифрового двойника систем различных физико-химических систем на базе метода математического прототипирования энергетических процессов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Т. 1. Пенза, 26 мая – 1 июня 2025 г., 2025. С. 68 - 74.
 11. **Haykin S. Neural Networks.** A Comprehensive Foundation. Upper Saddle River, USA: Prentice hall, 2006. 1105 p.
 12. **Flach P.** Machine Learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 400 p.

О.А. Степанов, А.М. Исаев, В.А. Васильев, А.Б. Торопов

МЕТОДЫ МОНТЕ-КАРЛО ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОЦЕНИВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ*

*ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО,
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, soalax@mail.ru*

Введение

Задачи обработки измерительной информации в робототехнических системах, как правило, приходится решать в условиях априорной неопределенности о моделях оцениваемых сигналов и используемых измерений. Такая задача с успехом может решаться в рамках байесовского подхода, в рамках которого имеется возможность вычисления оптимальной в среднеквадратическом смысле оценки, минимизирующей дисперсию ее ошибки [1]. При наличии неопределенности в моделях, приходится решать совместную задачу оценивания и идентификации, которая, как правило, является нелинейной. При ее решении широкое применение получили алгоритмы, называемые фильтрами частиц (ФЧ) и основанные на последовательных методах Монте-Карло (ММК). Одно из важных достоинств этих алгоритмов заключается в возможности успешно преодолевать трудности, связанные с нелинейностью, и добиваться точности, близкой к потенциальной, соответствующей точности оптимального оценивания. Однако ФЧ обладают существенным недостатком, порожденным значительной вычислительной сложностью, что ограничивает их

* Работа выполнена за счет гранта РФФ № 23-19-00626, <https://rscf.ru/project/23-19-00626/>

применение в режиме реального времени. Для преодоления этого недостатка разработан и успешно апробирован ряд специальных процедур, использование которых создаёт предпосылки для построения экономических в вычислительном отношении алгоритмов оценивания, пригодных в том числе и для реализации в режиме реального времени [2-6]. Обзору этих алгоритмов и посвящен настоящий доклад.

Постановка исследуемой задачи и её оптимальное решение

Введем вектор состояния $x_k = (x_k^I, \theta^T)$, в котором x_k^I – n_x -мерная оцениваемая случайная марковская последовательность, а θ – неизвестный постоянный – n_θ -мерный подвектор, отражающий неопределенность моделей. Уравнения для вектора состояния и используемых m – мерных измерений в этом случае могут быть записаны в виде

$$x_k = f_k(x_{k-1}^I, \theta) + \Gamma_k(\theta)w_k, \quad \theta_k = \theta_{k-1} = \theta, \quad (1)$$

$$y_k = h_k(x_k^I, \theta) + \Psi_k(\theta)v_k. \quad (2)$$

где k – индекс дискретного времени; $f_k(\bullet)$, $h_k(\bullet)$, – известные нелинейные функции; w_k , v_k – центрированные гауссовские бел шумные последовательности с известными матрицами ковариаций Q_k, R_k ; $\Gamma_k(\bullet), \Psi_k(\bullet)$ – известные матрицы соответствующих размерностей.

Решение задачи оценивания вектора состояний (1) по измерениям (2) в рамках байесовского подхода сводится к нахождению оптимальной в среднеквадратическом смысле оценки $\hat{x}_k^{opt}(Y_k)$ и соответствующей ей условной матрице ковариаций $P_k^{opt}(Y_k)$, для которых справедливы следующие соотношения [1]:

$$\hat{x}_k^{opt}(Y_k) = \int x_k p(X_k / Y_k) dX_k, \quad (3)$$

$$P_k^{opt}(Y_k) = \int (x_k - \hat{x}_k^{opt}(Y_k))(x_k - \hat{x}_k^{opt}(Y_k))^T p(X_k / Y_k) dX_k \quad (4)$$

где $p(X_k / Y_k)$ – апостериорная (условная) к набору измерений $Y_k = [y_1^T, y_2^T, \dots, y_k^T]^T$ ф.п.р.в. для составного вектора $X_k = [x_0^T, x_1^T, \dots, x_k^T]^T$, а интегралы предполагаются многомерными с бесконечными пределами.

Методы Монте-Карло и их модификации.

При решении сформулированной задачи ММК трактуются как методы аппроксимации апостериорной ф.п.р.в. В частности, при построении простейшего ММК, апостериорную ф.п.р.в. на каждом шаге можно представить в виде [1-4]

$$p(X_k / Y_k) \approx \sum_{n=1}^N \tilde{\omega}_k^{(n)} \delta(X_k - X_k^{(n)}), \quad \sum_{n=1}^N \tilde{\omega}_k^{(n)} = 1, \quad (5)$$

Для получения оценки (3) и матрицы ковариаций (4) согласно ММК могут быть использованы следующие приближённые равенства

$$\hat{x}_k^{opt}(Y_k) \approx \hat{x}_k(Y_k) = \sum_{n=1}^N \tilde{\omega}_k^{(n)} x_k^{(n)}, \quad (6)$$

$$P_k^{opt}(Y_k) \approx P_k(Y_k) = \sum_{n=1}^N \tilde{\omega}_k^{(n)} x_k^{(n)} (x_k^{(n)})^T - \hat{x}_k(Y_k) (\hat{x}_k(Y_k))^T, \quad (7)$$

где нормированные $\tilde{\omega}_k^{(n)}$ и ненормированных $\omega_k^{(n)}$ веса определяются

$$\omega_k^{(n)} = p(Y_k / X_k^{(n)}), \quad \tilde{\omega}_k^{(n)} = \omega_k^{(n)} / \sum_{n=1}^N \omega_k^{(n)}, \quad (8)$$

Для снижения вычислительной сложности ММК разработан ряд следующих рассматриваемых в докладе процедур: существенная выборка; последовательная существенная выборка; существенная переборка и метод аналитического интегрирования по части переменных. Отмечается возможность реализации ММК с использованием рекуррентных и нерекуррентных алгоритмов [4-6].

Заключение

В докладе проведён краткий обзор рекуррентных алгоритмов, основанных на ММК, и способов повышения их эффективности, направленных на обеспечения свойства состоятельности алгоритмов при решении задач оценивания и идентификации. Проанализированы возможности сокращения объема вычислений при реализации алгоритмов, в которых применяется нерекуррентная обработка измерений, и алгоритмов, предполагающих комбинированное применение рекуррентных и нерекуррентных схем обработки. Обсуждена возможность привлечения методов оптимизации на графах при реализации алгоритмов, основанных на ММК. Применение рассматриваемых алгоритмов иллюстрируется на методических примерах и примерах решения задач обработки навигационной информации в робототехнических системах.

1. **Степанов О.А.** Применение нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб ЦНИИ Электроприбор, 2003г.
2. **Thomas B. Sch"on et al.**, Sequential Monte Carlo methods for system identification. In Proceedings of the 17th IFAC Symposium on System Identification (SYSID), Beijing, China, October 2015.

3. **О. А. Степанов, В. А. Васильев, А. В. Моторин, А. Б. Торопов**
Анализ потенциальной точности идентификации параметров погрешностей навигационных датчиков и средств коррекции. // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2015. – Т. 1. – С. 189-193. – EDN UYUQCH.
4. **Stepanov O., Motorin A.** Performance criteria for the identification of inertial sensor error models. *Sensors*. 2019. Т. 19. № 9.
5. **Nicolas Chopin, Omiros Papaspiliopoulos.** An Introduction to Sequential Monte Carlo//Springer Nature, 2020, pp 378.
6. **Wills, A. G.** Sequential Monte Carlo: A Unified Review / A. G. Wills, T. B. Schön // *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. – 2023. – Vol. 6, No. 1. – P. 159-182.

О.А. Степанов, А.М. Исаев, В.А. Васильев

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАНИЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ О ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ *

*ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Университет ИТМО,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический универси-
тет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург,
soalax@mail.ru*

Введение

В последнее время широкое распространение получили робототехнические комплексы, навигационные системы (НС) которых корректируются по данным о геофизических полях (ГФП) [1, 2]. Для решения подобного рода задач коррекции отмечается существенно нелинейный характер решаемой задачи оценивания, а также необходимость накопления и обработки достаточно большого числа точечных измерений полей для получения навигационно-информативного массива данных, по которому можно проверить сложную гипотезу о вероятном местоположении объекта на основе разности показаний датчиков полей и значений, снятых с карты. Последняя особенность увеличивает время обсервации, что, в свою очередь, порождает необходимость учёта изменчивого характера погрешностей НС.

Рассматриваемая задача коррекции чаще всего формулируется в рамках байесовского подхода [1, 2]. В работе [3] для её решения

* Работа выполнена за счет гранта РФФИ № 23-19-00626, <https://rscf.ru/project/23-19-00626/>

предложено использовать рекуррентный итерационный сглаживающий пачечный линеаризованный фильтр (РИС-ПДФ), основанный на комбинированном применении рекуррентной и нерекуррентной схем. Однако его эффективность была продемонстрирована лишь на простейшем примере, когда погрешности НС за время проведения коррекции считались неизменными. Настоящий доклад посвящен вопросу анализа эффективности РИС-ПДФ в условиях, когда погрешности НС имеют изменчивый характер, а задача коррекции решается при комплексном использовании данных о нескольких полях [4]. Проверяется эффективность решения задачи коррекции с учетом комплексирования измерений нескольких полей по сравнению с решениями, получаемыми отдельно по каждому полю.

Постановка исследуемой задачи

Следуя [2] предположим, что на борту подвижного объекта имеются НС, вырабатывающая измерения его координат на плоскости $y_k^{HC} = [y_{1,k}^{HC} \quad y_{2,k}^{HC}]^T$ в k -е моменты времени, и датчики, обеспечивающие измерения m скалярных геофизических полей $y_k = [y_{1,k} \quad y_{2,k} \quad \dots \quad y_{m,k}]^T$, которые могут быть представлены в виде:

$$y_k^{HC} = x_k^K + \Delta y_k^{HC}, \quad (1)$$

$$y_k = \varphi(x_k^K) + \Delta y_k^\Sigma, \quad (2)$$

где $x_k^K = [x_{1,k}^K \quad x_{2,k}^K]^T$ – истинные координаты подвижного объекта; $\Delta y_k^{HC} = [\Delta y_{1,k}^{HC} \quad \Delta y_{2,k}^{HC}]^T$ – погрешности выработки координат места НС; $\varphi(x_k^K)$ – вектор-функция, определяющая зависимость измеряемых параметров от координат объекта и позволяющая с точностью до суммарных погрешностей карт и измерителей Δy_k^Σ вычислять значения полей в произвольной точке заданного района.

Трактуя показания НС как известный входной сигнал [2], задачу можно свести к оцениванию погрешности НС Δy_k^{HC} по измерениям

$$y_k = \varphi(y_k^{HC} - \Delta y_k^{HC}) + \Delta y_k^\Sigma = s_k(\Delta y_k^{NS}) + \Delta y_k^\Sigma. \quad (3)$$

Для ее решения требуется сформировать составной вектор x_k , включающий x_k^{HC} и x_k^Σ , ввести для них формирующие фильтры, описывающие поведение $\Delta y_k^{HC} = H_k^{HC} x_k^{HC}$ и $\Delta y_k^\Sigma = H_k^\Sigma x_k^\Sigma$, и записать измерения

$$(3) \text{ в виде } y_k = s_k \left(H_k^{HC} x_k^{HC} \right) + H_k^\Sigma x_k^\Sigma.$$

Для получения оптимальной в среднеквадратическом смысле оценки при решении такой нелинейной задачи может быть построен алгоритм, основанный на последовательном методе Монте-Карло (ММК). При этом его вычислительную сложность можно сократить выделив в векторе x_k подвектор x_k^{HC} и воспользовавшись процедурами аналитического интегрирования по части переменных [5].

Рекуррентный итерационный сглаживающий пачечный линейаризованный фильтр

РИС-ПЛФ относится к алгоритмам, основанным на линейаризации. На каждом k -м шаге в РИС-ПЛФ неоднократно (итерационно) осуществляется рекуррентная обработка пачки измерений $Y_k = (y_1^T, \dots, y_k^T)^T$, накопленных к текущему моменту времени. При этом на каждой итерации в алгоритме можно выделить два блока.

Первый блок - рекуррентное решение задачи фильтрации для всех моментов времени $i = 1, 2 \dots k$ с использованием процедур линейаризованного фильтра Калмана, точки линейаризации в котором фиксированы. После обработки пачки накопленных измерений Y_k , рассчитанные в первом блоке значения прогнозов для вектора-состояния, оценки и соответствующих им матрицы ковариаций запоминаются и используются далее в следующем блоке.

Второй блок – рекуррентное вычисление в обратном времени $i = k - 1, k - 2, \dots, 0$ оценок, соответствующих задаче сглаживания, которые используются далее при повторной обработке измерений в качестве точек линейаризации. Затем описанная процедура повторяется вновь.

Заключение

В докладе анализируется эффективность применения РИС-ПЛФ в задаче коррекции показаний НС при комплексном использовании данных о гравитационном поле и поле глубин. Согласно методике, описанной в [6], проведено сопоставление с алгоритмом, основанным на ММК и направленным на получение оптимальной в среднеквадратическом смысле оценки при длительном времени обсервации. Обсуждена возможность привлечения методов оптимизации на графах при построении алгоритмов.

1. **И.Н. Белоглазов, Г.И. Джанджгава Г.П. Чигин.** Основы навигации по геофизическим полям. Под редакцией А.А. Красовского, Наука, 1985г.

2. **О.А. Степанов, А.Б. Торопов** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 1. Обзор алгоритмов. Гирроскопия и навигация. 2015. № 3 (90). С. 102-125.
3. **А. М. Исаев, О. А. Степанов** Рекуррентный итерационный сглаживающий пачечный линеаризованный фильтр в задаче коррекции показаний навигационной системы по информации о геофизических полях. // Материалы XXXIV конференции памяти выдающегося конструктора гирроскопических приборов Н.Н. Острякова: Сборник докладов. Санкт-Петербург, 2024. С. 200-207.
4. **Степанов О.А., Носов А.С., Торопов А.Б.** Анализ эффективности уточнения координат подвижного объекта при одновременном использовании данных о нескольких геофизических полях. // Материалы XXXII конференции памяти выдающегося конструктора гирроскопических Н. Н. Острякова. Санкт-Петербург, 2020. С. 140-146.
5. **Nicolas Chopin, Omiros Papaspiliopoulos.** An Introduction to Sequential Monte Carlo//Springer Nature, 2020, pp 378.
6. **Степанов О.А., Исаев А.М.** Методика сравнительного анализа рекуррентных алгоритмов нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации на основе предсказательного моделирования. *Гирроскопия и навигация*. 2023. Т. 31. №3 (122). С. 48-65.

А.О. Степочкин, А.В. Становов

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПОМОЩИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОЙ МОДЕЛИ

*ФГБОУ ВО Тульский государственный университет, г. Тула,
s.a.o.1984@yandex.ru, stanovov28@gmail.com*

Важным этапом проектирования электромеханических мехатронных систем является выбор исполнительного устройства, удовлетворяющего комплексу заданных требований, среди которых можно выделить, прежде всего, энергетические и массогабаритные характеристики. В большинстве случаев задача разработчика состоит лишь в выборе марки электрической машины из располагаемого перечня, представленного в каталоге производителя. Однако специфика мехатронного подхода подразумевает, в том числе, глубокую степень интеграции компонентов мехатронной системы [1], вследствие чего возникает задача разработки нестандартных вариантов конструкции и оптимизации параметров

исполнительных устройств, необходимых для достижения заданных характеристик разрабатываемого комплекса.

Синхронные электрические двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) являются одним из наиболее перспективных типов исполнительных устройств мехатронных систем, вследствие чего особенную актуальность приобретают задачи оптимизации их конструктивных параметров, которые могут эффективно решаться при помощи методов на основе искусственного интеллекта. На сегодняшний день наиболее широкое практическое применение имеют три группы методов искусственного интеллекта: искусственные нейронные сети, нечеткая логика и генетические алгоритмы. Генетический алгоритм [2] относится к эволюционным алгоритмам и представляет собой эвристический алгоритм поиска для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искоемых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Рассмотрим вариант использования генетического алгоритма для оптимизации конструктивных параметров синхронного электрического двигателя обращенной конструкции с наружным расположением постоянных магнитов на роторе на основе его полевой модели. Полевая модель электрического двигателя – это математическая модель, которая описывает электромагнитные процессы в двигателе с учётом особенностей его конструкции и нелинейных характеристик [3].

Рассмотрим задачу минимизации объема СДПМ при заданной плотности тока в обмотках статора и требуемой величине развиваемого им электромагнитного момента. Процедура оптимизации осуществляется с использованием генетического алгоритма средствами программных пакетов MATLAB и FEMM. Средствами MATLAB выполняется основной объем вычислений генетического алгоритма, разработка полевой модели двигателя с заданными геометрическими размерами и обеспечивается обмен данными с FEMM. В пакете FEMM для полученной полевой модели с помощью МКЭ выполняется расчет картины магнитостатического поля и вычисление электромагнитного момента двигателя. Ввиду симметрии машины задача расчета трехмерной картины магнитного поля двигателя сводится к двумерной осесимметричной задаче магнитостатики [4].

В рамках работы был разработан комплекс программного обеспечения на базе пакетов FEMM и MATLAB, позволяющий осуществлять пошаговую реализацию генетического алгоритма с автоматизированным обменом данными между программами [5].

Для расчёта генетического алгоритма в работе используется, являющийся частью системы MATLAB, пакет Genetic Algorithm Tool. С помощью Genetic Algorithm Tool можно настраивать различные параметры генетических алгоритма, такие как популяция, масштабирование, операторы отбора, репродукции, мутации.

Выполним анализ работы алгоритма:

Блок 1 «Исходные данные». Исходные данные алгоритма формируются в MATLAB и представляют собой наборы из 9-ти конструктивных параметров, заданных для 200 двигателей.

Блок 2 «Формирование начальной популяции генов». Формирование начальной популяции генов реализовано в MATLAB и происходит на основе заданных наборов конструктивных параметров.

Блок 3 «Преобразование генов в параметры двигателя». Преобразование генов в параметры двигателя реализовано путем передачи из MATLAB в FEMM заданных наборов конструктивных параметров.

Блок 4 «Анализ двигателя и расчет целевой функции». На основе полученных значений параметров средствами MATLAB и FEMM осуществляется разработка серии полевых моделей двигателей и вычисление целевой функции, в качестве которой используется объем двигателя.

Блок 5 «Расчет функции относительной пригодности и оценка приспособленности». С помощью полученных полевых моделей осуществляется расчет функции относительной пригодности – величины развиваемого двигателями момента и выполняется сравнение объема двигателя с его со значением на предыдущем шаге алгоритма при достижении значения развиваемого электромагнитного момента близкого к заданному.

Блок 6. «Условие выполнено» В данном блоке осуществляется проверку условий завершения алгоритма по максимальному заданному количеству поколений и достижению заданного уровня приспособленности для случая, если значение объема двигателя на текущем шаге меньше чем на предыдущем.

Блок 7 «Селекция, скрещивание и мутация». В данном блоке средствами MATLAB осуществляются операции селекции, скрещивания и мутации для создания новой популяции – нового перечня значений конструктивных параметров электрической машины для случая, если заданное условие не выполнено.

Блок 8 «Формирование новой популяции». В данном блоке средствами MATLAB осуществляется формирование новой популяции – нового набора конструктивных параметров двигателя.

Итогом работы алгоритма является набор из 9-ти значений конструктивных параметров двигателя, обеспечивающих минимальную величину его объема. Условие завершения алгоритма в общем случае не является строго определенным и задается, как правило, с учетом ограничения максимального количества поколений.

Таким образом, средствами программного обеспечения разработанного для программных пакетов FEMM и MATLAB может быть выполнена реализация генетического алгоритма оптимизации конструктивных параметров синхронного электрического двигателя удовлетворяющих заданным требованиям по развиваемому электромагнитному моменту при условии обеспечения минимальных габаритных размеров машины.

1. **Герман-Галкин С. Г.**, Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech. Герман-Галкин С. Г., Карташов Б. А., Литвинов С. Н. М.: ДМК Пресс, 2021. 494 с.
2. **Дэн Саймон** Алгоритмы эволюционной оптимизации/ пер. с англ. А. В. Логунова. М.: ДМК Пресс, 2020. 1002 с.: ил.
3. **Байда, Е.И.** Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM: Учебно-методическое пособие / Е.И. Байда. – Харьков, 2015. – 147 с.
4. **Шевченко А.Ф.** Проектирование электрических машин с постоянными магнитами: учебное пособие / А. Ф. Шевченко, А. Г. Приступ, Ю. Г. Бухгольц [и др.]. Новосибирск: НГТУ, 2021. 152 с. ISBN 978-5-7782-4427-6. Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система.
5. **Степочкин, А.О.** Применение генетических алгоритмов в методиках разработки перспективных электромеханических мехатронных модулей. А.О. Степочкин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – Выпуск 12. С. 105-110. – Библиография С. 110.

В.Ю. Устенко, Б.В. Павленко

СРАВНЕНИЕ СТРАТЕГИЙ МОЗАИЧНОЙ АУГМЕНТАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ УГЛА КРЕНА БЕСПИЛОТНИКА ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ С КАМЕРЫ

*ФГБНУ «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк
ustenko.vova@yandex.ru, bogdanpavl2000@mail.ru*

Введение

Современные методы машинного обучения и компьютерного зрения предъявляют повышенные требования к подготовке обучающих выборок [1]. Одним из ключевых способов повышения качества моделей является расширение (аугментация) данных, что способствует лучшему обобщению и росту точности предсказаний [2].

Популярные библиотеки — такие как Albumentations, TorchAug и др. — предлагают широкий спектр готовых аугментаций, включая технику мозаичной (mosaic) аугментации, давно применяемую в задачах детектирования объектов [3].

Цель исследования — оценить эффективность разных вариантов мозаичной аугментации при классификации изображений в рамках библиотеки TorchAug, ориентируясь на задачу прогноза угла крена беспилотника.

Методы и подходы

В качестве тестовой площадки выбран проект, где требуется по снимку оценить угол крена дрона — это необходимо для последующих алгоритмов позиционирования аппарата. Расширение данных выполнялось «на лету»: нужные преобразования применялись в момент чтения очередного примера из датасета.

Используемые методы расширения данных

Метод `getitem` выборки:

1. по индексу `id` загружается изображение и метка;
2. картинка переводится в RGB-формат, масштабируется до нужного размера и преобразуется в тензор;
3. в режиме обучения с вероятностью 40 % применяется мозаика; иначе используется стандартная цепочка преобразований;
4. метка кодируется в one-hot-представление.

Для случайных преобразований был сформирован единый пул: `RandomColorJitter`, `RandomGaussianBlur`, `RandomEqualize`, `RandomGrayscale`, `RandomInvert`, `RandomPosterize`, `RandomSolarize`. Из него для каждой части изображения выбиралась комбинация аугментаций.

Экспериментальная часть

Эксперимент 1. Обучение 20 эпох (стартовое `acc1 = 27`). На каждой итерации четыре разных изображения проходили независимые аугментации и объединялись в мозаику 2×2 (рис. 1).

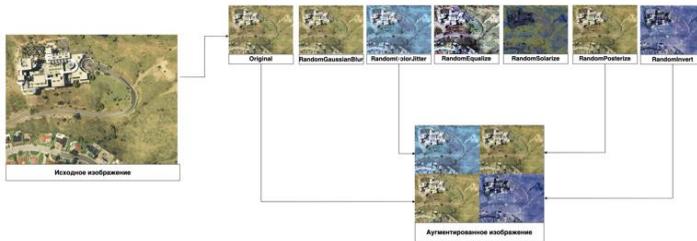


Рис. 1. Алгоритм применения мозаичной аугментации: 4 изображения обрабатываются и объединяются в 2×2 мозаику

Эксперимент 2. Также 20 эпох. Одно изображение делилось на четыре квадранта; каждая часть аугментировалась отдельно, после чего квадранты снова формировали исходное разрешение (рис. 2).

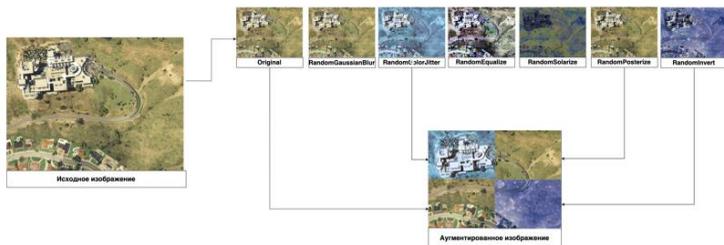


Рис. 2. Алгоритм обучения с мозаикой, из одного изображения, где каждая из его частей была аугментирована разными методами
 Эксперимент 3. Контроль: каждое изображение подвергалось одной случайной аугментации без мозаики.

Результаты экспериментов

Лидером оказался первый подход: мозаика из четырёх различных изображений дала $acc1 = 74,22$ на обучении и $76,52$ на валидации. Во втором варианте (части одного кадра) показатели составили $70,99 / 55,91$ соответственно. Базовый метод без мозаики довёл точность до $74,19$ на трейне, но лишь $50,79$ на валидации.

Выводы

Эксперименты показали, что составление мозаики из разных изображений заметно повышает способность модели обобщать знания и обеспечивает наилучшие результаты на невидимых данных (рис. 3). Следовательно, при задачах классификации угла наклона дрона целесообразно применять именно этот вариант аугментации.

1. **Пикалёв, Я. С.** О нейронных архитектурах извлечения признаков для задачи распознавания объектов на устройствах с ограниченной вычислительной мощностью [Текст] / Я. С. Пикалёв, Т. В. Ермоленко // Проблемы искусственного интеллекта. – 2023. – № 3(30). – С. 44-54 – ISSN 2413-7383. – DOI 10.34757/2413-7383.2023.30.3.004.
2. **Павленко, Б. В.** Интеллектуально-алгоритмический метод калибровки прицелов [Текст] / Б. В. Павленко, В. И. Бондаренко // Проблемы искусственного интеллекта. – 2024. – № 3 (34). – С. 55–63. – ISSN 2413-7383. – DOI 10.24412/2413-7383-2024-3-55-63.
3. Мозаичное расширение, реализованное в Pytorch // github [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/prymeka/mosaic-augmentation-pytorch> (дата обращения: 04.07.2025)

В.Ф. Филаретов¹, А.В. Зуев^{1,2}, А.А. Проценко², И.В. Горностаев^{2,3}

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ СИНТЕЗА САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ И МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ*

*¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
г. Владивосток,*

*²Институт проблем морских технологий имени академика М.Д. Агеева
ДВО РАН, г. Владивосток,*

*³Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
г. Владивосток*

Введение

В настоящее время широкое применение находят многостепенные манипуляторы (ММ) и мобильные роботы различного назначения. Для управления приводами таких роботов уже разработаны эффективные системы управления (СУ) [1], но применительно только к коллекторным электродвигателям постоянного тока, описываемым дифференциальными уравнениями третьего порядка. Для бесколлекторных двигателей постоянного тока (БДПТ), более эффективных из-за отсутствия щеточно-коллекторного узла [2], также создан метод синтеза СУ [3], но он требует использования их полных моделей, описываемых системами из пяти дифференциальных уравнений первого порядка [4], что приводит к необходимости мощных бортовых ЭВМ, поскольку приходится учитывать большую скорость изменения токов в каждой из трех фаз БДПТ. Это значительно затрудняет применение создаваемых СУ на практике, а также не позволяет учитывать влияние электронного регулятора скорости вращения (ЭРСВ) на динамику БДПТ.

В работе ставится задача разработки новой эквивалентной модели БДПТ, учитывающей динамику его ЭРСВ и описываемой системой из трех дифференциальных уравнений первого порядка, которая с учетом методов [1], может быть успешно использована для синтеза самонастраивающихся СУ БДПТ ММ, не требующих применения мощных бортовых ЭВМ.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-41-00044

Разработка эквивалентной математической модели БДПТ

Известная в настоящее время модель БДПТ [4] нелинейна и её использование для синтеза СУ с самонастройкой известными методами [1] затруднительно, так как многие её параметры зависят от быстро меняющегося угла поворота ротора θ_r . Но изменения этих параметров оказывают влияние на динамику БДПТ только при низких скоростях его вращения. Поэтому во всех типовых (номинальных) режимах работы БДПТ целесообразно использовать усреднённые значения этих коэффициентов, получая качественную эквивалентную модель, но пониженного порядка. Таким образом, для получения эквивалентной модели БДПТ были объединены первые три уравнения известной модели [4] относительно потребляемого тока $I(t)$ цепи питания ЭРСВ вместо фазных токов $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$, а переменные параметры, зависящие от угла θ_r , заменены на их средние значения за период 2π одного оборота.

Таким образом, эквивалентную математическую модель БДПТ можно представить в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{I}(t) = & \left(-\frac{R}{L} - \frac{k_5\omega^2(t) + k_6\omega(t)}{k_2\omega^2(t) + k_3\omega(t) + k_4} \right) I(t) - \frac{7\lambda}{3L(k_2\omega^2(t) + k_3\omega(t) + k_4)} \omega(t) + \\ & + \frac{k_1 k_u}{L(k_2\omega^2(t) + k_3\omega(t) + k_4)} U, \quad (1) \\ J\dot{\omega} = & \lambda(k_2\omega^2(t) + k_3\omega(t) + k_4)I(t) - k_v\omega(t) - T_L(t), \quad \dot{\theta}_r(t) = \frac{1}{p}\omega(t), \end{aligned}$$

где I – потребляемый ток цепи питания ЭРСВ; R и L – соответственно, активные сопротивления и индуктивности фазных обмоток; $\omega(t) = p\omega_r(t)$ – электрическая угловая скорость вращения ротора; p – число пар полюсов двигателя; $\omega_r(t)$ – угловая скорость вращения ротора; λ – потокосцепление двигателя; U и k_u – код управления и коэффициент усиления ЭРСВ; $T_L(t)$ – момент нагрузки, включающий момент сухого трения; J – суммарный момент инерции ротора и вращающихся частей редуктора; k_v – коэффициент вязкого трения; k_1, \dots, k_6 – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров ЭРСВ.

Полученная модель БДПТ (1) описывается только тремя дифференциальными уравнениями первого порядка, но она эквивалентна известной полной модели [4], учитывает при этом еще и влияние ЭРСВ на динамику двигателя, и не требует учета быстрого изменения угла поворота θ_r .

Для подтверждения адекватности полученной математической модели (1) было проведено её моделирование и сравнение с поведением реального БДПТ. Данные о работе реального БДПТ были получены с использованием электромеханического стенда содержащего БДПТ, ЭРСВ,

датчики скорости вращения и силы тока. Шаг дискретизации сигнала в модели принят равным $\Delta t = 10$ мс.

На рис. 1а показаны графики изменения угловой скорости вращения вала БДПТ, а на и 1б – значений тока $I(t)$, потребляемого от источника питания, при подаче на ЭРСВ, линейно нарастающего и гармонически изменяемого сигналов управления. Из этих графиков видно, что значения угловых скоростей и токов, полученных экспериментально (см. кривые 1 и 3 на рис. 1) и рассчитанных по модели (1) (см. кривые 2 и 4 на рис. 1), в среднем различаются не более чем на 2.5% (максимум на 5%). Таким образом, сравнения полученных результатов моделирования с результатами проведенных экспериментов полностью подтвердили правильность разработанной модели БДПТ (1).

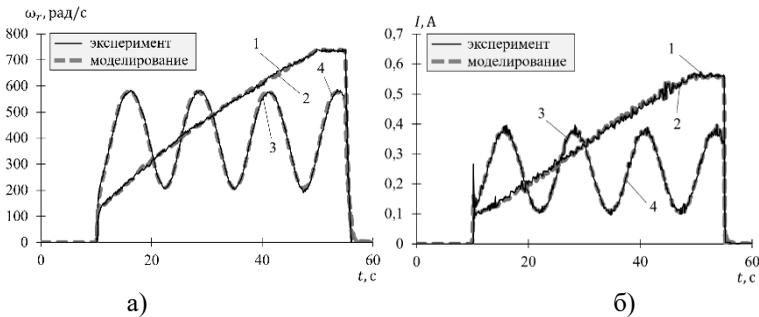


Рис. 1. Изменения угловой скорости $\omega_r(t)$ и потребляемого тока $I(t)$ при линейно нарастающем 1 и 2 и гармоническом 3 и 4 сигналах управления

Заключение

В докладе представлены результаты разработки математической модели БДПТ, описываемой системой из трех дифференциальных уравнений первого порядка, по виду аналогичной математическому описанию типовых коллекторных двигателей постоянного тока. Это дает возможность использовать полученную модель для синтеза высококачественных самонастраивающихся систем управления приводами ММ. Указанную модель удалось создать за счёт оценки усредненного значения суммарного тока питания двигателя. Преимуществом полученной модели над известными является меньшая необходимая частота дискретизации и учёт динамики ЭРСВ.

1. **Филаретов В. Ф.** Самонастраивающиеся системы управления

- приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000. 304 с.
2. **Гаврилов Р., Мустафаев Ю.** Управление синхронными машинами с постоянными магнитами: учебное пособие. Санкт-Петербург: БГТУ "Военмех" им. ДФ Устинова, 2019. 78 с.
 3. **Зуев А. В., Проценко А. А., Тимошенко А. А., Копылов Д. В.** Метод построения самонастраивающихся корректирующих устройств для электроприводов подводных манипуляторов, использующих бесколлекторные двигатели постоянного тока // Экстремальная робототехника. 2022. Т. 1. № 1. С. 277–285.
 4. **Bhugineni S., Rajagopal K. R.** PWM schemes for average line to line voltage based sensorless control of BLDC motor // 2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE). 2012. P. 1–6.

В.Ф. Филаретов¹, А.В. Зуев^{1,2}, А.А. Проценко², И.В. Горностаев^{2,3}

МЕТОД СИНТЕЗА САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА*

*¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
г. Владивосток*

*²Институт проблем морских технологий имени академика М.Д. Агеева
ДВО РАН, г. Владивосток*

*³Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
г. Владивосток*

Введение

В настоящее время в качестве исполнительных устройств в промышленной и подводной робототехнике всё более широкое применение находят бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ), которые в отличие от коллекторных двигателей более эффективны и надежны из-за отсутствия щеточно-коллекторного узла. Для обеспечения высокой точности работы исполнительных устройств в их системы управления (СУ) включают специальные самонастраивающиеся корректирующие устройства (СКУ) [1, 2], позволяющие за счет подстройки управляющих сигналов стабилизировать динамические свойства БДПТ и компенсировать негативные воздействия внешних нагрузочных моментов. В работе

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-41-00044

[2] предложен метод синтеза СКУ для БДПТ подводных манипуляторов, однако при его разработке использовалась сложная математическая модель БДПТ, описываемая системой из пяти дифференциальных уравнений (ДУ) первого порядка [3]. При этом для корректной работы СКУ необходимо учитывать высокую скорость изменения токов в каждой из трех фаз БДПТ, что требует использования мощных бортовых ЭВМ. Для устранения недостатков подхода [2], можно применить метод, предложенный в работе [1], но в качестве математической модели БДПТ использовать эквивалентную модель [4], позволяющую существенно упростить реализацию СКУ. Таким образом, в работе ставится задача разработки метода синтеза СКУ для БДПТ, позволяющих стабилизировать динамические свойства этих двигателей на заданном номинальном уровне с учетом текущих моментов нагрузки.

Метод синтеза СКУ для БДПТ

Разработка метода синтеза СКУ будет осуществляться с использованием математической модели БДПТ, описанной в работе [4]. Эта модель, в отличие от известных [3], описывается только тремя ДУ первого порядка, но при этом полностью эквивалентна им, учитывает влияние электронного регулятора скорости вращения (ЭРСВ) вала на динамику двигателя и не требует учета быстрого изменения угла поворота выходного вала.

Для разработки нового метода синтеза СКУ был использован известный подход [1], ранее применяемого для синтеза качественных СУ, коллекторных двигателей. При этом желаемые динамические свойства БДПТ могут быть заданы с помощью линейного ДУ с постоянными параметрами:

$$\dot{\omega}(t) = \alpha_1 \omega(t) + \alpha_2 \bar{U}(t), \quad (1)$$

где $\bar{U}(t)$ – сигнал управления, формируемый на входе СКУ; $\omega(t) = p\omega_r(t)$ – электрическая угловая скорость вращения ротора; $\omega_r(t)$ – угловая скорость вращения ротора; p – число пар полюсов двигателя; α_1 и α_2 – постоянные параметры, задающие желаемые динамические свойства БДПТ.

Для придания БДПТ нужных динамических свойств необходимо подобрать такой закон управления $U(t)$, который при подстановке в модель БДПТ [3] превращает её в уравнение (1). Такой закон управления, полученный с помощью подхода [1] имеет вид:

$$U(t) = \frac{I(Rb+Lc)}{\lambda k_1 k_u b} \times \left[\left(\frac{7}{3J} \frac{\lambda^2 b}{Rb+Lc} + \frac{k_v}{J} + \alpha_1 \right) \omega(t) + \frac{T_L(t)}{J} + \alpha_2 \bar{U}(t) \right], \quad (2)$$

где $U(t)$ – сигнал управления, поступающий на вход ЭРСВ; $T_L(t)$ – момент нагрузки, приведенный к выходному валу БДПТ, включающий момент сухого трения; R и L – активные сопротивления и индуктивности фазных обмоток; J – суммарный момент инерции ротора и вращающихся частей редуктора; k_v – коэффициент вязкого трения; λ – потокосцепление двигателя; k_u – коэффициент усиления ЭРСВ, зависящий от напряжения его питания; b и c – переменные параметры, равные, соответственно, $k_2\omega^2(t) + k_3\omega(t) + k_4$ и $k_5\omega^2(t) + k_6\omega(t)$; k_1, \dots, k_6 – коэффициенты, зависящие от параметров БДПТ.

Результаты экспериментов

Для проверки эффективности СКУ (2) были проведены математическое моделирование и эксперименты с использованием электромеханического стенда содержащего БДПТ, ЭРСВ, датчики скорости вращения и силы тока. Шаг дискретизации работы стенда и модели принят равным $\Delta t = 10$ мс. На рис. 1а и 1б показаны скорости $\omega_r(t)$ вращения БДПТ, при последовательной подаче на его вход линейно нарастающего (рис. 1а) и гармонического (рис. 1б) сигналов. Цифрой 1 обозначена желаемая скорость, цифрой 2 – скорость вращения без синтезированного СКУ; а цифрой 3 – с СКУ (2). Из представленных графиков видно, что при использовании СКУ (2) отклонение скорости $\omega_r(t)$ от желаемой находится в диапазоне 1.5–3%, что вполне достаточно для качественного управления БДПТ. Таким образом, результаты моделирования и проведенных экспериментов подтвердили работоспособность и высокую эффективность созданного СКУ.

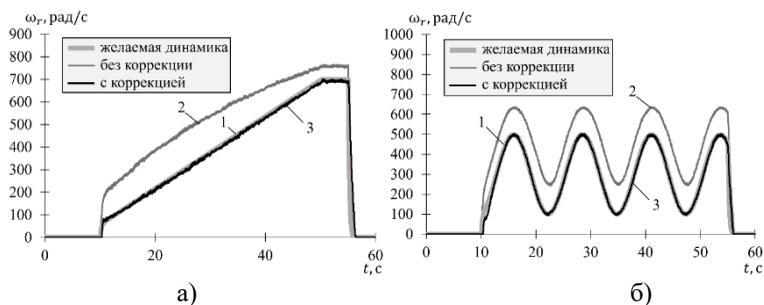


Рис. 1 Изменения скоростей $\omega_r(t)$ БДПТ при различных входных сигналах

Выводы

В работе представлены результаты разработки метода синтеза СКУ, позволяющих за счет коррекции управляющих сигналов стабилизировать динамические свойства БДПТ на заданном номинальном уровне, одновременно компенсируя влияние на качество управления внешнего нагрузочного момента. Синтезированные СКУ могут быть легко реализованы даже на маломощных бортовых ЭВМ мехатронных систем. Результаты проведенного моделирования и натуральных экспериментов полностью подтвердили эффективность синтезируемых систем.

1. **Филаретов В. Ф.** Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000. 304 с.
2. **Зуев А. В., Проценко А. А., Тимошенко А. А., Копылов Д. В.** Метод построения самонастраивающихся корректирующих устройств для электроприводов подводных манипуляторов, использующих бесколлекторные двигатели постоянного тока // Экстремальная робототехника. 2022. Т. 1. № 1. С. 277–285.
3. **Вельченко А.А., Павлюковец С.А., Радкевич А.А.** Математическая модель бесколлекторного двигателя постоянного тока на основе уравнения напряжения трёхфазной обмотки // Системный анализ и прикладная информатика. 2024. № 1. С. 19–25.
4. **Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Проценко А.А., Горностаев И.В.** Разработка математической модели бесколлекторного двигателя постоянного тока для синтеза самонастраивающихся систем управления манипуляционными и мобильными роботами // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2025.

*В.Ф. Филаретов¹, Д.А. Юхимец¹, А.В. Зуев^{1,2},
А.А. Тимошенко², И.В. Горностаев^{1,2,3}*

МЕТОД СИНТЕЗА РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ВЫСОКОТОЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ И СТА- БИЛИЗАЦИЮ АВТОНОМНЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ ПОД- ВОДНЫХ РОБОТОВ*

¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,

г. Владивосток,

*²Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева
ДВО РАН, г. Владивосток,*

*³Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
г. Владивосток*

timoshenko.aal@mail.ru

Введение

В настоящее время перспективным направлением развития подводной робототехники является создание автономных манипуляционных подводных роботов (АМПР), которые предназначены для автоматического выполнения различных подводных технологических операций в режиме зависания над объектами работ в условиях заранее неизвестной и непрерывно изменяющейся подводной обстановки.

Для автоматического выполнения манипуляционных операций необходимо обеспечить точный подход АМПР к объекту работ и его стабилизацию в исходной точке в пространстве над этим объектом. Существующие системы управления подводными роботами [1, 2] позволяют обеспечить это только тогда, когда точно известны все параметры динамической модели АМПР и его движительно-рулевого комплекса (ДРК).

В настоящей работе предлагается новый метод построения робастных систем управления (СУ) АМПР, которые позволяют обеспечивать точное движение подводных роботов по заданным пространственным траекториям, а также их стабилизацию в точке над этими объектами работ, даже если параметры динамических моделей АМПР и их ДРК определены недостаточно точно.

Описание метода синтеза

Синтез предлагаемой СУ производится на основе полной шести степенной модели движения АМПР, которая описывается следующей системой уравнений [3]:

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00218

$$\begin{aligned} M\dot{v} + (C + D)v + g &= \tau + F_{\text{вн}}, \\ \dot{\eta} &= Jv, \end{aligned} \quad (1)$$

где M – тензор инерции АМПР; C – матрица кориолисовых и центробежных сил; D – матрица гидродинамических сил и моментов; g – вектор гидростатических сил и моментов; $F_{\text{вн}}$ – вектор проекций сил и моментов, действующих на АМПР со стороны движущегося манипулятора, полученный после решения обратной задачи динамики [4]; v – вектор проекций линейной и угловой скоростей движения АМПР на оси ССК; τ – вектор проекций тяг и моментов движителей АМПР на оси ССК; J – матрица перехода из ССК в АСК; η – вектор положения и ориентации АМПР в АСК.

Для управления АМПР в работе предлагается использовать комбинированную робастную СУ, состоящую из нелинейного регулятора положения и регулятора с переменной структурой. Главная задача СУ — это обеспечить заданные динамические свойства АМПР в АСК, в условиях, когда параметры АМПР заранее точно не известны и могут меняться в процессе выполнения АМПР миссий. Уравнение, которое будет описывать желаемую динамическую модель движения АМПР в АСК, имеет следующий вид:

$$\ddot{\eta} + \Lambda \dot{\eta} + \delta \eta = \Lambda \dot{\eta}_d + \delta \eta_d, \quad (2)$$

где η_d – вектор желаемого положения и ориентации АМПР в АСК; Λ , δ – диагональные матрицы положительных коэффициентов.

Для синтеза алгоритма управления, приводящего систему (1) к виду (2), представим систему (1) как:

$$M \left(J^{-1} \ddot{\eta} - J^{-1} \dot{J} J^{-1} \dot{\eta} \right) + (C + D) J^{-1} \dot{\eta} + g - F_{\text{вн}} = \tau. \quad (3)$$

Параметры модели (1) можно представить в следующем виде: $M = M_n + M_\Delta$, $C = C_n + C_\Delta$, $D = D_n + D_\Delta$, $F_{\text{вн}} = F_n + F_\Delta$, где M_n , C_n , D_n , F_n – известные части соответствующих параметров АМПР; M_Δ , C_Δ , D_Δ , F_Δ – неизвестные части соответствующих параметров АМПР.

Желаемый сигнал управления будет иметь вид $\tau_d = \tau_n + \tau_s$, где τ_n – часть управления, формируемая на основе известной части параметров АМПР; τ_s – часть управления, компенсирующая влияние неизвестной части параметров АМПР.

Сигнал τ_n формируется на основе модели (3) с номинальными параметрами и описания желаемой динамики АМПР (2) в следующем виде:

$$\tau_n = M_n J^{-1} (\Lambda \dot{e}_\eta + \delta e_\eta) + (C_n + D_n) v + g - F_n - M_n J \dot{J} v. \quad (4)$$

где $e_\eta = \eta_d - \eta$, $\dot{e}_\eta = \dot{\eta}_d - \dot{\eta}$.

Для компенсации отклонения реальных параметров от номинальных формируется сигнал управления τ_s :

$$\tau = J^{-1} K_s \text{sign}(s), \quad s = \Lambda \dot{e}_\eta + \delta e_\eta. \quad (5)$$

где K_s – диагональная матрица положительных коэффициентов.

Эффективность работы синтезированной системы была проверена с помощью математического моделирования в среде MATLAB/Simulink. В ходе моделирования исследовались переходные процессы АМПР по отдельным каналам управления при отклонении параметров его динамической модели на $\pm 20\%$ от номинальных значений. В результате моделирования было выявлено, что при использовании описанной СУ наличие достаточно больших отклонений параметров не приводит к изменению переходных процессов, что говорит о высокой робастности описанных СУ.

Заключение

Таким образом, в работе был предложен метод построения робастных СУ пространственным движением и стабилизации АМПР, которые позволяют обеспечивать им желаемые динамические свойства в условиях неопределенности их параметров, а также наличия неизвестных внешних воздействий, в том числе со стороны движущихся в вязкой среде манипуляторов.

1. **Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю.** Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. №. 7. С. 29-34.
2. **Hammad M.M., Elshenawy A.K., El Singaby M.I.** Position control and stabilization of fully actuated AUV using PID controller // Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys) 2016: Volume 2: Springer International Publishing, 2018. С. 517-536.
3. **Fossen T.I.** Guidance and control of oceanic vehicles. – John Willei and Sons, 1994. – 494 p.
4. **Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Тимошенко А.А.** Идентификация параметров взаимодействия звеньев подводных манипуляторов с вязкой средой для точного автоматического выполнения манипуляционных операций. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2025. Т. 26, № 2. С. 98-108.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*ФГБОУ ВО Тульский государственный университет, г. Тула,
fd1907220@mail.ru*

В настоящее время проблема синтеза оптимального программного управления для сложных нелинейных динамических объектов является одной из востребованных задач теории автоматического управления. Эту проблему решил Л.С. Понтрягин, доказав свою теорему о принципе максимума. Однако, такой подход позволяет находить оптимальное управление аналитическим методом. При работе с системами высокого порядка это вызывает трудности в связи с трудоемкостью вычислений. Возможным решением данной проблемы может быть интеграция численных итерационных методов в алгоритм, предложенный Л.С. Понтрягиным. Использовать метод последовательных приближений предложили Ф.Л. Черноусько и И.А. Крылов. Данный подход предполагает наличие полной верифицированной математической модели объекта управления, которую не всегда возможно получить. Необходимо комплексное решение, которое будет включать в себя использование численных методов и возможность работы с объектом типа «серый ящик»

Проанализировав существующие современные подходы к решению данной задачи, можно выделить несколько основных направлений развития. Первый метод предполагает идентифицировать объект управления с помощью алгоритмов машинного обучения, выявить оптимальную структуру нейронной сети и определить ее параметры [1-3]. Еще одним подходом к решению данной задачи является создание универсального решения для класса объектов. Так называемая AI Pontyagin [4-5] позволяет находить квазиоптимальное управление объектом. Данная нейронная сеть обучается на дифференциальных уравнениях системы, характеризующих ее динамику. Однако, вышеописанные подходы имеют недостатки. Обучение представленных нейронных сетей требовательно к вычислительным ресурсам и времени, первый подход лишь реализует идентификацию объекта, а второй предполагает наличие точного верифицированного математического описания системы для вычисления квазиоптимального управления.

В настоящей работе авторами предлагается использование искусственных нейронных сетей для синтеза нейроимитатора, точно повторяющего динамику объекта. Ставится задача синтеза квазиоптимального

управления в условиях неполной информации и ограничений, наложенных на время и входное воздействие. Известно, что объект содержит нелинейность типа насыщение, однако его математическое описание достоверно неизвестно. Критерием оптимальности является максимизация выходной величины. Для решения поставленной задачи предлагается использование численного метода отыскания квазиоптимального управления Черноусько-Крылова и ADAM, модифицированного авторами. В качестве объекта управления возьмем вертикальный канал летательного аппарата, а в качестве критерия оптимизации – уменьшение колебательности переходного процесса при достижении линии визирования.

Первым этапом является определение структуры нейромимитатора. Необходимо включить в нейронную сеть два звена, описывающие рулевой привод и аэродинамическую схему. Вторым шагом является сбор обучающих данных. Для этого на объект управления подаются типовые сигналы, такие как ступенчатые функции различной амплитуды, линейно нарастающие функции с разными коэффициентами нарастания и гармонические сигналы различных амплитуд и частот. После обучения нейронная сеть включается в алгоритм оптимизации вместо дифференциальных уравнений, описывающих динамику системы, что позволяет найти оптимальное управление объектом типа «серый ящик».

Рассмотрим результат работы алгоритма и сравним переходный процесс модели при реакции на синтезированное управление с переходным процессом второй модели с диффильтром.

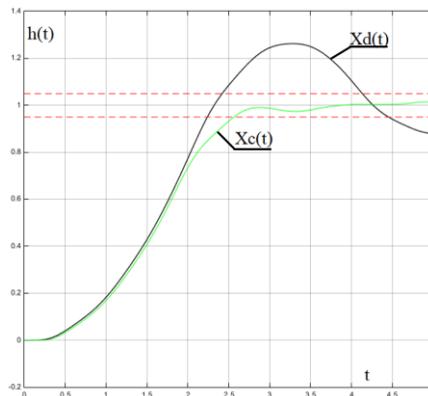


Рис. 1. Сравнение траекторий

На рис.1 $X_c(t)$ – высота ЛА при его реакции на синтезированное управление, $X_d(t)$ – переходный процесс скорректированной системы.

Рис.1 иллюстрирует, что с помощью модифицированного алгоритма ADAM получилось отыскать такое квазиоптимальное управление для заданного объекта, что переходный процесс, по сравнению с контуром, имеющим в своем составе диффильтр, не только имеет аperiodический вид, но и оказался быстрее. Таким образом можно сделать вывод. Предложенный модифицированный метод ADAM позволяет не только найти квазиоптимальное управление по заданному критерию, но и улучшить характеристики переходного процесса в сравнении с классическим методом корректирования системы – диффильтром. Стоит отметить, что при синтезе управления, близкого к оптимальному, использовался нейромимитатор системы, повторяющий его динамику. Это дало возможность не находить точную адекватную модель системы.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ численных методов оптимизации, выявлены наиболее подходящие для поставленных задач. Приведен пример, иллюстрирующий работу алгоритмов с нелинейными системами.

1. **A. Diveev and S. Konstantinov**, "Applying Neural Networks for the Identification of Control Object Mathematical Models for the Control Problems," 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Istanbul, Turkey, 2022, pp. 1059-1063, doi: 10.1109/CoDIT55151.2022.9803986.
2. **J. K. P. Tsoi, N. D. Patel and A. K. Swain**, "Grey-Box Neural Network System Identification with Transfer Learning on Ball and Beam System," 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Rio de Janeiro, Brazil, 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/IJCNN.2018.8489103.
3. **H. Xu and S. Jagannathan**, "Neural Network-Based Finite Horizon Stochastic Optimal Control Design for Nonlinear Networked Control Systems," in IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 26, no. 3, pp. 472-485, March 2015, doi: 10.1109/TNNLS.2014.2315622.
4. **Yuanyuan S., Baisen Z.** Optimal Control Via Neural Networks: A Convex Approach // ICLR Conference. — 2019
5. **Крылов, И. А.** Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления / И. А. Крылов, Ф. Л. Черноусько // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1972. – Т. 12, № 1. – С. 14-34.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ НАБОРА ОРИЕНТИРОВ К ИЗМЕНЕНИЯМ ПОЛОЖЕНИЯ И ОРИЕНТАЦИИ КАМЕРЫ *

*Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский
институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК),
г. Санкт-Петербург,
i.fomin@rtc.ru, a.korsakov@rtc.ru*

Введение

Проблема навигации беспилотного аппарата в условиях, когда отсутствуют данные о геолокации, и известны только позиции некоторых видимых ориентиров по-прежнему актуальна. Подобные задачи можно отнести к классу проблем интерпретирующей навигации на местности, и им посвящено достаточно большое количество работ, например, [1], [2]. Важной задачей при этом является построение алгоритма устойчивого распознавания заданной системы ориентиров. Это позволит осуществлять привязку на местности по известным группам ориентиров и формировать маршрут путем перехода от одной группы к другой.

В данной работе предполагается рассмотреть подход к распознаванию системы ориентиров с использованием сегментного спайкового нейрона со структурной адаптацией [3].

Набор данных, параметры эксперимента и метрики

Для исследования устойчивости была выбрана задача распознавания набора ориентиров при виде сверху и разных искажениях: движение вверх-вниз (масштаб), вращение камеры относительно вертикальной оси без изменения высоты (ориентация), наклон камеры и случайное перемещение. В качестве ориентиров в эксперименте использовался набор ArUco-меток [4], соответствующих цифрам от 1 до 9, для обнаружения применялись стандартные алгоритмы библиотеки OpenCV.

Создано несколько записей каждого типа. Обозначим записи как R_{ij} , где i – номер записи, j – тип искажения (масштаб – S, вращение – R,

* Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России «Исследование методов анализа слабоструктурированных данных, обработки знаний и создания когнитивных агентов на базе комбинированных глубоких нейронных сетей» (FNRG-2025-0008 1024050200009-5-1.2.1;2.2.2)

наклоны вверх-вниз и влево-вправо – LR и UD, наклон камеры – SW, случайное перемещение – RD). Количество кадров в каждой записи приведено в таблице 1.

Спайковый нейрон имеет несколько входов, на каждый из которых подается один импульс. Временная задержка импульса кодирует информацию. Структурное обучение нейрона заключается в изменении параметров нейрона (длин дендритов и числа синапсов) так, чтобы все импульсы пришли на тело нейрона одновременно со специальным импульсом с максимальной задержкой и имели при этом одинаковую амплитуду сигнала. Если последовательность при тестировании слабо отличается от использовавшейся при обучении, происходит срабатывание. При большом отличии задержек импульсов по разным каналам срабатывания не происходит. Устойчивость к искажениям регулируется порогом срабатывания.

При подаче на нейрон каждому маркеру был сопоставлен один дендрит, плюс один синхронизирующий. Задержка кодировалась в зависимости от подхода. В отсутствие маркера выставлялась максимальная задержка.

Рассматривалось два варианта кодирования на основе дистанции до ориентиров. В первом варианте задержка импульса соответствует расстоянию от центральной точки кадра до видимого ориентира. Во втором варианте рассчитывался геометрический центр всех видимых ориентиров, а задержка пропорциональна расстоянию от этого центра до каждого из ориентиров. Обозначим их как E_1 и E_2 . В обоих случаях кодирование инвертировано так, чтобы большая длина дендрита соответствовала большому расстоянию.

Эксперименты

При обучении и тестировании был выбран подход, при котором из последовательности кадров последовательно выбирался каждый 4-й, и использовался в качестве обучающего, затем выполнялось сопоставление всех кадров последовательности с обучающим. Оценка инвариантности к искажениям для отдельного кадра рассчитывается как отношение числа кадров, на которые нейрон реагирует, к общему числу кадров, чем больше, тем лучше. Показана доля нейронов, для которых получено больше 20%, 50% и 80% откликов. Отличия можно заметить только во втором способе кодирования, а также для сложных последовательностей. Результаты оценки приведены в таблице 1.

Предложенный подход кодирования по положению относительно центра кадра обладает высокой устойчивостью к искажениям масштаба,

средней устойчивостью к изменению положения, и низкой устойчивостью к искажениям вращения. Кодирование относительно центра маркерной системы показало крайне высокую устойчивость ко всем видам искажений, но существенно зависит от наличия обнаружения всех маркеров.

Таблица 1

Оценка инвариантности к искажениям

E ₁	R _{3S}	R _{1R}	R _{1LR}	R _{1UD}	R _{1SW}	R _{1RD}
>20%	0.35	0.23	0.17	0.24	0.73	0.05
>50%	0.22	0.18	0.11	0.19	0.66	0.03
>80%	0.19	0.12	0.09	0.12	0.52	0.01
E ₂	R _{3S}	R _{1R}	R _{1LR}	R _{1UD}	R _{1SW}	R _{1RD}
>20%	0,95	0,97	0,91	1,00	1,00	0,98
>50%	0,95	0,95	0,88	0,99	0,99	0,97
>80%	0,93	0,95	0,87	0,99	0,98	0,96

Заключение

Предложен подход к распознаванию заданного набора ориентиров по видеокамере с помощью нейрона сегментной импульсной модели. Рассмотрено два варианта кодирования. Показана высокая устойчивость ко всем видам искажений для варианта кодирования на основе дистанции от центра маркерной системы.

В дальнейшем предполагается исследовать возможности по настройке параметров нейрона для повышения толерантности к отклонениям импульсов от обучающих положений. Кроме того, будут проведены эксперименты по повышению устойчивости к отсутствию нескольких маркеров.

1. **Давыдов О. И., Платонов А. К.** Организация и структура комплексной карты операционной среды сервисного робота // Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН. – 2015. – №. 0. – С. 72-28.
2. **Кирильченко А. А., Платонов А. К., Соколов С. М.** Теоретические аспекты организации интерпретирующей навигации мобильного робота //Препринт Ин-та прикл. матем. им. МВ Келдыша РАН. – 2002. – №. 5. – С. 40.
3. **Корсаков А. М., Астапова Л. А., Бахшиев А. В.** Применение сегментной спайковой модели нейрона со структурной адаптацией для решения задач классификации //Информатика и автоматизация. – 2022. Т. 21. Вып. 3. – С. 493-520.
4. **Garrido-Jurado S. et al.** Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion //Pattern Recognition. – 2014. – Т. 47. – №. 6. – С. 2280-2292.

Е.Ю. Шмалько, И.В. Прокопьев, А.И. Дивеев

МЕТОД НЕЙРОСЕТЕВОГО ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО СИНТЕЗА МОДЕЛИ В НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИИ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

*Федеральный Исследовательский Центр «Информатика и Управление»
Российской Академии Наук, г. Москва,
e.shmalko@gmail.ru, fvi2014@list.ru*

Введение

Качество математической модели, используемой при расчетах оптимального управления мобильным роботом, безусловно влияет на расчет закона управления. При этом реализация получаемого управления на реальном объекте зависит и от точности работы сопутствующих систем локализации и навигации. Автономная навигация является одной из ключевых задач при реализации систем управления реальными автономными мобильными роботами. Основным источником информации о местоположении робота является его сенсорная система и средства глобальной навигации. Однако, у любой сенсорной системы есть слабые места, а средства глобальной навигации могут оказаться недоступными. В связи с этим возникает необходимость поддержки навигационной системы дополнительным образом, не зависящим от показаний датчиков. В нашей работе мы применяем подход на основе нейросетевого идентификационного синтеза для получения динамической модели робота для решения как задачи оптимального управления, так и использования на борту полученной нейросетевой модели реального робота для определения положения мобильного робота в автономном режиме. В условиях современных вычислительных мощностей получение такой модели значительно проще, чем аналитическое ее выведение. При этом в модели учитываются различные динамические свойства модели, которые трудно учесть вручную. Использование нейронной сети в качестве динамической модели для расчета управляющего воздействия позволяет учесть различные иногда трудно формализуемые факторы, влияющие на поведение объекта в реальной среде.

Постановка задачи

Обученная нейронная сеть представляет собой аппроксимацию математической модели объекта управления в виде системы конечно-разностных рекуррентных уравнений

$$\mathbf{x}^i(t_{i+1}) = \mathbf{x}^i(t_i) + \Delta t \mathbf{f}_{NN}(\mathbf{x}^j(t_i), \mathbf{u}^j(t_i), t_i). \quad (1)$$

Целевым функционалом оптимизации процесса машинного обучения искусственной нейронной сети является

$$J_0 = \sum_{j=1}^K \sum_{i=0}^{D_j-1} \|\mathbf{x}^j(t_{i+1}) - \mathbf{z}(t_i)\| \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $\mathbf{z}(t_i)$ - выходной вектор искусственной нейронной сети

$$\mathbf{z}(t_i) = \mathbf{f}_{NN}(\mathbf{y}(t_i)), \quad i = 0, \dots, D_i - 1, j \in \{1; K\}, \quad (3)$$

$\mathbf{f}_{NN}(\mathbf{y}(t_i))$ — функция, описываемая искусственной нейронной сетью.

Метод решения

Применение нейронных сетей основано на обучении на больших объемах данных, однако сбор данных, особенно с реального объекта, является сильно трудоемким процессом, поэтому таких данных, как правило, не много. В этой связи на этапе получения модели объекта управления предлагается использовать смешанный нейросетевой идентификационный синтез, основанный на использовании известных простых моделей объектов и идентификации неучтенных динамических свойств объекта с помощью нейронной сети на основе обучающей выборки. Такой подход на основе комбинации известной математической модели и дополнительной идентифицированной нейросетевой модели, с одной стороны, позволит использовать преимущества накопленного физико-математического аппарата, а также позволит уменьшить требуемый объем обучающих данных, при этом повысить его эффективность и точность получаемой модели за счет использования современных средств машинного обучения.

Были проведены численные эксперименты и натурные испытания, где робот автономно и точно справляется с задачей реализации расчетного оптимального управления в разомкнутом контуре по полученной нейросетевой модели в условиях автономного движения.

1. **Shmalko, E., Prokopiev, I., Diveev, A., Yamshanov, K. (2025).** Improving Feasibility of Optimal Control via Obtaining High-Precision Model. In: Sergeyev, Y.D., Kvasov, D.E., Astorino, A. (eds) Numerical Computations: Theory and Algorithms. NUMTA 2023. Lecture Notes in Computer Science, vol 14476. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81241-5_33.
2. **Шмалько Е.Ю., Прокопьев И.В., Дивеев А.И.** Поддержка средств автономной навигации мобильного робота с помощью внутренней

А.П. Юрманов, А.Ю. Коноплин, Р.П. Василенко

МЕТОД ГИБРИДНОГО УПРАВЛЕНИЯ АНПА, ОСНАЩЕННЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ КАНАЛАМИ СВЯЗИ*

*Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
г. Владивосток, yurmanov_a@mail.ru*

Введение

Разработка автономных подводных аппаратов (АНПА) с многозвенными манипуляторами (ММ) - перспективное направление в подводной робототехнике [1-3]. Такие аппараты не требуют судов сопровождения и большого экипажа, не ограничены кабелем и могут автономно преодолевать десятки километров для поиска объектов. Это делает их эффективным средством проведения различных манипуляционных работ. Несмотря на значительный задел в данной области, широкое применение АНПА с ММ для выполнения технологических операций в глубинах Мирового океана требует решения ряда научных и технических проблем.

Современные системы автоматического выполнения подводных операций [2] не позволяют полноценно решать сложные задачи из-за неопределённости при работе с деформированными или заиленными объектами. В таких условиях операторам приходится постоянно контролировать процесс и формировать целеуказания, это требует наличия высокоскоростного канала гидроакустической связи, что является недостижимым в водной среде как сейчас, так и в обозримом будущем. Для преодоления этих ограничений необходимы новые методы гибридного управления АНПА с ММ, сочетающие контроль со стороны оператора с использованием гидроакустического канала для ключевых решений и автономное выполнение этапов, где операторский контроль невозможен из-за ограниченной скорости передачи данных.

Для решения обозначенной проблемы в докладе представлена разработка, программная реализация и испытания метода гибридного управления АНПА, оснащёнными ММ и гидроакустическими каналами связи, который позволит эти аппаратам эффективно выполнять ответственные манипуляционные операции.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038

Описание метода

Предлагаемое гибридное управление, сочетает в себе автономное выполнение операций с контролем оператора на критических и ответственных этапах. При этом АНПА на основе данных, полученных от бортовых систем технического зрения (СТЗ), автономно выполняет стандартные задачи, такие как: первоначальная идентификация заранее известного объекта, сближение с ним, а также построение траектории движения ММ по его поверхности. Но в связи с тем, что подводные объекты сильно подвержены деформациям, существующие алгоритмы идентификации не способны безошибочно определить целевой объект и, как следствие, правильно сформировать траекторию движения по его поверхности. Поэтому такие ответственные этапы должны контролироваться оператором на основе данных, полученных с использованием гидроакустической системы навигации и связи (ГАСНС). Особенностью разработанного метода является подход к формированию данных для передачи, при котором оператор сначала получает обобщенную карту дефектов и отклонений с количественными характеристиками (рис. 1а,б). При необходимости более детального изучения конкретных участков оператор запрашивает дополнительную информацию, которая передается в виде адаптивно формируемых наборов примитивных геометрических форм (рис. 1в), параметры которых динамически подстраиваются под текущую пропускную способность канала связи. Это позволяет оператору принимать решения о продолжении операции, повторном сканировании объекта, корректировке траектории или прекращении выполнения работ. Важно отметить, что в контексте данного метода термин «дефекты» включает не только реальные повреждения объекта, но и специально исключенные из модели характерные элементы, что позволяет оператору получить информацию о конкретной области.

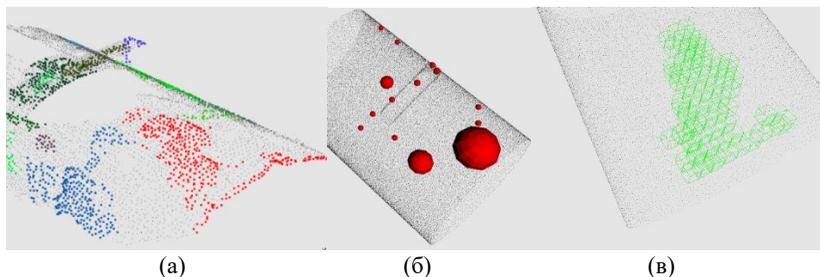


Рис. 1. Идентификация «дефектов» на объекте работ (а), карта дефектов (б), дефект, описанный примитивными формами (в)

После получения команды от оператора АНПА начинает обрабатывать заданную траекторию ММ [3]. Однако из-за значительных задержек в передаче данных оператор не может контролировать этот процесс в реальном времени. Для обеспечения высокой точности выполнения операции предложен алгоритм коррекции траектории ММ. В его основе лежит использование специального графического маркера, закрепленного на схвате ММ. Алгоритм включает следующие шаги: 1) идентификация маркера с помощью СТЗ для определения его пространственного положения, 2) расчет ожидаемого положения маркера путем решения прямой задачи кинематики, 3) Вычисление вектора ошибки путем сравнения реального и расчетного положений маркера.

Заключение

Экспериментальная проверка метода проводилась в условиях бассейна и открытого моря с использованием ГАСНС. В процессе испытаний на интерфейсе оператора в режиме реального времени отображались данные, передаваемые по гидроакустическому каналу, обеспечивая оператора необходимой информацией для оценки геометрии объекта и принятия решений о продолжении выполнения миссии. Полученные результаты натурных испытаний достоверно подтвердили практическую возможность осуществления сложных манипуляционных операций АНПА с ММ под контролем оператора с использованием ГАСНС.

1. **Billings, G.** Visual Methods Towards Autonomous Underwater Manipulation (Doctoral dissertation). – 2022. – P. 139.
2. **Plomeras, N.** I-AUV Docking and Panel Intervention at Sea / N. Palomeras, A. Peñalver, M. Massot-Campos, P.L. Negre, J.J. Fernández, P. Ridaio, P.J. Sanz, G. Oliver-Codina // Sensors. – 2016. – № 16. – P. 1673.
3. **Morgan E.** Autonomous Underwater Manipulation: Current Trends in Dynamics, Control, Planning, Perception, and Future Directions / Morgan E., Carlucho I., Ard W., Barbalata, C. // Current Robotics Reports. – 2022. – № 3(4), – P. 187-198.
4. **Konoplin A.** Development of a control system for multilink manipulators on unmanned underwater vehicles dynamically positioned over seafloor objects / Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P. // Applied Sciences. – 2022. – № 3 (12). – P. 1666.

А

Андропова А.А. -16
Аксенов А.Ю. - 222
Антипов В.А. - 165
Антонов А.В. - 75
Анцев Г.В. - 113
Артемьев К.С. – 21, 84

Б

Балакина Е.В. - 23
Безусов С.О. - 28
Бектыбаева М.Т. - 247
Бельченко Ф.М. – 31, 115
Берлин Л.М. – 168, 171
Бирин Д.А. - 118
Бливно М.В. - 174
Бобцов А.А. - 35
Богуславский А.А. - 255
Болотник Н.Н. - 43
Брем И.В. -75
Брискин Е.С. -21, 23, 28, 57, 84, 97, 107, 244
Быков А.С. -180, 248
Бузиков М.Э. - 177

В

Вазасв А.В. - 238
Василенко Р.П. - 292
Васильев В.А. -262, 265
Васильев П.В.- 183,186
Вершинина И.П. – 28, 84
Ветлицын М.Ю. - 123
Вольф Д.А. -192
Волкова Т.А. - 208
Вилейко И.В. - 188

Г

Галин Р.Р. -192
Галина С.Б. -192
Галяев А.А. -168,171,241
Гергет О.М. -136
Глущенко А.И. - 46
Годжаев З.А. - 126

Гойдин О.П. - 238
Голубев Ю.Ф. - 50
Горностаев И.В. -94, 195, 274, 277, 281
Григорьев И.М. - 53
Грузликов А.М. -130
Губанков А.С. - 195
Гусев С.В. - 91

Д

Даринцев О.В. - 78
Дашевский В.П. - 145
Дементьев Е.В. - 57
Дивеев А.И. – 198, 290

Е

Ермолов И.Л. - 115

Ж

Жиравок А.Н. - 200

З

Зайцев И.А. - 203
Зайцева А.А. - 222
Зуев А.В. – 94, 274, 277, 281

И

Иванов Е.В. -65
Исаев А.М. -262
Лю Ифань - 133

К

Казаков Ю.Н. -133
Каляев А.И. - 148
Каретников В.В. - 208
Князьков М.М. - 31
Кожин М.А. - 211
Козачёк О.А. - 35
Колпашиков Д.Ю. -136
Коноплин А.Ю. – 72, 139,292
Корсаков А.М. - 287
Корянов В.В. - 50
Котов К.Ю. -188, 214

Костин Г.В. - 68
Кошман А.М. – 180,218
Красавин Н.А. - 72
Крестовников К.Д. -145
Кулешов С.В. - 222
Курьянов А.Н. - 235

Л

Лаговский Б.А. - 225
Ласточкин К.А. -46
Левашова Т.В. - 252
Леонард А.В. – 180, 218
Лесков А.Г. - 65
Лысенко П.В. -168,171

М

Майер А.М. -229
Малолетов А.В. -142
Мартынова Л.А. - 232
Мельников И.К. - 155
Мещеряков Р.В. - 118
Михальков Н.В. -81
Мунасыпов Р.А. – 183, 186
Мухин К.С. – 75

Н

Нагайцев Г.Н. -115
Насибуллаев И.Ш. -78
Носков В.П. -235, 238

О

Остриков П.П. – 31, 115

П

Павленко Б.В. - 271
Пикалёв Я.С. - 174
Пономарев А.В. - 252
Потапов А.П. - 241
Потатуркин О.И. - 214
Прокопов А.С. - 244
Прокопьев И.В. - 290
Проценко А.А. – 274, 277

Пыркин А.А. - 81

Р

Решмин С.А. - 247

Родионов О.А. - 142

Ронжин А.Л. - 145

Рубинович Е.Я. - 225

С

Савин С.И. - 16

Савин Л.А. - 133

Семенов Е.А. - 31

Сенькевич С.Е. - 126

Серов В.А. – 28, 97

Смирная Л.Д. - 84

Смирнов А.В. - 252

Соколов С.М. - 126

Становов А.В. - 268

Старостин И.Е. - 259

Степанов О.А. – 262, 265

Степочкин А.О. - 268

Судаков В.А. - 126

Суханов А.Н. – 31, 88, 115

Т

Тарабукин И.М. - 91

Тимошенко А.А. – 94, 281

Торопов А.Б. - 262

Туровский Я.А. - 118

Нгуен Тхай Ха - 133

У

Устенко В.Ю. -271

Устинов С.А. - 28

Ф

Феофилов Д.С. - 284

Фецак С.И. - 186

Фигурина Т.Ю. - 43

Филаретов В.Ф. – 94, 274, 277, 281

Филимонов Н.Б. - 211

Филиппов Г.С. - 155

Фомин А.С. -75
Фомин И.С. - 287

Х

Халютин С.П. -259
Хачатрян А.А. - 97
Хисамутдинов М.В. – 148, 214
Хорошева А.А. – 101, 104

Ч

Чернецов Р.А. - 155
Черноусько Ф.Л. – 101, 104

Ш

Шалюхин К.А. - 155
Шаронов Н.Г. - 107, 123
Шилов Н.Г. - 252
Шмалько Е.Ю. – 198, 290
Шурыгин В.А. -180, 218

Ю

Ло Юань - 133
Юрманов А.П. – 292
Юхимец Д.А. -53, 94, 281
Ющенко А.С. – 158, 161

Научное издание

**ХVIII ВСЕРОССИЙСКАЯ
МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ
(МКПУ–2025)**

(15 сентября – 20 сентября 2025 г.)

Том 1

***РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА
(РИМ–2025)***

Авторские редактирование
и художественное оформление

Принято 19.08. 2025. Подписано в печать 25.08.2025

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная

Усл. печ. л. 24,4

Тираж 200 экз. (1-й з-д 1 –200). Заказ 000

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95