

АВТОНОМНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВЫСОКОМАНЕВРЕННОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ОМНИКОЛЕСАМИ В НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ СРЕДЕ*

Ю.Л. Караваев, А.В. Клековкин, К.С. Ефремов, В.А. Шестаков

Работа посвящена решению задачи автономного объезда препятствий, возникающих на пути движения высокоманевренного омниколесного мобильного робота. Приведено описание конструкции мобильного робота и структурная схема его системы управления. Функционирование мобильного робота осуществляется с помощью средств мета-операционной системы ROS. Приведены результаты экспериментальных исследований, разработанных алгоритмов управления для созданного прототипа мобильного робота.

Ключевые слова: омниколесный робот, лидар, навигация, метод одновременной локализации и построения карты (SLAM).

AUTONOMOUS MOVING OF A HIGHLY MANEUVERABLE MOBILE ROBOT WITH OMNIWHEELS IN UNKNOWN ENVIRONMENT

Yu.L. Karavaev, A.V. Klekovkin, K.S. Efremov, V.A. Shestakov

This paper is dedicated to solve a task of autonomous obstacle avoidances, which arise on a path of motion of a highly maneuverable omniwheel mobile robot. Design description and a system architecture of the mobile robot are described. Mobile robot functionality is realized by means of instrumentality of the ROS meta-operating system. Experimental research results, the developed control algorithm for the created prototype of a mobile robot are described.

Keywords: omniwheel robot, lidar, navigation, simultaneous localization and mapping (SLAM).

Введение

Степень автономности современных робототехнических систем характеризуется их способностью идентификации объектов окружающей среды и возможностью определения их локализации в недетерминированных условиях, что решается с помощью систем технического зрения [1]. В настоящее время активно развиваются и тестируются скоростные и достаточно точные сенсоры, позволяющие мобильным роботам, беспилотным автомобилям и беспилотным летательным аппаратам идентифицировать окружающие объекты, а их системы управления на основании полученной информации формируют стратегию дальнейшего

поведения. К числу таких сенсоров относятся оптические камеры, лазерные сканирующие системы (лидары), времяпролетные камеры и др. Однако их стоимость значительно превышает стоимость самих мобильных платформ и может достигать нескольких миллионов рублей.

С другой стороны, при формировании стратегии поведения автономного мобильного робота система управления должна учитывать ограничения, накладываемые его конструкцией на возможность реализации различных движений, необходимых, например, для объезда препятствия или исключения столкновения с ним. Так, хорошо известные конструкции мобильных роботов с автомобильной компоновкой

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Удмуртской республики в рамках научного проекта № 18-48-183004, работа Клековкина А.В. выполнена в рамках программы «УМНИК» при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (№12593ГУ/2017).

шасси [2] и двухколесными шасси со сферической опорой или колесом рояльного типа [3] имеют существенные ограничения по маневренности, несмотря на простоту и распространенность конструкций. При реализации автономного режима движения это может привести к выполнению дополнительных маневров, отклонению траектории движения от заданной, что скажется на времени выполнения задачи.

В отличие от мобильных роботов с обычными колесами омниколесные мобильные роботы являются высокоманевренными, что позволяет им реализовать движение с места в любом направлении. Известные конструкции высокоманевренных мобильных роботов [4–7] при реализации автономного движения позволяют формировать наиболее быстрые маршруты движения, в том числе с объездом препятствий. Однако в существующих пакетах навигации нет специально разработанных с учетом конструкции и возможностей омниколесных роботов.

В данной работе приведены модель высокоманевренного мобильного робота с разработанной системой управления на основе недорогой элементной базой под управлением метаоперационной системы *ROS (Robot Operation System)* [8] с открытым исходным кодом и пакетом навигации *g-mapping* [9] и результаты проведенных экспериментальных исследований и выводы о применимости кинематической модели движения омниколесного робота.

Конструкция высокоманевренного мобильного робота

Высокоманевренный мобильный робот представляет собой платформу, к которой крепятся четыре роликонесущих колеса *Mecanum* [5, 6] (ролики на колесах расположены под углом 45° к оси колеса) с приводами. Индивидуальное оснащение каждого из колес своим приводом дает возможность задавать требуемые сочетания

скоростей вращения колес, что позволяет реализовать всенаправленные перемещения мобильного робота на плоскости. На каждом приводе колеса установлен датчик обратной связи (энкодер), с помощью которого обеспечивается вращение колеса с заданной скоростью. Для поддержания требуемой скорости каждого колеса разработан пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД)-регулятор. Определение коэффициентов регулирования для рассматриваемого высокоманевренного робота (рис. 1) проводилось согласно экспериментальной методике, приведенной в работе [10].

На роботе установлен лазерный датчик расстояния – лидар (транслитерация *LIDAR*, англ. *Light Identification Detection and Ranging*), формирующий цилиндрическую развертку с углом обзора 360°.

Для управления мобильным роботом используются кинематическая модель движения, описанная в работах [5, 7]. Данная модель строится на неголономной связи, исключающей проскальзывание роликов колес относительно подстилающей поверхности. В этом случае уравнение, связывающее угол поворота колеса с заданной траекторией, запишется в виде

$$\dot{\psi}_i = -\frac{1}{(\alpha_i, \tau_i) \cdot h} \cdot (V_{oi}, \alpha_i), \quad (1)$$

где ψ_i – угол поворота i -го колеса ($i = 1, \dots, 4$); α_i – единичный вектор i -го колеса, направленный вдоль оси закрепления роликов; τ_i – касательный единичный вектор i -го колеса к плоскости колеса в точке контакта; h – радиус колеса; V_{oi} – вектор скорости центра i -го колеса, который определяется как

$$V_{oi} = V + \omega \cdot r_p$$

где $V = (x, y, 0)$ – линейная скорость робота; $\omega = (0, 0, \omega_z)$ – угловая скорость вращения



Рис. 1. Высокоманевренный мобильный робот:
а – конструкция в сборе; б – отдельный колесный модуль

робота относительно вертикальной оси, проходящей через его центр масс; r_i – радиус-вектор, направленный от центра мобильного робота до центра i -го колеса, определяющий его положение. В общем случае траектория может быть задана функциями изменения соответствующих координат от времени.

Подставляя в уравнение (1) известные значения векторов, определяющих геометрию робота, изображенного на рис. 1, получим следующие выражения для расчета управляющих воздействий, в качестве которых выступали угловые скорости колес:

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \\ \dot{\psi}_3 \\ \dot{\psi}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -21,05\dot{x} - 21,05\dot{y} + 4,76w_z \\ -21,05\dot{x} + 21,05\dot{y} + 4,76w_z \\ 21,05\dot{x} + 21,05\dot{y} + 4,76w_z \\ 21,05\dot{x} - 21,05\dot{y} + 4,76w_z \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Система управления мобильным роботом

Для реализации автономного объезда препятствий на пути движения мобильного робота разработана система управления, схема которой приведена на рис. 2. Система управления реализована в мета-операционной системе *ROS Kinetic*, установленной на одноплатный компьютер *Gigabyte N3050N-D2P*. Подробное описание примеров использования *ROS* для управления мобильными роботами можно найти в работах [8, 9].

Для реализации автономного движения рассматриваемого мобильного робота использованы следующие пакеты из состава *ROS*:

- *rp-lidar* – пакет для преобразования данных с лидара марки *RPLidarA1* фирмы *Slamtec*, разработанный специально для *ROS*. Сенсор делает 2000 измерений в секунду и вращается со скоростью около 5,5 об./с, что позволяет делать измерения через каждые 0,99°.

В системе управления пакет *rp-lidar* преобразует их в стандартизированные для *ROS* сообщения, включающие заголовок со служебной ин-

формацией и массив из 360 значений. Каждое значение элемента массива соответствует расстоянию до объекта, а индекс – углу, при котором это расстояние измерено. Пропущенные и неправильные значения заменяются нулями;

- *laser-scan-matching* – пакет, реализующий алгоритм лазерной одометрии (оценка положения робота путем анализа последовательного лазерного сканирования). Выходными данными пакета являются координаты робота относительно точки начала движения;

- *gmapping* – пакет, реализующий *SLAM* алгоритм [9]. На вход подаются два вида данных: текущий массив из 360 значений расстояний и координаты робота относительно точки начала движения. По этим данным алгоритм выстраивает карту, состоящую из квадратов. Каждый квадрат карты содержит значение, равное вероятности нахождения в нем препятствия. После прохождения через пороговые функции квадраты делятся на три типа по величине потенциального поля: свободный, занятый и неисследованный.

- *move-base* – пакет планирования траектории движения и управления перемещением. Задачей пакета являются построение траектории и управление следованием по заданной траектории. Для обозначения препятствий пакет применяет метод потенциальных полей. Подробнее применение метода рассмотрено в статьях [11, 12]. Траектория строится в обход стационарных и движущихся препятствий, на расстоянии не менее ширины конфигурируемого отталкивающего потенциального поля. Пакет имеет два планировщика пути: локальный и глобальный. Глобальный планировщик пути по принятой на вход карте строит глобальную траекторию до цели. Локальный планировщик выстраивает траекторию, уменьшающую отклонение от глобальной траектории, и задает вектор направления движения робота. Выходными данными пакета являются траектория движения мобильного робота и вектор движения робота;

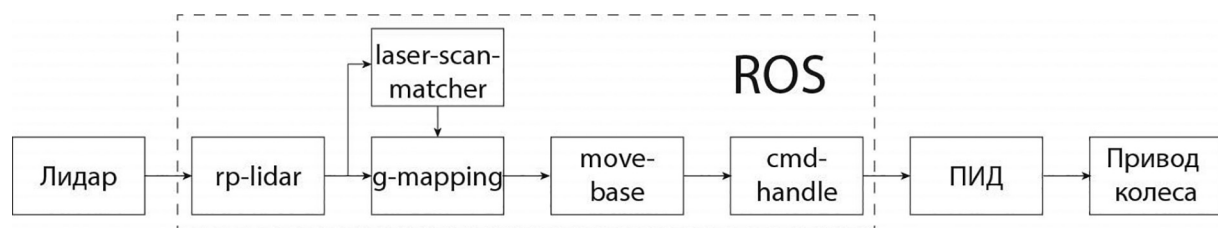


Рис. 2. Структурная схема реализации системы управления мобильного робота

– *cmd-handle* – пакет, разработанный по концепции ROS для рассматриваемого омниколесного мобильного робота. Пакет преобразует команды управления движением робота в команды управления двигателями приводов колес робота в соответствии с кинематическими уравнениями (2).

Проведение экспериментальных исследований

Для проверки алгоритма автономного движения робота проведены две серии экспериментов по исследованию движения высокоманевренного мобильного робота в заданную точку на тестовом полигоне размерами $1,5 \times 2$ м. Каждая серия включала по пять экспериментов при одинаковых условиях.

Первая серия экспериментов проводилась на полигоне без препятствий. В ходе экспериментов мобильный робот передвигался из начальной точки с координатами (0;0) в точку с координатами (1,4; 0,7), где координаты заданы в системе координат, связанной с геометрическим центром мобильного робота в начальный момент движения, т.е. в месте включения SLAM алгоритма. Траектория движения формировалась с помощью пакета *move-base* в процессе движения мобильного робота с учетом окружающих объектов. Типовая траектория движения мобильного робота в рамках первой серии экспериментов приведена на рис. 3, а. Данное изображение получено с помощью визуализации данных, полученных с лидара и обработанных

системой управления. Границы полигона (см. рис. 3, а) обозначены черным цветом, исследованная часть – светлая, не исследованная – темная. Области вблизи границ полигона обозначают потенциальные поля.

Управляющие воздействия, в качестве которых выступали угловые скорости вращения колес и которые формировались системой управления для движения вдоль данной траектории, приведены на рис. 3, б. Изменяющийся характер угловых скоростей колес во времени отражает работу алгоритма управления в процессе движения мобильного робота и работу метода потенциальных полей.

Максимальное отклонение конечной точки траектории от заданной не превышало 3 см, что позволяет сделать вывод о возможности точного позиционирования высокоманевренного мобильного робота в автономном режиме.

Во второй серии экспериментов в центре полигона на пути движения робота размещено препятствие прямоугольной формы. На карте препятствие показано в виде черного прямоугольника с потенциальным полем снаружи и неисследованной частью внутри.

На рис. 3, в приведена типовая траектория движения, огибающая препятствие, в точку с координатами (1,25; 0,2), а на рис. 3, г соответствующие зависимости угловых скоростей вращения колес от времени. Характер изменения угловых скоростей позволяет проанализировать работу системы управления, а именно, моменты ускоренного прямолинейного дви-

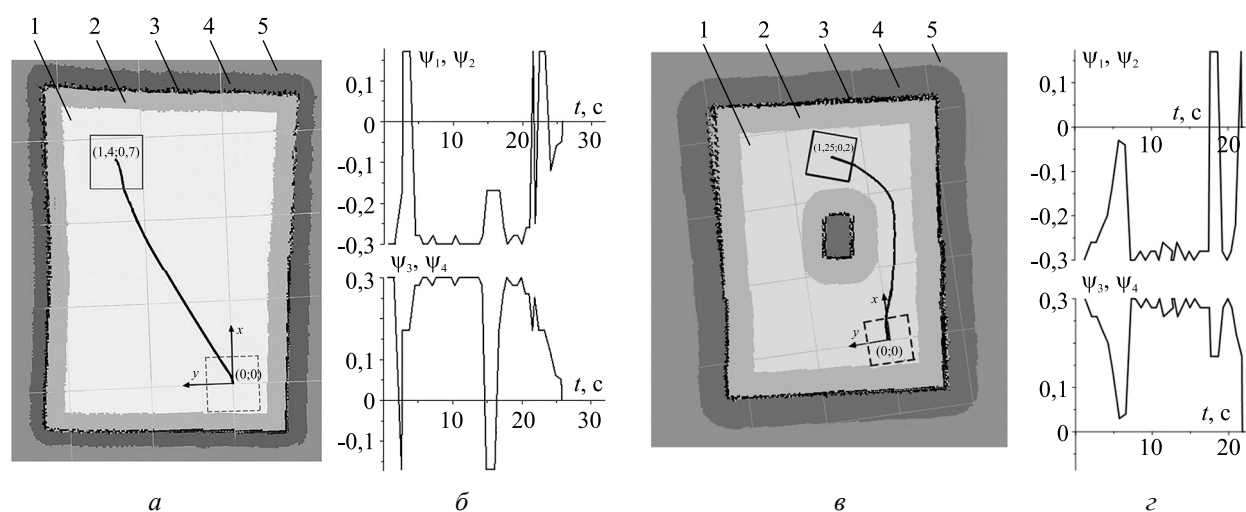


Рис. 3. Движение робота в заданную точку и графики изменения угловых скоростей колес при отсутствии препятствий (а, б соответственно) и с препятствием (в, г соответственно):

- 1 – свободная часть карты; 2 – область вблизи препятствий;
- 3 – границы полигона (непреодолимое препятствие); 4 – потенциальное поле препятствия со стороны неисследованной части карты; 5 – неисследованная область

жения, поворотов, замедленного движения, что вызвано появлением препятствия на пути следования мобильного робота и формированием траектории объезда.

Траектория движения робота находится в исследованной свободной области и не затрагивает области с препятствиями. Максимальное отклонение конечной точки траектории в данной серии экспериментов также не превышает 3 см. При этом траектория движения омниколесного мобильного робота является гладкой, без резких перегибов или дополнительных вспомогательных маневров, которые, как правило, сопровождают движение мобильных роботов с классическими колесами.

Результаты проведенных экспериментов подтверждают возможность точного позиционирования высокоманевренного мобильного робота в автономном режиме при недорогой элементной базе, а также работоспособность алгоритма и системы управления для движения мобильного робота при наличии препятствия на пути его движения.

Замедление движения мобильного робота, что соответствует уменьшению угловых скоростей вращения колес (начиная с 5-й с, см. рис. 3, з) указывает на момент, когда система управления начинает перестраивать траекторию движения и пересчитывать управляющие воздействия. Из-за низкой производительности системы управления и не высокой точности лазерного сканера процесс локализации с учетом препятствия и формирование новых управлений замедляют скорость движения мобильного робота и в общем случае могут привести к его остановке.

Для увеличения скорости работы алгоритмов и обеспечения равномерной скорости движения робота, в дальнейшем необходимо перенести систему управления на более производительную аппаратную платформу.

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о применимости кинематической модели движения омниколесного робота для расчета управляющих воздействий и планирования траектории движения с помощью программных пакетов мета-операционной системы ROS. При этом в качестве сенсоров, используемых для построения карты окружающей среды, использовался наиболее доступный однолучевой лазерный сканирующий дальномер. Проведен-

ные эксперименты демонстрируют работоспособность алгоритма при следовании робота по траектории без препятствий и с объездом статических препятствий.

В дальнейшем предполагается усовершенствовать систему управления для повышения точности и скорости движения робота, а также для обеспечения его равномерного движения. Помимо переноса системы управления на более производительную платформу, необходимо решить задачу формирования оптимальных маневров омниколесных мобильных роботов, учитывая их высокую маневренность и динамику движения.

Также планируется решить задачу определения динамически движущихся объектов, в том числе с прогнозированием их движения.

Список литературы

1. Писаревский А.Н., Чернявский А.Ф., Афанасьев Г.К. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение). Л.: Машиностроение. 1988 – 424 с.
2. Алгоритмы управления четырехколесным роботом при движении по пересеченной местности / М.И. Евстигнеев, Ю.В. Литвинов, В.В. Мазулина, Г.М. Мищенко // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 9. С. 738–741.
3. Boucher S. Obstacle detection and avoidance using turtlebot platform and xbox kinect // Department of Computer Science, Rochester Institute of Technology. 2012. P. 56.
4. Караваев Ю.Л., Клековкин А.В., Лесин С.К. Мультисенсорная информационно-измерительная система мобильного робота для реализации движения в недетерминированной среде // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 4. С. 111–115.
5. Borisov A.V., Kilin A.A., Mamaev I.S., Dynamics and Control of an Omniwheel Vehicle // Regular and Chaotic Dynamics. 2015. Vol. 20. No. 2. P. 153–172.
6. Караваев Ю.Л., Килин А.А. Динамика сфероробота с внутренней омниколесной платформой // Нелинейная динамика. 2015. Т. 11. № 1. С. 187–204.
7. Килин А.А., Караваев Ю.Л. Кинематическая модель управления сферороботом с неуравновешенной омниколесной платформой // Нелинейная динамика. 2014. Т. 10. № 4. С. 497–511.

8. ROS: an open-source Robot Operating System / *Quigley M. et al.* // ICRA Workshop on Open Source Software. 2009. Vol. 3. No. 3.2. P. 5.
9. *Grisetti G., Stachniss C., Burgard W.* Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters // IEEE Transactions on Robotics. 2007. Vol. 23. No. 1. P. 34–46.
10. Experimental investigations of a highly maneuverable mobile omniwheel robot / *A.A. Kilin, P. Bozek, Y.L. Karavaev, A.V. Klekovkin, V.A. Shestakov* // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2017. Vol. 14. No. 6. P. 1–9.
11. *Ge S. S., Cui Y. J.* Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method // Autonomous Robots. 2002. Vol. 13. No. 3. P. 207–222.
12. *Wang Y., Chirikjian G.S.* A new potential field method for robot path planning // Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on. – IEEE. 2000. Vol. 2. P. 977–982.

**КАРАВАЕВ
Юрий Леонидович**

E-mail: karawaew_yura@mail.ru
Тел.: (950) 811-51-10

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Мехатронные системы» ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. Сфера научных интересов: мобильные роботы, системы управления, мехатроника. Автор более 30 научных статей.

**КЛЕКОВКИН
Антон Владимирович**

E-mail: klanvlad@mail.ru
Тел.: (950) 170-09-91

Аспирант кафедры «Мехатронные системы» ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. Сфера научных интересов: мобильные роботы, системы управления, мехатроника. Автор порядка 15 научных статей.

**ЕФРЕМОВ
Кирилл Сергеевич**

E-mail: ks.efremov18@gmail.com
Тел.: (950) 150-31-38

Аспирант кафедры «Мехатронные системы» ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. Сфера научных интересов: мобильные роботы, системы управления, мехатроника. Автор 3 научных статей.

**Шестаков
Вячеслав Александрович**

E-mail: slafik9526@gmail.com
Тел.: (951) 200-32-09

Магистрант кафедры «Мехатронные системы» ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. Сфера научных интересов: мобильные роботы, системы управления, мехатроника. Автор 5 научных статей.