

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Дарьиной Анны Николаевны

«Методы решения задач оптимального управления с фазовыми ограничениями, возникающими в робототехнике», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.3 – «Теоретическая информатика, кибернетика»

Актуальность темы исследования

Современное развитие робототехники ставит перед теорией управления все более сложные и многоаспектные задачи. Одной из ключевых проблем при проектировании интеллектуальных систем управления является обеспечение не только эффективности и оптимальности траекторий движения, но и строгого соблюдения фазовых ограничений. Эти ограничения отражают реальные условия эксплуатации роботов: недопустимость столкновений с препятствиями, необходимость движения в заданной области пространства, а также ограничения на координаты и скорости.

Традиционные методы оптимального управления, разработанные в рамках классического вариационного исчисления или принципа максимума Понтрягина, зачастую оказываются недостаточными для корректного учета сложных, нелинейных и негладких фазовых ограничений, характерных для прикладных задач робототехники. В то же время современные приложения требуют гарантированно безопасных и предсказуемых траекторий в реальном времени. Это обуславливает необходимость разработки новых и адаптации существующих численных и аналитических методов, способных эффективно решать задачи оптимального управления с учетом таких ограничений.

Таким образом, исследование и совершенствование методов решения задач оптимального управления с фазовыми ограничениями,

обусловленными спецификой робототехнических систем, представляет собой научно обоснованную и практически востребованную проблему. Решение данной проблемы способствует повышению надежности, безопасности и автономности роботизированных комплексов.

Анализ структуры и содержания диссертации

В **первой** главе предложен новый подход к решению задачи о быстрейшем обходе препятствия мобильным роботом в рамках упрощенной кинематической модели без учета инерции. Используется базовая унициклическая модель движения, дополненная возможностью мгновенного разворота на месте. Показано, что применение принципа максимума Понтрягина к этой задаче сталкивается с серьезными трудностями: во-первых, любая допустимая траектория, касающаяся границы единичного круга, оказывается нерегулярной; во-вторых, в задаче возникают особые режимы по угловой скорости, т.е. робот не всегда будет следовать с максимальной по модулю угловой скоростью. Для преодоления этих сложностей разработан метод ε -регуляризации исходной задачи. Применение принципа максимума к регуляризованной задаче приводит к краевой задаче, решаемой численно методом стрельбы в обратном времени. Доказана сходимость решений регуляризованной задачи к решению исходной. Приведены результаты численных экспериментов, подтверждающие работоспособность метода.

Во **второй** главе разработан метод вычисления точных экстремалей с заданной точностью для задачи быстрогодействия управления унициклическим роботом при наличии фазовых ограничений глубины 2 (т.е. управление осуществляется через ускорение). В основу метода положен принцип максимума Понтрягина второго порядка относительно таких ограничений. Описан соответствующий вычислительный алгоритм и представлены результаты численного моделирования. Полученные

точные оптимальные траектории используются в качестве эталонных при разработке и тестировании алгоритмов управления для реальных роботов.

В **третьей** главе рассмотрена задача построения оптимального маршрута для робота, движущегося в плоскости R^2 между фиксированными начальной и конечной точками при наличии фазовых ограничений. Предполагается, что позиционирование робота осуществляется с известной погрешностью $\varepsilon > 0$ и измерения поступают дискретно – через фиксированные промежутки времени. Для построения оптимальной траектории применяется принцип разделения допустимых траекторий: доказано, что оптимальный путь состоит из отрезков прямых и дуг окружностей, касающихся границ препятствий. На основе этих геометрических элементов строится связный граф, где вершины соответствуют старту, финишу и точкам касания с препятствиями, а ребра – возможным участкам движения. Кратчайший по времени путь в этом графе находился с помощью алгоритма Дейкстры, что позволяет получить оптимальную траекторию в идеальных (невозмущенных) условиях. Также предложен алгоритм построения касательных, необходимых для реализации принципа разделения допустимых траекторий. Проведено исследование поведения оптимальных траекторий при обходе как полигональных, так и невыпуклых препятствий.

В **четвертой** главе предложены методы управления реальным мобильным роботом в реальном времени. Использование чисто классических методов оптимального управления оказывается непрактичным из-за высокой вычислительной сложности, особенно при ограниченных ресурсах бортовой системы. Однако гибридный подход – совмещение классических методов с эвристиками или методами машинного обучения, в частности с нейронными сетями, позволил существенно снизить вычислительную нагрузку. Такой синтез сделал возможным построение и реализацию оптимальных или

квазиоптимальных траекторий непосредственно в процессе движения робота, обеспечивая онлайн-управление в динамической среде.

В **заключении** приведены результаты, полученные в диссертационной работе.

Представленные теоретические результаты подкреплены большой экспериментальной базой – от численного моделирования до натурных испытаний на реальных роботах в Робототехническом центре ФИЦ ИУ РАН.

Научная новизна, обоснованность положений, результатов и выводов

В диссертации предложен и всесторонне исследован комплекс взаимосвязанных методов, позволяющих решать широкий класс задач оптимального управления с фазовыми ограничениями как теоретически, так и на практике.

Достоверность научных положений и выводов обеспечивается строгой математической формализацией, корректным применением теории оптимального управления и фундаментальных теорем анализа, а также согласованностью теоретических и экспериментальных результатов. Все ключевые утверждения сопровождаются доказательствами или иллюстрируются численными и натурными экспериментами.

Результаты диссертации отражены в 29 публикациях. Среди публикаций 7 – в журналах из перечня ВАК и 10 – в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus. Материалы докладывались на международных и российских конференциях.

Замечания по диссертации

Несмотря на высокое качество выполненной работы, целесообразно отметить следующее:

1. В диссертационной работе использованы метод стрельбы, метод касательных, алгоритм ASLAM-MPPI, однако не приведены теоремы о

сходимости, условиях устойчивости итерационных процедур, оценках погрешности.

2. Термин «ограничения глубины 2» используется без строгого формального определения в общепринятой терминологии теории оптимального управления. В работе указанный термин понятен из контекста, однако читателю, не знакомому с предшествующими публикациями авторского коллектива, может потребоваться дополнительное пояснение.

3. В экспериментах используется среднеквадратичная ошибка отклонения от эталонной траектории, однако не указано, почему именно эта метрика выбрана в качестве основной, и не обсуждается возможность использования альтернативных метрик (например, интеграл модуля ошибки, максимум отклонения и т.п.).

4. В главе 4 отсутствует четкая математическая постановка задачи, а именно, не указаны пространства состояний и управлений, класс допустимых управлений, условия гладкости, тип ограничений (неравенства, равенства, смешанные ограничения).

5. На рис. 4.15–4.19 представлены сравнительные графики, но не указаны единицы измерения, масштабы осей, параметры модели, что затрудняет интерпретацию результатов.

Заключение по диссертационной работе

Наличие отмеченных замечаний не оспаривает научную значимость диссертации, ее новизну и обоснованность выводов. Считаю, что диссертация Дарьиной Анны Николаевны «Методы решения задач оптимального управления с фазовыми ограничениями, возникающими в робототехнике» представляет собой законченное, глубокое и оригинальное исследование, в котором решена важная научная проблема – построение точных и вычислительно эффективных методов оптимального управления

мобильными роботами при фазовых ограничениях, пригодных для реализации в реальном времени; выполнена автором самостоятельно, отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, данные подходы открывают широкие возможности для применения в актуальных направлениях робототехники – от автономной навигации в сложных средах до реализации надежных и интеллектуальных систем управления мобильными роботами, а ее автор, Дарьина Анна Николаевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.3 – «Теоретическая информатика, кибернетика».

Официальный оппонент

профессор кафедры математического моделирования,
компьютерных технологий и информационной безопасности,
ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина»,
доктор физико-математических наук

доцент

Маск

Масина Ольга Николаевна

24 ноября

2025 г.

тел.: +7 952 592-48-23, e-mail: olga121@inbox.ru

Подпись Масиной Ольги Николаевны заверяю:

Специалист по кадрам *Авдеев В. А.*

