

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Бордюгова Дениса Владимировича на тему «Управление движением опорных элементов мобильных роботов с изменяемой внутренней конфигурацией», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)

Актуальность темы исследования

Исследование и разработка мобильных роботов является актуальной задачей развития современной робототехники. Диссертационная работа освещает концептуальные проблемы капсульного «шагающеподобного» (терминология автора исследования) робота и предлагает способы их решения. Автор акцентирует внимание на таких преимуществах мобильных капсульных роботов, как эффективность использования в ограниченном пространстве вследствие отсутствия внешних движителей и общая простота механического устройства. Недостатком известных капсульных роботов является сильное проскальзывание робота при взаимодействии с поверхностью, что ухудшает энергетическую эффективность и снижает точность позиционирования робота. Автор предлагает оригинальное решение проблемы проскальзывания робота путём поочерёдного выдвижения из корпуса робота опор, контактирующих с поверхностью перемещения. В таком случае, проскальзывание робота относительно поверхности перемещения можно полагать пренебрежимо малым, поскольку капсульный робот теперь перемещается не за счет скольжения, а за счет движения, подобного шагам, с попаренным зацеплением с поверхностью каждой из выдвижных опор. Задача управления выдвижными опорами является актуальной задачей разработки мобильных роботов с изменяемой внутренней конфигурацией, в том числе капсульных роботов «шагающеподобного» типа.

Анализ содержания диссертационной работы

Во введении приведено обоснование выбора решаемой в диссертации научно-технической проблемы, обоснована актуальность проблемы. Сформулирована цель и перечислены задачи, решенные в процессе поискового исследования. Подчёркнута научная новизна диссертационной работы. Обозначены методология и методы исследования, теоретическая и практическая значимость, выносимые на защиту положения. Приведены сведения по апробации, достоверности и обоснованности результатов. Перечислены основные публикации автора по теме результатов диссертационной работы.

В первой главе проведен обзор и анализ литературных источников. Выполнен подробный обзор современного состояния развития и исследований класса мобильных роботов с шагающими и «шагающеподобными» движителями, в том числе лазающих роботов. На основании проведенного обзора и анализа литературных источников автором сделан вывод о том, что алгоритмы управления движением подвижных опор капсулых «шагающеподобных» мобильных роботов изучены в недостаточной мере и могут рассматриваться в качестве направления перспективных научных исследований. Мобильные роботы капсулного типа с выдвижными опорами могут использоваться для операций переноски грузов по плоским поверхностям, для движения по высоковольтным линиям с целью их поверки. По результатам первой главы автор делает вывод об актуальности решения инженерно-технической задачи и необходимости осуществления научно-исследовательской работы с целью разработки методов управления движением опорных элементов мобильных роботов с изменяемой внутренней конфигурацией.

Во второй главе приведена разработанная автором математическая модель динамики движения мобильного робота капсулного типа с выдвижными опорами. Автором разработаны расчетные схемы для мобильного робота капсулного типа с выдвижными опорами и одним или несколькими внутренними телами. Разработанные

автором расчетные схемы позволяют устанавливать законы движения мобильного робота капсульного типа с выдвижными опорами по заданной траектории с учетом массово-геометрических параметров робота. Представлены описания программного движения мобильного робота капсульного типа с выдвижными опорами при перемещении по плоским горизонтальным и наклонным поверхностям. Определена траектория движения геометрического центра мобильного робота капсульного типа с выдвижными опорами при различных алгоритмах смены опорных стоек. Детально описаны алгоритмы управления опорными стойками, позволяющие реализовать основные направления движения (прямое, боковое, по диагонали, и по дуге окружности). Хорошее качество маневренности мобильного робота капсульного типа достигается за счёт предложенного и разработанного автором метода управления движением опорных элементов, позволяющего избегать проскальзывания в момент контакта робота с поверхностью. Автором решена задача оптимизации движения мобильного робота капсульного типа с выдвижными опорами по критерию минимизации отклонения от заданной траектории движения.

В третьей главе приведена разработанная автором математическая модель квазистатического движения лазающего мобильного робота капсульного типа с заклиниванием опорных элементов. Автором разработаны расчетные схемы для лазающего мобильного робота капсульного типа с заклинивающими опорными втулками. Разработанные автором расчетные схемы позволяют устанавливать законы движения лазающего мобильного робота капсульного типа с заклинивающими опорными втулками по заданной траектории с учетом массово-геометрических параметров робота. Представлены описания программного движения лазающего мобильного робота капсульного типа с заклинивающими опорными втулками при перемещении по различно ориентированным в пространстве направляющим. Определены показатели, оказывающие наибольшее влияние на величину требуемого

усилия, создаваемого приводом лазающего мобильного робота капсульного типа с заклинивающими опорными втулками.

В четвертой главе описана методика и результаты экспериментальных исследований с целью верификации математических моделей мобильного робота капсульного типа с выдвижными опорами и лазающего мобильного робота капсульного типа с заклиниванием опорных элементов. Проведены лабораторные исследования с прототипами мобильного робота капсульного типа с выдвижными опорами и лазающего мобильного робота капсульного типа с заклиниванием опорных элементов. Экспериментально подтверждена эффективность разработанных алгоритмов программного движения мобильного робота капсульного типа с выдвижными опорами и лазающего мобильного робота капсульного типа с заклиниванием опорных элементов по критерию минимизации отклонений от заданной траектории. Экспериментально подтверждено отсутствие проскальзывания выдвижных опор и заклинивающих опорных втулок соответствующих мобильных роботов капсульного типа с изменяемой внутренней конфигурацией.

В заключении сформулированы научно-технические положения и результаты, полученные автором в процессе выполнения научно-квалификационной работы.

Список литературы по диссертации включает в себя 112 источников, в том числе на иностранном языке, что показывает полноту картины представления автора о современном состоянии развития мобильных роботов капсульного типа.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки). Области исследования паспорта, которым соответствует диссертация:

- п.4 «Математическое и полунатурное моделирование мехатронных и робототехнических систем, включая взаимодействие со средой, анализ их характеристик, оптимизация и синтез по результатам моделирования», так как в диссертации производится разработка и верификация математических моделей мобильного робота капсульного типа с выдвижными опорами и лазающего мобильного робота капсульного типа с заклиниванием опорных элементов; проведены лабораторные исследования прототипов указанных типов мобильных капсульных роботов;
- п.5 «Методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства управления роботами, робототехническими и мехатронными системами, включая адаптивное, оптимальное, распределенное, интеллектуальное и супервизорное управление», поскольку в диссертации приводится разработка и исследование методов и алгоритмов управления движителями мобильных роботов.

Методы исследования

При решении поставленных задач были использованы методы теории робототехнических систем, теоретической механики, теории механизмов и машин.

Для экспериментального исследования использовались методы математического и компьютерного моделирования. Прототипы мобильных роботов с изменяемой конфигурацией изготовлены с использованием аддитивных технологий.

Апробация работы и подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертации были доложены на выступлениях всероссийских и международных научных конференций. Основные положения диссертации представлены в 7 публикациях в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, в 4 публикациях в научных изданиях, индексируемых международными базами данных, также автором получен 1 патент на полезную модель.

Научная новизна

Наиболее важными результатами диссертации, обладающими признаками научной новизны, являются:

- 1) алгоритмы управления конфигурацией голономных связей на основе разработанных математических моделей движения мобильных роботов капсульного типа с выдвижными опорами и лазающего мобильного робота капсульного типа с заклиниванием опорных элементов;
- 2) метод планирования движения мобильного робота капсульного типа с выдвижными опорами при перемещении по плоским горизонтальным и наклонным поверхностям, оптимизированный по минимизации отклонения робота от заданной траектории;
- 3) установлены аналитические зависимости развиваемых приводами усилий для лазающего мобильного робота капсульного типа с заклинивающими опорными втулками;
- 4) представлены экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность разработанных математических моделей и эффективность разработанных алгоритмов управления движителями мобильных роботов с изменяемой внутренней конфигурацией.

Ценность для науки и практики и рекомендации по использованию результатов исследований

Научная ценность заключается в разработке методов управления движением опорных элементов мобильных роботов с изменяемой внутренней конфигурацией для типов капсульных роботов с выдвижными опорами и с заклиниванием опорных элементов. Разработанные методы способствуют повышению точности перемещения роботов по заданной траектории, а также оптимизации по критерию энергетической эффективности.

Практическая значимость диссертации заключается в востребованности результатов научно-исследовательской работы при проектировании транспортировочных роботов с выдвижными опорами, а также роботов-инспекторов линий электропередач с движителями заклинивающего типа.

Результаты работы могут быть применены в научно-исследовательских и проектных организациях, занимающихся разработкой мобильных роботов для выполнения различных задач.

Замечания по диссертационной работе

1. В тексте автореферата и диссертации отсутствует явно выделенный пункт объекта исследования диссертации. Выделение не является обязательным, но значительно облегчает восприятие для читающих диссертацию.
2. Во второй главе при описании математических моделей движения мобильного робота с изменяемой внутренней конфигурацией на стр. 48, 53 указано, что b – «расстояние от центра корпуса мобильного робота до опоры, находящейся во взаимодействии с поверхностью». При этом на соответствующих рисунках 2.4 и 2.5 обозначение b соответствует расстоянию от каждой из осей центральной симметрии корпуса робота до вертикальной оси опоры. Иными словами, расстояние от центра корпуса робота до вертикальной оси опоры, в таком случае, становится равным $\sqrt{b^2 + b^2}$, то есть $b\sqrt{2}$, но не b .
3. Отсутствует единообразие в оформлении иллюстраций, некоторые рисунки (например, стр. 57, 70 и др.) выполнены в достаточно низком качестве. Тем не менее, рисунки вполне читаемые.
4. Несмотря на заявленное название работы «Управление движением опорных элементов мобильных роботов с изменяемой внутренней конфигурацией», всё описание разработки методов управления движением,

представленное в диссертации, сводится к текстовому описанию на стр. 45 и к таблице на стр. 60. В диссертации достаточно подробно описываются успешно проведенные эксперименты, при этом в тексте диссертации отсутствуют упоминания положений теории автоматического управления, отсутствует описание передаточных функций, описание проверки устойчивости динамической системы. Какие методы использовались для проверки устойчивости движения мобильного робота с изменяемой внутренней конфигурацией на этапе составления математической модели?

5. В диссертации заявлено решение задачи многокритериальной оптимизации движения мобильного робота с изменяемой внутренней конфигурацией, подтверждённое экспериментально, эксперименты описаны достаточно подробно в четвёртой главе. Во второй главе автор предлагает решение задачи многокритериальной оптимизации, приводит одну целевую функцию, и даёт результат решения задачи оптимизации. Из текста диссертации не ясно, как выбирались остальные целевые функции, по каким критериям решалась задача многокритериальной оптимизации? Какие методы использовались для решения задачи многокритериальной оптимизации?
6. Автором упомянуто решение задачи оптимизации движения робота. Приводится условие оптимального движения мобильного робота капсульного типа с выдвижными опорами для некоторого параметра (или переменной?) i , при этом не указан физический смысл i , не даются ссылки на формулы, содержащие параметр (или переменную?) i . Таблица на стр. 76 содержит значения i , называя их «решением оптимационной задачи». Каков их физический смысл? Какая роль значения i в управлении движением мобильного робота?

7. Таблица с результатами экспериментальных исследований главы 4 была бы предпочтительнее текстового описания и сильно облегчила восприятие результатов эксперимента.

Общее заключение по работе

Перечисленные выше замечания не влияют на общую оценку работы, которая является законченным исследованием, направленным на решение важной научно-технической задачи. Результаты диссертации обладают научной новизной и представляют практический интерес. По своему содержанию, научной новизне и практической ценности она соответствует требованиям пп. 9–11, 13–14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Бордюгов Денис Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки).

Официальный оппонент выражает своё согласие на обработку персональных данных.

Официальный оппонент:

к.т.н., старший преподаватель

факультета компьютерных и инженерных наук

института анализа данных и искусственного интеллекта

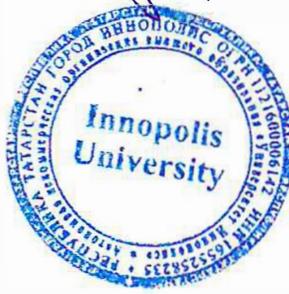
АНО ВО «Университет Иннополис»

Марчук Евгений Александрович

« <u>10</u> »	листов	Вх.№ <u>0.5-65-190</u>
« <u>28</u> »		11 2025.
ВолгГТУ		

Сотрудник ознакомлен

28.11.2025 *[Signature]*



Подпись Марчук Е.А. заверяю.
Директор по развитию и кадровой политике
АНО ВО «Университет Иннополис»

[Signature] Р.Ф. Валиев
24.11.2025 г.

Сведения о лице, подписавшем отзыв:

Марчук Евгений Александрович

Место работы: автономная некоммерческая организация высшего образования
«Университет Иннополис»

Должность: старший преподаватель факультета компьютерных и инженерных наук, Институт анализа данных и искусственного интеллекта.

Адрес: 420500, Республика Татарстан, Верхнеуслонский муниципальный район, город Иннополис, улица Университетская, д. 1.

Телефон: +7 (843) 203-92-53

E-mail: e.marchuk@innopolis.ru

Специальность, по которой защищалась диссертация: 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)