

**В диссертационный совет  
24.1.224.03 на базе Федерального  
исследовательского центра  
«Информатика и управление»  
Российской академии наук**

**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

На отзыв представлены диссертационная работа и автореферат. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, насчитывающего 253 источника. Общий объем работы 350 страниц, число рисунков – 108, число таблиц – 22.

*Актуальность исследования обусловлена тем, что задача поиска пути (путей) с заданными характеристиками на графе, являющаяся одной из фундаментальных задач как классической теории графов, так и искусственного интеллекта, обладает высокой значимостью для ряда практически важных областей, таких как робототехника. В более широком контексте указанная задача относится к задачам планирования действий, т.е. задачам нахождения последовательности шагов, переводящих систему из начального состояния в целевое. Центральной проблемой при планировании является проблема эффективного перебора, т.к. пространство состояний в реалистичных постановках может достигать существенных размеров. Соответственно, целесообразной является разработка методов, позволяющих находить оптимальные или близкие к ним решения (планы), исследуя лишь малую долю этого пространства. Именно разработке подобных методов, основанных на новых, оригинальных способах сокращения и элиминации перебора, и посвящена работа Яковлева К.С., что подтверждает её актуальность.*

*Анализ и общая оценка основного содержания диссертационной работы*  
Основные материалы работы скомпонованы в пять глав.

В первой главе формализуется связь задачи планирования траектории мобильного робота с задачей поиска пути на графе особой структуры – графе регулярной декомпозиции. Описываются базовые алгоритмы эвристического поиска, проводится обзор литературы, охватывающий современные системы управления мобильными роботами, методы учёта динамики среды и кинематических ограничений при планировании, многоагентную постановку задачи, а также подходы к интеграции машинного обучения и эвристического поиска. По итогам обзора формулируются четыре перспективных направления исследований, которым посвящены последующие главы.

Вторая глава рассматривает задачу поиска пути на динамическом графе, т.е. графе, пропускная способность вершин и рёбер которого зависит от времени. Формализуются базовая и расширенная постановки задачи, допускающая перемещение между произвольными вершинами графа. Предлагаются новые алгоритмы решения последней задачи, обладающие важными теоретическими оценками. Эффективность алгоритмов подтверждается результатами многочисленных экспериментов.

Третья глава посвящена задаче поиска совокупности неконфликтных путей на графе регулярной декомпозиции (многоагентное планирование). Как и ранее, акцент делается на постановку, подразумевающую возможность перемещения между произвольными вершинами графа. Для поиска оптимальных решений предлагается двухуровневый алгоритм, реализующий принцип конфликтно-ориентированного планирования и использующий оригинальные способы формирования мульти-ограничений, существенно сокращающие перебор на верхнем уровне поиска. Для эффективного построения субоптимальных решений предложен алгоритм приоритизированного планирования и соответствующие техники сокращения перебора. Проведены обширные эксперименты, подтвердившие высокую эффективность предложенных методов и их практическую применимость на реальных робототехнических системах.

Четвёртая глава посвящена поиску путей с геометрическими ограничениями – ограничением на максимальный угол отклонения между смежными прямолинейными секциями пути. Такая постановка позволяет косвенно учитывать кинематические ограничения мобильных роботов. Предложен алгоритм, осуществляющий поиск среди путей, образованных секциями фиксированной длины. Доказаны полнота и оптимальность алгоритма относительно определенного класса решений. Далее предложена модификация алгоритма, расширяющая класс отыскиваемых решений.

Экспериментальные исследования показали значительное превосходство предложенных алгоритмов над известными аналогами.

Пятая глава посвящена интеграции методов машинного обучения и эвристического поиска. Предлагаются два оригинальных типа эвристических функций, аппроксимируемые глубокими нейронными сетями с блоками внимания (трансформерами). Разработаны способы интеграции этих эвристик с алгоритмами эвристического поиска, позволяющие сохранить важные теоретические гарантии последних. Созданы авторские наборы данных для обучения и тестирования. Подход распространён на задачу планирования по изображениям. Обширные эксперименты демонстрируют существенное превосходство предложенных методов над современными аналогами как по вычислительной эффективности, так и по качеству решений.

В целом диссертация представляет собой зрелое, целостное и логически выстроенное исследование, объединённое сквозной идеей разработки эффективных методов сокращения перебора при поиске на графах регулярной декомпозиции. Автор демонстрирует глубокое владение предметной областью, свободно ориентируется в литературе и ясно позиционирует свой вклад относительно мирового уровня исследований. Предлагаемые алгоритмы исследуются как теоретически (доказывается широкий спектр утверждений об их свойствах), так и практически в ходе многочисленных экспериментов. При этом используются общепризнанные наборы данных и проводится систематическое сравнение с прямыми и косвенными аналогами.

Диссертация содержит ряд существенных научных результатов, обладающих несомненной *научной новизной*:

Во-первых, разработаны и исследованы оригинальные алгоритмы эвристического поиска на динамических графах регулярной декомпозиции, позволяющие эффективно, в вычислительном смысле, находить оптимальные решения.

Во-вторых, предложены новые методы многоагентного планирования траекторий, развивающие парадигму поиска в пространстве конфликтов. Введены оригинальные типы ограничений и стратегии разрешения конфликтов, позволяющие существенно сократить размер пространства поиска. Также предложены оригинальные эвристики для повышения вычислительной эффективности процесса приоритизированного планирования, направленного на поиск субоптимальных решений.

Предложено семейство методов поиска пути на графе регулярной декомпозиции, учитывающих строгие геометрические ограничения и тем самым косвенно учитывающие кинематические ограничения реальных

мобильных роботов.

Разработаны новые обучаемые эвристические функции и способы их интеграции с классическими алгоритмами поиска. Результирующие алгоритмы отличаются повышенной эффективностью при решении практических задач и при этом гарантируют корректность решения вне зависимости от выхода используемых нейросетевых аппроксиматоров.

*Теоретическая значимость* диссертации определяется следующими аспектами. Во-первых, работа вносит существенный вклад в теорию методов автоматического планирования. Так, полученные результаты расширяют известный набор техник элиминации перебора при поиске решения, при этом результирующие методы обладают строгими теоретическими гарантиями. Во-вторых, работа предлагает новые основы интеграции методов машинного обучения и методов эвристического поиска, что позволяет получить алгоритмы инвариантные к выходу искусственных нейронных сетей и, тем самым, гарантировать корректность работы на любых входных данных.

Результаты диссертации могут быть использованы при разработке новых алгоритмов автоматического планирования, при исследовании комбинаторной сложности задач поиска пути или путей на графах, при создании гибридных методов планирования, сочетающих последние достижения в области машинного обучения и классические теоретически-обоснованные методы поиска.

*Практическая значимость* работы обуславливается возможностью применения разработанных алгоритмов в системах навигации мобильных роботов различного типа и назначения, что подтверждается, в том числе, проведенными в работе экспериментальными исследованиями на реальных мобильных роботах с дифференциальным приводом. Отдельно стоит отметить, что разработанные в диссертации алгоритмы реализованы в виде открытых программных средств, доступных для использования другими исследователями и разработчиками.

*Апробация результатов.* Результаты диссертации прошли обширную и представительную апробацию. Основные результаты опубликованы в ведущих российских и международных журналах и представлены на авторитетных международных конференциях в области искусственного интеллекта и робототехники, включая конференции высшего ранга (AAAI, IJCAI, ICAPS, AAMAS, IROS и др.), что свидетельствует о признании работы международным научным сообществом.

*Замечания.* При общей высокой оценке диссертационной работы считаю необходимым высказать ряд замечаний дискуссионного характера.

1. В диссертации основное внимание сосредоточено на методах поиска на графах регулярной декомпозиции. Хотелось бы видеть более развёрнутое обсуждение того, в какой мере предложенные методы и теоретические результаты переносимы на другие типы графов.

2. Предлагаемый автором алгоритм поиска оптимального решения задачи планирования на динамическом графе основан на достаточно оригинальной и нетривиальной технике сокращения перебора, заметно отличающейся от общепринятых подходов. В этой связи помимо описания самого алгоритма и доказательств его свойств было бы полезным видеть описание работы алгоритма на отдельном примере.

3. При экспериментальном исследовании предложенного алгоритма планирования совокупности неконфликтных путей на графе, гарантирующего ограниченную субоптимальность решения, максимальное значение параметра  $w$ , задающего верхнюю границу стоимости решения, составляло 1,25. Неясно почему верхняя граница была выбрана именно такой и почему не рассматривались большие значения параметра?

4. В пятой главе работы автором рассматривалась, в том числе, задача поиска пути по изображению – спутниковому снимку местности. При этом предполагалось, что для предварительного анализа и обучения нейросетевой эвристической функции доступна выборка пар «спутниковое изображение – карта высот». Представляет интерес вопрос, расширяется ли предлагаемый автором метод на случай, когда карта высот не доступна для предварительного анализа, а вместо этого имеется выборка примеров решения задачи (путей, проложенных экспертом)?

*Заключение.* Перечисленные выше замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация Яковлева К.С. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой автором предложена совокупность новых теоретически-обоснованных алгоритмов поиска пути на графах, опирающихся на оригинальные техники сокращения перебора для повышения вычислительной эффективности и применимых для решения задач планирования траекторий мобильных роботов. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.2.1 – Искусственный интеллект и машинное обучение, поскольку в ней предложены новые методы элиминации перебора (п. 16 паспорта), новые алгоритмы совместного применения методов машинного обучения и классического математического моделирования (п. 5 паспорта), новые методы планирования траекторий, применимые в современных системах

управления роботами, автомобилями, БПЛА (п. 6 паспорта), проведено исследование оценки эффективности алгоритмических решений (п. 2 паспорта). Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Яковлева Константина Сергеевича «Методы и алгоритмы эвристического поиска на графах регулярной декомпозиции в задачах планирования траекторий мобильных роботов» полностью соответствует требованиям положения о присуждении ученых степеней ВАК Минобрнауки РФ, а её автор, Яковлев Константин Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.1 – Искусственный интеллект и машинное обучение.

**Официальный оппонент:**

доктор физико-математических наук (по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в отраслях информатики, вычислительной техники и автоматизации)), ведущий научный сотрудник лаборатории №11 «Сетевых моделей в нейроинформатике и многоагентных системах» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук

Л.Ю. Жилиякова

Подпись Л.Ю. Жилияковой  
ЗАВЕРЯЮ  
ВЕД. ИНЖЕНЕР  
ЖИЛКОВА Л.Ю.  
19.05.2020

117342, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, стр. 2  
ИПУ РАН  
+7 (495) 198-17-20 доб. 1344  
zhilyakova@ipu.ru