

## 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**

Диссертационная работа К.С. Яковлева посвящена одной из центральных проблем современного искусственного интеллекта и мобильной робототехники – разработке вычислительно эффективных алгоритмов планирования траекторий мобильных агентов. Подобные алгоритмы востребованы в связи с развитием беспилотных транспортных средств, автоматизированных логистических и складских комплексов, систем автономной доставки и др. Классические эвристические алгоритмы планирования, известные с 70х годов XX века, обладают строгими теоретическими гарантиями, но в базовом виде плохо применимы для реальных робототехнических приложений, когда необходим учет динамики среды, кинематических особенностей робота и многоагентного взаимодействия. С другой стороны, активно развивающиеся в последнее время обучаемые методы планирования и навигации зачастую лишены каких-бы то ни было гарантий, склонны к ошибкам в нетипичных ситуациях (проблема генерализации) и сложны в интерпретации. Таким образом, разработка новых методов планирования, учитывающих особенности робототехнических приложений, и обладающих повышенной вычислительной эффективностью, в том числе, счет интеграции классических алгоритмов планирования с современными методами машинного обучения, что является высоко востребованной научно-технической задачей. Именно решению этой задачи и посвящена работа Яковлева К.С., что свидетельствует о её актуальности.

### **Содержание работы**

Работа изложена на 350 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы (253 наименования).

Во Введении обосновывается актуальность, формулируются цели, задачи и положения, выносимые на защиту.

В первой главе вводится необходимый математический аппарат, даются формальное определение графов регулярной декомпозиции и постановки задач, представляется аналитический обзор предметной области, выявляющий ограничения существующих методов.

Во второй главе решается задача планирования в средах с динамическими препятствиями, которая формализуется как задача поиска пути на графе, проходимость вершин и ребер которого зависит от времени – динамическом графе. Автором предложен алгоритм TO-AA-SIPP, позволяющий находить оптимальные пути на динамическом графе с возможностью перемещения между произвольными вершинами. Эффективность алгоритма обеспечивается принципом интервального планирования и предлагаемой техники обратного раскрытия. Для дальнейшего повышения скорости работы предлагается ряд алгоритмов, направленных на быстрый поиск субоптимальных решений (алгоритмы AA-SIPP, WSIPP, FocalSIPP).

В третьей главе исследуется задача многоагентного планирования с возможностью перемещения в произвольном направлении. Для эффективного поиска оптимальных решений задачи предложен алгоритм AA-CCBS, использующий конфликтно-ориентированное планирование в сочетании с новыми способами наложения мульти-ограничений. Для быстрого поиска субоптимальных решений предложен приоритизированный алгоритм AA-SIPP(m) и ряд дополнительных эвристических способов сокращения пространства планирования.

В четвертой главе исследуется задача планирования с геометрическими (кинематическими) ограничениями на угол поворота. Предлагается эффективный алгоритм LIAN и его модификация D-LIAN с динамической адаптацией длины секции (сегмента).

В пятой главе предложен новый гибридный подход к планированию пути на графе, основанный на комбинации классических алгоритмов поиска и эвристических функций, аппроксимируемых искусственными нейронными сетями, для чего вводятся в рассмотрение две новые эвристические функции. Для их аппроксимации предлагается использование современных нейросетевых архитектур, использующих

механизм внимания (трансформерные модели). Предлагаемый подход расширяется на задачу планирования пути по спутниковому снимку местности.

### **Обоснованность и достоверность научных положений выводов и результатов**

К основным результатам диссертации относятся новые алгоритмы планирования. Их достоверность обусловлена строгим математическим обоснованием их свойств – доказаны соответствующие леммы, теоремы и утверждения о полноте, оптимальности (ограниченной субоптимальности), вычислительной сложности. Практическая работоспособность предлагаемых алгоритмов подтверждена масштабным эмпирическим исследованием на общепринятых наборах данных с использованием сотен тысяч уникальных конфигураций задач. Ряд предлагаемых алгоритмов успешно апробирован на реальных физических роботах, что также является подтверждением достоверности результатов работы.

### **Научная новизна и практическая значимость**

К числу наиболее значимых *новых* научных результатов работы можно отнести следующие.

1. Разработан метод поиска пути на динамическом графе регулярной декомпозиции, допускающий переходы между произвольными (не только смежными) вершинами и гарантирующий отыскание оптимального решения.
2. Предложены способы сокращения пространства поиска для многоагентного непрерывного планирования, позволяющие существенно ускорить поиск оптимальных решений (алгоритм AA-SIPP)
3. Разработано семейство алгоритмов для поиска путей с учетом геометрических ограничений (алгоритмы LIAN, D-LIAN), решающих проблему комбинаторного взрыва за счет фокусировки на решениях определенного класса ( $\Delta$ -решения).
4. Предложены гибридные алгоритмы поиска пути, использующие оригинальные эвристические функции, аппроксимируемые искусственными нейросетями, позволяющие гарантировать корректность решения вне зависимости от выхода нейросетевой модели.

*Практическая значимость* полученных результатов заключается в возможности внедрения разработанных алгоритмов в современные системы управления отдельными мобильными роботами и их группами, что позволит

повысить степень автономности управляемых роботов за счет эффективного построения безопасных, кинематически согласованных траекторий.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертация полностью соответствует паспорту специальности 1.2.1 – Искусственный интеллект и машинное обучение, а именно, по пунктам:

- п. 16: "Исследования в области специальных методов оптимизации, проблем сложности и элиминации перебора..." (разработанные методы сокращения перебора, такие как: обратное раскрытие, мульти-ограничения, использование решетки переходов, фокусировка поиска и др.);
- п. 6: "Разработка систем управления с использованием систем искусственного интеллекта, в том числе – управления роботами, автомобилями, БПЛА" (предложенные алгоритмы применимы для построения траекторий мобильных роботов в сложно-структурированных, динамических средах);
- п. 5: "Исследования в области совместного применения методов машинного обучения и классического математического моделирования" (предложенные гибридные алгоритмы планирования путей, сочетающие систематический поиск и нейросетевые эвристические функции).

### **Замечания**

К работе имеются следующие замечания:

1. В Главе 4 при разработке алгоритмов LIAN и D-LIAN вводится параметр  $\Delta$ , который, однако, не кажется естественным. Необходимость введения этого параметра следовало бы разъяснить более подробно.
2. В Главе 5 помимо задачи поиска пути на графе рассматривается задача поиска пути по спутниковому снимку местности, при этом также предполагается, что на этапе предварительного анализа доступна карта высот местности. Возникает вопрос, как связаны проблемы восстановления карты высот (карты глубин) и собственно планирования пути?

Отмеченные замечания не являются критическими, носят отчасти дискуссионный характер, не затрагивают фундаментальных выводов диссертации и не снижают её научной ценности.

## Заключение

Считаю, что диссертационная работа Яковлева Константина Сергеевича «Методы и алгоритмы эвристического поиска на графах регулярной декомпозиции в задачах планирования траекторий мобильных роботов» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. Совокупность представленных результатов представляет собой научное достижение и вносит важный вклад в теорию и практику создания систем управления мобильными роботами за счет разработки эффективных и теоретически обоснованных методов планирования. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, зафиксированных в нормативных документах (Положение о присуждении ученых степеней и др.). Считаю, что автор диссертации, Яковлев Константин Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.1 – Искусственный интеллект и машинное обучение.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, доцент,  
главный научный сотрудник  
лаборатории робототехники  
НИЦ «Курчатовский институт»

Карпов Валерий Эдуардович

тел. (499)196-71-00 (доб.3370), e-mail [karpov\\_ve@nrcki.ru](mailto:karpov_ve@nrcki.ru)

Федеральное государственное бюджетное учреждение

"Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»"

(НИЦ «Курчатовский институт»)

Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, <http://www.nrcki.ru>

*Подпись Карпова В.Э. заверяю:*

Заместитель директора –  
главный ученый секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт»



О.А. Алексеева

14.05.2026