

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Момынкулова Зейнель Зейнуллаұлы
«Разработка моделей глубокого обучения с подкреплением для управления
роботизированным манипулятором в промышленных приложениях», представленной на
соискание степени доктора философии (PhD) по ОП: 8D06105 – «Наука о Данных»

Актуальность исследования. В связи с этим одной из ключевых задач современной промышленности является минимизация участия человека в опасных и тяжелых производственных процессах. Эффективным решением данной проблемы является внедрение роботизированных манипуляторов, способных выполнять широкий спектр операций без непосредственного (supervisor) участия человека. Использование роботов позволяет существенно снизить уровень производственных рисков, повысить стабильность выполнения операций и обеспечить непрерывность технологического процесса. Помимо повышения безопасности, внедрение роботизированных систем имеет значительную экономическую выгоду. Автоматизация процессов позволяет сократить затраты на оплату труда, снизить издержки, связанные с производственными травмами и простоем оборудования. В добавок к этому повысить производительность за счет круглосуточной работы и высокой повторяемости действий. Роботизированные манипуляторы обеспечивают более точное и стабильное выполнение задач, что особенно важно в высокоточных производственных процессах, таких как сварка и маркировка разных объектов. Однако традиционные подходы к управлению роботами, основанные на жестко заданных алгоритмах и заранее запрограммированных траекториях, обладают ограниченной гибкостью. В условиях реального производства часто возникают неопределенности: изменение положения объектов, необходимость адаптации к новым задачам. В таких ситуациях классические методы управления требуют сложной перенастройки и не обеспечивают достаточной адаптивности. В последние годы перспективным направлением является использование методов глубокого обучения с подкреплением, позволяющих роботам самостоятельно обучаться эффективным стратегиям управления на основе взаимодействия со средой. Такие методы позволяют учитывать сложные динамические процессы и адаптироваться к изменяющимся условиям, что особенно важно для работы в реальных промышленных сценариях. Дополнительным преимуществом является возможность интеграции с методами компьютерного зрения, что позволяет роботам ориентироваться в пространстве и выполнять задачи без точной предварительной настройки. Таким образом, разработка интеллектуальных систем управления роботизированными манипуляторами, способных эффективно работать в опасных и динамически изменяющихся условиях, является актуальной задачей. Решение данной задачи позволит не только повысить уровень безопасности на производстве, но и обеспечить значительный экономический эффект за счет повышения эффективности, надежности и автономности технологических процессов.

Цель диссертационной работы: Целью диссертационного исследования является разработка интеллектуальной системы управления роботизированным манипулятором на основе методов глубокого обучения с подкреплением, обеспечивающей адаптивное и высокоточное выполнение промышленных задач в условиях заданной среды.

Были оставлены следующие **задачи исследования**:

- провести анализ современных методов глубокого обучения с подкреплением, применяемых для управления роботизированными манипуляторами в промышленных приложениях;
- разработать виртуальную среду моделирования обеспечивающую воспроизведение типовых промышленных задач (сварка и маркировка);
- сформировать пространство состояний и действий для роботизированного манипулятора, включая параметры суставов, положения объектов и целевые состояния;
- разработать функцию вознаграждения, учитывающую точность выполнения задачи, эффективность траектории, избегание столкновений и устойчивость управления;
- реализовать и обучить модели глубокого обучения с подкреплением для управления манипулятором;
- провести экспериментальное исследование обученных моделей в симуляционной среде с оценкой качества управления по метрикам точности, времени выполнения и устойчивости;
- выполнить оптимизацию архитектуры модели и параметров обучения для повышения эффективности и обобщающей способности системы;
- провести валидацию разработанного подхода на реальных или приближенных к реальным условиям, включая интеграцию с промышленным роботизированным оборудованием или цифровым двойником;

Объект исследования: роботизированные манипуляторы, применяемые в промышленных задачах автоматизации (перемещение, захват и обработка объектов).

Методы исследования: методы глубокого обучения с подкреплением, алгоритмы управления роботами, методы оптимизации, моделирование в симуляционных средах.

Научная новизна работы:

- Разработана специализированная симуляция для обучения роботизированного манипулятора, включающая разнообразные промышленные сценарии (захват, перемещение, сортировка объектов), приближенные к реальным условиям эксплуатации.
- Предложена архитектура модели с учетом дополнительных факторов среды, такие как неопределенность положения объектов, шум сенсорных данных и вариативность динамики, что позволило повысить устойчивость обучаемой модели к изменениям условий и обеспечить лучшую обобщающую способность.
- Разработана модель глубокого обучения с подкреплением для управления манипулятором, обеспечивающая одновременное решение задач позиционирования, захвата и перемещения объектов с учетом ограничений кинематики и динамики.
- Интегрирована система управления коллаборативным роботом для разных промышленных целей.

Научный вклад:

- разработана и реализована симуляционная среда для обучения роботизированного манипулятора, включающая широкий спектр промышленных сценариев, таких как захват, перемещение и сортировка объектов, с учётом ограничений кинематики, динамики и контактных взаимодействий, что обеспечивает высокую степень приближения к реальным условиям эксплуатации.
- сформирован комплексный подход к моделированию среды обучения, учитывающий неопределённость положения объектов, наличие сенсорных шумов и вариативность динамических параметров, что позволило существенно повысить устойчивость и робастность обучаемых моделей к внешним воздействиям и изменениям условий.
- разработана и экспериментально обоснована модель глубокого обучения с подкреплением для управления роботизированным манипулятором, обеспечивающая эффективное решение совокупности задач позиционирования, захвата и перемещения объектов в непрерывном пространстве состояний и действий.
- проведён сравнительный анализ эффективности различных стратегий управления и параметров обучения, включая влияние структуры функции награды, параметров среды и алгоритмов обучения, что позволило определить оптимальные конфигурации для достижения высокой точности и стабильности управления.
- предложен подход к интеграции разработанной модели в систему управления коллаборативным роботом, ориентированный на выполнение различных промышленных задач, что подтверждает практическую применимость и масштабируемость разработанных решений.
- получены экспериментальные результаты, демонстрирующие повышение точности позиционирования, снижение ошибок управления и улучшение плавности траекторий по сравнению с базовыми подходами, что подтверждает эффективность предложенных методов.

Научные положения, выносимые на защиту:

- разработанная симуляционная среда для обучения роботизированного манипулятора, обеспечивающая моделирование промышленных сценариев (захват, перемещение и сортировка объектов) с учётом кинематических и динамических ограничений, приближенных к реальным условиям эксплуатации.
- архитектура модели глубокого обучения с подкреплением, учитывающая неопределённость положения объектов, шум сенсорных данных и вариативность динамики системы, что обеспечивает устойчивость управления и высокую обобщающую способность в изменяющихся условиях.
- разработанная модель управления роботизированным манипулятором на основе обучения с подкреплением, позволяющая эффективно решать совокупность задач позиционирования, захвата и перемещения объектов в непрерывном пространстве состояний и действий.

- предложенный подход к интеграции алгоритмов обучения с подкреплением в систему управления коллаборативным роботом, обеспечивающий адаптивное выполнение различных промышленных задач и возможность практического применения разработанных методов.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Теоретическая значимость работы заключается в развитии и адаптации методов глубокого обучения с подкреплением для задач управления роботизированными манипуляторами в условиях промышленной эксплуатации. В отличие от большинства существующих подходов, ориентированных либо на классические методы управления, либо на изолированное применение алгоритмов обучения с подкреплением, в данном исследовании расширена научно-методологическая база за счёт интеграции непрерывных методов обучения с подкреплением с учётом кинематических и динамических ограничений робототехнических систем. Существенным вкладом является формализация задачи управления манипулятором как многокритериальной оптимизационной задачи, учитывающей параметры как: точность позиционирования, плавность траектории и устойчивость к внешним возмущениям. Тем самым формируется теоретическая основа для построения интеллектуальных систем управления, способных функционировать в сложных и неопределённых промышленных средах. Основным практическим результатом является обученная и оптимизированная модель управления роботизированным манипулятором на основе глубокого обучения с подкреплением, способная выполнять задачи захвата, перемещения и сортировки объектов с высокой точностью и устойчивостью. Разработанная симуляционная среда позволяет эффективно обучать модели в условиях, приближенных к реальным, что существенно снижает затраты на экспериментальную отладку и минимизирует риски при внедрении. Дополнительно реализована интеграция разработанных алгоритмов в систему управления коллаборативным роботом, что обеспечивает возможность их применения для широкого спектра промышленных операций. Практическая реализация результатов исследования демонстрирует, что предложенные методы позволяют повысить уровень автоматизации производственных процессов, снизить зависимость от ручного труда и увеличить точность выполнения технологических операций. Таким образом, разработанные методы и программные инструменты обладают высокой степенью готовности к внедрению и представляют значительный интерес для промышленного применения.

Основные результаты работы были представлены и обсуждены на семинарах кафедры «Математическое и Компьютерное Моделирование» АО «МУИТ» (2024–2026 гг.), университете Asia Metropolitan University, Малайзия (2026 г.). По теме диссертации опубликованы 4 публикации, в том числе 2 публикации в рейтинговом научном издании, индексируемом Scopus; 2 публикации в материалах международных конференций; 1 публикация в материалах отечественных конференций публикация в журналах КОКСНВО МНВО.

1. Momykulov, Z., Tursynova, A., Olzhayev, O., Ikramov, A., Ibrayev, S., & Omarov, B. (2025). Three-Dimensional trajectory planning for robotic manipulators using model predictive control and point cloud optimization. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 145(1), 891–918. Квартиль – Q2, процентиль 73, citespace 4.4, DOI: <https://doi.org/10.32604/cmescs.2025.068615>

2. S. Ibrayev, B. Omarov, A. Ibrayeva, and Z. Momykulov, “DeePSurNET-NSGA II: Deep Surrogate Model-Assisted Multi-Objective Evolutionary Algorithm for enhancing leg linkage in walking robots,” *Computers, Materials & Continua/Computers, Materials & Continua (Print)*, vol.

81, no. 1, pp. 229–249, Jan. 2024, Квартиль – Q1, процентиль 86, citescore 6.1, DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.053075>.

3. Zeinel Momyunkulov, Azhar Tursynova, Olzhas Olzhayev, Akhanseri Ikramov, Sayat Ibrayev, Amandyk Tuleshov, Batyrkhan Omarov. Pareto-Optimized Model Predictive Control for Real-Time 3D Trajectory Planning of Collaborative Robots. In Proceedings of PAMDAS 2025 - International conference on Physical Asset Management and Data Science, 17-18 Jul. 2025, Coimbra, Portugal

4. Zeinel Momyunkulov, Azhar Tursynova, Olzhas Olzhayev, Akhanseri Ikramov, Sayat Ibrayev, Amandyk Tuleshov, Batyrkhan Omarov. Trajectory Optimization for Collaborative Robots via the Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm. In Proceedings of PAMDAS 2025 - International conference on Physical Asset Management and Data Science, 17-18 Jul. 2025, Coimbra, Portugal.

5. Z. Momyunkulov & B. Omarov (2025). DDPG for Trajectory Generation. 10th International Conference on Digital Technologies in Education, Science and Industry (DTESI), 19-20 Nov. 2025, Almaty, Kazakhstan.

6. Z.Z. Momyunkulov, O. M. Olzhayev, A. T. Tursynova, A. K. Tuleshov, & S. M. Ibrayev. (2025). CONSTRUCTION AND GENERATION OF OPTIMAL TRAJECTORIES USING THE DDPG REINFORCEMENT LEARNING ALGORITHM. Science and Technology of Kazakhstan, №4, 2025. <https://doi.org/10.48081/JPFT4234>.

7. Момынкуллов З. З., Турсынова А. Т., Олжаев О. М., Ибраев С. М., Тулешов А. К., Омаров Б. С., Мусилимов Ж. А., Икрамов А. З., Туенбаев М. К. Патент на полезную модель “Способ визуального слежения и предотвращения столкновений манипулятора коллаборативного робота” № 11903 от 13 марта 2026 года.

Результаты. Разработано программное обеспечение, обеспечивающее практическое применение предложенной системы управления, включая программные модули для моделирования, обучения и тестирования алгоритмов управления роботизированным манипулятором, а также интерфейсы для мониторинга и анализа выполнения задач в реальном времени. Реализованные инструменты позволяют отслеживать траектории движения, оценивать точность позиционирования, анализировать показатели эффективности и формировать отчетность по результатам работы системы. Полученные результаты подтверждают достижение поставленных целей исследования, отражают научную новизну предложенных подходов и демонстрируют перспективность их внедрения в промышленную практику. Разработанная система может быть использована в задачах автоматизации производственных процессов, включая операции сборки, перемещения и обработки объектов, а также в составе интеллектуальных робототехнических комплексов.

В первом разделе обосновывается актуальность автоматизации управления роботами в условиях перехода к Индустрии 4.0 и 5.0, формулируются цель и задачи исследования, а также определяется научная новизна и практическая значимость предложенного подхода.

Во втором разделе проводится комплексный обзор литературы, охватывающий развитие систем управления роботами, макроэкономические аспекты роботизации и современные направления, такие как воплощенный интеллект и фундаментальные модели. Уделяется внимание интеграции больших языковых моделей в робототехнику, а также

применению глубокого обучения с подкреплением для задач управления и оптимизации. Рассматриваются методы планирования траекторий, навигации и пространственного восприятия, включая подходы на основе MPC и DRL. Дополнительно анализируются задачи роботизированной сборки, и манипуляции, а также вопросы коллаборативной робототехники и обеспечения безопасности. Также упоминается об анализе экономической выгоде применение автономных систем в промышленных отраслях.

В третьем разделе подробно описывается методология исследования. Представляется концепция гибридного управления, в которой высокоуровневое планирование осуществляется с помощью методов обучения с подкреплением, а низкоуровневое управление реализуется через Model Predictive Control. Рассматривается разделение уровней управления и математические основы MPC, включая формализацию целевой функции и ограничений. Детально анализируются алгоритмы DDPG и TD3, а также их расширения, такие как иерархическое обучение и многоуровневые архитектуры. Формулируется задача построения траектории в трехмерном пространстве, задаются граничные условия, метрики оценки и методы оптимизации параметров, включая анализ Парето-фронта.

В четвертом разделе представлены результаты экспериментальных исследований. Проводится анализ эффективности MPC при различных критериях оптимизации, включая минимизацию ошибки и ускорения. Рассматриваются результаты обучения с подкреплением и их поведение в симуляционной среде. Выполняется комплексный анализ полученных данных, включая сравнение различных подходов и оценку устойчивости системы. Также демонстрируется применение разработанных методов в прикладных задачах, таких как дуговая сварка и маркировка, с учетом реальных технических характеристик роботов.

В пятом разделе подводятся итоги работы. Подтверждается достижение поставленной цели, формулируются основные научные и практические результаты, а также делаются выводы о перспективности применения гибридных методов RL и MPC в задачах промышленной робототехники. Отмечается потенциал дальнейшего развития системы в направлении повышения автономности, расширения области применения и интеграции с реальными роботизированными платформами.

Личный вклад автора. Все основные результаты, описанные в диссертации, выполнены и собраны автором. Кроме того, основные результаты исследований, анализы, модели, программы созданы автором, выводы сделаны на основе результатов, полученных от работы и исследования PhD докторанта.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из титульного листа, содержания, обозначений и сокращений, пяти разделов, списка из 150 использованных источников. Общий объем диссертации составляет 106 страниц, включая 44 иллюстраций и 19 таблиц.