

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
учреждения «Федеральный
исследовательский центр «Информатика и
управление» Российской академии наук»,



М.А. Посыпкин

« 7 » 02 20 26 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской академии наук»

Диссертация Яковлева Константина Сергеевича на тему «Методы и алгоритмы эвристического поиска на графах регулярной декомпозиции в задачах планирования траекторий мобильных роботов» выполнена в отделе №71 «Интеллектуальные динамические системы и когнитивные исследования» отделения №7 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН).

Яковлев Константин Сергеевич, 1983 года рождения, гражданин Российской Федерации, в 2004 году окончил бакалавриат Российского университета дружбы народов (РУДН) по направлению обучения Прикладная математика и информатика, в 2006 году – магистратуру РУДН по направлению обучения Прикладная математика и информатика, в 2009 году – очную аспирантуру РУДН по направлению Теоретические основы информатики. В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Исследование методов и разработка алгоритмов автоматического планирования траектории на плоскости» (специальность 05.13.17 – Теоретические основы информатики, место защиты – Институт программных систем им. А.К. Айламазяна Российской академии наук). С 2011 по 2015 гг. работал в Институте системного анализа Российской академии наук, с 2015 г. по настоящее время – в ФИЦ ИУ РАН.

В период подготовки диссертации с 2018 по настоящее время соискатель работал в отделе №71 ФИЦ ИУ РАН в должности ведущего научного сотрудника.

По итогам обсуждения диссертации «Методы и алгоритмы эвристического поиска на графах регулярной декомпозиции в задачах планирования траекторий мобильных роботов» принято следующее заключение.

Актуальность темы

Разработка вычислительно эффективных методов поиска пути на графах, вложенных в метрическое пространство, в частности – графах регулярной декомпозиции, является актуальной и практически востребованной научной задачей, требующей для своего решения новых научных подходов.

Обоснованность научных положений

Все теоретические результаты, полученные в диссертационном исследовании, корректно обоснованы, сопровождаются строгими математическими доказательствами и подтверждены экспериментальными исследованиями.

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов

Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректным применением используемого математического аппарата (дискретная математика, теория графов, математическая логика), согласованностью результатов проведенных экспериментальных исследований с известными теоретическими положениями в области методов поиска пути на графах, апробацией результатов на ведущих Российских и мировых конференциях в области искусственного интеллекта, автоматического планирования и робототехники.

Научная новизна работы

Разработан новый метод поиска пути на графе регулярной декомпозиции, основанный на принципе безопасно-интервального планирования и оригинальном способе исследования пространства состояний, позволяющим сокращать число вычислительно ресурсоемких операций. Указанный метод, в отличие от аналогов, впервые допускает использование переходов между произвольными вершинами графа, гарантируя при этом отыскание оптимальных решений задачи планирования. Предложены оригинальные методы поиска субоптимальных решений этой задачи, отличающихся повышенной вычислительной эффективностью в практических задачах.

Предложен метод построения совокупности неконфликтных путей на графе регулярной декомпозиции, опирающийся на принцип конфликтно-ориентированного поиска, и ряд оригинальных техник, направленных на повышение вычислительной эффективности планирования. Указанный метод, в отличие от аналогов, допускает использование переходов между произвольными вершинами графа и гарантирует отыскание решений с заданными пользователем ограничениями на стоимость решения (в т.ч. получение оптимальных решений). Разработан новый алгоритм поиска субоптимальных решений указанной задачи на основе приоритизированного планирования.

Предложено семейство алгоритмов поиска пути на графе регулярной декомпозиции, позволяющих учитывать заданные пользователем геометрические ограничения в виде максимального угла отклонения между сегментами пути. Исследованы теоретические свойства алгоритмов семейства. Сформулированы и доказаны гарантии отыскания решений в определенном классе.

Предложены новые типы эвристических функций для поиска пути на графе регулярной декомпозиции, которые для каждого экземпляра задачи поиска учитывают его специфику и успешно аппроксимируются современными нейросетевыми моделями. Разработаны алгоритмы поиска, основанные на комбинации предложенных обучаемых эвристик и классических техник систематизации поиска, обладающие строгими теоретическими гарантиями. В частности, гарантируется корректность построенного решения вне зависимости от выходных значений нейросетевой модели.

Теоретическая значимость

Предложен ряд новых теоретически-обоснованных способов элиминации перебора в задачах поиска пути (совокупности путей) на графах, вложенных в метрическое пространство, на основе которых разработаны методы и алгоритмы задачи планирования пути на графах регулярной декомпозиции. Исследованы свойства предложенных алгоритмов и доказан ряд теорем о предоставляемых гарантиях. Предложен способ интеграции обучаемых (с помощью современных искусственных нейронных сетей) эвристик и алгоритмов классического поиска, гарантирующий построение корректного решения для произвольных задач планирования пути на графе регулярной декомпозиции. Создание указанных методов и алгоритмов расширяет и обогащает основы теории графов и искусственного интеллекта и может служить фундаментом для дальнейших исследований в этой области.

Практическая значимость

Созданы программные реализации предложенных методов и алгоритмов, которые могут использоваться в системах управления мобильными роботами для повышения степени их автономности за счет повышения эффективности решения задач планирования траектории. Ряд разработанных алгоритмов был апробирован в ходе работы на колесных мобильных роботах. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили применимость предлагаемых подходов на практике.

Апробация работы

Основные материалы диссертации и результаты исследования докладывались на ведущих профильных научных конференциях, симпозиумах и семинарах, среди которых можно отметить следующие:

- Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» (САИТ) 2015 (Светлогорск, Россия);
- Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ), 2016 (Иннополис, Россия), 2017 (Казань, Россия), 2019 (Санкт-Петербург, Россия), 2021 (Москва, Россия);
- Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ) 2016 (Смоленск, Россия), 2018 (Москва, Россия), 2021 (Таганрог, Россия);
- Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника» (ЭР) 2016 (Санкт-Петербург, Россия);
- Совместный семинар Российской ассоциации искусственного интеллекта и Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (семинар РАИИ-ФИЦ ИУ РАН) 2023 (Москва, Россия), 2025 (Москва, Россия);
- German Conference on Artificial Intelligence (KI) 2015 (Дрезден, Германия), 2019 (Кассель, Германия);
- Workshop on Multi-agent Pathfinding (WoMAPF) 2016 (Нью-Йорк, США), 2019 (Макао, КНР), 2026 (Сингапур);
- International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS) 2017 (Питтсбург, США), 2020 (Франция, онлайн), 2021 (КНР, онлайн);
- International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS) 2018 (Стокгольм, Швеция);
- International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO) 2020 (Франция, онлайн);
- European Conference on Mobile Robotics (ECMR) 2019 (Прага, Чехия);
- Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICR) 2019 (Стамбул, Турция), 2020 (Россия, онлайн);
- Symposium on Robot Control (SyRoCo) 2022 (Япония, онлайн);
- Conference on Artificial Intelligence (AAAI) 2023 (США, онлайн);
- International Symposium on Combinatorial Search (SoCS) 2024 (Канада, 2024);
- Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 2024 (ОАЭ, 2024), 2025 (Ханчжоу, КНР).

Ряд результатов был получен в процессе выполнения работ по грантам Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), Российского научного фонда (РНФ) и грантов Министерства науки и высшего образования РФ (МНВО), среди которых стоит отдельно отметить грант №075-15-2024-544, “Математические модели и численные методы как основа для разработки робототехнических комплексов, новых материалов и интеллектуальных технологий конструирования” (МНФО РФ).

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях

Основные результаты диссертационного исследования изложены в 54 научных публикациях общим объемом 63.88 п.л, личный вклад автора составляет 47.91 п.л. Среди опубликованных работ имеются 12 публикаций в ведущих отечественных журналах (К1/К2 Списка ВАК); 3 публикации в ведущих зарубежных журналах (Q1-Q3 по Scopus/WoS, приравненные к К1 Списка ВАК); 26 публикаций в сборниках трудов ведущих конференций, индексируемых в международных базах данных (Scopus/WoS), в т.ч. 6 работ – в сборниках трудах конференций, имеющих рейтинг А/А* по CORE; 13 публикаций в сборниках трудов конференций, индексируемых в РИНЦ.

Среди наиболее значимых публикаций можно отметить следующие:

1. Яковлев К.С., Макаров Д.А., Баскин Е.С. Метод автоматического планирования траектории беспилотного летательного аппарата в условиях ограничений на динамику полета // Искусственный интеллект и принятие решений, 4, 2014. С.3-17. **(ВАК К1, RSCI)**
2. Макаров Д.А., Панов А.И., Яковлев К.С. Архитектура многоуровневой интеллектуальной системы управления беспилотными летательными аппаратами // Искусственный интеллект и принятие решений, 3, 2015. С.18-32. **(ВАК К1, RSCI)**
3. Яковлев К.С., Баскин Е.С., Андрейчук А.А. Метод автоматического планирования совокупности траекторий для навигации беспилотных транспортных средств // Управление большими системами. Выпуск 58. 2015. С. 306-342. **(ВАК К1, RSCI)**
4. Emel'yanov, S., Makarov, D., Panov, A., Yakovlev, K. Multilayer cognitive architecture for UAV control // Cognitive Systems Research, 39, 2016. P. 58-72 **(WoS Q2, Scopus Q2, ВАК К1 (прирав.))**
5. Панов А.И., Яковлев К.С. Взаимодействие стратегического и тактического планирования поведения коалиции агентов в динамической среде // Искусственный интеллект и принятие решений, 4, 2016. С. 68-78. **(ВАК К1, RSCI)**
6. Андрейчук А.А., Яковлев К.С. Методы планирования траектории на плоскости с учетом геометрических ограничений // Известия РАН. Теория и системы управления, 6, 2017. С. 125-140. **(RSCI, ВАК К1 через приравнение RSCI)**
7. Яковлев К.С. АА-SIPP: Алгоритм планирования в среде с динамическими препятствиями // Искусственный интеллект и принятие решений, 1, 2020. С. 49-59. **(ВАК К1, RSCI)**
8. Яковлев К. С., Белинская Ю. С., Макаров Д. А., Андрейчук А. А. Безопасно-интервальное планирование и метод накрытий для управления движением мобильного робота в среде со статическими и динамическими препятствиями // Автоматика и телемеханика, 6, 2022. С. 96-117. **(RSCI, ВАК К1 (прирав.))**
9. Яковлев К.С., Андрейчук А.А., Скрынник А.А., Панов А.И. Методы планирования и обучения в задачах многоагентной навигации // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления, Т. 508, № 1, 2022. С. 88-93. **(RSCI, ВАК К1 (прирав.))**
10. Kirilenko D., Andreychuk A., Panov A.I., Yakovlev K. Generative Models for Grid-Based and Image-Based Pathfinding // Artificial Intelligence, 338, 2025. pp. 104238. **(Scopus Q1, WoS Q1, ВАК К1 (прирав.))**
11. Yakovlev, K., Andreychuk, A. Any-Angle Pathfinding for Multiple Agents Based on SIPP Algorithm // Proceedings of the 27th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2017). pp. 586-593. **(Scopus, Core A*)**
12. Yakovlev K., Andreychuk A., Stern R. Revisiting Bounded-Suboptimal Safe Interval Path Planning // Proceedings of the 30th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2020). pp. 300-304. **(Scopus, Core A*)**
13. Yakovlev K., Andreychuk A. Towards Time-Optimal Any-Angle Path Planning With Dynamic Obstacles // Proceedings of the 31st International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2021). pp. 405-414. **(Scopus, Core A*)**

14. Kirilenko D., Andreychuk A., Panov A., Yakovlev K. TransPath: Learning Heuristics For Grid-Based Pathfinding via Transformers // Proceedings of the 37th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2023). pp. 12436-12443. **(Scopus, Core A*)**
15. Yakovlev K., Andreychuk A., Stern R. Optimal and Bounded Suboptimal Any-Angle Multi-agent Pathfinding // In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotic Systems (IROS 2024). pp. 7996-8001. **(Scopus, Core A)**
16. Yakovlev K., Baskin E., Hramoin I. Grid-based angle-constrained path planning // Proceedings of The 38th Annual German Conference on Artificial Intelligence (KI 2015). pp. 208-221. **(Scopus)**
17. Andreychuk A., Soboleva N., Yakovlev K. eLIAN: Enhanced Algorithm for Angle-Constrained Path Finding // Proceedings of the 16th Russian Conference on Artificial Intelligence (RCAI-2018). pp. 206-217. **(Scopus)**
18. Yakovlev K., Andreychuk A., Belinskay Ju., Makarov D. Combining Safe Interval Path Planning and Constrained Path Following Control: Preliminary Results // Proceedings of the 4th International Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICR 2019). pp. 310-319. **(Scopus)**
19. Yakovlev K., Andreychuk A., Vorobyev V. Prioritized Multi-Agent Path Finding for Differential Drive Robots // Proceedings of the 2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR 2019). pp. 1-6. **(Scopus)**
20. Dergachev S., Muravyev K., Yakovlev K. 2.5D Mapping, Pathfinding and Path Following For Navigation Of A Differential Drive Robot In Uneven Terrain // Proceedings of 13th IFAC Symposium on Robot Control (SyRoCo 2022). pp. 80-85. **(Scopus)**
21. Андрейчук А.А., Яковлев К.С. Планирование траектории на плоскости с учетом размера агента (мобильного робота, беспилотного транспортного средства) // Четвертый Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2017). С.107-117. **(РИНЦ)**

Публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают её основные положения. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим.

Ценность научных работ соискателя ученой степени

Ценность научных работ соискателя определяется возможностью их применения для автономной навигации мобильных робототехнических систем, в том числе беспилотных транспортных средств.

Соответствие паспорту специальности

Результаты диссертационного исследования соответствуют паспорту специальности

1.2.1 – Искусственный интеллект и машинное обучение, а именно:

- пункту 16 «Исследования в области специальных методов оптимизации, проблем сложность и элиминации перебора, снижения размерности»;
- пункту 6 в части «Разработка систем управления с использованием систем искусственного интеллекта и методов машинного обучения в том числе – управления роботами, автомобилями, БПЛА и т.п.»;
- пункту 5 в части «Исследования в области совместного применения методов машинного обучения и классического математического моделирования»;
- пункту 2 в части «Исследования в области оценки качества и эффективности алгоритмических и программных решений для систем искусственного интеллекта и машинного обучения».

Диссертация соответствует требованиям п.14 Положения о присуждении ученых степеней (Положение правительства РФ №842 от 24.09.2013 в действующей редакции) и не содержит заимствованного материала без ссылки на авторов.

Диссертация Яковлев Константина Сергеевича «Методы и алгоритмы эвристического поиска на графах регулярной декомпозиции в задачах планирования траекторий мобильных роботов» является законченной научно-квалификационной работой, результаты которой можно квалифицировать как научное достижение в области методов эвристического поиска и автоматического планирования, имеющее важное значение для создания эффективных систем автономной навигации мобильных роботов. Диссертация соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.1 – Искусственный интеллект и машинное обучение в диссертационном совете 24.1.224.03 при Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук».

Заключение принято на заседании семинара отделения 7 ФИЦ ИУ РАН 11 февраля 2026 г., протокол №2. Присутствовало на заседании 15 человек. Результаты голосования: «за» – 15 человек, «против» – 0, «воздержалось» – 0.

Председательствующий на заседании:
Руководитель Отделения 7
доктор технических наук

О.Г. Григорьев

Секретарь семинара
руководитель Отдела 72
доктор технических наук

И.В. Смирнов

