

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Сунь Силуна, выполненную на тему: «Математическое моделирование процессов интеллектуального управления роботизированным манипулятором», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертации

Актуальность диссертационного исследования Сунь Силуна обусловлена развитием принципиально нового класса динамических систем - воплощенного искусственного интеллекта, функционирующего в неструктурированных средах. В отличие от классических механических систем, такие объекты требуют восстановления неизвестных данных при сохранении интерпретируемости. Традиционные методы моделирования на основе обыкновенных дифференциальных уравнений становятся неэффективными с ростом размерности и жесткости систем, что делает проблематичным их применение в сложных сценариях реального мира. Разработка гибридных математических моделей управления является перспективным путем решения этой проблемы. Следующие аспекты только подтверждают актуальность проведенного исследования.

1. Усложнение задач робототехники: современные манипуляторы выходят за рамки жестко запрограммированных конвейеров, что требует от них способности к автономному планированию и адаптации.
2. Проблема крайне низкой эффективности выборки у классических методов обучения с подкреплением, и недостаточная обобщающая способность у методов обучения на демонстрациях.
3. Недостаточная эффективность математических решений для комплексных иерархических моделей, интегрирующих высокоуровневый семантический вывод больших языковых моделей с низкоуровневым моторным контролем.

Перечисленные проблемы машинного обучения делают диссертационное исследование Сунь Силуна, посвященное интеллектуальному управлению манипуляторами через внедрение инновационных гибридных методов и алгоритмов, весьма актуальным и представляющим несомненный теоретический и практический интерес.

Оценка научной новизны

Научная значимость диссертации Сунь Силуна заключается в развитии математических методов управления многосвязными динамическими системами за счёт интеграции классических уравнений движения и алгоритмов машинного обучения.

Научная задача исследования направлена на повышение вычислительной эффективности процессов обучения и точности выполнения многошаговых задач с использованием гибридного математического моделирования. Для достижения цели исследования в диссертации решены следующие задачи:

1. Построена математическая модель гибридной динамической системы, объединяющая детерминированное описание траекторий на основе динамических примитивов движения (DMPs) и стохастические процессы оптимизации стратегий управления (RL).

2. Разработан численный метод ускорения сходимости алгоритмов стохастической оптимизации на основе механизма оптимального буфера воспроизведения, реализующего стратегию взвешенной выборки данных.

3. Разработан метод семантической декомпозиции задач управления, формализующий процесс преобразования высокоуровневых инструкций в последовательность динамических примитивов через выделение «ключевых состояний» для реализации иерархической схемы с LLM.

4. Реализован комплекс проблемно-ориентированных программ, воплощающий разработанные математические модели и численные методы в виде программных модулей на базе ROS.

5. Проведены вычислительные эксперименты на репрезентативном бенчмарке (задачи робототехнического манипулирования) для верификации адекватности моделей и количественной оценки эффективности предложенных численных методов.

Тематика работы и основные результаты соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: п. 1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений», п. 2 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов», п. 3 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ» и п. 5 «Разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических

моделей объектов на основе данных натурального эксперимента или на основе анализа математических моделей».

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается структурой работы, корректным использованием математического аппарата теории динамических систем, теории стохастического оптимального управления (Марковские процессы принятия решений) и методологии глубинного обучения. Достоверность полученных результатов подтверждается проведёнными автором вычислительными экспериментами на репрезентативном наборе данных RL Bench и натурными испытаниями на физических манипуляторах (KUKA iiwa, UR3). Об обоснованности и достоверности результатов диссертации свидетельствует также их апробация на международных конференциях (IROS, IJCAI) и наличие значительного числа публикаций: 16 научных работ, в т.ч. 4 статьи в высокорейтинговых международных журналах Q1 (IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Advanced Science, Nano Energy), а также 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты исследования внедрены в научно-образовательный процесс КубГУ и SIAT CAS, что подтверждается актами о внедрении.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Результаты диссертационного исследования обладают как теоретической, так и практической ценностью. Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов гибридного математического моделирования. Формализация механизма оптимального буфера воспроизведения как процесса выборки из неравномерного распределения вносит важный вклад в развитие численных методов для задач стохастической оптимизации. Архитектура LLaKey предлагает формальный способ интеграции семантического вывода больших языковых моделей с дифференциальными уравнениями движения. Практическая значимость диссертации заключается в разработке алгоритмов, которые могут быть непосредственно применены в современной робототехнике. В ходе исследования был разработан программный комплекс в архитектуре ROS,

который позволил значительно сократить время сходимости алгоритма (до 30%) и улучшить процент успеха при выполнении задач. Использование комплекса позволит предприятиям эффективно автоматизировать манипуляции в условиях неопределенности.

Оценка структуры и содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 192 источника, и шести приложений. Материал изложен на 200 страницах, включая 34 иллюстрации и 7 таблиц.

Во *введении* обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи, отражается новизна и значимость результатов.

Первая глава посвящена системному анализу методов интеллектуального управления роботами. Рассмотрены подходы LfD и RL, а также роль больших моделей (LLM/VLM) в проблематике исследования. Выявлена ключевая проблема традиционных методов - «семантическое когнитивное искажение», которая обосновывает необходимость разработки новых гибридных иерархических структур.

Вторая глава посвящена формированию математических основ системы. Подробно описано обобщение модели DMP, формализация задачи через Марковский процесс принятия решений и построение комплексной функции вознаграждения. Ключевым этапом главы является математическое описание механизма оптимального буфера воспроизведения.

Третья глава посвящена разработке численных методов и алгоритмов оптимизации. Описан алгоритм локально-взвешенной регрессии и предложена архитектура LLaKey. Приводятся результаты обширных вычислительных и натурных экспериментов: задача «робохоккей» и тесты в среде RL Bench. Анализ показал значительное превосходство предложенных методов над базовыми аналогами, например, RVT.

Четвертая глава посвящена практическому применению и описанию разработанного программно-аппаратного комплекса на базе ROS. Детально рассмотрена интеграция модулей машинного зрения Kinect V2, генерации траекторий и принятия решений на базе PyTorch и управления физическим роботом, реализующих замкнутый цикл восприятие - планирование - действие.

В *заключении* подведены итоги исследования, показано, что разработанные методы эффективно решают задачу обучения роботов в условиях неопределенности.

Замечания по диссертации

1. Для разработанных алгоритмов обучения с подкреплением, а именно алгоритма детерминированного градиента политики (пункт 3.1.2.1), алгоритма Deep Q-network (пункт 3.1.2.2) и алгоритма глубокого детерминированного политического градиента (пункт 3.1.2.3) не приведены строгие формулировки в формате псевдокода или блок-схем. Указанное обстоятельство затрудняет оценку практической применимости указанных алгоритмов.

2. На рисунке 5 (стр. 93) приведена диаграмма структуры метода имитационного обучения для манипуляций. На указанной диаграмме перемешаны русско- и англоязычные обозначения и имеются опечатки. Не указано, что происходит в случае, когда $r_t \leq 0$. Непонятно, что является начальным и конечным состоянием системы при применении метода.

3. Непонятна структура данных, изложенных в таблице 1 (стр. 112), а также ее назначение.

4. При обсуждении рисунка 15 на стр. 116 автор утверждает: «Оба метода могут эффективно привести модель к цели, но модель, использующая наш метод, может достичь относительно стабильного состояния положительного вознаграждения за меньшее количество шагов». С учетом стохастической природы графика на рисунке 15, такая оценка выглядит весьма поверхностной без статистической обработки результатов эксперимента.

5. Архитектура LLaKey полагается на дообучение большой языковой модели LLaVA. В диссертации не оценены вычислительные затраты и задержки при работе системы в реальном времени. Для задач управления манипулятором, особенно в такой динамичной области как хоккей задержка инференса большой языковой модели может быть критической. Указанное ограничение разработки недостаточно обсуждено в соответствующем разделе диссертации.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационного исследования.

Заключение

Диссертационное исследование Сунь Силуна на тему «Математическое моделирование процессов интеллектуального управления роботизированным манипулятором» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научной задачи разработки эффективных математических моделей и

численных методов для интеллектуальных робототехнических систем. По актуальности темы, глубине проработки поставленных задач, научной и практической значимости полученных результатов диссертация отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Сунь Силун, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой математического моделирования факультета математики и компьютерных наук имени профессора Н.И. Червякова федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», кандидат физико-математических наук
(специальность: 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»), доцент

19 марта 2026 года



Ляхов Павел Алексеевич

Почтовый адрес: 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1

Номер телефона: 8 (8652) 95-88-08

E-mail: pliakhov@ncfu.ru

ПОДПИСЬ
УДОСТОВЕРЯЮ
Логачева А. В.

Подпись Павла Алексеевича Ляхова заверяю:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»