АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
по образовательной программе 8D07101 - Автоматизация и управление

ОРАЗОВА АРАЙЛЫМ ЖАНБОЛАТКЫЗЫ

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЗВЕННЫМ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ

Основная идея исследования: Диссертационная работа посвящена разработке нелинейного метода траекторного управления последовательным роботом-манипулятором при неопределённости параметров и внешних возмущениях. Исследование объединяет дифференциальную плоскостность, геометрическое представление динамики и робастную коррекцию метода вычисляемых моментов. Такой подход направлен на повышение точности слежения при расхождении номинальной и фактической моделей объекта управления и использует понятие дифференциально плоских систем типа А, то есть систем управления, плоский выход которых зависит исключительно от переменных состояния. Последовательный полностью приводной робот-манипулятор с моментным управлением рассматривается как система данного типа, что позволяет обосновать применение обобщённого метода вычисляемых моментов для решения задачи траекторного управления.

В работе предложены и обоснованы:

- представление последовательного манипулятора с силовым управлением как дифференциально плоской системы типа А и обобщение метода вычисляемых моментов;
- геометрическое описание динамики на основе метрики кинетической энергии и линеаризация динамики статической обратной связью;
- нелинейный робастный закон траекторного управления, компенсирующий влияние неопределённостей математической модели и внешних воздействий.

Разработанные положения исследованы аналитически и проверены компьютерным моделированием двухзвенного манипулятора. Выполнено сравнение классического метода вычисляемых моментов и предложенного робастного закона по точности слежения и управляющим моментам.

Ключевые слова: многозвенный последовательный робот-манипулятор, нелинейное управление, метод вычисляемых моментов, дифференциальная плоскостность, геометрическая динамика, линеаризация обратной связью, робастное управление.

Актуальность. Расширение применения роботов-манипуляторов сопровождается повышением требований к точности воспроизведения заданных траекторий, скорости движения и устойчивости к изменению условий работы. Динамика последовательного манипулятора нелинейна и многосвязна: движение каждого сочленения влияет на остальные звенья, а инерционные, кориолисовы,

центробежные и гравитационные составляющие зависят от конфигурации и скорости движения.

Метод вычисляемых моментов позволяет компенсировать нелинейности и сформировать заданную динамику ошибки, однако его эффективность зависит от точности модели. Неопределённость масс и моментов инерции, неучтённое трение, внешние воздействия и изменение полезной нагрузки нарушают компенсацию и ухудшают качество слежения. Поэтому требуется согласовать преимущества точной линеаризации с механизмом подавления остаточной неопределённости.

Дифференциальная плоскостность раскрывает связь состояния и управляющих воздействий с заданной траекторией, а геометрическое описание связывает динамику с метрикой конфигурационного пространства. Совместное использование этих представлений позволяет обосновать структуру управления и сформулировать условия повышения его робастности. Разработка соответствующего нелинейного закона и проверка его эффективности составляют актуальную научную задачу.

Диссертационная работа выполнялась в рамках двух проектов с грантовым финансированием Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан № AP19679327 «Методы машинного обучения в задачах автоматического управления и инерциальной навигации мобильных роботов» по приоритету «Информационные, коммуникационные и космические технологии», по подприоритету «Интеллектуальные робототехнические системы» и № AP13068317 «Разработка новых алгоритмов управления роботом-манипулятором для технологий 3D-сканирования и аддитивного микроплазменного напыления покрытий».

Объектом исследования является многозвенный последовательный робот-манипулятор с силовым управлением, рассматриваемый как нелинейная система с управлением.

Предметом исследования являются математические модели, методы линеаризации обратной связью и нелинейные робастные алгоритмы траекторного управления многозвенным роботом-манипулятором.

Цель исследования: разработка и исследование нелинейного метода траекторного управления многозвенным роботом-манипулятором, обеспечивающего повышение точности и робастности системы при наличии параметрических неопределённостей, погрешностей математической модели и внешних возмущений.

Задачи исследования:

1. Проанализировать современные методы управления манипуляторами, включая линеаризацию обратной связью, метод вычисляемых моментов и робастное управление.

2. Разработать математическую модель динамики последовательного манипулятора с учётом взаимного влияния звеньев, инерционных, кориолисовых, центробежных и гравитационных составляющих.

3. Исследовать манипулятор как дифференциально плоскую систему особого типа и определить его плоский выход.

4. Установить связь метода вычисляемых моментов с общим методом траекторного управления рассматриваемыми дифференциально плоскими системами.

5. Описать динамику манипулятора средствами дифференциальной геометрии через метрику конфигурационного пространства и ковариантную производную.

6. Определить условия линеаризации обратной связью и структуру эквивалентной линейной системы.

7. Исследовать влияние параметрических неопределённостей, погрешностей модели и внешних возмущений на точность классического метода вычисляемых моментов.

8. Синтезировать нелинейный робастный закон траекторного управления линеаризованной системой.

9. Обосновать устойчивость замкнутой системы и установить условия сходимости ошибки слежения.

10. Провести компьютерное исследование методов в MATLAB/Simulink, оценить точность, переходные процессы и динамические характеристики системы.

11. Сопоставить разработанный робастный закон с классическим методом вычисляемых моментов по показателям точности, устойчивости и робастности.

Основные методы исследования: методы теории автоматического управления, математического моделирования, дифференциальной геометрии, теории дифференциальной плоскостности и линеаризации обратной связью. Устойчивость исследована прямым методом Ляпунова, чувствительность к возмущениям — частотными методами. Компьютерные исследования выполнены в MATLAB/Simulink с использованием численного интегрирования уравнений динамики и сопоставления результатов с аналитическими решениями.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Последовательный робот-манипулятор как дифференциально плоская система управления особого типа; обобщённый метод вычисляемых моментов и линеаризация системы управления манипулятором.

2. Геометрическая интерпретация динамики манипулятора и линеаризация статической обратной связью.

3. Нелинейный робастный закон траекторного управления роботом-манипулятором, основанный на линеаризации обратной связью и компенсации неопределённостей математической модели.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Обосновано использование представления последовательного многозвенного манипулятора с силовым управлением как дифференциально

плоской системы типа А для линеаризации нелинейной динамики и построения системы траекторного управления.

2. Установлено, что классический метод вычисляемых моментов является частным случаем общего метода траекторного управления дифференциально плоскими системами типа А.

3. Разработан нелинейный робастный закон управления линеаризованной динамикой многозвенного манипулятора, учитывающий параметрические неопределённости, погрешности модели и внешние возмущения.

4. Получены условия устойчивости замкнутой системы и сходимости ошибки траекторного слежения при использовании разработанного закона управления с учётом принятых предположений.

Основные научные результаты исследования:

1. Исследовано преобразование нелинейной динамики полностью приводного манипулятора при точном знании параметров модели в систему независимых двойных интеграторов. Обоснована структура обобщённого метода вычисляемых моментов, исследованы переходные процессы и чувствительность ошибки к аддитивным возмущениям. Аналитические амплитудно-частотные характеристики согласованы с результатами компьютерного моделирования.

2. Получены геометрические характеристики модели двухзвенного манипулятора, включая символы Кристоффеля и гауссову кривизну. При постоянной потенциальной энергии и отсутствии управляющих моментов свободное движение интерпретировано как геодезическое. Численная проверка показала согласованность классического и геометрического представлений: расхождение траекторий при управляемом движении составило $1{,}8\cdot10^{-11}$ рад, а при проверке линеаризации — $1{,}0\cdot10^{-11}$ рад.

3. Подтверждена эффективность робастной коррекции при неточных параметрах модели и неучтённом трении. Отдельно исследованы импульс внешнего момента 3 Н·м и увеличение массы второго звена на 0,5 кг. В рассмотренных режимах ошибки слежения уменьшились в 37–50 раз по сравнению с классическим методом вычисляемых моментов. При импульсном воздействии максимальные ошибки сочленений снизились с 0,160 и 0,525 рад до 0,0043 и 0,0142 рад при сопоставимых пиковых моментах приводов.

При варьировании масс и моментов инерции модели в пределах ±40 % максимальная норма ошибки робастной системы составила 0,0018–0,0058 рад, тогда как при классическом управлении — 0,08–0,29 рад. Показано влияние усиления робастной коррекции и ширины пограничного слоя на точность слежения и гладкость управляющих моментов. Полученные результаты характеризуют рассмотренные режимы компьютерного моделирования.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 8 научных работ, в том числе 2 статьи в международных рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science Core Collection: Sensors (2025 г., квартиль Q1 по Scopus, Q2 по WoS, JCR 2025) и Siberian Electronic Mathematical Reports (2025 г., квартиль Q3 по WoS, JCR 2024); 3 статьи в научных

изданиях, рекомендуемых уполномоченным органом в области науки и высшего образования Республики Казахстан; 3 публикации в материалах международных научных конференций.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждены на трёх международных конференциях:

1. VIII Международная научно-техническая конференция «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана», 7–8 апреля 2022 г., Усть-Каменогорск, Казахстан;

2. 18th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (AIS 2023), 16 ноября 2023 г., Секешфехервар, Венгрия;

3. X Международная научно-техническая конференция «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана», посвящённая 125-летию Каныша Сатпаева, 11–12 апреля 2024 г., Усть-Каменогорск, Казахстан.

Практическая значимость. Разработанные модели и алгоритмы могут использоваться при проектировании, анализе и компьютерном исследовании систем траекторного управления последовательными роботами-манипуляторами. Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева по образовательной программе 6B07101 «Автоматизация и управление» и применяются при преподавании дисциплины «Нелинейные системы автоматического регулирования» (акт внедрения научно-исследовательской работы в учебный процесс от 28.02.2024 г.).

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в постановке научной задачи, формулировании цели и задач исследования, разработке математических моделей и методов управления, выполнении аналитических расчётов и компьютерных экспериментов, интерпретации результатов, подготовке научных публикаций, апробации и внедрении результатов исследования.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка использованных источников и приложения А. Работа изложена на 151 странице, содержит 81 рисунок и 7 таблиц. Список использованных источников включает 92 наименования.

В разделах последовательно рассматриваются современные методы управления многозвенными манипуляторами, дифференциальная плоскостность и обобщённый метод вычисляемых моментов, геометрическая интерпретация динамики и её линеаризация, а также нелинейное робастное траекторное управление и результаты компьютерного моделирования.