

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента 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 поиска пути и совокупности путей на графах относятся к числу фундаментальных задач искусственного интеллекта, автоматического планирования, дискретной оптимизации. Их значимость определяется как широтой теоретических постановок, так и большим числом практических приложений, в которых требуется находить допустимые и, по возможности, оптимальные маршруты в сложных пространствах состояний. Особое место среди таких постановок занимают задачи поиска пути (путей) на частичных подграфах графа-решетки – графах регулярной декомпозиции, – поскольку именно этот класс графовых моделей часто используется в робототехнике для моделирования окружающей среды мобильного робота. Несмотря на многолетнее развитие методов эвристического поиска, для рассматриваемого класса задач сохраняется ряд принципиально важных и далеких от окончательного решения проблем: учет динамических изменений среды, построение неконфликтных путей в многоагентной постановке, учет геометрических и кинематических ограничений, а также автоматическое конструирование информативных эвристических функций, позволяющих эффективно сокращать перебор на практике. В этой связи представленная диссертационная работа, направленная на развитие методов и алгоритмов эвристического поиска на графах регулярной декомпозиции и их адаптацию к практически важным постановкам, является актуальной как в теоретическом, так и в прикладном отношении.

### **Содержание диссертации**

Основной результат диссертационного исследования состоит в разработке семейства методов эвристического поиска на графах регулярной декомпозиции, которые обеспечивают полноту, а также — в зависимости от метода — либо оптимальность, либо ограниченную субоптимальность решений при учёте динамики среды, многоагентности и кинематических ограничений и с использованием обучаемых эвристик.

Диссертационная работа объемом 350 страниц состоит из введения, пяти глав и заключения, включая 108 рисунков и 22 таблицы. Список литературы содержит 253 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов.

В *первой главе* дано содержательное введение в предметную область: формализованы базовые понятия, описана связь задач поиска пути на графах регулярной декомпозиции с задачами планирования траекторий мобильных роботов, рассмотрены основные методы эвристического поиска и выполнен развернутый анализ современного состояния исследований по теме диссертации.

Во *второй главе* рассматривается задача поиска пути на динамических графах регулярной декомпозиции. Автор предлагает новые методы и алгоритмы безопасно-интервального планирования, в том числе для поиска оптимальных и субоптимальных решений, и подтверждает их свойства как теоретически, так и экспериментально.

В *третьей главе* исследуется задача поиска совокупности неконфликтных путей на графах регулярной декомпозиции. Разработаны новые методы на основе конфликтно-ориентированного и приоритизированного планирования, проведены их экспериментальные исследования, включая проверку на реальных робототехнических системах.

В *четвертой главе* рассматривается задача поиска путей с геометрическими ограничениями, косвенно учитывающими кинематические особенности мобильного агента. Предложены алгоритмы поиска путей с ограничением на угол отклонения между секциями, исследованы их теоретические свойства и показана их практическая применимость.

В *пятой главе* предложены методы автоматического конструирования эвристических функций на основе машинного обучения для задач поиска пути на графах регулярной декомпозиции. Автор рассматривает способы интеграции обучаемых эвристик с классическими алгоритмами систематического поиска и подтверждает эффективность разработанных подходов на широком наборе вычислительных экспериментов.

В заключении подведены итоги исследования, сформулированы основные результаты и обозначено их значение для дальнейшего развития методов эвристического поиска, планирования и интеллектуального управления мобильными роботами.

**Новизна основных научных положений, опубликованных в диссертации, состоит в следующем:**

— разработан новый метод поиска пути на динамическом графе регулярной декомпозиции, допускающий переходы между произвольными

вершинами, основанный на безопасно-интервальном планировании и оригинальном методе обращения направления поиска в сочетании с ленивым поиском. Предложены новые алгоритмы поиска субоптимальных решений задачи поиска пути на динамическом графе регулярной декомпозиции.

— разработаны новые методы и алгоритмы построения совокупности неконфликтных путей на графе регулярной декомпозиции, опирающиеся на принципы конфликтно-ориентированного поиска и приоритизированного планирования с использованием оригинальных техник сокращения перебора.

— предложено семейство алгоритмов поиска на графе регулярной декомпозиции, косвенно учитывающих кинематические ограничения мобильного агента (ограничения на максимальный угол отклонения между прямолинейными сегментами траектории). Исследованы теоретические свойства алгоритмов семейства.

— предложены новые типы эвристических функций для задачи поиска пути на графе регулярной декомпозиции, учитывающие специфику экземпляра задачи и аппроксимируемые нейросетевыми моделями.

— разработаны гибридные алгоритмы поиска на графе регулярной декомпозиции, основанные на комбинации предложенных обучаемых эвристик и классических техник систематического поиска, обладающие строгими теоретическими гарантиями.

Важным обстоятельством является то, что все новые методы исследованы как теоретически (доказаны их свойства), так и эмпирически с использованием устоявшихся в области методик проведения экспериментов.

**Теоретическая значимость** диссертации состоит в развитии аппарата эвристического поиска применительно к задачам планирования пути (путей) на графах регулярной декомпозиции и их расширенным постановкам. В работе предложены новые формализации задач, разработаны оригинальные методы поиска, установлены их свойства, доказаны теоремы о полноте, оптимальности и ограниченной субоптимальности, что в совокупности вносит существенный вклад в теорию методов поиска, планирования и интеллектуального управления.

**Практическая значимость** работы определяется тем, что предложенные методы и алгоритмы ориентированы на решение реальных задач мобильной робототехники: навигации в динамической среде, многоагентной координации, учета кинематических ограничений. Важным достоинством диссертации является наличие не только вычислительных экспериментов, но и апробации отдельных решений на реальных робототехнических платформах, что подтверждает прикладную ценность полученных результатов.

**Достоверность научных положений и рекомендаций** обеспечивается корректным использованием аналитического аппарата теории графов, дискретной математики, методов оптимизации, а также строгим теоретическим обоснованием предложенных алгоритмов (доказательства полноты, оптимальности и ограниченной субоптимальности). Полученные результаты согласуются с современными представлениями о развитии исследуемой области и подтверждаются сопоставлением с известными аналогами и экспериментальными исследованиями, в том числе на реальных робототехнических платформах.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается совпадением теоретических и практических результатов, положительными итогами вычислительных экспериментов и апробацией основных полученных научных результатов на многочисленных международных и всероссийских конференциях и семинарах. Выводы по главам и всей работе в целом логически следуют из основного содержания диссертации.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком уровне. Работа соответствует п. 16 «Исследования в области специальных методов оптимизации, проблем сложности и элиминации перебора, снижения размерности», п. 2 «Исследования в области оценки качества и эффективности алгоритмических и программных решений для систем искусственного интеллекта и машинного обучения. Методики сравнения и выбора алгоритмических и программных решений при многих критериях», п. 5 в части «Исследования в области совместного применения методов машинного обучения и классического математического моделирования» и п. 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.» Паспорта специальности 1.2.1 – Искусственный интеллект и машинное обучение.

Диссертация является самостоятельным исследованием, содержащим совокупность новых научных результатов и положений, выдвигаемых автором для публичной защиты. Все основные результаты достаточно полно отражены в 54 печатных и электронных научных работах, из которых 15 в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, и в изданиях, индексируемых в базе

данных Scopus и Web of Science; 6 – в сборниках трудов конференций, имеющих рейтинг A/A\* по CORE.

Диссертационная работа отличается внутренним единством. Результаты соискателя являются новыми. Работа в целом написана грамотно, ясно, с четкой аргументацией и оформлена в соответствии с требованиями. В тексте работы даны корректные ссылки на авторов и источники. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

### **Замечания**

1. Во второй главе, посвященной методам и алгоритмам поиска пути на динамическом графе, вводится техника обратного раскрытия. Кажется, что эта техника является достаточно универсальной и может использоваться для сокращения перебора и при решении других задач, рассматриваемых в диссертации, однако этого не происходит. Если имеются какие-то веские причины этого не делать, то целесообразно было бы озвучить их в тексте работы в явном виде.

2. В задаче AC-PF (Глава 4) вводится ограничение на максимальный угол поворота. Основной метрикой эффективности алгоритмов (LIAN, D-LIAN) является процент успешно решённых задач. Однако критически важной метрикой здесь также должна быть вычислительная сложность нахождения решения. Автор ограничивается эмпирическим анализом, не приводя теоретической оценки зависимости сложности от  $\alpha_{max}$  и длины секции  $\Delta$ , что несколько ограничивает глубину анализа предложенных методов.

3. Автор обучает нейросеть предсказывать карту вероятностей пути (PPM). В экспериментах (Глава 5) используется метрика MSE для оценки точности предсказания. Однако не приводится анализ того, как *ошибки* в предсказании PPM влияют на итоговый путь. Например, есть ли пороговые значения MSE, после которых падает качество планирования или растёт число итераций? Без этого трудно судить о робастности метода к неточным предсказаниям.

4. В пятой главе, посвященной обучаемым эвристикам, недостаточно подробно рассмотрен вопрос устойчивости предложенных моделей к смене домена входных данных, например при существенном отличии структуры препятствий или характера карт от использованных при обучении.

5. В разделе 5.3.3 описано критическое падение эффективности GBFS+PPM на OOD-задачах (с 83% до 18,6% оптимальных решений), однако отсутствует анализ причин этого падения и не предлагается способов повышения робастности. Констатация снижения эффективности без попытки его объяснить или компенсировать снижает практическую ценность

