

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора

ИПС им. А.К. Айламазяна РАН
кандидат технических наук

И.П. Тищенко

« » апреля 2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт программных систем им. А.К. Айламазяна Российской академии наук
на диссертацию Яковлева Константина Сергеевича
«Методы и алгоритмы эвристического поиска на графах регулярной декомпозиции в
задачах планирования траекторий мобильных роботов», представленную на
соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности
1.2.1 – Искусственный интеллект и машинное обучение

Актуальность темы диссертации

Задачи планирования являются основополагающими в искусственном интеллекте, при этом планирование траекторий для мобильных агентов (например, роботов) образует отдельный класс задач, обособленный ввиду высокой востребованности в различных практических применениях. Основным инструментом для решения задач планирования является эвристический поиск, в частности алгоритмы семейства A* и их многочисленные модификации. Однако даже современные алгоритмы не в состоянии полностью купировать основополагающую проблему планирования – проблему избыточного перебора. Работа Яковлева К.С. направлена на разработку, теоретическое и эмпирическое исследование новых методов и алгоритмов планирования, основанных на оригинальных способах элиминации перебора, использующих особенности рассматриваемой предметной области, и позволяющих эффективно решать задачи с учетом множества практически важных ограничений (учет динамики окружающей среды, косвенный учет кинематических ограничений робота, учет ограничений, возникающих в мульти-агентных системах и др.). Исследование крайне актуально в контексте создания современных систем управления робототехническими комплексами, и представляет собой существенный вклад в решение фундаментальной проблемы элиминации перебора при планировании.

Характеристика содержания диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 350 страниц. В работе имеется 108 рисунков и 22 таблицы. Список литературы содержит 253 наименования. Работа написана ясным языком и логично структурирована.

Во **введении** обосновывается актуальность работы и характеризуется степень разработанности темы, формулируются задачи и цель исследования, излагается научная новизна и практическая значимость, описываются результаты, выносимые на защиту.

В **главе 1** вводятся основные понятия, задача планирования траектории формализуется как задача поиска пути на графе особой структуры – графе регулярной декомпозиции. Проводится развёрнутый анализ современного состояния исследований в предметной области. Показывается, что известные к настоящему времени подходы к планированию и поиску имеют существенные ограничения, что обосновывает необходимость разработки новых методов элиминации перебора для разработки эффективных алгоритмов поиска пути на графах регулярной декомпозиции в задачах планирования траекторий мобильных роботов.

В **главе 2** исследуются задачи поиска пути на графе, проходимость вершин и рёбер которого изменяется со временем, что соответствует задаче планирования траектории для робота в среде с движущимися препятствиями. Предлагается новый способ сокращения перебора и алгоритм его реализующий, исследуются теоретические свойства алгоритма и доказываются соответствующие теоремы, в т.ч. числе теорема о полноте и об оптимальности отыскиваемых решений. Предлагаются модификации алгоритма для эффективного поиска субоптимальных решений. Проводится обширное экспериментальное исследование разработанных алгоритмов с использованием общеизвестной коллекции задач планирования, подтверждающие практическую эффективность предлагаемых подходов.

В **главе 3** рассматривается задача поиска совокупности неконфликтных путей на графе, что соответствует задаче централизованного планирования множества неконфликтных траекторий для группы мобильных роботов, функционирующих в общем рабочем пространстве. Для решения этой задачи предлагаются алгоритмы трёх разных классов: алгоритм, гарантирующий отыскание оптимальных решений; алгоритм поиска решений, стоимость которых не превосходит стоимость оптимальных в заданное число раз (т.н. ограниченная субоптимальность); алгоритм поиска субоптимальных решений. Указанные алгоритмы исследуются теоретически и эмпирически (в том числе и на реальных робототехнических системах).

В **главе 4** решается задача поиска пути с ограничением на максимальный угол отклонения между смежными прямолинейными сегментами, что позволяет косвенно учитывать кинематические ограничения мобильных роботов при планировании. Предлагаются два параметризованных алгоритма решения поставленной задачи, гарантирующих полноту и оптимальность относительно вполне определенного класса задач. Доказываются соответствующие теоремы. Проводится обширное экспериментальное исследование алгоритмов, подтверждающие эффективность предлагаемых техник поиска и превосходство разработанных алгоритмов перед аналогами.

В **главе 5** представляются методы автоматического конструирования эвристических функций, оценивающих расстояние на графе, и способов их интеграции с алгоритмами поиска пути. Описываются два новых типа эвристических функции и способы их аппроксимации с помощью глубоких искусственных нейронных сетей. Предлагается оригинальная архитектура нейросетей, описывается способ её обучения и разрабатываются наборы данных для обучения. Предлагаются гибридные алгоритмы планирования, комбинирующие предложенные эвристики с классическими техниками систематического поиска и, за счет этого, сохраняющие теоретические гарантии корректности. Доказываются соответствующие утверждения. Предложенный подход расширяется на задачи планирования пути по спутниковому снимку местности. Проводится экспериментальное исследование предложенных алгоритмов, показывается их существенное превосходство над современными аналогами.

В **заключении** дана краткая характеристика проведенного исследования, сформулированы основные научные результаты.

Новизна и достоверность исследования и полученных результатов

В работе получены следующие **новые** научные результаты.

1. Разработан новый алгоритм поиска пути на динамическом графе регулярной декомпозиции, допускающий переходы между произвольными вершинами, что позволяет сократить длину пути и время достижения цели. Для элиминации перебора в алгоритме используется оригинальный подход к обращению поиска. Алгоритм теоретически исследован, установлена его временная сложность, доказаны теоремы о полноте и оптимальности возвращаемых решений.
2. Предложен метод и алгоритм поиска пути на динамическом графе регулярной декомпозиции, допускающий переходы между произвольными вершинами и использующий для сокращения перебора эвристическую процедуру изменения родительского узла в дереве поиска. Алгоритм гарантирует построение пути при его наличии в исходной топологии графа, при этом стоимость найденного пути не превышает стоимости оптимального пути в исходной топологии.
3. Разработан ряд новых вычислительно-эффективных субоптимальных методов поиска пути на динамическом графе регулярной декомпозиции. Методы основаны на применении решетки переходов и регулируемого коэффициента субоптимальности. Проведены их экспериментальные исследования.
4. Предложен новый метод и алгоритм построения совокупности неконфликтных траекторий на графе регулярной декомпозиции, основанный на принципе конфликтно-ориентированного поиска и использующий для элиминации перебора оригинальные подходы конструирования мульти-ограничений при поиске. Алгоритм гарантирует отыскание оптимального решения. Предложена модификация алгоритма, основанная на дополнительной фокусировке поиске с помощью вторичной эвристической функции, позволяющая конструировать решения, стоимость которых, не превосходит стоимость оптимальных решений более чем в заданное пользователем число раз.
5. Предложены оригинальные эвристики для приоритизированного планирования и соответствующий метод построения совокупности неконфликтных путей на графе. Указанный метод позволяет в сотни раз повысить скорость получения решений на практике, при этом стоимость этих решений, по результатам экспериментов, лишь незначительно превышает стоимость оптимальных решений. Проведена апробация алгоритма на реальных колесных роботах.
6. Предложено семейство алгоритмов поиска на графе регулярной декомпозиции, допускающих перемещение между произвольными вершинами и учитывающих геометрические ограничения, в частности – ограничение на максимальный угол поворота между смежными прямолинейными сегментами траектории. Исследованы теоретические свойства разработанных алгоритмов, сформулированы и доказаны гарантии нахождения решений в заданном классе решений.
7. Предложены новые типы эвристических функций для поиска пути на графе регулярной декомпозиции, учитывающие специфику отдельного экземпляра задачи и эффективно аппроксимируемые современными нейросетевыми моделями. Разработаны гибридные алгоритмы планирования, комбинирующие указанные эвристические функции и классические принципы систематического поиска, что позволяет гарантировать корректность получаемых ответов вне зависимости от предсказаний нейронной сети. Разработанный подход к решению задачи поиска пути, сочетающий обучаемые эвристики и классические алгоритмы, успешно применен для планирования траектории по спутниковым снимкам местности.

Достоверность результатов подтверждается:

- детальным описанием разработанных методов и алгоритмов;
- строгими математическими доказательствами, опирающимися на корректное использование аппарата дискретной математики, теории графов, математической логики.
- большим объёмом проведенных экспериментальных исследований с использованием общедоступных и распространённых в области коллекций данных; согласованием полученных результатов с теоретическими положениями;
- публикациями в ведущих рецензируемых журналах и представлением на профильных международных конференциях в области искусственного интеллекта, автоматического планирования и робототехники;
- апробацией на реальных робототехнических системах.

Значимость полученных результатов

Работа существенно развивает теоретические основы эвристического поиска при решении задач планирования. Автором предложены и строго обоснованы новые методы элиминации перебора, включая принцип обратного раскрытия состояний, оригинальные техники формирования мульти-ограничений в конфликтно-ориентированном планировании, а также динамическую подстройку параметра дискретизации для учёта геометрических ограничений. Для каждого из разработанных алгоритмов, использующих указанные техники, доказаны свойства полноты, оптимальности или ограниченной субоптимальности. Предложена новая парадигма гибридизации обучаемых (с помощью глубоких нейронных сетей) эвристических функций с классическими алгоритмами систематического поиска, сохраняющая теоретические гарантии корректности решений вне зависимости от качества аппроксимации. В совокупности эти результаты расширяют теоретический фундамент в области методов автоматического планирования и вносят существенный вклад в решение фундаментальной проблемы сокращения перебора при поиске.

Практическая значимость работы подтверждается успешной апробацией разработанных алгоритмов как в ходе численных экспериментов с использованием стандартизированных наборов входных данных (задач планирования), так и в ходе экспериментов на реальных робототехнических системах – малых колесных мобильных роботах YARP-2, оснащенных дифференциальным приводом. Разработанные алгоритмы могут быть использованы в современных системах управления мобильными роботами, использующихся в задачах поиска и спасения, сортировки грузов на складских комплексах, автоматизированной доставки и др. Результаты апробированы в том числе на крупнейших профильных робототехнических конференциях, что свидетельствует об их востребованности со стороны робототехнического сообщества.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать в научно-исследовательских организациях и инженерных центрах, занимающихся разработкой систем автономной навигации для мобильных роботов, беспилотных летательных аппаратов и наземных транспортных средств. Разработанные алгоритмы могут быть интегрированы в модули планирования траекторий существующих и перспективных робототехнических платформ и применяться в системах складской логистики, мониторинга территорий и др. Кроме того, предложенные методы и математические модели целесообразно применять в образовательном процессе при подготовке магистров и аспирантов по направлениям «Искусственный интеллект», «Робототехника». Реализации ключевых алгоритмов, описанных в диссертации, могут служить основой для

создания открытых библиотек планирования, что позволит расширить их применение в академической среде и в индустрии.

Замечания

К диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Некоторые алгоритмы приведены в работе без оценки вычислительной сложности.
2. В работе рассматриваются графы, вложенные в метрические пространство, однако все предложенные методы и алгоритмы формализованы и исследованы в предположении, что пространство является Евклидовым. При этом не вполне ясно насколько алгоритмы могут быть обобщены на случай неевклидовых пространств.
3. При проведении экспериментального исследования алгоритмов поиска пути на динамическом графе регулярной декомпозиции (глава 2) отсутствует сравнение с аналогами, а в экспериментах с реальными роботами (глава 3) используется лишь один из предложенных в работе алгоритмов много-агентного планирования.
4. В главе 5 предлагается архитектура искусственной нейронной сети для аппроксимации эвристических функций, однако не даётся рекомендаций по адаптации этой архитектуры к различным размерам входа. Также недостаточно исследован вопрос генерализации, т.е. возможности использования обученной нейронной сети вне используемой выборки заданий планирования.

Указанные замечания не снижают научной ценности исследования, выполненного на высоком теоретическом и практическом уровне.

Заключение по диссертации

Работа представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком уровне и расширяющее теоретический фундамент методов автоматического планирования и эвристического поиска. Исследование сочетает глубокий теоретический анализ и успешные эксперименты в том числе на реальных робототехнических системах. Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением методов дискретной математики, теории графов, математической логики, а также согласованностью результатов экспериментов с теоретическими положениями.

Основные результаты диссертации опубликованы в 54 публикациях, из них 12 публикаций в журналах из перечня ВАК, 3 – в ведущих зарубежных журналах, индексируемых в Scopus/Web of Science, 26 – в трудах конференций, индексируемых в Scopus, в том числе 6 – в трудах конференции рейтинга А*/А. Результаты апробированы на ведущих профильных научных мероприятиях по искусственному интеллекту и робототехнике.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.2.1 – Искусственный интеллект и машинное обучение по пп. 2, 5, 6, 16. В ней предлагаются новые методы элиминации перебора (п. 16), проводится оценка качества и эффективности алгоритмических и программных решений для систем искусственного интеллекта (п. 2), предлагается совместное применения методов машинного обучения и классического математического моделирования (п. 5), в том числе для задач автоматизации управления роботами (п. 6). Автореферат полностью отражает основное содержание работы.

Таким образом, диссертационная работа Яковлева Константина Сергеевича «Методы и алгоритмы эвристического поиска на графах регулярной декомпозиции в задачах планирования траекторий мобильных роботов» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, результаты которой можно квалифицировать как научное достижение в области теоретических основ эвристического поиска, методов и

алгоритмов автоматического планирования. Полученные результаты имеют важное практическое значение для разработки систем управления мобильными роботами, функционирующими в сложно-структурированных, динамических средах. Диссертация полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а ее автор, Яковлев Константин Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.1 – Искусственный интеллект и машинное обучение.

Отзыв ведущей организации обсужден и принят на заседании общеинститутского семинара ИПС им. А.К. Айламазяна РАН 26.03.2026г., протокол № 10 (присутствовало: 12 чел. Результаты голосования: за - 12, против - 0, воздержались - 0).

Председатель семинара

Руководитель Исследовательского центра процессов управления
ИПС им. А.К. Айламазяна РАН

д.ф.-м.н., доцент



Сачков Юрий Леонидович

Секретарь семинара

с.н.с. Исследовательского центра процессов управления
ИПС им. А.К. Айламазяна РАН

к.т.н.



Ардентов Андрей Андреевич

Выходные данные организации

152021, Ярославская область, Переславский район, с. Вельково,
ул. Петра Первого, д. 4 «а», ИПС им. А.К. Айламазяна РАН,
тел. +7 (4852) 695-228, e-mail: psi@botik.ru,
адрес официального сайта: <http://www.psi-ras.ru>

Личные подписи Сачкова Ю.Л. и Ардентова А.А. заверяю

начальник отдела кадров



Игнатъева Е.Л.