



Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала: <http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 004.9

ОБЗОР МЕТОДОВ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ

Капирусов М.А.

*ФГБОУ ВО "МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)",
Москва, Россия, (105005, город Москва, 2-Я Бауманская ул, д. 5 стр. 1), e-mail:
m.kapirusov@mail.ru*

В данной работе объектом исследования является анализ существующих методов автономной навигации, применяемой в робототехнике. В современном мире мобильные роботы являются неотъемлемой частью жизни человека. Они часто используются в повседневных задачах, например, доставке товаров. Автономная навигация является неотъемлемой частью современных средств передвижения и активно внедряется в жизнь человека. Для понимания автономной навигации необходимо были рассмотрены основные классификации. Проанализированы технологии, с помощью которых реализован тот или иной метод автономной навигации. Результатом обзора стала сравнительная таблица, в которой продемонстрированы особенности каждой автономной системы..

Ключевые слова: Робототехника, автономная система навигации, мобильный робот, методы автономной навигации, ROS, Gazebo

OVERVIEW OF AUTONOMOUS NAVIGATION METHODS

Kapirusov M.A.

*BAUMAN MOSCOW STATE TECHNICAL UNIVERSITY (NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY),
Moscow, Russia, (105005, Moscow, 2nd Baumanskaya ul, 5 bld. 1), e-mail: m.kapirusov@mail.ru*

In this paper, the object of research is the analysis of existing methods of autonomous navigation used in robotics. In the modern world, mobile robots are an integral part of human life. They are often used in everyday tasks, such as delivering goods. Autonomous navigation is an integral part of modern means of transportation and is actively being introduced into human life. To understand autonomous navigation, it was necessary to consider the main classifications. The technologies used to implement one or another method of autonomous navigation are analyzed. The result of the review was a comparative table, which demonstrates the features of each autonomous system.

Keywords: robotics, autonomous navigation system, mobile robot, autonomous navigation methods, ROS, Gazebo.

Введение

В современном мире робототехника является одной из самых актуальных тем. Применение мобильных роботов можно встретить в таких местах как аэропорт, больница, частное предприятие, фабрика и т.п. Они используются для перевозки или доставки предметов (грузов, посылок и пр.), патрулирования территории или уборки. Также мобильные роботы способны заменить человека в тех видах деятельности, где необходимо уменьшить опасность человеческой жизни. В век информационных технологий мобильные роботы являются неотъемлемой частью жизни человека, поскольку робот позволяет не только перемещаться в пространстве, но и взаимодействовать с объектами окружающей его среды [1].

Современные разработчики мобильных роботов пытаются всячески усовершенствовать свои модели: улучшить средства картографирования и ориентации, создать более совершенные датчики, увеличить мобильность, увеличить автономность и срок эксплуатации. За счёт этих улучшений мобильные роботы обладают такими внешними исследовательскими средствами как лазерный датчик LIDAR, камера или стереокамера, позволяющие сканировать местность, в которой находится робот.

Применяемые на данный момент роботы, в основном, управляются с помощью человека и мало автоматизированы. Для полноценной работы мобильному роботу необходимо построить карту помещения для корректной навигации и построения маршрута, соблюдая при этом все необходимые меры безопасности. Но без вмешательства человека построить точную карту местности для перемещения мобильного робота становится проблематично. Для решения данной проблемы стала изучаться тема автономной навигации роботов.

На данный момент проходят активные исследования на тему автономной навигации такими известными компаниями как Google, Amazon, Boston Dynamics, Yandex и другими [2]. Для автономной навигации используются сканирующий лазерный дальномер (LIDAR), датчики движения мобильного робота, датчики ориентирования и создания карт местности в трёхмерном пространстве. В ходе исследований было выяснено, что для достижения полностью автономной системы необходимо использовать все доступные средства в совокупности.

Для тщательного изучения работы с мобильными роботами существуют разнообразные симуляторы, позволяющие протестировать разнообразные ситуации, связанные с трёхмерной робототехникой перед созданием реальной автономной системы управления. Одним из таких симуляторов является Gazebo симулятор с открытым исходным кодом, который используется совместно с операционной системой для роботов ROS [3].

В данной работе рассмотрены вопросы, связанные с методами автономной навигации мобильных роботов и разработкой такой системы.

Обзор методов автономной навигации

Что такое автономная навигация?

Автономная навигация – это выполнение определенной задачи роботом без использования человеческой помощи.

В робототехнике выделяют три основных принципа автономной навигации [4]:

Локальный – нахождение координат робота по отношению к некому объекту (как правило к стартовой точке). Такой вид автономной навигации применяется разработчиками беспилотных самолетов и наземных роботов, карта действий которых заданы заранее.

Глобальный – нахождение координат робота при движении по длинным маршрутам.

Персональный – позиционирование роботом и его составляющих (датчиков, колес и всего тела) относительно близлежащих предметов и взаимодействие с ними. Данный метод актуален для роботов имеющие манипуляционные приспособления.

Так же системы навигации классифицируются на пассивные, активные и гибридные.

Пассивная система навигации заключается в том, что информация о координатах робота и других параметров его тела получены за счёт внешних устройств.

Активная система навигации заключается в том, что координаты робота и других параметров его тела получены самим роботом без участия внешних устройств.

Гибридная система навигации, в свою очередь, объединяет оба метода навигации и подкрепляет их программными алгоритмами нахождения точек исследования местности.

Пассивные системы навигации

Первые прототипы роботов с автономной навигации были созданы в 1960е годы [4]. Они передвигались по строго заданному маршруту при помощи электрических кабелей, проложенных под полом промышленного помещения. Также на роботов устанавливались упрощённые устройства считывания электромагнитного излучения, исходящего от кабеля, позволяющие роботу корректно позиционировать себя в пространстве.

Позже стали появляться первые системы машинного зрения, которые значительно упростили задачу создания полностью автономной системы навигации. Примером ранней реализации машинного зрения является робот с камерой и визуальные объекты (точки, линии и пр.), называемые маркерами, по которым робот ориентировался.

Со временем маркерная система стала эволюционировать и с помощью более современных аналоговых датчиков мобильные роботы смогли получать подробную информацию об окружающей среде.

С изобретением такой технологии как GPS автономная навигация сделала резкий шаг вперед. Она стала применяться в спутниках, автопилотах и прочих технологиях, но не взывала своей популярности в сфере мобильных роботов. Произошло это по причине того, что GPS не способен передать точные координаты робота в пространстве из-за наличия погрешности, что является абсолютно недопустимым фактором в сфере промышленного применения, так как возможны непредвиденные столкновения с роботом вплоть до летальных последствий для человека.

Разработчики пассивной локальной системы автономной навигации активно используют искусственные объекты для ориентирования. Примером такого искусственного объекта является специализированная вышка, с помощью которой робот ориентируется в пространстве получая с неё данные о местности. Такие системы реализованы в коммерческих предприятиях, где робот при помощи специализированных вышек довольно точно рассчитывает расстояния до объектов. Ключевым недостатком данной системы автономной навигации заключается проблема с нахождением ключевых ориентиров при изменении внешней среды.

Еще одним популярным примером пассивной автономной системы является GPS. Его принцип аналогичен предыдущему, но в качестве вышек используется спутник. Такой метод имеет ряд преимуществ, например, работу в недетерминированной среде и отсутствие ограничения размера исследуемой территории (с условием стабильного подключения к спутнику). Ключевым недостатком в работе GPS является снижение точности работы в помещении и метрах плохого подключения к спутнику.

Другим примером пассивной локальной системы автономной навигации является аппаратная система, генерирующая радиосигнал, который обрабатывается за счёт процессора. На определенной местности располагаются фиксированные радиовышки, которые и помогают роботу перемещаться. Недостатком данной системы является то, что робот неспособен обходить препятствия или использовать альтернативный способ маршрута. Если же сделать комплексную систему радиовышек, то на обработку данных процессором уйдет достаточно большое время.

Самым эффективным способом реализации пассивной локальной автономной навигации является система непрерывных радиометок. Её принцип заключается в том, что специальное устройство создает сигнал, распространяемый на большую площади и имеющий определенные параметры, которые меняются в зависимости от расстояния от источника. Минусом является дороговизна и низкая надежность системы.

Примером применения данной системы является мобильный робот Mini-Ranger Falcon от компании Motorola, который определяет координаты с точностью 2 м на удалении 75 км от радиомаяка [5].

Активные системы навигации

Наиболее популярным представителем этой группы является инерционная навигационная система (ИНС) [6]. Изначально её использовали в ракетостроении. Примером ИНС является гироскоп, который позволяет измерить момент внешней силы, прикладываемый к телу и за счёт этого рассчитать положение и скорость этого тела относительно точки, с которой начиналось движение. Механические акселерометры, в свою очередь, способны определить схожим образом собственное ускорение.

Активное применение ИНС можно встретить в самолётах, кораблях, машинах, устройствах наведения и пр. Но основным недостатком механических ИНС является накопление ошибок измерения за время активной работы. Это означает, что чем больше времени прошло с начала движения робота, тем больше будет погрешность в определении местоположения и вычислении координат. Также ИНС является низкоэффективной в работе с теми объектами, где скорость непостоянна и имеет изменчивый характер.

Самым простым устройством ИНС, применяемым в робототехнике, является одномер [7]. Принцип его заключается в том, что он периодически измеряет скорость вращения колеса. В совокупности имея параметры диаметра колеса, одномер с лёгкостью вычисляет пройденное расстояние. Недостатком является не идеальность покрывки, за счёт чего могут возникнуть ошибки.

С развитием бесконтактных систем локальной навигации стали появляться устройства генерации радио, ультразвуковых или инфракрасных сигналов, а также лазерных дальномеров. В свою очередь эффективность данных устройств напрямую зависит от характеристики местности, в которой расположен робот.

Дальномеры [7]– это устройства, которые определяют расстояние между объектами с помощью встроенной системы генерации и получения сигнала. Существует несколько популярных видов дальномеров: лазерный и радио.

В лазерном дальномере (LIDAR) расстояние определяется с помощью испускания лазерных волн оптического диапазона с дальнейшей регистрацией лазерных импульсов, которые были рассеяны объектами.

В радиодальномере расстояние определяется с помощью радиоволн, которые отражаются от объектов исследования. В основу принципа действия положено определение времени прохождения радиоволны от радиодальмера до какого-либо объекта и обратно, расстояние до которого будет прямо пропорционально этому времени.

Данные методы исследования территории имеют ключевые недостатки в виде накопления ошибок, что может привести к неточному построению карты местности.

Гибридные системы навигации

Основным недостатком ранее упомянутых систем автономной навигации в совокупности являлось отсутствие какой-либо интеллектуальной составляющей. Гибридная система автономной навигации, в свою очередь, использует совокупность всех средств и занимается анализом местности, в которой расположен робот. С помощью доступных роботу устройств, он пытается создать собственный образ окружающей его местности, в которой ему предстоит перемещаться. После чего он формирует маршрут и движется по нему, постоянно сверяя имеющуюся у него карту местности с данными, полученными от устройств внешней среды.

Гибридные системы навигации [8] способны самостоятельно создавать двумерные карты области, в которой они перемещаются. Для этого применяется такие технологии, как лазерный дальномер (LIDAR). Но робот не может воссоздать максимально чёткую карту местности, используя только LIDAR. Из-за множества факторов, таких как эхо, помехи и пр. Поэтому в построении карты местности используются такие датчики, как одномер и др. В совокупности роботу удастся построить необходимую для работы карту местности.

Одним из широко используемых в гибридных методах навигации является SLAM-метод.

SLAM (simultaneous localization and mapping — одновременная локализация и построение карты) — метод, используемый в мобильных автономных средствах для построения карты в неизвестном пространстве или для обновления карты в заранее известном пространстве с одновременным контролем текущего местоположения и пройденного пути.

С математической точки зрения, SLAM пытается оценить карту и весь путь, пройденный роботом. Таким образом, поза робота рассчитывается только в конце траектории, проделанной роботом. Вероятностное определение подхода полного SLAM может быть дано следующим образом [9]:

$$u_{\{1:t\}} = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_t\},$$

где u представляет собой управление роботом в момент времени t

$$z_{\{1:t\}} = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_t\},$$

где z представляет собой информацию об окружающей среде, обозреваемой роботом в момент времени t

$$x_{\{1:t\}} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_t\},$$

где x — полученное местоположение робота в момент времени t . Таким образом, для расчета траектории робота, можно все представить в следующем виде:

$$p(x_{\{1:t\}}, m | z_{\{1:t\}}, u_{\{1:t\}}).$$

где m представляет собой построенную карту. На Рисунке 1 представлена графическая модель SLAM подхода.

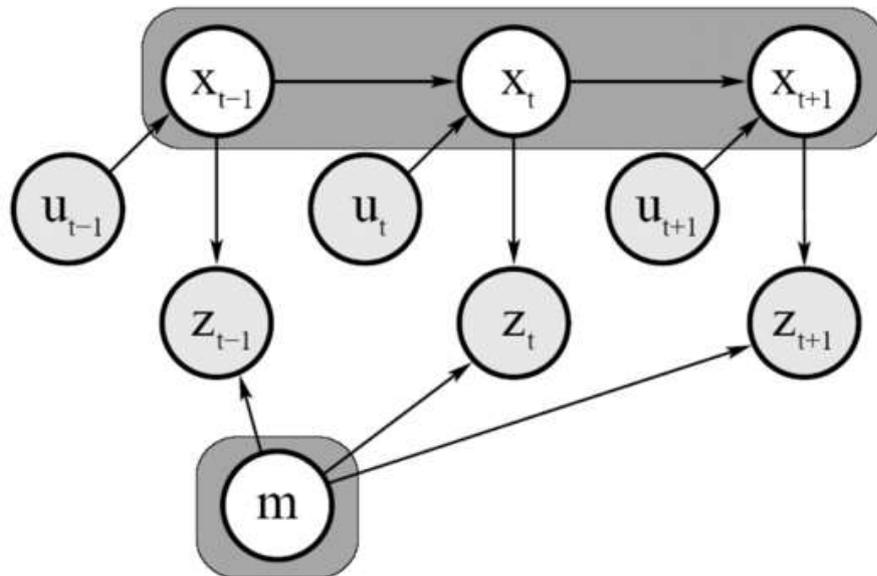


Рисунок 1 – Графическая модель SLAM подхода [9]

Структурное представление карты местности зависит от среды функционирования.

Для выбора наилучшей реализации задач SLAM вводится условная классификация сред функционирования:

с многочисленными ярко выраженными ориентирами (например, поле с отдельно стоящими кустами)

с отсутствием ярко выраженных ориентиров (например, коридоры, комнаты, где в качестве ориентиров могут выступать углы)

Если в исследуемой среде нет возможности найти ориентиры, то её рационально представить в виде массива, где элементы, отражающие положение препятствий, имеют значение 1, а все остальные — 0. (Такое представление карты применяется, например, в алгоритме DP-SLAM [10])

В случае, когда в исследуемой местности есть многочисленные ориентиры, карта представляет собой массив оценок их местоположения. Размерность массива $R \cdot m$, где R — размерность пространства, m — количество ориентиров.

Для хранения структуры такой карты проще всего использовать картографическую базу данных, которая отражает положение ориентиров, их уникальные свойства и взаимосвязи. Матрица оценок состояния динамической системы на основе расширенного Филтра Калмана использует именно этот вариант представления карты.

Несмотря на решение многих задач автономной навигации SLAM-метод имеет ключевые особенности, влияющие не его функционал. Например, для корректной работы алгоритма анализа местности все объекты должны быть стационарными и не менять свое местоположение, иначе алгоритм продублирует их. Эту проблему решает гибридная система навигации, которая добавляет использование дальномеров, таких как LIDAR, стереокамера и одномер.

Сравнение методов автономных навигаций

Произведя обзор методов автономной навигации, можно выделить совокупность особенностей каждого из них.

Таблица 1. - Сравнение методов автономной навигации

	Пассивная		Гибридная	Активная	
	GPS	Радио метки		SLAM	Колесная одометрия
Не накапливают ошибку	Да	Да	Да	Нет	Нет
Высокая точность на коротких траекториях	Нет	Нет	Да	Да	Да
Работает в недетерминированной среде	Да	Нет	Да	Да	Да
Не снижает точность в помещении	Нет	Нет	Да	Да	Да
Размер территории не ограничен	Да	Нет	Нет	Да	Да
Инвариантна к проскальзыванию колес	Да	Да	Да	Нет	Да
Не требует стационарных объектов	Да	Нет	Нет	Да	Да
Инвариантна к изменениям в среде	Да	Да	Нет	Да	Да

Источник: анализ автора

Таким образом можно сделать вывод, что каждый из методов навигации имеет свои достоинства и недостатки. Совокупность всех этих методов навигации способствует улучшению алгоритма и выбора определенного метода зависит от типа решаемой задачи.

Список литературы

1. Костишин М. О., Жаринов И. О., Суслов В. Д. Автономная навигация мобильного робота на основе ультразвукового датчика измерения расстояний // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №. 2 (84).
2. Тенденции развития мобильных роботов: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://controleng.ru/innovatsii/robototehnika/tendencii-razvitiya-mobilnyh-robotov/>
3. Документация ROS: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials>
4. Навигация мобильных роботов: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.computer-museum.ru/frgnhist/robonav.htm>
5. Lachapelle G. et al. Shipborne GPS kinematic positioning for hydrographic applications // Navigation. – 1988. – Т. 35. – №. 1. – С. 73-88.

6. Различия БИНС и ИНС: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://mp-lab.ru/difference-bins-and-ins/>
7. Урваев И. Н. Навигация мобильного робота на основе методов лазерной дальнометрии //Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2021. – №. 1 (35). – С. 44-51.
8. Синютин С. А. Гибридная навигационная система для автомобиля //Ползуновский вестник. – 2011. – №. 3-1. – С. 179-183.
9. de Freitas C. M. S. Autonomous navigation with simultaneous localization and mapping in/outdoor. – 2020.
10. Eliazar A., Parr R. DP-SLAM: Fast, robust simultaneous localization and mapping without predetermined landmarks //IJCAI. – 2003. – Т. 3. – С. 1135-1142.

References

1. Kostishin M. O., Zharinov I. O., Suslov V. D. Autonomous navigation of a mobile robot based on an ultrasonic distance measurement sensor //Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2013. – №. 2 (84).
 2. Trends in the development of mobile robots: [Electronic resource] – Access mode: <https://controleng.ru/innovatsii/robototekhnika/tendencii-razvitiya-mobilnyh-robotov/>
 3. ROS documentation: [Electronic resource] – Access mode: <http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials>
 4. Navigation of mobile robots: [Electronic resource] – Access mode: <https://www.computer-museum.ru/frgnhist/robonav.htm>
 5. Lachapelle G. et al. Shipborne GPS kinematic positioning for hydrographic applications //Navigation. – 1988. – Vol. 35. – No. 1. – pp. 73-88.
 6. Differences between BINS and INS: [Electronic resource] – Access mode: <https://mp-lab.ru/difference-bins-and-ins/>
 7. Urvaev I. N. Navigation of a mobile robot based on laser rangefinder methods //Measurement. Monitoring. Management. Control. – 2021. – №. 1 (35). – Pp. 44-51.
 8. Sinyutin S. A. Hybrid navigation system for a car //Polzunovsky bulletin. – 2011. – №. 3-1. – pp. 179-183.
 9. de Freitas C. M. S. Autonomous navigation with simultaneous localization and mapping in/outdoor. – 2020.
 10. Eliazar A., Parr R. DP-SLAM: Fast, robust simultaneous localization and mapping without predetermined landmarks //IJCAI. – 2003. – Vol. 3. – pp. 1135-1142.
-