

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта
Высшая школа автоматизации и робототехники

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Исследование методов построения цифровых моделей объектов при
выполнении операций мониторинга с использованием робо-животных.**

Выполнил
студент гр.3331506/80401 <подпись> А. В. Пестов

Руководитель
старший преподаватель <подпись> А. С. Габриель

Научный консультант
Заместитель руководителя НИЦ <подпись> Е. Ю. Смирнова

« ____ » _____ 202__ г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Аналитический обзор проектов робо-животных	7
1.1 Виды робо-животных	7
1.2 Boston Dynamics BigDog	8
1.3 MIT Cheetah 3	9
1.4 MIT Mini Cheetah	10
1.5 Выводы по разделу	10
2 Аналитический обзор датчиков, используемых для получения значений расстояний в алгоритмах SLAM	12
2.1 Ультразвуковые дальномеры	12
2.2 Инфракрасные дальномеры	13
2.3 Лидары	13
2.4 Радары	14
2.5 Стереокамеры	15
2.6 RGB-D-камеры	15
2.6.1 Камеры структурного света	16
2.6.2 ToF-камеры	16
2.6.3 Активное стерео	17
2.7 Выводы по разделу	17
3 Аналитический обзор алгоритмов 3D LIDAR-SLAM	19
3.1 Базовый алгоритм SLAM	19
3.2 Cartographer	20
3.2.1 Локальный SLAM	21
3.2.2 Глобальный SLAM	22
3.3 HDL Graph SLAM	23
3.4 RTAB-Map	25
3.5 LOAM	26

3.6 Выводы по разделу	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	29
Список используемой литературы	30

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время робототехника получила большое развитие в разных сферах деятельности, наибольшее распространение она получила в военной сфере и в производстве. Чаще всего роботов применяют в монотонных или опасных работах. Об этом свидетельствует постоянно появляющаяся информация о достижениях ведущих стран мира в разработке военных наземных, подводных роботов и беспилотных летательных аппаратов. В нынешнее время начинается эпоха развития биоморфных роботов.

Основной вид робо-животных - это шагающие четвероногие роботы, разработка которых активно ведется, а некоторые проекты уже внедряются в производство или тестируются в военных частях. Основная цель использования данного вида роботов - это мониторинг обстановки окружающего пространства, например, разведка при боевых действиях, мониторинг поведения людей на улице [1] или контроль строительства [2].

Главной задачей для проведения операций мониторинга является построение трехмерной виртуальной модели окружающего мира. Для выполнения этой задачи робот должен передвигаться в пространстве, строить трехмерную карту пространства в котором находится и одновременно локализовать себя в ней. Одновременная локализация и построение карты (simultaneous localization and mapping, SLAM) - метод, используемый в робототехнике для построения карты в неизвестном нестатичном пространстве. Для построения трехмерной карты необходимо использовать методы SLAM, которые предоставляют такой тип карт. Данные методы более сложные, так как требуют больше мощности на обработку больших данных, либо используются дополнительные алгоритмы для оптимизации получаемых с датчиков данных.

Целью данной работы является:

- исследование существующих проектов робо-животных, анализ их особенностей для работы над задачей SLAM;

- проведение обзора датчиков измерения расстояния в алгоритмах SLAM, с учетом использования на базе робо-животного;
- проведение обзора основных методов трехмерного SLAM, удовлетворяющие условиям работы робо-животных.

1 Аналитический обзор проектов робо-животных

1.1 Виды робо-животных

Робо-животные или биоморфные роботы - это роботы, которые имитируют механики, сенсорные системы, используемые животными. При создании таких роботов, разработчики вдохновляются принципами биологических систем. Как следствие, внешний вид робота часто напоминает животного, у которого были позаимствованы базовые механики передвижения. Основная цель разработок таких роботов - получить схожие с животными характеристики скорости, маневренности и проходимости или превзойти их.

Основные разрабатываемые биоморфные роботы, используют способ передвижения, подобный соответствующим животным. По способу передвижения их можно разделить на следующие типы:

- а) Шагающие двуногие
- б) Шагающие четвероногие
- в) Шагающие многоногие (больше 4 ног)
- г) Летающие
- д) Ползущие
- е) Другие специфичные виды передвижения

Среди проектов робо-животных наибольшую перспективу и популярность сейчас имеют четвероногие роботы или квадрупеды (quadruped robot). Такой тип робота имеет 4 опоры, в соответствии с животными их часто называют ноги. Они обладают наиболее удачной конструкцией для динамического движения (dynamic locomotion) и достаточной устойчивостью при использовании соответствующих алгоритмов [3].

Этот вид роботов можно разделить по весогабаритным характеристикам на:

- а) Большие (от 100 кг) "Мул"
- б) Средние (от 10 до 100 кг) "Собака"
- в) Маленькие (до 10 кг) "Минисобака"

В этом разделе произведен обзор наиболее популярных разработок четвероногих роботов, разных по весогабаритным и динамическим характеристикам.

1.2 Boston Dynamics BigDog

BigDog - шагающий робот, разработанный компанией Boston Dynamics совместно с DARPA. Разработка велась для военных задач. Цель состояла в том, чтобы создать автономного робота с высокой проходимостью на пересеченной местности, превосходящей существующей колесные и гусеничные платформы. Идеальная система должна была бы путешествовать везде, где человек или животное могли бы двигаться, используя свои ноги, бежать много часов подряд и нести собственное топливо и полезную нагрузку.

У BigDog есть бортовые системы, которые обеспечивают питание, приведение в действие, датчики, средства управления и связь. Силовой агрегат представляет собой двухтактный двигатель внутреннего сгорания с водяным охлаждением мощностью около 15 л.с. Двигатель приводит в действие гидравлический насос, который подает гидравлическое масло под высоким давлением через систему фильтров, коллекторов, аккумуляторов и других трубопроводов к исполнительным механизмам ног робота. Приводы представляют собой гидравлические цилиндры с низким коэффициентом трения, регулируемые двухступенчатыми сервоклапанами авиационного качества. Каждый привод имеет датчики положения и силы соединения. Каждая нога имеет 4 гидравлических привода, приводящих в действие суставы, а также 5-ю пассивную степень свободы.

BigDog имеет различные способы передвижения. Он может вставать, приседать, ходить ползком, ходить рысью и бежать рысью. Скорость бегущей рысью - 2 м/с. Вес робота 109 кг, около 1 метра в высоту, 1,1 метра в длину и 0,3 метра в ширину. На рис. 1.1 изображен робот в снаряженном состоянии [4].



Рисунок 1.1 – BigDog в снаряженном состоянии

1.3 MIT Cheetah 3

Cheetah 3 - четвероногий робот разработанный в Массачусетском технологическом институте. Главной особенностью этого робота является то, что в нем используются электрические двигатели с высокой плотностью крутящего момента, одноступенчатые планетарные редукторы и малоинерционные ноги. Благодаря этому, робот может контролировать силы реакции земли без дополнительных датчиков, что позволяет ему ориентироваться на неровной поверхности. Робот способен без средств компьютерного зрения подниматься по лестнице, передвигаться по неровной поверхности за счет проприоцепции. Кроме того, это дает роботу очень высокую устойчивость к внешним воздействиям [5].

На рис. 1.2 изображена нога MIT Cheetah 3 с 3 приводами и коленный привод в разрезе.

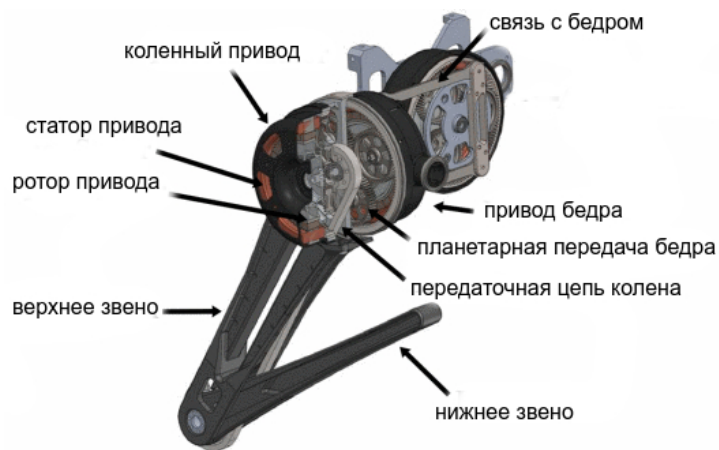


Рисунок 1.2 – Схема приводов одной ноги MIT Cheetah 3

Робот имеет массу 45 кг, 0,2 метра в высоту, 0,6 метров в длину и 0,26 м в ширину. Максимальная скорость около 3,5 м/с.

Данную разработку использовали для создания коммерческого варианта робота китайская компания Unitree A1. На робот дополнительно установлен RGB-D камера и опционально лидар. Сейчас стоимость данного робота составляет около 10,000\$.

1.4 MIT Mini Cheetah

Mini Cheetah - легкий, недорогой и высокопроизводительный четвероногий робот. Главная цель проекта - обеспечить быструю разработку систем управления шагающих роботов, за счет крепкого и недорого корпуса.

Mini Cheetah весит 9 кг. Он оснащен модульным приводом, разработанным для управления крутящим моментом с высокой пропускной способностью, плотностью крутящего момента и устойчивостью к высокоскоростным ударам. Несмотря на свой небольшой размер и низкую стоимость, Mini Cheetah демонстрирует высокودинамичное поведение, включая бег рысью, прыжки и бег со скоростью до 2,45 м/с, а также сальто назад на 360 градусов из положения стоя [6].

1.5 Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены популярные проекты шагающих четвероногих роботов разных размеров. Наиболее подходящим для решений задачи SLAM является проект робота MIT Cheetah 3 или готовый

вариант Unitree A1. Этот робот обладает достаточной грузоподъемностью и свободным местом на основании робота для установки дополнительного оборудования, например датчик измерения расстояния или дополнительный миникомпьютер для выполнения алгоритмов SLAM. На корпусе Unitree A1 присутствуют выходы питания для дополнительных устройств.

На рис. 1.3 изображен робот Unitree A1 с монтированным на нем дополнительным оборудованием.



Рисунок 1.3 – Unitree A1 с монтированным на нем дополнительным оборудованием

2 Аналитический обзор датчиков, используемых для получения значений расстояний в алгоритмах SLAM

Для того, чтобы составлять карту и локализовать в ней себя, роботу необходимо получать данные об окружающем мире, то есть необходимы датчики, по измерениям которых можно напрямую или косвенно получить значения расстояний до наблюдаемых объектов. Каждый вид датчиков имеет свои особенности, недостатки и преимущества. Для разных условий использования и точности получаемых измерений, необходимо подбирать необходимый датчик. В SLAM чаще всего используются следующие датчики измерения дальности:

- ультразвуковые дальномеры;
- инфракрасные дальномеры;
- лидары;
- радары;
- стереокамеры;
- RGB-D-камеры.

В данном разделе приведено описание и сравнение датчиков определения расстояния до объектов, наиболее распространенных для решения задачи SLAM.

2.1 Ультразвуковые дальномеры

Ультразвуковой дальномер измеряет расстояние за счет измерения времени отражения звукового сигнала от объекта. Передающая часть испускает неслышимый для человека ультразвук (частота 20-40 кГц) в направлении определенного объекта, волны отражаются от него, возвращаются и улавливаются приемной частью. Процессор определяет время, необходимое на прохождение звука в обоих направлениях и с учетом его скорости высчитывает расстояние. [7]

Ультразвуковой дальномер, в отличие от других датчиков, отражается от большинства поверхностей, вне зависимости от их материала, цвета и прозрачности. Кроме того, данный вид дальномера компактный (несколько

сантиметров), энергопотребление не превышает 10 Вт, а также имеет сравнительно небольшую стоимость (порядка 10-100 \$).

Основным недостатком ультразвукового дальномера является точность измерения конкретной точки. Активная часть датчика испускает сигнал по всем допустимым направлениям, и определяет первый полученный ответный сигнал, как расстояние до объекта. Поэтому целесообразно использовать данный тип датчика для определения расстояния до больших объектов, например стен. При работе с небольшими объектами погрешность измерения значительно увеличивается. Кроме того, погрешность зависит от расстояния до объекта, что делает измерения расстояний больше 10 м недостоверными.

2.2 Инфракрасные дальномеры

Инфракрасные дальномеры близки по способу регистрации информации к ультразвуковым дальномерам. Однако вместо ультразвука в них используются импульсы инфракрасного излучения. Как правило, инфракрасные дальномеры имеют меньшую дальность, чем ультразвуковые или лазерные, однако являются более дешевыми и простыми в эксплуатации. Диапазон действия инфракрасных дальномеров — единицы метров, погрешность до 10 % [8].

Чаще всего инфракрасные датчики применяются в мобильных роботах, как дальномеры ближнего действия для предотвращения столкновения, а также для определения наличия предметов в схватах манипулятора.

2.3 Лидары

Лидар (LIDAR - Light Detection and Ranging) - технология, которая использует явления отражения и рассеивания света в прозрачных и полупрозрачных средах для получения и обработки информации об удаленном объекте. В отличие от инфракрасных дальномеров, лидар испускает световые лучи в разных направлениях и с большой точностью и дискретизацией определяет расстояния до окружающих объектов. По количеству испускаемых лучей бывают 2D и 3D лидары. По технологии изменения направления луча лидары

делятся на электромеханический, где присутствуют движущиеся части и твердотельные, использующие оптическую фазированную решетку [9].

Лидары имеют диапазон измерений от 1 до 200 м, а угол обзора до 360 градусов по горизонтали и до 40 градусов по вертикали. Дискретность угла в зависимости от модели может достигать до 0,1 градуса. Лидар может быть использован при различных уровнях освещенности, как в помещении так и на открытой местности, но подвержены влиянию погодных условий [10]. По сравнению с радаром лидар имеет более сфокусированный лазерный луч, большее число сканируемых слоев в вертикальном направлении и большую плотность измерений. Одновременно может проводиться десятки измерений.

Основным недостатком лидаров является высокая стоимость, которая может превышать 1000\$, особенно для 3D лидаров высокого разрешения. Энергопотребление является сравнительно большим, до 20 Вт. Кроме того, по сравнению с другими датчиками, они крупные и тяжелые, а также механические лидары имеют движущиеся части, которые могут выходить из строя и требуют более сложное обслуживание.

2.4 Радары

Радар использует радиоволны 24/77/79 ГГц для обнаружения и определения местоположения объектов. Передатчик излучает радиоволну, которая после отражения улавливается приемником. Кроме расстояния, радар может определить скорость объекта используя эффект Доплера.

Радар предназначен для обнаружения крупных объектов, так как длина радиоволн не позволяет обнаруживать маленькие объекты, форму поверхностей и границы объектов. Диапазон измерения до 250 м с точностью 0.05 м. Угол обзора 15 - 90 градусов по горизонтали и 4 - 20 по вертикали. Стоимость до 5000\$. Скорость работы и разрешение ниже чем у лидара. Но радары устойчивы к разным погодным условиям, так как могут быть закрыты защитой, через которую может проходить радиосигнал.

2.5 Стереокамеры

Стереокамера это две видеокамеры зафиксированные на определенном расстоянии (несколько сантиметров) и направленные в одну сторону. Это позволяет симулировать бинокулярное зрение человека. Из-за расстояния между ними получается, что камеры видят одну и ту же картину под разным углом. Расстояния до объектов необходимо вычислить методом триангуляции, используя двумерные изображения с обеих камер.

Стереокамеру необходимо использовать в освещенной обстановке или использовать дополнительное освещение. Разрешение стереокамер зависит от используемых видеокамер, обычно это 1280×720 пикселей. Потребление энергии порядка 2 Вт. Стоимость стереокамер варьируется в пределах 100 - 300\$.

К основным проблемам стереокамеры можно отнести то, что качество зависит от освещенности, наличия текстур, различных цветов, отсутствия повторяющихся структур, отсутствия однотонных поверхностей. Погрешность измерений сильно зависит от расстояния до объектов [11].

2.6 RGB-D-камеры

Камеры глубины представляют собой изображение, в котором каждый пиксель, кроме значений цвета, имеет значение расстояния до точки пространства, спроецированную на плоскость камеры. RGBD-камеры имеют относительно небольшой размер, приемлемую стоимость и благодаря серийному производству легко заменяемы [12].

Данные камеры, по принципу действия можно разделить на следующие:

- камеры структурного света (Structured Light);
- камеры, основанные на измерении задержки отраженного света (Time of Flight камеры);
- активное стерео;

2.6.1 Камеры структурного света

В данном методе используется камера и проектор. Проектор проецирует структурированное изображение, например прямые полосы. Благодаря тому, что проектор смещен относительно камеры, полосы тоже будут смещаться пропорционально расстоянию до объекта. Измеряя это смещение, рассчитывается расстояние до объекта. В качестве света используются инфракрасное излучение.

Диапазон измерений таких камер от 0,1 метра до 10 метров. Угол обзора до 80 по горизонтали и до 60 по вертикали. Точность измерений до 0,01 м. Энергопотребление составляет примерно 2 Вт. Стоимость камер структурированного света не превышает 200\$ [13].

Как следствие использования инфракрасного света, у данных камер есть недостатки, такие как засвечивание датчика солнечным светом, отражения и преломления ИК лучей от зеркальных и прозрачных поверхностей. Две камеры данного типа снимающие один объект будут портить измерения друг другу. Для повышения точности используют алгоритмы обработки карт глубины, например кросс-фильтрацию, где данные с RGB сенсора используют для корректировки зашумленных данных по глубине [14].

2.6.2 ToF-камеры

ToF (Time-of-Flight) камеры используют время затраченное на полет светового импульса от излучателя до объекта и от объекта до приемника.

Данные камеры могут работать при плохом освещении, но при ярком солнечном свете или подобными камерами данные будут некорректны. Но по сравнению с камерами структурного света ToF-камеры менее чувствительны к солнечному свету. Кроме того, как и другие датчики использующие активное излучение света, данные камеры плохо определяют объекты с прозрачными или зеркальными поверхностями.

Диапазон измерений, углы обзора ToF-камер сопоставимо с камерой структурного света, но энергопотребление выше, до 10 Вт, разрешение ниже,

выдают больше шумов при измерении, имеют более высокую стоимость (до 400\$) и требуют более сложной калибровки [15].

2.6.3 Активное стерео

Активное стерео проецирует изображение на объекты окружающей среды и использует его для более точного определения расстояния в стереозрении. Характеристики, такие как диапазон измерений, разрешение и стоимость сопоставимы с камерами структурированного света.

В отличие от других методов с активным излучением света, активное стерео можно использовать не только в помещениях, но и при солнечном освещении, так как стереокамеры производят измерения не только по проецируемой структуре, но и по естественной текстуре окружающих объектов. Излучаемый узор позволяет корректно проводить измерения в случае недостаточного освещения или отсутствия явных элементов структуры и цвета.

2.7 Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены датчики измерения расстояния, применяемые при решении задачи SLAM, их особенности, преимущества и недостатки.

Учитывая что, шагающий робот используются чаще всего в открытых пространствах, или в больших помещениях, например производственных, а также последние разработанные модели могут развивать скорость до 50 км/ч, необходимо выбрать датчик измерения расстояния который может работать при солнечном свете, на расстояниях несколько десятков метров, а также достаточно большую скорость работы. Кроме того, необходимо учитывать габариты датчика, так как шагающий робот ограничен в размерах и массе переносимого груза.

Критерию работы при солнечном освещении подходят ультразвуковые дальнометры, лидар, радар, стереокамеры и RGB-D с активным стерео. Необходимому диапазону измерений удовлетворяют лидары и радары. Лидары

имеют большую точность измерений, разрешение, угол обзора и скорость работы в сравнение с радаром. Поэтому для решения задачи SLAM шагающего робота наиболее подходящим датчиком расстояния является лидар.

В некоторых случаях есть необходимость вместе с лидаром использовать камеру и применять метод слияния визуального SLAM и SLAM на основе лидара (Visual-LiDAR fusion based SLAM). Это позволяет увеличить точность на небольших расстояниях, а также добавляет цветовую информацию в построенную карту.

3 Аналитический обзор алгоритмов 3D LIDAR-SLAM

3.1 Базовый алгоритм SLAM

За последние два десятилетия сообщество робототехники приложило огромные усилия для разработки решений SLAM. Среди этих решений наиболее популярны методы, основанные на техническом зрении и лидарах. Поскольку многие фреймворки SLAM доступны в открытом доступе, этот раздел направлен на оценку новейших фреймворков 3D SLAM на основе лидара с открытым исходным кодом.

Алгоритм SLAM получает от лидара 3D облако точек. Каждая точка облака имеет точные координаты относительно системы координат лидара. Трехмерная карта облака точек, созданная с помощью трехмерного лазерного SLAM, может более полно отражать трехмерную информацию об окружающей среде и предоставлять полезную информацию для навигации.

Задачу 3D SLAM на основе данных лидара можно разделить на следующие подзадачи:

- а) Сопоставление внешнего сканирования в структуре SLAM (Front-end Scanning)
- б) Внутренняя оптимизация (Back-end Optimization)
- в) Обнаружение замкнутых петель (Closed Loop Detection)
- г) Запись карты (Map Registration)

На рис. 3.1 изображенная базовая структура SLAM.



Рисунок 3.1 – Базовая структура SLAM

На первом этапе сопоставления внешнего сканирования происходит определение положение предыдущего кадра и, используя взаимосвязь между кадрами, оценить положение текущего кадра. На этом этапе также происхо-

дит извлечение характерных точек, поскольку данные облака точек слишком большие и необходимо уменьшить их объем для дальнейших вычислений.

Сопоставление внешнего сканирования может оценить позу за короткое время, но неизбежно накопление ошибок. Внутренняя оптимизация заключается в объединении информации замкнутых петель, одометрии и кадром полученным из первого этапа. В настоящее время в SLAM существуют формы на основе фильтрации, такие как расширенная фильтрация Калмана, расширенная фильтрация информации и фильтрация частиц; существуют также методы, основанные на оптимизации графов, и алгоритмы внутренней оптимизации, такие как слияние карт.

Обнаружение замкнутых петель отвечает за уменьшение дрейфа глобальной карты путем обнаружения замкнутой траекторий, то есть обнаружение ситуации, когда робот возвращается в точку пространства, в которой было произведено сканирование раньше.

Карта получаемая после этих операций может представлять собой облако точек, масштабную топологическую или растровую карту. Разные виды хранения карт позволяют добиваться меньшего размера данных и скорость дальнейшей работы с ней, например поиск пути для навигации [16].

Большинство современных систем управления роботами используют фреймворк ROS (Robot Operating System) для одновременного запуска в одной системе алгоритмов управления, навигации и SLAM. В практической части данной работы будет использован именно этот фреймворк, поэтому в данном разделе будут преимущественно разобраны алгоритмы трехмерного SLAM использующий лидар совместимые с ROS.

3.2 Cartographer

Cartographer — это система, которая обеспечивает решение задачи SLAM в режиме реального времени в 2D и 3D при различных конфигурациях датчиков, в том числе 3D лидары.

Cartographer делится на две взаимосвязанные подсистемы. Первая - локальный SLAM, иногда также называемый внешним сканированием (front-

end). Задача локального SLAM состоит в том, чтобы построить последовательность подкарт. Каждая подкарта должна быть локально достоверной, но с временем может накапливать ошибку. Вторая подсистема - глобальный SLAM, или внутренняя часть системы (backend). Основная задача глобального SLAM - найти замкнутые петли, путем сравнения подкарт с сохраненными результатами предыдущих сканирований. Он также включает данные других датчиков, чтобы получить представление более высокого уровня и определить наиболее точное глобальное решение. В 3D также происходит поиск направления гравитации [17].

3.2.1 Локальный SLAM

Перед обработкой локальным алгоритмом SLAM облако точек собирается и фильтруется из данных нескольких серий сканирований. Локальным SLAM вставляет новое сканирование в свою текущую конструкцию подкарты путем сопоставления сканирования с использованием начального предположения из экстраполятора местоположения. Идея экстраполятора местоположения состоит в том, чтобы использовать данные других датчиков, помимо лидара, чтобы предсказать, где следующее сканирование должно быть вставлено в подкарту. Если других датчиков нет, то текущее сканирование сопоставляется с текущей подкартой. Поиск наилучшего места для нового сканирования в подкарте осуществляется путем интерполяции подкарты и попиксельного выравнивания сканирования.

Чтобы избежать вставки слишком большого количества сканирований на подкарту, как только средство сопоставления сканирований обнаруживает движение между двумя сканированиями, оно проходит через фильтр движения. Сканирование отбрасывается, если движение, которое привело к нему, не считается достаточно значительным. Сканирование вставляется в текущую подкарту, только если его движение превышает определенное расстояние, угол или временной порог.

Подкарта считается завершенной, когда локальный SLAM получил достаточный объем данных. Подкарты должны быть достаточно маленькими, чтобы дрейф внутри них был ниже разрешения, чтобы они были локально правильными. С другой стороны, они должны быть достаточно большими, чтобы их можно было различить, чтобы замыкание петель работало должным образом [18].

3.2.2 Глобальный SLAM

Вторая подсистема глобальной оптимизации работает в фоновом режиме, параллельно с генерацией последовательностей подкарт. Ее роль заключается в перераспределении подкарт друг с другом, чтобы они образовывали согласованную глобальную карту. Оптимизация отвечает за изменение текущей построенной траектории, чтобы правильно выровнять подкарты учитывая замкнутые петли.

Глобальный SLAM - это оптимизация графа местоположений, которая работает путем создания ограничений между узлами и подкартами, а затем путем оптимизации полученного графа ограничений. Полученная сеть называется «графом местоположений». Ограничения могут быть глобальными и неглобальными. Неглобальные ограничения создаются автоматически между узлами, которые идут друг за другом на траектории, и сохраняют согласованность локальной структуры траектории. Глобальные ограничения регулярно ищутся между новой подкартой и предыдущими узлами, близкими в пространстве. Таким образом происходит уточнение карты и поиск замкнутых петель.

Как только траектория завершена, запускается новая глобальная оптимизация, как правило, с гораздо большим количеством итераций, чем предыдущие глобальные оптимизации. Это делается для уточнения окончательного результата и обычно не требует выполнения в реальном времени [18].

3.3 HDL Graph SLAM

HDL Graph SLAM — это пакет ROS с открытым исходным кодом для трехмерного SLAM в реальном времени с использованием 3D лидара. Он базируется на 3D SLAM на основе графов с оценкой одометрии и обнаружением петель. Он также поддерживает несколько способов уточнений карты, таких как GPS и обнаружение плоскости пола в облаке точек. Основное отличие от Cartographer состоит в том, что данная система SLAM не использует данные IMU для оценки одометрии. Одометрия рассчитывается непосредственно из данных лидара путем вычисления преобразования, необходимого для перекрытия последних сканирований.

Входное облако точек сначала подвергается субдискретизации, для ускорения последующих вычислений. После этого одновременно выполняется оценка положения датчика, итеративно применяя сопоставление сканирования между последовательными кадрами, то есть производится оценка одометрии, и производится определение плоскости пола с помощью RANSAC (Random Sample Consensus). Чтобы компенсировать накопленную ошибку сопоставления сканирования, выполняется обнаружение петли и оптимизируется граф положения, который учитывает различные ограничения [19].

SLAM на основе графов — один из самых успешных подходов к SLAM. В этом подходе задача SLAM решается путем построения и оптимизации графа, узлы которого представляют параметры, подлежащие оптимизации, такие как местоположение робота и положения ориентиров, а ребра представляют ограничения, такие как относительные положения между положениями робота и ориентирами. Граф оптимизирован таким образом, чтобы ошибки между параметрами и ограничениями были сведены к минимуму.

В системе сначала оценивается траектория робота, итеративно сравнивая сканирования между последовательными кадрами, используя преобразование нормального распределения (Normal Distributions Transform, NDT). Для 3D-лидаров NDT показывает лучшую производительность, чем другие алгоритмы сопоставления сканирования с точки зрения как надежности, так

и скорости обработки [20]. На рисунке 3.2 изображена упрощенная структура графа HDL Graph SLAM.

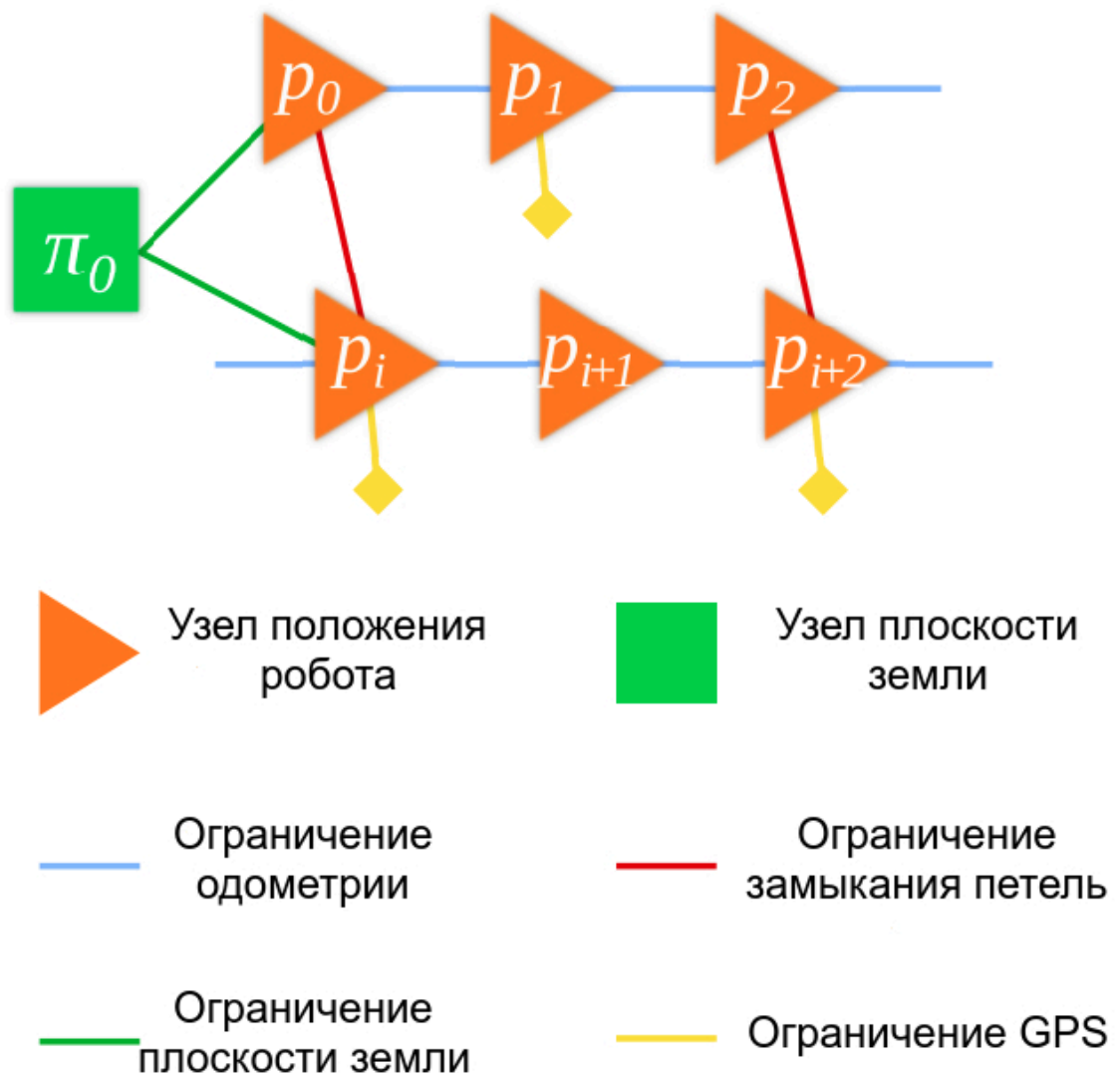


Рисунок 3.2 – Структура графа

Первым шагом алгоритма обнаружения петель является обнаружение кандидатов на петлю на основе расстояния и длины траектории между узлами. Затем для проверки кандидатов цикла между узлами каждого кандидата применяется алгоритм сопоставления сканирования NDT. Если оценка пригодности ниже порогового значения, происходит добавление петли в граф, в виде ребра между узлами.

3.4 RTAB-Map

RTAB-Map (Real-Time Appearance-Based Mapping) - это реализация SLAM на основе RGB-D, стерео и лидарного SLAM на основе графов, основанный на инкрементальном детекторе замыкания контура на основе вероятности. Детектор замыкания петель использует подход «мешок слов» (bag-of-words), чтобы определить, насколько вероятно новое сканирование из предыдущего или нового местоположения.

RTAB-Map в основном сочетает в себе два алгоритма: обнаружение замыкания петли и оптимизацию графа, обеспечивая управление памятью для удовлетворения требований для выполнения в реальном времени. Между узлами существует три разных типа связей: соединяющие, замыкающие и близкие звенья. Соединяющие ребра добавляются между последовательными местоположениями, в то время как последние связи добавляются после обнаружения замыкания петли между связанными местоположениями. Связи близости добавляются между узлами при обнаружении близости местоположений. После добавления замыкающего контура граф карты оптимизируется с использованием подхода TORO (Tree-based netwORk Optimizer) для уменьшения ошибок одометрии [21].

Управление памятью используется для ограничения размеров графа. Без управления памятью по мере роста графа время обработки может превысить ограничения, при котором будет выполняться условие работы в реальном времени, то есть время обработки может стать больше, чем время цикла получения узла. Память RTAB-Map делится на рабочую память (Working Memory, WM) и долговременную память (Long-Term Memory, LTM). Когда время обновления RTAB-Map превышает установленный порог времени, некоторые узлы из WM переводятся в LTM, чтобы ограничить размер WM и сократить время обновления. Чтобы определить, какие узлы следует перевести в LTM, механизм взвешивания идентифицирует местоположения, которые являются более важными, чем другие, например, чем дольше наблюдается местоположение, тем оно важнее и, следовательно, должно быть оставлено в WM.

Когда замыкание петли происходит, узлы этого местоположения могут быть возвращены из LTM в WM для более точного закрытия петли [22].

Изначально RTAB-Map разрабатывался как визуальный SLAM, а поддержка 2D и 3D лидаров была введена сравнительно недавно. Основные работы и эксперименты по данному фреймворку, которые сейчас доступны в открытом доступе, посвящены именно визуальному SLAM. Поэтому есть вероятность столкнуться с трудностями при использовании RTAB-Map с 3D лидаром.

3.5 LOAM

LOAM (Lidar Odometry and Mapping) - метод оценки одометрии и построения карты используя 3D лидар. Данный метод обеспечивает как низкий дрейф, так и низкую вычислительную сложность без необходимости высокоточных измерений дальности или инерциальных измерений. Ключевой идеей в достижении такого уровня производительности является разделение сложной задачи одновременной локализации и построения карты, которая направлена на одновременную оптимизацию большого количества переменных. Один алгоритм выполняет одометрию с высокой частотой, но с низкой точностью для оценки скорости лидара. Другой алгоритм работает на частоте на порядок ниже для точного сопоставления и регистрации облака точек. Комбинация двух алгоритмов позволяет методу строить точную трехмерную карту в режиме реального времени [23].

На рисунке 3.3 изображена блок-схема алгоритма LOAM с указанием частоты работы отдельных частей алгоритма. Одометрия лидара берет облако точек и вычисляет движение лидара между двумя положениями. Расчетное движение используется для исправления искажения в облаке точек. Алгоритм работает на частоте около 10 Гц. Выходные данные дополнительно обрабатываются построением карты, которое сопоставляет и регистрирует неискаженное облако на карте с частотой 1 Гц. Наконец, преобразования местоположения, опубликованные двумя алгоритмами, объединяются для

создания выходных данных преобразования с частотой около 10 Гц относительно положения лидара по отношению к карте.

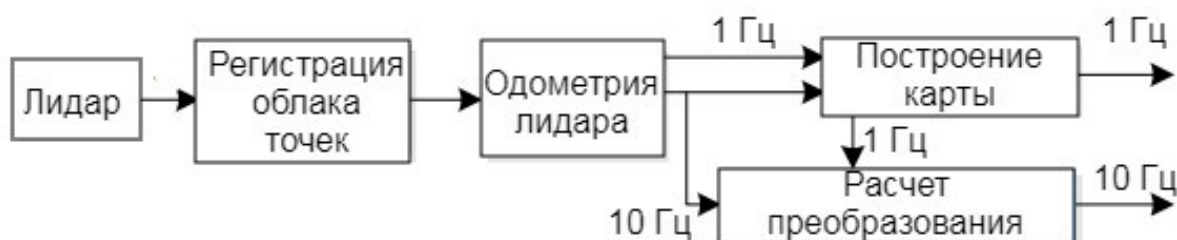


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритма расчета одометрии и построения карты LOAM

Основным недостатком данного метода является отсутствие алгоритма распознавания замкнутых петель. Поэтому при работе со временем будет накапливаться ошибка. Кроме того, не используются дополнительные данные одометрии других датчиков, что увеличивает дрейф оценки движения.

Для решения проблемы накопления ошибки были разработаны алгоритмы на основе LOAM: LIO-SAM (Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping) [24] и SC-LIO-SAM (Scan Context and LIO-SAM) [25]. LIO-SAM добавляет возможность использовать инерционный датчик одометрии или GPS и объединяет показания с одометрией лидара. Scan Context - алгоритм распознавания места, в частности распознавания кандидатов на замыкание петли. Данные дополнения к методу LOAM сводят накопление ошибки к минимуму.

3.6 Выводы по разделу

В данном разделе был разобран базовый алгоритм 3D SLAM, а также произведен анализ основных методов трехмерного SLAM на основе лидара с открытым исходным кодом и совместимые с ROS, а именно: Cartographer, HDL Graph SLAM, RTAB-Map и LOAM с дополнениями. Каждый метод имеет свои особенности, преимущества и недостатки.

Все данные методы удовлетворяют условиям использования на больших открытых пространствах и могут использоваться для решения задачи

SLAM на шагающем четвероногом роботе. Для выбора наиболее подходящего алгоритма SLAM необходимо произвести исследование и сравнить точность построения карты у этих методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы были рассмотрены типы робо-животных. Более подробно были рассмотренные наиболее популярный проекты шагающих четвероногих роботов. Выбрана модель робота, на базе которого будут производиться испытания методов построения цифровых моделей объектов.

Также в данной работе проведено сравнение датчиков для измерения расстояний, используемых при решении задачи SLAM. В качестве датчика, наиболее подходящего для создания карты больших открытых пространств с использованием шагающего четвероного робота, был выбран трехмерный лидар. Лидар обеспечивает диапазон измерений расстояний и точность измерений, достаточный для работы на улице.

Сделан обзор существующих алгоритмов трехмерного SLAM для использования с лидаром. Для выбора наиболее подходящего метода SLAM, необходимо сравнить точность построения карты и быстродействие всех рассмотренных алгоритмов.

В план дальнейших исследований входит изучение математического описания выбранных алгоритмов, подбор методов и критериев сравнения алгоритмов, а также проверка пригодности данных алгоритмов для решения задачи SLAM с заданными условиями в среде ROS. По результатам тестирования необходимо сравнить алгоритмы и рассмотреть возможности улучшения работы выбранного алгоритма.

3 Список используемой литературы

1. Autonomous Social Distancing in Urban Environments Using a Quadruped Robot / Z. Chen [и др.] // IEEE Access. — 2021. — Т. 9. — С. 8392—8403. — DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3049426.
2. A Methodology for BIM-enabled Automated Reality Capture in Construction Inspection with Quadruped Robots / S. Halder [и др.] //. — 11.2021. — DOI: 10.22260/ISARC2021/0005.
3. *Liao Q.* Review of Quadruped Robots for Dynamic Locomotion. — 05.2020.
4. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot // IFAC Proceedings Volumes. — 2008. — Т. 41, № 2. — С. 10822—10825. — ISSN 1474-6670. — DOI: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01833>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016407020>; 17th IFAC World Congress.
5. MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot / G. Bledt [и др.] // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). — 2018. — С. 2245—2252. — DOI: 10.1109/IROS.2018.8593885.
6. *Katz B., Carlo J. D., Kim S.* Mini Cheetah: A Platform for Pushing the Limits of Dynamic Quadruped Control // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — 2019. — С. 6295—6301. — DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793865.
7. A Systematic Review of Perception System and Simulators for Autonomous Vehicles Research / F. Rosique [и др.] // Sensors. — 2019. — Т. 19, № 3. — ISSN 1424-8220. — DOI: 10.3390/s19030648. — URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/3/648>.
8. *Cicolani J.* Working with Infrared Sensors //. — 03.2021. — С. 259—287. — DOI: 10.1007/978-1-4842-6891-9_8.

9. *Nam D. V., Gon-Woo K.* Solid-State LiDAR based-SLAM: A Concise Review and Application // 2021 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp). — 2021. — C. 302—305. — DOI: 10.1109/BigComp51126.2021.00064.
10. *Byeon M., Yoon S. W.* Analysis of Automotive Lidar Sensor Model Considering Scattering Effects in Regional Rain Environments // IEEE Access. — 2020. — T. 8. — C. 102669—102679. — DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2996366.
11. *Rozman J.* Incremental creation of a 3D map with a stereocamera // 2010 10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. — 2010. — C. 861—865. — DOI: 10.1109/ISDA.2010.5687155.
12. *Brahmanage G., Leung H.* Outdoor RGB-D Mapping Using Intel-RealSense // 2019 IEEE SENSORS. — 2019. — C. 1—4. — DOI: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956916.
13. *DiFilippo N. M., Jouaneh M. K.* Characterization of Different Microsoft Kinect Sensor Models // IEEE Sensors Journal. — 2015. — T. 15, № 8. — C. 4554—4564. — DOI: 10.1109/JSEN.2015.2422611.
14. Hierarchical Alternate Interaction Network for RGB-D Salient Object Detection / G. Li [и др.] // IEEE Transactions on Image Processing. — 2021. — T. 30. — C. 3528—3542. — DOI: 10.1109/TIP.2021.3062689.
15. *Dalbah Y., Rohr S., Wahl F. M.* Detection of dynamic objects for environment mapping by time-of-flight cameras // 2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). — 2014. — C. 971—975. — DOI: 10.1109/ICIP.2014.7025195.
16. Research on the Development of 3D Laser SLAM Technology / X. Niu [и др.] // 2021 IEEE 4th International Conference on Big Data and Artificial Intelligence (BD AI). — 2021. — C. 181—185. — DOI: 10.1109/BD AI52447.2021.9515260.

17. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM / W. Hess [и др.] // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — 2016. — С. 1271—1278. — DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487258.
18. Cartographer Algorithm walkthrough [Электронный ресурс]. — (Дата обращения: 10.01.2022). URL: https://google-cartographer-ros.readthedocs.io/en/latest/algo_walkthrough.html.
19. Koide K., Miura J., Menegatti E. A portable three-dimensional LIDAR-based system for long-term and wide-area people behavior measurement // International Journal of Advanced Robotic Systems. — 2019. — Февр. — Т. 16. — DOI: 10.1177/1729881419841532.
20. Interactive 3D Graph SLAM for Map Correction / K. Koide [и др.] // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2021. — Янв. — Т. 6. — С. 40—47. — DOI: 10.1109/LRA.2020.3028828.
21. Comparison of 3-dimensional SLAM systems: RTAB-Map vs. Kintinuous / N. Altuntaş [и др.] // 2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK). — 2017. — С. 99—103. — DOI: 10.1109/UBMK.2017.8093567.
22. Labbé M., Michaud F. RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation // Journal of Field Robotics. — — Т. 36, № 2. — С. 416—446. — DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.21831>. — eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/rob.21831>. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.21831>.
23. Zhang J., Singh S. LOAM : Lidar Odometry and Mapping in real-time // Robotics: Science and Systems Conference (RSS). — 2014. — Янв. — С. 109—111.
24. LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping / T. Shan [и др.] // 2020 IEEE/RSJ International Conference on

Intelligent Robots and Systems (IROS). — 2020. — C. 5135—5142. — DOI:
10.1109/IROS45743.2020.9341176.

25. *Kim G., Kim A.* Scan Context: Egocentric Spatial Descriptor for Place Recognition within 3D Point Cloud Map // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. — Madrid, 10.2018.