



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук
(ИМАШ РАН)

Малый Харитоньевский пер., дом 4, Москва, 101000
телефон/факс: (495) 624-98-00, (495) 624-98-63, e-mail: info@imash.ru, www.imash.ru
ОКПО 00224588, ОГРН 1037700067492, ИНН 7701018175, КПП 770101001

26.02.2024 № 11503-ИИ.1/12-87
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
Института по научной работе
д.т.н., профессор

Ерофеев М.Н.

«26» февраля 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук
на диссертационную работу Крестовникова Константина Дмитриевича
**«Алгоритмы и программная система управления группой наземных
роботов с перераспределением энергетических ресурсов»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

1. Актуальность темы диссертации

Исследования способов перераспределения ресурсов в группах робототехнических средств сосредоточены на биологически инспирированных подходах к управлению, оптимизации распределения целевых заданий и перемещения роботов, а также на вспомогательных сервисных задачах. Научные проблемы энергетического обеспечения и планирования при групповом управлении рассматриваются со стороны поддержания энергетических параметров роботов и распределения задач соответствующим образом.

Группа наземных роботов на открытом пространстве может выполнять различные задачи: составление карты, мониторинг местности, поиск объектов интереса, доставка оборудования и обеспечение его функционирования. Использование нескольких гомогенных или гетерогенных роботов для решения целевых задач дает преимущества в виде снижения затрат времени или расширения функциональных возможностей по сравнению с одиночным роботом. При этом также возрастает количество ресурсов, необходимое для обеспечения работы группы роботов. Выполнение задач и движение по маршруту расходует ресурс аккумуляторной батареи робота, которого может быть недостаточно для выполнения всей миссии в целом. Для экономии времени и расширения области функционирования в случаях ограниченного энергетического запаса роботов группы имеет смысл разделять по специализации и использовать заряжающих роботов, которые будут восполнять ресурсы роботов-рабочих. Таким образом, эффективное перераспределение энергетических ресурсов внутри группы роботов является актуальной научно-технической задачей.

Осуществить передачу электрической энергии между роботами можно с помощью контактных методов, но в этом случае как правило требуется высокая точность позиционирования, что усложняет сенсорную систему робота. Кроме того, разъемы и контактные пары требуют регулярного обслуживания и должны иметь пылевлагозащищенное исполнение для функционирования в естественной окружающей среде на открытом пространстве. Учитывая тот факт, что функционирование группы роботов может происходить на неоднородных поверхностях, а также несовершенство сенсорных систем, контактные методы передачи энергии имеют значительные ограничения и снижают общую надежность. Данных недостатков лишены беспроводные системы передачи энергии, которые находят применение в качестве устройств для беспроводного заряда аккумуляторов различных автономных систем. В связи с этим, актуальным представляется разработка подхода к функционированию группы наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов посредством беспроводной передачи энергии.

2. Научная новизна и основные результаты исследований

Целью диссертационной работы Крестовникова К.Д. является снижение временных затрат и расширение территории функционирования группы роботов, выполняющих задачи на открытой местности с переменным рельефом посредством перераспределения энергетических ресурсов внутри группы с применением системы беспроводной передачи энергии. В качестве объекта исследования выступает процесс управления группой наземных роботов, оснащенных двунаправленной беспроводной системой передачи энергии. Предметом исследования являются модели и алгоритмы группового управления роботами при перераспределении энергетических ресурсов и реализации целевых задач.

Научную новизну работы составляют:

1. Математическая модель управления группой наземных роботов, отличающаяся новыми условиями решения задачи, учитывающая перераспределение энергетических ресурсов между роботами и оптимизирующая выполнение целевых задач.

2. Комплекс алгоритмов группового централизованного управления наземными роботами, отличающийся совокупностью правил и реализующий перераспределение энергетических ресурсов на маршрутах между точками местоположения целевых задач при передвижении на открытом пространстве с переменным рельефом, обеспечивающий уменьшение общего времени выполнения целевых задач.

3. Архитектура программной системы управления группой наземных роботов, отличающаяся применением нескольких шин данных, осуществляющих соединение модулей системы управления группой роботов, модулей отдельного наземного робота и информационный обмен между ними; наличием модуля определения координат точек энергетического обмена между рабочим и заряжающим роботом.

Разработанная математическая модель отличается введением новых параметров, описывающих энергетические характеристики роботов и задач, а также учитывает возможность энергетического обмена между роботами посредством беспроводной системы передачи энергии. Модель описывает

принципы функционирования роботов и их взаимодействия. В модели заданы значения максимальных и минимальных уровней энергетических ресурсов для роботов, которые используются для определения выполнимых задач и точек заряда на траекториях роботов-рабочих.

Разработанные алгоритмы функционирования группы наземных роботов отличаются реализацией процессов перераспределения энергетических ресурсов между роботами на основе результатов предварительного планирования внешней централизованной системой управления. В качестве точек заряда выбираются участки траектории имеющие минимальное отклонение по высоте между соседними точками карты высот, что обеспечивает увеличение эффективности передачи энергии между роботами и сокращение временных затрат на данный процесс.

Экспериментально проведено сравнение между группами, функционирующими с традиционными принципами и на основе представленного подхода. Имитационное моделирование проведено в среде Gazebo по двум сценариям. В первом сценарии все шесть роботов были рабочими и выполняли задачи, а во втором группа была разделена поровну на роботов-рабочих и роботов-заряжающих. Проведено три набора экспериментов, в которых изменялось количество задач от шести до 15. Максимальная разница во времени выполнения задач группами достигается при среднем расстоянии от зарядной станции до задачи 225 м, количестве задач от 13 до 15 и составляет более 25 %. Одним из преимуществ разработанного алгоритмического обеспечения является расширение области функционирования группы. Подтверждение данного факта проведено посредством вычислительного эксперимента. При расходе 20 % запаса энергии робота на выполнение задачи радиус работы группы с перераспределением ресурсов будет больше в 1,66 раз, чем у группы с традиционным принципом функционирования. При увеличении количества энергии необходимого для выполнения задачи до 80% разница в радиусах функционирования превышает 9 раз, с преимуществом у группы с перераспределением ресурсов.

Результаты экспериментов подтверждают работоспособность и эффективность разработанных решений. Перераспределение энергетических ресурсов позволяет значительно расширить область функционирования группы роботов и использовать ее для потенциально более энергоемких задач.

3. Достоверность и обоснованность основных результатов исследований

Достоверность положений, основных выводов и результатов диссертации подтверждается анализом современных исследований в данной области, согласованностью теоретических выводов с результатами экспериментальной проверки разработанных решений, а также апробацией основных теоретических положений диссертации в печатных трудах и докладах на международных и российских научных специализированных конференциях: «Современные проблемы робототехники 2019» (Москва, МГТУ имени Н.Э. Баумана 26.03.2019), «18th International Conference on Smart Technologies» (IEEE EUROCON 2019, Novi Sad, Serbia, 1-4 июля 2019), «International Conference on Interactive Collaborative Robotics» (ICR-2019, Istanbul, Turkey, 20-25 Августа 2019), «International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"» (ER(ZR)-2019, Курск, 17-19 апреля 2019), International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER(ZR)-2021, Санкт-Петербург, 14-17 апреля 2021), «СПИСОК-2023: Всероссийская научно-практическая конференция» (Санкт-Петербург, 26-28 апреля 2023), Донецкий международный круглый стол «Искусственный интеллект: теоретические аспекты и практическое применение» в рамках IX Международного Научного форума Донецкой Народной Республики (24 мая 2023), МКПУ-2023 XVI-я всероссийская мультikonференция по проблемам управления (11-15 сентября 2023)

4. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационного исследования

В диссертационной работе Крестовников К.Д. решена актуальная научная задача разработки алгоритмов, моделей процессов и средств управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических

ресурсов. Решенная задача имеет важное значение для развития подходов и технических средств группового управления роботами наземного и других сред базирования. Практическая ценность научных результатов соискателя заключается в расширении территории функционирования группы роботов и снижении времени выполнения целевых задач на открытой местности с переменным рельефом. Разработанное модельно-алгоритмическое и программно-аппаратное обеспечение группового управления роботами было использовано при проведении исследовательских работ СПб ФИЦ РАН, КБНЦ РАН, ООО «РУФИЛМС ИННОВЕЙШЕН», и в учебном процессе Калининградского государственного технического университета, получены соответствующие акты внедрения.

5. Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Результаты, полученные в данной работе, рекомендуется внедрить в образовательные учреждения, специализирующиеся на управлении в технических системах и робототехнике, такие как Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, а также имеющие направление системного программирования, такие как Санкт-Петербургский государственный университет.

6. Общая оценка диссертационной работы

При оценке диссертации Крестовникова К.Д. было отмечено, что данное исследование является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной автором на высоком уровне. В данной работе решена актуальная и практически значимая научная задача разработки модели и алгоритмов управления группой наземных роботов с перераспределением ресурсов. Результаты диссертационной работы представлялись на международных и российских конференциях, основные положения описаны в нескольких научных статьях, опубликованных в российских и зарубежных изданиях. Имеются 10 публикаций в журналах из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на

соискание ученой степени доктора наук», две статьи в указанном перечне опубликованы без соавторов

В тоже время можно выделить и ряд замечаний к диссертационной работе.

1. Целесообразно было бы более подробно обосновать выбор оптимального количества роботов, а также оценить экономический эффект от внедрения предложенных в диссертационной работе алгоритмов.

2. В диссертационной работе недостаточно подробно описано решение задачи о назначениях, а также неясно в чем преимущества и недостатки используемого в работе Венгерского алгоритма.

3. Автору следовало бы более подробно описать конструкции исследуемых роботов.

4. Автору следовало бы более подробно рассмотреть вопрос практического внедрения и использования разработанных в диссертационной работе решений.

Однако указанные выше замечания не снижают уровень выполненного соискателем исследования. Предложенный подход к управлению группой наземных роботов позволяет расширить территорию функционирования и решать роботам более энергоемкие задачи. Предлагаемые решения являются существенным вкладом в развитие робототехнических систем с групповым управлением. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертационной работы. Цель и задачи исследования корректно сформулированы и выполнены, что подтверждают результаты моделирования и эксперименты.

Диссертационная работа Крестовникова Константина Дмитриевича «Алгоритмы и программная система управления группой наземных роботов с перераспределением энергетических ресурсов» удовлетворяет требованиям пп.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 (в редакции Постановления Правительства РФ от 26.10.2023 № 1786), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор работы Крестовников К.Д. заслуживает присуждения ученой степени кандидата

технических наук по специальности 2.3.5. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Доклад Крестовникова Константина Дмитриевича был заслушан на заседании научно-технического совета отдела «Механика машин и управление машинами» ИМАШ РАН, протокол № 106/24 от «10» января 2024 г.

Заместитель председателя НТС отдела,
доктор технических наук

А.К. Алёшин
26.02.2024

Почтовый адрес: 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д.4.

Тел: +7-495-628-87-30

E-mail: aleshin_ak@mail.ru

Организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Должность: ведущий научный сотрудник

Сайт организации: <http://imash.ru>

Учёный секретарь НТС,
кандидат технических наук

П.А. Скворцов
26.02.2024

Почтовый адрес: 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д.4.

Тел: +7-495-628-87-30

E-mail: SkvortsovPA@yandex.ru

Организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Должность: научный сотрудник

Сайт организации: <http://imash.ru>

Подписи А.К. Алёшина и П.А. Скворцова заверяю

Ведущий специалист
по кадрам
Е.М. Роданов