



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки – 15.04.06 «Мехатроника и робототехника»
ООП Управление робототехническими комплексами и мехатронными системами
Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТКА МАГИСТРАНТА

Тема работы
Исследование эффектов проскальзывания при навигации мобильного робота при движении по неоднородным поверхностям

УДК 531.14:629.072.1:007.52

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ11	Брылев Олег Александрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас А.А.	К.Т.Н., доцент		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОАР ИШИТР	Беляев А.С.	—		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Былкова Т.В.	канд. экон. наук, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП	Федорчук Ю.М.	д-р техн. наук, профессор		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИИШТР	Кузьминская Е.В.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас А.А.	К.Т.Н., доцент		

Томск – 2023 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий.
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели.
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(-ых) языке(-ах), для академического и профессионального взаимодействия.
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия.
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен применять естественнонаучные и инженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.
ОПК(У)-2	Способен применять основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации в области машиностроения.
ОПК(У)-3	Способен осуществлять профессиональную деятельность с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений на всех этапах жизненного уровня.
ОПК(У)-4	Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при моделировании технологических процессов.
ОПК(У)-5	Способен разрабатывать нормативно-техническую документацию, связанную с профессиональной деятельностью с учетом стандартов, норм и правил.
ОПК(У)-6	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий.
ОПК(У)-7	Способен разрабатывать современные экологичные и безопасные методы рационального использования сырьевых и энергетических ресурсов в машиностроении.
ОПК(У)-8	Способен оптимизировать затраты на обеспечение деятельности производственных подразделений.
ОПК(У)-9	Способен разрабатывать и осваивать новое технологическое оборудование.
ОПК(У)-10	Способен разрабатывать методики контроля и обеспечения производственной и экологической безопасности на рабочих местах.
ОПК(У)-11	Способен организовывать разработку и применение алгоритмов и современных цифровых программных методов расчетов и проектирования отдельных устройств и подсистем мехатронных и робототехнических систем с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматики, измерительной и вычислительной техники в соответствии с техническим заданием, разрабатывать цифровые алгоритмы и программы управления робототехнических систем.
ОПК(У)-12	Способен организовывать монтаж, наладку, настройку и сдачу

Код компетенции	Наименование компетенции
	в эксплуатацию опытных образцов мехатронных и робототехнических систем, их подсистем и отдельных модулей.
ОПК(У)-13	Способен использовать основные положения, законы и методы естественных наук и математики при формировании моделей и методов исследования мехатронных и робототехнических систем.
ОПК(У)-14	Способен организовывать и осуществлять профессиональную подготовку по образовательным программам в области машиностроения.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен обрабатывать и анализировать научно-техническую информацию, планировать и проводить эксперименты и оформлять результаты исследований и разработок.
ПК(У)-2	Готов к оформлению элементов документации, проектов планов и программ проведения отдельных этапов работ.
ПК(У)-3	Способен к разработке рабочей проектно-конструкторской и эксплуатационной документации РТС в соответствии с требованиями нормативной документации.
ПК(У)-4	Готов разработать программное обеспечение изделий РТС робототехники.



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки – 15.04.06 «Мехатроника и робототехника»
Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) _____ (Дата) Филипас А.А.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
8ЕМ11	Брылев Олег Александрович

Тема работы:

Исследование эффектов проскальзывания при навигации мобильного робота при движении по неоднородным поверхностям	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 38-110/с от 07.02.2023

Срок сдачи студентом выполненной работы:	02.06.2023
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объектом исследования является проскальзывание колёс всенаправленного мобильного робота Festo Robotino 2 в задачах навигации при движении робота по неоднородной поверхности. Исследование эффекта проскальзывания колёс должна производиться с учётом имеющейся лабораторной базы, а именно: – мобильная робототехническая платформа Festo Robotino 2; – испытательный полигон, имитирующий неоднородную среду и набор поверхностей с различными свойствами; – система технического зрения.
--	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1) Аналитический обзор существующих методов определения проскальзывания колёс мобильных роботов; 2) Проведение экспериментов по получению данных о движении робота по поверхностям с различными свойствами; 3) Анализ полученных данных; 4) Построение моделей зависимости коэффициента проскальзывания колеса от тока двигателя; 5) Настройка фильтра Калмана для двигателя постоянного тока; 6) Апробация системы оценки проскальзывания колёс.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Графики зависимости среднего значения тока двигателя от направления движения на разных типах поверхности, график зависимости проскальзывания колеса от тока двигателя на трёх поверхностях, сравнение графиков нормированной угловой скорости и среднего значения тока, график зависимости проскальзывания колеса от тока двигателя с учётом нормированной угловой скорости, график линейных моделей проскальзывания и исходных данных, график работы фильтра Калмана.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН ШБИП Былкова Татьяна Васильева
Социальная ответственность	Профессор ООД ШБИП Федорчук Юрий Митрофанович
Раздел на иностранном языке	Доцент ОИЯ ШБИП Диденко Анастасия Владимировна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Обзор литературы	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	07.02.2023
--	-------------------

Задание выдал руководитель и консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас А.А.	К.Т.Н., доцент		07.02.2023
Старший преподаватель ОАР ИШИТР	Беляев А.С.	—		07.02.2023

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ11	Брылев Олег Александрович		07.02.2023



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки (ООП) – 15.04.06 «Мехатроника и робототехника»
Уровень образования – Магистратура
Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники
Период выполнения – Весенний семестр 2022/2023 учебного года

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
8ЕМ11	Брылев Олег Александрович

Тема работы:

Исследование эффектов проскальзывания при навигации мобильного робота при движении по неоднородным поверхностям

Срок сдачи студентом выполненной работы:	02.06.2023
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
29.05.2023	Основная часть ВКР	60
30.05.2023	Раздел «Социальная ответственность»	20
30.05.2023	Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас А.А.	К.Т.Н., доцент		07.02.2023

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОАР ИШИТР	Беляев А.С.	—		07.02.2023

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас А.А.	К.Т.Н., доцент		07.02.2023

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ11	Брылев Олег Александрович		07.02.2023

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 99 с., 34 рис., 32 табл., 62 источника, 1 прил.

Ключевые слова: колёсный мобильный робот, навигация, локализация, проскальзывание колёс, неоднородная среда, одометрия, фильтр Калмана.

Объектом исследования является проскальзывание колёс всенаправленного мобильного робота Festo Robotino 2 в задачах навигации при движении робота по неоднородной поверхности.

Цель работы – исследование эффекта проскальзывания колёс всенаправленного мобильного робота Festo Robotino 2 в задачах навигации при движении робота по неоднородной поверхности.

В процессе исследования был проведён аналитический обзор существующих методов определения проскальзывания колёс мобильных роботов. Были проведены эксперименты по получению данных о движении робота по поверхностям с различными свойствами. Экспериментальные данные были проанализированы на наличие различных зависимостей, которые могут быть полезны для оценки проскальзывания колёс мобильного робота. По экспериментальным данным были построены модели зависимости коэффициента проскальзывания от тока двигателя с учётом нормированной угловой скорости колёс. Для фильтрации шумов в измерениях тока двигателей был настроен фильтр Калмана. В конце была проведена апробация системы оценки проскальзывания колёс мобильного робота.

По интегральному показателю эффективности и по сравнительной эффективности разработки предлагаемая разработка является самой эффективной из рассмотренных в данной работе вариантов. Прирост эффективности в сравнении с аналогами составил 14%.

В будущем планируется продолжить работу в данном направлении.

Содержание

Введение.....	11
Определения	14
Обозначения и сокращения.....	16
1 Основной раздел.....	17
1.1 Обзор литературы.....	17
1.1.1 Решения на основе проприоцептивных датчиков	18
1.1.2 Решения на основе экстероцептивных датчиков.....	21
1.1.3 Решения на основе проприоцептивных и экстероцептивных датчиков	23
1.2 Постановка экспериментов.....	25
1.2.1 Описание испытательного полигона, мобильного робота и системы технического зрения.....	25
1.2.2 План эксперимента	27
1.2.3 Предварительная обработка данных.....	30
1.2.4 Анализ экспериментальных данных	33
1.3 Учёт нормированной угловой скорости колёс для частного случая...	38
1.4 Построение моделей проскальзывания на разных типах поверхности	41
1.5 Фильтр Калмана.....	44
1.5.1 Идентификация модели двигателя постоянного тока робота Festo Robotino 2	45
1.5.2 Линеаризация модели и переход в пространство состояний	50
1.5.3 Дискретизация модели.....	52
1.5.4 Алгоритм работы фильтра Калмана.....	53
1.5.5 Оценка ковариационных матриц шумов процесса Q и измерений R	54
1.5.6 Проверка работы фильтра Калмана	55
1.6 Апробация системы оценки проскальзывания колёс	58

2	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	61
2.1	Предпроектный анализ.....	61
2.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	61
2.1.2	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	62
2.1.3	SWOT-анализ.....	63
2.1.4	Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	65
2.1.5	Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	67
2.2	Инициация проекта.....	67
2.3	Планирование управления научно-техническим проектом.....	68
2.3.1	План проекта.....	68
2.3.2	Бюджет научного исследования	71
2.4	Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	74
2.4.1	Оценка сравнительной эффективности исследования	74
3	Социальная ответственность	79
3.1	Вредные факторы	79
3.1.1	Отклонения показателей микроклимата в помещении	79
3.1.2	Превышение уровней шума	80
3.1.3	Повышенный уровень электромагнитных излучений	81
3.1.4	Недостаточная освещённость	83
3.2	Опасные факторы	86
3.2.1	Электроопасность	86
3.2.2	Пожароопасность	87
3.3	Экологическая безопасность	90
3.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	91
	Заключение	93
	Список используемых источников.....	94

Приложение А	100
--------------------	-----

Введение

Навигация является одной из ключевых задач в мобильной робототехнике. Навигация мобильного робота – это определение положения робота в некоторой системе отсчёта, планирование пути к месту назначения и его реализация. Для планирования пути роботу необходимо построить карту местности (здания, помещения и пр.) либо использовать уже готовую карту. Таким образом, задача навигации мобильного робота является комбинацией трёх базовых задач [1, с. 3-4]:

- 1) локализации,
- 2) планирования пути,
- 3) построения и интерпретации карты.

При этом задачу локализации решают в первую очередь, так как без информации о текущем положении робота невозможно решение остальных задач навигации. Кроме того, точность построения карты в значительной степени обуславливается точностью локализации робота.

Существенное влияние на точность локализации мобильного робота оказывает внешняя среда. Indoor роботы, которые предназначены для передвижения в помещениях, обычно имеют в своём распоряжении структурированную среду: ровный однородный пол и качественное сцепление колеса с поверхностью пола. Также для повышения точности локализации разработчики могут применять различные внешние системы: инфракрасные и ультразвуковые системы опорных станций, камеры, визуальные и световые маркеры и т. д.

В значительно более суровых условиях приходится работать outdoor роботам. Они перемещаются в крайне неструктурированной естественной среде. Поэтому под колёсами робота могут оказаться различные виды почв, песок, камни, снег, лёд, трава, грязь, гравий и т. д. Разные типы подстилающей поверхности могут иметь (и зачастую имеют) существенно различные свойства. Кроме того, поверхность, по которой передвигается робот, может иметь различный уклон. Ямы и бугры также свойственны уличным условиям. Всё

вышеперечисленное негативно сказывается на точности локализации и управления мобильным роботом.

Единственными внешними системами локализации outdoor роботов являются спутниковые системы навигации (ГНСС) и RTK. Однако приведённые системы невозможно применить в следующих ситуациях:

- частичное или полное отсутствие сигналов ГНСС в закрытых пространствах: помещениях, шахтах, завалах (при спасательных работах) и пр.;
- частичное или полное подавление сигналов ГНСС, а также подмена сигналов ГНСС во время военных действий;
- отсутствие ГНСС на других небесных телах: Луне, Марсе и др. (навигация планетоходов: луноходов и марсоходов).

По этим причинам необходимо повышать точность оценки положения outdoor роботов по данным с бортовых датчиков.

К основным методам локализации по данным с бортовых датчиков робота относятся колёсная одометрия, инерциальная навигация, визуальная одометрия и др. В целях повышения точности оценки позиции робота обычно используют различные методы data или sensor fusion, с помощью которых локализация производится на основе информации с различных датчиков робота. В направлении навигации мобильных роботов классическим алгоритмом sensor fusion является фильтр Калмана.

Дальнейшее повышение точности локализации робота связано с повышением точности отдельных методов либо их связок. Основные пути решения задачи локализации в условиях неоднородной среды делятся на четыре группы (таблица 1) [2, с. 1].

Представленная магистерская диссертация является прямым продолжением работы, проделанной в рамках бакалаврской работы [3]. В ней в качестве метода определения проскальзывания были выбраны модели зависимости коэффициента проскальзывания колеса от тока двигателя из публикации [4]. В отличие от работы [4], данные модели строились по экспериментальным

Таблица 1 – Систематизация работ по навигации в неоднородной среде [2, с. 1]

Подход к построению модели	Промежуточная классификация подстилающей поверхности	
	используется	не используется
Выявление и анализ физических закономерностей	Khaleghian S. at al. [5] <u>Сенсоры:</u> акселерометры, энкодеры. <u>Метод:</u> нечёткая логика	Ojeda L. at al. [4] Iagnemma K. at al. [6] <u>Сенсоры:</u> энкодеры, датчики тока, гироскоп, акселерометр. <u>Метод:</u> анализ проскальзывания колёс.
Построение нефизических моделей средствами машинного обучения	DuPont E. at al. [7] <u>Сенсоры:</u> датчики тока, гироскоп, акселерометр, энкодеры. <u>Метод:</u> вероятностная нейронная сеть	Andrakhanov A.A. at al. [2; 8] <u>Сенсоры:</u> энкодеры, датчики тока, гироскоп, акселерометр. <u>Метод:</u> дважды многорядная нейронная сеть МГУА с активными нейронами

данным. Итогом работы стал упрощённый прототип системы определения и компенсации проскальзывания колёс мобильного робота при движении по неоднородной поверхности. В ходе работы выяснилось, что линейных моделей зависимости проскальзывания от тока недостаточно для её точной оценки. Также на величину проскальзывания и тока оказывало влияние направление движения робота, так как в качестве мобильной платформы использовался всенаправленный робот Festo Robotino 2 с довольно нетипичной кинематикой для outdoor-робота. Поэтому в работе [3] были выбраны 4 типа движения робота (движение по оси X, по оси Y, одновременно по осям X и Y с одинаковой уставкой в локальной системе координат робота и вращение вокруг собственной оси). В текущей работе планируется получить более общую модель проскальзывания, которая будет применима для всех реализуемых роботом движений.

Целью магистерской диссертации является исследование эффекта проскальзывания колёс всенаправленного мобильного робота Festo Robotino 2

в задачах навигации при движении робота по неоднородной поверхности. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить ряд задач:

- 1) выполнить аналитический обзор существующих методов определения проскальзывания колёс мобильных роботов;
- 2) провести эксперименты по получению данных о движении робота по поверхностям с различными свойствами;
- 3) проанализировать полученные данные;
- 4) построить модели зависимости коэффициента проскальзывания колеса от тока двигателя;
- 5) настроить фильтр Калмана для двигателей постоянного тока;
- 6) произвести апробация системы оценки проскальзывания колёс.

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

outdoor робот: Мобильный робот, разработанный для функционирования в естественных условиях.

естественные условия: природные условия, неструктурированная среда.

навигация мобильного робота: процесс определения положения робота в некоторой системе отсчёта, планирование пути к месту назначения и его реализация.

Примечание: В широком смысле навигация мобильного робота означает набор технологий и методов локализации, планирования пути, построения и интерпретации карты.

локализация: процесс определения положения объекта в некоторой системе отсчёта.

одометрия: Метод оценки положения робота по информации о перемещениях и скоростях его приводов.

проскальзывание или скольжение колеса: (англ. wheel slippage, wheel slip) Одновременное перемещение всех находящихся в контакте точек колеса относительно опорной поверхности [9].

Примечание: В сфере мобильной робототехники терминология, касающаяся вопросов кинематики и динамики колёс, является заимствованной из автомобильной сферы. Русскоязычные термины устанавливаются ГОСТ 17697-72, англоязычные термины мы будем использовать согласно SAE J670_202206.

продольное скольжение: (англ. longitudinal slip) Скольжение колеса в продольной плоскости [9].

Примечание: В тексте термины проскальзывание или скольжение будут означать продольное скольжение, если не сказано иначе.

боковое скольжение: (англ. lateral slip) Скольжение колеса в поперечной плоскости [9].

буксование колеса: Продольное скольжение колеса, направление которого совпадает с направлением тангенциальных скоростей точек колеса в контакте [9].

юз колеса: Продольное скольжение колеса, направление которого противоположно направлению тангенциальных скоростей точек колеса в контакте [9].

радиус качения колеса: (англ. effective rolling radius) Отношение продольной составляющей поступательной скорости колеса к его угловой скорости.

спутниковая система навигации: (англ. satellite navigation, satnav) Система оценки географического положения объектов с использованием искусственных спутников Земли.

проприоцептивный датчик: (англ. proprioceptive sensor) датчик, требующий входные значения только от робота (например, энкодер, блок инерциальной навигации) [11].

экстероцептивный датчик: (англ. exteroceptive sensor) датчик, требующий входные значения из окружающей среды робота (например, камера) [11].

Обозначения и сокращения

ГНСС (англ. GNSS) – глобальная навигационная спутниковая система.

EKF – extended Kalman filter, расширенный фильтр Калмана.

GPS – global positioning system, система глобального позиционирования.

SVM – support vector machine, метод опорных векторов.

ИНС – искусственная нейронная сеть.

SOM – self-organizing map, самоорганизующаяся карта Кохонена.

1 Основной раздел

1.1 Обзор литературы

Изучением свойств поверхностей и их взаимодействия с колёсными и гусеничными транспортными средствами занимается террамеханика. Её основоположником считается польско-американский инженер и учёный М. G. Bekker. В 50-х и 60-х годах прошлого века он опубликовал несколько книг по террамеханике и разработке внедорожных транспортных средств [12–14]. М. G. Bekker консультировал специалистов армий США и Канады в вопросах проектирования внедорожников [15]. М. G. Bekker был автором общей идеи и внёс значительный вклад в разработку американского лунохода (Lunar Roving Vehicle, LRV), который успешно использовался в трёх последних миссиях программы Аполлон (Аполлон 15, 1971 г.; Аполлон 16 и 17, 1972 г.) [16].

Дальнейшим развитием идей М. G. Bekker занимались А. R. Reese и J. Y. Wong в работах [17–19]. Зависимости, полученные М. G. Bekker, А. R. Reese и J. Y. Wong, до сих пор используются исследователями для анализа движения транспортных средств.

Теперь перейдём непосредственно к существующим подходам оценки величины проскальзывания колёс мобильных роботов. Величина проскальзывания колеса определяется коэффициентом проскальзывания (англ. slip ratio)

$$s = \begin{cases} \left(1 - \frac{v}{\omega r}\right) \times 100, & \text{если } \omega r > v, \quad (\text{буксование}) \\ \left(1 - \frac{\omega r}{v}\right) \times 100, & \text{если } v > \omega r, \quad (\text{юз}) \end{cases} \quad (1)$$

где ω – угловая скорость колеса, r – радиус колеса, v – линейная скорость центра (оси) колеса [19]. Также широко используется только первое условие из (1) для определения коэффициента проскальзывания

$$s = \left(1 - \frac{v}{\omega r}\right) \times 100. \quad (2)$$

В этом случае $s > 0$ свидетельствует о буксовании колеса, а $s < 0$ – юзе. Скорость колёс робота обычно достаточно точно измеряют с помощью энкодеров.

Таким образом, задача оценки коэффициента проскальзывания сводится к задаче оценки или измерению скорости робота.

Детальный обзор методов оценки и компенсации проскальзывания колёс в контексте планетоходов был проведён в работе [11]. На рисунке 1 приведена классификация методов оценки проскальзывания из работы [11]. Данная классификация проводится по методам или датчикам, которые используются для оценки или измерения скорости робота.

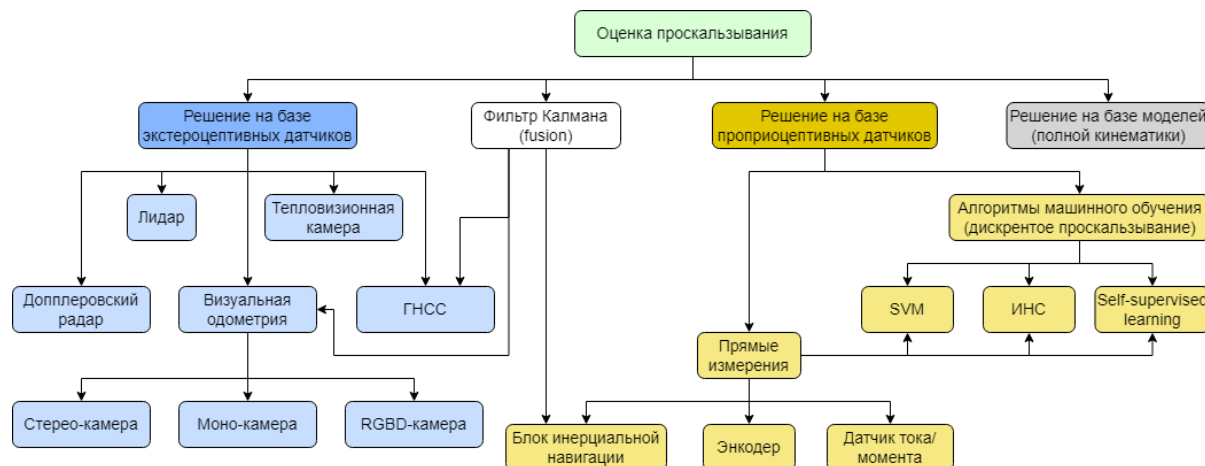


Рисунок 1 – Классификация методов оценки проскальзывания колёс планетоходов (адаптированная и модифицированная из работы [11])

1.1.1 Решения на основе проприоцептивных датчиков

Решения на основе проприоцептивных датчиков производят оценку проскальзывания при передвижении робота непосредственно по поверхности, для которой производится определение проскальзывания. Они дают относительно высокую точность оценки проскальзывания, однако повышают риск застревания робота, так как роботу для определения проскальзывания необходимо заехать на поверхность.

Самым простейшим и первым способом оценки проскальзывания является использование дополнительного свободного (не ведущего) колеса [20]. Оценка проскальзывания производится из сравнения скорости свободного и ведущих колёс. Недостатками данного метода являются:

- необходимость внесения конструктивных изменений в робота, для установки дополнительного колеса;

- необходимость подвески для свободного колеса, которая будет обеспечивать постоянный контакт с грунтом;
- не подходит для роботов со всенаправленной кинематикой.

Следующий метод, представленный в работах [21–23], основан на сравнении скорости колёс со скоростью робота, полученной путём интегрирования линейного ускорения в направлении движения (например, с помощью акселерометров). Однако используя даже высокоточные инерциальные датчики, оценка скорости робота подвержена ошибкам и смещениям (особенно на малых скоростях) [6; 24].

Существует методы определения проскальзывания колёс по токовым или моментным характеристикам. Простой алгоритм обнаружения продолжительного буксования в мягкой почве упоминается в работе [11]. Он основан на усреднении тока привода колеса в течение двадцатисекундного окна. Затем средний ток двигателя сравнивается с заранее установленным безопасным порогом. Если среднее значение тока превышает заданный порог, то система сигнализирует о возникновении буксования и переходит в ручной режим управления. Несмотря на простоту метода, в настоящее время он используется на марсоходах Mars Science Laboratory (в частности, в работе [11] упоминается ровер Curiosity). Наиболее значимым ограничением этого подхода является то, что для каждого типа поверхности и для каждого уровня её наклона нужно устанавливать разные уровни пороговых значений токов.

В работе [25] предлагается использовать эмпирическую зависимость между моментом привода и проскальзыванием колеса. Однако в данном исследовании момент не измеряется, а принимается прямо пропорциональным уставке двигателя.

Зависимость между коэффициентом проскальзывания колеса и током привода используется в работе [4]. Данная зависимость (рисунок 2) была получена авторами аналитически. Основная сложность в применении данного метода состоит в том, что точность определения проскальзывания сильно зависит от точности оценки эмпирических коэффициентов модели, отражающих

свойства почвы, колеса и их взаимодействия. Авторами было предложено три метода real-time оценки этих коэффициентов в зависимости от доступности информации об абсолютном положении робота.

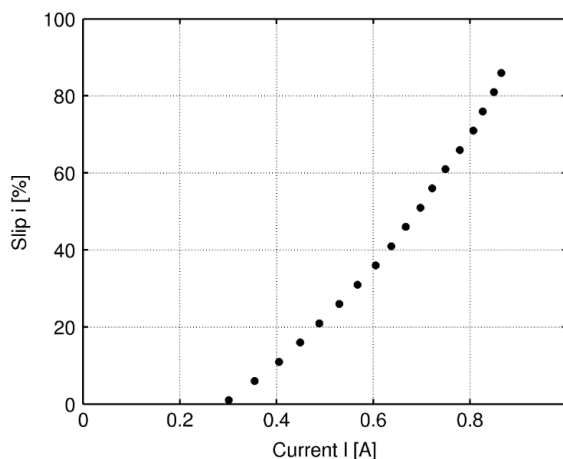


Рисунок 2 – Модель зависимости коэффициента проскальзывания колеса от тока двигателя при известных параметрах поверхности [4]

Алгоритмы машинного обучения также применяются для определения проскальзывания колёс. Обычно задача обнаружения проскальзывания сводится к задаче классификации на дискретные классы проскальзывания. Такой подход использовался в работе [26]. Авторы применяют такие алгоритмы машинного обучения, как SVM, ИНС, самоорганизующаяся карта Кохонена (SOM), метод k-средних. Проскальзывание в работе разбивается на три дискретных класса: малое проскальзывание $s \leq 0,3$, среднее проскальзывание $0,3 < s \leq 0,6$ и высокое проскальзывание $s > 0,6$ (также было рассмотрено разбиение на два класса). В качестве входных данных используется информация блока инерциальной навигации, энкодеров и датчиков тока двигателя. В результате работы было определено, что наилучший результат даёт алгоритм SVM; алгоритмы SOM и ИНС демонстрируют аналогичную точность. Метод k-средних показал худшую точность.

В работах [2; 8] построение моделей локализации осуществлялось при помощи нейронных сетей, основанных на методе группового учета аргументов. В качестве входных данных использовались показания гироскопа, акселерометра, токовых датчиков и энкодеров. Выход обученных моделей использовались для коррекции положения робота при движении по существенно

неоднородному полигону. Кроме того, были проведены сравнения работы моделей с учётом предварительной классификации на разные поверхности и без классификации.

Часто кроме проскальзывания требуется определить тип поверхности, по которой движется робот. Эта информация может использоваться дополнительно в алгоритмах определения проскальзывания колеса. В работах [6; 27] классификация типов поверхности проводилась методом SVM по данным с акселерометров. Сравнение методов машинного обучения на задаче классификации поверхностей проведено в работах [28; 29]. В сравнениях использовали следующие методы: SVM, вероятностная нейронная сеть (PNN), k-ближайших соседей, наивный байесовский классификатор, дерево решений, случайный лес, elaboration likelihood model (ELM), Adaboost, свёрточная нейронная сеть (CNN), рекуррентная нейронная сеть (RNN). Все они обучались на данных вибраций робота при движении, измеренные акселерометрами.

В работе [30] исследователи обучали нейросетевые классификаторы поверхности на измерениях трёхосевого гироскопа, трёхосевого акселерометра, датчиков тока и напряжения приводов, инфракрасных и ультразвуковых дальномеров (направленных вниз), микрофона (также направленного вниз) и энкодеров. Каждая нейронная сеть обучалась на данных отдельного датчика. На вход нейронной сети подавался сигнал датчика после дискретного преобразования Фурье. Самый точный результат показали нейросетевые классификаторы, которые были обучены на измерениях акселерометра.

1.1.2 Решения на основе экстероцептивных датчиков

Самым очевидным методом определения действительной скорости робота (и проскальзывания колёс) является RTK-GPS, например, как в работе [31].

Вместо ГНСС также используют системы наземных маячков: радио, инфракрасных, ультразвуковых, визуальных и др. Недостаток таких систем

закljučается в том, что эти маячки необходимо размещать в рабочей зоне робота и их глобальная позиция должна быть известна с высокой точностью.

В качестве методов определения действительной скорости робота наибольшее распространение получили методы визуальной одометрии [32–36]. Данный подход даёт достаточно точную оценку действительной скорости робота (а значит и проскальзыванию колёс). К недостаткам методов визуальной одометрии относится их вычислительная сложность. Медленная обработка данных (особенно на слабых вычислителях) накладывает ограничение на максимальную скорость: робот должен двигаться медленнее, чтобы программа успела обработать изображения. Ускорить вычисления визуальной одометрии можно перенеся обработку на ПЛИС, как это сделали в работе [35]. Ещё одна особенность методов визуальной одометрии заключается в том, что их точность сильно зависит от количества признаков (features) в кадре и уровню освещённости. На поверхностях с малым количеством признаков (таких, как песок) или в тёмное время суток количество обнаруженных и отслеживаемых признаков будет малым, что может привести к падению точности оценки перемещения. В работах [34; 36] для увеличения качества работы визуальной одометрии в условиях недостатка признаков предлагаются алгоритмы с переключением между разными методами детектирования признаков.

В вышеперечисленных публикациях визуальная одометрия использовала изображения с камеры, направленной вперёд по ходу движения робота. В работе [37] скорость робота определяется методом визуальной одометрии по камере, направленной в землю. В следующей своей работе [38] авторы добавили классификатор поверхности по изображениям с фронтальной камеры и камеры, направленной в землю.

В публикации [39] в качестве источника изображения для метода визуальной одометрии предлагается камера с телецентрическим объективом, которая направлена в землю. Телецентрический объектив сохраняет масштаб изображения вне зависимости от расстояния между камерой и землёй, что облегчает обработку изображений, полученных на неровной поверхности.

Другой способ определения проскальзывания по камере представлен в работе [40]. Продольное и боковое проскальзывания определялись по кадрам следов колёс, оставленных роботом на песке. Изображения предоставляла камера, установленная в задней части робота и направленной в землю. Слабой стороной такого решения является его способность работать только на мягких поверхностях, на которых будут оставаться следы колёс.

1.1.3 Решения на основе проприоцептивных и экстероцептивных датчиков

Для увеличения точности оценки скорости робота применяют фильтр Калмана, который учитывает динамическую модель робота и измерения обоих типов датчиков (проприоцептивных и экстероцептивных). В работе [41] авторы производят оценку скорости робота с помощью EKF и измерений с энкодеров, блока инерциальной навигации и GPS. Недостатком данного метода является зависимость от глобальной системы позиционирования, которая может быть недоступна.

Фильтр Калмана также применяется в работе [42] для комбинирования измерений блока инерциальной навигации, колёсной и визуальной одометрии (по стерео-камере) (рисунок 3). Оценка проскальзывания производится с помощью компаратора Махаланобиса. Главный недостаток предложенного решения в том, что оно опирается на визуальную информацию, что затруднит его применение в условиях плохой освещённости.

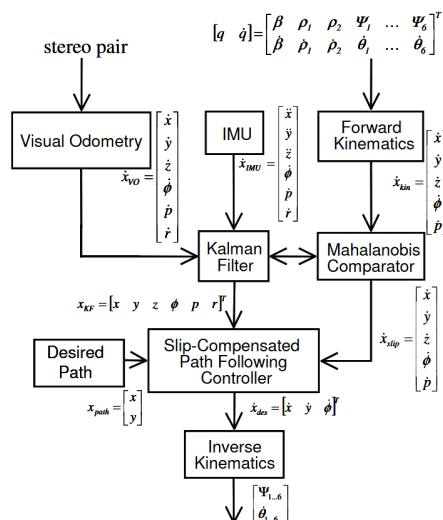


Рисунок 3 – Структурная схема системы следования траектории с компенсацией проскальзывания [42]

Интересный способ классификации поверхности был предложен в работе [43]. На рисунке 4 приведена схема работы self-supervised классификатора. На первом этапе (рисунок 4а) ровер собирает визуальные признаки о поверхности с помощью стереопары. На этом этапе система не имеет информации о связи внешнего вида поверхности и её класса. Как только робот заезжает на участок поверхности, который уже был в кадре у робота на предыдущем этапе, то происходит классификация поверхности на основе данных момента и вибрации (рисунок 4б). Таким образом устанавливается связь между внешним видом поверхности и её классом. После этого робот по последующим кадрам проводит предварительную классификацию поверхности по накопленной информации о связи между визуальными признаками и классом поверхности (рисунок 4в). Незнакомые поверхности продолжают классифицироваться при наезде на них робота, таким образом пополняя базу для предварительной визуальной классификации.

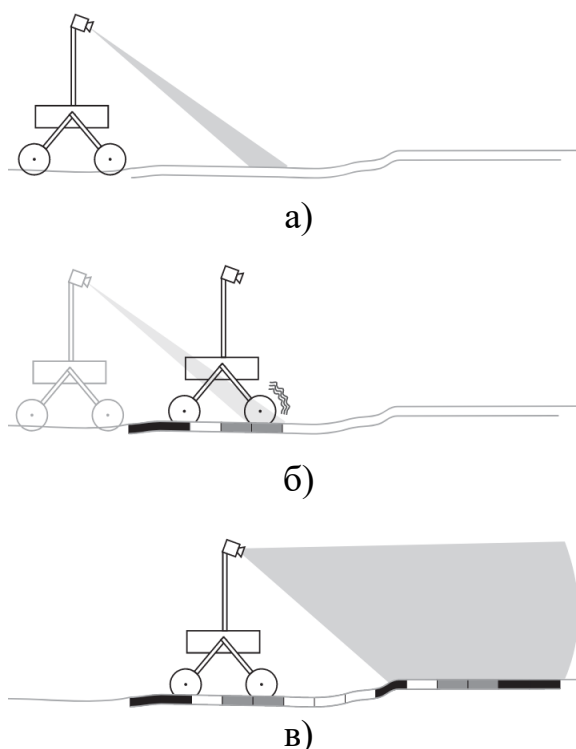


Рисунок 4 – Иллюстрация работы self-supervised классификатора [43]

Подобная идея была предложена пятью годами ранее в работе [44]. Кроме классификации поверхностей система также предсказывает значение

проскальзывания колёс на основе накопленных данных с уже пройденных поверхностей. Текущее проскальзывание колёс определяется по разнице скоростей, полученных с визуальной и колёсной одометрии.

1.2 Постановка экспериментов

Для начала необходимо получить набор данных, характеризующих движение робота по поверхностям разных типов. Для этого были проведены ряд экспериментов, в ходе которых робот двигался по некоторой поверхности испытательного полигона. Перейдём к его описанию.

1.2.1 Описание испытательного полигона, мобильного робота и системы технического зрения

Структура испытательного полигона приведена на рисунке 5. Она состоит из трёх подсистем: мобильный робот Festo Robotino 2, система технического зрения и набор поверхностей. Рассмотрим каждый элемент подробнее.

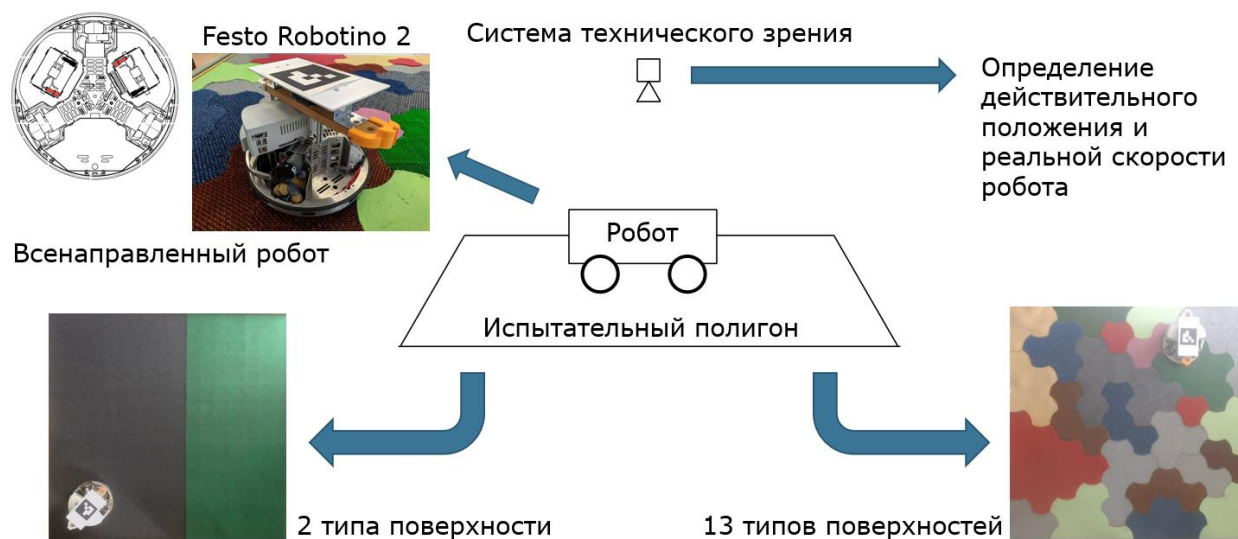


Рисунок 5 – Общая схема испытательного полигона

В качестве мобильной платформы в исследовании используется автономный мобильный робот Festo Robotino 2. Внешний вид и кинематическая схема мобильного робота приведены на рисунке 6. Он оснащён тремя двигателями постоянного тока. Через редуктор и ремённую передачу они приводят в движение роликонесущие всенаправленные колеса (omni-колёса). Оси колёс расположены под углом 120° друг относительно друга. Такая конструкция робота позволяет ему перемещаться в любую сторону без изменения курсового

ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Обучающемуся:

Группа	ФИО
8ЕМ11	Брылеву Олегу Александровичу

Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.06 «Мехатроника и робототехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость ресурсов определялась по средней рыночной стоимости, в соответствии с тарифами на рынке труда для сотрудников проекта.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф на электроэнергию 3,16 руб. за кВт/ч. 30% районный коэффициент.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	30% отчисления во внебюджетные фонды.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Провести предпроектный анализ.
2. Разработка устава научно-технического проекта	Представить Устав научного проекта магистерской работы.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Разработать план управления НТИ.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Рассчитать сравнительную эффективность исследования.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1) Карта сегментирования рынка outdoor мобильной робототехники. 2) Цветовые обозначения робототехнических компаний. 3) Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок. 4) Интерактивная матрица проекта: сильные стороны и возможности. 5) Интерактивная матрица проекта: слабые стороны и возможности. 6) Интерактивная матрица проекта: сильные стороны и угрозы. 7) Интерактивная матрица проекта: слабые стороны и угрозы. 8) Матрица SWOT. 9) Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации. 10) Заинтересованные стороны проекта. 11) Цели и результаты проекта. 12) Рабочая группа проекта. 13) Календарный план проекта. 14) Календарный план-график проведения НИОКР по теме. 15) Группировка затрат по статьям. 16) Сырьё, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты. 17) Расчёт затрат по статье спецоборудование для научных работ для первого варианта исполнения проекта. 18) Расчёт затрат по статье спецоборудование для научных работ для второго варианта исполнения проекта. 19) Расчёт затрат по статье спецоборудование для научных работ для третьего варианта исполнения проекта. 20) Расчёт основной заработной платы и отчисления на социальные нужды для первого варианта исполнения. 21) Расчёт основной заработной платы и отчисления на социальные нужды для второго варианта исполнения. 22) Расчёт основной заработной платы и отчисления на социальные нужды для третьего варианта исполнения. 23) Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. 24) Сравнительная эффективность разработки.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	20.02.2023
--	------------

Задание выдал консультант по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Былкова Т.В.	канд. экон. наук, доцент		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ11	Брылев Олег Александрович		

2 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

2.1 Предпроектный анализ

2.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Разработанные в магистерской диссертации методы определения про-скальзывания и прочие результаты помогут повысить точность навигации и локализации колёсных роботов при функционировании в естественных условиях (outdoor). Поэтому потенциальными потребителями являются компании и фирмы, которые занимаются разработкой таких роботов или навигационных систем для них.

На российском рынке представлены следующие компании, которые занимаются разработками в сфере outdoor робототехники: Yandex Self-Driving Group, СМП Роботикс, Aurora Robotics, Cognitive Technologies, Гумич РТК, Научно-Технический Центр «РОКАД» (НТЦ «РОКАД»), Специальное кон-структорско-технологическое бюро прикладной робототехники (СКТБ ПР), Федеральное государственное автономное научное учреждение «Централь-ный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робото-техники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК) и пр.

Данные компании разрабатывают решения для таких отраслей, как до-ставка последней мили (last mile delivery), сельское хозяйство, инспекция объ-ектов, патрулирование объектов, спасательные работы и некоторые другие. Разрабатываемые компаниями решения могут иметь как автономное, так ди-станционное управление. Именно эти критерии и были взяты за основу по-строения карты сегментирования российского рынка outdoor мобильной робо-тотехники (таблица 6). Цветовые обозначения компаний на карте сегментиро-вания приведены в таблице 7.

Таблица 6 – Карта сегментирования рынка outdoor мобильной робототехники

		Отрасль						
		Доставка		Сельское хозяйство		Инспекция / патрулирование объектов		Спасательные работы
Тип управления	Автономные							
	Дистанционное управление / телеуправление							

Таблица 7 – Цветовые обозначения робототехнических компаний

Yandex Self-Driving Group	СМП Роботикс	Avrora Robotics	Cognitive Technologies
Гумич Роботикс	НТЦ «РОКАД»	СКТБ ПР	ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

На текущий момент самыми быстрорастущими сегментами рынка являются доставка и сельское хозяйство. Поэтому будет логично ориентировать предлагаемое в работе решение в первую очередь компаниям, работающих в этих отраслях.

2.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

В качестве конкурентных решений для разрабатываемой системы были выбраны следующие разработки:

- решение с использованием визуальной информации с камеры (k_1) [44],
- решение на основе нейронных сетей (k_2) [26].

В таблице 8 приведена оценочная карта, в которой происходит сравнение предлагаемого в работе решения с конкурентными разработками.

Подробнее опишем некоторые критерии оценки. Требование к вычислительным ресурсам означает требуемое количество оперативной памяти и вычислительной мощности процессора. Так как в показаниях различных

датчиков всегда есть шум и помехи, то важным критерием является помехоустойчивость. Важнейшим критерием всех приведённых решений является точность оценки величины проскальзывания колёс мобильного робота. А под универсальностью системы подразумевается возможность применения разработки для роботов различной конструкции без существенных изменений в алгоритме оценки проскальзывания.

Таблица 8 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1. Требования к вычислительным ресурсам	0,2	4	2	3	0,8	0,4	0,6
2. Помехоустойчивость	0,2	3	4	4	0,6	0,8	0,8
3. Точность оценки величины проскальзывания колёс	0,3	4	5	4	1,2	1,5	1,2
4. Универсальность системы	0,3	4	4	3	1,2	1,2	0,9
Итого	1,0	15	15	14	3,8	3,9	3,5

По итогу оценки конкурентоспособности предлагаемое в работе решение получило средний балл. Однако отставание от ближайшей конкурентной разработки составляет всего 0,1. Слабой стороной предлагаемого решения является меньшая помехоустойчивость относительно конкурентов. В противовес этому, разрабатываемое решение сбалансировано по ряду критериев: требование к вычислительным ресурсам, точности оценки проскальзывания и универсальности системы. Также стоит отметить, что предлагаемое в магистерской диссертации решение ещё находится в процессе разработки.

2.1.3 SWOT-анализ

Выявление соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды были проведены по составленным интерактивным матрицам проекта (таблицы 9-12).

Таблица 9 – Интерактивная матрица проекта: сильные стороны и возможности

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
		С1	С2	С3	С4
	В1	+	+	+	+
	В2	+	+	+	+
	В3	+	+	+	–
	В4	–	–	–	–

Направления реализации проекта: В1С1С2С3С4, В2С1С2С3С4, В3С1С2С3.

Таблица 10 – Интерактивная матрица проекта: слабые стороны и возможности

Возможности проекта	Слабые стороны проекта				
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	В1	–	–	–	–
	В2	+	+	+	+
	В3	–	–	–	–
	В4	+	+	+	+

Направление реализации проекта: В2В4Сл1Сл2Сл3Сл4.

Таблица 11 – Интерактивная матрица проекта: сильные стороны и угрозы

Угрозы проекта	Сильные стороны проекта				
		С1	С2	С3	С4
	У1	–	–	–	–
	У2	+	+	+	+
	У3	–	–	–	–
	У4	+	+	+	+

Направления реализации проекта: У2С1С2С3С4, У4С1С2С3С4.

Таблица 12 – Интерактивная матрица проекта: слабые стороны и угрозы

Угрозы проекта	Слабые стороны проекта				
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	+	–	+	+
	У2	+	0	+	+
	У3	+	+	+	+
	У4	+	+	–	–

Направления реализации проекта: У1Сл1Сл3Сл4, У2Сл1Сл3Сл4, У3Сл1Сл2Сл3Сл4, У4Сл1Сл2.

В результате получены различные варианты направлений реализации проекта, которые были внесены в таблицу 13.

Таблица 13 – Матрица SWOT

	Сильные стороны: С1. Способность системы работать на существенно неоднородной поверхности. С2. Низкие требования к вычислительным ресурсам. С3. Высокая точность определения проскальзывания. С4. Квалифицированная команда.	Слабые стороны: Сл1. На данном этапе имеется только прототип. Сл2. Отсутствие решения по компенсации проскальзывания колёс. Сл3. Отсутствие апробации проекта в рабочих условиях. Сл4. Отсутствует апробация разработки на других моделях роботов.
Возможности: В1. Растущий рынок мобильной робототехники для доставки последней мили и сельского хозяйства. В2. Участие в различных национальных проектах и фондах развития («Фонд содействия инновациям», программа «УМНИК») В3. Уход с российского рынка многих зарубежных технологических компаний в сфере робототехники. В4. Использование инфраструктуры ТПУ.	В1С1С2С3С4 – Сбалансированные характеристики позволят разрабатываемой системе закрепиться на растущем рынке. В2С1С2С3С4 – Перспективность разработки и сильная команда увеличивают шанс получения грантов на разработку. В3С1С2С3 – Уменьшение количества конкурентов способствует закреплению разработки на рынке.	В2В4Сл1Сл2Сл3Сл4 – Инвестиции и гранты помогут с продолжением разработки.
Угрозы: У1. Слабое развитие робототехники в России. У2. Появление сильных конкурирующих разработок. У3. Потеря ключевых членов команды. У4. Уход с российского рынка многих зарубежных компаний-разработчиков ПО.	У2С1С2С3С4 – Сбалансированные характеристики системы являются преимуществом относительно конкурентных решений У4С1С2С3С4 – Миграция на свободное ПО и ПО с открытым исходным кодом.	У1Сл1Сл3Сл4, У2Сл1Сл3Сл4, У3Сл1Сл2Сл3Сл4, У4Сл1Сл2 – Продолжение разработки системы и проведение апробации в рабочих условиях и на других роботах.

2.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Была произведена оценка готовности научно-технического проекта к коммерциализации. Оценка проводилась в виде таблицы 14.

По итоговым баллам можно сказать, что проект готов к коммерциализации на среднем уровне. Знания разработчика по вопросу коммерциализации тоже имеют средний показатель. Это связано с тем, что проект находится

на ранней стадии разработки, и авторы делают упор на техническую составляющую проекта и не занимались проработкой коммерциализации проекта. После получения минимального жизнеспособного продукта и проведения всех необходимых тестов авторы планируют уделить вопросам коммерциализации больше внимания (возможно, с привлечением специалистов).

Таблица 14 – Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определён имеющийся научно-технический задел	4	4
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	2	1
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	3
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	3	4
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	1
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	2
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	1
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	1	1
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	2

Продолжение таблицы 14

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	3
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15	Проработан механизм реализации научного проекта	1	1
Итого баллов		4	5

2.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Из всех возможных методов коммерциализации результатов научно-технического исследования была выбрана торговля патентными лицензиями. Данный выбор обусловлен тем, что результатом научно-технического исследования является метод повышения точности локальной системы навигации мобильных роботов, функционирующих в естественных условиях. При этом данный метод не является самостоятельным и обособленным, т.е. для его работы нужна система навигации. Разработка встраивается в уже готовую систему. Таким образом, патентная лицензия будет разрешать разработчикам и компаниям интегрировать авторское решение в свою систему навигации (как отдельно, так и в составе готового робота).

2.2 Инициация проекта

Представим «Устав проекта»:

- 1) Заинтересованными сторонами проекта являются потенциальные потребители, которые были перечислены в пункте 2.1.1. В таблице 15 приведены заинтересованные стороны проекта и их ожидания.

Таблица 15 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Yandex Self-Drive Group	Повышение точности локальной навигации мобильной платформы
СМП Роботикс	
Avrora Robotics	
Cognitive Technologies	

- 2) В таблице 16 приведены цели и результаты научно-исследовательского проекта.

Таблица 16 – Цели и результаты проекта

Цели проекта	исследование эффектов проскальзывания в задаче навигации мобильного колёсного робота при движении по неоднородной поверхности
Ожидаемые результаты проекта	получение моделей проскальзывания колёс и разработка прототипа системы оценки проскальзывания колёс на их основе.

- 3) Рабочая группа проекта приведена в таблице 17.

Таблица 17 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО	Основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудовые затраты, час
1	Филипас Александр Александрович	НИ ТПУ, ОАР ИШИТР, заведующий кафедрой – руководитель отделения на правах кафедры	Руководитель	Координирует команду	20
2	Беляев Александр Сергеевич	НИ ТПУ, ОАР ИШИТР, старший преподаватель	Эксперт	Консультации по конкретным вопросам	40
3	Брылев Олег Александрович	НИ ТПУ ОАР ИШИТР, инженер	Исполнитель	Выполнение работ по проекту	768
Итого					828

2.3 Планирование управления научно-техническим проектом

2.3.1 План проекта

Составим план проекта. В таблице 18 приведён линейный график проекта.

Таблица 18 – Календарный план проекта

№ п/п	Название	Длительность, дни	Дата начала	Дата окончания	Состав участников
1	Проведение литературного обзора по теме исследования	16	07.02.2023	25.02.2023	Исполнитель
2	Календарное планирование работ по теме	2	27.02.2023	28.02.2023	Руководитель, эксперт, исполнитель
3	Планирование и проведение экспериментов	16	01.03.2023	18.03.2023	Эксперт, исполнитель
4	Формирование отчёта по проведённым экспериментам	3	20.03.2023	22.03.2023	Исполнитель
5	Построение модели трудоёмкости движения для частного случая	10	23.03.2023	01.04.2023	Эксперт, исполнитель
6	Построение модели проскальзывания для частного случая	12	03.04.2023	15.04.2023	Исполнитель
7	Разработка фильтра Калмана для электроприводов мобильного робота	12	17.04.2023	29.04.2023	Исполнитель
8	Разработка системы оценки проскальзывания на основе полученных моделей	16	02.05.2023	20.05.2023	Исполнитель
9	Апробация системы оценки проскальзывания на испытательном полигоне	6	22.05.2023	27.05.2023	Исполнитель
10	Оценка полученных результатов	3	29.05.2023	31.05.2023	Руководитель, эксперт, исполнитель
Итого		96			

В соответствии с календарным планом проекта была составлена диаграмма Ганта. В таблице 19 показана диаграмма Ганта.

Таблица 19 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	Тк, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ															
				февраль			март			апрель			май						
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
1	Проведение литературного обзора по теме исследования	Исполнитель	16																
2	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	2																
		Эксперт																	
3	Планирование и проведение экспериментов	Исполнитель	16																
		Эксперт																	
4	Формирование отчёта по проведённым экспериментам	Исполнитель	3																
5	Построение модели трудоёмкости движения для частного случая	Эксперт	10																
		Исполнитель																	
6	Построение модели проскальзывания для частного случая	Исполнитель	12																
7	Разработка фильтра Калмана для электроприводов мобильного робота	Исполнитель	12																
8	Разработка системы оценки проскальзывания на основе полученных моделей	Исполнитель	16																
9	Апробация системы оценки проскальзывания на испытательном полигоне	Исполнитель	6																
10	Оценка полученных результатов	Руководитель	3																
		Эксперт																	
		Исполнитель																	
Цетовое обозначение				– Руководитель			– Эксперт			– Исполнитель									

2.3.2 Бюджет научного исследования

Рассмотрим 3 варианта исполнения научно-технического исследования:

- 1) текущая магистерская диссертация,
- 2) прошлая выпускная квалификационная работа «Разработка имитационной модели мобильного робота и системы управления» [3],
- 3) самое сильное конкурентное решение с использованием визуальной информации с камеры [44] из пункта 2.1.2.

В таблице 20 приведена группировка затрат по статьям.

Таблица 20 – Группировка затрат по статьям

Варианты исполнения	Статьи			
	Сырьё, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты, руб.	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ, руб.	Основная заработная плата, руб.	Итого плановая стоимость, руб.
1	2 885,38	507 407,63	346 320	856 613,01
2	2 885,38	443 866,70	317 460	764 212,08
3	2 885,38	663 305,73	331 110	997 301,11

В статью сырьё, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты отнесём электроэнергию и сеть Интернет. Примем состав этой статьи расходов одинаков для всех видов исполнения проекта. В таблице 21 приведён расчёт стоимости используемых ресурсов.

Таблица 21 – Сырьё, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Цена за месяц/киловатт-час, руб.	Количество месяцев/киловатт-часов	Сумма, руб.
Сеть Интернет 100 Мб/с	600,00	4	2 400,00
Электроснабжение	3,16	153,6	485,38
Итого			2 885,38

В статью специальное оборудование для научных работ также включим различное программного обеспечение, используемое для реализации проекта. В таблицах 22, 23 и 24 приведены расчёты затрат по статье спецоборудования

для первого, второго и третьего вариантов исполнения, соответственно.

Таблица 22 – Расчёт затрат по статье спецоборудование для научных работ для первого варианта исполнения проекта

№ п/п	Наименование оборудования и программного обеспечения	Общая стоимость, руб.
1	Операционная система Microsoft Windows 10 Home	17 699,00
2	Microsoft Office для дома и бизнеса	29 990,00
3	Пакет прикладных программ Matlab (годовая подписка)	74 660,59
4	Среда блочного программирования Simulink (годовая подписка)	112 785,15
5	Control System Toolbox для Matlab (годовая подписка)	42 890,13
6	Curve Fitting Toolbox для Matlab (годовая подписка)	37 171,44
7	System Identification Toolbox для Matlab (годовая подписка)	42 890,13
8	Optimization Toolbox для Matlab (годовая подписка)	42 890,13
9	Simulink Design Optimization для Simulink (годовая подписка)	42 890,13
10	Econometrics Toolbox для Matlab (годовая подписка)	63 540,93
Итого		507 407,63

Таблица 23 – Расчёт затрат по статье спецоборудование для научных работ для второго варианта исполнения проекта

№ п/п	Наименование оборудования и программного обеспечения	Общая стоимость, руб.
1	Операционная система Microsoft Windows 10 Home	17 699,00
2	Microsoft Office для дома и бизнеса	29 990,00
3	Пакет прикладных программ Matlab (годовая подписка)	74 660,59
4	Среда блочного программирования Simulink (годовая подписка)	112 785,15
5	Control System Toolbox для Matlab (годовая подписка)	42 890,13
6	Curve Fitting Toolbox для Matlab (годовая подписка)	37 171,44
7	System Identification Toolbox для Matlab (годовая подписка)	42 890,13
8	Optimization Toolbox для Matlab (годовая подписка)	42 890,13
9	Simulink Design Optimization для Simulink (годовая подписка)	42 890,13
Итого		443 866,70

Таблица 24 – Расчёт затрат по статье спецоборудование для научных работ для третьего варианта исполнения проекта

№ п/п	Наименование оборудования и программного обеспечения	Общая стоимость, руб.
1	Операционная система Microsoft Windows 10 Home	17 699,00
2	Microsoft Office для дома и бизнеса	29 990,00
3	Стерео-камера Stereolabs ZED X Stereo Camera / 4 шт	190 300,96
4	Модуль инерциальной навигации Xsens MTi-100 IMU	155 061,38
5	RTK GNSS спутниковая навигация Xsens MTi-680G RTK GNSS/INS	270 254,39
Итого		663 305,73

В завершении формирования бюджета проекта рассчитаем основную заработную плату и отчисления на социальные нужды. Расчёт для первого варианта исполнения проекта приведён в таблице 25, для второго варианта – в таблице 26, для третьего – в таблице 27.

Таблица 25 – Расчёт основной заработной платы и отчисления на социальные нужны для первого варианта исполнения

Сотрудник	Трудоёмкость, чел.-час	Тариф, руб./чел.-час	Всего заработная плата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды	Итого, руб.
Руководитель	20	600	12 000	79 920	346 320
Эксперт	40	600	24 000		
Исполнитель	768	300	230 400		

Таблица 26 – Расчёт основной заработной платы и отчисления на социальные нужны для второго варианта исполнения

Сотрудник	Трудоёмкость, чел.-час	Тариф, руб./чел.-час	Всего заработная плата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды	Итого, руб.
Руководитель	45	600	27 000	73 260	317 460
Эксперт	80	600	48 000		
Исполнитель	564	300	169 200		

Таблица 27 – Расчёт основной заработной платы и отчисления на социальные нужды для третьего варианта исполнения

Сотруд- ник	Трудоём- кость, чел.-час	Тариф, руб./чел.- час	Всего за- работная плата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды	Итог, руб.
Руководи- тель	30	600	18 000	76 410	331 110
Эксперт	85	600	51 000		
Исполни- тель	619	300	185 700		

2.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

2.4.1 Оценка сравнительной эффективности исследования

Начнём с оценки финансовой эффективности научного исследования. Для этого посчитаем интегральный финансовый показатель для трёх видов исполнения научно-технического проекта, введённых в пункте 2.3.2

$$I_{\phi}^p = \frac{856613,01}{997301,11} = 0,86,$$

$$I_{\phi}^{a1} = \frac{764212,08}{997301,11} = 0,77, \quad I_{\phi}^{a2} = \frac{997301,11}{997301,11} = 1,00.$$

Теперь приступим к оценке ресурсоэффективности вариантов исполнения проекта. Для этого составим таблицу 28, в которой оценим варианты исполнения проекта по общему набору критериев. Критерии взяты из анализа конкурентных решений (пункт 2.1.2).

Таблица 28 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		
		текущего проекта	первого аналога	второго аналога
1. Требования к вычислительным ре- сурсам	0,2	4	4	2
2. Помехоустойчивость	0,2	3	2	4
3. Точность оценки величины про- скальзывания колёс	0,3	4	3	5
4. Универсальность системы	0,3	4	3	4
Итого	1,0			

По данным таблицы 28 вычислим интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения научно-технического проекта

$$I_m^p = 0,2 \times 4 + 0,2 \times 3 + 0,3 \times 4 + 0,3 \times 4 = 3,8,$$

$$I_m^{a1} = 0,2 \times 4 + 0,2 \times 2 + 0,3 \times 3 + 0,3 \times 3 = 3,0,$$

$$I_m^{a2} = 0,2 \times 2 + 0,2 \times 4 + 0,3 \times 5 + 0,3 \times 4 = 3,9.$$

Переходим к подсчёту интегральных показателей эффективности разработки и аналогов

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p} = \frac{3,8}{0,86} = 4,42,$$

$$I_{финр}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_\phi^{a1}} = \frac{3,0}{0,77} = 3,89,$$

$$I_{финр}^{a2} = \frac{I_m^{a2}}{I_\phi^{a2}} = \frac{3,9}{1,00} = 3,89.$$

Последним показателем, который необходимо вычислить, является сравнительная эффективность проекта

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^{a1}} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^{a2}} = \frac{4,42}{3,90} = 1,14.$$

В заключении проведём сравнение финансовой и ресурсной эффективности вариантов исполнения в целом. В таблице 29 сведены все показатели эффективности.

Таблица 29 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатель	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,77	1,00	0,86
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,00	3,90	3,80
3	Интегральный показатель эффективности	3,89	3,89	4,42
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,14	1,14	1,00

По финансовой эффективности предлагаемая разработка находится между предлагаемыми аналогами. По интегральному показателю ресурсоэффективности разработка также находится на втором месте, однако отрыв от аналога 1 составляет 0,8, а отставание от аналога 2 – всего 0,1. В итоге, если оценивать эффективность разработки в целом (по интегральному показателю эффективности и по сравнительной эффективности разработки), то предлагаемая разработка является самой эффективной из рассмотренных в данном разделе вариантов. Прирост эффективности в сравнении с аналогами 1 и 2 составил 14%.

ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Обучающемуся:

Группа	ФИО
8ЕМ11	Брылеву Олегу Александровичу

Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.06 «Мехатроника и робототехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.	Объект исследования: проскальзывание колёс мобильного робота Festo Robotino 2. Область применения: робототехника. Рабочее место: лаборатория. Количество и наименование оборудования рабочей зоны: персональный компьютер, мобильный робот Festo Robotino 2, испытательный полигон.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов: – Природа воздействия; – Действие на органы человека; – Нормы воздействия и нормативные документы (для вредных факторов); – СИЗ коллективные и индивидуальные; 1.2. Анализ выявленных опасных факторов: – Термических источники опасности; – Электробезопасность; – Пожаробезопасность.	1. Вредные факторы: 1.1. Недостаточная освещённость; 1.2. Нарушение микроклимата, оптимальные и допустимые параметры; 1.3. Шум, ПДУ, СКЗ, СИЗ; 1.4. Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ. 2. Опасные факторы: 2.1. Электроопасность, класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, $R_{\text{заземления}}$, СКЗ, СИЗ. Приведён расчёт освещения рабочего места; 2.2. Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения. Приведена схема эвакуации.
2. Экологическая безопасность: – Выбросы в окружающую среду; – Решения по обеспечению экологической безопасности.	Наличие промышленных отходов (бумага-черновики, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника, свинцовые и литий-ионные аккумуляторы) и способы их утилизации.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: 1. Перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; 2. Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; 3. Разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.	Рассмотрены 2 ситуации ЧС: 1. Природная – сильные морозы зимой (аварии на электро-, тепло- коммуникациях, водоканале, транспорте); 2. Техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место (возможны проявления вандализма, диверсии, промышленного шпионажа), представлены мероприятия по обеспечению устойчивой работы производства в том и другом случае.
4. Перечень нормативно-технической документации	ГОСТы, СанПиНы, СНиПы.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	20.02.2023
--	------------

Задание выдал консультант по разделу «Социальная ответственность»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП	Федорчук Ю.М.	д-р техн. наук, профессор		06.05.2023

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ11	Брылев Олег Александрович		06.05.2023

3 Социальная ответственность

Социальная ответственность – ответственность отдельного ученого и научного сообщества перед обществом. Первостепенное значение при этом имеет безопасность применения технологий, которые создаются на основе достижений науки, предотвращение или минимизация возможных негативных последствий их применения, обеспечение безопасного как для испытуемых, как и для окружающей среды проведения исследований.

В рамках данной работы было проведено исследование эффектов про-скальзывания при навигации мобильного робота при движении по неоднородным поверхностям. Исследование проводилось в лаборатории outdoor робототехники в аудитории 101А 10-го корпуса НИ ТПУ. Все работы выполнялись с использованием компьютера и мобильного робота. В разделе также оцениваются условия труда на рабочем месте, анализируются вредные и опасные факторы труда и разрабатываются меры защиты от них.

3.1 Вредные факторы

3.1.1 Отклонения показателей микроклимата в помещении

Проанализируем микроклимат в помещении, где находится рабочее место. Микроклимат производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Эти факторы влияют на организм человека, определяя его самочувствие.

Оптимальные и допустимые значения параметров микроклимата приведены в таблице 30 и 31.

Таблица 30 – Оптимальные нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	19-23	40-60	0,1
Тёплый	23-25		0,2

Таблица 31 – Допустимые нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
	нижняя допустимая граница	верхняя допустимая граница		
Холодный	15	24	20-80	<0,5
Тёплый	22	28	20-80	<0,5

Общая площадь рабочего помещения составляет 67,2 м², а объём – 221,8 м³. По СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 санитарные нормы составляют 6,5 м² и 20 м³ объема на одного человека. Исходя из приведенных выше данных, можно сказать, что количество рабочих мест соответствует размерам помещения по санитарным нормам.

После анализа габаритных размеров рассмотрим микроклимат в этой комнате. В качестве параметров микроклимата рассмотрим температуру, влажность воздуха, скорость ветра.

В помещении осуществляется естественная вентиляция посредством наличия легко открываемого оконного проема (форточки), а также дверного проема. По зоне действия такая вентиляция является общеобменной. Основным недостатком – приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагрева. Согласно нормам СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 объем воздуха необходимый на одного человека в помещении без дополнительной вентиляции должен быть более 40 м³ [50]. В нашем случае объем воздуха на одного человека составляет 42 м³, из этого следует, что дополнительная вентиляция не требуется. Параметры микроклимата поддерживаются в холодное время года за счет систем водяного отопления с нагревом воды до 100°С, а в теплое время года – за счет кондиционирования, с параметрами согласно [51]. Нормируемые параметры микроклимата, ионного состава воздуха, содержания вредных веществ должны соответствовать требованиям [52].

3.1.2 Превышение уровней шума

Одним из наиболее распространенных в производстве вредных факторов является шум. Он создается вентиляционным и рабочим оборудованием,

преобразователями напряжения, рабочими лампами дневного света, а также проникает снаружи. Шум вызывает головную боль, усталость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, память ухудшается, реакция уменьшается.

Основным источником шума в комнате являются компьютерные охлаждающие вентиляторы и. Уровень шума варьируется от 35 до 42 дБА. Согласно СанПиН 2.2.2 / 2.4.1340-03, при выполнении основных работ на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 82 дБА [50].

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ) от шума.

Средства коллективной защиты:

- 1) устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
- 2) изоляция источников шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов, например любой пористый материал – шамотный кирпич, микропористая резина, поролон и др.);
- 3) применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения.

Средства индивидуальной защиты: применение спецодежды и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

3.1.3 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Источником электромагнитных излучений в нашем случае являются дисплеи ПЭВМ. Монитор компьютера включает в себя излучения рентгеновской, ультрафиолетовой и инфракрасной области, а также широкий диапазон электромагнитных волн других частот. Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см вокруг ВДТ не должна превышать 25В/м в диапазоне от 5Гц до 2кГц, 2,5В/м в диапазоне от 2 до 400кГц [53]. Плотность магнитного потока не должна превышать в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц 250нТл, и 25нТл

в диапазоне от 2 до 400кГц. Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500В [53]. В ходе работы использовалась ПЭВМ типа HP Pavilion 15-bc404ur со следующими характеристиками: напряженность электромагнитного поля 2,5В/м; поверхностный потенциал составляет 450 В (основы противопожарной защиты предприятий ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010 – 76.).

При длительном постоянном воздействии электромагнитного поля (ЭМП) радиочастотного диапазона при работе на ПЭВМ у человеческого организма сердечно-сосудистые, респираторные и нервные расстройства, головные боли, усталость, ухудшение состояния здоровья, гипотония, изменения сердечной мышцы проводимости. Тепловой эффект ЭМП характеризуется увеличением температуры тела, локальным селективным нагревом тканей, органов, клеток за счет перехода ЭМП на теплую энергию.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) облучения (по ОСТ 54 30013-83):

- а) до 10 мкВт/см², время работы 8 часов;
- б) от 10 до 100 мкВт/см², время работы не более 2 часов;
- в) от 100 до 1000 мкВт/см², время работы не более 20 мин. при условии пользования защитными очками;
- г) для населения в целом ППМ не должен превышать 1 мкВт/см².

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется следующими способами. СКЗ:

- 1) защита временем;
- 2) защита расстоянием;
- 3) снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения;
- 4) заземление экрана вокруг источника;
- 5) защита рабочего места от излучения.

СИЗ:

- 1) Очки и специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани (кольчуга). При этом следует отметить, что использование СИЗ

возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера. Ежедневная защита обслуживающего персонала должна обеспечиваться другими средствами.

- 2) Вместо обычных стекол используют стекла, покрытые тонким слоем золота или диоксида олова (SnO_2).

3.1.4 Недостаточная освещённость

Для обеспечения требуемой освещенности необходимо использовать совмещенное освещение, создаваемое сочетанием естественного и искусственного освещения. При данном этапе развития осветительной техники целесообразно использовать люминесцентные лампы, которые по сравнению с лампами накаливания имеют большую светотдачу на ватт потребляемой мощности и более естественный спектр.

Минимальный уровень средней освещенности на рабочих местах с постоянным пребыванием людей должен быть не менее 300 лк.

В расчётном задании должны быть решены следующие вопросы:

- выбор системы освещения,
- выбор источников света,
- выбор светильников и их размещение,
- выбор нормируемой освещённости,
- расчёт освещения методом светового потока.

В данном расчётном задании для всех помещений рассчитывается общее равномерное освещение.

В данном расчётном задании для всех помещений рассчитывается общее равномерное освещение. В таблице 32 приведены параметры помещения и выбранных осветительных приборов.

Таблица 32 – Параметры помещения и выбранных ламп

Параметр	Обозначение	Значение
Длина помещения	A	8,4 м
Ширина помещения	B	8 м
Высота помещения	H	3,3 м
Свес	h_c	0 м
Высота рабочей поверхности	h_{pn}	0,75 м
Высота от светильников до рабочей поверхности	h	2,55 м
Коэффициент отражения стен	ρ_{cm}	70 %
Коэффициент отражения потолка	ρ_n	70 %
Коэффициент запаса	k_z	1,5
Коэффициент неравномерности	Z	1,1

Свес ламп был принят равным 0, так как лампы в лаборатории встраиваются в панельный потолок.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен.

Световой поток лампы определяется по формуле

$$\Phi = \frac{E_n * S * k_z * Z}{N * \eta}, \quad (29)$$

где E_n – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05- 95, лк; S – площадь освещаемого помещения, м²; k_z – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли; Z – коэффициент неравномерности освещения, отношение E_{cp}/E_{min} ; N – число ламп в помещении; η – коэффициент использования светового потока. Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен ρ_c и потолка ρ_n .

Находим индекс помещения

$$i = \frac{S}{h(A+B)} = \frac{67,2}{2,55 * (8+8,4)} = 1,61.$$

Коэффициент использования светового потока для светильников типа ШОД при индексе помещения 1,61 будет равен 0,51.

Согласно указанной методике выбираем тип источника света. Наиболее подходящим вариантом является 40 ваттная лампа ЛБ-40, у которой световой поток равен 2800 лм. Для выбранного типа лампы подходит светильник ШОД-2-40 с длиной 1228 мм и шириной 284 мм.

Из формулы (29) находим количество ламп для помещения

$$N = \frac{E_n * S * k_z * Z}{\Phi * \eta} = \frac{300 * 67,2 * 1,5 * 1,1}{2800 * 0,51} = 23,29 \approx 24.$$

Принимаем $N = 24$ лампы или 12 светильников.

Размещаем светильники в 3 ряда по 4 светильника в ряду с соблюдением условий: L – расстояние между соседними светильниками или рядами (если по длине и ширине помещения расстояния различны, то они обозначаются L_A и L_B), l – расстояние от крайних светильников или рядов до стены. Оптимальное расстояние l от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать равным $L/3$.

Сначала определим расчетный световой поток

$$\Phi = \frac{E_n * S * k_z * Z}{N * \eta} = \frac{300 * 67,2 * 1,5 * 1,1}{24 * 0,51} = 2717,6 \text{ лм.}$$

Проверяем выполнение условия

$$\begin{aligned} -10\% &\leq \frac{\Phi_{\text{станд}} - \Phi_{\text{расч}}}{\Phi_{\text{станд}}} * 100\% \leq +20\%, \\ -10\% &\leq \frac{2800 - 2717,6}{2800} * 100\% \leq +20\%, \\ -10\% &\leq 2,94\% \leq +20\%. \end{aligned}$$

В заключении, определим общую электрическую мощность получившейся осветительной установки

$$P = N * P_{\text{л}} = 24 * 40 = 960 \text{ Вт.}$$

Теперь определим расстояния между светильниками по длине и ширине помещения

$$A = 3L_A + 4 * 1228 + 2 * \frac{L_A}{3}, \quad L_A = (8400 - 4 * 1228) * \frac{3}{11} = 951,27 \text{ мм,}$$

$$B = 2L_B + 3 * 284 + 2 * \frac{L_B}{3}, \quad L_B = (8000 - 3 * 284) * \frac{3}{8} = 2680,50 \text{ мм,}$$

$$l_A = \frac{L_A}{3} = \frac{951,27}{3} = 317,09 \text{ мм,} \quad l_B = \frac{L_B}{3} = \frac{2680,50}{3} = 893,50 \text{ мм.}$$

По итогу расчёта получили следующую схему размещения светильников в лаборатории, которая приведена на рисунке 33.

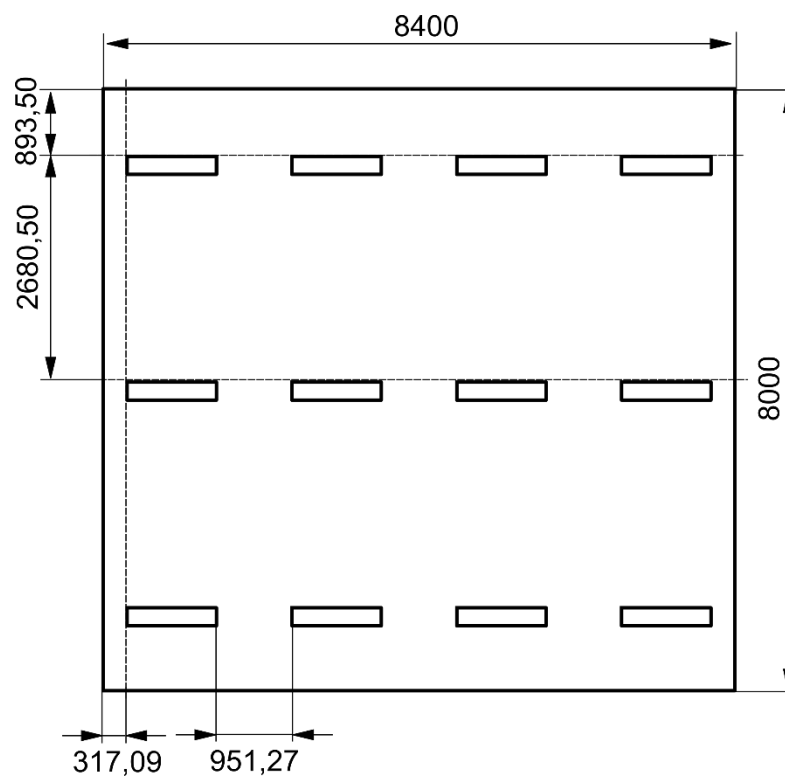


Рисунок 33 – План размещения светильников в лаборатории

3.2 Опасные факторы

3.2.1 Электроопасность

К опасным факторам можно отнести наличие в помещении большого количества аппаратуры, использующей однофазный электрический ток напряжением 220 В и частотой 50Гц. По опасности электропоражения комната

относится к помещениям без повышенной опасности, так как отсутствует повышенная влажность, высокая температура, токопроводящая пыль и возможность одновременного соприкосновения токоведущих элементов с заземленными металлическими корпусами оборудования [56].

Лаборатория относится к помещению без повышенной опасности поражения электрическим током. Безопасными номиналами являются: $I < 0,1 \text{ А}$; $U < (2-36) \text{ В}$; $R_{\text{зазем}} < 4 \text{ Ом}$.

Для защиты от поражения электрическим током используют СИЗ и СКЗ. Средства коллективной защиты:

- 1) защитное заземление, зануление [57];
- 2) малое напряжение;
- 3) электрическое разделение сетей;
- 4) защитное отключение;
- 5) изоляция токоведущих частей;
- 6) оградительные устройства;
- 7) использование щитов, барьеров, клеток, ширм, а также заземляющих и шунтирующих штанг, специальных знаков и плакатов.

Средства индивидуальной защиты: использование диэлектрических перчаток, изолирующих клещей и штанг, слесарных инструментов с изолированными рукоятками, указатели величины напряжения, калоши, боты, подставки и коврики.

3.2.2 Пожароопасность

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д.

Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории В – горючие и трудно горючие жидкости, твердые горючие и трудно горючие вещества и материалы, вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых находится, не относятся к категории наиболее опасных А или Б.

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 (выполнено из кирпича, которое относится к трудновоспламеняемым материалам).

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера: халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня).

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000В. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Для предупреждения пожара и взрыва необходимо предусмотреть:

- 1) специальные изолированные помещения для хранения и разлива легко воспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), оборудованные приточно-вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении – соответствии с ГОСТ 12.4.021-75 и СНиП 2.04.05-86;

- 2) специальные помещения (для хранения в таре пылеобразной канифоли), изолированные от нагревательных приборов и нагретых частей оборудования;
- 3) первичные средства пожаротушения на производственных участках (передвижные углекислые огнетушители ГОСТ 9230-77, пенные огнетушители ТУ 22-4720-80, ящики с песком, войлок, кошма или асбестовое полотно);
- 4) автоматические сигнализаторы (типа СВК-3 М 1) для сигнализации о присутствии в воздухе помещений предвзрывных концентраций горючих паров растворителей и их смесей.

Лаборатория полностью соответствует требованиям пожарной безопасности. В ней находятся охранно-пожарная сигнализация, план эвакуации (рисунок 34), порошковые огнетушители с поверенным клеймом, таблички с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу.



Рисунок 34 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений учебного корпуса №10 НИ ТПУ

3.3 Экологическая безопасность

В компьютерах содержится огромное количество компонентов, которые содержат токсичные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды. К таким веществам относятся бериллий, кадмий, мышьяк, поливинилхлорид, ртуть, свинец, фталаты, огнезащитные составы на основе брома и редкоземельные минералы. Поэтому компьютерная техника требует специальных методов утилизации. Общие этапы утилизации компьютерной техники:

- разборка блока, сортировка деталей по типу для упрощения дальнейшей переработки;
- отправка металлических деталей на вторсырье, измельчение пластика, использование гранул в производстве;
- обработка системных плат, извлечение драгоценных металлов, снятие припоя с деталей электроники;
- уничтожение материалов, которые не могут быть использованы повторно или переработаны.

Люминесцентные лампы утилизируют следующим образом. Неработающие лампы немедленно после удаления из светильника должны быть упакованы в картонную коробку, бумагу или тонкий мягкий картон, предохраняющий лампы от взаимного соприкосновения и случайного механического повреждения. После накопления ламп объемом в одну транспортную единицу их сдают на переработку на соответствующее предприятие. Недопустимо выбрасывать отработанные энергосберегающие лампы вместе с обычным мусором.

Мобильный робот для питания в автономном режиме использует две свинцово-кислотные или литиевые (в зависимости от модели) аккумуляторные батареи.

Свинец, содержащийся в аккумуляторах, является токсичным тяжелым металлом и наносит серьезный вред при попадании в окружающую среду. Электролит аккумулятора (водный раствор серной кислоты) также является чрезвычайно опасным веществом для окружающей среды и человека.

Литиевые батареи содержат потенциально токсичные никель, медь и свинец. А входящий в состав аккумуляторов щелочной металл литий легко-воспламеняющийся.

Изношенные свинцово-кислотные и литий-ионные аккумуляторные батареи необходимо отдавать на переработку в специализированные компании, тем самым защищая окружающую среду от негативного воздействия.

3.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Природная чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории или акватории, сложившейся в результате возникновения источника природной чрезвычайной ситуации, который может повлечь или повлек за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и/или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Лаборатория расположена в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Такие природные явления, как землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д., в данном регионе маловероятны.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы. Для Сибири в зимнее время года характерны сильные морозы. Достижение критически низких температур приводит к авариям систем тепло- и водоснабжения, сантехнических коммуникаций и электроснабжения, приостановке работы. В этом случае при подготовке к зиме следует предусмотреть

- газобаллонные калориферы (запасные обогреватели),
- дизель или бензоэлектрогенераторы,
- запасы питьевой и технической воды на складе,
- теплый транспорт для доставки работников на работу и с работы домой в случае отказа муниципального транспорта.

Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

В лаборатории outdoor мобильной робототехники наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие оборудовано системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы было проведено исследование эффекта проскальзывания колёс всенаправленного мобильного робота Festo Robotino 2 в задачах навигации при движении робота по неоднородной поверхности.

В процессе исследования был проведён аналитический обзор существующих методов определения проскальзывания колёс мобильных роботов. Были проведены эксперименты по получению данных о движении робота по поверхностям с различными свойствами. Была произведена предварительная обработка полученного набора данных с помощью пакета прикладных программ Matlab. Экспериментальные данные были проанализированы на наличие различных зависимостей, которые могут быть полезны для оценки проскальзывания колёс мобильного робота. По экспериментальным данным были построены модели зависимости коэффициента проскальзывания от тока двигателя с учётом нормированной угловой скорости колёс. Для фильтрации шумов в измерениях тока и скорости двигателя постоянного тока был настроен фильтр Калмана. В заключении была проведена апробация системы оценки проскальзывания колёс мобильного робота.

Список используемых источников

1. Stachniss C. Robotic Mapping and Exploration : Springer Tracts in Advanced Robotics. Vol. 55 / C. Stachniss; coll. B. Siciliano, O. Khatib, F. Groen. – DOI 10.1007/978-3-642-01097-2. – URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-01097-2> (date accessed: 15.05.2023). – Text : electronic.
2. Andrakhanov A. Navigation learning system for mobile robot in heterogeneous environment: Inductive modeling approach / A. Andrakhanov, A. Belyaev. – DOI 10.1109/STC-CSIT.2017.8098846 // 2017 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). – Vol. 1. – P. 543-548.
3. Брылев О. А. Разработка имитационной модели мобильного робота и системы управления : бакалаврская работа / О. А. Брылев ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет ; науч. рук. А. В. Тырышкин. – Томск, 2021. – 90 с.
4. Current-Based Slippage Detection and Odometry Correction for Mobile Robots and Planetary Rovers / L. Ojeda, D. Cruz, G. Reina, J. Borenstein. – DOI 10.1109/TRO.2005.862480 // IEEE Transactions on Robotics. – 2006. – Vol. 22. – № 2. – P. 366-378.
5. Khaleghian S. Terrain classification using intelligent tire / S. Khaleghian, S. Taheri. – DOI 10.1016/j.jterra.2017.01.005 // Journal of Terramechanics. – 2017. – Vol. 71. – P. 15-24.
6. Iagnemma K. Classification-based wheel slip detection and detector fusion for mobile robots on outdoor terrain / K. Iagnemma, C. C. Ward. – DOI 10.1007/s10514-008-9105-8 // Autonomous Robots. – 2009. – Vol. 26. – № 1. – P. 33-46.
7. Terrain Classification Using Vibration Sensors : Theory and Methods / E. DuPont, E. Collins, E. Coyle, R. Roberts. – Text : electronic.
8. Andrakhanov A. GMDH-Based Learning System for Mobile Robot Navigation in Heterogeneous Environment / A. Andrakhanov, A. Belyaev. – DOI 10.1007/978-3-319-70581-1_1 // Advances in Intelligent Systems and Computing II : Advances in Intelligent Systems and Computing / eds. N. Shakhovska, V. Stepashko. – P. 1-20.
9. ГОСТ 17697-72. Автомобили. Качение колеса. Термины и определения. – Москва : Издательство стандартов, 1972.
10. J670_202206. Vehicle Dynamics Terminology : дата введения 2022-06-09. – SAE International.
11. Gonzalez R. Slippage estimation and compensation for planetary exploration rovers. State of the art and future challenges / R. Gonzalez, K. Iagnemma. – DOI 10.1002/rob.21761 // Journal of Field Robotics. – 2018. – Vol. 35. – № 4. – P. 564-577.

12. Bekker M. G. Theory of Land Locomotion: The Mechanics of Vehicle Mobility. Theory of Land Locomotion / M. G. Bekker. – 530 p. – ISBN 978-0-472-75020-7.
13. Bekker M. G. Off-the-road Locomotion: Research and Development in Terramechanics. Off-the-road Locomotion / M. G. Bekker. – 240 p. – ISBN 978-0-472-04142-8.
14. Bekker M. G. Introduction to Terrain-vehicle Systems / M. G. Bekker. – 874 p. – ISBN 978-0-472-04144-2.
15. Mieczyslaw Bekker : URANOS. – URL: <https://web.archive.org/web/20090107031443/http://www.uranos.org.pl/biogr/bekkere.html> (date accessed: 27.05.2023). – Text : electronic.
16. Lunar Roving Vehicle : Wikipedia. – URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lunar_Roving_Vehicle&oldid=1156844486#cite_note-1 (date accessed: 27.05.2023). – Text : electronic.
17. Reece A. R. Principles of Soil-Vehicle Mechanics / A. R. Reece. – DOI 10.1243/PIME_AUTO_1965_180_009_02 // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Automobile Division. – 1965. – Vol. 180. – № 1. – P. 45-66.
18. Wong J.-Y. Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stresses part I. Performance of driven rigid wheels / J.-Y. Wong, A. R. Reece. – DOI 10.1016/0022-4898(67)90105-X // Journal of Terramechanics. – 1967. – Vol. 4. – № 1. – P. 81-98.
19. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles / J. Y. Wong. – 1. – DOI 10.1002/9781119719984. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119719984> (date accessed: 26.05.2023). – Text : electronic.
20. Benoit O. Prediction of trafficability for tracked vehicle on broken soil: real size tests / O. Benoit, Ph. Gotteland, A. Quibel. – DOI 10.1016/j.jterra.2003.10.003 // Journal of Terramechanics. – 2003. – Vol. 40. – № 2. – P. 135-160.
21. Relating Torque and Slip in an Odometric Model for an Autonomous Agricultural Vehicle / D. R. Lindgren, T. Hague, P. J. P. Smith, J. A. Marchant. – DOI 10.1023/A:1015682206018 // Autonomous Robots. – 2002. – Vol. 13. – № 1. – P. 73-86.
22. Slip, Traction Control, and Navigation of a Lunar Rover / K. Yoshida, T. Watanabe, N. Mizuno, G. Ishigami. – Text : electronic.
23. Ojeda L. Experimental results from FLEXnav: an expert rule-based dead-reckoning system for Mars rovers / L. Ojeda, G. Reina, J. Borenstein. – DOI 10.1109/AERO.2004.1367682 // 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720). – Vol. 2. – Experimental results from FLEXnav. – P. 816-825 Vol.2.

24. Iv W. S. F. Characterization of Various IMU Error Sources and the Effect on Navigation Performance / W. S. F. Iv, J. H. Wall, D. M. Bevly. – Text : electronic. – 2005.
25. Yoshida K. Slip-based Traction Control of a Planetary Rover / K. Yoshida, H. Hamano, T. Watanabe. – DOI 10.1007/3-540-36268-1_59 // Experimental Robotics VIII : Springer Tracts in Advanced Robotics / eds. B. Siciliano, P. Dario. – P. 644-653.
26. Gonzalez R. Slippage and immobilization detection for planetary exploration rovers via machine learning and proprioceptive sensing / R. Gonzalez, D. Apostolopoulos, K. Iagnemma. – DOI 10.1002/rob.21736 // Journal of Field Robotics. – 2018. – Vol. 35. – № 2. – P. 231-247.
27. Weiss C. Vibration-based Terrain Classification Using Support Vector Machines / C. Weiss, H. Frohlich, A. Zell. – DOI 10.1109/IROS.2006.282076 // 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – P. 4429-4434.
28. Comparison of Different Approaches to Vibration-based Terrain Classification / C. Weiss, N. Fechner, M. Stark, A. Zell. – Text : electronic // European Conference on Mobile Robots.
29. Comparative Study of Different Methods in Vibration-Based Terrain Classification for Wheeled Robots with Shock Absorbers / M. Mei, J. Chang, Y. Li [et al.]. – DOI 10.3390/s19051137 // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – № 5. – P. 1137.
30. Terrain characterization and classification with a mobile robot / L. Ojeda, J. Borenstein, G. Witus, R. Karlsen. – DOI 10.1002/rob.20113 // Journal of Field Robotics. – 2006. – Vol. 23. – № 2. – P. 103-122.
31. Low C. B. GPS-Based Path Following Control for a Car-Like Wheeled Mobile Robot With Skidding and Slipping / C. B. Low, D. Wang. – DOI 10.1109/TCST.2007.903100 // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2008. – Vol. 16. – № 2. – P. 340-347.
32. Maimone M. Two years of Visual Odometry on the Mars Exploration Rovers / M. Maimone, Y. Cheng, L. Matthies. – DOI 10.1002/rob.20184 // Journal of Field Robotics. – 2007. – Vol. 24. – № 3. – P. 169-186.
33. Computer Vision on Mars / L. Matthies, M. Maimone, A. Johnson [et al.]. – DOI 10.1007/s11263-007-0046-z // International Journal of Computer Vision. – 2007. – Vol. 75. – № 1. – P. 67-92.
34. Robust and Efficient Stereo Feature Tracking for Visual Odometry / A. E. Johnson, S. B. Goldberg, Y. Cheng, L. H. Matthies. – DOI 10.1109/ROBOT.2008.4543184 // 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – P. 39-46.

35. Enabling continuous planetary rover navigation through FPGA stereo and visual odometry / T. M. Howard, A. Morfopoulos, J. Morrison [et al.]. – DOI 10.1109/AERO.2012.6187041 // 2012 IEEE Aerospace Conference. – P. 1-9.
36. Advanced Visual Odometry for Planetary Exploration Rover / K. Otsu, M. Otsuki, G. Ishigami, T. Kubota. – Text : electronic.
37. Combined visual odometry and visual compass for off-road mobile robots localization / R. Gonzalez, F. Rodriguez, J. L. Guzman [et al.]. – DOI 10.1017/S026357471100110X // Robotica. – 2012. – Vol. 30. – № 6. – P. 865-878.
38. Gonzalez R. Improving Robot Mobility by Combining Downward-Looking and Frontal Cameras / R. Gonzalez, A. Rituerto, J. J. Guerrero. – DOI 10.3390/robotics5040025 // Robotics. – 2016. – Vol. 5. – № 4. – P. 25.
39. Development of a Visual Odometry System for a Wheeled Robot on Loose Soil using a Telecentric Camera / K. Nagatani, A. Ikeda, G. Ishigami [et al.]. – DOI 10.1163/016918610X501282 // Advanced Robotics. – 2010. – Vol. 24. – № 8-9. – P. 1149-1167.
40. Odometry Correction Using Visual Slip Angle Estimation for Planetary Exploration Rovers / G. Reina, G. Ishigami, K. Nagatani, K. Yoshida. – DOI 10.1163/016918609X12619993300548 // Advanced Robotics. – 2010. – Vol. 24. – № 3. – P. 359-385.
41. Ward C. C. A Dynamic-Model-Based Wheel Slip Detector for Mobile Robots on Outdoor Terrain / C. C. Ward, K. Iagnemma. – DOI 10.1109/TRO.2008.924945 // IEEE Transactions on Robotics. – 2008. – Vol. 24. – № 4. – P. 821-831.
42. Slip-compensated path following for planetary exploration rovers / D. M. Helmick, S. I. Roumeliotis, Y. Cheng [et al.]. – DOI 10.1163/156855306778792470 // Advanced Robotics. – 2006. – Vol. 20. – № 11. – P. 1257-1280.
43. Brooks C. A. Self-supervised terrain classification for planetary surface exploration rovers / C. A. Brooks, K. Iagnemma. – DOI 10.1002/rob.21408 // Journal of Field Robotics. – 2012. – Vol. 29. – № 3. – P. 445-468.
44. Learning and prediction of slip from visual information / A. Angelova, L. Matthies, D. Helmick, P. Perona. – DOI 10.1002/rob.20179 // Journal of Field Robotics. – 2007. – Vol. 24. – № 3. – P. 205-231.
45. BrOleg5. Aruco mobile robot localization / BrOleg5. – URL: https://github.com/BrOleg5/aruco_robot_localization (дата обращения: 31.05.2023). – Текст : электронный.
46. Terrain mobility performance optimization: Fundamentals for autonomous vehicle applications. Part I. New mobility indices: Optimization and analysis / V. V. Vantsevich, D. J. Gorsich, J. R. Paldan [et al.]. – DOI

10.1016/j.jterra.2022.09.001 // Journal of Terramechanics. – 2022. – Vol. 104. – P. 31-47.

47. GR 42x25. – URL: https://ametekcdn.azureedge.net/mediafiles/project/oneweb/oneweb/dunkermotoren/downloads/pdf/products/002_brushed%20dc%20motors/003_gr_42x25_en_1.pdf?revision:e1f4ca2b-4fbf-4ece-8e8c-112a0ccb7d98 (date accessed: 03.06.2023). – Text : electronic.
48. Estimating the state of a dc motor : Kalman filter for professionals. – URL: <https://kalman-filter.com/estimating-the-state-of-a-dc-motor/> (date accessed: 03.06.2023). – Text : electronic.
49. rawlings-group / als — Bitbucket. – URL: <https://bitbucket.org/rawlings-group/als/src/master/> (date accessed: 22.05.2023). – Text : electronic.
50. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы : дата введения 2003-06-30. – Москва : Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003.
51. СНиП 2.04.05-86. Отопление, вентиляция и кондиционирование : дата введения 1986-01-01. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1987.
52. ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны : дата введения 2003-06-15. – Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.1313-03.
53. ОСТ 54 30013-83. ССБТ. Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности : дата введения 1984-01-01. – Москва.
54. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 1) : дата введения 1992-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2006.
55. ГОСТ 12.1.010-76. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Взрывобезопасность. Общие требования (с Изменением N 1) : дата введения 1978-01-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002.
56. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты : дата введения 2009-12-10. – Москва : Стандартинформ, 2010.
57. ГОСТ 12.1.030-81. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением N 1) : дата введения 1982-07-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2001.
58. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности : дата введения 2003-08-01. – Москва : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003.

59. СНиП 2.01.02-85. Противопожарные нормы : дата введения 1987-01-01. – Москва : Госстрой СССР, 1991.
60. ГОСТ 12.4.021-75. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы вентиляционные. Общие требования (с Изменением N 1) : дата введения 1977-01-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2001.
61. ГОСТ 9230-77. Огнетушители СО(2) (углекислотные) передвижные. Технические условия (с Изменением N 1) : дата введения 1978-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1983.
62. ТУ 22-4720-80. Огнетушитель химический воздушно-пенный ОХВП-10 : дата введения 1981-01-01.

Приложение А

(обязательное)

Раздел 1.1

Обзор литературы

Обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ11	Брылев Олег Александрович		

Консультант ОАР ИШИТР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОАР ИШИТР	Беяев А.С.	—		

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Диденко А.В.	канд. филол. наук, доцент		

Literature review

The study of the surface properties and their interaction with wheeled and tracked vehicles is carried out by terramechanics. Its founder is the Polish-American engineer and scientist M. G. Bekker. In the 1950s and 1960s of the last century, he published several books on terramechanics and the development of off-road vehicles [12–14]. M. G. Bekker consulted specialists from the U.S. and Canadian armies in designing off-road vehicles [15]. M. G. Bekker was the author of the general idea and significantly contributed to the development of the American Lunar Roving Vehicle (LRV), which was successfully used in the last three missions of the Apollo program (Apollo 15, 1971; Apollo 16 and 17, 1972) [16].

Further development of M. G. Bekker's ideas was carried out by A. R. Reece and J. Y. Wong in [17–19]. The dependences obtained by M. G. Bekker, A. R. Reece, and J. Y. Wong are still used by researchers to analyze the movement of vehicles.

Now let us go directly to the existing approaches to wheel slippage estimation. The value of wheel slip is determined by the slip ratio

$$s = \begin{cases} \left(1 - \frac{v}{\omega r}\right) \times 100, & \text{если } \omega r > v, \quad (\text{slip}) \\ \left(1 - \frac{\omega r}{v}\right) \times 100, & \text{если } v > \omega r, \quad (\text{skid}) \end{cases} \quad (30)$$

where ω is the angular wheel velocity, r is the wheel radius, and v is the linear speed of the wheel's center (axis) [19]. Also, only the first condition from (30) is widely used to determine the slip ratio

$$s = \left(1 - \frac{v}{\omega r}\right) \times 100. \quad (31)$$

In this case $s > 0$ indicates wheel slip, a $s < 0$ indicates wheel skid. The wheel velocity is usually measured quite accurately with encoders. Thus, the task of slippage estimation is reduced to the task of estimating or measuring the robot's speed.

A detailed review of methods for estimation and compensation of wheel slippage in the context of planetary vehicles was carried out in [11]. Figure 35 shows

the classification of slip estimation methods from [11]. This classification is based on the methods or sensors that are used to estimate or measure the robot speed.

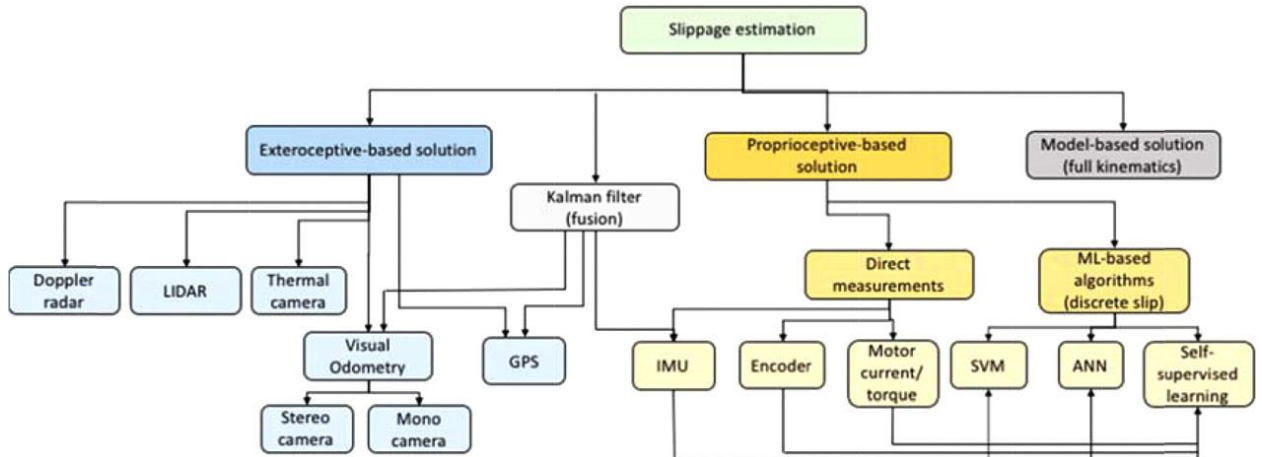


Figure 35 – Classification of slippage estimation approaches in the context of planetary exploration rovers [11]

Proprioceptive-based slippage estimation

Proprioceptive-based solutions estimate the wheel slippage when the robot moves directly on the surface for which the slippage is determined. They provide relatively high slippage estimation accuracy but increase the risk of robot entrapment since the robot has to drive over the surface to determine slippage.

The simplest and first way to estimate slippage is to use an additional free (not driving) wheel [20]. The slippage is estimated by comparing the velocity of the free wheel and the driving wheels. The disadvantages of this method are:

- the need to make changes in the robot design to install an additional wheel;
- the need for a suspension for the free wheel, which will ensure constant contact with the ground;
- not suitable for robots with omnidirectional kinematics.

The next method presented in [21–23] is based on comparing the wheel velocity with the robot speed obtained by integrating the linear acceleration in the direction of motion (e.g., with accelerometers). However, even using high-precision inertial sensors, the robot velocity estimation is subject to error and drift (especially at low speeds) [6; 24].

There are methods for determining wheel slip by current or torque characteristics. A simple algorithm for detecting longitudinal slipping in soft soil is mentioned

in [11]. It is based on averaging the motor current during a twenty-second window. Then the average motor current is compared to a predetermined safe threshold. If the average current value exceeds the preset threshold, the system signals the occurrence of slipping and switches to manual control mode. Despite the simplicity of the method, it is currently used on the Mars Science Laboratory rovers (in particular, the Curiosity rover is mentioned in [11]). The most significant limitation of this approach is that for each type of surface and for each slope level, different levels of current thresholds should be set.

An empirical relationship between motor torque and wheel slip is proposed in [25]. However, in this study, the torque is not measured but is assumed to be proportional to the motor set point.

The dependence between the wheel slip coefficient and the motor current is used in [4]. This relationship (Figure 36) was obtained analytically by the authors. The main difficulty in applying this method is that the accuracy of slippage estimation depends on the accuracy of the estimation of empirical model coefficients that reflect the properties of the soil, wheel, and their interaction. The authors proposed three methods for real-time estimation of these coefficients, depending on the availability of information on the absolute position of the rover.

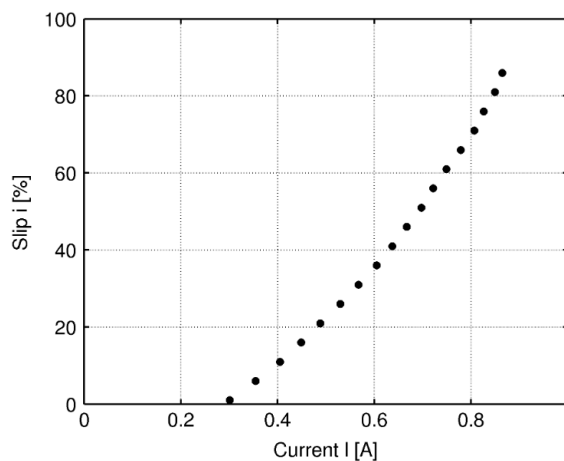


Figure 36 – Wheel slippage versus motor current relationship model with slip-sinkage effect [4]

Machine learning algorithms are also used to detect wheel slippage. Usually, the problem of slip detection is reduced to the problem of classification into discrete slip classes. This approach was used in [26]. The authors apply such machine

learning algorithms as SVM, ANN, self-organizing map (SOM), and k-means method. The slippage in the paper is divided into three discrete classes: small slippage $s \leq 0,3$, medium slippage $0,3 < s \leq 0,6$, and high slippage $s > 0,6$ (a split into two classes was also considered). The input data is the information from IMU, encoders, and motor current sensors. It was determined that the SVM algorithm gives the best result; the SOM and ANN algorithms show similar accuracy. The k-means method showed the worst accuracy.

The authors of [2; 8] built localization models with the help of neural networks based on Group Method of Data Handling (GMDH). Input parameters included data from gyroscopes, accelerometers, current sensors, and encoders. Output data from the model was used for correction of the robot's motion while moving across some highly heterogeneous surface. Besides, the authors compared the operation of two kinds of models: with preliminary classification of different surfaces and without it.

In addition to the slip, it is often necessary to determine the type of surface on which the robot is moving. This information can be used in addition to algorithms for determining wheel slip. In [6; 27] the classification of surface types was performed by the SVM method using data from accelerometers. A comparison of machine learning methods on the problem of surface classification was carried out in [28; 29]. The following methods were compared: SVM, probabilistic neural network (PNN), k-nearest neighbors, naive Bayesian classifier, decision tree, random forest, elaboration likelihood model (ELM), Adaboost, convolutional neural network (CNN), and recurrent neural network (RNN). All of them were trained on the robot's vibration data, measured by accelerometers.

In [30] the researchers trained neural network surface classifiers on measurements of a three-axis gyroscope and accelerometer, motor current and voltage sensors, infrared and ultrasonic rangefinders (pointing at the ground), a microphone (also pointing at the ground), and encoders. Each neural network was trained on individual sensor data. The sensor signal, after a discrete Fourier transform, was fed to the input of the neural network. The most accurate results were obtained by neural network classifiers, which were trained on accelerometer measurements.

Exteroceptive-based slippage estimation

The most obvious method to determine the actual speed of a robot (and wheel slippage) is RTK-GPS, for example, as in [31].

Instead of GNSS, ground beacon systems are also used: radio, infrared, ultrasonic, visual, etc. The disadvantage of such systems is that these beacons must be placed in the working area of the robot, and their global position must be known with high accuracy.

Visual odometry methods are most common as methods for determining the actual robot speed [32–36]. This approach gives a fairly accurate estimate of the actual robot speed (and hence the wheels slippage). The disadvantages of visual odometry methods include their computational complexity. Slow data processing (especially on weak computers) imposes a limit on the maximum speed: the robot must move slower so the program has time to process images. It is possible to speed up visual odometry calculations by moving the processing to an FPGA, as was done in [35]. Another property of visual odometry methods is that their accuracy depends on the number of features in the frame and the level of illumination. On featureless surfaces (such as sand) or in shadowed areas, the number of detected and tracked features will be small, which may lead to a decrease in the accuracy of movement estimates. In [34; 36], to increase the quality of the visual odometry in featureless cases, algorithms with switching between different methods of detecting features are proposed.

In the above publications, visual odometry used frontal cameras pointed forward along the motion of the robot. In [37] the speed of the robot is determined by visual odometry from a camera pointed at the ground. In their next work [38], the authors added a surface classifier based on images from the frontal and ground cameras.

The publication [39] proposes a camera with a telecentric lens pointed at the ground as an image source for the visual odometry method. The telecentric lens preserves the image scale regardless of the distance between the camera and the ground, which facilitates the processing of images obtained on an uneven surface.

Another way of determining the camera slip is presented in [40]. Longitudinal and lateral slippage were determined from the frames of the wheel tracks left by the robot on the sand. The images were provided by a camera mounted on the back of the robot and pointed at the ground. The weak point of this solution is its ability to work only on soft surfaces, which would leave wheel tracks.

Proprioceptive and exteroceptive-based slippage estimation

To increase the accuracy of robot speed estimation, a Kalman filter is used, which takes into account the dynamic model of the robot and measurements of both types of sensors (proprioceptive and exteroceptive). In [41] the authors estimate the robot's velocity using EKF and measurements from encoders, an inertial navigation unit, and GPS. The disadvantage of its method is the dependence on the global positioning system, which may not be available.

The Kalman filter is also used in [42] to combine measurements of IMU, wheel, and visual odometry (by stereo camera) (Figure 37). The slippage is estimated using the Mahalanobis comparator. The main drawback of the proposed solution is that it relies on visual information, which makes it difficult to use in low-light conditions.

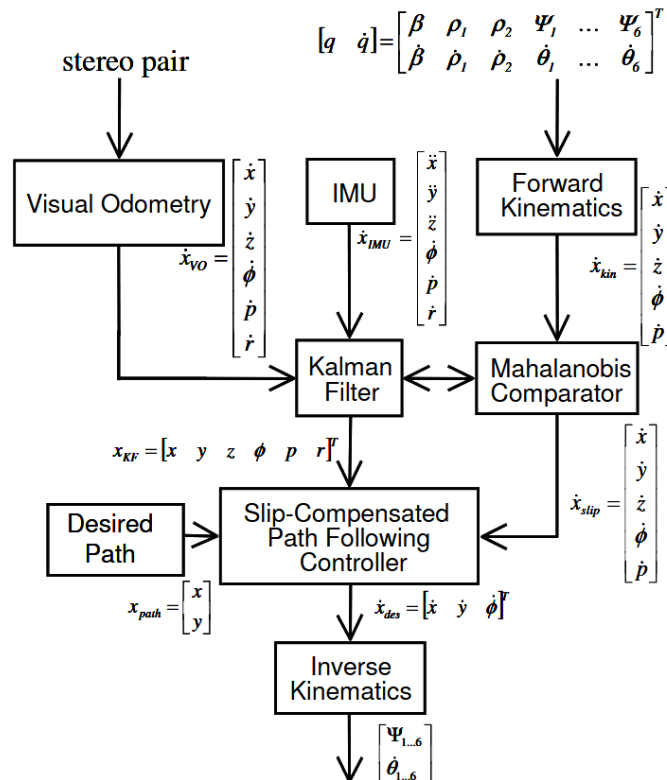


Figure 37 – Block diagram of slip-compensated path following system [42]

An interesting method of surface classification was proposed in [43]. Figure 38 shows a schematic of a self-supervised classifier. At the first stage (Figure 38a), the rover collects visual features about the surface using a stereo pair. At this stage, the system has no information about the relationship between the appearance of the surface and its class. As soon as the robot drives onto a surface that was already in the frame at the previous stage, the surface is classified based on the torque and vibration data (Figure 38b). Thus, the connection between the appearance of the surface and its class is established. After that, the robot performs a preliminary classification of the surface based on the accumulated information about the relationship between the visual features and the surface class (Figure 38c). Unfamiliar surfaces continue to be classified when the robot drives onto them, thus replenishing the base for the preliminary visual classification.

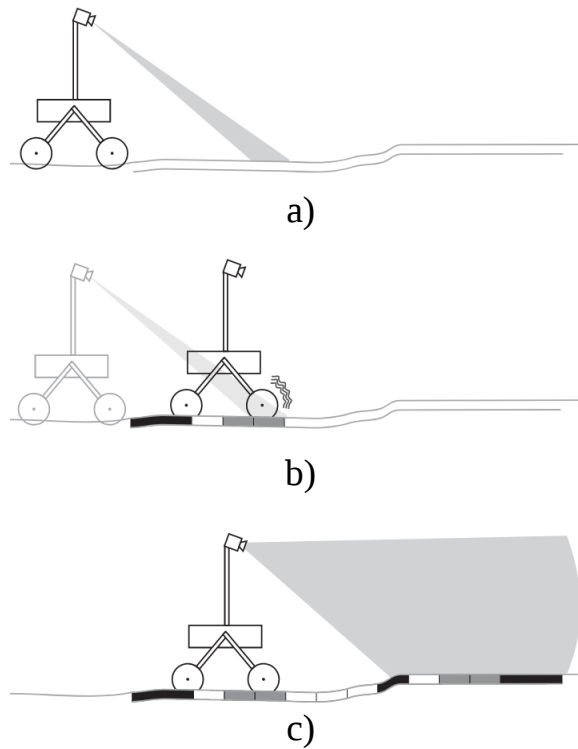


Figure 38 – Illustration of proposed self-supervised classification framework [43]

A similar idea was proposed five years earlier in [44]. In addition to surface classification, the system also predicts the value of wheel slippage based on the accumulated data from the already passed surfaces. The current wheel slippage is determined by the difference in speeds obtained from visual and wheel odometry.