

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 диссертации

Обеспечение быстрого перемещения автономных систем в условиях сложных пространственных ограничений является одной из центральных задач современной робототехники. Особенно трудоёмкими оказываются задачи оптимального управления, в которых траектория многократно касается границы ограничений.

Классические аналитические подходы, в частности принцип максимума Понтрягина, в подобных случаях требуют нетривиальной интерпретации, поскольку стандартные условия регулярности нарушаются. С другой стороны, численные методы сталкиваются с рядом серьёзных трудностей, связанных с обеспечением устойчивости и условий сходимости алгоритмов. Кроме того, затрудняется корректное воспроизведение структуры множителей Лагранжа, особенно при высокой размерности задачи и наличии множества активных ограничений.

Таким образом, создание надёжных и эффективных численных алгоритмов для анализа и поиска оптимальных траекторий с учётом фазовых ограничений, включая корректное вычисление точек стыковки, представляет собой важную междисциплинарную научную проблему, находящуюся на пересечении кибернетики, вычислительной математики и информатики.

Работа выполнена на высоком научном уровне и демонстрирует глубокое понимание, как фундаментальных основ теории оптимального управления, так и современных вопросов прикладной робототехники. Автору

удалось успешно соединить строгий математический анализ с практической реализацией на реальных робототехнических платформах.

Анализ структуры и содержания диссертации

В **первой главе** разработан и теоретически обоснован метод ε -регуляризации для задач оптимального управления с фазовыми ограничениями, в которых нарушены классические условия регулярности. Этот подход позволяет преодолеть фундаментальные трудности, связанные с появлением сингулярных компонент и обеспечивает корректное построение условий оптимальности в режиме движения по границе препятствия. Доказана сходимость решений регуляризованных задач к решению исходной нерегулярной задачи.

Во **второй главе** предложен и реализован метод стрельбы для задач с фазовыми ограничениями глубины 2, соответствующих простой динамике с управлением ускорением. Введено понятие 2-регулярности, получены оценки скачков производной множителя Лагранжа в точках входа на границу и выхода с неё, что позволило построить устойчивый численный алгоритм для решения краевой задачи. Это является существенным развитием теории для задач с ограничениями высших порядков.

В **третьей главе** теоретически обоснован и алгоритмически реализован принцип разделения траекторий для кинематических моделей колёсных роботов при ненулевой начальной скорости. Показано, что оптимальная траектория состоит из прямолинейных участков и дуг вдоль границ препятствий, а задача сводится к поиску кратчайшего пути на специально построенном графе. Предложен эффективный метод поиска касательных, обеспечивающий полиномиальную сложность алгоритма. Существенная трудность решаемой задачи определяется наличием большого (более 100) числа простых ограничений.

В **четвертой главе** разработана гибридная архитектура управления в реальном времени, сочетающая точные аналитические решения (как «ядро»)

с методами машинного обучения, нейросетевого моделирования и эволюционных вычислений (сетевой оператор). Особенно отмечу предложенный метод ASLAM-MPPI, объединяющий активное SLAM и стохастическую оптимизацию траекторий, что обеспечивает надёжную работу даже в сложных условиях (например, на подъёмах).

Все основные результаты подтверждены как теоретическими доказательствами, так и обширной экспериментальной базой – от имитационного моделирования до натурных испытаний на реальном аппаратном стенде в Робототехническом центре ФИЦ ИУ РАН. Эксперименты демонстрируют высокую точность (средняя ошибка траектории – 0,99%), устойчивость (более 7 кругов без сбоев) и практическую применимость предложенных методов.

В **заключении** обобщены полученные результаты, подчеркнуты их научная новизна и практическая ценность.

Научная новизна, обоснованность положений, результатов и выводов

Научная новизна представленной работы состоит в том, что автором разработаны и теоретически обоснованы новые методы решения задач оптимального управления с фазовыми ограничениями, возникающими при управлении мобильными роботами.

Обоснованность и достоверность основных положений подтверждается путем моделирования и с помощью натурных экспериментов с реальными мобильными роботами.

Работа сопровождается высокой публикационной активностью: 29 публикаций, включая 7 статей в журналах из перечня ВАК (из них 6 – в изданиях категорий К-1/К-2), 10 – в базах Web of Science и Scopus. Результаты доложены на ведущих международных конференциях (ECC, IFAC, CAO, CoDIT, INTELS и др.), что свидетельствует о признании научным сообществом новизны и значимости полученных результатов.

Автореферат адекватно отражает основные положения и результаты диссертационного исследования.

Замечания по диссертации

1. Предложенные методы регуляризации и стрельбы демонстрируют высокий уровень теоретической проработки. Однако в диссертации недостаточно подробно описаны условия сходимости предложенных численных алгоритмов, особенно в случае нерегулярных траекторий, критерии останова, а также оценки погрешности аппроксимации.

2. В работе упоминаются модифицированный принцип максимума Понтрягина и фазовые ограничения глубины 2, однако зона регулярности для фазовых ограничений детально описана лишь на простейшем примере ньютоновской задачи, в которой ограничением выступает окружность радиуса R . Остается неясным вопрос как может быть вычислена такая зона регулярности в общем случае, является ли это каким-то особым искусством или существует строгая методика.

3. Не приведены теоремы о сходимости и оценки погрешности для численных процедур (например, для метода стрельбы или алгоритма поиска касательных).

4. В описании вычислительных и натурных экспериментов не указаны ключевые параметры: начальные условия, параметры штрафов, критерии сходимости.

Заключение по диссертационной работе

Перечисленные замечания не снижают научную ценность представленной диссертационной работы и ее положительную оценку в целом. Считаю, что диссертация Дарьиной Анны Николаевны «Методы решения задач оптимального управления с фазовыми ограничениями, возникающими в робототехнике» представляет собой законченную научно-

квалификационную работу. В работе решена крупная научная проблема – получение точного решения задачи оптимального управления с фазовыми ограничениями, применительно к мобильному роботу, с целью последующего использования этого решения для управления роботом в режиме реального времени. Исследование выполнено автором самостоятельно и отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Предложенные методы обладают высоким потенциалом для внедрения в исследовательские проекты, связанные с автономной навигацией, безопасным перемещением и интеллектуальным управлением 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

заведующий кафедрой прикладной математики,

Арзамасского политехнического института (филиала)

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный

технический университет им. Р.Е. Алексеева»,

доктор физико-математических наук

профессор  Пакшин Павел Владимирович

25 ноября 2025 г.

тел.: +7 (910) 1224189, e-mail: pakshinpv@gmail.com

Подпись Пакшина Павла Владимировича заверяю:

Директор  Глебов Владимир Владимирович

