

АМАНОВ БЕКЗАТ ОНДАСЫНУЛЫ
Динамика и управление руки гуманоидного робота
Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности
6D060300 – Механика
АННОТАЦИЯ

Актуальность темы исследования

В настоящее время развитие робототехники и мехатроники направлено не только на создание систем, обеспечивающих высокую точность, высокую скорость и повторяемость движений, но и на разработку интеллектуальных робототехнических устройств, способных безопасно, гибко и адаптивно взаимодействовать с человеком. В особенности гуманоидные роботы и роботизированные руки с большим числом степеней свободы широко рассматриваются в промышленности, сервисной сфере, медицине, телеоперации, системах дистанционного управления, а также в робототехнике, предназначенной для реабилитации верхней конечности. В таких условиях исследование движения роботизированной руки с учетом не только ее геометрии, но и физической природы, динамических свойств и законов управления является актуальной научно-технической задачей.

Актуальность диссертации обосновывается также двумя конкретными прикладными направлениями. Первое — дистанционное управление. В этом случае роботизированная рука должна выполнять точные, понятные, естественные и визуально надежные движения по командам оператора или управляющей системы. Ее движение должно быть удобным для восприятия, путь end-effector должен быть геометрически обоснованным, а система управления — устойчивой. Второе направление — робототехнические системы, предназначенные для реабилитации верхней конечности. В этом случае роботизированная рука непосредственно взаимодействует с человеком, поэтому ее движение должно быть мягким, безопасным, физиологически приемлемым и адаптированным к состоянию пациента. Рассмотрение этих двух различных, но взаимосвязанных задач в рамках одной гуманоидной роботизированной руки определяет научную и практическую значимость данной диссертации.

Несмотря на то, что классические кинематические и динамические методы исследования гуманоидных роботизированных рук широко известны, вопросы обоснования точного траекторного управления и безопасного силового взаимодействия в рамках одной платформы, а также их связи с задачами дистанционного управления и реабилитации, до сих пор не получили полного решения. В связи с этим построение математической модели 6-DOF гуманоидной роботизированной руки, исследование ее динамических свойств, сравнение методов планирования траектории, обоснование computed-torque control и импедансного управления, а также проведение численного моделирования с учетом параметров реального прототипа представляют собой актуальную и практически значимую задачу.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка кинематических, динамических и управляющих моделей двухцелевой 6-DOF гуманоидной роботизированной руки, адаптированной к задачам дистанционного управления и реабилитации, научное обоснование методов планирования траектории и предложение эффективных алгоритмов управления, обеспечивающих точное, безопасное и адаптивное движение рабочего органа.

Объект исследования

Объект исследования — двухцелевая 6-DOF гуманоидная роботизированная рука.

Предмет исследования

Предмет исследования — кинематика, динамика, методы планирования траектории, системы управления двухцелевой 6-DOF гуманоидной роботизированной руки и особенности ее движения в режимах дистанционного управления и реабилитации.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели в диссертации были решены следующие основные задачи:

- проведен анализ научной литературы в области гуманоидных роботизированных рук, манипуляторов, дистанционного управления, робототехники для реабилитации, взаимодействия человека и робота, кинематики, динамики и управления;
- обоснована структурная схема двухцелевой 6-DOF гуманоидной роботизированной руки и определены ее функциональные особенности;
- выведены уравнения прямой и обратной кинематики роботизированной руки на основе параметров Денавита–Хартенберга;
- выполнен анализ рабочего пространства, сингулярных конфигураций и матрицы Якоби;
- построена динамическая модель роботизированной руки на основе метода Эйлера–Лагранжа;
- определены массово-инерционные параметры звеньев, включая массу, центр масс и тензор инерции, на основе инженерной модели;
- исследованы и сравнены методы линейной интерполяции, кубических полиномов, полиномов пятого порядка, а также методы PTP, LIN и адаптивного планирования траектории;
- обоснован метод импедансного управления для безопасного силового взаимодействия с человеком и окружающей средой;
- выполнена численная проверка прямой и обратной динамики, слежения за траекторией и алгоритмов управления в среде MATLAB;
- разработан 3D инженерный прототип роботизированной руки в среде SolidWorks и выполнена связь теоретической модели с параметрами реальной конструкции.

Методы исследования

В работе использованы классические и современные методы робототехники, механики и теории управления. Кинематическое моделирование выполнено на основе D–H параметризации. Для описания пространственного положения и ориентации роботизированной руки использованы однородные матрицы преобразования. В задаче прямой кинематики по суставным переменным определялась поза рабочего органа, а в задаче обратной кинематики по состоянию end-effector находились суставные углы. Для обратной кинематики использовался аналитический, то есть closed-form подход.

Динамические уравнения роботизированной руки были получены методом Эйлера–Лагранжа. Этот метод позволил вывести уравнения движения в обобщенных координатах с учетом полной кинетической и потенциальной энергии системы. Для описания связи между суставным движением и декартовым пространством использована матрица Якоби. При анализе контактного и силового взаимодействия рассмотрена передача сил и моментов к звеньям.

Численное моделирование выполнено в среде MATLAB. В MATLAB были реализованы задачи forward dynamics и inverse dynamics, исследованы траектории движения, временные зависимости суставных углов, управляющие моменты и пространственное движение рабочего органа. Инженерное и геометрическое моделирование выполнено в среде SolidWorks. Для каждого звена были рассчитаны масса, центр масс и тензор инерции, которые затем использовались в динамической модели.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна диссертационной работы характеризуется следующими результатами:

- предложена целостная научно-методическая основа для рассмотрения задач дистанционного управления и реабилитации в рамках одной 6-DOF гуманоидной роботизированной руки;
- построена полная кинематическая модель 6-DOF гуманоидной роботизированной руки на основе D–H параметров, а решения прямой и closed-form обратной кинематики систематизированы;
- рабочее пространство, сингулярные конфигурации и матрица Якоби проанализированы с точки зрения задач дистанционного управления и реабилитации;
- динамическая модель, полученная методом Эйлера–Лагранжа, связана с массово-инерционными параметрами реального прототипа;
- методы планирования траектории обоснованы сравнительно с учетом их прикладного назначения, а именно требований к точности движения, геометрии пути, гладкости движения и безопасной адаптации;
- показана целесообразность применения метода вычисленного момента для точного движения в свободном пространстве и импедансного управления для безопасного взаимодействия с человеком в рамках единой архитектуры роботизированной системы;
- предложены принципы выбора виртуальной массы, демпфирования и жесткости для режимов, предназначенных для реабилитации;
- выполнена численная проверка слежения за траекторией, управляющих моментов и динамического отклика системы на основе forward dynamics и inverse dynamics моделей в MATLAB.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость исследования заключается в комплексной систематизации кинематических, динамических и управляющих моделей 6-DOF гуманоидной роботизированной руки. В работе движение роботизированной руки рассматривается не только с точки зрения кинематики или только управления, а как целостная система. Это расширяет теоретические основы исследования многозвенных робототехнических систем и позволяет объяснить, каким образом в одной системе сочетаются точное траекторное управление и безопасное силовое взаимодействие.

Практическая значимость определяется возможностью применения предложенных моделей и алгоритмов при проектировании реальных инженерных систем. Результаты диссертации могут быть использованы в дистанционно управляемых сервисных роботах, социальных роботах, роботизированных системах для указательных и направляющих действий, а также в интеллектуальных робототехнических устройствах, предназначенных для реабилитации верхней конечности. Разработанные в SolidWorks и MATLAB инженерные и численные модели могут служить основой для дальнейшего совершенствования аппаратного прототипа и разработки реальных программ управления.

Результаты, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие научные результаты:

- структурно-функциональная модель двухцелевой 6-DOF гуманоидной роботизированной руки;
- решения прямой и обратной кинематики роботизированной руки на основе D–H параметров;
- результаты анализа рабочего пространства, сингулярных конфигураций и матрицы Якоби;
- динамическая модель, полученная методом Эйлера–Лагранжа;

- сравнительный анализ методов линейной интерполяции, кубических и полиномов пятого порядка, а также РТР, LIN и адаптивного планирования траектории;
- метод вычисленного момента для точного движения в свободном пространстве;
- метод импедансного управления для безопасного взаимодействия с человеком;
- принципы выбора адаптивных импедансных параметров для режимов реабилитации;
- результаты численного и инженерного моделирования в MATLAB и SolidWorks.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертации

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечиваются использованием широко признанных в робототехнике и механике методов: D–H параметризации, метода Эйлера–Лагранжа, якобианового анализа, классических подходов к планированию траектории и положений теории модельно-ориентированного управления. Задачи forward dynamics и inverse dynamics были численно проверены в среде MATLAB, а их результаты сопоставлены с теоретическими положениями по движению, моментам и точности слежения. Массово-инерционные параметры, полученные в SolidWorks, повысили инженерную обоснованность модели.

Связь диссертационной работы с другими научно-исследовательскими работами

Содержание диссертационной работы непосредственно связано с современными исследованиями в области робототехники, систем управления и проектирования мехатронных устройств. Полученные результаты могут дополнить исследования в направлениях дистанционного управления, интеллектуальных манипуляторов и роботизированных систем, предназначенных для реабилитации.

Апробация результатов исследования

Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены на международных и республиканских научно-технических конференциях, а также опубликованы в авторитетных научных изданиях:

Baigunchekov, Z., Cao, M., Li, Q., Amanov, B., Zhangabergen, D., Omarov, B., Rakhmatulla, Z., and Yeerzhati, M., *Social Humanoid Robot Ai-Gerim*, IEEE 20th Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2025, DOI: 10.1109/ICIEA65512.2025.11148978.
 Baigunchekov, Z., Carbone, G., Zhumasheva, Z., Amanov, B., Zholdassov, Y., Tolenov, S., Tleukhanov, A., *Kinematics of the “Ai-Gerim” Robot Arm*, Mechanisms and Machine Science Conference, 2022, DOI: 10.1007/978-3-031-04870-8_2.
 Ibrayev, S., Amanov, B., *Enhancing Orthopedics and Sports Medicine with Lower Limb Exoskeleton Control in Rehabilitation Using Deep Learning-Based Electromyography Signal Classification*, Retos, Open Access, 2024, Vol. 61, pp. 616–625.
 Ibrayev, S., Omarov, B., Amanov, B., Momynkulov, Z., *Development of a Deep Learning-Enhanced Lower-Limb Exoskeleton Using Electromyography Data for Post-Neurovascular Rehabilitation*, Engineered Science, Open Access, 2024, Vol. 31, p. 1269.

Личный вклад автора

Основные научные результаты, теоретические положения, математические модели, а также обоснование методов планирования траектории и алгоритмов управления, представленные в диссертации, получены непосредственно автором. Автор выполнил анализ научной литературы, разработал кинематические и динамические модели роботизированной руки, реализовал задачи forward dynamics и inverse dynamics в MATLAB, определил параметры прототипа на основе SolidWorks и систематизировал полученные результаты.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, основных разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. В работе последовательно изложены актуальность темы исследования, цель и задачи, методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, результаты, выносимые на защиту, и основные выводы.

Основное содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех основных разделов, заключения, списка использованных источников и приложений.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость. В качестве основной цели поставлены моделирование двухцелевой 6-DOF гуманоидной роботизированной руки для задач дистанционного управления и реабилитации, выбор методов планирования траектории и разработка соответствующих систем управления.

В первом разделе выполнен обзор современных исследований по гуманоидным роботизированным рукам, их применению в промышленности, медицине, сервисной робототехнике и системах дистанционного управления. Также рассмотрены вопросы реабилитационной робототехники, телеоперации и взаимодействия человека с роботом. На основе анализа литературы обоснована необходимость объединения точного траекторного управления и безопасного силового взаимодействия в рамках одной робототехнической системы.

Во втором разделе построены кинематическая и динамическая модели 6-DOF гуманоидной роботизированной руки. На основе параметров Денавита–Хартенберга выведены уравнения прямой и обратной кинематики, исследованы рабочее пространство, сингулярные конфигурации и матрица Якоби. Кроме того, на основе формализма Эйлера–Лагранжа получены полные динамические уравнения движения, а массово-инерционные параметры звеньев определены в среде SolidWorks.

В третьем разделе рассмотрены основные методы планирования траектории для роботизированной руки. Выполнен сравнительный анализ линейной интерполяции, кубических и полиномов пятого порядка, а также методов PTP, LIN и адаптивного планирования траектории. Показано, что для задач дистанционного управления наиболее целесообразно совместное применение методов PTP и LIN, тогда как для задач реабилитации более предпочтительным является адаптивное планирование траектории.

В четвертом разделе исследованы системы управления роботизированной руки. Для точного движения в свободном пространстве обоснован метод вычисленного момента, а для безопасного и гибкого взаимодействия с человеком и окружающей средой — импедансное управление. Рассмотрены математические модели законов управления, динамика ошибки, условия устойчивости, а также принципы выбора параметров для реабилитационных и телеоперационных режимов.

В заключении показано, что в диссертации разработаны математические, алгоритмические и прикладные основы двухцелевой 6-DOF гуманоидной роботизированной руки, а предложенные методы планирования траектории и управления обеспечивают точное движение, направленное перемещение рабочего органа и безопасное физическое взаимодействие с человеком.