

УТВЕРЖДАЮ

проректор по науке и цифровому развитию
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский
университет)»

Дроговоз П.А.

«28» июня 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на диссертационную работу Аль-Саиди Аднан Адаб К. на тему: «Метод и алгоритмы планирования маршрутов движения автономного карьерного транспорта с использованием параллельных вычислительных процедур», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук (специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика)

Материалы рассмотренной диссертации структурированы следующим образом: введение, 4 главы, заключение, список использованных источников, 3 приложения. Объем работы составляет 151 стр., в том числе основное содержание – 124 стр., 40 рисунков и 16 таблиц, список литературы из 133 наименований.

В отзыве ведущей организации отражены основные аспекты работы, которые соответствуют требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» НИТУ МИСИС.

Актуальность темы диссертационного исследования

Сегодня автономные транспортные средства и, в частности, колесные роботы, все более массово применяются в различных сферах деятельности. При этом модели и алгоритмы, определяющие характер и режимы движения этих роботов существенно зависят от среды функционирования. В горной промышленности, особенно в условиях добычи минерального и энергетического сырья открытым способом, транспортно-технологические процессы являются основой всего производственного цикла и оказывают определяющее влияние на интегральные показатели эффективности предприятия.

Важнейшим элементом процессов транспортировки горной массы между экскаваторами и зонами разгрузки по технологическим дорогам карьеров является самосвал большой грузоподъемности (120 и более тонн).

В настоящее время разработаны и начинают активно внедряться на горных предприятиях роботы-самосвалы. Функционирование этих машин в рамках реального производственного процесса, в принципе, четко определяется топологией карьерных дорог, на базе которой с использованием стандартных алгоритмов маршрутизации осуществляется начальный выбор маршрутов перемещения самосвалов. В тоже время, динамический характер инфраструктурной технологической среды, связанный с периодическим изменением местоположения зон погрузки и разгрузки; постоянное изменение состояния дорожного полотна под воздействием тяжелых горных машин, особенно при неблагоприятных погодных условиях; а также непредсказуемое и порой внезапное возникновение технико-технологических препятствий, ограничивающих реальную «проезжую часть», требуют принятия оперативных решений по выбору конкретных траекторий движения и изменению маршрутов. Традиционно под оптимальной маршрутизацией карьерных самосвалов понималась такая организация движения, при которой обеспечивались бы максимальные объемы перевозимой горной массы за определенный временной период. Эта задача успешно решается сегодня в системах диспетчерского

управления в рамках заранее вычисленных маршрутов и с учетом опыта водителей. Наряду с этим критерием, в случае использования автономных самосвалов, требуется учитывать повышенные риски аварий роботов-самосвалов, а также расход топлива и разрушающие нагрузки на основные узлы самосвалов. Следовательно, необходимо, решать задачу выбора маршрутов, с учетом таких трасс (траекторий), которые обеспечивали бы оптимальные значение некоторого комплексного критерия.

Важно также отметить, что в случае использования автономных самосвалов в условиях реального карьера все вычисления должны осуществляться достаточно оперативно, а используемые критерии должны учитывать, как макро-факторы планирования (объем перевозимой горной массы, время перемещения по маршрутам), так и микро-факторы (трасса перемещения по конкретной дороге, возможные траектории прохождения трассы, скоростные режимы). Основное внимание в настоящей работе сконцентрировано на разработке метода и соответствующих алгоритмов оперативного определения трасс и, в конечном итоге, маршрутов, по которым должны перемещаться автономные самосвалы. В связи со сказанным, можно заключить, что тема диссертационного исследования является актуальной

Новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций заключается в следующем:

- Предложена оригинальная функция стоимости маршрута, которая базируется на мульти-фрактальном представлении дорожного полотна карьерных дорог («плиточная модель»), которая вычисляется с учетом характеристик дорожного полотна и предполагаемых значений скорости прохождения данного участка дороги.
- Разработан метод оптимальной маршрутизации семейства роботов самосвалов, который основан на использовании комплексного критерия оценки стоимости выбираемой для движения трассы, с учетом расходов

топлива и уровня механических воздействий на узлы и блоки автосамосвала.

- Разработан ряд алгоритмов, которые обеспечивают работоспособность метода оптимальной маршрутизации для роботов-самосвалов, а именно:

1. Алгоритм вычисления маршрута оптимальной стоимости, построенный на основе алгоритма Дейкстры с использованием модели разделяемой памяти и библиотеки OpenMP, отличительной особенностью которого является распараллеливание вычислительных процессов только при выполнении циклов, что позволяет существенно снизить время осуществления поиска в графах большой размерности и, следовательно, снизить в 1,5-2 раза время, затрачиваемое на построение (перестроение) трассы для перемещения робота-самосвала.

2. Алгоритм прогнозирования скорости робота-самосвала в любой точке дорожного полотна, позволяющий осуществить более полную оценку вариантов перемещения, который построен на основе граф-конволюционной нейронной сети с оригинальной архитектурой.

Значимость для науки и производства достигнутых результатов

Полученные в работе результаты содержат новые знания в области алгоритмов и моделей маршрутизации автономного карьерного транспорта, которые концентрируются в методе оптимальной маршрутизации роботов - самосвалов, реализованном с использованием модифицированного параллельного алгоритма Дейкстры, позволяющего оперативно вычислять оценки (стоимости) конкретных планируемых для перемещения трасс.

Определенный интерес вызывает подход автора, основанный на использовании цифровой модели карьерных дорог, представляющей собой регулярную мозаичную структуру, состоящую из однотипных правильных многоугольников (элементарных фрагментов - фракталов технологической дороги), на основе которой формируется ациклический направленный граф

большой размерности, веса ребер которого представляют собой значение введенной автором оригинальной функции стоимости. Также существенным научным результатом является разработанный автором алгоритм прогнозирования скорости в любой точке дорожного полотна на базе нейросетевой модели с граф-конволюционной архитектурой.

Полученные в работе научные результаты имеют также и очевидную практическую ценность.

1. Рассмотренная мульти-фрактальная цифровая модель может быть полезна при описании инфраструктуры различных транспортных систем для моделирования и оптимизации перемещения колесных роботов.
2. Метод оптимальной маршрутизации, основанный на оценке и выборе конкретной трассы перемещения автономных самосвалов, является удобным инструментом для решения широкого класса логистических задач.
3. Разработанные алгоритмы, реализованные в виде универсальных программных модулей, должны быть при соответствующей доработке внедрены в качестве элементов современных систем управления горно-транспортными комплексами карьеров и могут быть полезны не только в случае беспилотных самосвалов, но и как элементы системы «цифровой советчик водителя», обеспечивая повышения качества вождения большегрузного карьерного транспорта.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

В работе получен ряд новых результатов, которые представляют интерес для специалистов и организаций, деятельность которых связана с моделированием и планированием работы автономных транспортных систем, а также связанных с разработкой различных вычислительных моделей поиска

решений в пространстве состояний на основе эффективных эвристических алгоритмов и граф-конволюционных нейронных сетей.

Результаты диссертационной работы представляют интерес для ряда образовательных, научных, а также промышленных предприятий, занимающихся, как разработкой и внедрением программных продуктов, так и их использованием. Перечислим некоторые из них:

ФГБУН ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, ОАО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта», ФГБУН ИПКОН им. Академика Н.В. Мельникова РАН, Научно-исследовательский и проектный институт городского транспорта города Москвы (ГБУ «МосТрансПроект»); ФГАОУ ВО "Российский университет транспорта", ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», ФГБОУ ВО Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Группа Компаний «ЦИФРА», АО «Пиклема», АО «Сибирская угольная энергетическая компания»

Публикации и апробация работы

Материалы диссертации опубликованы в 5 научных работах.

В том числе 2 – в журналах рекомендованных ВАК, 3 статьи опубликованы в журналах, включенных в международные реферативные базы Scopus/Web of Science, Результаты работы докладывались и обсуждались на нескольких научных форумах и симпозиумах, в том числе:

- Международный симпозиум «4th IEEE International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering» 2022 (Москва);
- XXXII Международный научный симпозиум «Неделя Горняка – 2024»

Общая оценка и замечания по диссертационной работе

Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование. Диссертация правильно структурирована, а содержательный материал выстроен в четкую логическую последовательность. Текст изложен

грамотным языком с использованием общепринятой научно-технической терминологии и практически полностью исключает возможность неоднозначных толкований сформулированных положений, математических выражений и выводов. Поэтому в целом, стиль изложения может быть объективно квалифицирован как научный. Содержание реферата полностью соответствует по структуре и содержанию тексту диссертации.

К достоинствам работы следует отнести предложенный автором оригинальный подход к решению задачи планирования перемещений автономного карьерного самосвала, в котором поиск оптимальных трасс – опорных точек для построения траекторий движения роботов опирается на использование мульти-фрактальных геопространственных моделей, а также разработанные автором алгоритмы, реализующие различные механизмы параллельных вычислений, на которых базируется метод оптимальной маршрутизации автономных самосвалов. Кроме того, следует отметить большой объем проведенных вычислительных экспериментов, в которых использовались геотехнологические данные реальных карьерных дорог, результаты которых подтверждают достоверность выводов автора диссертации.

Диссертация, тем не менее, имеет ряд недостатков, которые перечислены ниже:

1. Разработанный автором метод позволяет определить некоторое множество реперных точек, которые рассматриваются автором как основа для построения реальной траектории перемещения робота самосвала. Поскольку в диссертации мы имеем дело с сильно упрощенной моделью движения автономного транспортного средства, остается не ясным, каким образом будет влиять выбор при перемещении роботов различных сглаженных траекторий (проходящих через одни и те же опорные точки) на оценки стоимости, вычисленные разработанным методом.
2. В диссертации автором фокусируется внимание на алгоритме Дейкстры и вариантах повышения его эффективности за счет организации

параллельных вычислений. Не умаляя достоинств алгоритма Дейкстры, как надежного средства поиска точных решений на графах большой размерности, отметим, что в данном случае высокая точность и не требуется, а вот другие более современные средства планирования движения роботов на дорогах, в которых не используются пространственные примитивы, но оптимизируется структура графа, по которому осуществляется поиск решений (например, алгоритм RRT), к сожалению, автор не рассматривает.

3. В работе утверждается, что использование параллельного алгоритма Дейкстры существенно снижает время вычислений, что является важным фактором при планировании перемещения робота-самосвала. Многочисленные вычислительные эксперименты, приведенные в работе подтверждают эффективность представленного подхода. Однако, в работе отсутствуют какие либо зависимости, определяющие связь между характеристиками дорожного полотна, количеством потенциальных препятствий, возникающих в случае одновременного планирования для двух и более автосамосвалов, и суммарным временем вычислений. Это естественно, усложняет практическое использование метода.
4. Нейронные сети используются для решения прогнозных задач уже многие десятилетия. В работе используется для решения задачи прогнозирования нейронная сеть с граф-конволюционной архитектурой, которая хорошо зарекомендовала себя при решении транспортных задач в условиях городской транспортной сети. Автор предлагает использование данной модели для прогнозирования скорости в любых точках конкретного дорожного полотна (которые лежат вне существующих трасс), опираясь на структурную матрицу мульти-фрактальной модели. Очевидным недостатком этой части работы является отсутствие сравнительного анализа результатов, полученных с использованием данной и архитектуры

и хотя бы одной из существующих сегодня и упомянутых автором в анализе архитектур с глубоким обучением.

Отмеченные замечания не влияют на положительную в целом оценку диссертационной работы, научная и практическая ценность которой не вызывает сомнений.

Заключение

Диссертационная работа, представленная к публичной защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика представляет собой законченное исследование, в котором получены новые результаты в сфере планирования маршрутов перемещения автономных карьерных самосвалов на основе учета характеристик технологических дорог карьера и режимов движения по конкретным трассам в рамках этих дорог, представленные в виде метода и алгоритмов, которые являются ценными для различных научных и производственных организаций, занимающихся вопросами повышения эффективности и безопасности функционирования автономных транспортных систем.

Представленная работа полностью соответствует паспорту специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика, а именно следующим пунктам паспорта:

4 - Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта;

10 - Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах;

11. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов.

Таким образом, по актуальности и объему выполненных исследований, научной новизне, достоверности и практической значимости полученных результатов и выводов, диссертационная работа «Метод и алгоритмы планирования маршрутов движения автономного карьерного транспорта с использованием параллельных вычислительных процедур» полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» в НИТУ МИСИС, а ее автор **Аль-Саиди Аднан Адаб К.** заслуживает присуждение ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Диссертационная работа была рассмотрена на заседании кафедры ИУ5 «Системы обработки информации и управления» факультета Информатика и систем управления Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», протокол № 11 от «27» июня 2024 г.

Заведующий кафедрой ИУ5

**«Системы обработки информации
и управления», к.т.н., доцент**



Терехов Валерий Игоревич

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»,
105005, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ
Басманный, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1,
тел. +7 (499) 263 63 91,
адрес официального сайта: <https://bmstu.ru>.