

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 исследования и факторы, определяющие новизну диссертации

Актуальность темы исследования определяется развитием современных интеллектуальных инструментов, позволяющих совершенствовать механизмы управления сложными робототехническими системами. Современные условия функционирования воплощенного искусственного интеллекта характеризуются необходимостью работы в неструктурированных средах с высокой степенью неопределённости, неполнотой и неточностью исходных визуальных данных. Это определяет использование математических подходов, способных интегрировать строгие физические ограничения динамики и причинно-следственные связи, восстанавливаемые на основе данных. Одним из таких подходов является метод гибридного моделирования, используемый в работе Сунь Силуна, позволяющий объединить динамические двигательные примитивы (DMP) и обучение с подкреплением (RL). Данный подход основан на синтезе детерминированных дифференциальных уравнений второго порядка и стохастической оптимизации, что обеспечивает возможность построения адаптивных моделей, пригодных для генерации сложных траекторий в условиях неопределённости.

Анализ существующих численных методов управления роботами показал их ограничения в задачах многошагового планирования. Традиционные математические модели на основе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) сталкиваются с «проклятием размерности», а алгоритмы искусственного интеллекта (в частности, RL) обладают крайне низкой эффективностью выборки. Важным достоинством предложенного в диссертации метода является интеграция высокоуровневого семантического вывода (с помощью больших языковых моделей) с оптимизацией моторных навыков, что позволяет адаптировать алгоритм к специфике многосвязных систем. Применение механизма оптимального буфера воспроизведения (ORB) способствует выявлению наиболее ценного опыта, повышает обоснованность параметрической оптимизации и ускоряет процесс сходимости.

В практике применения методов машинного обучения в робототехнике

выявляется ряд противоречий. Несмотря на очевидные преимущества, существующие архитектуры часто подвержены «семантическому когнитивному искажению», концентрируясь на объектах и игнорируя семантику действий. Кроме того, используемые алгоритмы не обеспечивают полноценную интеграцию когнитивных рассуждений в реальном времени из-за высоких вычислительных затрат. Таким образом, диссертация Сунь Силуна на тему «Математическое моделирование процессов интеллектуального управления роботизированным манипулятором» является актуальной и важной для развития научно-методологического аппарата решения задач управления динамическими системами и их практического использования.

Основные формальные положения работы

Объектом исследования являются методы построения, численной реализации и алгоритмической адаптации гибридных математических моделей управления для многосвязных динамических систем, функционирующих в условиях неопределенности. Предметом исследования выступает класс гибридных математических моделей сложных динамических систем, интегрирующих детерминированное описание на основе систем дифференциальных уравнений с обучаемой нелинейной структурой и стохастических методов оптимизации. Цель работы состоит в повышении вычислительной эффективности процессов обучения (сокращении времени сходимости) и точности выполнения многошаговых задач за счет разработки метода гибридного моделирования и модифицированного численного метода с механизмом оптимального буфера воспроизведения.

Для достижения этой цели соискателем сформулирована и разрешена научная задача, состоящая в разработке математических моделей, численных методов и программного комплекса на базе ROS для интеллектуального управления манипулятором. Соискателем научная задача была декомпозирована на следующую совокупность взаимосвязанных частных задач, которые, в соответствии с паспортом специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, отражают необходимость научного вклада диссертации: 1) Разработка математической модели гибридной динамической системы, объединяющей DMP и RL (соответствует п. 1 паспорта специальности). 2) Разработка численного метода ускорения стохастической оптимизации на основе оптимального буфера воспроизведения (ORB) (соответствует п. 2 паспорта специальности). 3) Разработка метода семантической декомпозиции задач (LLaKey) и сегментации траекторий по «ключевым состояниям» (соответствует п. 5 паспорта специальности). 4) Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ в архитектуре ROS, включающего модули машинного зрения, планирования и управления (соответствует п. 3

паспорта специальности).

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Теоретическая значимость работы заключается в развитии научно-методического аппарата теории численных методов и гибридного моделирования сложных динамических систем. В диссертации формализован механизм оптимального буфера воспроизведения как процесс вероятностной выборки из неравномерного распределения. Разработанные алгоритмы обеспечивают более точное представление причинно-следственных связей (LLaKey) в слабоформализованных задачах и позволяют решать проблему эффективности выборки. На примерах задач нехватательных манипуляций («робохоккей») и сборки показана универсальность предложенного подхода.

Практическая значимость подтверждается наличием актов о внедрении результатов диссертационной работы в деятельность Гуандунской лаборатории искусственного интеллекта и цифровой экономики, а также в учебный процесс и исследования Шэньчжэньского института передовых технологий Китайской академии наук (SIAT CAS) и Кубанского государственного университета.

К числу основных научных результатов, полученных в ходе работы, относятся:

1. Построена математическая модель гибридной системы управления, интегрирующая детерминированную систему DMP со стохастическим процессом RL, что обеспечило баланс между интерпретируемостью и гибкостью.
2. Предложен численный метод ускоренной стохастической оптимизации (ORB), который сокращает время сходимости вычислительного процесса на 30% по сравнению с базовыми алгоритмами равномерной выборки.
3. Исследована и разработана иерархическая архитектура интеллектуального управления LLaKey, преодолевающая «семантическое когнитивное искажение» при выполнении длинноцепочечных задач.
4. Разработан программно-аппаратный комплекс на базе ROS, реализующий замкнутый цикл «восприятие — планирование — действие» с использованием роботов KUKA iiwa и UR3.

Степень достоверности результатов диссертационной работы

Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы подтверждается:

- 1) корректными математическими обоснованиями, использованием аналитических преобразований теории устойчивости (Ляпунова), Марковских процессов принятия решений и численных методов стохастической

оптимизации;

2) непротиворечивостью результатов диссертации с результатами других современных подходов (например, превосходство предложенного метода над алгоритмом RVT с увеличением процента успеха на 27,75% в сложных задачах);

3) широкой апробацией результатов на международных конференциях и масштабными натурными экспериментами на физическом оборудовании.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки) по следующим пунктам:

п. 1) разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений;

п. 2) разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий;

п. 3) реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ;

п. 5) разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента;

п. 8) комплексные исследования научных и технических проблем с применением математического моделирования.

Публикация результатов исследования

По тематике диссертационной работы опубликовано 16 научных работ, в т. ч. в высокорейтинговых международных журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science (Q1, Белый список 1-го уровня) – 4 публикации (IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Advanced Science, Nano Energy). Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Апробация результатов исследования

Результаты исследования были представлены на престижных международных конференциях IROS 2024 и IJCAI 2024, а также на всероссийских конференциях в период 2019-2023 гг., что позволяет сделать вывод о широком информировании научной общественности и качественной апробации.

Реализация и внедрение результатов исследования

Как указывается соискателем, результаты диссертационной работы были внедрены в исследовательскую практику Шэньчжэньского института передовых технологий (SIAT CAS) и в операционную деятельность Гуандунской лаборатории искусственного интеллекта. Дополнительно

результаты работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет».

Анализ автореферата диссертации

Автореферат диссертации, в целом, соответствует основным положениям диссертации и достаточно логично отражает ее содержание. Выводы аргументированы.

Замечания по диссертации

1. Несмотря на то, что во введении к диссертации перечислены три различных подхода к моделированию, в обзорной главе 1 приведены сведения только по одному из них, наиболее близкому к тому, что реализован в диссертации. Как следствие, обоснование выбора подхода, который применяется далее, раскрыто не в полной мере. Необходимо указать классы систем, в которых данный подход является доминирующим, а остальные – неприменимы.
2. На стр. 59 формула (2.18) воспроизводит ядерное направление вынуждающего члена, который по форме представления является непрерывной функцией. Однако уже на рис. 2 (стр. 60) приведена диаграмма весов, несколько из которых – нулевые (т.е. функция в окрестности этих точек может не существовать). Необходимо привести дополнительные аргументы в пользу непрерывности, чтобы использовать формулу (2.18).
3. В подразделах п. 3.1.2 (стр. 79-86) в заголовках заявлены конкретные алгоритмы, однако в тексте раздела вместо них приведено поверхностное описание методов, а сами алгоритмы (как последовательность действий) никак не описаны.
4. На рис. 33 (стр. 150) приведена общая архитектура программного комплекса, а в разделах 4.3-4.6 приведено описание его модулей. Однако в работе отсутствует описание программного комплекса как объекта техники, и технологий: не приведены результаты испытаний, отсутствуют сведения о его производительности и масштабируемости по данным.
5. Заголовок п. 3.1.4.1 (стр. 90) «Численное решение параметров...» сформулирован неудачно, вне рамок русского языка. Вероятно, имелось в виду «Численное определение параметров...».

Замечания снижают общую ценность диссертационной работы, однако не носят критического характера, препятствующего защите.

Заключение

Диссертация Сунь Силуна на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук является самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством и содержащей новые научные результаты решения актуальной задачи разработки математических моделей и численных методов для интеллектуального управления робототехническими системами, имеющего важное значение для развития математического моделирования сложных систем. Диссертационная работа соответствует требованиям ВАК РФ, 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,
директор мегафакультета

Бухановский Александр Валерьевич

трансляционных информационных технологий
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский университет
ИТМО», доктор технических наук
Специальность по защите (2006) 05.11.16 – Информационно-измерительные
и управляющие системы.

(Специальность по работе в диссодете (с 2016) 1.2.2 – Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ.

22.04.2026 года

Почтовый адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

Номер телефона: +7 (812) 909-31-56

E-mail: avbukhanovskii@itmo.ru

Подпись Александра Валерьевича Бухановского заверяю:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
университет ИТМО»

Менеджер ОЭС
Журавлева С.В.

