А. В. Смирнов, аспирант, asmirnov_1991@mail.ru, **А. Ю. Беззубцев,** аспирант-инженер, mannaz2012@mail.ru,
Институт программных систем им. А. К. Айламазяна РАН, г. Переславль-Залесский

Автоматическое передвижение роботизированного подвижного технического средства с построением схемы исследуемого помещения

Обсуждается решение проблемы автоматической навигации роботизированных подвижных технических средств (РПТС) в помещении. Рассматриваются метод и алгоритм передвижения РПТС по заданному помещению с последующим формированием схемы помещения. Разработанные алгоритмы основаны на использовании свойств среднеквадратического отклонения значений дистанции до окружающих РПТС объектов, полученных с комплекса дальномеров.

Ключевые слова: роботизированное подвижное техническое средство, схема помещения, план помещения, дисперсия, среднеквадратическое отклонение, команды управления, схема-прототип, комплекс дальномеров

Введение

В наши дни в робототехнике большое внимание уделяется задаче автоматического передвижения и ориентации роботов в пространстве. Решение этой задачи напрямую зависит от методов и алгоритмов построения карты территории или плана-схемы помещения, в кртором находится робот. Одним из самых популярных на сегодняшний день является метод одновременной навигации и составления карты (SLAM [1, 2] от англ. Simultaneous Location and Mapping). Этот метод основан на одновременной генерации схемы помещения и движении робота с использованием сканирующего лазерного дальномера (СЛД) [3] или лидара (Lidar) [4] и данных об угловой скорости колес робота. Из российских разработок можно выделить методы, представленные в диссертации А. А. Минина [5], где описаны методы определения линейной и угловой скоростей мобильного робота по данным лазерного дальномера, комплексации данных дальномера с информацией от других датчиков, управления движением робота и планирования пути. Все эти методы хорошо зарекомендовали себя на практике, но, тем не менее, имеют ряд недостатков, ключевым из которых является стоимость лазерного сканера.

Из-за дороговизны сканирующего оборудования возникла потребность в разработке менее материально затратного метода построения схемы помещения и ориентации роботизированного подвижного технического средства (РПТС). Сейчас независимому разработчику доступны такие устройства определения расстояния до объекта, как дальномеры. Все дальномеры различаются по типу используемого сигнала для измерения расстояния. Самыми недорогими на рынке являются ультразвуковые дальномеры [6], более дорогие — инфракрасные [7, 8] и лазерные [9]. Тем не менее, стоимость самого дорогого дальномера по меньшей мере в 10 раз ниже, чем у СЛД. Комплексы из дальномеров уже ис-

пользуют как вспомогательное средство ориентирования роботов в пространстве.

В данной статье рассматриваются метод и алгоритм автоматического передвижения РПТС с последующим построением схемы помещения с использованием данных, полученных от комплекса дальномеров, и данных об изменении среднеквадратического отклонения расстояний до объектов.

Системы навигации РПТС

Разработка систем навигации РПТС в помещении является нетривиальной задачей. Прежде всего, необходимо определить, по какому принципу робот будет получать информацию об окружающей среде и близлежащих объектах. В зависимости от используемых датчиков и сенсоров системы навигации можно разделить на следующие группы:

- 1) системы навигации, основанные на использовании сенсоров, работающих вне видимого спектра. К таким сенсорам относят дальномеры всех типов. К ним также можно отнести СЛД. Такие системы характерны тем, что информация об окружающей среде формируется за счет анализа данных о расстоянии до окружающих РПТС объектов;
- 2) системы навигации, основанные на использовании компьютерного зрения [10]. Здесь главной задачей робота является анализ и обработка изображений или видеопотока, полученного с установленных на его борту камер. Компьютерное зрение также позволяет наделить роботов стереозрением, необходимым для генерации карты глубин, с помощью которой можно определить расстояние до объектов, попавших в поле зрение камер;
- 3) системы навигации, основанные на использовании маяков. Такие системы требуют дополнительной установки маяков в исследуемом помещении. Задачей робота является определение местоположения каждого из маяков и нахождение по полученным данным собственных координат и ориентация в пространстве;

4) гибридные системы навигации. Данные системы могут объединять подходы, перечисленные в первых трех пунктах. Например, с помощью компьютерного зрения можно определить, где находится тот или иной маяк. Сейчас разработчики часто используют гибридные системы навигации для повышения точности позиционирования робота.

Конфигурация исследуемого помещения

Для испытаний разрабатываемых алгоритмов было использовано помещение коридорного типа. Такой тип помещений обычно имеет две продольные параллельные стены. Стены имеют разное число углублений и выступов. В конце каждого участка с коридором есть переход в следующий коридор. Таким образом, помещение состоит из четырех коридоров, переходящих друг в друга, и образует тем самым некий квадрат, который должен объехать РПТС. На рис. 1 ниже представлена схема изучаемого помещения.

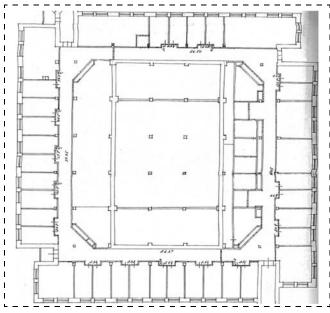


Рис. 1. Схема изучаемого помещения

Метод передвижения РПТС по коридору

Метод движения РПТС по коридору основывается на принципе слежения за кривизной стен коридора. Данный принцип заключается в измерении расстояния от ближайшей боковой стены до РПТС. Такая стена коридора называется опорной.

От изменения расстояния до опорной стены зависит направление движения РПТС. РПТС стремится находиться в определенном диапазоне до опорной стены и приближается, если расстояние до нее велико, и отдаляется, если мало.

Конструкция РПТС

В основе конструкции РПТС используется гусеничная платформа с четырьмя роликами, два из которых подключены напрямую к двигателям. Двигатели расположены с правой и с левой сторон платформы, соответственно. РПТС способен двигаться вперед и назад, а также выполнять разворот на месте путем изменения направления вращения правого и левого двигателей.

На РПТС был установлен комплекс дальномеров, в состав которого входят три дальномера: два расположены по бокам РПТС и один — на фронтальной стороне. Тот из боковых дальномеров, который находится ближе к опорной стене, является опорным. Именно по информации, поступающей от этого дальномера, ориентируется РПТС. Второй боковой дальномер является контрольным. Он отслеживает расстояние до противоположной стены. Контрольный дальномер не участвует в ориентации РПТС по коридору, но может "оттолкнуть" его в том случае, если ПТС слишком приблизится к противоположной стене. Передний дальномер является остановочным. По поступающей от него информации РПТС принимает решение об остановке или развороте перед препятствием. Данный метод передвижения ПТС не исключает возможность комбинирования используемых дальномеров в зависимости от конфигурации исследуемого коридора.

За обработку и фильтрацию поступающей от дальномеров информации отвечает контроллер на базе Arduino Uno (ATmega8U2) [11]. Контроллер также определяет, в каком направлении следует двигаться РПТС в зависимости от расстояния до стены, путем передачи соответствующей цифровой команды на блок управления двигателями. В качестве такого блока используется одноплатный компьютер Raspberry Pi [12].

Алгоритм движения РПТС

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма движения РПТС.

Алгоритм движения РПТС по заданному помещению включает следующие шаги:

- 1) получение данных от трех дальномеров. Запись данных в переменные Dist1, Dist2 и Dist3 (расстояния, взятые с опорного дальномера, с контрольного дальномера и с остановочного дальномера, соответственно);
- 2) фильтрация данных, полученных от дальномеров. Этап характерен тем, что на нем можно использовать разнообразные фильтры в зависимости от входных данных и используемых дальномеров;
- 3) расчет дисперсии [13] и среднеквадратического отклонения [13] значений дистанции, полу-



Рис. 2. Блок-схема алгоритма движения РПТС по заданному помещению

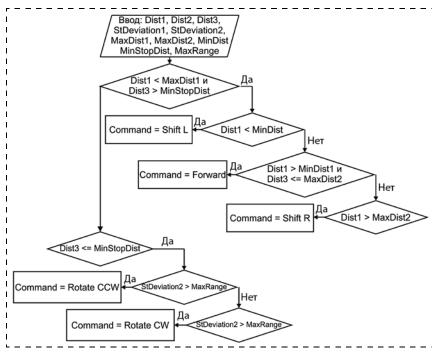


Рис. 3. Блок-схема функции DirectionMotion

ченных от опорного и контрольного дальномеров. Дисперсия расчитывается по формуле

$$D[X] = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)^2}{n}}{n-1},$$
 (1)

где X — случайная величина (значение с дальномера), n — число элементов последовательности; среднеквадратическое отклонение — по формуле

$$\sigma = \sqrt{D[X]}. \tag{2}$$

Для расчета среднеквадратических отклонений значений, полученных от опорного и контрольного дальномеров, был выбран шаг длиной в пять измерений расстояния. Рассчитанные таким образом данные используются в качестве указателя стороны поворота, а также играют важную роль в построении схемы помещения;

- 4) генерация команд управления функцией DirectionMotion. Список команд, доступных для управления ПТС:
- движение вперед (Forward);
- поворот против часовой стрелки (Rotate CCW);
- поворот по часовой стрелке (Rotate CW);
- смещение вправо (Shift R);
- смещение влево (Shift L).

Команды управления представляют собой числовые значения, но для удобства в статье применяются их буквенно-символьные обозначения, которые были перечислены выше;

5) формирование строки сообщения. Сообщение отсылается на одноплатный компьютер Raspberry Pi или аналогичный. Затем полученное сообщение раз-

деляется на составные части, каждая из которых содержит свой сегмент данных. Данные, которые формируют сообщение, необходимы также для построения схемы помещения. Пересылаемое сообщение содержит в себе:

- команду управления двигателями;
- дистанцию до опорной стены;
- среднеквадратическое отклонение значений дистанции от опорного дальномера.

Все перечисленные этапы повторяются в цикле, пока РПТС находится во включенном состоянии.

Функция Direction Motion

Ha рис. 3 изображена блок-схема функции DirectionMotion.

В функции DirectionMotion происходит сравнение значений расстояния, полученных от опорного дальномера Dist1, с краевыми значениями дистанции MaxDist1, MaxDist2 и MinDist, где MaxDist1 — максимальная дистанция, при которой данные с дальномера яв-

ляются достоверными, MaxDist2 и MinDist — границы диапазона значений расстояния до стены.

Также в функции DirectionMotion проверяется условие остановки/разворота. Данные от остановочного дальномера проходят проверку на минимально допустимую дистанцию до стены. Минимально допустимая дистанция хранится в переменной MinStopDist. В переменной MaxRange записано значение максимального среднеквадратического отклонения расстояния. Сравнивая среднеквадратические отклонения опорного и контрольного дальномеров с этой переменной, можно понять, с какой стороны в данный момент времени находится стена, а с какой пустота, так как значение среднеквадратического отклонения при направлении дальномера в пустоту увеличивается благодаря техническим особенностям используемых дальномеров.

Значения переменных MaxDist1, MaxDist2, MinDist, MinStopDist и MaxRange подбираются эмпирическим путем в зависимости от конфигурации исследуемого помещения и скорости движения РПТС.

Следует отметить, что РПТС двигался против часовой стрелки в заданном помещении. При движении по часовой стрелке необходимо инвертировать команды.

Построение схемы исследуемого помещения

Понятие "схема-прототип"

Разработка алгоритма построения схемы помещения потребовала введения нового понятия "схема-прототип". Схема-прототип помещения — это схема помещения, в которой не учитывается вся кривизна стен. Такая схема не отображает углубления и выступы, габаритные размеры которых менее одного метра. Также схема-прототип может отображать как все помещение, так и только его часть.

Сама по себе схема-прототип не является планом или схемой помещения, однако она дает представление о реальной конфигурации исследуемого помещения, что делает возможным использование схемы-прототипа для автоматической ориентации РПТС.

Алгоритм построения схемы-прототипа помещения

Для построения схемы-прототипа помещения используются следующие данные: управляющие команды РПТС, расстояния, снятые с опорного дальномера, и среднеквадратическое отклонение значений этих расстояний. Построение схемыпрототипа состоит из трех основных этапов:

1) фильтрация команд. Из сгенерированного списка команд удаляются (заменяются) команды с неявным поворотом, т. е. те команды Rotate CW и Rotate CCW, при подаче которых РПТС не совершал поворот, а лишь подруливал перед препятствием. Для обнаружения неявного поворота приме-

няется анализ длины участка подряд идущих повторяющихся команд. Во время тестирования было установлено, что при повторении команды на поворот менее пяти раз РПТС выполнял подруливание. Таким образом, обнаруженный участок, состоящий менее чем из пяти команд, удалялся из списка;

- 2) сохранение стартового расстояния до опорной стены. По умолчанию, РПТС до начала движения находится параллельно стене на оптимальной дистанции;
- 3) построение схемы-прототипа. Построение схемы-прототипа включает в себя несколько шагов:
- отслеживание изменения среднеквадратического отклонения расстояния до опорной стены. Считается, что если среднеквадратическое отклонение мало и не превышает определенного значения, полученного эмпирическим путем, то РПТС движется относительно параллельно с опорной стеной, т. е. угол отклонения минимален. В противном случае, если среднеквадратическое отклонение выходит за допустимое значение, считается, что РПТС либо проходит углубление в стене, либо опорный дальномер достиг максимального значения измерения расстояния, заложенного в него технически. Такая ситуация также может указывать на углубление или проем;
- построение точек прототипа. Построение схемыпрототипа происходит поточечно. Точки ставятся в соответствии со стартовым расстоянием до опорной стены, среднеквадратическим отклонением расстояния и командой управления. Если среднеквадратическое отклонение проходит проверку, то от центра рабочей области откладывается точка на стартовое расстояние. Иначе при обнаружении углубления в стене точки откладываются на расстояние, полученное в момент прохождения углубления. Здесь рабочей областью называется некое "полотно", на которое наносятся все точки схемы-прототипа. На этом этапе также происходит проверка команд управления. При этом учитываются только команды на поворот, так как после прохождения поворота необходимо изменить направление нанесения точек.

Результаты

В результате работы алгоритма автоматического передвижения РПТС прошел полный круг по заданному помещению (см. рис. 1). Во время движения РПТС собрал достаточное количество данных о помещении, в котором находится. Благодаря этим данным была сгенерирована схема-прототип исследуемого помещения, которая представлена на рис. 4.

Стоит заметить, что в представленной схеме не отображены углы помещения, так как при прохождении поворотов данные с опорного дальномера не являлись достоверными из-за движения РПТС. Также схема-прототип не отображает внутреннюю стену помещения. Внутренняя стена не обрабатывалась, потому что при движении РПТС против ча-

совой стрелки контрольный дальномер не давал достоверной информации о расстоянии до стены вследствие превышения максимально доступного для измерений расстояния.

Следует учесть еще тот факт, что в данной работе не учитывались внешние возмущающие факторы, такие как проскальзывания колес, так как не было данных о пройденном пути. В свою очередь, погрешность измерения дальномера была сведена к минимуму благодаря постфильтрации полученных от него данных, которая происходила непосредственно во время построения схемы-прототипа. Также, чтобы избежать "про-

блемы замыкания циклов" (slam loop closure problem), при построении схемы-прототипа были введены некоторые правила. В соответствии с ними РПТС при приближении к стене всегда делал поворот на 90° против часовой стрелки, затем проезжал точно такое же расстояние, что и до поворота. При отсутствии данных о пройденном пути считалось, что от поворота до поворота РПТС всегда проходит одно и тоже расстояние из-за планировки помещения.

Несмотря на то, что схему-прототип удалось построить, использование ее для автоматической ориентации РПТС является нетривиальной задачей. В дальнейшем работа будет направлена на повышение точности схемы. Предполагается использовать данные с трехосевого цифрового магнитометра [15], акселерометра и гироскопа [16], чтобы иметь больше информации об ориентации РПТС в пространстве. Также для более точного позиционирования схемы необходимо знать, какую дистанцию прошел РПТС и с какой скоростью. Для получения подобных данных необходимо установить одометр [17] и энкодер [18].

Список литературы

1. **SLAM** — принципы и ссылки на open source. URL: http://my-it-notes.com/2013/01/slam-basis-and-links-at-open-source/

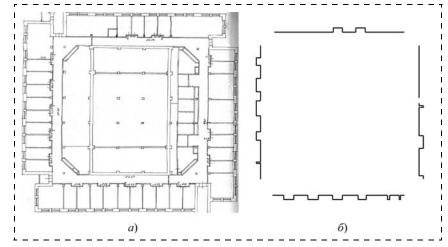


Рис. 4. Реальная схема помещения (а) и сгенерированная схема-прототип (б)

- 2. **SLAM.** Разработка роботов. URL: http://robot-develop.org/archives/3954
- 3. **Delphi.** Сканирующий лазерный дальномер. Разработка роботов. URL: http://robot-develop.org/archives/3700
 - 4. Лидар. URL: http://systemsauto.ru/active/lidar.html
- 5. **Минин А. А.** Навигация и управление мобильным роботом, оснащенным лазерным дальномером: Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва, 2008. 18 с.
- 6. Ультразвуковой датчик измерения расстояния HC-SR04. URL: http://robocraft.ru/blog/electronics/772.html
- 7. **ИК-**дальномеры SHARP. URL: http://roboforum.ru/wiki/ИК-дальномеры SHARP
- 8. Датчик измерения расстояния SHARP-GP2Y0A710K0F расчет расстояния. URL: http://robocraft.ru/blog/arduino/770.html
- 9. **Soga** Laser Ranging Module Preview. URL: http://www.elec-freaks.com/7180.html
- 10. **Машинное** зрение. URL: http://robodem.ru/machinevision 11. **Arduino** Uno. URL: http://arduino.ru/Hardware/Arduino-
- BoardUno
 12. **Raspberry** Pi 2 model B. URL: https://www.raspberrypi.org/
- products/raspberry-pi-2-model-b/ 13. **Орлов А. И.** Дисперсия случайной величины // Математика случая: Вероятность и статистика основные факты. М.:
- МЗ-Пресс, 2004. 14. **Боровиков В.** STATISTICA. Искусство анализа данных на
- компьютере: Для профессионалов. СПб.: Питер, 2003. 688 с. 15. **Работа** с магнитометром HMC5883L. URL: http://avr-project.ru/ publ/kak_podkljuchit/rabota_s_magnitometrom_hmc58831/2-1-0-150
- 16. **Акселерометр** и гироскоп MPU6050. URL: http://cxem.net/mc/mc324.php
- 17. Одометр. URL: http://autodrop.ru/stati/517-chto-takoe-odometr.html
 - 18. Энкодер. URL: http://robocraft.m/blog/technology/734.html

Automatic Moving of a Robotic Mobile Device Making a Map of a Building

A. V. Smirnov, asmirnov_1991@mail.ru⊠, **A. Yu. Bezzubtcev,** mannaz2012@mail.ru, The Program Systems Institute of Russian Academy of Science, Pereslavl-Zalessky, 152021, Russian Federation

Corresponding author: Smirnov Alexander V., Engineer, The Program Systems Institute of Russian Academy of Science, Pereslavl-Zalessky, 152021, Russian Federation, e-mail: asmirnov_199l@mail.ru

Received on January 19, 2016 Accepted on January 29, 2016 This article describes methods of solving problems of automatic navigation of robotized mobile devices inside of a building. A robotized mobile device has tracks and can move back and forth and turn right-hand and left-hand. Micro controller based on Arduino is responsible for receiving and processing of information taken from sensors. Analysis of the data occurs directly onboard of a robotized mobile device using a single-board computer Raspberry Pi or some kind of it. The article shows a method and an algorithm of a robotized mobile device to follow the path and then make a map of a particular building. While moving a robotized mobile device records in memory the data received from sensors. Then it processes the data and forms a map of the building. The relevance of this work is that the most common navigation systems using GPS (Global Positioning System) / GLONASS (GLObal Navigation Satellite System) don't work in those conditions when a robotized mobile device is located in buildings, such as a room or a building hallway. A satellite signal is lost while going through cemental, metal or wooden constructions. The algorithms presented in the article are based on the properties of the standard deviation values of the distance to objects surrounding a robotized mobile device. The data were obtained through a set of range finders, which was installed onboard of a robotized mobile device, without using a complex and expensive scanning device. Developed algorithms have an advantage, they can work in a building without reference to GPS or GLONASS. The main features of the algorithm are simplicity, low price and accessibility of the used hardware.

Keywords: robotized mobile devices, map of a building, dispersion, the standard deviation, a set of rangefinders, pathfinder

For citation:

Smirnov A. V., Bezzubtcev A. Yu. Automatic Moving of a Robotic Mobile Device Making a Map of a Building, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 395—400.

DOI: 10.17587/mau.17.395-400

References

- 1. **SLAM** *principy i ssylkina open source* (SLAM principles and references to open source), available at: http://my-it-notes.com/20.13/01/slam-basis-and-links-at-open-source/ (accessed 17.07.2015).
- 2. **SLAM.** Robot-develop, available at: http://robot-develop.org/archives/3954 (accessed 17.07.2015).
- 3. **Delphi** skanirujushhij lazernyj dal'nomer [Scanning range finder]. Robot-develop, available at: http://robot-develop.org/archives/3700 (accessed 17.07.2015).
- 4. **Lidar** [Light Detection and Ranging], available at: http://systemsauto.ru/active/lidar.html (accessed 17.07.2015).
- 5. **Minin A. A.** Navigacija i upravlenie mobil'nym robotom, osnashhennym lazernym dal'nomerom: Avtoref. dis. kand. tehn. nauk, Moskva, 2008, 18 p.
- 6. *Ul'trazvukovoj* datchik izmerenija rasstojanija HC-SR04 (Ultrasonic ranging module HC-SR04), available at: http://robo-craft.ru/blog/electronics/772.html (accessed 17.07.2015).
- IK-dal'nomery SHARP (IR range finders), available at: http://roboforum.ru/wiki/ИК-дальномеры_SHARP (accessed 17.07.2015).
- 8. **Datchik** izmerenija rasstojanija \overline{SHARP} -GP2Y0A710K0F raschj ot rasstojanija (The sensor measurement rangeSHARP-GP2Y0A710K0F —

calculation of distance), available at: http://robocraft.ru/blog/arduino/770.html (accessed 17.07.2015).

- Soga Laser Ranging Module Preview, available at: http://www.elecfreaks.com/7180.html (accessed 17.07.2015).
- 10. **Computer** vision, available at: http://robodem.ru/machinevision (accessed 17.07.2015).
- 11. **Arduino** Uno, available at: http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno (accessed 17.07.2015).
- 12. **Raspberry** Pi 2 modelB, available at: http://www.raspberrypi.org/products/raspberrv-pi-2-model-b/ (accessed 17.07.2015).
- 13. **Orlov A. I.** *Dispersija sluchajnoj velichiny, Matematika sluchaja: Verojatnost' i statistika osnovnyefakty* (The variance of the random variable, Mathematics cases: Probability and statistics key facts), Moscow, Progress, 2003, 2004 (in Russian).
- 14. **Borovikov V.** *Statistica. Iskusstvo analizadannyh na komp'jutere: Dlja professionalov* (The art of data analysis on the computer: For professionals), Peterburg, Progress, 2003, 688 p. (in Russian).
- 15. **Rabota** s magnitometrom HMC5883L (Working with the magnetometer HMC5883L), available at: http://avrproiect.ru/publ/kak podkljuchit/rabota_s_magnitometrom hmc58831/2-1-0-150 (accessed 17.07.2015).
- 16. **Akselerometr** i giroskop MPU6050 (Accelerometer and gyroscope MPU6050), available at: http://cxem.net/mc/mc324.php (accessed 17.07.2015).
- 17. **Odometer,** available at: http://autodrop.ru/stati/517-chto-takoe-odometr.html (accessed 17.07.2015).
- 18. **Encoder,** available at: http://robocraft.ru/blog/technology/734.html (accessed 17.07.2015).

DOI: 10.17587/mau.17.400-406

УДК [004.896: 004.932]: [681.586: 519.712]

Нгуен Туан Зунг, науч. сотр., dunghvkt@yahoo.com,

Вьетнамская академия наук и технологий,

И. А. Щербатов, канд. техн. наук, доц., sherbatov2004@mail.ru,

О. М. Проталинский, д-р техн. наук, проф., protalinskiy@gmail.com, Астраханский государственный технический университет

Система управления мобильным роботом на основе модифицированного алгоритма 3D-pointcloud

Предложена система управления мобильным роботом в зданиях и сооружениях, в основу которой положена методика построения траекторий движения с использованием сенсора глубины датчика Kinect. Синтезирован модифицированный алгоритм 3D-pointcloud, обеспечивающий решение задачи перемещения робота без столкновений с препятствиями. Показаны результаты экспериментов, подтверждающие эффективность изложенного в работе подхода.

Ключевые слова: датчик глубины, робот, SURF, 3D-pointcloud, распознавание образов, библиотека FLANN, система управления, траектория робота, предотвращение столкновений робота, навигация