

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 ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.1 Искусственный интеллект и машинное обучение

Диссертационная работа Яковлева К.С. посвящена разработке и исследованию новых методов и алгоритмов поиска пути (совокупности путей) на графах специального вида – графах регулярной декомпозиции (ГРД), представляющих собой частичные подграфы решётчатых графов, вложенных в Евклидово пространство. Работа интересна как с точки зрения возможности применения представленных методов на практике, а именно – в мобильной робототехнике, так и теоретической с точки зрения.

Актуальность работы. Задачи поиска кратчайших и оптимальных путей на графах принадлежат к числу фундаментальных задач дискретной математики и компьютерных наук (в том числе – искусственного интеллекта), восходящих к классическим работам Э. Дейкстры, Р. Беллмана, Л. Форда. Графы регулярной декомпозиции, рассматриваемые в работе, представляют собой важный и широко встречающийся на практике класс структурированных графов: они обладают фиксированной степенью вершин, регулярной геометрической структурой и вложенностью в метрическое пространство. Именно эти свойства открывают возможности для разработки специализированных алгоритмов, превосходящих по эффективности универсальные методы поиска на графах общего вида, за счет специфических техник сокращения перебора.

Новизна результатов и вклад работы состоят в систематическом исследовании задач поиска путей на ГРД в нескольких нетривиальных постановках, существенно расширяющих классическую задачу о кратчайшем пути, и разработке новых теоретически обоснованных методов решения этих задач. Исследуемыми задачами являются:

1. *Поиск пути на динамических ГРД с произвольными переходами.* Автор рассматривает граф, в котором множество допустимых рёбер расширено за счёт функции видимости $\text{los} : V \times V \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$, допускающей переходы между произвольными парами вершин. Фактически, это означает переход от фиксированного частичного подграфа решётки к семейству зависящих от времени подграфов полного графа на множестве вершин ГРД. Задача поиска оптимального пути в таком динамическом графе строго формализуется (Определения 2–3), и для нее предлагается новый алгоритм TO-AA-SIPP, основанный на оригинальном подходе обращения поиска. Теоретическое исследование этого алгоритма выполнено на высоком уровне. Доказана цепочка лемм (Леммы 1–8), завершающихся теоремами об оптимальности (Теорема 1), оценке сложности (Теорема 2: $O(M^2)$, где M — число состояний поиска) и полноте (Теорема 3).

2. *Поиск совокупности неконфликтных путей на графе.* Известно, что даже в самых простых постановках этой задачи получение её оптимальных решений – чрезвычайно трудоемкий процесс, т.к. задача NP-трудна. Для решения автор опирается на двухуровневую схему, в которой верхний уровень осуществляет поиск в дереве ограничений, а нижний – решает индивидуальные задачи поиска пути. Научный интерес представляют предложенные техники формирования мультиограничений (MC2, MC3), опирающиеся на геометрические свойства ГРД и позволяющие

существенно сократить размер дерева ограничений без потери гарантий оптимальности, а также предложенные способы повышения эффективности получения субоптимальных решений.

3. *Поиск путей с геометрическими ограничениями (ограничениями на углы поворота).* Эта задача представляет значительный теоретический интерес, поскольку наложение ограничений на геометрию последовательных ребер пути принципиально меняет структуру задачи: более длинный частичный путь до вершины может оказаться предпочтительнее более короткого, если последний приводит к нарушению ограничений на максимальный угол отклонения. Это делает невозможным использование стандартной техники отсечения при поиске, что делает задачу существенно более сложной по сравнению с классическим поиском кратчайшего пути. Введение понятия Δ -пути в этих условиях представляется весьма разумным, а доказательство полноты и оптимальности предлагаемых алгоритмов в соответствующих классах решений (Теоремы 5, 6) является значимым теоретическим результатом.

4. *Обучаемые эвристические функции для поиска.* Описываемые способы автоматического конструирования эвристик с помощью нейронных сетей интересны в первую очередь тем, что предложенные способы интеграции обучаемых функций в классические алгоритмы поиска сохраняют формальные гарантии – полноту и, в ряде случаев, ограниченную субоптимальность – вне зависимости от качества аппроксимации нейронной сетью. Это принципиально отличает данный подход от чисто нейросетевых методов планирования, лишенных подобных гарантий.

Обоснованность результатов. Работа основана на корректном и последовательном применении методов дискретной математики, теории графов и математической логики. Доказательства выстроены логично, используются стандартные методы: математическая индукция, доказательство от противного, анализ граничных случаев. Число доказанных утверждений весьма значительно для работы данной тематики, что свидетельствует о серьезном внимании автора к строгому обоснованию предлагаемых методов. Экспериментальная часть работы обширна и тщательно спланирована: используются признанные в сообществе открытые наборы данных, проводится сравнение с релевантными аналогами, результаты представлены в наглядной и воспроизводимой форме.

Замечания.

1. Переход от стандартной топологии ГРД (8-связность) к произвольным переходам между вершинами с помощью введения функции видимости фактически превращает задачу поиска пути из поиска на разреженном графе в поиск на потенциально плотном (в пределе – полном) графе. Было бы интересно обсудить, при каких условиях на структуру препятствий средний размер множества вершин, видимых из данной вершины, остаётся существенно меньше $|V|$, и как это влияет на эффективность предложенных алгоритмов.

2. Оценка сложности алгоритма TO-AA-SIPP составляет $O(M^2)$, где M – число состояний поиска (Теорема 2). Однако M в общем случае не совпадает с числом вершин в графе и зависит от числа безопасных интервалов. Было бы предпочтительней связать сложность алгоритма именно с числом вершин входного графа.

3. При рассмотрении задачи поиска пути с геометрическими ограничениями автор доказывает оптимальность предлагаемых алгоритмов в классе Δ -путей, однако остается открытым вопрос о соотношении этого класса с множеством всех допустимых решений. Можно ли оценить (хотя бы в терминах параметров ГРД и ограничения α_{\max}) долю задач, для которых оптимальное решение не принадлежит классу Δ -путей? Иными словами, насколько ограничительным является условие принадлежности классу Δ -путей?

Высказанные замечания носят рекомендательный, дискуссионный характер и не умаляют общей высокой оценки работы.

Общий вывод. Диссертация Яковлева К.С. представляет собой зрелое, законченное научно-квалификационное исследование, содержащее ряд оригинальных теоретических результатов (доказанные теоремы о полноте, оптимальности и сложности предложенных алгоритмов), подкрепленных обширными экспериментальными данными. Работа вносит существенный вклад в теорию алгоритмов поиска пути на графах и в методы искусственного интеллекта. Результаты исследований опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных научных изданиях и апробированы на ведущих профильных конференциях. Считаю, что работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а ее автор Яковлев Константин Сергеевич заслуживает присуждения указанной учёной степени по специальности 1.2.1 Искусственный интеллект и машинное обучение.

Директор Физтех-школы прикладной
математики и информатики Московского
физико-технического университета (МФТИ),
доктор физико-математических наук, профессор

09.06.26.

Андрей Михайлович Райгородский

141701, Московская область, г. Долгопрудный,
Институтский переулок, д. 9

mraigor@yandex.ru

ПОДПИСЬ РУКИ
ЗАВЕРЯЮ:
АДМИНИСТРАТОР КАНЦЕЛЯРИИ
АДМИНИСТРАТИВНОГО ОТДЕЛА
С. А. КОРАБЛЕВА

С. М. Райгородский

