

УДК 681.321

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-5

НАВИГАЦИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

И. Н. Урваев

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

iurvaev@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования в данной работе является система навигации для мобильного робота-спасателя, предназначенного для поиска пострадавших людей, находящихся под обломками разрушенных конструкций. Предметом исследования являются методы локализации и построение карты неизвестной местности. Целью исследования является поиск наиболее универсального и точного способа навигации для управления движением мобильного робота в среде с динамическими препятствиями. *Материалы и методы.* Для решения поставленных задач в работе использовались методы лазерной дальнометрии и SLAM-методы для локализации и построения карты местности. *Результаты.* Предложен алгоритм управления системой навигации мобильного робота, использующий метод лазерной дальнометрии для сканирования окружающего пространства. Местоположение робота определяется в системе локальных координат, связанных с исходным положением робота, так как априорная информация о его положении в пространстве отсутствует. Навигационная система робота самостоятельно строит карту его передвижения. *Выводы.* Предложенный способ навигации мобильного робота на основе лидара позволяет построить карту пространства, структура которого заранее неизвестна, и определить позицию робота на ней. Необходимость использования жесткой логики системы навигации снижает маневренность и скорость передвижения мобильного робота, поэтому для оптимизации траектории движения целесообразно применять технологии искусственного интеллекта.

Ключевые слова: мобильный робот, система навигации, лазерный дальномер, сканирующий лидар, карта местности, динамические препятствия

Для цитирования: Урваев И. Н. Навигация мобильного робота на основе методов лазерной дальнометрии // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 44–51. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-5

MOBILE ROBOT NAVIGATION BASED ON LASER RANGE METHODS

I.N. Urvaev

Penza State University, Penza, Russia

iurvaev@mail.ru

Abstract. *Background.* The object of research in this work is a navigation system for a mobile rescue robot designed to search for injured people under the rubble of destroyed structures. The subject of the research is localization methods and building a map of an unknown area. The aim of the study is to find the most versatile and accurate navigation method for controlling the movement of a mobile robot in an environment with dynamic obstacles. *Materials and methods.* To solve the set tasks, the work used the methods of laser ranging and SLAM-methods for localization and building a map of the area. *Results.* An algorithm for controlling a navigation system of a mobile robot is proposed using the method of laser ranging for scanning the surrounding space. The location of the robot is determined in a system of local coordinates associated with the initial position of the robot, since there is no a priori information about its position in space. The robot's navigation system independently builds a map of its movement. *Conclusions.* The proposed lidar-based navigation method for a mobile robot makes it possible to construct a map of space, the structure of which is unknown in advance, and to determine the position of the robot on it. The need to use the rigid logic of the navigation system reduces the maneuverability and speed of movement of a mobile robot, therefore, to optimize the trajectory of movement, it is advisable to use artificial intelligence technologies.

Keywords: mobile robot, navigation system, laser range finder, scanning lidar, terrain map, dynamic obstacles

For citation: Urvaev I.N. Mobile robot navigation based on laser range methods. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:44–51. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-5

© Урваев И. Н., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В настоящее время практически во всех развитых промышленных странах активно ведутся разработки мобильных роботов. Мобильный робот – это устройство, которое может самостоятельно передвигаться в пространстве и решать поставленные перед ним задачи с высокой степенью автономии. В создании мобильных роботов, прежде всего, заинтересованы военные и различные службы безопасности, для которых роботы могут заменить людей в сложных и опасных для жизни условиях. Все больший интерес для людей представляют не только промышленные мобильные роботы, но и роботы, созданные как для помощи людям – роботы-пылесосы, роботы-поводыри, так и для развлечения – роботы-собаки, квадрокоптеры [1].

Несмотря на значительный прогресс в области робототехники, основной проблемой создания таких устройств является навигация. Бортовая система управления робота должна уметь строить маршрут, управлять параметрами движения, адекватно интерпретировать поступающую от датчиков информацию о состоянии окружающей среды и отслеживать собственные координаты в сложной помеховой обстановке.

Существующие навигационные системы достаточно хорошо проработаны для применения в индустриальной сфере, где среда детерминирована и является статической. Для работы в незнакомой среде используемые алгоритмы навигации либо не обеспечивают достаточную точность и надежность локализации робота, либо требуют значительных вычислительных ресурсов. Последнее сильно сказывается на массогабаритных размерах, а также на потреблении энергии и, как следствие, времени на автономную работу [2].

Целью исследования является поиск наиболее универсального и точного способа навигации для управления движением мобильного робота в среде с динамическими препятствиями.

Материалы и методы

В настоящее время существует три основных схемы навигации робота.

Глобальная навигация – определение абсолютных координат робота при движении по длинным маршрутам. Используется GPS, ГЛОНАСС. Обладает высокой точностью (погрешность 1–3 м). Недостаток – невозможность использования в замкнутой среде.

Локальная навигация – определение текущего положения робота относительно некоторой точки, обычно стартовой точки. Актуально для роботов, выполняющих задания в пределах заранее известной области. Недостаток – низкая точность (погрешность может достигать 150 м).

Персональная навигация – определение роботом частей собственной конструкции и взаимодействие с ближайшими объектами, что актуально для роботов с манипуляторами на борту, например, использование энкодеров, ориентация по меткам, движение вдоль линии и т.п. Недостаток – отсутствие гибкости системы.

Наиболее перспективной идеей является хранение в памяти робота полной карты местности. Лучший результат дают трехмерные карты, но их хранение и обработка бортовой системой управления роботом требуют больших вычислительных ресурсов. Задача построения карты заключается в хранении описания окружающей среды, чтобы в будущем робот мог определить свое местоположение на карте. Эта карта используется для планирования возможной траектории движения или выбора наиболее оптимальной позиции для захвата какого-либо объекта [3].

Анализ методов и средств навигации мобильных роботов показал, что оптимальным методом для построения карты маршрута является сканирующий лазерный дальномер. Судя по многим работам в области навигации мобильных роботов, использование лазерного дальномера позволяет достичь наиболее высокой точности локализации.

Основой лазерного дальномера является лидар (LIDAR англ. *Light Identification Detection and Ranging* – световое обнаружение и определение дальности). Лидар – это устройство, реализующее технологию получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью электромагнитного излучения. Принцип работы лидара приведен на рис. 1 [4].



Рис. 1. Принцип действия лидара

Направленный луч от излучателя отражается от цели, возвращается к приемнику. Расстояние до точки поверхности объекта можно рассчитать как

$$L = 0,5ct,$$

где c – скорость света; t – полное время прохождения светом пути до точки отражения и обратно; L – искомое расстояние до точки отражения [5].

В табл. 1 приведены данные, показывающие зависимость времени отклика от расстояния до цели.

Таблица 1

Зависимость времени отклика от расстояния до цели

Расстояние до цели	1 м	10 м	100 м	1 км	10 км	100 км
Время отклика	6,7 нс	67 нс	0,67 мкс	6,7 мкс	67 мкс	0,67 с

Очевидно, что из-за высокой скорости света c время отклика незначительно, поэтому оборудование, необходимое для измерения этого малого промежутка времени, должно работать очень быстро.

Структура лидара приведена на рис. 2.

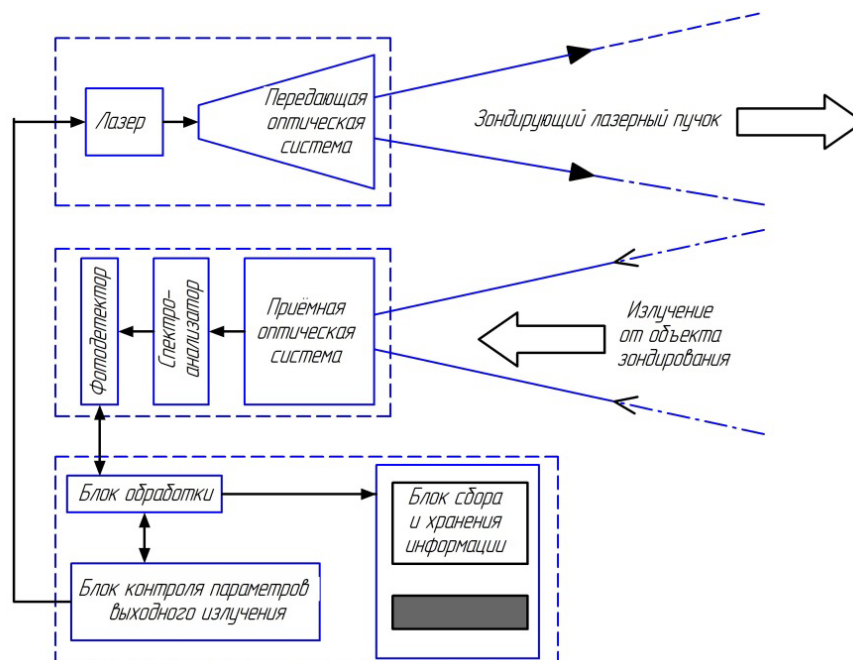


Рис. 2. Структура лидара

Большинство лидаров состоят из трех частей: передатчика, приемника и системы управления. Передатчик содержит источник излучения – лазер и оптическую систему для формирования выходного лазерного пучка, т.е. для управления размером выходного пятна и расходи-

мостью пучка. В абсолютном большинстве конструкций излучателем служит лазер, формирующий короткие импульсы света высокой мгновенной мощности (рис. 3).

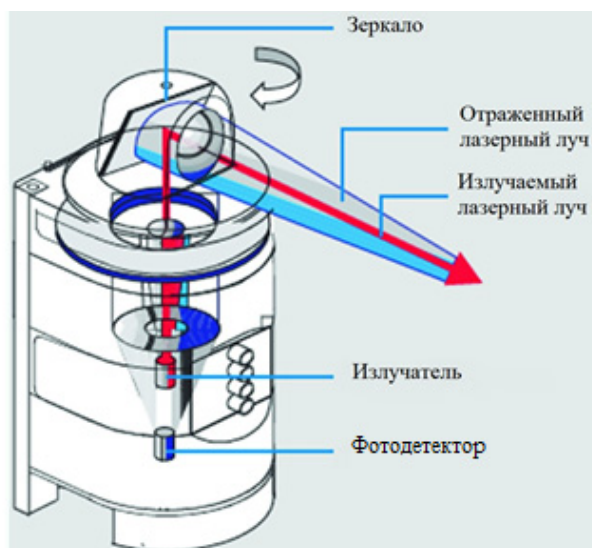


Рис. 3. Типовая конструкция лидара

Периодичность следования импульсов или модулирующая частота выбираются так, чтобы пауза между двумя последовательными импульсами была не меньше, чем время отклика от обнаруживаемых целей (которые могут физически находиться дальше, чем расчетный радиус действия прибора). Приемник состоит из объектива, спектрального и/или пространственного фильтра, поляризационного элемента и фотоприемника. Излучение, отраженно-рассеянное от исследуемого объекта, концентрируется приемной оптикой, а затем проходит через анализатор спектра. Этот прибор служит для выделения интервала длин волн, в котором проводятся наблюдения, и, следовательно, для отсечки фонового излучения на других длинах волн. Анализатор может представлять собой либо сложный, тщательно настраиваемый моно- или полихроматор, либо набор узкополосных фильтров, включая фильтр отсечки излучения на длине волны лазерного передатчика [6].

Излучатель и приемный блок могут быть далеко разнесены друг от друга или выполнены в едином блоке. Оси излучателя и приемника могут быть совмещены (коаксиальная схема) или разнесены (биаксиальная схема) [7].

Система управления лидара выполняет следующие задачи:

- управление режимом работы лидара;
- управление частотой зондирующего излучения лазера;
- измерение энергии излучения в выходящем и принимаемом двухчастотном лазерном пучке на обеих частотах;
- обработка результатов, т.е. получение спектральных характеристик атмосферы, определение наличия и концентраций примесей по имеющимся в базе данных компьютера «спектральным портретам» молекул;
- управление системой наведения лидара на исследуемый объект [8].

Результаты

Объектом исследования в данной работе является система навигации для мобильного робота-спасателя, предназначенного для поиска пострадавших людей, находящихся под обломками разрушенных конструкций. Проблема навигации таких роботов заключается в позиционировании его в пространстве при движении в динамической недетерминированной среде.

В общем виде задачу навигации можно сформулировать следующим образом. Имеется некоторое пространство, в котором расположен мобильный робот, оснащенный лазерным дальномером. Задана целевая точка, которую робот должен достичь для выполнения некоторой задачи. Необходимо определить закон управления мобильным роботом, который переве-

дет его из начального положения в целевую точку. На первый взгляд, задача кажется простой, однако существует целый ряд проблем, условий и ограничений:

1. Робот должен определять свое положение в пространстве, чтобы позиционироваться относительно целевой точки.
2. Необходимо обходить статические препятствия, для чего нужно строить карту местности.
3. Построению карты мешают динамические препятствия.
4. Движение робота к целевой точке должно быть оптимальным по времени.

Решение задачи навигации мобильного робота в пространстве требует одновременного решения проблемы локализации и построения карты или ее дополнения вновь обнаруженными объектами. В настоящее время решается либо задача локализации по имеющейся карте, либо задача построения карты при известной траектории робота. Общего подхода, решающего эти задачи одновременно с требуемой точностью и вне зависимости от особенностей окружения на данный момент не существует. К тому же решение поставленных задач заметно усложняется из-за того, что навигационные датчики имеют погрешности, следовательно, точно определить траекторию движения не представляется возможным.

Было принято решение представлять местоположение робота в системе локальных координат, связанных с исходным положением робота, так как априорная информация о его положении в пространстве отсутствует. Робот самостоятельно строит карту своего передвижения.

В робототехнике для навигации и позиционирования роботов обычно используются SLAM-методы (одновременная локализация и построение карты – от англ. *simultaneous localization and mapping*). SLAM-методы позволяют построить карту пространства, структура которого заранее неизвестна, и определить позицию робота на ней. Использование SLAM-методов позволяет оптимизировать траекторию движения робота, но только в условиях статического пространства. На рис. 4 приведены карты, построенные системой навигации робота до применения SLAM-методов (рис. 4,а) и после (рис. 4,б) [9].

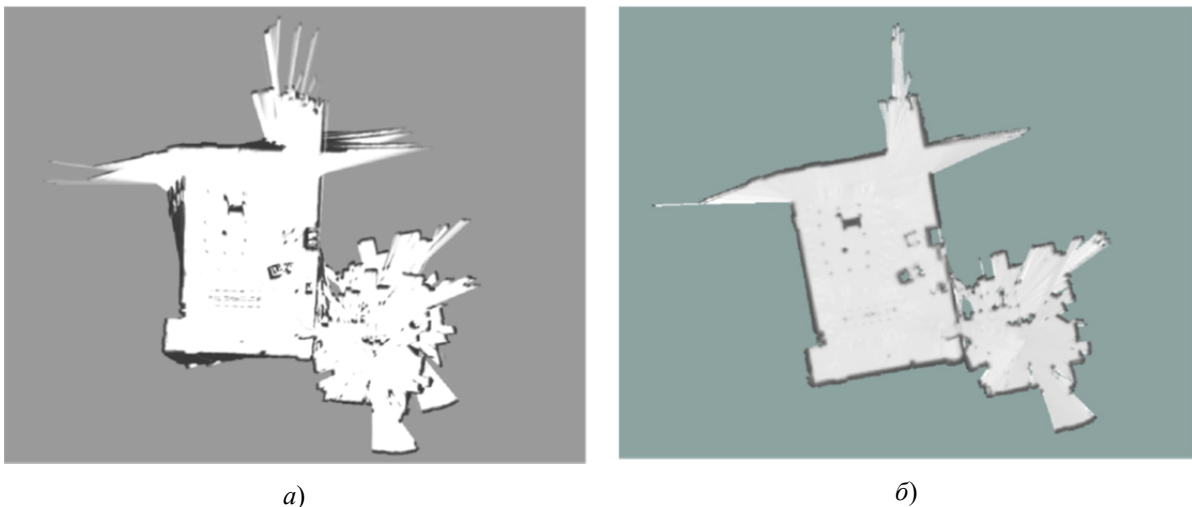


Рис. 4. Оптимизация карты местности с помощью SLAM-методов:
а – до применения («сырые данные»); б – после обработки одного из SLAM-методов

В динамической среде движение препятствий нельзя рассчитать заранее, так как среда в общем случае является недетерминированной, поэтому невозможно предварительно построить маршрут, который позволит двигаться безопасно. Чтобы избежать столкновений с динамическими препятствиями, необходимо определять текущее их положение и предсказывать траекторию движения. Тогда можно двигаться вдоль спланированной траектории, отклоняясь от нее в нужный момент, чтобы совершить маневр для обхода препятствия. Поэтому адекватным решением задачи движения в динамической среде является учет перемещения препятствий непосредственно в контуре управления мобильным роботом [10].

В работе предлагается алгоритм работы системы навигации, позволяющий учесть динамику движения робота, положение препятствий, а также избежать столкновения с ними. Алгоритм управления системы навигации робота-спасателя представлен на рис. 5.

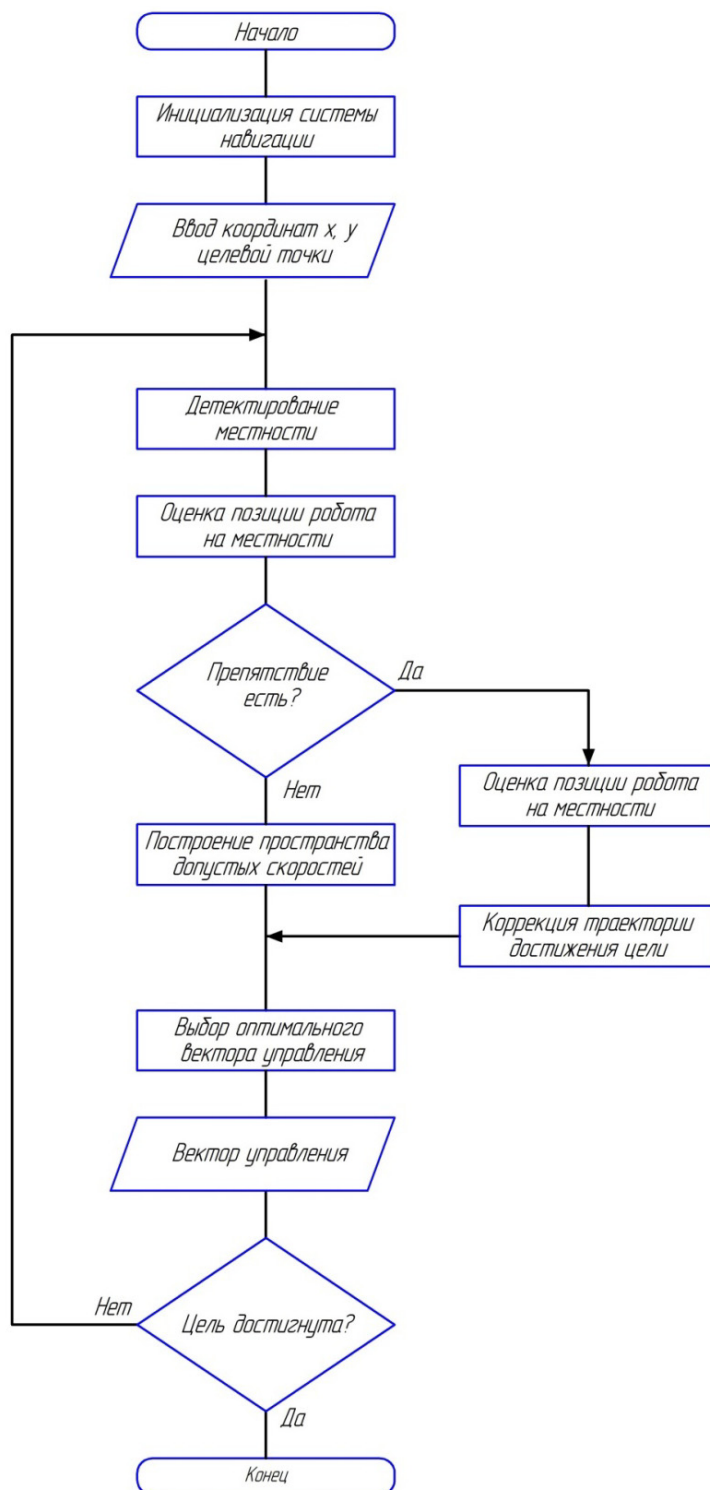


Рис. 5. Алгоритм управления системы навигации робота-спасателя

Работа предложенной системы навигации робота-спасателя заключается в следующем. На первоначальном этапе лидар формирует трехмерное облако точек, обозначающее окружающее робот пространство. Полученные данные передаются в систему навигации робота, где предварительно строится карта местности и карта препятствий. Определив позицию управляемого объекта, система навигации переходит к обновлению карты и карты препятствий, т.е. на каждом шаге алгоритма система навигации строит карту препятствий и местоположения управляемого объекта относительно этой карты. Поступаемые с лидара данные позволяют системе навигации оптимизировать вектор управления. Процесс управления кончается, когда робот достигнет целевой точки.

Заключение

Предложенный способ навигации мобильного робота на основе лидара позволяет построить карту пространства, структура которого заранее неизвестна, и определить позицию робота на ней. Необходимость использования жесткой логики системы навигации снижает маневренность и скорость передвижения мобильного робота, поэтому для оптимизации траектории движения целесообразно применять технологии искусственного интеллекта.

Список литературы

1. Войтович, И. Д., Корсунский В. М. Интеллектуальные сенсоры : учеб. пособие. М. : Бинوم. Лаборатория знаний, 2009. С. 51–53. ISBN 978-5-9963-0124-9
2. Дергачев, В. В., Карташов О. О. Способы оценки и снижения вычислительной сложности алгоритмов принятия решений в задачах одновременной локализации и картографирования // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4598
3. Кучерский, Р. В., Манько С. В. Алгоритмы локальной навигации и картографии для бортовой системы управления автономного мобильного робота // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 3. С. 13–22. ISSN 1999-9429.
4. Endres F., Hess J., Engelhard N. [et al.]. An evaluation of the RGB-D SLAM system // Robotics and Automation (ICRA) : 2012 IEEE International Conference. 2012. P. 1691–1696.
5. Lu F., Milios E. Robot pose estimation in unknown environments by matching 2d range scans // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 1997. Vol. 18, № 3. P. 249–275.
6. Park J., Lee S., Park J. Correction robot pose for SLAM based on Extended Kalman Filter in a rough surface environment // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2009. Vol. 6, № 2. P. 67–72.
7. Eliazar A., Parr R. DP-SLAM: Fast, robust simultaneous localization and mapping without predetermined landmarks // Proceedings of the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). 2003. P. 1135–1142.
8. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. Vol. 22, № 11. P. 1330–1334.
9. Steux B., Hanzaoui O. EI. TinySLAM: A SLAM algorithm in less than 200 lines C-language program // Control Automation Robotics & Vision (ICARCV) : 11th International Conference. 2010. P. 1975–1979.
10. Garrido-Jurado, S., Munos-Salinas R., Madrid-Cuevas F. J., Marin-Jimenez M. J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion // Pattern Recognition. 2014. Vol. 47, № 6. P. 2280–2292.

References

1. Voytovich I. D., Korsunskiy V.M. *Intellektual'nye sensory: ucheb. posobie = Smart sensors: a tutorial*. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2009:51–53. ISBN 978-5-9963-0124-9. (In Russ.)
2. Dergachev V.V., Kartashov O.O. Methods for evaluating and reducing the computational complexity of decision-making algorithms in simultaneous localization and mapping problems. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2017;4. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4598 (In Russ.)
3. Kucherskiy R.V., Man'ko S.V. Algorithms of local navigation and cartography for the onboard control system of an autonomous mobile robot. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = News of the Southern Federal University. Technical sciences*. 2012;3:13–22. ISSN 1999-9429. (In Russ.)
4. Endres F., Hess J., Engelhard N. [et al.]. An evaluation of the RGB-D SLAM system. *Robotics and Automation (ICRA): 2012 IEEE International Conference*. 2012:1691–1696.
5. Lu F., Milios E. Robot pose estimation in unknown environments by matching 2d range scans. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 1997;18(3):249–275.
6. Park J., Lee S., Park J. Correction robot pose for SLAM based on Extended Kalman Filter in a rough surface environment. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2009;6(2):67–72.
7. Eliazar A., Parr R. DP-SLAM: Fast, robust simultaneous localization and mapping without predetermined landmarks. *Proceedings of the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*. 2003:1135–1142.
8. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000;22(11):1330–1334.
9. Steux B., Hanzaoui O.EI. TinySLAM: A SLAM algorithm in less than 200 lines C-language program. *Control Automation Robotics & Vision (ICARCV): 11th International Conference*. 2010:1975–1979.
10. Garrido-Jurado, S., Munos-Salinas R., Madrid-Cuevas F.J., Marin-Jimenez M.J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*. 2014;47(6):2280–2292.

*Информация об авторах / Information about the authors***Илья Николаевич Урваев**

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iurvaev@mail.ru

И'ya N. Urvaev

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)