

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

Диссертационная работа А.Н. Дарьиной посвящена разработке и теоретическому обоснованию новых методов решения задач оптимального управления с фазовыми ограничениями, возникающими при управлении мобильными роботами. Актуальность темы не вызывает сомнений: в условиях стремительного развития автономных систем, промышленной робототехники и интеллектуальных транспортных средств задачи с фазовыми ограничениями становятся центральными как с теоретической, так и с практической точек зрения. Учёт фазовых ограничений в задачах оптимального управления значительно усложняет их решение, особенно в нелинейных и многомерных системах, что требует разработки новых, эффективных методов и алгоритмов для применения в реальных робототехнических системах.

Работа выполнена на высоком научном уровне и демонстрирует глубокое владение как фундаментальными основами теории экстремальных задач, так и современными вычислительными и прикладными подходами. Автору удалось не только выявить ключевые теоретические проблемы, но и предложить конструктивные пути их преодоления.

Анализ структуры и содержания диссертации

В первой главе разработан и строго обоснован метод ε -регуляризации для задач оптимального управления с фазовыми ограничениями, в которых

нарушены условия регулярности. Этот подход позволяет свести нерегулярную задачу к последовательности регулярных, для которых применим принцип максимума в классической форме. Доказана сходимость решений регуляризованных задач к решению исходной задачи при $\varepsilon \rightarrow 0$. Это решение имеет фундаментальное значение для теории оптимального управления с фазовыми ограничениями.

Во **второй главе** рассматривалась задача оптимального управления с фазовыми ограничениями второго порядка (т.е. ограничения активны не сразу, а после дифференцирования дважды). Сформулирован принцип максимума Понтрягина второго порядка, включая условия на скачки сопряжённых переменных при входе/выходе на границу ограничения. Разработан алгоритм численного решения на основе метода стрельбы, учитывающий особенности траекторий с участками скольжения по границе ограничения. Проведено теоретическое и численное исследование для модели мобильного робота с динамикой ньютоновского типа (ускорение как управление). Результаты использованы для улучшения структуры ПИД-регулятора, применяемого в реальном времени.

В **третьей главе** рассмотрена задача перемещения мобильного робота с дифференциальным приводом в условиях множества препятствий, заданных как запретные круги. Доказано, что оптимальная траектория состоит из: прямолинейных участков, дуг окружностей (движение по границе препятствий), поворотов на месте. Разработан метод построения графа возможных траекторий, где вершины – это точки касания/поворотов, а рёбра – допустимые участки движения. Предложен алгоритм поиска касательных между окружностями и вычисления времени движения по каждому участку. Приведены численные эксперименты с 2–12 препятствиями, подтверждающие корректность и эффективность метода. Показано, что кратчайший геометрический путь часто совпадает с быстреешим, особенно при малом расстоянии между колёсами.

В **четвертой главе** решена задача управления реальным роботом с учётом неопределённостей, шумов и ошибок позиционирования. Разработаны следующие компоненты:

- идентификация модели (кинематической и динамической) на основе экспериментальных данных с использованием методов машинного обучения и фильтра Калмана;
- построение гладких, физически реализуемых траекторий с учётом ограничений;

Представлен алгоритм синтеза функционала качества для адаптации к реальным условиям.

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

Все основные результаты подтверждены теоретическими доказательствами и многочисленными экспериментами.

Работа содержит 29 публикаций, 17 из которых включены в перечень ВАК или в базы Web of Science и Scopus. Результаты докладывались на ведущих международных конференциях.

Научная новизна, обоснованность положений, результатов и выводов

Научная новизна заключается в разработке и теоретическом обосновании новых методов решения задач оптимального управления с фазовыми ограничениями, возникающими при управлении мобильными роботами.

Обоснованность подтверждается теоретической строгостью – все ключевые утверждения доказаны на основе принципа максимума Понтрягина и анализа дифференциальных уравнений; сходимостью численных схем – доказана сходимость регуляризованных решений к решению исходной задачи при $\varepsilon \rightarrow 0$; экспериментальной проверкой – результаты подтверждены как численными, так и натурными экспериментами на реальном роботе в Робототехническом центре ФИЦ ИУ РАН.

Автореферат адекватно отражает основные положения и результаты диссертационного исследования.

Замечания по диссертации

1. В диссертационной работе, в сделанном докладе часто фигурирует термин «касание». Имеется ввиду касание не обязательно прямыми, но также и кривыми некоторой другой кривой, или поверхности. Но при этом почему-то опускается тип касания, ведь существуют разные типы касания: касание первого порядка, касание второго порядка и далее касания высших порядков. Касанием нулевого порядка можно считать любое пересечение траекторией границы фазового ограничения. Здесь важными определяющими моментами должны быть такие понятия как кривизна кривой, радиус кривизны, центр кривизны и т.п. Однако, только из доклада А.Н. Дарьиной на моем семинаре и соответствующих вопросов, прозвучавших в аудитории, слушателям стало понятно, что в общем случае в задаче k -го порядка (с фазовым ограничением глубины k) получается и касание, или как еще говорят, соприкосновение k -го порядка. Так в ньютоновской тестовой задаче (а ее следует понимать как задачу об управляемой баллистике с препятствием в виде окружности) порядок касания равен 2. Это, разумеется, не относится к первой главе, где предложена ε -регуляризация, там речь идет об обычном касании, т.е. первого порядка. Здесь мы говорим именно про вторую главу. Понятно, что авторы, образно выражаясь, варятся в котле своих научных изысканий, в процессе которых формируется некоторая своя внутренняя (локальная) терминология, и, говоря про касание или соприкосновение, они неявно подразумевают касание, отвечающее порядку задачи. Тем не менее, считаю необходимым отмечать каждый раз в тексте порядок касания, так как это полезно для полного понимания и осмысления задачи.

2. Второе замечание вытекает или тесно связано с предыдущим. В разделе 2.5 диссертационной работы приведен алгоритм метода стрельбы. На шаге 2 требуется «Проверить условие пересечения границы в некоторой

точке t_0 ». Здесь не совсем понятно, о каком пересечении идет речь, ведь задача состоит в обходе препятствия, и попадания внутрь области фазовых ограничений не должно быть, можно двигаться вне области ограничений или по ее границе. Однако во время доклада А.Н. Дарьиной стало понятно, что речь идет о касании, или соприкосновении с границей. Более того, речь идет о касании второго порядка. Вероятно, здесь мы также сталкиваемся с авторской терминологией, но для полного понимания считаю важным использовать общедоступную терминологию. Поэтому данную фразу следует заменить на «Проверить условие касания второго порядка границы фазоограничения в некоторой точке t_0 ». Такое же замечание относительно и некоторых других фраз работы, где речь идет просто о пересечении границы или же касании, но не указан порядок касания.

3. На подписи к рисунку 3.10 указан двухколесный робот, однако, на самом рисунке робот трёхколёсный.

4. В формуле (4.17), по-видимому, имеется опечатка в индексах.

Заключение по диссертационной работе

Перечисленные замечания никак 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 которой решена 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; выполнено автором самостоятельно, отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, предложенные методы обладают высоким потенциалом для внедрения в исследовательские и образовательные

проекты, связанные с 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

главный научный сотрудник

Центрального экономико-математического института РАН,

доктор физико-математических наук

профессор

24 ноября

Бекларян 2025 г.

Бекларян Лева Андреевич

тел.: +7 (499)129-16-00, e-mail: Beklar@cemi.rssi.ru

Подпись Бекларяна Левы Андреевича заверяю:

Ученый секретарь ЦЭМИ РАН,
к. э. н.



Ставчиков Ставчиков А. И.