

ОТЗЫВ НА АВТОРЕФЕРАТ

диссертационной работы Яковлева Константина Сергеевича
«Методы и алгоритмы эвристического поиска на графах регулярной декомпозиции в
задачах планирования траекторий мобильных роботов»,
представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук
по специальности

1.2.1 Искусственный интеллект и машинное обучение

Диссертационная работа Яковлева Константина Сергеевича посвящена разработке и исследованию новых методов и алгоритмов эвристического поиска на графах регулярной декомпозиции (ГРД), применимых для решения задач автоматического планирования траекторий мобильных роботов. **Актуальность** темы обусловлена возрастающей потребностью в теоретических обоснованных и при этом вычислительно эффективных алгоритмах планирования для современных систем управления мобильными роботами, функционирующими в сложных и динамически изменяющихся средах, в том числе в составе группы. Работа выполнена на высоком уровне и демонстрирует глубокое понимание автором тесной взаимосвязи фундаментальных основ искусственного интеллекта, теории графов и современных задач робототехники.

Автором предложен и теоретически обоснован ряд **методов и алгоритмов**, существенно расширяющих арсенал средств планирования траекторий. Особый интерес представляют следующие результаты:

- Алгоритм ТО-АА-SIPP, решающий задачу поиска оптимального пути на динамическом ГРД с возможностью перемещения агента в произвольном направлении. Предложенный подход, основанный на принципе обратного раскрытия в сочетании с безопасно-интервальным планированием, является оригинальным и позволяет эффективно справляться с проблемой взрывного роста коэффициента ветвления, возникающей при наивном расширении классического SIPP. Для алгоритма доказаны полнота, оптимальность и установлена оценка вычислительной сложности $O(V^2)$. Помимо оптимального алгоритма, предложен вычислительно-эффективный субоптимальный аналог АА-SIPP, использующий технику переназначения родительского указателя в дереве поиска, что позволяет на практике существенно (на 1–2 порядка) ускорить поиск при незначительной (менее 3%) потере в качестве решения.
- Алгоритмы построения совокупности неконфликтных путей на ГРД для группы мобильных агентов. Предложенный алгоритм АА-CCBS, основанный на принципе конфликтно-ориентированного поиска, гарантирует отыскание оптимального решения, а предложенные оригинальные техники мультиограничений (типы МС2 и МС3) позволяют существенно сократить перебор на верхнем уровне поиска. Алгоритм приоритизированного планирования АА-SIPP(m) демонстрирует впечатляющую практическую эффективность, решая на порядок больше задач, чем оптимальный аналог, при среднем превышении стоимости решений над оптимальной лишь на 3.8%. Особую ценность

представляет апробация разработанных алгоритмов на реальных колёсных роботах YARP-2, подтвердившая их практическую применимость.

- Семейство алгоритмов LIAN и D-LIAN для задачи поиска пути с ограничением на максимальный угол отклонения между смежными сегментами траектории, что позволяет косвенно учитывать кинематические ограничения мобильного робота. Для обоих алгоритмов доказаны полнота и оптимальность в определённых классах решений. Экспериментальные результаты убедительно демонстрируют существенное превосходство предложенных алгоритмов над мировыми аналогами.

Также перспективным является направление автоматического конструирования эвристических функций на основе глубоких нейронных сетей. Предложенные оригинальные эвристические функции – фактор коррекции (CF) и вероятность вхождения в путь (PP) – и способы их интеграции в классические алгоритмы поиска (WA*+CF, FS+PPM, GBFS+PPM) представляют собой оригинальный подход, в котором обучаемые модели и классические алгоритмы дополняют друг друга, при этом теоретические гарантии (полнота, ограниченная субоптимальность) сохраняются вне зависимости от качества предсказаний нейронной сети. Применение этого подхода к задаче планирования маршрута по спутниковому снимку демонстрирует широкий потенциал предложенной методологии.

Достоверность полученных результатов подтверждается строгими математическими доказательствами (доказано большое число лемм и теорем), обширными экспериментальными исследованиями с использованием признанных в сообществе открытых наборов данных, а также апробацией на реальных робототехнических платформах. Результаты работы опубликованы в 54 научных публикациях, среди которых 12 статей в ведущих отечественных журналах (К1/К2 Списка ВАК), 3 статьи в ведущих зарубежных журналах (включая Artificial Intelligence – WoS Q1), 6 публикаций в трудах ведущих конференций по искусственному интеллекту и робототехнике, имеющих рейтинг A/A* по CORE (ICAPS, AAMAS, AAAI, IROS). Столь обширный и представительный список публикаций свидетельствует о высоком уровне проведённых исследований и их признании мировым научным сообществом.

По автореферату диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Предложенные методы были исследованы на графах, вложенных в двумерное пространство. Интересно было бы увидеть оценки масштабируемости предложенных алгоритмов при переходе к решению задач планирования в трехмерном пространстве.
2. В главе 5, посвящённой обучаемым эвристикам, экспериментальное исследование проводилось на картах относительно небольшого размера (64×64 и 128×128). Как предложенные решения масштабируются на карты существенно большего размера (например, 512×512 и более), часто встречающиеся в практических робототехнических приложениях?

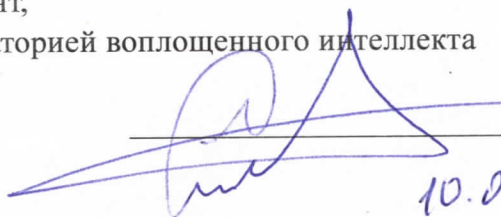
3. Графы, рассматриваемые в работе, имеют фиксированную топологию, т.е. соответствуют статическим картам. При этом во многих робототехнических приложениях требуется работа в динамическом окружении, когда карта постоянно уточняется по сенсорным данным с помощью методов одновременного картирования и локализации. Как предлагаемые методы могут быть распространены на подобные сценарии?

Указанные замечания носят рекомендационный характер и не имеют принципиальной значимости для общей положительной оценки работы. Судя по автореферату, диссертация Яковлева К.С. представляет собой законченное и оригинальное научно-квалификационное исследование, вносящее существенный вклад как в развитие теории эвристического поиска и искусственного интеллекта, так и в прикладную робототехнику. Считаю, что работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор Яковлев Константин Сергеевич заслуживает присуждения указанной учёной степени по специальности 1.2.1 Искусственный интеллект и машинное обучение.

Отзыв составил:

доктор технических наук, доцент,
профессор, заведующий лабораторией воплощенного интеллекта
Университет ИТМО

Email: s.kolyubin@itmo.ru
Телефон: 8(911) 915-29-54


С.А. Колюбин
10.06.2026

