АННОТАЦИЯ

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

ТОЛЫКБАЕВА МАРАЛ БАКЫТКАНОВНА

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ

Основная идея данного исследования: Диссертационная работа посвящена разработке адаптивного траекторного управления последовательным роботом-манипулятором на основе геометрической модели его динамики. Цель исследования состоит в повышении точности воспроизведения заданной траектории при неопределённости параметров манипулятора и действии внешних возмущений.

В работе предложены и обоснованы:

– геометрическая модель динамики последовательного манипулятора, в которой кинетическая энергия определяет метрику конфигурационного пространства, а бескоординатное уравнение движения связывает ковариантное ускорение с моментами приводов;

– метод траекторного управления, основанный на точной линеаризации геометрического уравнения динамики посредством обратной связи;

– адаптивно-робастный алгоритм с раздельной настройкой коэффициентов робастной коррекции по сочленениям.

Разработанные методы исследованы в MATLAB/Simulink на модели двухзвенного планарного манипулятора. В исследованных режимах с параметрической неопределённостью и внешними возмущениями адаптивная настройка снизила среднеквадратическую ошибку слежения по сравнению с робастной коррекцией с постоянными коэффициентами.

Ключевые слова. Робот-манипулятор, адаптивное управление, робастное управление, траекторное управление, нелинейные динамические системы, геометрические методы управления, дифференциальная геометрия, риманово многообразие, конфигурационное пространство, метрический тензор, линеаризация обратной связью, метод вычисляемых моментов.

Актуальность. При роботизированной обработке материалов качество выполнения операции зависит от точности движения рабочего инструмента по заданной траектории. Для последовательного манипулятора это требует согласованного движения всех сочленений. Управление моментами приводов позволяет учитывать взаимное влияние звеньев. Расчёт требуемых моментов осложняется нелинейностью уравнений движения и зависимостью инерционных характеристик манипулятора от его текущей конфигурации. Методы теории групп и алгебр Ли позволяют выразить положения и скорости звеньев через обобщённые координаты и скорости сочленений. Эти кинематические соотношения служат основой для вычисления кинетической энергии манипулятора. Кинетическая энергия задаёт риманову метрику на

конфигурационном пространстве манипулятора при условии положительной определённости соответствующей квадратичной формы. Такая метрика позволяет записать уравнение движения в бескоординатной форме. Геометрическое уравнение движения служит основой для построения закона управления моментами приводов. При точном знании параметров и отсутствии внешних возмущений линеаризация обратной связью позволяет задать линейную динамику ошибки слежения. На практике неточность инерционных параметров, изменение полезной нагрузки и внешние возмущения снижают точность слежения. Поэтому актуальна разработка адаптивно-робастного алгоритма, который в ходе движения настраивает коэффициент коррекции для каждого сочленения.

Диссертационная работа выполнена в рамках реализации двух научно-исследовательских проектов, финансируемых за счёт грантовых средств Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (КН МНВО РК): AP19679327 «Методы машинного обучения в задачах автоматического управления и инерциальной навигации мобильных роботов», реализуемого по приоритетному направлению «Информационные, коммуникационные и космические технологии», подприоритету «Интеллектуальные робототехнические системы»; AP13068317 «Разработка новых алгоритмов управления роботом-манипулятором для технологий 3D-сканирования и аддитивного микроплазменного напыления покрытий».

Объектом исследования является последовательный манипулятор с поворотными сочленениями, управляемый крутящими моментами приводов.

Предметом исследования являются математические модели динамики последовательных роботов-манипуляторов, геометрические свойства их конфигурационного пространства, методы точной линеаризации нелинейных динамических систем, а также методы и алгоритмы адаптивного траекторного управления манипуляторами в условиях параметрической неопределённости.

Цель исследования: исследование геометрически обоснованных методов математического моделирования и точной линеаризации динамики последовательного робота-манипулятора, а также построение на их основе адаптивной системы траекторного управления, обеспечивающей воспроизведение заданных траекторий движения в условиях неопределённости динамических параметров объекта управления.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих методов математического моделирования динамики последовательных роботов-манипуляторов, методов точной линеаризации нелинейных систем и адаптивного траекторного управления, определить их особенности, преимущества и ограничения.

2. Разработать геометрическое описание кинематики последовательного робота-манипулятора с использованием аппарата групп и алгебр Ли для определения конфигураций и скоростей его звеньев.

3. Представить конфигурационное пространство манипулятора как риманово многообразие с метрикой, определяемой кинетической энергией, и

получить аналитические выражения для вычисления метрического тензора по геометрическим и инерционным характеристикам звеньев.

4. Построить динамическую модель последовательного робота-манипулятора на римановом многообразии с учётом геометрической структуры его конфигурационного пространства и действующих управляющих моментов.

5. Разработать процедуру точной линеаризации уравнений динамики последовательного манипулятора посредством обратной связи по обобщённым координатам и скоростям и на её основе построить систему траекторного управления.

6. Разработать систему адаптивного траекторного управления последовательным роботом-манипулятором на основе линеаризации нелинейной динамики обратной связью, исследовать условия её устойчивости и свойства ошибки слежения при неопределённости динамических параметров объекта управления.

7. Выполнить компьютерное моделирование разработанных алгоритмов управления, исследовать точность воспроизведения заданных траекторий, влияние неопределённости динамических параметров и внешних возмущений на качество управления, а также провести сравнительный анализ полученных результатов.

Основные методы исследования: методы теории автоматического управления, методы теории групп и алгебры Ли, аналитической механики, римановой геометрии, метод Ляпунова, компьютерное моделирование в MATLAB/Simulink.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Геометрическая модель динамики последовательного манипулятора, основанная на представлении его конфигурационного пространства как риманова многообразия с метрикой, определяемой кинетической энергией.

2. Метод траекторного управления последовательным манипулятором, основанный на точной линеаризации его нелинейной динамики посредством обратной связи.

3. Адаптивно-робастный алгоритм траекторного управления последовательным манипулятором на основе точной линеаризации и адаптивной робастной коррекции, эффективность которого при параметрической неопределённости и внешних возмущениях подтверждена компьютерным моделированием.

Научная новизна работы заключается в том, что:

Представлена модель динамики последовательного манипулятора на римановом многообразии. Конфигурационное пространство манипулятора рассматривается как гладкое многообразие с заданной на нём метрикой, физически интерпретируемой как тензор кинетической энергии манипулятора. Впервые уравнение динамики манипулятора сформулировано в бескоординатной форме с использованием ковариантного дифференцирования на римановом многообразии. Впервые в рамках разработанной модели обобщённые скорости, силы и импульсы представлены в единой векторной форме. Обобщённая скорость является вектором касательного пространства, а

ковекторам обобщённых сил и импульсов посредством метрики сопоставлены векторы того же пространства. В такой форме уравнение динамики манипулятора выражает формальную аналогию со вторым законом Ньютона для материальной точки.

Предложена оригинальная процедура точной линеаризации уравнений динамики последовательного манипулятора, записанных в геометрической форме на римановом многообразии. Процедура реализуется посредством обратной связи по обобщённым координатам и скоростям манипулятора.

Разработан новый метод адаптивно-робастного траекторного управления последовательным манипулятором, основанный на точной линеаризации геометрических уравнений динамики и адаптивной настройке коэффициентов робастной коррекции для каждого сочленения.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 8 научных работ, в том числе **1** статья в международном рецензируемом научном журнале, индексируемом в базах данных Scopus (квартиль Q1) и Web of Science Core Collection (квартиль Q2), **4** статьи в научных изданиях, рекомендуемых уполномоченным органом в области науки и высшего образования Республики Казахстан, и **3** публикации в материалах международных научных конференций. Кроме того, получено **1** свидетельство о государственной регистрации объекта авторского права на программу для ЭВМ.

Основные результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на 3-х международных научно-технических конференциях:

1. VIII Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана», апрель 2022 г., г. Усть-Каменогорск, Казахстан;

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

3. X Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана», посвящённая 125-летию Каныша Сатпаева, апрель 2024 г., г. Усть-Каменогорск, Казахстан.

Основные научные результаты, доказанные в диссертации, а также в статьях по теме исследования, включают:

1. Получено бескоординатное уравнение динамики последовательного манипулятора. Метрический тензор, вычисленный по кинематическим и инерционным характеристикам звеньев, связывает ковариантное ускорение с обобщёнными моментами приводов.

2. Из геометрического уравнения движения выведен закон управления моментами приводов. Для полностью приводного манипулятора при точной модели и отсутствии внешних возмущений обоснована экспоненциальная сходимость ошибок положения и скорости к нулю.

3. Разработан закон адаптивной настройки усиления робастной поправки для каждого сочленения. Настройка учитывает ошибки положения и скорости относительно заданных допусков и соотношение фактической и опорной производных соответствующей составляющей функции Ляпунова.

Диссертация имеет практическое значение: результаты исследования внедрены в учебный процесс ВКТУ им. Д. Серикбаева в образовательную программу 7М07101 «Автоматизация и управление», используются для преподавания дисциплины «Адаптивные методы прогнозирования параметров технологических процессов» (Акт о внедрении научно-исследовательской работы в учебный процесс от 28.02.2024 г.).

Для внедрения в практику предлагается: программа для ЭВМ «Восстановление поверхности по данным сканирования» (авторы Кадыролдина А.Т., Құсайын-Мұрат Ә.Т., **Толыкбаева М.Б.**). Сведения о правах внесены в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом, что подтверждается свидетельством № 38548 от 21 августа 2023 года.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов с выводами, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Работа изложена на 132 страницах, содержит 53 рисунка и 11 таблиц. Список использованных источников включает 73 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту. В первом разделе «Аналитический обзор современного состояния исследований и теоретических основ управления последовательными роботами-манипуляторами» рассмотрены существующие подходы к описанию динамики манипуляторов и управлению их движением. Особое внимание уделено точной линеаризации и адаптивному траекторному управлению. Во втором разделе «Геометрическое представление кинематики и динамики последовательного робота-манипулятора» по кинетической энергии построена риманова метрика конфигурационного пространства и получено бескоординатное уравнение движения. Тем самым обосновано первое научное положение о геометрической модели динамики манипулятора. В третьем разделе «Метод траекторного управления роботом-манипулятором на основе точной линеаризации» из полученного уравнения движения выведен закон управления моментами приводов. Обосновано второе научное положение о точной линеаризации динамики манипулятора посредством обратной связи по обобщённым координатам и скоростям. В четвёртом разделе «Исследование адаптивной системы траекторного управления роботом-манипулятором» закон управления дополнен робастной коррекцией с адаптивной настройкой усиления для каждого сочленения. Третье научное положение об эффективности разработанного алгоритма при параметрической неопределённости и внешних возмущениях подтверждено результатами моделирования двухзвенного манипулятора. В заключении сформулированы основные выводы и приведены сведения о публикациях по теме диссертации и внедрении результатов исследования.