

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.320.11, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «КУБАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 12.05.2026 г. № 3/26

О присуждении Сунь Силуну, гражданину Китайской Народной Республики, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «**Математическое моделирование процессов интеллектуального управления роботизированным манипулятором**» по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 02.03.2026 г., протокол №2/26, диссертационным советом 24.2.320.11, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет» Министерства науки и высшего образования РФ, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, приказ Минобрнауки России о создании диссертационного совета № 835/нк от 20.04.2023 г.

Соискатель Сунь Силун, 06 сентября 1988 года рождения.

В 2014 году Сунь Силун окончил ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет» по специальности 131000 «Нефтегазовое дело», а в 2021 г. окончил обучение в аспирантуре по направлению подготовки 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет». В настоящее время работает преподавателем кафедры анализа данных и искусственного интеллекта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет» Министерства науки и высшего образования РФ.

Диссертация «Математическое моделирование процессов интеллектуального управления роботизированным манипулятором» выполнена на кафедре анализа данных и искусственного интеллекта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Коваленко Анна Владимировна, заведующая кафедрой анализа данных и искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет».

Официальные оппоненты:

Бухановский Александр Валерьевич, доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», директор мегафакультета трансляционных информационных технологий;

Ляхов Павел Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», заведующий кафедрой математического моделирования–

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону, в своем **положительном отзыве**, утвержденном Мухановым Евгением Леонидовичем, проректором по стратегическому развитию и исследовательской деятельности, и подписанном Угольницким Геннадием Анатольевичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой прикладной математики и программирования Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ, указала, что представленная на защиту диссертационная работа является завершенной научно-квалификационной работой и отвечает требованиям п. 9 Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней. В диссертации содержится решение следующих научных задач, имеющих значение для развития соответствующей отрасли знаний: 1) математическое моделирование гибридных динамических систем для интеллектуального управления роботизированным манипулятором; 2) разработка численного метода ускоренной стохастической оптимизации на основе механизма оптимального буфера воспроизведения; 3) разработка и реализация комплекса проблемно-ориентированных программ в архитектуре ROS, обеспечивающего семантическую декомпозицию задач и иерархическое управление. Автор диссертационной работы, Сунь Силун, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Соискатель имеет 16 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликованы 16 работ, из них 3 статьи в высокорейтинговых международных журналах (Q1), индексируемых в базах WoS и Scopus, 2 статьи в материалах международных конференций (IJCAI, IROS), а также 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ:

1. **X. Sun**, J. Li, A.V. Kovalenko, W. Feng and Y. Ou, "Integrating Reinforcement Learning and Learning From Demonstrations to Learn Nonprehensile Manipulation," in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 20, no. 3, pp. 1735-1744, July 2023, doi: 10.1109/TASE.2022.3185071.
2. Yue Jiang, Lin Fan, Herong Wang, Zehe Luo, Weiguan Zhang, Jie Wang, **Xilong Sun**, Ning Li, Jindong Tian, Highly resilient aerogel/sponge nested structures assisted multimodal tactile sensory system for robotic embodied perception, Nano Energy, Volume 131, Part B, 2024, 110279, ISSN 2211-2855, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110279>.
3. Jiang Y, Fan L, **Sun X**, et al. A Multifunctional Tactile Sensory System for Robotic Intelligent Identification and Manipulation Perception[J]. Advanced Science, 2024, 11(41): 2402705.
4. Zhuo, F., He, Y., Yu, F., Li, P., Zhao, Z., & **Sun, X.** (2024). ABM: Attention before Manipulation. In Proceedings of the Thirty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-24, K. Larson, Ed. International Joint Conferences on Artificial Intelligence Organization (Vol. 8, pp. 1816-1824).
5. Z. Zhao, Y. He, F. Yu, P. Li, F. Zhuo and **X. Sun**, "LLaKey: Follow My Basic Action Instructions to Your Next Key State," 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2024, pp. 9604-9611, doi: 10.1109/IROS58592.2024.10802579.

В этих и остальных работах изложены и обоснованы основные результаты исследования Сунь Силуна в области математического моделирования процессов интеллектуального управления роботизированным манипулятором. Все результаты диссертационной работы получены соискателем лично, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя в работах, опубликованных в соавторстве: в статье [1] автором разработана математическая модель интеграции обучения с подкреплением и обучения через демонстрацию для задач неохватывающих манипуляций, предложен численный метод оптимизации гибридной функции потерь. В статье [2] автору принадлежит разработка численных алгоритмов обработки мультимодальных тактильных данных для управления роботизированным захватом. В статье [3] автором предложена архитектура многофункциональной тактильной сенсорной системы для интеллектуальной идентификации и восприятия манипуляций. В работе [4] автору принадлежит математическая модель механизма внимания для предварительной обработки визуальной информации перед манипулированием. В статье [5] автором разработан алгоритм преобразования базовых инструкций действий в ключевые состояния робота. Первыми авторами статей [4] и [5] являются магистранты, работавшие под научным руководством соискателя. В данных работах автор принимал непосредственное участие на всех этапах исследования, при этом личный вклад автора в каждую из них составляет около 40%.

На диссертацию и автореферат поступили двенадцать отзывов, все положительные:

1) Официального оппонента Бухановского Александра Валерьевича, доктора технических наук, директора мегафакультета трансляционных информационных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург, в котором содержится пять замечаний: 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 виде «Численное определение параметров...».

2) Официального оппонента Ляхова Павла Алексеевича, кандидата физико-математических наук, заведующего кафедрой математического моделирования факультета математики и компьютерных наук имени профессора Н.И. Червякова федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь. В отзыве содержится пять замечаний: 1. Для разработанных алгоритмов обучения с подкреплением, а именно алгоритма детерминированного градиента (пункт 3.1.2.1), алгоритма Deep Q-network (пункт 3.1.2.2) и алгоритма глубокого детерминированного 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 $r_1 < 0$. 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.

3) Ведущей организации — Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону, где имеется четыре замечания: 1. В описании математической модели динамических примитивов движений во второй главе недостаточно подробно рассмотрен вопрос устойчивости системы при наличии сильных внешних возмущений, превышающих стандартные отклонения, рассмотренные в экспериментах. 2. При интеграции визуально-языковых моделей в контур управления (пункт 3.2) автор делает акцент на семантической интерпретации сцены, однако вопрос вычислительных задержек при обращении к большим моделям и их влияния на работу системы в режиме жёсткого реального времени освещен недостаточно полно. 3. В третьей главе при сравнении разработанного гибридного метода с классическими подходами желательно было бы привести более детальные характеристики настроек базовых алгоритмов для более глубокой оценки чистоты эксперимента. 4. В тексте диссертации и автореферата встречаются отдельные опечатки, пунктуационные неточности и стилистические погрешности (например, в оформлении некоторых библиографических ссылок и подписей к рисункам), которые, однако, не влияют на общее понимание сути исследования и научную ценность работы.

4) Доцента Чеканова Владимира Сергеевича, доктора физико-математических наук, заведующего кафедрой информационных технологий Филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет» в г. Ставрополе. В отзыве имеются два замечания: 1. Построенная математическая модель DMP опирается на временной коэффициент масштабирования. Желательно было бы описать математические условия устойчивости модели при необходимости динамического изменения этого параметра в процессе выполнения движения, например, при резком возникновении препятствия. 2. При численном исследовании метода ORB не был приведен детальный анализ влияния размера буфера на устойчивость находимых численных решений. Следовало бы включить этот блок анализа чувствительности алгоритма в диссертационную работу.

5) Профессора Ромма Якова Евсеевича, доктора технических наук, ведущего научного сотрудника, профессора кафедры информатики Таганрогского института имени А.П. Чехова (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)», г. Таганрог. Отзыв содержит три замечания: 1. Для используемых в диссертации средств необходимы динамические системы с целью создания траекторий движения манипулятора. Вся система управления должна быть асимптотически устойчивой динамической системой (стр. 6 автореферата). Однако в последующем тексте реферата не указано ни одного математического способа обеспечения устойчивости, тогда как в условиях неопределенности возмущающие воздействия не только не исключены, но даже не ограничены. Стохастические процедуры параметрической оптимизации на базе обучения с подкреплением не могут подменять собой формального математического доказательства устойчивости получаемой нелинейной системы движения манипулятора. 2. Численные методы решения отмеченных динамических систем в процессе компьютерной реализации не исключают накопления погрешности. Тем более это так при использовании гауссианов (стр. 16 автореферата): в машине они вычисляются через экспоненты, которые резко ограничивают диапазон независимых переменных и вносят неустранимые погрешности, что дополнительно возмущает правые части применяемых динамических систем движения. 3. Результаты сравнительных экспериментов (стр. 21 автореферата) показывают 95.75% успеха на нескольких последовательностях сложных задач и 60% на одной последовательности. Тем не менее, это вероятностные оценки, что не исключает на практике возможности полностью неадекватной реакции манипулятора. Вероятность недопустимой реакции можно было бы снизить или вовсе исключить, если бы удалось конструктивно обеспечить устойчивость динамических систем и ограничить компьютерное накопление погрешности применяемых численных методов в условиях предложенного обучения на основе успешного опыта.

6) Доцента Дубенко Юрия Владимировича, доктора технических наук, заведующего кафедрой информатики и вычислительной техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (КубГТУ), г. Краснодар, имеются два замечания: 1. В некоторых разделах анализа результатов (например, при оценке успешности выполнения задач в симуляционной среде RL Bench) стоило бы усовершенствовать статистическую глубину исследования, например, включить более подробный статистический анализ дисперсии результатов при многократных запусках. 2. Автор недостаточно подробно рассматривает идеи, изложенные в научных трудах одного из основоположников современного обучения с подкреплением, лауреата премии Тьюринга, Ричарда С. Саттона.

7) Профессора Кравец Аллы Григорьевны, доктора технических наук, профессора кафедры САПР и ПК Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ), г. Волгоград. В отзыве содержится четыре замечания: 1. В автореферате не приведены количественные характеристики сокращения времени сходимости алгоритма и повышения точности выполнения многошаговых задач, заявленные в цели исследования. Какие преимущества имеет использование предложенной гибридной модели DMP+RL по сравнению с традиционными методами планирования (например, RRT* или PID-управление) с точки зрения вычислительной эффективности и точности для рассмотренных задач? 2. В автореферате отсутствует подробное описание потенциальных ограничений использования больших визуально-языковых моделей (VLM) в контуре управления реального времени, связанных с задержкой инференса. 3. Использование в формулах (1), (2), (5), (6) номера измерения в виде верхнего индекса приводит к неоднозначному восприятию моделей. 4. В Заключение автореферата не приведены перспективы исследования.

8) Профессора Никульчева Евгения Витальевича, доктора технических наук, профессора кафедры цифровых технологий обработки данных Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, содержит следующее замечание: 1. Для использования методов машинного обучения важной составляющей в качестве модели являются параметры обучающей выборки. Для многопараметрических задач необходимо проведение исследований по зависимости точности моделей от обучающих данных.

9) Доцента Алексева Александра Олеговича, доктора технических наук, начальника управления организации научных исследований федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, имеются два замечания: 1. Работу можно улучшить за счёт более подробного описания методов минимизации рисков при обучении робота в реальной среде. В автореферате описан процесс обучения с подкреплением, но не раскрыты конкретные механизмы предотвращения столкновений или выхода за пределы рабочей зоны в процессе стохастического исследования, что позволило бы сделать рекомендации более прикладными для инженеров. 2. Также полезным было бы расширить раздел, посвящённый сравнению различных алгоритмов аппроксимации для DMP. В тексте упоминается использование метода локально-взвешенной регрессии для обучения весов DMP, но практическое сравнение его эффективности с другими методами регрессии (например, использование нейронных сетей для аппроксимации форсирующего члена) позволило бы повысить ценность работы для исследователей.

10) Старшего научного сотрудника Чжэнь Тяня, доктора философии (PhD) в области робототехники, Гуандунской лаборатории искусственного интеллекта и цифровой экономики (Шэньчжэнь), г. Шэньчжэнь, Китай. Отзыв содержит следующее замечание: 1. В работе предлагается механизм оптимального буфера воспроизведения (ORB), в котором вероятность выборки пропорциональна вознаграждению. Не вполне ясно, как данный метод справляется с ситуациями «редкого вознаграждения» (sparse reward) на начальных этапах обучения, когда в буфере очень мало успешных примеров. Было бы полезно

уточнить, существуют ли механизмы, предотвращающие преждевременную сходимость алгоритма к локальным оптимумам при использовании столь агрессивной стратегии приоритетной выборки.

11) Доцента Рыбина Вячеслава Геннадьевича, кандидата технических наук, доцента кафедры систем автоматизированного проектирования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург, отмечено три замечания: 1. В автореферате справедливо отмечается проблема «жёсткости» традиционных ОДУ-моделей, однако предлагаемый вычислительный аппарат не содержит специализированных численных методов для её преодоления, таких как неявные схемы, BDF-интеграторы или алгоритмы с автоматическим управлением шагом интегрирования. Кроме того, не рассматривается потенциал экстраполяционных подходов для повышения точности аппроксимации траекторий, а оценка погрешности гибридных схем ограничена эмпирическими метриками без строгого математического обоснования. 2. В работе отсутствует строгое теоретическое обоснование сходимости предложенного механизма оптимального буфера воспроизведения в условиях высокоразмерных пространств состояний и стохастических возмущений. Представленные доказательства носят преимущественно экспериментальный характер, что не позволяет оценить гарантированные границы применимости метода за пределами тестовых бенчмарков. 3. Апробация программных модулей проведена на ограниченном наборе задач манипулирования, что не раскрывает вопросов масштабируемости комплекса при переходе к системам с большим числом степеней свободы или к задачам с непрерывным контактным взаимодействием. Кроме того, в автореферате не приведены требования к вычислительным ресурсам и программно-аппаратной конфигурации, необходимые для независимого воспроизведения экспериментальных результатов.

12) Доцента Ласкина Михаила Борисовича, доктора экономических наук, кандидата физико-математических наук, главного научного сотрудника лаборатории интеллектуальных систем Санкт-Петербургского Федерального Исследовательского центра РАН (СПИИРАН), профессора кафедры информационных систем в экономике Петербургского Государственного Университета (г. Санкт-Петербург), имеются два замечания: 1. В работе рассмотрены примеры манипулирования твердыми объектами. Желательно показать, какие еще физические свойства объектов могут влиять на результативность предложенной гибридной модели DMP+RL. 2. Недостаточно полно проведен сопоставительный анализ результатов между имитационными и натурными экспериментами на роботе KUKA. Более детальный анализ проблемы переноса обучения позволил бы лучше оценить устойчивость разработанных численных методов к шумам реальных сенсоров.

В отзывах отмечено, что все указанные замечания не снижают научной ценности и практической значимости диссертационной работы.

На все вопросы и замечания оппонентов и ведущей организации, а также на замечания в отзывах, поступивших на автореферат и диссертацию, соискатель привел аргументированные ответы.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования

«Южный федеральный университет» существует известная научная школа (Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича), представители которой занимаются математическим моделированием сложных систем, информационными технологиями и разработкой программных комплексов, что подтверждается наличием публикаций сотрудников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, и изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования.

Выбор официальных оппонентов обосновывается сферой их научных интересов в области технологий искусственного интеллекта, высокопроизводительных вычислений и математического моделирования, их способностью определить научную и практическую ценность диссертации, что подтверждается наличием публикаций оппонентов по теме диссертации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, и изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан метод математического моделирования гибридных динамических систем, интегрирующий детерминированное описание траекторий на основе динамических примитивов движения (DMP) со стохастическими процедурами параметрической оптимизации;

предложен численный метод ускоренной стохастической оптимизации стратегий управления с применением механизма взвешенной выборки данных;

разработан метод семантической декомпозиции задач управления, формализующий преобразование высокоуровневых инструкций в последовательность динамических примитивов через выделение «ключевых состояний»;

реализован комплекс проблемно-ориентированных программ в архитектуре ROS, обеспечивающий интеграцию модулей машинного зрения, планирования траекторий и принятия решений.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

разработана математическая модель гибридного управления, интегрирующая детерминированные динамические системы (на основе DMP) и стохастические методы оптимизации (RL), что вносит вклад в теорию построения систем управления для многосвязных динамических систем;

дано математическое описание и проведена формализация механизма оптимального буфера воспроизведения (ORB) как процесса выборки из неравномерного, зависящего от вознаграждения распределения, что развивает теорию численных методов для обучения с подкреплением;

предложена и теоретически обоснована иерархическая архитектура управления LLaKey, представляющая собой формальный способ интеграции высокоуровневого семантического вывода больших языковых моделей с низкоуровневым моторным управлением;

формализован процесс семантической декомпозиции задач управления, описывающий математическое отображение лингвистических инструкций планировщика в последовательность динамических примитивов через выделение «ключевых состояний»;

доказана эффективность применения механизма взвешенной выборки из буфера воспроизведения для повышения скорости сходимости нейросетевых моделей и стабильности процесса обучения в условиях неопределенности.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан комплекс проблемно-ориентированных программ в архитектуре ROS, позволяющий проводить вычислительные и натурные эксперименты по интеллектуальному управлению роботом-манипулятором. Программный комплекс обеспечивает сквозную интеграцию модулей машинного зрения, планирования траекторий (на основе динамических примитивов движений) и принятия решений (на основе обучения с подкреплением). Кроме того, благодаря внедрённой иерархической архитектуре LLaKey с использованием больших визуально-языковых моделей, комплекс позволяет декомпозировать сложные пользовательские инструкции на естественном языке в последовательность элементарных робототехнических действий. Комплекс программ для ЭВМ может быть использован на практике, поскольку позволяет в режиме реального времени управлять физическими роботами-манипуляторами (такими как KUKA и UR3) при выполнении как одиночных сложных двигательных навыков, так и многошаговых задач в неструктурированных средах. Разработанное программное обеспечение подтверждено тремя свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ;

определены перспективы практического использования разработанных гибридных математических моделей и численных методов для создания промышленных роботизированных систем нового поколения и интеллектуальных ассистентов для взаимодействия с человеком; доказано, что использование метода обучения с механизмом оптимального буфера воспроизведения (ORB) позволяет значительно сократить время и затраты на внедрение и перенастройку роботов на реальном производстве;

создана система практических рекомендаций по подготовке обучающих данных для командной визуально-языковой модели путем сегментации экспертных демонстрационных траекторий по «ключевым состояниям»; результаты диссертационного исследования успешно внедрены в образовательный процесс и исследовательскую практику ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», Шэньчжэньского института передовых технологий (SIAT CAS) и Гуандунской лаборатории искусственного интеллекта и цифровой экономики.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на использовании строгого математического аппарата, включающего теорию динамических систем, теорию стохастического оптимального управления и методологию глубинного обучения, и проверена сопоставлением с экспериментальными результатами на общепринятом бенчмарке RL Bench, а также в ходе натурных испытаний на физических роботах-манипуляторах;

идея базируется на обобщении и критическом анализе работ мирового уровня по созданию гибридных систем управления, интеграции имитационного обучения с обучением с подкреплением и применению больших языковых и визуально-языковых моделей в робототехнике;

использованы методы численного решения систем дифференциальных уравнений, аппарата Марковских процессов принятия решений, современные архитектуры нейронных сетей и распределенные программные технологии на базе ROS;

установлено качественное и количественное превосходство авторских результатов над современными аналогами и базовыми подходами на основе обучения с подкреплением со стандартным буфером воспроизведения.

Личный вклад соискателя заключается в постановке задач диссертационного исследования, построении и анализе математической модели гибридной системы управления, интегрирующей динамические двигательные примитивы и обучение с подкреплением, разработке математической модели оптимизированного процесса обучения и численного метода на основе оптимального буфера воспроизведения, теоретическом обосновании иерархической архитектуры управления для семантической декомпозиции задач, разработке метода сегментации демонстраций по «ключевым состояниям», реализации архитектуры программного комплекса на базе ROS, а также в проведении серий вычислительных экспериментов в симуляционной среде и натурных испытаний с физическими роботами-манипуляторами для верификации предложенных подходов.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. Несмотря на перечисление в работе различных подходов к моделированию, в обзорной главе подробно представлен лишь один из них. Необходимо более полно обосновать выбор именно гибридного метода и указать классы систем, в которых данный подход является доминирующим.

2. Недостаточно полно обоснован тип функции $f(x)$, связанной с функцией Гаусса.

3. Поскольку Архитектура LLaKey опирается на дообучение большой визуально-языковой модели, в работе недостаточно обсуждены вычислительные затраты и задержки инференса, которые могут быть критическими для управления манипулятором в реальном времени.

4. Стохастические процедуры параметрической оптимизации на базе обучения с подкреплением не могут в полной мере подменять собой формальное математическое доказательство устойчивости получаемой нелинейной системы движения манипулятора.

5. Неясно, как механизм оптимального буфера воспроизведения (ORB) справляется с ситуациями «редкого вознаграждения» на начальных этапах обучения и существуют ли механизмы, предотвращающие преждевременную сходимость алгоритма к локальным оптимумам.

Соискатель Сунь Силун ответил на заданные в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Преимущество гибридной архитектуры заключается в иерархической декомпозиции: использование DMP гарантирует гладкость траектории и избавляет от высокочувствительного геометрического поиска, свойственного RRT*, обеспечивая высокую обобщающую способность при меньшем количестве итераций.

2. Функция $f(x)$ построена как взвешенная сумма набора гауссовых базисных функций, чтобы гарантировать, что траектория движения робота всегда остаётся непрерывной и гладкой. Это обусловлено тем, что гауссовы функции бесконечно дифференцируемы. При наличии достаточного количества базисных функций линейная комбинация последовательно расположенных гауссовых функций позволяет с любой заданной точностью аппроксимировать любую непрерывную и гладкую кривую на конечном интервале.

3. В архитектуре LLaKey основной акцент сделан на декомпозиции процессов планирования задач и выполнения движений. Для рассматриваемого класса квазистатических задач задержка инференса большой модели изолирована на этапе планирования и не оказывает критического влияния на успешность выполнения операций.

4. Согласно, что стохастическая сходимость не эквивалентна строгому доказательству. Базовая модель DMP сама по себе обладает локальной асимптотической устойчивостью, а вопрос конструктивного доказательства глобальной устойчивости при нелинейных возмущениях является задачей, выходящей за пределы специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

5. Для исключения проблемы «холодного старта» в настройках среды применялись «плотные/формируемые вознаграждения», что позволяет буферу ORB быстро накапливать образцы. Агрессивная стратегия выборки была выбрана намеренно для ускорения сходимости в рамках специфических пространственных задач. Для обеспечения максимальной скорости в низкоуровневом контуре управления использовались стандартные явные схемы интегрирования, а проблема жесткости минимизировалась через нормализацию вынуждающего члена и ограничение амплитуды сигналов в пространстве действий.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям (пп. 9–14), установленным Положением о присуждении ученых степеней, утверждённым постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 (со всеми последующими изменениями), предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

За разработку метода математического моделирования гибридных динамических систем, объединяющего детерминированные динамические примитивы движения и стохастические процессы оптимизации, развитие эффективных численных методов ускоренной стохастической оптимизации на основе механизма оптимального буфера воспроизведения, а также создание комплекса программ для проведения вычислительных экспериментов по интеллектуальному управлению роботизированным манипулятором, что можно классифицировать как решение научной задачи, имеющей значение для развития физико-математических наук, присудить Сунь Силуну ученой степени кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 10 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 12 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 10 (десять), против присуждения ученой степени – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

12 мая 2026 г.



Уртенев Махамет Хусеевич

Чубырь Наталья Олеговна