МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»

Инженерная школа

Кафедра приборостроения

Кочегаров Николай Константинович

МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ РОБОТА

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

по образовательной программе подготовки магистров
по направлению подготовки
12.04.01 «Приборостроение»,
магистерская программа «Гидроакустика»

г. Владивосток
2020

Студент _____ Косенков И.Н.
подпись
«07» июля 2020 г.

Руководитель ВКР
профессор. д.ф.-м.н
(должность, ученое звание)
_____ Короченцев В.И.
(подпись) (ФИО)
«07» июля 2020г.

«Допустить к защите»

Руководитель ОП д.ф.-м.н.
(ученое звание)
_____ Короченцев В.И.
(подпись) (фио)
«07» июля 2020 г

Зав. кафедрой д.ф.-м.н.
(ученое звание)
_____ Короченцев В.И.
(подпись) (фио)
«07» июля 2020 г

Пройден нормоконтроль
_____ Гарасев И.В.
(подпись) (ФИО)
«07» июля 2020г.

В материалах ВКР не содержатся/содержатся
(нужное подчеркнуть)
сведения, составляющие государственную /коммерческую тайну и подлежащие экспортному контролю
Уполномоченный по экспортному контролю
_____ Петухов В.И.
(подпись) (ФИО)
«09» июля 2020г.

Назначен рецензент д.ф.-м.н.
(ученое звание)
Дзюба Владимир Пименович
(фамилия, имя, отчество)
_____ Дзюба В.П.
(подпись) (ФИО)
«07» июля 2020г.

Эксперт Инженерной школы
_____ Петросьянц В.В.
«07» июля 2020г.

Защищена в ГЭК с оценкой _____

Секретарь ГЭК
_____ _____ Н.С.Сошина
подпись И.О.Фамилия
«_____» _____ 20____г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»

Инженерная школа

Кафедра приборостроения

УТВЕРЖДЕНО
Руководитель ОП д.ф.-м.н., проф.
(ученая степень, должность)
_____ Короченцев В.И.
(подпись) (ФИО)
«24» июня 2020 г.

Заведующий кафедрой д.ф.-м.н., проф.
(ученая степень, звание)
_____ Короченцев В.И.
(подпись) (ФИО)
«24» июня 2020 г.

З А Д А Н И Е
на выпускную квалификационную работу

Студенту (ке) Кочегарову Николаю Константиновичу (Фамилия, Имя, Отчество) Группа М3118 (номер группы)

1. Наименование темы Модель устройства управления двигательной установкой робота

2. Основания для разработки Приказ от 17.12.2018 № Сд-205, Приказ от 04.02.2020 № 62-01-06-26 «О частичном изменении приказа»

3. Источники разработки Отечественный и зарубежный опыт разработки автономных мобильных роботов, отечественные и зарубежные публикации

4. Технические требования (параметры) В качестве датчика компьютерного зрения использовать монокулярный модуль; в роли устройства обработки информации использовать одноплатный компьютер; в качестве устройства управления двигателями использовать микроконтроллер.

5. Дополнительные требования Не предъявляются

6. Перечень разработанных вопросов Составление обзора литературы, выбор аппаратной части самодвижущейся роботизированной платформы, сборка и наладка всех систем мобильного робота, проведение испытаний функционирования разных алгоритмов компьютерного зрения.

7. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных плакатов)

Слайды презентации: титульный лист, цель работы, задачи, классическая схема автопилота, минимальный состав устройств для реализации компьютерного зрения, система автопилота с применением кластера одноплатных компьютеров, преимущества системы, автопилот Tesla, мобильный робот в сборе, ORB SLAM, заключение.

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

№ п/п	Выполняемые работы и мероприятия	Срок выполнения	Отметка о выполнении
1	Выбор темы и согласование с руководителем	до 1 ноября 2018 г.	выпол
2	Подбор первичного материала, его изучение и обработка. Составление предварительной библиографии	до 20 декабря 2018 г.	выпол
3	Составление плана работы и согласования с руководителем	до 6 февраля 2019 г.	выпол
4	Разработка и представление руководителю первой части работы	до 20 марта 2019 г.	выпол
5	Разработка и представление руководителю второй части работы	до 10 апреля 2020 г.	выпол
6	Подготовка и согласование с руководителем выводов и предложений, введения и заключения.	до 20 мая 2020 г.	выпол
7	Доработка ВКР в соответствии с замечаниями руководителя	до 20 июня 2020 г.	выпол
8	Получение отзыва научного руководителя и предзащита ВКР на заседании выпускающей кафедры	до 1 июля 2020 г.	выпол
9	Защита ВКР в ГАК	13 июля 2020 г.	выпол

Дата выдачи задания 04.02.2020

Срок представления к защите 13.07.2020

Руководитель ВКР _____ (подпись) Короченцев В.И.. (ФИО)

Студент _____ (подпись) Кочегаров Н.К. (ФИО)

АННОТАЦИЯ

Тема магистерской диссертации: «Модель устройства управления двигательной установкой робота»

Объем – 72 страниц, 24 рисунка, 5 таблиц, список литературы: 45 источников.

При написании пояснительной записки использовалось программное обеспечение (Ubuntu Mate 18.04, ROS, ORB SLAM2, LSD SLAM, DSO).

Структура магистерской диссертации включает: введение, обзор литературы, конструкторскую часть и экспериментальная часть, а также заключение и список литературы.

Во введении представлены цели выполнения ВКР и постановка задачи.

В обзоре литературы приведен анализ отечественных и зарубежных публикаций по тематике выпускной квалификационной работы.

В конструкторской части предложена модель устройства управления двигательной установкой робота.

В экспериментальной части проведена проверка работоспособности систем и соответствие заданным требованиям

В заключении приводятся результаты проделанной работы.

Ключевые слова: система компьютерного зрения, SLAM навигация, одноплатный компьютер, микроконтроллер, фреймворк.

ABSTRACT

The project of master's thesis: " Model propulsion robot control device "

Volume - 72 pages, 24 figures, 5 tables, bibliography: 45 sources.

When writing an explanatory note, software was used (Ubuntu Mate 18.04, ROS, ORB SLAM2, LSD SLAM, DSO).

The structure of the master's thesis includes: introduction, literature review, constructive part and experimental part, as well as the conclusion and reference list.

The introduction presents the objectives of the implementation of the graduate qualification work and the formulation of the problem.

The review of literature provides an analysis of domestic and foreign publications on the subject of final qualifying work.

In the constructive part, model propulsion robot control device.

In the experimental part, the systems were tested for their performance and compliance with the specified requirements.

In conclusion, the results of the work done.

Keywords: computer vision system, SLAM navigation, single-board computer, microcontroller, framework.

Оглавление

Введение 6

1 Обзор литературы 8

1.1 Самодвижущиеся роботизированные платформы (СРП) 8

1.2 Движители СРП 9

1.3 Двигатели и исполнительные устройства СРП 13

1.4 Датчики и сенсоры СРП 23

1.5 Система компьютерного зрения 35

1.6 Алгоритмы одновременной локализации и построения карты (SLAM) 36

1.6.1 Основные функции VSLAM 38

1.6.2 Дополнительные функции VSLAM 39

1.6.3 Функциональные и прямые методы SLAM навигации 40

1.6.3.1 Функциональные методы 40

1.6.3.2 Прямые методы 44

1.6.4 Сравнение и анализ алгоритмов SLAM навигации 45

1.7 Среда разработки СРП ROS 47

2 Конструкторская часть 52

2.1 Описание модели устройства управления двигательной установки робота 52

3 Экспериментальная часть 62

Заключение 67

Список литературы 68

Введение

В настоящее время применение мобильных робототехнических систем, основанных на современных методах SLAM, происходит во многих областях деятельности человека, особенно в беспилотном автотранспорте, в космонавтике, в промышленном производстве и в военной отрасли. Большое количество мобильных роботов способны выполнять поставленные задачи только под непосредственным контролем оператора, с заранее заданными параметрами движения и в присутствии только статичных объектов, что существенно ограничивает область применения данного вида устройств. Зачастую в условиях окружающей среды присутствует много динамичных объектов, избыточная или недостаточная освещённость, блики, слабая контрастность предметов, всё это накладывает трудности в получении достоверных данных для средств машинного зрения робота. Высокие требования к характеристикам перемещения роботов в пространстве обуславливают необходимость использования средств компьютерного и математического моделирования на всех этапах разработки алгоритмов управления. Поэтому исследования в данной области являются актуальной задачей.

Система компьютерного зрения включает в себя область инженерных разработок, направленных на преобразование получаемых входных параметров о состоянии окружающего пространства и дальнейшее применение результатов полученного преобразования. В своём изначальном определении, система компьютерного зрения представляет собой систему преобразования данных, получаемых с датчиков и сенсоров, с дальнейшим выполнением разных программных операций над полученной информацией.

Для создания самодвижущейся роботизированной платформы (СРП), функционирующей в режиме реального времени, необходимо решить ряд важных задач, одной из которых является исследование и применение методов и ал-

горитмов навигации, локализации и картографирования. Программно-аппаратная реализация данных методов и алгоритмов является наиболее трудновыполнимой задачей. Магистерская диссертация посвящена разработке модели управления двигательной установки робота с использованием средств компьютерного зрения.

Цель работы: создание мобильной роботизированной платформы для исследования и разработки системы автопилота для наземного транспорта.

Задачи, поставленные в рамках работы:

1. Составить обзор литературы на тему основных ключевых устройств и систем самодвижущейся роботизированной платформы.
2. Сравнительный анализ методов компьютерного зрения.
3. Анализ алгоритмов SLAM навигации;
4. Исследование существующих систем автопилотирования наземного транспорта.
5. Разработка модели самодвижущейся роботизированной платформы.
6. Проведение тестирования работы мобильного робота в реальных условиях.

1 Обзор литературы

1.1 Самодвижущиеся роботизированные платформы (СРП)

Самодвижущаяся роботизированная платформа – это автономное мобильное устройство, оснащённое системой компьютерного зрения и комплексом информационных датчиков, способных сформировать общее представление о текущей окружающей обстановке. Полученные входные данные с датчиков робота, позволяет ему самостоятельно ориентироваться в окружающем пространстве и выполнять необходимые действия для решения поставленной задачи. Таким образом, мобильный робот представляет собой техническую систему, способную к самостоятельному автономному поведению. Тем не менее, в заранее неизвестных условиях и задачах, связанных с высокой ответственностью, по-прежнему предполагается участие оператора в управлении роботом.

Важная роль в решении задач управления мобильными роботами принадлежит информационно-сенсорной системе, которая должна самостоятельно анализировать текущую обстановку, планировать свои действия и при этом иметь обратную связь с оператором. Робот должен самостоятельно обнаруживать препятствия, свободно перемещаться в пространстве, в котором могут находиться и другие движущиеся объекты. В случае потери связи с оператором, при необходимости СРП должна самостоятельно, используя полученную информацию о внешнем мире, вернуться обратно на исходную позицию. Таким образом, управление автономным мобильным роботом со стороны оператора приобретает новый характер. Это уже не прямое управление движением, а постановка задач. Так как условия выполнения задач не всегда соблюдаются, управление становится похожим на диалог между оператором и интеллектуальной системой управления робота. СРП принимает равноправное участие в планировании своих действий и

принятии решений. Такого рода роботизированные системы называют системами кооперативного управления [1].

Исследования в области мобильной робототехники ведутся во многих странах. Для успешного развития робототехники требуется серьёзная научная база, для создания которой необходимы общие усилия ученых в области информатики, теории управления, прикладной математики, механики. Несмотря на существенный отрыв от ведущих стран, прежде всего, от Японии и США, по разнообразию и количеству выпускаемых роботов, Россия занимает достойное место в мире по научным разработкам в области робототехники. Результаты российских ученых получают признание в международном научном сообществе.

Значительная доля в передовых достижениях ученых России в области робототехники принадлежит Российской академии наук. Исследования в данном направлении ведутся во многих институтах РАН, среди которых Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова и другие.

1.2 Движители СРП

Современные наземные самодвижущиеся роботизированные платформы (СРП) обладают большим выбором разнообразных способов передвижения в пространстве. Основой любого автономного робота является шасси определённой конструкции. Шасси представляет собой совокупность устройств, обеспечивающих передачу механической энергии от двигателей к активным элементам движителя – ведущим колесам, шкивам, звездочкам, механизмам шагания и т.п., – объединенных вместе с приводами в функциональную конструктивную подсистему.

Шасси и используемый движитель во многом определяют как функциональные возможности мобильного робота, так и его конструктивный облик. Главной функциональной возможностью робота является способность к передвижению в неизвестной среде и его приспособляемость к трудным условиям движения. В конструкциях наземных СРП традиционно используются колёсный и гусеничный движители с простейшими схемами шасси. Также существует общая тенденция развития наземных СРП в сторону миниатюризации, возрастающие требования к проходимости мобильных роботов с одновременным снижением массы и размеров обуславливают к необходимости усложнения конструкций шасси с помощью различных активных или пассивных механизмов адаптации. Это позволяет существенно повысить показатели проходимости платформы и наделить её дополнительными функциями [2].

Рисунок 1 – Развитие принципов построения шасси СРП

На рисунке представлены результаты анализа принципов построения шасси с точки зрения повышения их адаптационных способностей. Таким образом шасси наземных СРП первоначально делятся на несколько классов, определяемых выбранным принципом перемещения [3]. Существует следующая классификация шасси:

- колесные;
- гусеничные;
- шагающие;
- гибридные (комбинированные);
- сочлененные.

При этом к гибридным (комбинированным) относятся конструкции, имеющие в своем составе признаки нескольких классов одновременно (колесно-шагающие, колесно-гусеничные, гусенично-рычажные и т. п.). В этих схемах главную роль играет не тип используемого основного движителя, а сама конструкция адаптационных механизмов шасси [4].

Таблица 1. Классификация колесных и гусеничных схем шасси

Колёсные	
Критерий классификации	**Описание**
По числу элементов движителя (колес, гусениц, ног, секций и т. п.)	С жесткой рамой (корпусом), 2-, 3-, 4-, 6-, 8-колесные, с неуправляемыми колесами (танковым способом поворота)
По способу поворота	С управляемыми колесами (рулевыми механизмами или индивидуально)
	С колесами типа Mecanum
По адаптационным способностям (типу и числу элементов адаптации шасси)	Изменяемой геометрии с пассивными шарнирами излома рамы или поворота (перемещения) осей вращения колес (балансирных тележек)
Гусеничные	
По числу элементов движителей (колес, гусениц, ног, секций и т. п.)	Фиксированной конфигурации с жесткой рамой (корпусом), 2-, 4-гусеничные с бортовым способом поворота

Продолжение таблицы № 1

По способу поворота	Изменяемой геометрии, с изгибом гусеничной ленты (поворот)
По адаптационным способностям (типу и числу элементов адаптации шасси)	Изменяемой геометрии с пассивными или активными шарнирами излома рамы (корпуса) или поворота гусеничных тележек, с активными шарнирами поворота рычагов с гусеницами

Таблица 2. Классификация шагающих, гибридных и сочлененных схем шасси

Шагающие	
Критерий классификации	**Описание**
По типу механизма шагания, числу элементов движителя и числу активных степеней подвижности	Шагающие с опорными элементами в виде «лыж» с цикловыми механизмами
	Шагающие с опорными элементами в виде «ног»
Гибридные (комбинированные)	
По типу адаптационного механизма, числу элементов движителей (колес, гусениц, ног, секций и т. п.) и числу активных степеней подвижности	Шагающие с «колесным» принципом шагания (одноосевое вращение каждого из элементов), с рычагами
	То же, с колесными модулями
	Колесно-шагающие с рычажными механизмами шагания или типа «ломающаяся рама» (безотрывный способ шагания)
	Колесно-шагающие с многостепенными механизмами шагания

Продолжение таблицы № 2

	Колесно-гусеничные с поворотными гусеничными секциями
	Колесно-рычажные со специальными поворотными рычагами
	То же, с добавлением механизма прыгания
	Гусенично-шагающие
	Колесные или гусеничные с использованием исполнительного оборудования в качестве механизма адаптации шасси
Сочлененные	
По числу секций, числу элементов движителя и числу активных степеней подвижности отдельной секции	С пассивными шарнирами сочленения с колесным или гусеничным движителем секций
	С активными шарнирами сочленения с колесным или гусеничным движителем секций
	Многомодульные ползающие
	Многомодульные реконфигурируемые (самоорганизующиеся)

1.3 Двигатели и исполнительные устройства СРП

Под исполнительными устройствами подразумеваются узлы, которые можно сравнить с мускулами человека, приводящими в движение руки и ноги, управляемые с помощью выходных сигналов от управляющих устройств и выполняющие определённые движения.

Исполнительные устройства можно подразделить на следующие виды:

- пневматические – принцип работы основан на давлении сжатого воздуха. Устройство: пневмоцилиндр, распределительная система (клапаны), источник сжатого воздуха [5]. Достоинства: высокая скорость работы; простота конструкции и низкая стоимость; зачастую используется дискретное управление; широкий диапазон рабочих температур. Недостатки: низкая удельная мощность, обусловленная небольшим рабочим давлением; низкая жесткость, обусловленная сжимаемостью воздуха, что требует применения гидроамортизаторов;
- гидравлические – принцип работы основан на давлении жидкости. Устройство: гидроцилиндр, распределительная система, станция питания, компрессор, охлаждение, расширительный бак, фильтры [5]. Достоинства: высокая энергоемкость; быстродействие; точное позиционирование; достаточная жесткость статической нагрузочной характеристики; высокая грузоподъемность; непрерывное управление (по скорости или позиции). Недостатки: вероятность протекания рабочих жидкостей в местах соединений; необходимость использования механизмов для охлаждения рабочих, что усложняет конструкцию; узкий диапазон рабочих температур;
- электрические – принцип работы основан на преобразовании электрической энергии в механическую. Устройство: электродвигатель, редуктор, источник питания, усилители мощности, датчики. Достоинства: простота управления; высокий КПД; широкий диапазон управления скорости; точное позиционирование; широкий диапазон изменения момента нагрузки; широкий диапазон рабочих температур. Недостатки: высокая стоимость; при продолжительной непрерывной работе возможен перегрев двигателя и износ трущихся частей; электромагнитное поле может создавать помехи в работе других устройств;

- комбинированные – объединение нескольких типов приводов в одном устройстве (пневмогидравлические, пневмоэлектрические, гидроэлектрические привода и т п.);

Для определения типа привода СРП необходимо учесть много разных факторов. Особенно требуется большая надёжность конструкции привода робота, предназначенного для работы в экстремальных условиях. Привод – это устройство, состоящее из двигателя, элементов управления двигателем и механизма передачи, соединяющего двигатель с рабочим органом [6]. При выборе типа привода СРП рекомендуется учитывать следующие основные требования [6]:

- небольшие габаритные параметры;
- высокие показатели выходной мощности к массе привода;
- возможность работы в режиме автоматического управления;
- небольшая масса привода;
- обеспечение безопасности работы привода;
- осуществление точной и быстрой работы исполнительных устройств при низкой погрешности позиционирования;
- возможность встраивания систем охлаждения и терморегулирования;
- надёжность конструкции;
- удобство монтажа и обслуживания.

Рассмотрим основные типы электроприводов, применяемых в мобильных роботах.

Электроприводом – это электромеханическое устройство, предназначенное для электрификации и автоматизации рабочих процессов [7].

Электропривод с асинхронным двигателем. По конструкции и устройству асинхронный двигатель является наиболее простейшим двигателем переменного тока.

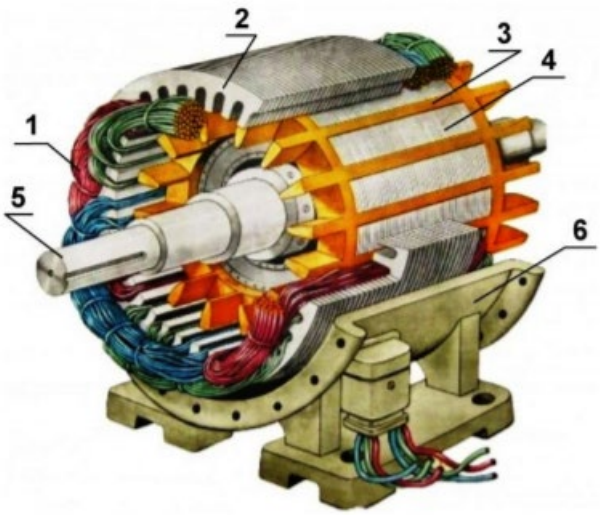

Рисунок 2 – Асинхронный двигатель: 1 – обмотка статора; 2 – сердечник статора; 3 – «беличья клетка»; 4 – сердечник ротора; 5 – вал ротора; 6 – станина

Асинхронный двигатель – это электрическая асинхронное устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии переменного тока, который подается на обмотки статора, в механическую энергию, которая возникает в результате вращения вала ротора. У асинхронного двигателя частота вращения магнитного поля статора всегда больше частоты вращения ротора. Работают асинхронные двигатели от сети переменного тока. Асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым и фазным ротором. С фазным ротором имеют более сложную конструкцию, чем у двигателей с короткозамкнутым ротором, тем не менее они имеют лучшие пусковые и регулировочные показатели. Однако, несмотря на простоту конструкции, двигатели переменного тока, а в частности асинхронные двигатели, практически не используются в мобильной робототехнике. Это связано с подключением данных двигателей к сети переменного тока, а мобильные роботы в большинстве своём работают от источников постоянного тока. Использование электропривода с асинхронным двигателем в СРП является нецелесообразным, как с конструктивной, так и с экономической стороны.

Электроприводы с асинхронным двигателем используются в основном в промышленных роботах. В свою очередь работу данных электроприводов можно регулировать в широком диапазоне как по моменту, так и по скорости, с помо-

щью системы регулирования с частотно-токовым векторным управлением. Система управления является двухконтурной с ПИ-регулятором скорости и трёхфазным релейным регулятором тока.

Электропривод с шаговым двигателем. Шаговый электродвигатель – это электродвигатель с дискретными угловыми перемещениями ротора, осуществляемыми за счет электрических импульсов сигнала управления.

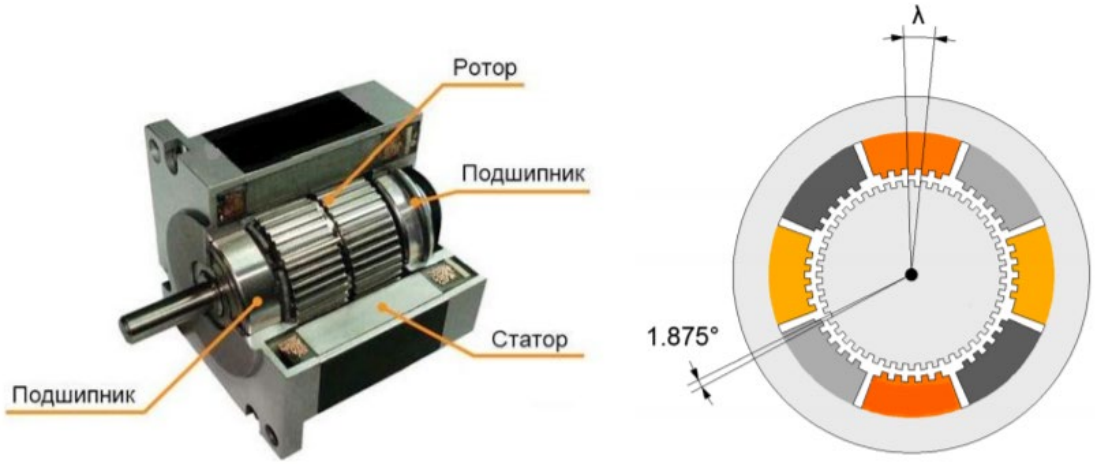

Рисунок 3 – Шаговый двигатель: λ – зубцовое деление; $1{,}875^{\circ}$ – шаговый угол

По принципу работы шаговый двигатель является синхронным двигателем. Отличие заключается в том, что магнитное поле шагового двигателя перемещается дискретно, т.е. шагами. Вследствие этого движение ротора состоит из последовательных шагов. Для получения такого движения обмотки шагового двигателя подключаются в определенном порядке к источнику питания [8].

При подаче напряжения на обычный электродвигатель его ротор начинает непрерывно вращаться. В этом случае определение точного положения ротора невозможно. Питание же шагового двигателя осуществляется серией электрических импульсов, подаваемых на обмотки двигателя. Каждый импульс поворачивает ротор на строго определённый угол, осуществляя так называемые «шаги», отсюда двигатель получил своё название.

Шаговые двигатели подразделяются:

1. по принципу действия: реактивный; с постоянными магнитами; гибридный;
2. по числу обмоток управления: однофазные; двухфазные; многофазные;

3. по числу пакетов стали магнитопровода: однопакетные; двухпакетные; многопакетные;
4. по способу фиксации ротора при обесточенных обмотках управления: с внутренней фиксацией; с внешней фиксацией [8].

Для шагового двигателя не существует единой величины шага. Выпускаются двигатели с различными углами поворота на один шаг. В зависимости от характера применения двигателя подбирается номинальная величина такого шага. Величины углов поворота указываются в спецификации устройства. Можно найти шаговые двигатели с углами поворота от долей градуса до десятков градусов.

Особенность шаговых двигателей состоит в том, что ими можно управлять с помощью цифровых устройств. Возможность осуществлять повороты на точно заданный угол делает шаговые двигатели идеальными для задач линейного и кругового позиционирования. Шаговые двигатели отличаются своим многообразием конструкций и способов управления.

В СРП шаговые двигатели применяются в основном в исполнительных устройствах, т.к. из-за малой мощности использование их в качестве силового привода шасси нецелесообразно. Применение электропривода с шаговым двигателем больше всего подойдет для лёгких мобильных роботов, например робота следящего за линией.

Электропривод с двигателем постоянного тока. Электродвигатель постоянного тока – это электрическое устройство постоянного тока, преобразующее электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию.

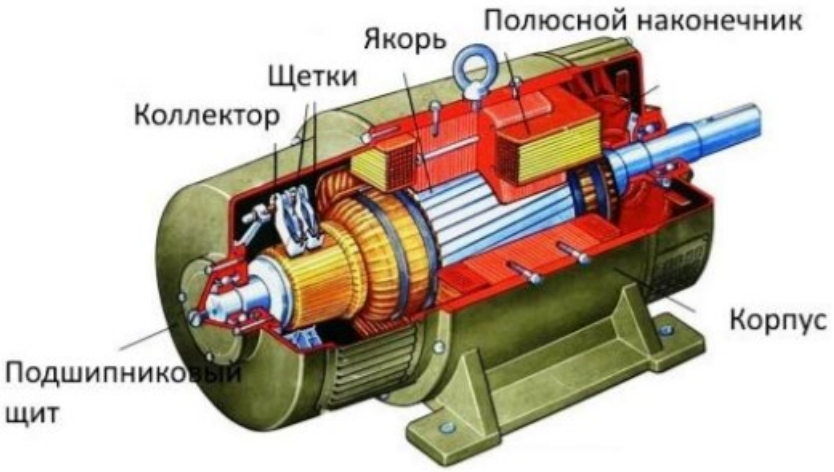

Рисунок 4 – Конструкция двигателя постоянного тока

Двигатели постоянного тока по конструкции схожи с синхронным двигателям переменного тока, только с разницей в типе тока. Главной обмоткой двигателя служит якорь, на который подается питание через коллектор и щеточный механизм. Он совершает вращение в магнитном поле, образованном полюсами статора (корпуса двигателя). Якорь изготавливается из нескольких обмоток, уложенных в его пазах, и закрепленных там особым эпоксидным составом. Статор может состоять из постоянных магнитов или из обмоток возбуждения. В двигателях с малой мощностью используют постоянные магниты, а в двигателях с большой мощностью статор снабжен обмотками возбуждения. Статор с торцов закрыт крышками со встроенными в них подшипниками, служащими для вращения вала якоря. Для охлаждения используется вентилятор, закреплённый на одном конце этого вала.

Принцип работы такого двигателя прост. При размещении проволочной рамки в магнитном поле, будет происходить её вращение. Ток, проходя по рамке создает вокруг себя магнитное поле, взаимодействующее с внешним магнитным полем, что приводит к круговому движению рамки. В современной конструкции двигателя постоянного тока роль рамки играет якорь с обмотками. На обмотки подается электрический ток, в результате вокруг якоря создается магнитное поле, приводящее его во вращательное движение.

Выводы обмоток якоря объединены в один узел, называемый коллектором. При вращении вала щётки по очереди подают питание на обмотки якоря. В результате вал двигателя совершает вращение с равномерной скоростью. Чем больше обмоток имеет якорь, тем стабильнее и равномернее будет работать двигатель.

Наиболее уязвимым механизмом в конструкции двигателя является щёточный узел. Во время работы графитовые щётки с постоянным усилием прижимаются к коллектору, тем самым притираясь к нему. В процессе эксплуатации щётки изнашиваются.

Требуется периодически продувать щётки, т.к. от накопившейся пыли щётки могут застрять в направляющих пазах. Это может привести к зависанию щёток над коллектором и сбою работы двигателя. Из-за износа требуется периодическая их замена. Также происходит износ коллектора в месте контакта коллектора со щётками. Поэтому при износе якорь снимают и на токарном станке протачивают коллектор.

В основном наибольшее применение двигатели постоянного тока находят в промышленных роботах, чем в СРП. Т.к. они являются малоинерционными и обладают высоким моментом в конструкциях с постоянными магнитами, что позволяет значительно повысить удельную мощность электропривода и получить высокую кратность тока и момента по отношению к номинальным.

Такой тип двигателя постоянного тока как сервомотор применяется в основном в небольших СРП, как и шаговый двигатель. Сервомотор – это двигатель постоянного тока, снабжённый редуктором и системой обратной связи контроля положения. Часто используется для управления дополнительным оборудованием СРП.

Электропривод с вентильным двигателем. Электродвигатели, работающие от постоянного тока, по сравнению с двигателями переменного тока, обычно обладают более высокими техническими и экономическими характеристиками. Единственным серьёзным недостатком является наличие щёточного механизма, существенно понижающего надёжность всей конструкции. В результате были

созданы бесщёточные двигатели, работающие от постоянного тока, которые называются вентильные двигатели. Благодаря появлению полупроводников, создание такого устройства нового типа стало возможным. Щёточный механизм в этой схеме заменён коммутатором на основе полупроводниковых элементов. Якорь является неподвижным элементом, а на роторе закреплены постоянные магниты.

Вентильный двигатель – это синхронный двигатель, регулируемый путём изменения частоты с самосинхронизацией [8].

Вентильный двигатель постоянного тока представляет собой электромеханическую систему, состоящую из: электрической машины для привода в действие исполнительного устройства; датчика положения ротора, выполненного в одном корпусе с двигателем и вырабатывающего сигналы управления, которые определяют последовательность подключения обмоток фаз к источнику питания; бесконтактного (полупроводникового) коммутатора, который по сигналам датчика положения ротора осуществляет коммутацию обмоток двигателя. В результате получается устройство, позволяющее сделать корпус более компактным, избавиться от дополнительных деталей, лишних преобразователей, а в следствии сделать весь привод механизма более надёжным.

Вентильный двигатель – это изменённый вариант коллекторного двигателя постоянного тока. Мотор имеет индуктор, расположенный на роторе, а обмотка якоря находится на статоре. Электричество подаётся управляющими сигналами на определённые статорные обмотки, в зависимости от угла поворота ротора, который определяется встроенными датчиками Холла.

Рисунок 5 – Конструкция вентильного двигателя

Дополнительно в вентильный двигатель может встраиваться термодатчик и тормозной механизм. Генератор тока используется в случае работы мотора в режиме стабилизации скорости с большой точностью. Термодатчик служит для предохранения обмоток от перегрева, и включает в себя несколько позисторов, соединенных друг с другом между собой последовательно. Позисторы – это резисторы, сопротивление которых зависит от температуры.

Достоинства вентильного двигателя: высокая энергоэффективность; безопасность при работе на максимальных нагрузках; широкий диапазон рабочих скоростей; высокая точность работы; отсутствие щёточно-коллекторного узла; возможность применения в агрессивной среде; длительный срок службы; высокая надёжность.

К недостаткам вентильных двигателей можно отнести сложность системы управления и высокую стоимость.

Благодаря высокой надёжности и хорошей управляемости, вентильные двигатели применяются в широком спектре устройств: от систем компьютерного охлаждения до мобильных роботов и космических ракет.

Широкое применение вентильные двигатели нашли в промышленности, особенно в системах регулирования скорости с большим диапазоном и высоким темпом пусков, остановок и реверса; авиации, автомобильном производстве, биомедицинской аппаратуре, бытовой технике и пр.

1.4 Датчики и сенсоры СРП

В основную часть информационно-измерительных систем разного рода роботов входят сенсоры и датчики, которые позволяют получать необходимую информацию из внешнего мира. На рисунке 6 показана обобщенная функциональная схема информационно-измерительных систем.

Датчик или чувствительное устройство — это первичный преобразователь, который реагирует на подлежащий определению параметр (температура, давление, перемещение, сила тока и т. д.) и преобразует его в другой параметр, удобный для дальнейшего использования, выдавая сигнал о его наличии и интенсивности. Природа полученного сигнала зависит от типа датчика, который принял этот сигнал.

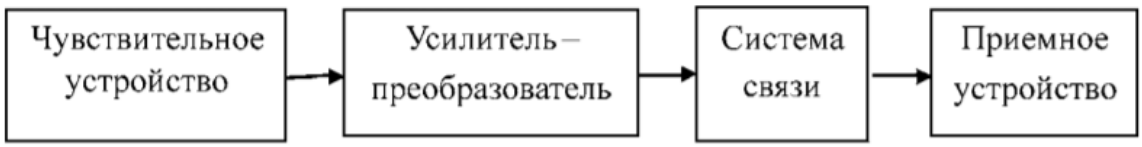

Рисунок 6 – Функциональная схема информационно-измерительной системы

Из элементов информационно-измерительных систем, представленных на рисунке 6, оригинальными являются только датчики. Оставшиеся элементы могут иметь более широкую область применения [9].

Рассмотрим датчики механических величин, которые наиболее популярны в робототехнике: датчики перемещения, скорости и ускорения, а также силы и давления.

Датчики перемещения делятся на линейные и угловые. Между собой они отличаются по классу точности и диапазону перемещения. Допустим, согласно российскому ГОСТ, датчики угловых перемещений в диапазоне 360° имеют шесть классов точности от 50 для датчиков I класса до 1 для VI класса. Важным параметром для такого типа датчиков является разрешающая способность не более 10 мкм и погрешность от нелинейности в пределах от 0,01% до 5% [10].

По принципу работы эти датчики можно разделить на фотоэлектрические, резистивные, ёмкостные и электромагнитные.

Резистивные (потенциометрические) датчики перемещения — это потенциометр с движком, перемещение которого и является первичным выявляемым параметром, который преобразуется в сопротивление. Параметр последнего преобразуется затем в выходное напряжение постоянного или переменного тока в схеме делителя напряжения и с помощью мостовой схемы.

Резистивные датчики просты, дают высокий уровень выходного сигнала, малы по габаритам и обладают устойчивостью к радиации.

Электромагнитные датчики перемещения бывают двух видов — индуктивные и трансформаторные.

В индуктивных датчиках выявляемое перемещение преобразуется в изменение индуктивности за счет изменения параметров магнитной цепи катушки индуктивности. Последнее происходит путем либо изменения воздушного зазора в магнитной цепи с помощью подвижного якоря, либо перемещения сердечника внутри катушки. Датчики первого типа служат для выявления небольших перемещений 0,1–1,0 мм, а второго — больших до 100 мм. Недостатком таких датчиков является наличие большой электромагнитной силы, которая действует на подвижную часть датчика. Для уменьшения этой силы основное применение получили дифференциальные индуктивные датчики, собранные по мостовой схеме, где указанные силы от двух катушек взаимно уравновешиваются.

Величина погрешности современных индуктивных датчиков перемещения составляет от 0,5% до 2%.

Трансформаторные датчики перемещения преобразуют выявляемый параметр в изменение коэффициента взаимной индукции. Данный датчик подобен индуктивному датчику, собранному по дифференциальной схеме, с добавлением вторичных обмоток, с которых снимается выходной сигнал.

На рисунке 7 изображены схемы дифференциального индуктивного датчика с подвижным якорем (а) и трансформаторного датчика (б).

К электромагнитным датчикам перемещения относятся синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (резольверы), индуктосины, редуктосины и

т. п. датчики в виде специальных электрических машин. Это электрические машины, используемые в режиме генератора как датчики угла поворота. При повороте ротора такой машины Э.Д.С., которая генерируется в его обмотках под действием вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, сдвигается по фазе на тот же угол. Это является мерой угла поворота ротора и в результате последующего преобразования дает напряжение постоянного тока, пропорциональное углу поворота ротора [11]. Основные достоинства этих датчиков, как и собственно всех электромагнитных датчиков — высокая мощность выходного сигнала, а также гальваническая развязка от сети питания.

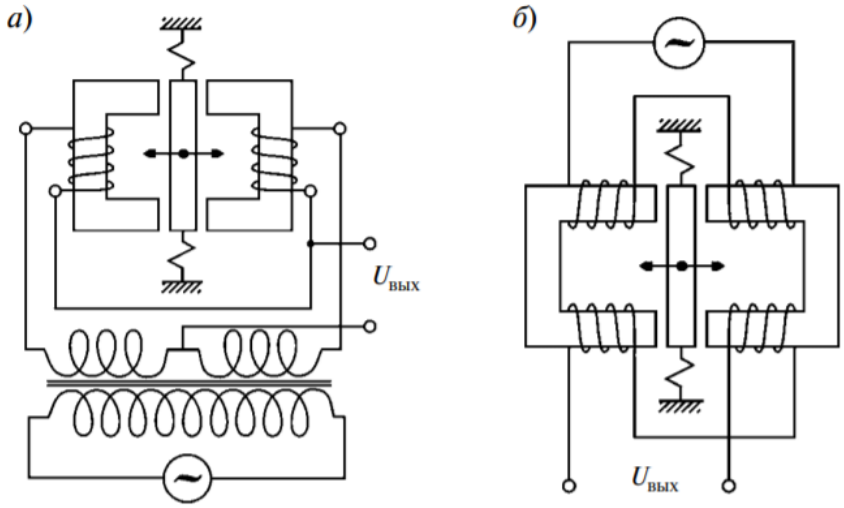

Рисунок 7 – Схемы дифференциального индуктивного (а) и трансформаторного (б) датчиков перемещения

Фотоэлектрические (оптические) датчики являются самыми точными датчиками перемещения, в которых перемещения контролируются с помощью луча света. Принцип действия этих датчиков заключается в размещении на контролируемом подвижном объекте экрана с системой отверстий, через которые проходит свет от источника и регистрируется, с другой стороны, фотоприёмниками. При перемещении экрана изменяются условия их освещения, что и является мерой перемещения. В самом простом варианте такого датчика угловых перемещений в качестве экрана используется диск с равноудалённо расположенными прорезями. При повороте диска фотоприемник регистрирует число световых импульсов, которое пропорционально углу поворота. Это импульсный датчик, преобразующий угол поворота в унитарный код. Однако наибольшую точность

обеспечивают кодовые оптические датчики, преобразующие угол поворота в цифровой код. Чтобы это осуществить на диске делается несколько дорожек со щелями. Каждая дорожка определяет разряд двоичного кода выходного сигнала (их может быть до 20): освещение фотоприемника на определенной дорожке соответствует двоичной единице, а его отсутствия — нулю. Для увеличения надёжности считывания вместо прямого двоичного кода часто используются коды с избыточностью типа кода Грея. В этом случае ошибка считывания не превышает младшего значащего разряда независимо от того, в каком разряде она произошла.

В датчиках линейного перемещения этого типа соответственно вместо диска используется линейки с такими же щелями и дорожками.

Существует много различных конструкций подобных оптических датчиков перемещения, в том числе двушкальные системы грубого и точного отсчета, системы с растровой интерполяцией, со штриховым кодом и др. [11]. Разрешающая способность таких прецизионных угловых датчиков может достигать до десятых долей секунды.

Емкостные (электростатические) датчики перемещения преобразуют выявляемое перемещение в параметр ёмкости конденсатора путем изменения расстояния между обкладками (электродами) конденсатора. Существуют такие датчики, в которых изменяется активная площадь пластин конденсатора, например, путем изменения положения одной пластины относительно другой. Основным применением ёмкостных датчиков является измерение малых перемещений, в том числе в датчиках давления и ускорения.

Датчики перемещения на основе эффекта Холла (датчики Холла). Эффект Холла заключается во влиянии магнитного поля на электрический ток. Если к пластине или пленке, по которой идёт ток, приложить перпендикулярно ей магнитное поле, между боковыми краями пластины возникнет разность потенциалов. Таким образом непосредственно эффект Холла позволяет создавать датчики магнитной индукции, но он получил распространение и для создания датчиков

перемещения пластины с током относительно магнита. Погрешность серийно выпускаемых датчиков Холла — 0,5–1,0%.

Датчики скорости. Путём дифференцирования сигнала от рассмотренных выше датчиков перемещения можно получить величину скорости линейного и углового перемещения. Однако более точное значение скорости дают датчики, непосредственно «чувствующие» скорость. Основными типами таких датчиков являются тахогенераторы и дискретные датчики, преобразующие скорость в частоту импульсов.

Тахогенераторы являются генераторами постоянного или переменного тока. Тахогенераторы постоянного тока могут иметь минимальную погрешность ~0,2%, но они дороже тахогенераторов переменного тока и менее надёжны в связи с наличием щёточно-коллекторного узла.

Дискретные датчики скорости вращения производят счёт числа оборотов в секунду с последующим преобразованием в код с помощью АЦП. Самый простой вариант такого датчика содержит диск с прорезями и с одной его стороны источник света, а с другой фотоприёмник в виде фотодиода или фототранзистора. Возможен вариант с использованием света, отражённого от освещённого вала с нанесёнными на нем полосками. Существуют и другие типы дискретных датчиков, в которых импульсы от вращающегося вала формируются не оптически, а с помощью магнитов и т. п.

Датчики ускорения — акселерометры. В этих датчиках ускорение выявляется через силу инерции некоторой известной по величине массы

$$F = mx\ , \tag{1.4.1}$$

где — x искомое ускорение.

Масса закрепляется на упругом элементе, например, на пружине. Деформация этого элемента, пропорциональная силе инерции, выявляется датчиком силы. В основном в данном типе датчиков нашли применение тензорезистивные и пьезоэлектрические датчики.

Принцип работы тензорезистивных датчиков основан на изменении сопротивления проводников или полупроводников при деформации и последующего

преобразования его в электрический сигнал подобно тому, как это делается в резистивных датчиках перемещения. Такие датчики ускорения имеют погрешность менее 1%.

Пьезоэлектрические датчики ускорения основаны на прямом пьезоэффекте, которым обладают некоторые материалы (сегнетова соль, кварц, турмалин и пьезокерамика — титанат бария, титанат свинца, цирконат свинца и др.). Пьезоэффект заключатся в возникновении электрического потенциала на их поверхности при деформации. Погрешность лучших таких датчиков — 0,2–0,5%. На рисунке 8 изображено устройство пьезоэлектрического датчика ускорения.

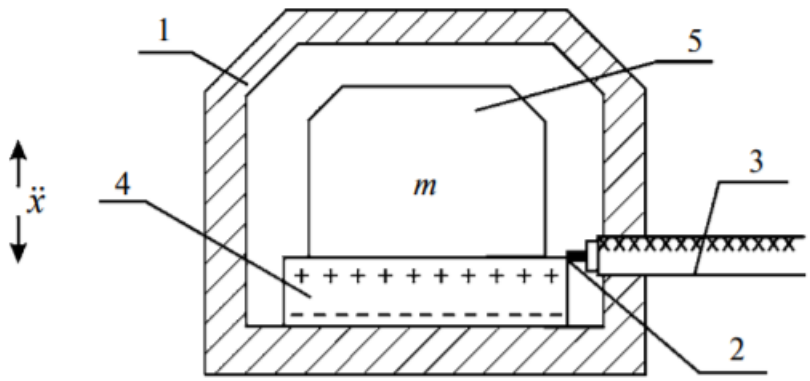

Рисунок 8 – Пьезоэлектрический датчик ускорения: 1 — корпус; 2 — центральный проводник коаксикального выходного кабеля; 3 — внешняя оболочка, соединенная с корпусом; 4 — пьезоэлемент; 5 — масса

Кроме датчиков ускорения указанные датчики применяются как датчики силы в диапазоне от долей грамма до десятков тонн и в качестве датчиков давления жидкости и газа, которое преобразуется в силу обычно с помощью мембран. Погрешность этих датчиков — десятые и сотые доли процента.

Дальномеры и локаторы. Сканирующие дальномеры, нашедшие применение в робототехнике, по физической природе используемого излучения подразделяются на радиотехнические, лазерные, инфракрасные и ультразвуковые.

На рисунке 9 показан радиотехнический локатор, предназначенный для обследования местности и обнаружения отдельных объектов. Дальность действия 2–200 м.

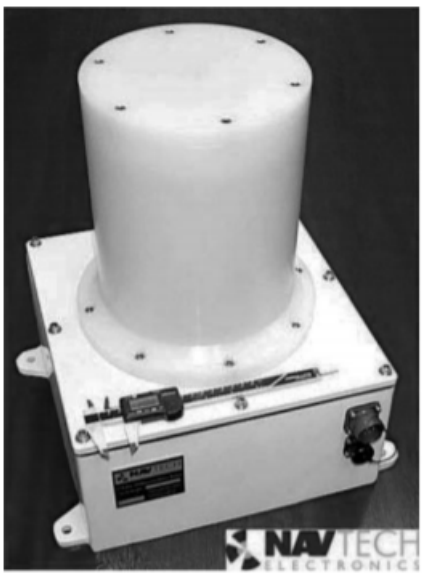

Рисунок 9 – Радар Nav Tech I 800 (США)

На рисунке 10 изображён лазерный локатор. Дальность его действия — 80 м, разрешение по расстоянию — 10мм, по углу < 1°.

Главное применение в робототехнике такие системы получили как дополнение систем компьютерного зрения в мобильных роботах, когда требуются повышенная точность и увеличение диапазона измерения расстояния.

Дальномер состоит из передатчика, направленно излучающего указанной выше физической природы излучение, и приёмника, регистрирующего отражённое от объектов окружающей среды это излучение. Принцип действия дальномеров основан на использовании в качестве меры измерения расстояния пройденного времени принимаемого отраженного эхосигнала относительно инициировавшего его сигнала, излучённого передатчиком. Данный сигнал представляет собой модулированное высокочастотное несущее колебание и может быть импульсным или непрерывным. Соответственно модуляция может быть непрерывной — амплитудной, частотной, фазовой или импульсной с изменением кроме этих параметров еще ширины импульсов или в виде кодовой модуляции.

Рисунок 10 – Лазерный локатор SICK (Германия)

Лазерные дальномеры и локаторы, получившие применение в робототехнике, основаны на твердотельных импульсных лазерах и применяются на дальностях до нескольких километров.

Сенсорные системы, которые используют инфракрасное излучение, применяются в мобильных роботах как дальномеры ближнего действия для предотвращения столкновений с препятствиями. Их достоинства — простота, надёжность и низкая стоимость. Диапазон действия инфракрасных дальномеров — единицы метров, погрешность до 10 %. Первичный оптический преобразователь у них — это излучающий светодиод с усилителем, а приёмник содержит матрицу фотодиодов или фоторезисторов. Передатчик и приемник имеют свои оптические системы.

Ультразвуковые дальномеры и локаторы (сонары) используют ультразвуковые колебания с частотой от 15 кГц и до мегагерц. Задачи, решаемые с их помощью:

- предотвращение столкновений и обеспечение обхода препятствий;
- картографирование окружающего пространства;
- распознавание объектов.

Большое распространение сонаров объясняется их низкой стоимостью, небольшим весом и энергопотреблением, простотой обработки сигналов.

Вместе с тем низкая скорость звука по сравнению с электромагнитным излучением, снижает быстродействие сонаров. Другим их недостатком является большая зависимость получаемого отражённого сигнала от свойств отражающей среды. Например, от наклонной поверхности этот сигнал вообще не попадает в сонар. В воздушной среде используются частоты 30–100 кГц. В излучателях этих колебаний применяются электростатические, пьезоэлектрические, а также магнитострикционные преобразователи электрического сигнала в ультразвук. Приёмники устроены по принципу обратимых электроакустических преобразователей такого же принципа действия. Наибольшее распространение в приёмниках и передатчиках получил прямой и обратный пьезоэффекты.

При использовании в водной среде в качестве гидроакустических преобразователей получили распространение магнитострикционные преобразователи, имеющие значительно большую акустическую мощность по сравнению, например, с пьезоэлектрическими и КПД до 80 %.

Ультразвуковые сенсорные системы нашли особенно широкое применение в подводных роботах, как и вообще во всех видах подводных аппаратов, где они являются основным средством контроля окружающего пространства.

Тактильные сенсорные системы. Эти системы предназначены для определения непосредственного соприкосновения с объектами внешнего окружения. В робототехнике они используются для «очувствления» рабочих органов манипуляторов и корпусов мобильных роботов. Когда наряду с фиксацией контакта требуется определять и его степень усилия, применяются силовые сенсоры. Тактильные системы используются так же для контроля проскальзывания предметов в схвате, распознавания формы объектов путем ощупывания, отслеживания краев и т. п.

В общем и целом, в тактильных системах применяются датчики касания, давления, проскальзывания. Они могут быть одиночные и матричные, занимающие определенную поверхность, аналоговые и дискретные, в пределе релейные. В них используются тензочувствительные материалы, электропроводящие поли-

меры, микропереключатели, герконы. Применяются устройства типа “искусственная кожа” на эластомерах (баристоры), пленках поливинилфторида и композитных материалах с волокнами из графита [11].

В последних вариантах матричных тактильных датчиков имеется однокристальный процессор, который осуществляет опрос точечных тактильных ячеек и формирует тактильный образ ощущаемого объекта в двоичном коде. Это пример так называемых интеллектуальных датчиков.

Сенсорные системы, определяющие положение в пространстве. К этим системам относятся гироскопические системы, акселерометры, одометры, спутниковые системы навигации и магнитометры.

Гироскопические системы используются для определения углового положения объектов в гравитационном поле. Первые такие системы, которые основаны на принципе действия волчка, — роторные гороскопы, были предложены ещё в XIX веке. Для измерения трёх углов в пространстве требуется три гироскопа с ортогонально ориентированными осями.

Следующим более простым типом гироскопов являются вибрационные гироскопы. Они основаны на эффекте Кореолиса, который обеспечивает сохранение колебаний в одной плоскости при повороте. Существуют много разных вариантов таких гироскопов. Наиболее простые, дешевые и миниатюрные из них — это гироскопы, выполненные на МЕМС технологиях — МЕМС гироскопы.

Другим типом гироскопов являются оптические гироскопы — волоконно-оптические и лазерные. В них чувствительное устройство представляет собой вращающийся плоский оптический контур, по которому в противоположных направлениях циркулируют два луча. Время прохождения контура лучом, сонаправленным с вращением контура, будет меньше, чем у противоположно направленного луча, т. к. последний должен проходить больший путь. Разность времени их прохождения этого конура пропорциональна углу поворота контура за это время и может использоваться мерой угла этого поворота.

В мобильных роботах основное применение получили МЕМС гироскопы. Однако и оптические гироскопы являются по ряду показателей очень даже конкурентно способными.

Акселерометры. Эти приборы служат для выявления ускорения. В робототехнике нашли применения трехкомпонентные акселерометры, определяющие параметр ускорения по трём осям.

Акселерометры используются вместе с гироскопами в инерциальных навигационных системах, рассмотренных далее, а так же в инклинометрах, определяющих углы наклона мобильных роботов относительно гравитационного поля Земли. В последнем случае акселерометры компенсируют погрешность показаний инклинометра от ускорения.

Рассмотренные системы нашли основное применение для обеспечения навигации мобильных роботов. В своей совокупности они получили название инерциальная измерительная система. Ее достоинство — автономность, основанная на пассивных способах получения навигационной сенсорной информации.

Инерциальная измерительная система только с гироскопами применяются в стабилизированных платформах на карданном подвесе для их управления. Такие платформы используются в том числе в роботах для проведения различных измерений и других операций, требующих такой базы.

Главным недостатком инерциальной измерительной системы является накапливающиеся со временем ошибки в определении координат, вызванные получением их путём интегрирования. Эти ошибки необходимо регулярно устранять. Главным способом этого служат спутниковые системы позиционирования. Для наземных роботов, очевидно, возможно использование для этого и карты местности.

Спутниковая система GPS базируется на 24 спутниках. Их орбиты выбраны так, чтобы из любой точки земной поверхности всегда можно быть в поле зрения не менее четырёх спутников. Это позволяет вычислять местоположение своего приёмника сигналов со спутников в этой точке как чисто геометрическую

задачу, получив от спутников их координаты, которые они непрерывно транслируют вместе с точным временем, и вычислив расстояние до них по времени прохождения сигналов. Для определения местоположения приёмника достаточно информации от трёх спутников. Расстояние от каждого дает сферу. Пересечение двух сфер образует окружность, на которой находится приемник. Точка пересечения с третьей сферой определяет точку нахождения приемника.

Магнитометры. Это приборы для определения параметров магнитного поля Земли. В робототехнике они применяются в навигации подобно компасу.

Основные типы магнитометров: магнитостатический (механический), индукционный (вибрационный, флюксометр, феррозондовый), на эффекте Холла и квантовый (протонный, гелиевый, атомный).

Магнитостатические магнитометры основаны на измерении механического момента, который действует на индикаторный магнит в магнитном поле. В индукционных магнитометрах измеряется ЭДС, возникающая в измерительной катушке, вращающейся или вибрирующей в магнитном поле. Феррозондовые магнитометры основаны на периодическом изменении магнитного сопротивления измерительной катушки путем перемещения пермаллоевого сердечника или изменения его магнитной проницаемости переменным полем возбуждения. Квантовые магнитометры основаны на квантовых эффектах в ядрах и электронах в магнитном поле (ядерный магнитный резонанс, электронный парамагнитный резонанс).

Одометры. Это самые простые устройства для определения положения транспортного средства путём измерения пройденного им пути. Классическим одометром является измеритель количества оборотов колеса, которые до настоящего времени используются в автомобилях. В робототехнике, для измерения пройденного пути применяют специальное колесо, помещенное сзади транспортного средства. Источниками погрешности этих систем являются проскальзывание колес, деформация грунта и самих колес. Эти погрешности могут корректироваться с помощью данных, получаемых от сенсорных систем, определяющих местоположение транспортного средства.

Для определения пройденного пути применяются и различные другие средства и способы, включая использование информации от дальномеров, локаторов и других сенсорных систем. Существуют, в частности, корреляционные системы, подобные измерителям для прокатных станков и т. п.

Аналогичного назначения системы применяются и в водной среде.

1.5 Система компьютерного зрения

В практике управления СРП возникает проблема быстрого сбора данных об окружающем её пространстве для корректного выполнения поставленной задачи. Для повышения скорости выполнения задания приходится увеличивать как скорость движения его механических частей, так и скорость сбора и обработки информации [12]. Вследствие этого любое механическое воздействие при физическом взаимодействии между роботом и препятствием или объектами манипулирования может стать разрушительным для системы.

Помимо этого, мобильный робот должен обладать возможностью получения информации обо всех окружающих его объектах как статичных, так и динамичных, что позволило бы ему обучаться, прокладывать наикратчайший курс для ускорения выполнения задачи.

Системы компьютерного зрения (Рисунок 11) включают в себя следующие основные компоненты:

- подсистему формирования изображений, которая сама, как правило, включает разные компоненты, например, оптическую систему, освещение и ПЗС- или КМОП-матрицу;
- вычислительный узел;
- алгоритмы анализа изображений, которые могут реализовываться программно на процессорах общего назначения, аппаратно в структуре вычислителя и даже аппаратно в рамках подсистемы формирования изображений.

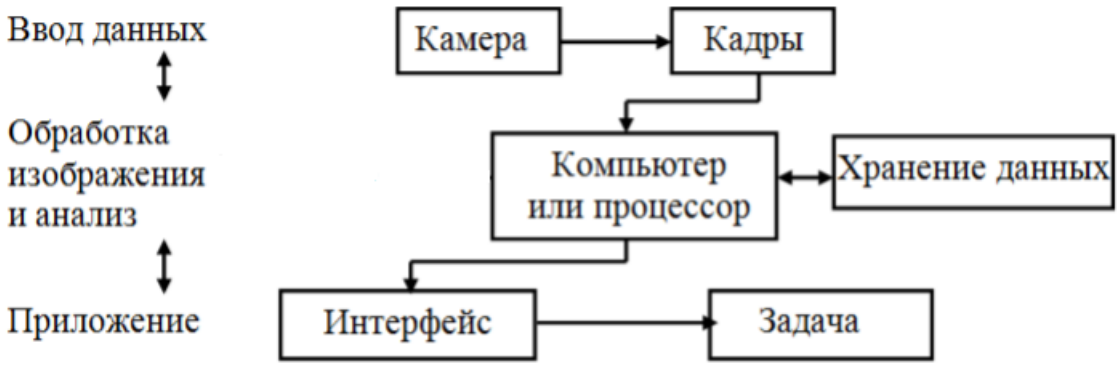

Рисунок 11 – Описание структуры системы компьютерного зрения

Системы компьютерного зрения зачастую тесно взаимодействуют с компьютерной графикой для построения динамической трёхмерной картины окружающего пространства в виде системы стилизованной виртуальной реальности, которая используется при планировании действий робота, отработки программ отдельных операций, а так же при управления ими.

Основные задачи, которые решают системы компьютерного зрения:

- получение общей зрительной картины окружающего пространства;
- выделение в этой картине отдельных объектов и их распознавание, включая кластеризацию (разбиение на классы по близости по некоторым важным признакам), классификацию (отнесение к определенным заданным классам), верификацию (обнаружение конкретного искомого объекта);
- определение характеристик тех из выявленных объектов, которые нужны для выполнения роботом конкретных заданий.

1.6 Алгоритмы одновременной локализации и построения карты (SLAM)

Одновременная локализация и картографирование (SLAM) — это метод, который при помощи входных данных с датчиков аппарата позволяет построить трёхмерную модель окружения. Изначально данный подход разрабатывался для решения задач навигации автономными мобильными роботами [13]. Тем не менее в настоящие время данные алгоритмы нашли своё применение не только в

робототехнике, но и в таких областях как управление наземным транспортом при помощи системы автопилота, построение трёхмерных моделей при помощи средств компьютерного зрения и в задачах реализации систем дополненной реальности. В самых первых SLAM алгоритмах получение информации об окружающей обстановке происходило при помощи комбинированного использования различных сенсоров. Сейчас же большой интерес у разработчиков вызывают построение систем с применением только видеокамер, хоть разработка такой конфигурации требует решения более сложных задач, но учитывая взрывной рост вычислительной производительности ЭВМ при уменьшении их габаритов, создание таких систем стало намного проще. Как ранее упоминалось методы visual SLAM (VSLAM) используются во многих областях деятельности человека [14]. В виду простоты состава оборудования, используемого в мобильных компьютерах и смартфонах, данные методы нашли применение в решении задачи оценки положения видеокамеры в системах дополненной реальности. Важным условием в таких системах является скорость реакции алгоритма при взаимодействии трёхмерных моделей с физическими объектами в реальном времени. Т.к. мобильные устройства на своём борту имеют относительно слабые процессоры, то были разработаны VSLAM методы и для такого типа устройств [15]. Хоть методы VSLAM и были разработаны для применения в различных задачах, у них всё же есть общие технические моменты. Поэтому в дальнейшем необходимо составить классификацию этих алгоритмов в данной работе.

Как и упоминалось ранее для синтеза SLAM систем получения визуальной информации только при помощи камер требуется решить намного больше задач, чем в случае с классическим SLAM системами на основе других датчиков из-за ограниченного обзора камер в сравнении с теми же лидарами, которые обладают круговым обзором. Чтобы исправить этот недостаток в моменте получения изображения с камеры нужно также фиксировать положение камеры, при этом совершая построение 3D модели окружающего пространства. В ранних методах VSLAM использовался так называемый «характеристический подход», который

заключается определении и отслеживании особых точек. Для локализации и картографирования без использования особых точек был разработан «прямой подход», суть которого заключается в обработке всего изображения методами, в которых не требуется обнаружение особых точек. С появлением в продаже дешёвых RGB-D-сенсоров, были разработаны алгоритмы для монокулярных камер глубины. В итоге, представленные в данной работе VSLAM алгоритмы, можно классифицировать по характеристическому, прямому и RGB-D подходу.

1.6.1 Основные функции VSLAM

Можно выделить три основные функции:

1) инициализация;
2) отслеживание;
3) картографирование.

Для начала инициализации VSLAM происходит определение глобальной системы координат и построение трёхмерной модели небольшой области окружения в этой системе координат. После процесса инициализации происходит непрерывное оценивание позиции камеры. Далее следует функция локализации, где происходит отслеживание положения камеры относительно построенной карты окружения. Чтобы это осуществить, алгоритм находит, с помощью функций соответствия или путём отслеживания особых признаков, двух и трёхмерные соответствия между полученными изображениями и построенной карты пространства. Далее путём решения задачи Perspective-n-Point определяется позиция камеры [16, 17]. Также стоит учесть, что большинство алгоритмов VSLAM предполагает наличие уже откалиброванных параметров камеры. Тем самым, при перемещении камеры в глобальной системе координат полученные параметры по-

зиции камеры эквивалентны внешним параметрами камеры. При процессе картографирования область трёхмерного окружения дополняется путём фиксирования изображений ещё неизученных областей.

1.6.2 Дополнительные функции VSLAM

Также необходимо отметить ещё две дополнительные функции алгоритма VSLAM:

1) релокализация;
2) оптимизация глобальной карты.

Функция релокализации активируется, когда происходит некоторое событие, приведшее к сильному резкому перемещению камеры, или имеются сильные помехи, вследствие чего происходит сбой вычислений собственного положения камеры. Следовательно, требуется вновь определить положение камеры относительно карты пространства. В случае отсутствия функции релокализации в VSLAM алгоритмах, при прерывании процесса отслеживания, вся система перестаёт работать, что делает подобные VSLAM алгоритмы непригодными для решения задач локализации и картографирования.

Для подавления накапливаемой ошибки суммарной оценки при длительном перемещении камеры применяется специализированная функция, которая называется глобальной оптимизацией. В этом процессе карта уточняется с учётом последовательности всей информации о карте. В моменте, когда карта окружения перестраивается и в объектив камеры попадает начальная область, происходит сравнение вновь полученных параметров и начальных, тем самым вычисляется накопленная ошибка. После для подавления ошибки происходит ограничение цикла благодаря полученным данным.

Метод замыкания петли используется для фиксирования дополнительных параметров. Данный метод основывается на том, чтобы найти уже замкнутую петлю при помощи сопоставления полученных изображений с текущими изоб-

ражениями. При обнаружении петли можно сделать вывод, что данное изображение соответствует ранее полученному изображению, благодаря чему можно определить накопленную ошибку. Следует отметить, что функции релокализации и обнаружения замкнутых петель используют одни и те же методы. Разница заключается лишь в том, что при релокализации происходит восстановление положения камеры, а при обнаружении замкнутых петель получают геометрическую последовательность карты окружения.

Для подавления накопленной ошибки зачастую использовалась оптимизация графа положения. Это достигалось с помощью оптимизации позиции камеры [18,19]. В данном методе связь между позициями камеры представлена в виде графика. А вот для устранения ошибки оптимизации используется последовательный граф. Метод Bundle Adjustment (BA) также часто применяется для подавления ошибки повторения изображений, оптимизируя взаимное положение камеры и карты пространства [20]. В условиях небольшого пространства выполнение Bundle Adjustment можно осуществлять без обнаружения замкнутых петель ввиду малой накопленной ошибки. Для больших пространств BA следует использовать для минимизации ошибки оценки.

1.6.3 Функциональные и прямые методы SLAM навигации

1.6.3.1 Функциональные методы

Существует два вида фундаментальных характеристических методов SLAM навигации. Это методы, в которых применяются разного рода фильтрации и методы с использованием Bundle Adjustment.

MonoSLAM. Самым первым визуальным монокулярным SLAM методом был алгоритм, разработанный ещё в 2002 году, под названием MonoSLAM [21,22]. Данный метод является типичным представителем VSLAM методов, работающих при помощи процесса фильтрации. Алгоритм MonoSLAM обладает шестью степенями свободы положения камеры (DOF), а координаты положения

особых точек в трёхмерном пространстве представлены в виде вектора состояний расширенного фильтра Калмана (EKF). Вычисление положения камеры основывается на полученных данных модели движения. В результате рассчитанного нового положения камеры добавляются новые особые точки. Также стоит отметить, что первоначальное построение карты окружения происходит, основываясь на уже известных видимых особых точках на текущем кадре. Подытожив, можно выделить следующие узлы данного алгоритма:

1) процесс инициализации происходит с заранее известными особыми точками на карте;
2) оценивание перемещения камеры и трёхмерных положений особых точек объекта выполняется при помощи расширенного фильтра Калмана.

Главным недостатком этого алгоритма является увеличение количества расчётов по мере расширения окружающего пространства, которое приводит к всё большему количеству вычислений новых особых точек. Из-за этого растёт размер вектора состояний, что не позволяет применять данный алгоритм в системах реального времени.

PTAM. Для решения основной проблемы метода MonoSLAM, следующий предложенный алгоритм под названием PTAM пошёл по пути разделения задач картографирования и отслеживание между двумя потоками CPU [23]. Т.к. выполнение этих двух потоков происходит параллельно, то вычислительная стоимость картографирования не оказывает значительного влияния на задачу отслеживания. Поэтому в процессе картографирования можно использовать Bundle Adjustment. А значит задача отслеживания может выполняться в режиме реального времени, пока происходит трёхмерное моделирование особых точек с большой вычислительной стоимостью. Алгоритм PTAM стал первым алгоритмов использующим Bundle Adjustment в режиме реального времени. В последствии подход многопоточности стал часто использоваться в других алгоритмах VSLAM. Построение начальной карты окружения в PTAM происходит при использовании алгоритма пяти точек [24]. Для уточнения положения камеры точки

карты окружения проецируются на изображение и из них строится облако предполагаемых видимых точек. В процессе сопоставления положение новых точек определяется при помощи триангуляции на конкретных кадрах, которые называются ключевыми точками. Важным событием в истории развития алгоритмов VSLAM благодаря опыту разработки PTAM является внедрение системы картографирования на основе ключевого кадра. Для определения ключевого кадра происходит сравнение входного кадра с другим ключевым кадром и если разница большая, то входной кадр принимается за ключевой. Чтобы выполнить триангуляцию необходима существенная разница между входным и ключевым кадрами. В PTAM оптимизация трёхмерного положения особых точек происходит при помощи применения глобального Bundle Adjustment с определёнными ключевыми кадрами, а также со всеми ключевыми кадрами на карте окружения. Также стоит отметить, что алгоритм PTAM для процесса отслеживания камеры использует метод релокализации [25]. В задаче же поиска наиболее подходящего ключевого кадра полученного изображения применяется рандомизированный древовидный классификатор поиска. В итоге в методе PTAM можно выделить следующие модули:

1) применение пятиточечного метода для задачи инициализации карты окружения;
2) оценка положения видеокамеры происходит при помощи совпадения особых точек карты окружения и полученного изображения;
3) с помощью триангуляции происходит оценка трёхмерных положений точек объекта, а уже оценённые положения оптимизируются при помощи Bundle Adjustment;
4) при использовании рандомизированного древовидного классификатора поиска происходит восстановление процесса отслеживания.

С лучшей стороны показал себя алгоритм PTAM в отличии с раннее рассмотренным алгоритмом MonoSLAM тем, что в методе PTAM задачи картографирования и отслеживания камеры решаются двумя параллельными потоками в CPU, а также алгоритм способен совершать обработку тысяч особых точек.

Методы оптимизации глобальной карты. Как упоминалось ранее при применении Bundle Adjustment для ключевых кадров, осуществляется поддержание геометрической последовательности всей карты пространства. Но и у этого метода имеется проблема локального минимума, которая возникла из-за немалого числа параметров. Чтобы решить эту проблему, в процессе замыкания петли применяют оптимизацию графа положения. Для начала нужно оптимизировать положения видеокамеры при работе алгоритма замыкания петли, воспользовавшись ограничением цикла. Далее происходит выполнение Bundle Adjustment для применения оптимизации положения камеры в пространстве и положений точек объекта на карте. Метод, базирующийся на визуальной информации, применяется для алгоритма замыкания петли [26]. Алгоритм основывающийся на «bag-of-word» для поиска изображений, применяют для обнаружения ключевого кадра, изображение которого совпадает с новым кадром [27].

В то время как во многих алгоритмах VSLAM в качестве камеры выбирают стереомодуль, получая известную и фиксированную шкалу системы координат, то в методах VSLAM с применением монокулярных камер, имеется неопределённость масштаба, да и во время перемещения камеры масштаб может меняться, если не работает глобальный Bundle Adjustment. Следовательно, происходит смещение масштаба, которое приводит к тому, что в каждом кадре масштаб системы координат может не совпадать. Чтобы справиться с этой проблемой, команда разработчиков из Strasdat Group предложили своё решение, суть которого заключается в оптимизации позиций камеры с 7 степенями свободы при помощи преобразования подобия [28].

Алгоритм ORB-SLAM являющийся продолжением расширенного метода PTAM имеет в своём составе алгоритм Bundle Adjustment, функцию обнаружения замкнутых петель и метод оптимизации графа положений с 7 степенями свободы. Значит можно сделать вывод, что наиболее функциональным и производительным алгоритмом VSLAM для монокулярных камер является алгоритм ORB-SLAM. Данный алгоритм также поддерживает стереокамеры и RGB-D камеры [29].

1.6.3.2 Прямые методы

В отличие от функциональных методов, прямые методы напрямую используют входное изображение без какой-либо абстракции с использованием рукописных функциональных детекторов и дескрипторов. В общем, фотометрическая последовательность используется как погрешность измерения в прямых методах, тогда как геометрическая последовательность, такая как положение особых точек на изображении, используется в характеристических методах. В этом разделе представлены некоторые ведущие прямые методы.

DTAM. Newcombe предложил полностью прямой метод, называемый DTAM [30]. В DTAM отслеживание выполняется путём сравнения входного изображения с синтетическими изображениями кадров, сгенерированными из восстановленной карты. Это просто эквивалентно регистрации между изображением и 3D-моделью карты и эффективно реализуется на графическом процессоре в DTAM. Картографирование выполняется с использованием многоосевого стерео, а затем карта оптимизируется с учетом непрерывности пространства, таким образом, чтобы можно было вычислить трехмерные координаты всех пикселей. Первоначальная карта глубины создается с использованием стереометрического измерения, такого как PTAM. Таким образом, DTAM состоит из следующих трёх компонентов:

1) инициализация карты производится стереометрическим измерением;
2) движение камеры оценивается с помощью синтетической генерации кадров с восстановленной карты;
3) информация о глубине оценивается для каждого пикселя с использованием многоосевого стерео, а затем оптимизируется с учетом непрерывности пространства.

LSD-SLAM. LSD-SLAM является другим ведущим методом среди прямых методов. Основная идея LSD-SLAM вытекает из идеи полуплотной VO [15]. В этом методе восстанавливаемые объекты ограничены областями с градиентом яркости по сравнению с DTAM, который восстанавливает полные области. Это

означает, что он игнорирует области без текстур, поскольку трудно оценить точную информацию о глубине по изображению. При сопоставлении, начальные значения глубины для каждого пикселя сначала устанавливаются как случайные значения, а затем эти значения оптимизируются на основе фотометрической последовательности. Поскольку этот метод не учитывает геометрическую последовательность всей карты, этот метод называют визуальной одометрией.

В 2014 году полуплотная VO была распространена в LSD-SLAM [31]. В LSD-SLAM обнаружение замыкания петли и оптимизаций графа положения с 7 степенями свободы, прибавляется к алгоритму полуплотной визуальной одометрии [15]. Таким образом, LSD-SLAM состоит из следующих четырёх компонентов:

1) случайные значения устанавливаются как начальные значения глубины для каждого пикселя;
2) движение камеры оценивается с помощью синтетической генерации изображений с восстановленной карты;
3) реконструированные области ограничены областями градиента высокой яркости;
4) для создания геометрически последовательной карты используется оптимизация геометрии 7 DOF.

В принципе, эти полуплотные подходы могут обеспечить обработку в реальном времени на процессоре. Кроме того, они оптимизировали алгоритм LSD-SLAM для мобильных телефонов, учитывая их архитектуру ЦП. LSD-SLAM распространяется на стереокамеры и однонаправленные камеры [32, 33].

1.6.4 Сравнение и анализ алгоритмов SLAM навигации

В ходе исследования были представлены последние алгоритмы VSLAM в ключевой период с 2010 по 2020 год. В основном, все алгоритмы VSLAM состоят

из инициализации, оценки движения камеры, оценки 3D структуры, глобальной оптимизации и релокализации. В последнее время «прямые методы» являются активным полем исследований в монокулярном VSLAM. RGB-D VSLAM был разработан также в последние годы, так как многие пользовательский RGB-D камеры сейчас можно приобрести по низкой цене. Несмотря на то, что алгоритмы vSLAM разрабатывались с 2003 года, vSLAM по-прежнему является активным полем исследований.

В таблице 3 приведено краткое сравнение представленных методов. Каждый алгоритм имеет разные характеристики. Необходимо выбирать соответствующий алгоритм, рассматривая цель его использования.

Таблица 3. Сравнение алгоритмов SLAM навигации

Метод	Тип метода	Плотность карты	Глобальная оптимизация	Замыкание петель
Mono-SLAM	Функциональный	Разреженная	Нет	Нет
PTAM	Функциональный	Разреженная	Есть	Нет
ORB-SLAM	Функциональный	Разреженная	Есть	Есть
DTAM	Прямой	Плотная	Нет	Нет
LSD-SLAM	Прямой	Полу-плотная	Есть	Есть
SVO	Полу-прямой	Разреженная	Нет	Нет
DSO	Прямой	Разреженная	Нет	Нет
KinectFusion	RGB-D	Плотная	Нет	Нет
Dense visual SLAM	RGB-D	Плотная	Есть	Есть
ElasticFusion	RGB-D	Плотная	Есть	Есть
SLAM++	RGB-D	Плотная	Есть	Есть

В этой работе были рассмотрены последние алгоритмы vSLAM, основанные только на использовании камеры. С другой стороны, алгоритмы SLAM, которые используют визуальные и инерциальные данные, называются визуально-инерциальными SLAM. Объединяя визуальные и инерциальные данные, мы можем получить более стабильные результаты оценки. Кроме того, возможно использование детальной информации о датчике для решения оценки масштаба и

компенсации искажения затвора. В настоящее время практически все смартфоны и планшетные устройства имеют камеры, GPS, гироскоп и акселерометр. Таким образом, считается, что сопряжение датчиков - одно из направлений для реализации надежных и практичных систем VSLAM.

1.7 Среда разработки СРП ROS

Robot Operating System (ROS) — это широко используемый в робототехнике фреймворк. Философия ROS заключается в создании программного обеспечения, которое позволяет вам работать с различными роботами, только внося небольшие изменения в код. Эта идея позволяет создавать функциональные возможности, которые могут быть просто перенесены для использования различными роботами.

ROS имеет стандартные функции операционной системы, такие как аппаратная абстракция, низкоуровневое управление устройствами, часто используемые функции, межпроцессная передача сообщений и управление библиотеками. Архитектура ROS не основана на графе с централизованной топологией. Обработка происходит в узлах, которые могут получать или отправлять данные от датчиков, систем контроля состояния и состояния накопителей. Библиотека ориентирована на Unix-подобные системы.

Пакет ros-pkg — это общий репозиторий для разработки высокоуровневых библиотек. Многие функции, часто связанные с ROS, такие как библиотеки навигации и визуализатор RViz, хранятся в этом хранилище. Эти библиотеки предоставляют мощный набор инструментов (различные визуализаторы, симуляторы, инструменты отладки) для упрощения работы.

ROS распространяется на условиях лицензии BSD и является программным обеспечением с открытым исходным кодом. ROS бесплатен для исследовательских и коммерческих целей.

ROS поддерживает параллельные вычисления, имеет хорошую интеграцию с популярными C++ библиотеками, такими как OpenCV, Qt, Point Cloud

Library и пр., и она может работать на одноплатных компьютерах, таких как Raspberry Pi, а также с микроконтроллерными платформами, например, Arduino [34].

Архитектура ROS. В архитектуре ROS можно выделить три концептуальных уровня:

1) уровень файловой системы;
2) уровень вычислительного графа;
3) уровень сообщества.

Первый уровень — это уровень файловой системы. На этом уровне расположена внутренняя структура ROS — структура папок, файлы, необходимые для работы.

Второй уровень — это уровень вычислительного графа, на котором происходит взаимодействие между процессами и системами. На этом уровне находятся концепции и модули, которые имеются в ROS для создания систем, обработки всех процессов, коммуникации с более чем одним компьютером и так далее.

Третий уровень — это уровень сообщества. Этот уровень содержит инструменты и концепции для обмена знаниями, алгоритмы и код от любого разработчика.

Файловая система ROS. Первым уровнем в архитектуре ROS является уровень файловой системы.

Рисунок 11 – Файловая система ROS

Как и в случае обычной операционной системы, программы в ROS разделены на папки, в которых содержатся некоторые файлы, описывающие её функциональность:

1) пакеты: реализуют базовый уровень ROS. Пакет имеет минимальную структуру и содержимое, чтобы создать программу в ROS. Он может иметь выполняемые процессы (узлы или node), файлы конфигурации и т.д.;
2) декларации: содержится информация о пакетах, лицензионная информация, зависимости, флаги компиляции и прочее. Управление декларациями осуществляется через файл manifests.xml;
3) стеки: при объединении вместе нескольких пакетов для, получения некоторой функциональности, формируется так называемый стек. В ROS, реализована возможность создания и множественной конфигурации таких стеков для различных целей, например, стек навигации;
4) декларации стеков: предоставляют данные о стеке, включая его структурную информацию и его зависимости от других стеков;
5) типы сообщений: сообщение является информацией, которую процесс отправляет другим процессам. В ROS имеется множество стандартных типов сообщений.
6) типы сервисов (Service types, src): служат для определения в ROS структуры данных запросов и ответов для сервисов.

Уровень вычислительного графа. ROS создает сеть, в которой соединены все процессы. Любой узел в системе может получить доступ к этой сети, взаимодействовать с другими узлами, смотреть информацию, которую они посылают, и передавать данные в сеть.

Рисунок 12 – Уровень вычислительного графа RO

Базовыми понятиями на этом уровне являются: узлы, мастер, сервер параметров, сообщения, сервисы, темы и бэги. Все они различными способами обеспечивают граф данными [34]:

1) узлы: это вычислительные процессы. Если вам нужен процесс, который может взаимодействовать с другими узлами, вам необходимо создать узел с этим процессом, подключив его к сети ROS. Обычно система имеет много узлов для управления различными функциями. Узлы записываются в клиентскую библиотеку ROS;
2) мастер: обеспечивает регистрацию имени и поиск оставшихся узлов. Если его нет в системе, вы не сможете обмениваться информацией с узлами, сервисами, сообщениями и другими потоками. Мастер может находиться на компьютере, где узлы работают с другими компьютерами;
3) сервер параметров: позволяет сохранять данные, используя ключи, хранящиеся централизованно. С помощью этого параметра можно настроить узлы во время их работы или изменить рабочий узел;
4) сообщения: узлы взаимодействуют друг с другом посредством сообщений. Сообщение содержит данные, передающие информацию другим узлам. ROS имеет много типов сообщений. Можно создать свой собственный тип сообщения, используя набор стандартных сообщений;
5) темы: каждое сообщение должно иметь имя для отправки в сеть ROS. Когда узел является отправителем данных, это означает, что узел опубликовал тему. Узлы могут получать темы с других узлов, просто подписавшись на тему. Узел может подписаться на тему, и необязательно,

чтобы узел, который будет публиковать тему, существовал в данный момент. Важно, чтобы название темы было уникальным, чтобы избежать проблем с передачей данных между темами с одинаковыми именами;

6) сервисы: сервисы предоставляют возможность взаимодействия с узлами. Сервисы также должны иметь уникальное имя. Когда у некоторого узла есть сервис, все узлы могут связываться с ней благодаря клиентским библиотекам ROS;
7) бэги: формат для хранения и воспроизведения данных сообщения ROS. Пакеты являются важным механизмом хранения данных, таких как данные датчиков, которые сложно собрать, но они необходимы для разработки и тестирования алгоритмов. Бэги часто используются при работе со сложными роботами.

2 Конструкторская часть

2.1 Описание модели устройства управления двигательной установки робота

Согласно поставленной цели данной работы необходимо разработать и создать мобильную роботизированную платформу для исследования и разработки системы автопилота для наземного транспорта.

Беспилотный автомобиль – это транспортное средство, оборудованное системой автоматического управления, которое может передвигаться без участия человека. Созданием беспилотных транспортных систем занимаются практически все ведущие автопроизводители мира ещё с 80-х годов. Проанализировав опыт многих компаний, можно выявить некую классическую схему автопилота, которой придерживаются в той или иной степени большинство автопроизводителей.

На рисунке 13 изображена классическая структура устройств автопилота для автотранспорта. Такая компоновка входных устройств является универсальной системой для решения задач компьютерного зрения и самонавигации. Однако и такая система имеет характерные проблемы для такого рода устройств, а также цена может с лёгкостью превышать 5000$.

Рисунок 13 – Классическая структура устройств автопилота для автотранспорта

На самом деле для организации компьютерного зрения требуется только видеокамера, компьютер и специализированное ПО. Конечно, на основе такой системы полноценного автопилота для автотранспорта не создать. Проблемы характерные для классической схемы автопилота такие как достаточно высокая погрешность измерений, вероятность ошибки при обработке данных, низкая плотность облака точек при построении карты окружения и т.д., также остро стоят и перед более простой системой автоматического управления, не говоря уже о том, что обыкновенный одноплатный компьютер не способен обработать такое большое количество данных моментально.

Рисунок 14 – Минимальный состав устройств для реализации компьютерного зрения

Но, если существенно сузить область обработки каждого кадра отдельным микрокомпьютером, то его производительности хватит, чтобы увеличить плотность точек для трёхмерного моделирования окружения и решения ряда других проблем, при этом временные задержки обработки данных будут в приемлемом диапазоне. А для того, чтобы компенсировать уменьшенный угол обзора камеры можно добавить в состав системы ещё несколько таких же одноплатных компьютеров с камерами объединив их в один кластер. Организовать же обмен обработанных данных можно через фреймворк ROS.

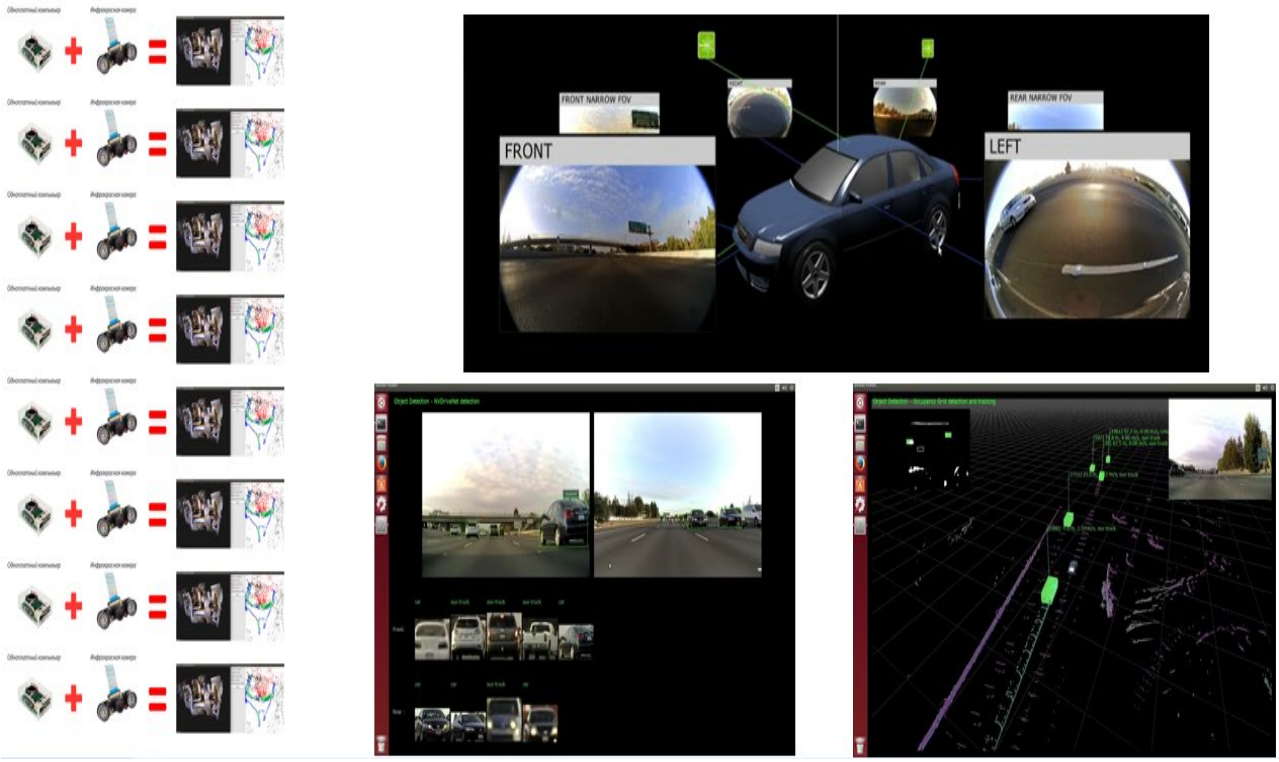

Рисунок 15 – Система автопилота с применением кластера одноплатных компьютеров

Очевидными преимуществами такого подхода создания системы автопилота является: высокая отказоустойчивость, т.к. выход одного или двух элементов системы из строя не приведёт к отказу всей системы автопилота; небольшие габаритные размеры элементов и самое главное низкая цена всей системы. Так система, состоящая из 8-ми элементов кластера, обойдётся около 800$, против 5500$ за классическую схему автопилота.

Таблица 4. Сравнение классической системы автопилота и системы автопилота с кластером одноплатных компьютеров

	Классическая система автопилота	**Система автопилота с кластером одноплатных компьютеров**
Возможность функционирования автопилота при отказе работы одного из устройств	нет	Да, допустим отказ 2 элементов
Уровень детализации построения 3D окружения	Высокий	Хороший
Небольшие габаритные размеры	нет	да
Цена	5500$	800$

В настоящее время самым передовым автопилотом в мире является система американского автопроизводителя Tesla. И она работает по схожему принципу с ранее предложенной системой. Отличие лишь в том, что обработку полученных данных с видеокамер осуществляет не кластер одноплатных компьютеров, а один мощный высокопроизводительный компьютер. Тем не менее цена системы автопилота Tesla 5000$.

Для того, чтобы была возможность проведения дальнейших исследований и разработки системы автопилотирования транспортных средств с использованием кластера одноплатных компьютеров. Была собрана мобильная роботизированная платформа, в которой задачу компьютерного зрения и навигации решает 1 из 8 элементов кластера ранее предложенной системы автопилота.

В качестве шасси была выбрана 4-х колесная платформа для построения мобильных автономных роботов. Каждое колесо приводится в движение при помощи отдельного двигателя с редуктором. Шасси состоит из двух акриловых пластин, соединенных между собой, придавая конструкции необходимую жесткость.

Рисунок 16 – Колёсная платформа шасси для построения мобильных автономных роботов с 4-мя мотор-редукторами

Для управления логикой работы электроприводов робота была выбрана отладочная плата ARDUINO UNO R3 на базе микроконтроллера ATmega328 с напряжением логики 5В. Модуль содержит встроенный стабилизатор напряжения и программатор. Свою популярность Arduino приобрела благодаря простоте и низкому порогу вхождения. Достаточно пары часов, чтобы освоить основы работы с Arduino, что отлично подходит для использования данной платформы в учебном процессе. Плата обладает низкой стоимостью.

Рисунок 17 – Отладочная плата ARDUINO UNO R3 на базе микроконтроллера ATmega328

Ещё одной отличительной особенностью Arduino является наличие плат расширения. Это дополнительные платы, которые ставятся подобно слоям бутерброда поверх Arduino, чтобы дать ей новые возможности. Для управления моторами была выбрана плата расширения, основанная на двух микросхемах L293D и сдвиговом регистре 74HC595. К плате возможно подключить 4 мотора постоянного тока с реверсивным вращением, либо 2 шаговых двигателя, либо 2 мотора постоянного тока и 1 шаговый двигатель. Также плата позволяет работать с двумя сервоприводами.

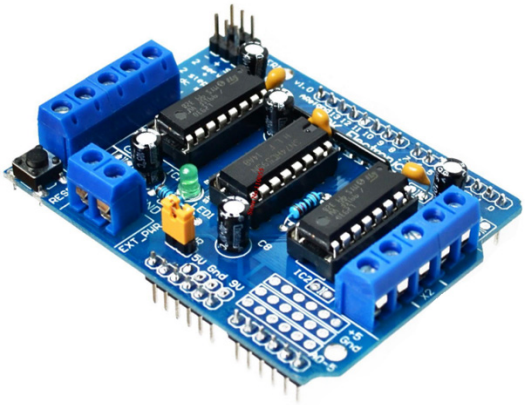

Рисунок 17 – Плата расширения L293D для управления электроприводами

В качестве дополнительного средства измерения расстояния до препятствия был выбран ультразвуковой датчик HC-SR04. Датчик позволяет измерять дистанцию до предметов используя эффект отражения ультразвуковых волн от

препятствий. Дальность измерения до 4 метров. По окончании измерения на выходе датчика появляется импульс, длительность которого кратна измеренному расстоянию.

Рисунок 18 – Ультразвуковой датчик HC-SR04

В виду того, что ультразвуковой датчик имеет небольшой угол измерения расстояния, было принято решение воспользоваться принципом работы радара, т.е. увеличить рабочий диапазон сонара путем вращения самого датчика с помощью сервопривода. Был выбран аналоговый сервопривод SG90 с крутящим моментом 1.8 кг*см при напряжении 4.8В и диапазоном вращения 180°.

Рисунок 19 – Аналоговый сервопривод SG90

Для реализации задач, связанных с компьютерным зрением в мобильных роботах, требуется вычисление больших объёмов данных за максимально короткий промежуток времени. А так как микроконтроллеры не способны осуществить такие вычисления, то было принято решение воспользоваться одноплатным компьютером Raspberry Pi 3 model B+ имеющим достаточную производительность для такого рода задач. Данный микрокомпьютер представляет собой

функциональную малогабаритную сборку, оптимальную для построения мобильных роботов, автоматизированных систем, сверхкомпактных настольных системных блоков и т.д. Изделие представляет собой материнскую плату, оборудованную процессором Broadcom 4x1400 МГц и 1 ГБ оперативной памяти. Микрокомпьютер снабжён контроллерами Wi-Fi, Bluetooth 4.2 и сетевым адаптером для присоединения Ethernet-кабеля.

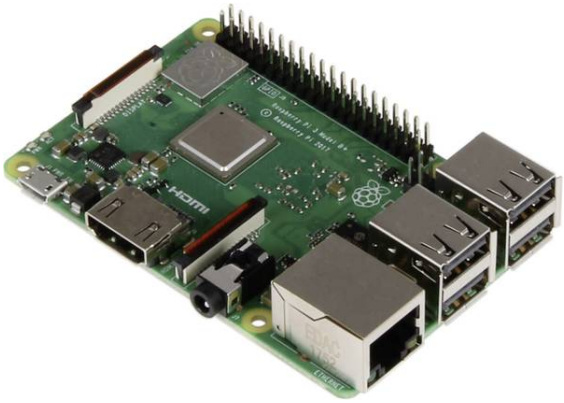

Рисунок 20 – Одноплатный компьютер Raspberry Pi 3 model B+

В решении задач компьютерного зрения важным моментом является ответственный выбор модуля камеры. Изначально для построения облака точек в трёхмерном пространстве требуется применение специальных стереокамер, но так как они очень дорогие и их стоимость может легко превышать стоимость всего робота без камеры, то было решено выбрать методы осуществления компьютерного зрения использующие только одну камеру. Хоть такие методы и обладают меньшей точностью и быстродействием в сравнении со стереорешениями, но для использования в учебном процессе это оправдано. В качестве монокулярной камеры был выбран компактный модуль камеры с ночным видением RPi Camera (F) WaveShare с инфракрасной подсветкой. Камера оснащена пятимегапиксельным сенсором OV5647 с изменяемым фокусным расстоянием. Она позволяет захватывать, записывать и транслировать видео в форматах 1080p и 30fps, 720p и 60fps, VGA и 90fps.

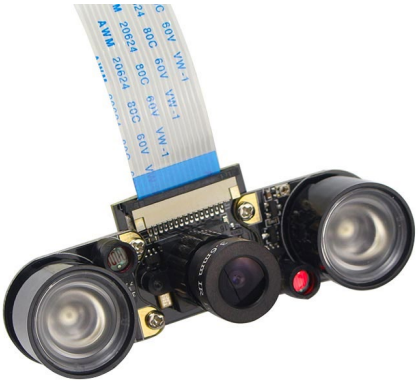

Рисунок 21 – Модуль камеры с ночным видением RPi Camera (F) WaveShare с инфракрасной подсветкой

Для питания всех систем мобильного робота был приобретён литий-полимерный аккумулятор большого объёма на 5200mAh и рабочим напряжением в 7.4В.

Рисунок 21 – Литий-полимерный аккумулятор

Модель автономной мобильной роботизированной платформы на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 3b+ с системой компьютерного зрения в сборе представлена на рисунке 22.

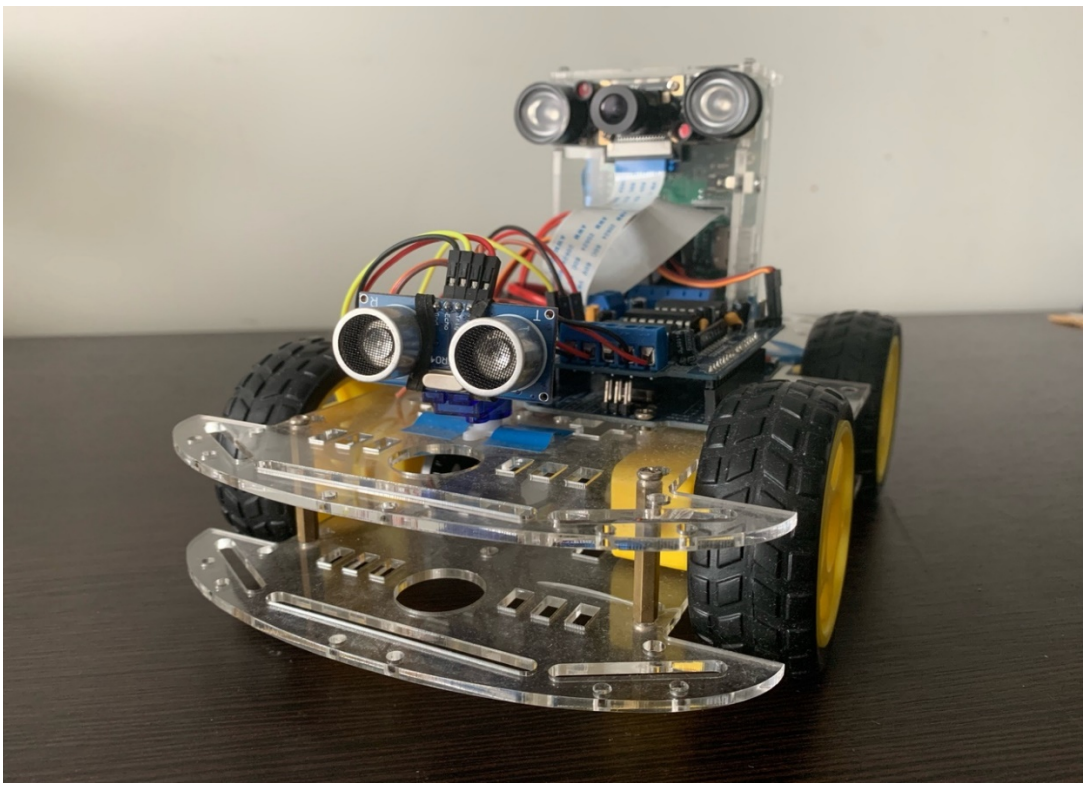

Рисунок 22 – Модель мобильной роботизированной платформы на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 3b+ с системой компьютерного зрения

В качестве операционной системы Raspberry Pi была выбрана Ubuntu MATE 18.04.2. По умолчанию Raspberry Pi поставляется с операционной системой Raspbian, эта система была разработана специально для этого устройства и содержит всё необходимое для работы с ним, но она не поддерживает необходимые библиотеки и программы для реализации данного проекта в отличии от Ubuntu MATE.

За обмен данными между устройствами робота отвечает фреймворк ROS, а для осуществления SLAM навигации и обработки полученных изображений с монокамеры был выбран самый быстрый, стабильный и производительный алгоритм на данный момент времени под названием ORB SLAM.

3 Экспериментальная часть

В этой части приведены результаты работы монокулярных систем SLAM на базе фреймворка ROS.

Все системы были протестированы на данных с монокулярной камеры RPi Camera (F) WaveShare с частотой кадров около 15 кадров в секунду. Обработка систем SLAM обеспечивалась одноплатным компьютером Raspberry Pi 3b+.

Параллельное отслеживание и картирование (PTAM). PTAM является алгоритмом SLAM, который базируется на ключевых кадрах, позволяющих оценивать 3D позицию робота и строить трёхмерную карту пространства при помощи отслеживая функции FAST. Система получает данные с датчика msgs / Image и публикует tf преобразование и геометрию msgs / PoseWithCovarianceStamped. Алгоритм не поддерживает встроенных средств для вывода карты окружения в ROS, для этого нужно пользовать отдельным инструментом. При проведении манёвра поворота мобильным роботом, алгоритм потерял отслеживание, что привело к сбою работы. Поэтому алгоритм считаю ненадёжным.

Крупномасштабный прямой монокулярный SLAM (LSD SLAM). LSD SLAM — это прямой метод, который использует локальное изображение для подгонки изображения, обеспечивая прогнозирование позиции и построение плотной карты. Для компенсации ошибки дрейфа в алгоритме LSD SLAM есть функция замыкания контура. С фреймворком ROS алгоритм плохо интегрирован, он подписывается на сенсор msgs / Image и публикует трансформации. После большой корректировки траектория мобильного робота была восстановлена и сравнена с траекторией ORBSLAM.

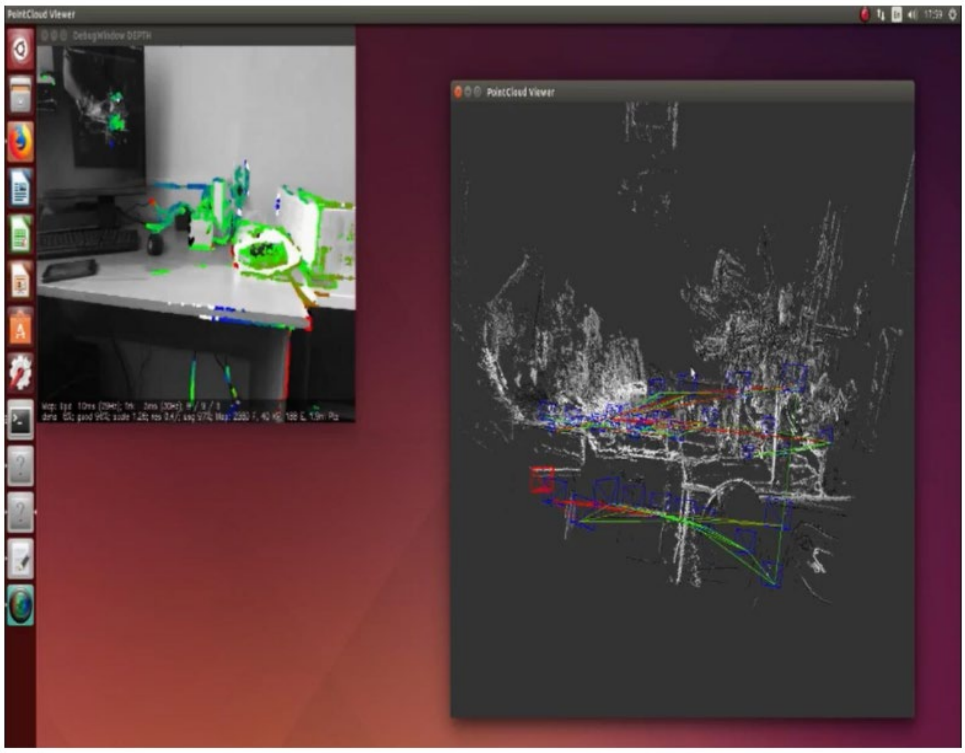

Рисунок 23 – Реализация работы алгоритма LSD SLAM

Т.к. карта окружения обладает недостаточной плотностью для точной локализации, то у алгоритма возникает проблема при вычислении положения робота. С помощью уточнения модели движения робота это смещение возможно отфильтровать. В результате после абсолютного восстановления масштаба алгоритм показал себя надёжным и его можно применять для построения карты окружения и оценки позы робота.

ORB SLAM. ORB SLAM — это алгоритм оценивания положения робота с помощью ORB точек. Для построения карты пространства создаётся разреженное облако точек. У алгоритма имеется очень полезная функция обнаружения замыкания петель, которая необходима для навигации мобильных роботов в помещении. На рисунке 24 представлен процесс детектирования особых точек и карта с оценкой положения. Для встраивания алгоритма в фреймворк ROS потребовалась дополнительная доработка алгоритма. Только после осуществления обработки набора данных траектория движения камеры может быть оценена. Карта пространства получается неплохим приближением к тестовой среде. Только во время получения ключевых кадров есть сведения об оценке позы камеры, а вот о местоположении камеры данные приходят реже. Алгоритм ORB

SLAM показал себя крайне надёжным, и он способен обеспечить неплохое приближение траектории робота при условии решении задачи восстановления в абсолютном масштабе.

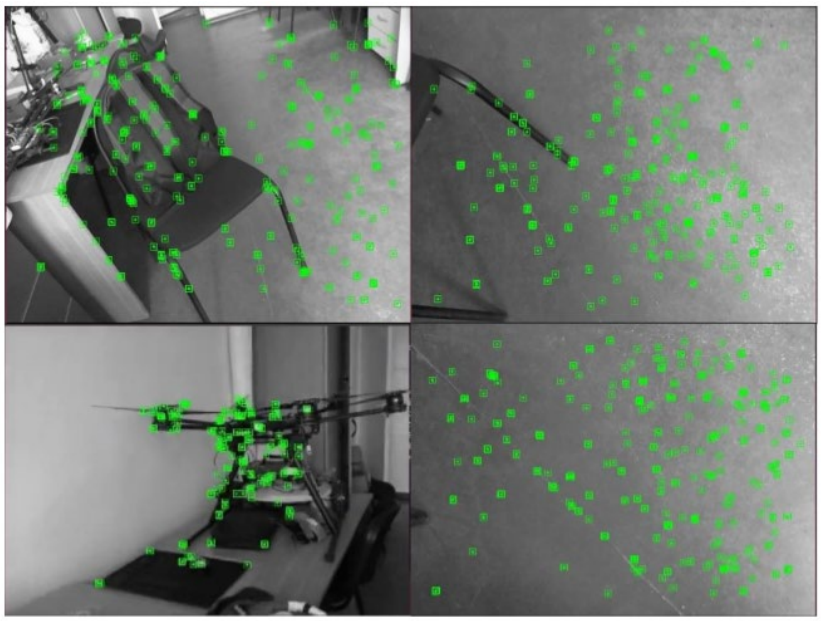

Рисунок 24 – Реализация работы алгоритма ORB SLAM

Прямая разреженная одометрия (DSO). DSO представляет собой полностью прямой метод. Для применения в ROS алгоритм имеет встроенную оболочку, а также необходима дополнительная разработка для применения в реальной реализации робототехники. Главное преимущество этого алгоритма — это плотная карта окружения. Положение мобильного робота публикуется как трансформация. Во время первого круга накапливался дрейф положения робота, а когда робот шёл на второй круг, создавались двойные объекты среды на карте, это происходило из-за отсутствия функции обнаружения замыкания петли. Из-за отсутствия функции обнаружения замыкания петли на карту добавляется большой уровень шумов, но при этом создаётся плотная карта пространства и DSO показал себя надёжным алгоритмов в задаче отслеживания положений. Для получения более точных результатов алгоритм нужно доработать добавлением функции обнаружения замыкания петли.

Полупрямая визуальная одометрия (SVO). С ROS SVO хорошо интегрирован. Принимая данные типа msgs/Image, SVO публикует облако точек, получаемое с датчика типа msgs/PointCloud для карты, геометрию msgs /

PoseWithCovarianceStamped положения робота и tf для координатных преобразований. Для получения дополнительной информации при прямых отрезках перемещения мобильного робота алгоритм можно использовать, но из-за того, что при поворотах робот теряет отслеживание, алгоритм не является надёжным для такого типа задач.

Плотное кусочно-параллельное отслеживание и картографирование (DPPTAM). DPPTAM представляет собой полностью прямой метод, применяющийся для оценки положения СРП. В основе этого алгоритма лежит предположение, что области пространства с одинаковым цветом относятся приблизительно к одно плоскости. Но в ходе испытания на повороте алгоритм потерял отслеживание мобильного робота, поэтому считаю систему ненадёжной в при использовании в помещении.

В ходе выполнения данной работы была разработана и собрана модель самодвижущейся роботизированной платформы для проведения ряда экспериментов. СРП была приведена в движение в помещении по замкнутой траектории, получая данные от видеокамеры и датчика для последующей обработки информации. Полученные входные данные были обработаны с использованием следующих алгоритмов SLAM:

1) крупномасштабный прямой монокуляр SLAM (LSD SLAM);
2) ORB SLAM;
3) прямая разреженная одометрия (DSO);

Основные результаты экспериментов:

1) параллельное отслеживание и картографирование (PTAM), полупрямая визуальная одометрия (SVO), плотное кусочно-параллельное отслеживание и картирование (DPPTAM) не прошли испытания из-за того, что во всех тестах СРП теряла своё текущее местоположение по причине отсутствия большого числа особых точек;

2) крупномасштабный прямой монокулярный SLAM (LSD SLAM), ORB SLAM, прямая разреженная одометрия (DSO) с дополнительным модулем восстановления масштаба вполне могут применяться для решения задачи локализации;
3) решить задачу неоднозначности шкалы масштаба без дополнительных данных о окружающей среде для её дальнейшего восстановления не смог ни один однокамерный SLAM алгоритм;
4) система Visual SLAM: карта RTAB показала самые хорошие результаты для решения задачи локализации в проведённых тестах с RMSE ATE на 0.162 м, но также была обнаружена проблема с прокладыванием пути вблизи монотонных стен.

Таблица 5. Абсолютная ошибка траектории для различных систем

Метод	RMSE (m)	Max (m)	Min (m)
ORB-SLAM	0.168	0.248	0.054
LSD-SLAM	0.307	0.563	0.09
DSO	0.452	0.777	0.007

Алгоритм ORB SLAM с RMSE ATE 0.168 м. оказался самым оптимальным и надёжным среди остальных алгоритмов. Также стоит отметить, что большое влияние на производительность визуальных алгоритмов SLAM оказывает наличие больших вычислительных мощностей на борту мобильного робота.

Заключение

В результате написания магистерской диссертации были изучены различные алгоритмы SLAM навигации, основы проектирования и разработки систем автоматического управления мобильных роботов. Изучены на практике основные функции и инструменты фреймворка ROS.

Были выполнены следующие задачи:

1. Составлен обзор литературы на тему основных ключевых устройств и систем самодвижущейся роботизированной платформы.
2. Проведено исследование существующих систем автопилотирования наземного транспорта.
3. Собран макет мобильного робота с системой компьютерного зрения.
4. Разработана программа управления электроприводами робота.
5. Проведено тестирование работы мобильного робота в реальных условиях.

Список литературы

1. Kristensen S, Horstmann S., Klandt J.,Lohner F., and Stopp A. Human-friendly interaction for learning and cooperation // Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 2001. IEEE. – P. 2590-2595. Структурные схемы измерительных устройств систем контроля и управления / Д.А. Аржаев, О.Н. Бодин, В.Г. Полосин, Д.И. Нефедьев, А.Г. Убиенных // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1. – С. 24–30.
2. Иванов, А.В. Мини- и микроробототехника: Учеб. пособие [Текст] / А.В. Иванов, Е.И. Юревич. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. –2011. –96 с.
3. Космачёв, П.В. Анализ конструктивных схем движителей транспортных средств робототехнических комплексов для выполнения антитеррористических операций [Текст] / П.В. Космачёв // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды IX Всерос. науч.-практич. конф. –СПб.: НПО Специальных материалов, 2006. –Т. 5: Экстремальная робототехника. –С. 607–615.
4. Шинов, С.Н. Использование манипулятора мобильной робототехнической системы для преодоления препятствий [Текст] / С.Н. Шинов // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды X Всерос. науч.-практич. конф. – СПб.: НПО Специальных материалов, 2007. –Т. 5: Экстремальная робототехника. –С. 194–201.
5. Персиянов В.А., Шапошникова Д.Т. Приводы мобильных роботов / В.А. Персиянов, Д.Т. Шапошникова // Научное сообщество студентов XXI столетия. Естественные науки: сб. ст. по мат. LXV междунар. студ. науч.-практ. конф. – 2019. – № 6 (64).
6. Иванов А.А. Основы робототехники: учебное пособие / А.А. Иванов. – М.: ФОРУМ, 2012. – 224 с.
7. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: учебное пособие / И.А. Данилов, П.М. Иванов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1989. – 752 с.

8. Гульков Г.И., Пеиренко Ю.Н., Раткевич Е.П., Симоненкова О.Л. Системы автоматизированного управления электроприводами: учебное пособие / Г.И. Гульков, Ю.Н. Петренко, Е.П. Раткевич, О.Л. Симоненкова. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск: Новое знание, 2007. – 394 с.

9. Солопченко Г.Н. Измерительные информационные системы. СПб.: изд. Политехнического университета, 2010.

10. Юревич Е. И. Сенсорные системы в робототехнике : учеб. пособие / Е. И. Юревич. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 100 с.

11. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем. М.: изд. МГТУ им Н.Э. Баумана, 2005.

12. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие. / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых и др. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002.

13. Chatila R, Laumond JP (1985) Position referencing and consistent world modeling for mobile robots. In: Proceedings of International Conference on Robotics and Automation Vol. 2. pp 138–145.

14. Billinghurst M, Clark A, Lee G (2015) A survey of augmented reality. Found Trends Human-Computer Interact 8(2-3):73–272.

15. Engel J, Sturm J, Cremers D (2012) Camera-based navigation of a lowcost quadrocopter. In: Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems. pp 2815–2821.

16. Klette R, Koschan A, Schluns K (1998) Computer vision: threedimensional data from images. 1st edn.

17. Nister D (2004) A minimal solution to the generalised 3-point pose problem. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Vol. 1. pp 560–5671.

18. Grisetti G, Kümmerle R, Stachniss C, Burgard W (2010) A tutorial on graph-based slam. Intell Transp Syst Mag IEEE 2(4):31–43.

19. Kümmerle R, Grisetti G, Strasdat H, Konolige K, Burgard W (2011) g2o: A general framework for graph optimization. In: Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. pp 3607–3613.

20. Bundle adjustment a modern synthesis. In: Triggs B, McLauchlan PF, Hartley RI, Fitzgibbon AW (eds) (2000) Vision algorithms: theory and practice. pp 298–372.

21. Davison AJ (2003) Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera. In: Proceedings of International Conference on Computer Vision. pp 1403–1410.

22. Davison AJ, Reid ID, Molton ND, Stasse O (2007) Monoslam: real-time single camera SLAM. Pattern Anal Mach Intell IEEE Trans 29(6):1052–1067.

23. Klein G, Murray DW (2007) Parallel tracking and mapping for small AR workspaces. In: Proceedngs of International Symposium on Mixed and Augmented Reality. pp 225–234.

24. Nistér D (2004) An efficient solution to the five-point relative pose problem. Pattern Anal Mach Intell IEEE Trans 26(6):756–770.

25. Williams B, Klein G, Reid I (2007) Real-time SLAM relocalisation. In: Proceedings of International Conference on Computer Vision. pp 1–8.

26. Mei C, Sibley G, Cummins M, Newman P, Reid I (2009) A constanttime efficient stereo slam system. In: Proceedings of British Machine Vision Conference. pp 54–15411.

27. Cummins M, Newman P (2008) FAB-MAP: probabilistic localization and mapping in the space of appearance. Int J Robot Res 27(6):647–665.

28. Strasdat H, Montiel J, Davison AJ (2010) Scale drift-aware large scale monocular slam. In: Proceedings of Robotics: Science and Systems. p 5.

29. Mur-Artal R, Tardós JD (2016) ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo and RGB-D cameras. CoRR. abs/1610.06475.

30. Newcombe RA, Lovegrove SJ, Davison AJ (2011) DTAM: dense tracking and mapping in real-time. In: Proceedings of International Conference on Computer Vision. pp 2320–2327.

31. Engel J, Schöps T, Cremers D (2014) LSD-SLAM: large-scale direct monocular SLAM. In: Proceedings of European Conference on Computer Vision. pp 834–849.

32. Caruso D, Engel J, Cremers D (2015) Large-scale direct SLAM for omnidirectional cameras. In: Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems.

33. Engel J, Stueckler J, Cremers D (2015) Large-scale direct SLAM with stereo cameras. In: Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems.

34. Robot Operating System (ROS): documentation, support, tutorials. URL: http://wiki.ros.org/.

35. Stefano Mintchev, Raffaele Ranzani, Filippo Fabiani, Cesare Stefanini. Towards docking for small scale underwater robots // 2014 Published by The BioRobotics Institute, Auton Robot. – 2014. – DOI 10.1007/s10514-014-9410-3– С. 283–299.

36. Lorenzo Migliorinia, Tommaso Santanielloa, Yunsong Yana, Cristina Lenardia, Paolo Milani 0925-4005/© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved. – 2016. – 0925-4005– С. 758-766.

37. A. A. Transeth and K. Y. Pettersen, “Developments in snake robot modeling and locomotion,” in Proc. 9th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, Dec. 5–8, 2006, pp. 1–8.

38. A. A. Transeth and K. Y. Pettersen, “Developments in snake robot modeling and locomotion,” in Proc. 9th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, Dec. 5–8, 2006, pp. 1–8.

39. Casbeer D.W. [et al.]. Forest fire monitoring with multiple small UAVs // Proceedings of the 2005 American Control Conference. – 2005. – P. 3530-3535.

40. Ушаков Д.М. Введение в математические основы САПР: курс лекций. М.: ДМК Пресс, 2011. 208 с.

41. Лукинов А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств. Серия: Учебники для вузов. Специальная литература. М.: Издательство «Лань», 2012. 607с.

42. Берлинер Э.М., Таратынов О.В. САПР в машиностроении. М.: ФОРУМ, 2012. 448 с.

43. Маркофф, Д. Homo Roboticus? Люди и машины в поисках взаимопонимания [Текст] : пер. с англ. / Д. Маркофф. - М. : Альпина нон-фикшн, 2017. - 404 с.

44. Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины [Текст]: сб. науч. ст. по материалам XII Междунар. науч.-техн. конф. "Вибрация - 2016": в 2 ч. / отв. ред. С. Ф. Яцун. - Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2016 - .Ч. 1. - 2016. - 342 с.

45. Московский гос. технический ун-т им. Н. Э. Баумана. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия приборостроение [Текст]: науч.-теорет. и приклад. журн. широкого профиля: спец. вып. / Московский гос. технический ун-т им. Н. Э. Баумана. - М.: [б. и.], 20 -. № 6(2012) : Робототехнические системы. 30 лет Научно-учебному центру "Робототехника". - 2012. - 159 с.