

УДК 622.23.05 © Д.М. Дубинкин✉, В.Ю. Садовец, И.С. Сыркин,
Е.В. Коршунова, 2024

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия
✉ e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

UDC 622.23.05 © D.M. Dubinkin✉, V.Yu. Sadovets, I.S. Syrkin,
E.V. Korshunova, 2024

Kuzbass State Technical University,
Kemerovo, 650000, Russian Federation
✉ e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Создание алгоритма обработки данных систем беспилотного управления карьерного самосвала для построения высокоточных 3D-карт местности*

Creation of an algorithm for processing data from unmanned control systems of a quarry dump truck for constructing high-precision 3D maps of the terrain

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-115-116-122>

ДУБИНКИН Д.М.

Канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры горных машин и комплексов
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный
технический университет
им. Т.Ф. Горбачева»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

САДОВЕЦ В.Ю.

Канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры информационных
и автоматизированных
производственных систем ФГБОУ ВО
«Кузбасский государственный технический
университет им. Т.Ф. Горбачева»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: svyu.pmh@kuzstu.ru

СЫРКИН И.С.

Канд. техн. наук, доцент
кафедры информационных
и автоматизированных
производственных систем ФГБОУ ВО
«Кузбасский государственный
технический университет
им. Т.Ф. Горбачева»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: syrkin@kuzstu.ru

В статье рассматриваются методы и технологии, используемые для создания высокоточных 3D-карт местности, которые необходимы при определении траектории движения и управлении беспилотного карьерного самосвала. Разработка системы беспилотного управления карьерным самосвалом представляет собой сложную и многогранную задачу. Для обеспечения построения высокоточных карт был произведен обоснованный выбор аппаратной части системы технического зрения и навигации. Основное внимание уделяется интеграции в системе беспилотного управления карьерным самосвалом современных сенсоров, таких как глобальная навигационная спутниковая система (GNSS), 3D-лидар, инерциальный датчик и видеокамера. Совокупность применения выбранного оборудования позволяет обеспечить точность и надежность получаемых данных, таких как видеоизображение, полигональная модель местности и точек позиционирования карьерного самосвала. Представлены используемые устройства, их функциональные возможности

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 № 075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

и способы синхронизации информации для создания детализированных карт, учитывающих рельефные особенности и препятствия на местности.

Ключевые слова: карьерный самосвал, беспилотное управление, система навигации, система технического зрения, сенсоры, обработка данных, алгоритм.

Для цитирования: Создание алгоритма обработки данных систем беспилотного управления карьерного самосвала для построения высокоточных 3D-карт местности / Д.М. Дубинкин, В.Ю. Садовец, И.С. Сыркин и др. // Уголь. 2024;(11S):116-122. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-116-122.

Abstract

The article discusses the methods and technologies used to create high-precision 3D terrain maps that are necessary to determine the trajectory of movement and control of an unmanned mining truck. Developing an unmanned control system for a mining truck is a complex and multifaceted task. To ensure the construction of high-precision maps, a reasonable choice of hardware for the vision and navigation system was made. The main attention is paid to the integration of modern sensors, such as a global navigation satellite system (GNSS), 3D lidar, inertial sensor and video camera, into the unmanned control system for a mining truck. The combination of the selected equipment ensures the accuracy and reliability of the data obtained, such as video images, a polygonal terrain model and positioning points of the mining truck. The devices used, their functionality and methods for synchronizing information for creating detailed maps that consider relief features and obstacles on the ground are presented.

Keywords

Quarry dump truck, unmanned control, navigation system, machine vision system, sensors, data processing, algorithm.

Acknowledgements

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under Agreement No 075-15-2022-1198 dated 30.09.2022 with the Gorbachev Kuzbass State Technical University on complex scientific and technical program of full innovation cycle: "Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life" (the "Clean Coal – Green Kuzbass" Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle) as part of implementing the project "Development and creation of an unmanned shuttle-type mine truck with a payload of 220 tonnes" in terms of research, development and experimental-design work.

For citation

Dubinkin D.M., Sadovets V.Yu., Syrkin I.S., Korshunova E.V. Creation of an algorithm for processing data from unmanned control systems of a quarry dump truck for constructing high-precision 3D maps of the terrain. *Ugol*. 2024;(11S):116-122. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-116-122.

ВВЕДЕНИЕ

Система беспилотного управления карьерным самосвалом представляет собой сложную аппаратную и программную архитектуру, состоящую из различных подсистем, таких как навигация, техническое зрение, вычислительный блок и др. [1, 2, 3, 4]. Основные результаты исследований по разработке и обоснованию структуры системы беспилотного управления представлены в работах [5, 6, 7, 8]. Одной из актуальных задач на данном этапе разработки системы являются отработка и программирование взаимодействия спутниковой навигаци-

КОРШУНОВА Е.В.

Младший научный сотрудник
Научного центра «Цифровые технологии»
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный
технический университет
им. Т.Ф. Горбачева»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: korshunovaev@kuzstu.ru



**НОЦ
КУЗБАСС –
ДОНБАСС**

Научно-образовательный
центр «Кузбасс-Донбасс»

онной системы (GNSS), 3D-лидаров, инерциального датчика и видеокамеры.

Построение 3D-карт местности для моделирования беспилотного управления карьерными самосвалами представляет собой важную задачу при определении траектории его движения, которая позволяет значительно повысить эффективность и безопасность работы в карьерах. Современные технологии распознавания окружающих объектов, такие как лазерное сканирование и фотограмметрия, позволяют создавать высокоточные 3D-модели внешней обстановки, учитывающие все рельефные особенности и препятствия на местности. Получаемые модели служат основой разработки алгоритмов для систем навигации беспилотного управления и систем управления самим самосвалом, позволяя прокладывать маршруты движения, избегая столкновений и учитывать происходящие изменения в ландшафте.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ

При записи навигационных данных, в целях построения высокоточных 3D-карт местности для моделирования беспилотного управления карьерными самосвалами, было применено следующее оборудование: глобальная навигационная спутниковая система (GNSS), 3D-лидар, инерциальный блок и видеокамера.

Чтобы получить данные глобальной навигационной спутниковой системы использовался GNSS приемник OC-213 производства Orient Systems с двумя антеннами, предназначенный для высокоточного определения положения объекта в пространстве (координаты объекта и направление его движения) [9]. К GNSS-приемнику подключались две внешние антенны AT340, которые являются достаточно высокоточными и предназначены для приема сигналов от различных спутниковых навигационных систем, таких как GPS, ГЛОНАСС, Galileo и других.

С целью повышения точности определения координат карьерного самосвала подключение к навигационной системе проводилось через подключение к станции поправок RTK, доступ к которой предоставляется компанией CORS.

Запись данных лидара производилась с помощью сенсора Ouster OS1. Он предназначен как для работы внутри помещений, так и снаружи в любых погодных условиях. Ouster OS1 – самая маленькая по габаритам система LiDAR в своем классе и имеет возможность устанавливаться на ровную поверхность транспортного средства, лобовое стекло, боковые зеркала и фары [10].

Представленное оборудование обладает следующими достоинствами и выполняет представленные ниже функции:

- имеет возможность нескольких вариантов синхронизации входа и выхода сигналов;
- ведение работ по программированию частоты кадров и разрешения получаемых фотографий в процессе работы системы беспилотного управления;
- режимы измерения с фиксированными углом и временем;
- сенсоры в процессе работы не создают друг другу помех;

- система внутренней и внешней калибровки сенсора является передовой в области сканирования;
- подключение к другим системам происходит через разъемное соединение;
- обновления информационной прошивки через интернетную сеть.

Для обработки поступающих сигналов от сенсоров и антенн использовался инерциальный блок БИНС Н1В, который является высокоточным МЭМС-модулем и способен осуществить точное определение всех навигационных параметров карьерного самосвала, задавались в геодезической системе координат WGS 84 [11]. Каждый сенсор имеет заводскую калибровку внутренних погрешностей, зависящих от динамики движения и температурных условий.

К особенностям выбранного инерционного блока можно отнести: полное навигационное решение, 3-осевой МЭМС-гироскоп и МЭМС-акселерометр, высокую температурную стабильность, заводскую калибровку нестабильности нуля и масштабного коэффициента, термокомпенсацию, программируемый цифровой фильтр, промышленный диапазон температур и низкий уровень шума.

Видеозапись процесса движения карьерного самосвала осуществлялась видеокамерами Basler. Они представляют собой высококачественные промышленные камеры, имеющие широкий спектр использования и применяемые в различных областях информационных систем, таких как машинное зрение, автоматизация, медицинская диагностика, контроль качества и робототехника. Также к их достоинствам стоит отнести высокую точность и высокое разрешение видеозаписи, быстрое действие, надежность работы и поддержку различных программных платформ для интеграции в системы машинного зрения.

Для синхронизации получаемых данных был выбран блок ROS2, который способен формировать собственные протоколы передачи данных, HTTP, WebSockets и благодаря своей архитектуре и особенностям ориентируется на высокую производительность и масштабируемость. Одним из главных преимуществ ROS2 является использование DDS (Data Distribution Service) в качестве основы для передачи данных [6]. Это делает его более адаптируемым к распределенным системам, требующим высокого уровня масштабируемости и надежности, таким как система беспилотного управления карьерным самосвалом. В отличие от ROS1, который основан на более простом подходе к публикации и подписке, ROS2 предлагает широкие возможности для управления качеством обслуживания (QoS), обеспечивая гибкую настройку синхронизации и надежности передачи данных.

Кроме того, ROS2 превосходит другие решения в плане гибкости сетевых взаимодействий. В то время как протоколы, такие как HTTP или WebSockets, могут ограничиваться производительностью и надежностью в системах реального времени, ROS2 предлагает различные протоколы транспортного уровня для передачи данных, включая поддержку TCP и UDP. Это позволяет выбирать оптимальные настройки в зависимости от требований к задержкам и надежности, что особенно важно в системах с высоким трафиком данных, например при синхронизации данных с лидаров, камер и GNSS.

С точки зрения производительности и многозадачности, ROS2 предоставляет улучшенную поддержку многопоточности и управления ресурсами. В отличие от многих других систем передачи данных ROS2 может эффективно работать в средах, где требуется параллельная обработка данных из нескольких источников.

Это достигается за счет расширенной системы управления потоками и приоритетами, чего не всегда хватает в других решениях для реального времени. Такая архитектура ROS2 позволяет избежать узких мест в производительности, улучшая общую синхронизацию данных.

GPS-трек движения карьерного самосвала по маршруту следования записывался в виде ROS2-пакетов в следующих форматах:

- sec, nanosec – это секунды и наносекунды соответственно;
- frame_id – это идентификатор кадра, который используется для указания системы координат, в которой представлены данные;
- status – это статус сообщения (содержит информацию о статусе сообщения);
- service – это тип службы или запроса;
- latitude – широта в градусах;
- longitude – долгота в градусах;
- altitude – высота или альтитуда (над уровнем моря) в метрах;
- position_covariance – ковариационная матрица позиции;
- position_covariance_type – тип ковариационной матрицы.

Для проведения обработки принимались данные, статус в которых должен был принимать значение 2, как наиболее точные с точки зрения процесса обработки информации.

Данные с лидара записывались в виде ROS2-пакетов в следующих форматах:

- header, stamp;
- sec, nanosec – это секунды и наносекунды соответственно;
- frame_id – идентификатор координатной системы;
- height – высота 2D-структуры точечного облака;
- width – ширина 2D-структуры точечного облака;
- fields – описание каналов и их расположение в бинарном блоге данных;
- name – имя канала (например, x, y, z);
- offset – смещение канала в байтах;
- datatype – тип данных канала (например, float32);
- count – количество элементов данного типа в канале;
- is_bigendian – флаг, указывающий на порядок байт (big endian или little endian);
- point_step – длина одной точки в байтах;
- row_step – длина строки данных в байтах;
- data – фактические бинарные данные точек, размер которых равен $row_step * height$;
- is_dense – флаг, указывающий на наличие недействительных точек в облаке (True, если нет недействительных точек).

Данные с инерциального блока (тип sensor_msgs/msg/Imu.msg):

- header, stamp;

- sec, nanosec – это секунды и наносекунды соответственно;
- frame_id – идентификатор координатной системы;
- orientation: x – компонента ориентации по оси x ; y – компонента ориентации по оси y ; z – компонента ориентации по оси z ; w – компонента ориентации по оси w (кватернион);
- orientation_covariance – матрица ковариации для ориентации (размерность 3×3);
- angular_velocity: x – угловая скорость по оси x ; y – угловая скорость по оси y ; z – угловая скорость по оси z ;
- angular_velocity_covariance – матрица ковариации для угловой скорости (размерность 3×3);
- linear_acceleration: x – линейное ускорение по оси x ; y – линейное ускорение по оси y ; z – линейное ускорение по оси z ;
- linear_acceleration_covariance – матрица ковариации для линейного ускорения (размерность 3×3).

Камера пишет в топик типа sensor_msgs/Image.msg. Он содержит следующую информацию:

- std_msgs/Header header – сообщение содержит заголовок, который включает временные метки и идентификатор системы координат;
- uint32 height – высота изображения в пикселях;
- uint32 width – ширина изображения в пикселях;
- string encoding – строка, описывающая формат пикселей в изображении. Например:
 - rgb8: 8-битный цвет, 3 канала (Red, Green, Blue);
 - bgr8: 8-битный цвет, каналы в порядке (Blue, Green, Red);
 - mono8: 8-битный монохромный (черно-белый) формат;
 - mono16: 16-битный монохромный формат.
- uint8 is_bigendian – указывает порядок в байтах;
- uint32 step – содержит данные о длине одной строки изображения в байтах;
- uint8 data – представляет собой массив байтов, который содержит фактические данные изображения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ ОТ СЕНСОРОВ

На базе данных, полученных от системы GNSS, можно анализировать процесс визуализации пройденного маршрута карьерным самосвалом. Визуализация маршрута карьерного самосвала в программном средстве RVIZ2 позволяет получить наглядное представление о траектории его движения [12]. Данные, полученные от системы GNSS, представляют собой координаты, которые записываются в процессе движения самосвала. В RVIZ2 эти координаты отображаются как последовательность точек или линий, соответствующих пройденному пути.

Основная цель такой визуализации – отслеживание и анализ передвижения карьерного самосвала. Это может использоваться для оптимизации маршрутов, повышения эффективности работы оборудования и предотвращения нежелательных ситуаций, таких как отклонение от заданного маршрута или попадание на опасные участки. Визуализация также помогает при анализе данных для последующего построения карт или моделирования местности на основе собранных GNSS данных.

Записанный маршрут следования карьерного самосвала и его визуализация представлены на *рис. 1*.

В RVIZ2 лидарные данные отображаются в виде облака точек, каждая из которых соответствует обнаруженной поверхности или объекту в пространстве. Цвета точек могут варьироваться в зависимости от расстояния до объектов или их отражающей способности, что делает визуализацию удобной для анализа.

Основная цель такой визуализации в реальном времени заключается в обеспечении безопасного движения карьерного самосвала за счет своевременного обнаружения препятствий и анализа окружающей среды. Этот принцип заложен в автоматизации движения по маршруту, предотвращения столкновений, а также для моделирования окружающей местности. Визуализация лидарных данных дополняет информацию от GNSS, предоставляя детализированную картину окружения, что особенно важно в сложных условиях эксплуатации, например в карьерах с неровной или переменной поверхностью.

Визуализация записанных лидаром данных представлена на *рис. 2*.

В RVIZ2 данные с камеры отображаются в виде последовательности изображений или видеопотока и выводятся на окно визуализации. Эти данные могут быть дополнены другими сенсорными данными, такими как лидар или GNSS, для создания более полной картины окружающей среды. Например, изображение с камеры может быть использовано для распознавания объектов, таких как другие транспортные средства или рабочие, которые могут находиться в зоне движения самосвала.

Основная цель визуализации данных с камеры заключается в улучшении восприятия окружающей среды оператором или автоматизированной системой управления. Эти данные помогают в оценке дорожных условий, обнаружении возможных препятствий, а также в навигации по сложным участкам маршрута. Камеры могут быть особенно полезны в условиях, когда визуальная информация играет ключевую роль, например при ограниченной видимости или при необходимости распознавания объектов в динамической среде.

Пример визуализации данных с камеры представлен на *рис. 3*, где показано изображение окружающей среды, полученное во время движения самосвала.

Компонент «Карта» является частью систем, предназначенных для беспилотных транспортных средств, в частности карьерных самосвалов [13].

Создание трехмерной карты с помощью технологии LiDAR невозможно без использования глобальной навигационной спутниковой системы и инерциальных датчиков. Эти устройства обеспечивают географическую привязку, определяя как координаты, так и ориентацию LiDAR-системы. Приемник GNSS предоставляет данные о местоположении сканера, но для полной картины требуется информация об ориентации устройства. Эту задачу выполняют инерциальные датчики, которые дополняют данные о позиции.

Одним из распространенных алгоритмов для этих целей выступает LIO-SAM. Он представляет собой метод моделирования карты и локализации, который использует ли-



Рис. 1. Визуализация пройденного маршрута в RVIZ2

Fig. 1. Visualization of the route traveled in the RVIZ2

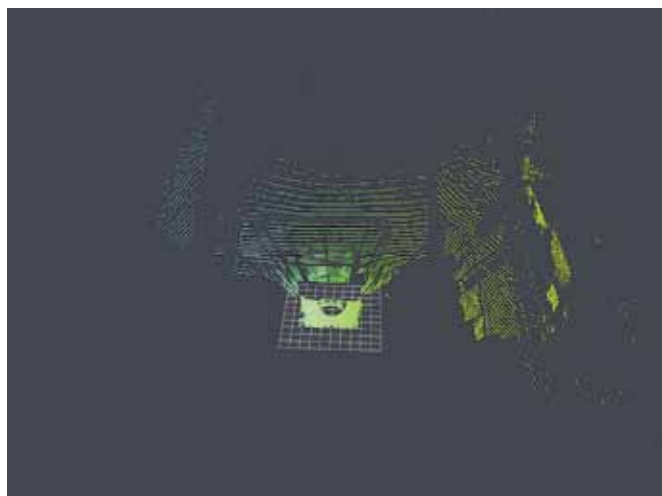


Рис. 2. Визуализация данных с лидара в RVIZ2

Fig. 2. Data visualization from lidar in RVIZ2



Рис. 3. Изображение с камеры во время движения карьерного самосвала

Fig. 3. Camera image during the movement of a mining dump truck

дар и инерциальное устройство в сочетании с дополнительным алгоритмом оптимизации. Авторы применяют нелинейную модель движения и данные инерциального датчика для коррекции искажений облака точек. Затем, на основе предсказанного движения, применяется алгоритм оптимизации для устранения шумов от IMU [14].

Однако опытным путем в прошлых экспериментах [15] было выявлено, что он, хотя и обладает большой эффективностью, имеет ряд недостатков:– не обеспечивает абсолютные координаты точек в пространстве;

- не интегрируется с GPS;
- имеет проблемы с определением уже известных позиций на карте для коррекции положения существующих объектов;

- не подходит для создания больших по площади карт из-за накапливаемой погрешности [10].

ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ввиду представленных недостатков было принято решение о разработке собственного программного обеспечения, которое бы использовало все данные, получаемые с различных сенсоров при построении карты с тем, чтобы добиться наибольшей точности.

Лидар, например Ouster, создает облака точек, представляющие расстояния до объектов. Эти данные дают пространственное представление об окружающей среде. В то же время GNSS предоставляет информацию о глобальном положении системы, а IMU регистрирует ориентацию и ускорение, что помогает определять направление движения и корректировать данные лидара при движении объекта.

После сбора данных встает задача их синхронизации. Алгоритмы объединяют информацию от лидара, IMU и GNSS, чтобы создать согласованное представление о местности. Поскольку данные собираются одновременно с разных источников, важно правильно соотнести их во времени и пространстве. Это позволяет учесть движение объекта, исправить смещения в координатах и устранить искажения, возникающие при наклоне или повороте устройства. Разработанный алгоритм обработки данных систем беспилотного управления карьерного самосвала для построения высокоточных 3D-карт местности представлен на рис. 4.

Как было сказано выше, проблема синхронизации данных решается посредством использования технологии ROS2, которая дает каждому пакету данных от каждого

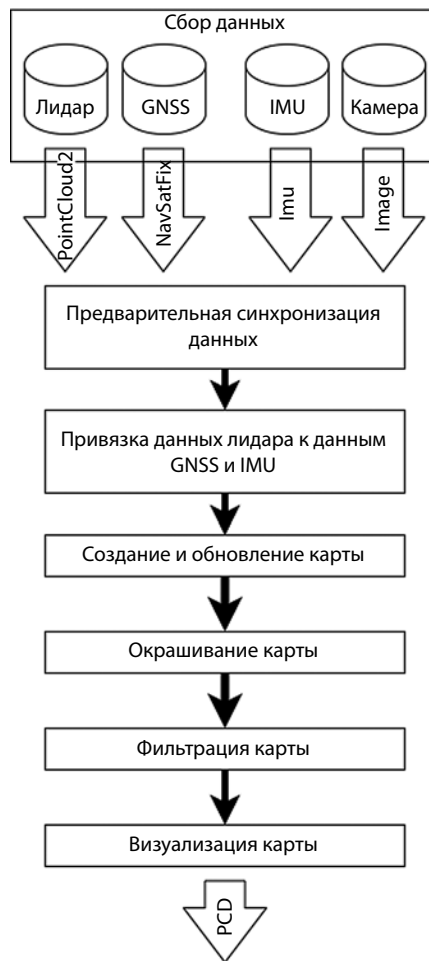


Рис. 4. Алгоритм обработки данных систем беспилотного управления карьерного самосвала для построения высокоточных 3D-карт местности

Fig. 4. Algorithm for processing data from unmanned control systems of a quarry dump truck for constructing high-precision 3D terrain maps

устройства метку времени, к которой можно привязываться.

Помимо этого, для правильного объединения данных с нескольких сенсоров необходимо точно знать их положение и ориентацию относительно друг друга. Это достигается с помощью процедуры калибровки, которая позволяет определить трансформации (позиции и ориентации) между сенсорами. В ROS2 для этого применяется система трансформаций tf2. Она хранит информацию о всех трансформациях (например, между лидаром и камерой, между IMU и GNSS) и позволяет получать данные о взаимном расположении сенсоров в любой момент времени. Это нужно для корректного совмещения 3D-координат точек облака с данными камеры.

Построение самой карты происходит преобразованием лидарных данных в трехмерную модель местности, где каждый точечный объект имеет свои координаты в пространстве. Использование данных IMU и GNSS позволяет не только создать статическую карту, но и обеспечить ее точную привязку к реальной глобальной системе координат, что особенно важно для навигации и отслеживания динамических объектов.

После построения карты местности происходят уточнение и фильтрация данных. Лидарные облака точек могут быть улучшены за счет алгоритмов фильтрации шума и устранения артефактов. Использование IMU помогает компенсировать возможные

ошибки лидара при движении объекта, а данные GNSS уточняют глобальное положение. В результате формируется точная 3D-карта местности, пригодная для анализа и использования в навигационных системах.

Для того чтобы окрасить карту, добавить ей цвета и текстуры, необходимо использовать данные с камеры. С помощью алгоритмов компьютерного зрения изображения с камер проецируются на 3D-координаты точек облака. Это возможно благодаря знанию точной калибровки между камерой и лидаром, что позволяет корректно соотнести 2D-пиксели с 3D-точками. На этом этапе карта окрашивается, получая текстуры и цвета, что делает ее визуально похожей на реальный мир.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанный алгоритм обработки данных систем беспилотного управления карьерного самосвала (навигационная система, лидар, видекамера) для построения высокоточных 3D-карт местности позволяет

визуализировать местоположение объекта с точными координатами позиционирования и осуществлять движение в беспилотном режиме карьерного самосвала с учетом происходящих изменений окружающей обстановки в режиме реального времени.

Список литературы • References

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665091 Российская Федерация. Модуль построения карты на основе показаний датчиков: № 2023664287: заявл. 06.07.2023; опубл. 12.07.2023 / И.С. Сыркин, Д.М. Дубинкин, И.Ф. Юнусов и др.; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева».
2. Соколов В.Г. Автопилотируемый автомобиль в системах автотранспортной телематики // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2018. № 2(16). С. 1-8.
Sokolov V.G. Autonomous car in automotive telematics systems. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2018;2(16):1-8. (In Russ.)
3. Brown C. Autonomous vehicle technology in mining. *Engineering & Mining Journal*. 2012;213(1):30-32.
4. Report 2 – Autonomous mining equipment. New Technology & Innovation. RFC Ambrian, May 2019, 36 p.
5. Golbasi O., Dagdelen K. Equipment replacement analysis of manual trucks with autonomous truck technology in open pit mines. APCOM 38. Golden, COL: Colorado School of Mines, 2017, pp. 19-9-19-20.
6. Parreira, J. An interactive simulation model to compare an autonomous haulage truck system with a manually-operated system. PhD thesis, Vancouver, The University of British Columbia, 2013, 228 p.
7. Мониторинг динамического состояния автономных тяжелых платформ на карьерных маршрутах горнорудных предприятий / С.Г. Костюк, И.В. Чичерин, Б.А. Федосенков и др. // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 4. С. 600-608. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-600-608.
Kostyuk S.G., Chicherin I.V., Fedosenkov B.A., Dubinkin D.M. Monitoring the dynamic state of autonomous heavy platforms on quarry routes of mining enterprises. *Ustojchivoe razvitie gornyykh territorij*. 2020;12(4):600-608. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-600-608.
8. Хазин М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. № 1. С. 4-15.
Khazin M.L. Robotic equipment for mining and mineral resources. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020;18(1):4-15. (In Russ.).
9. Системы управления автономного карьерного самосвала / И.С. Сыркин, Д.М. Дубинкин, И.Ф. Юнусов и др. / Россия молодая: Сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 19-21 апреля 2022 года. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. С. 420071-420078.
10. Родионов О.А., Рашид Б. Разработка семантической карты для беспилотного автомобиля с использованием метода одновременной локализации и картографирования // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2022. Т. 19. № 6. С. 900-914. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-900-914.
Rodionov O.A., Rashid B. Development of a semantic map for an unmanned vehicle using the method of simultaneous localization and mapping. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2022;19(6):900-914. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-900-914. (In Russ.)
11. Ouster. OS1 Lidar Sensor. [Электронный ресурс]. URL: <https://ouster.com/products/hardware/os1-lidar-sensor> (дата обращения: 15.10.2024).
12. Gyronav. [Электронный ресурс]. URL: <https://gyronav.ru/ru/> (дата обращения: 15.10.2024).
13. Ориент Системс [Электронный ресурс: сайт компании]. URL: <https://orsyst.ru/> (дата обращения: 15.10.2024).
14. ROS2 Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.ros2.org> (дата обращения: 15.10.2024).
15. ROS. RViz2. [Электронный ресурс]. URL: <https://index.ros.org/p/rviz2/> (дата обращения: 15.10.2024).

Authors Information

Dubinkin D.M. – PhD (Engineering), Associate, Associate Professor of the Department of Mining Machines and Complexes, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Sadovets V.Yu. – PhD (Engineering), Associate, Associate Professor of the Department of Information and Automated Production Systems, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: svyu.pmh@kuzstu.ru

Syrkin I.S. – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Information and Automated Production Systems, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: syrkin@kuzstu.ru

Korshunova E.V. – Junior Researcher of the Scientific Center “Digital Technologies”, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: korshunovaev@kuzstu.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.09.2024

Поступила после рецензирования: 21.10.2024

Принята к публикации: 31.10.2024

Paper info

Received September 15, 2024

Reviewed October 21, 2024

Accepted October 31, 2024