

УДК 004.93'1

DOI: 10.46548/21vek-2020-0952-0002

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

© 2020

Пашенко Татьяна Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры «Менеджмент и экономическая безопасность»

Пензенский государственный университет

(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: tania.paschenko@gmail.com)

Мартышкин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Вычислительные машины и системы»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: alexey314@yandex.ru)

Аннотация. Статья посвящена исследованиям проблемы планирования движения мобильного робота с системой технического зрения. Планирование движения мобильным роботом при наличии на карте местности препятствий является проблемой при построении роботов, пригодных для работы в реальных условиях. Существующие сегодня решения обладают частным характером, что не позволяет говорить об успешности решения задачи эффективного планирования движения. Цель настоящей статьи: разработка и исследование алгоритма планирования движения мобильного робота с системой технического зрения. Объектом исследования статьи является алгоритм планирования движения мобильного робота с системой технического зрения. В работе произведен обзор отечественных и зарубежных мобильных роботов, решающих задачу планирования движения на известной карте местности с неизвестными препятствиями. Рассмотрены методы навигации мобильных роботов: локальная, глобальная, персональная. В ходе проведенных работ и исследований был построен прототип мобильного робота, способный распознавать препятствия правильной геометрической формы, планировать и корректировать маршрут движения. Определение объекта окружающей среды и классификация его как препятствия осуществляются на основе методов и алгоритмов обработки цифровых изображений. Определение расстояния и угла до препятствия вычисляются методами фотограмметрии, улучшение качества изображения методом линейного контрастирования и оптимальной линейной фильтрации с применением уравнения Винера-Хопфа. Для тестирования прототипа был произведен обзор средств виртуального тестирования алгоритмов движения мобильного робота, на основании которого выбран программный комплекс Webots. В заключении сделаны выводы о проведенных исследованиях.

Ключевые слова: мобильный робот, техническое зрение, алгоритм планирования, прототип, робототехника, теория принятия решения.

INVESTIGATION OF AN ALGORITHM FOR A MOBILE ROBOT WITH A MACHINE VISION SYSTEM

© 2020

Pashchenko Tatyana Yuryevna, candidate of economic Sciences,
associate Professor of sub-department «Management and economic security»

Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: tania.paschenko@gmail.com)

Martyshevskiy Alexey Ivanovich, candidate of technical sciences, docent,
associate Professor of sub-department «Computers and systems»

Penza state technological University

(440039, Russia, Penza, Baydukov Proyezd / Gagarin Street, 1a/11, e-mail: alexey314@yandex.ru)

Abstract. This study is devoted to the challenges of motion planning for mobile robots with machine vision systems. Motion planning for mobile robots in the environment with obstacles is a problem to deal with when creating robots suitable for operation in real-world conditions. The solutions found today are predominantly private, and are highly specialized, which prevents judging of how successful they are in solving the problem of effective motion planning. Solutions with a narrow application field already exist and are being already developed for a long time, however, no major breakthrough has been observed yet. Only a systematic improvement in the characteristics of such systems can be noted. The purpose of this study: develop and investigate a motion planning algorithm for a mobile robot with a machine vision system. The research subject for this article is a motion planning algorithm for a mobile robot with a machine vision system. This study provides a review of domestic and foreign mobile robots that solve the motion planning problem in a known environment with unknown obstacles. The following navigation methods are considered for mobile robots: local, global, individual. In the course of work and research, a mobile robot prototype has been built, capable of recognizing obstacles of regular geometric shapes, as well as plan and correct the movement path. Environment objects are identified and classified as obstacles by means of digital image processing methods and algorithms. Distance to the obstacle and relative angle are calculated by photogrammetry methods, image quality is improved by linear contrast

enhancement and optimal linear filtering using the Wiener-Hopf equation. Virtual tools, related to mobile robot motion algorithm testing, have been reviewed, which led us to selecting Webots software package for prototype testing. Testing results allowed us to make the following conclusions. The mobile robot has successfully identified the obstacle, planned a path in accordance with the obstacle avoidance algorithm, and continued moving to the destination. Conclusions have been drawn regarding the concluded research.

Keywords: mobile robot, machine vision, planning algorithm, prototype, robotics, decision theory.

Введение. Планирование движением мобильного робота (МР) при наличии препятствий является довольно актуальной проблемой при построении МР, пригодных для работы в реальных условиях. На сегодняшний день, существующие решения обладают преимущественно частным, узкоспециализированным характером, что не позволяет говорить об успешности решения задачи эффективного планирования движения. Решения, направленные на задачи узкого спектра, начали развиваться уже давно, но тем не менее большого прорыва в этом направлении не наблюдается. Отмечается только планомерное улучшение характеристик показателей таких систем.

Настоящая статья в целом носит исследовательский характер. В ходе изучения предметной области были проанализированы литературные источники [1 – 3], [4, 5] и [6 – 8] с целью поиска незатронутых и нерешенных проблем. Некоторые вопросы, связанные с алгоритмами планирования движения МР с системой технического зрения, не нашли должного отражения в публикациях, однако частично проблемные вопросы были рассмотрены в [9 – 11].

Главной функцией автономного МР является навигация (планирование движения в реальном пространстве). Применяемые сегодня решения бытовых многофункциональных роботов стоят дорого, что не позволяет использовать их массово. **Целью** настоящей статьи является разработка и исследование алгоритма планирования движения МР с системой технического зрения. Для решения этой проблемы в данной работе спроектирован прототип простого МР под управлением мобильного устройства (МУ), благодаря быстрому развитию производственной линейки которых, производители стремятся оснащать МУ простыми, но современными датчиками, которые можно запрограммировать, благодаря наличию открытых операционных систем. Таким образом МУ включает в себя несколько важных подсистем МР: подсистема сбора данных об окружающей среде; подсистема анализа данных об окружающей среде; подсистема планирования движения.

Такое сочетание возможностей в МУ упрощает задачу построения доступного широкому кругу пользователей МР, который состоит всего лишь из двух агрегатов: МУ и исполнительная часть системы. В качестве исполнительской части системы может использоваться любая колесная платформа, содержащая элемент питания, систему привода платформы в движения, а также контроллер с приемопередатчиком, координирующий исполнительную часть системы и принимающий сигналы управления. Данные вопросы сегодня актуальны ввиду активного внедрения в

сферы и отрасли народного хозяйства различных конструкторских решений для мобильных роботов.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие частные задачи:

1. Провести обзор существующих решений в мировой и отечественной практике мобильного роботостроения, а также обзор мобильных систем планирования движения мобильным роботом.

2. Синтезировать прототип системы планирования движения мобильным роботом с системой технического зрения, а также выполнить тестирование прототипа.

3. Сделать выводы по полученным результатам

Материалы исследования. Исходные данные и материалы для проведения исследования: трехколесная платформа *lego mindstorms NXT* с двумя сервоприводами, мобильное устройство под управлением ОС *Android*, оснащенное гироскопом, акселерометром, цифровой видеокамерой и *Bluetooth* адаптером.

В настоящей статье рассматриваются МР, относящиеся к группам бытового и специального назначения [12]. В ходе исследования решения задач планирования движения, было установлено, что навигация МР является ключевым методом, поэтому, учитывая широкий спектр применения решений задач навигаций, выделены три вида навигации:

1) глобальная – представляет координаты движущегося объекта в выбранной системе координат, как правило, абсолютной;

2) локальная – представляет координаты движущегося объекта в локальной системе координат, привязанной к выбранной стартовой позиции маршрута. Широко используется при проектировании беспилотных авиационных летательных аппаратов;

3) персональная – представляет координаты узлов и агрегатов робота относительно базового, либо относительно объектов, находящихся в рабочей зоне робота [13].

Учитывая особенность навигации разно габаритных МР, отмечается зависимость между габаритами и видом навигации, используемой роботом. Так, крупногабаритные роботы ориентируются, используя методы глобальной навигации, а мелкогабаритные – персональной. Существуют также варианты применения нескольких видов навигации на одном роботе. Такая комбинация методов повышает точность позиционирования робота как объекта. При более детальном изучении каждого метода навигации наблюдаются общие черты, которые можно выделить в отдельный признак, включающий в себя пассивную, постоянно находящуюся в режиме приема информации, как о собственных координатах, так и о количественных характеристиках

движения от внешних систем, и активную, определяющую местоположение посредством анализа информации от датчиков, расположенных на МР и принятия решения о дальнейших направлении и скорости движения для выполнения поставленной задачи, системы навигации. Активную систему навигации постоянно используют роботы, использующие персональные схемы навигации, и наполовину – локальные. Из этого следует вывод, что МР, использующие локальные схемы навигации, выполняют более широкий спектр задач.

Первые модели промышленных роботов, созданные в 1960-е годы, передвигались по маршруту, жестко заданному с помощью электрических кабелей, проложенных под полом заводских сооружений [12]. С появлением и внедрением первых систем машинного зрения удалось отказаться от кабелей и перейти к навигации по ярко нарисованным линиям на полу [14].

Из большого количества известных робототехнических платформ для исследований движения МР можно выделить ряд наиболее интересных проектов, таких как *Lego mindstorms*, *iRobot*, *Thymio*. Сегодня все больший интерес вызывают МУ под управлением ОС *Android*. Развивающимися зарубежными проектами в бытовом сегменте автономных МР на сегодняшний день являются *Cellbots*, *IOIO*, *Meet ROMO*, *Wheelphone*, *Botiful*. Отечественные аналоги МР под управлением мобильных устройств с ОС *Android* на сегодняшний день практически отсутствуют. Общая функциональная схема МР под управлением МУ включает в себя непосредственно МУ, одноплатный компьютер, привод, датчики и колесную платформу. Одноплатный компьютер посредством цифровых сигналов управляет сервоприводами, установленными на колесной платформе. Датчики определяют обратную связь, необходимую для контроля движения. МУ является в этой системе высокоуровневым устройством управления и в ряде случаев может исполнять роль одноплатного компьютера и датчиков, тем самым функциональная схема устройства оптимизируется (из нее уберутся соответственно блоки «Одноплатный компьютер» и «Датчики»).

Результаты исследования. При разработке системы планирования движения МР большое внимание уделяется построению системы управления, алгоритмам распознавания препятствия, а также алгоритмам объезда препятствия. Поэтому, в качестве колесной базы и приводов было выбрано стандартное решение от *LEGO*, а именно, платформа *NXT*, которая позволяет контролировать до трех серводвигателей и предоставляет простые в использовании датчики, позволяющие строить МР любой модификации. Наличие *Bluetooth* приемопередатчика позволяет обеспечивать беспроводную связь с МР, что значительно упрощает конструкцию. Основной концепцией построения МР для решения задачи планирования движения является разделение устройства на 2 слоя: низкоуровневый и высокоуровневый. Низкоуровневый слой, реализуемый *Lego NXT*, позволяет контролировать датчики и

исполнительные механизмы, входящие в стандартный комплект [15]. Высокоуровневый слой обеспечивает вычисление управляющих сигналов при планировании сложного поведения системы.

В качестве МУ, встраиваемого в МР, выбран телефон, производства компании *Samsung*, модели *Galaxy S4*. Для упрощения конструкции при решении исследовательской задачи из стандартного компонента *Lego NXT* была собрана трехколесная платформа с двумя независимыми ведущими колесами, что для рассматриваемой исследовательской задачи вполне достаточно.

При построении математической модели МР с двумя электродвигателями постоянного тока, вращающими колеса робота, было пренебрежено влиянием инерционности третьего ролевого колеса на динамику робота, а также, движение ведущих колес было принято без проскальзывания. Следовательно, с учетом пренебрежений, третье колесо представляется к расчетам как абсолютно гладкая опора в некоторой точке. На рисунке 1 изображена схема трехколесного МР, где *L*, *R* – левый и правый независимые двигатели соответственно, *N* – ролевое колесо, ω_l , ω_r – угловые скорости левого и правого колес, ω_p – угловая скорость вращения платформы относительно вертикальной оси. Сервоприводы платформы *Lego NXT L* и *R* приводят в движение ведущие колеса.

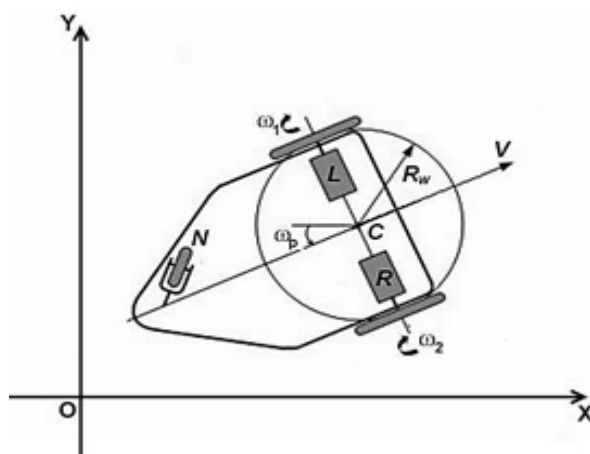


Рисунок 1 – Схема мобильного робота

В процессе вывода уравнений движения МР, оно будет описываться изменением положения точки *C*. Система координат, представленная на рисунке 1, является неподвижной и введена в систему для решения задачи локализации робота. При движении по реальной местности, абсцисса выбирается направлением востока, а ордината в направлении севера [16]. Скорость робота определяется согласно выражению:

$$V = \frac{\omega_l + \omega_r}{2} \cdot r_k, \quad (1)$$

где ω_l , ω_r – угловые скорости левого и правого ведущих колес; r_k – радиус колеса.

При поворотах МР и смещении курса движения, угловая скорость вращения становится отличной от нуля и принимает значение, описываемое через угловые скорости колес:

$$\omega_p = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \cdot \frac{r_k}{R_\omega}, \quad (2)$$

где R_ω – половина ширины платформы, т.е. колесной базы.

Управляющий сигнал подается от контроллера *Lego NXT* на сервоприводы, следовательно, при известных значениях параметров передаточных функций сервоприводов по скорости WL и WR отношение угловых скоростей вращения колес к управляющим напряжениям посредством изображений Лапласа можно представить в виде следующих выражений:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= W_L(s)U_1(s), \\ \omega_2 &= W_R(s)U_2(s), \end{aligned} \quad (3)$$

где $U_1(s)$, $U_2(s)$ – изображения Лапласа для входных сигналов напряжения, подаваемых на левый и правый двигатели соответственно [16].

Объединив полученные ранее математические выражения в системы, получаем схему исполнительской части МР, показанную на рисунке 2.

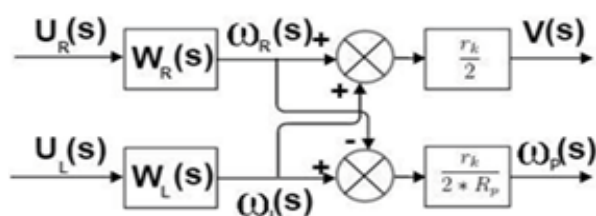


Рисунок 2 – Схема исполнительской части системы

Входные сигналы напряжения $U_1(s)$, $U_2(s)$, проходя через динамические звенья WL и WR , преобразуются в угловые скорости вращения колес ω_p , ω_2 и, проходя через пропорциональные звенья, преобразуются в выходные переменные $V(s)$ и $\omega_p(s)$.

Для написания приложения на стороне МУ использован прикладной программный интерфейс *Android 5.0* комплекта разработчика. ОС *Android* представляет компонентную модель процессов в системе [17]. Все подключаемые модули и библиотеки на этапе компиляции, перед запуском компилируются в *native C/C++* код. На стороне платформы *LegoNXT* на блоке управления установлена ОС *LejOS*.

Для создания системы технического зрения, базирующейся на МУ, предварительно был проведен обзор библиотек компьютерного зрения с открытым исходным кодом, что аргументировано такими критериями как безопасность, качество, реконфигурируемость, гибкость. На основании достоинств и недостатков библиотек и фреймворков библиотек компьютерного зрения *OpenCV* и *JavaCV* являются наиболее подходящими инструментами для распознавания препятствий на пути МР. Подключение библиотеки *OpenCV* к ОС позволяет использовать весь потенциал библиотеки в разработке приложений для мобильной ОС *Android* [18].

Алгоритм планирования движения мобильного робота. При управлении МР можно выделить три варианта системы управления движением:

- 1) распределенная система принятия решений.

Такая система подразумевает наличие сервера для тщательной обработки больших данных, для принятия более тщательного решения о выборе движения, скорости и ускорения робота;

2) реактивная система принятия решений. Такая система предполагает быстрое взаимодействие между исполнительской и управляющей частью робота;

3) гибридная система принятия решений. Такая система предполагает быстрое симбиоз двух предшествующих видов систем, т.е. скорость работы реактивной системы принятия решений и интеллект распределенной системы принятия решений.

При наличии в конструкции МР единственной камеры в качестве системы технического зрения, для определения направления движения робота, существуют три последовательные задачи: детектирование объекта окружающей среды как препятствие, кратковременное слежение за препятствием, для исключения внешних кратковременных возмущений (яркие вспышки (например, «солнечные зайчики»), проезд по неровностям, во время которого зона видимости робота теряет стабильность), передача зафиксированного кадра с препятствием в алгоритмический блок обработки изображения с последующим планированием движения МР [19].

Для распознавания и детектирования изображения необходимо также реализовать алгоритмы обработки цифрового изображения. Используемыми методами при обработке изображения для решения этой задачи являются:

- 1) фотограмметрия;
- 2) улучшение качества изображения;
- 3) фильтрация изображения.

Применение фотограмметрии в случае, если расстояние между видеокамерой и наблюдаемым объектом достаточно больше фокусного расстояния оптической системы, то изображение строится в ее фокальной плоскости [15]. Проекцию точки m можно представить в виде:

$$ZV = AM, \quad (4)$$

где $A = \begin{pmatrix} f/w & 0 & u_o \\ 0 & f/h & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ – матрица внутренних параметров камеры;

M – трехмерный вектор точки M ;

v – вектор однородных координат камеры.

Для решения задачи улучшения качества изображения применяется метод линейного контрастирования [15]. Поэлементное преобразование выглядит, как:

$$y = ax + b, \quad (5)$$

где x , y – значения яркости изображения до и после обработки соответственно, a и b – параметры преобразования.

Система уравнений для минимальных и максимальных значений яркости выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} y_{\min} = ax_{\min} + b, \\ y_{\max} = ax_{\max} + b; \end{cases} \quad (6)$$

Ввиду того, что изображения, сформированные

различными информационными системами, искажаются действием помех, это затрудняет автоматическую обработку ЭВМ. Ослабление действия помех достигается фильтрацией, когда яркость каждой точки исходного изображения, искаженного помехой, заменяется другим значением яркости, которое признается в наименьшей степени искаженным помехой. Следовательно, основная идея фильтрации заключается в рациональном использовании данных как из рабочей точки, так и из ее окрестности [20]. В статье применяется оптимальная линейная фильтрация, основанная на уравнении Винера-Хопфа. Изображение на входе представлено как описывает выражение

$$y_{i,j} = f(x_{i,j}, n_{i,j}), \quad i = 0, I-1, j = 0, J-1, \quad (7)$$

где n – значение помехи в точке, $f(x, n)$ – функция взаимодействия сигнала и помехи, I и J – число строк и столбцов кадра изображения. При линейной фильтрации выходной эффект определяется линейной комбинацией входных данных

$$x^*(i, j) = \sum_{(i_1, j_1) \in S} a(i_1, j_1) y(i - i_1, j - j_1), \quad (8)$$

где x – результат фильтрации полезного сигнала в точке с координатами (i, j) , образующих окрестность; $a(i, j)$ – весовые коэффициенты.

Задача планирования движения МР заключается в поиске оптимального, свободного маршрута от стартовой точки до точки назначения в незнакомой среде, содержащей всевозможные препятствия. Планирование движения делится на 2 группы: планирование в статической и динамической окружающей среде. Под статической окружающей средой понимается среда, содержащая только статические объекты-препятствия, под динамической – динамические объекты-препятствия. Каждая из этих групп делится на подгруппы: управление в среде с известными картой и объектами, и неизвестными, определение которых необходимо выполнять в режиме реального времени.

Для каждого случая выделены наиболее подходящие методы определения маршрута и движения [13].

- 1) Планирование движения в известной статической среде с известными препятствиями.
- 2) Планирование пути в статической неизвестной окружающей среде.
- 3) Планирование пути в динамической известной среде.
- 4) Планирование пути в динамической неизвестной среде.

Планирование движения МР в неизвестной местности с наличием статических и динамических препятствий является самым сложным случаем, но в то же время и самым распространенным, с которым приходится сталкиваться МР. Самым эффективным методом в этом случае является метод потенциалов в задаче выбора полей, предложенный А.К. Платоновым в 1970 году [12]. Необходимым условием является высокая точность навигационной системы МР, его известные начальные и конечные координаты, направление сектора обзора в выбранной системе координат. МР в этой системе координат представляется как точка с

вектором ориентации. Суть метода заключается в следующем. Цель является положительно заряженной, а МР и препятствия – отрицательно. Под действием сил МР в качестве отрицательного заряда, будет притягиваться к целевому, положительному заряду и отталкиваться от препятствий в виде отрицательных зарядов. Важное значение этого метода заключается в том, что имеется возможность задания собственных законов движения различными способами. Следовательно, при введении в систему ограничений на неизвестную карту местности и законы движения МР, он достигнет цели.

Экспериментальное исследование разработанной системы планирования движения. Для проведения эксперимента с использованием виртуальных средств тестирования алгоритмов движения МР был проведен обзор существующих программных комплексов для моделирования таких систем. К преимуществам предварительного тестирования алгоритмов МР относятся:

- 1) решение проблемы ограниченности выбора технических средств. Виртуальные среды симуляции МР позволяют собрать робота из большинства актуальных и доступных в продаже узлов;

- 2) отсутствие возможности наблюдения за поведением робота в выбранной окружающей среде, чаще всего агрессивной.

Основными возможностями программных комплексов симуляции роботов являются:

- 1) параллельная и асинхронная обработка данных, поступающих с датчиков;
- 2) синхронное и асинхронное взаимодействие процессов управления различными подсистемами робота;
- 3) создание модели робота с учетом физических свойств, таких как масса, упругость, свойства материала, вращающие моменты;
- 4) тестирование алгоритмов управления;
- 5) создание настраиваемых, с учетом параметров 3D-сцен для моделирования;

- 6) возможность моделирования отдельных узлов МР, например, современных датчиков: лазерный дальномер, ультразвуковой и инфракрасный датчики, компас, двигатели и сервомоторы, GPS и т.д.

Был выбран простой программный комплекс *Webots*, для моделирования синтезированного в ходе написания статьи алгоритма. При тестировании прототипа МР в естественной среде использовались те же алгоритмы детектирования и объезда препятствия. На основании координат МР, с помощью математического пакета *MATLAB* построены графики, отображающие траекторию движения МР. На рисунке 3, а представлена траектория объезда одного препятствия на карте местности. На рисунке 3, б показана траектория объезда МР двух препятствий. На рисунке 3, в представлена траектория объезда МР нескольких препятствий на карте местности.

Результатом эксперимента, который обеспечивается при совместном использовании датчиков спроектированного МР и выполнением алгоритма объезда

препятствия, служит достижение МР указанной точки назначения без соприкосновения с препятствием.

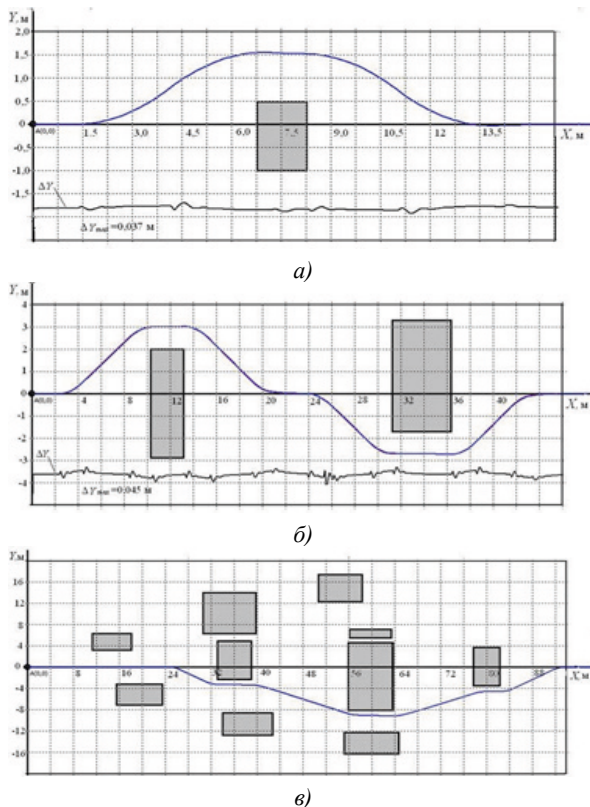


Рисунок 3 – Траектория движения при объезде одного препятствия (а), двух препятствий (б), нескольких препятствий (в)

Заключение. В статье проведен обзор отечественных и зарубежных МР, решающих задачу планирования движения на известной карте местности с неизвестными препятствиями. Рассмотрены такие методы навигации МР как локальная, глобальная, персональная. Выбрана элементная база в составе МУ, работающего под управлением ОС *Android* 5.0 и непосредственно исполнительная часть устройства на базе трехколесной платформы с двумя ведущими сервоприводами и флюгерным колесом *Lego Mindstorms NXT*. На основании проведенных исследований предложен прототип МР, способный распознавать препятствия правильной геометрической формы, осуществлять планирование и корректировку, в случае необходимости, маршрута движения. Определение расстояния и угла до препятствия вычисляются методами фотограмметрии, улучшение качества изображения методом линейного контрастирования и оптимальной линейной фильтрации с применением уравнения Винера-Хопфа. Для тестирования прототипа выбран программный комплекс *Webots*. МР успешно определил препятствие, спланировал маршрут в соответствии с алгоритмом объезда и продолжил движение к целевой точке назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Chi K.-H., Lee M.R. Obstacle avoidance in mobile robot using Neural Network // 2011 International Conference on Con-

sumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2011. PP. 5082–5085.

2. Kristensen S, Horstmann S., Klandt J., Lohner F., and Stopp A. Human-friendly interaction for learning and cooperation // Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 2001. IEEE. – PP. 2590–2595.

3. Ulas C., Temeltas H. Multi-Layered Normal Distribution Transform for Fast and Long Range Matching // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2013. – Vol. 71 (1). – PP. 85–108.

4. Дергачев, В. В. Способы оценки и снижения вычислительной сложности алгоритмов принятия решений в задачах одновременной локализации и картографирования / В. В. Дергачев, О.О. Карташов // Инженерный вестник Дона. – 2017. – №4. [Электронный ресурс] URL: <http://ivdon.ru/rumagazine/archive/n4y2017/4598> (дата обращения: 22.06.2020).

5. Кучерский, Р.В. Алгоритмы локальной навигации и картографии для бортовой системы управления автономного мобильного робота / Р.В. Кучерский, С.В. Манько // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – №3(128). – С. 13–22.

6. Montemerlo M., Thrun S., Koller D., Wegbreit B. Fastslam: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. In AAAI-2002 (Vancouver, BC, July 2002).

7. Nist'er D., Naroditsky O., Bergen J. Visual odometry for ground vehicle applications // Journal of Field Robotics. – 2006. – Vol. 23 (1). – PP. 3–20.

8. Девятчиков Е.А., Михайлов Б.Б. Использование данных визуального одометра для автономного возвращения мобильного робота в среде без фиксированных точек отсчета // Экстремальная робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. – С. 356–361.

9. Герасимов В.Н., Михайлов Б.Б. Решение задачи управления движением мобильного робота при наличии динамических препятствий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. Спецвыпуск «Робототехнические системы». – 2012. – № 6. – С. 83–92.

10. Герасимов В.Н. Алгоритм SLAM на основе корреляционной функции // Экстремальная робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. – С. 126–133.

11. Герасимов В.Н. К вопросу управления движением мобильного робота в динамической среде // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – № 1 (2). – С. 44–51.

12. Gary Bradski, Computer vision face tracking for use in a perceptual user interface, Intel Technology Journal (1998), [Электронный ресурс] URL: http://opencv.jp/opencv-1.0.0_org/docs/papers/camshift.pdf (дата обращения: 22.06.2020).

13. Gary Bradski and Adrian Kaehler, Learning opencv: Computer vision with the opencv library, 1st ed., O'Reilly Media, Sep. 2008, 580 p.

14. Keinosuke Fukunaga and Larry D. Hostetler, The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 21, 1975, pp. 32–40.

15. Stephan Goebel, Ruben Jubeh, Simon-Lennert Raesch, Albert Zündorf, Using the android platform to control robots, Research paper, Kassel University, 2011, [Электронный ресурс] URL: https://pdfs.semanticscholar.org/fccf/452a3cfb3269f899ee6c3ba602f668816f19.pdf?_ga=2.80217687.1724508901.1587716517-246479418.1587716517 (дата обращения: 22.06.2020).

16. В.А. Плотников. Анализ эффективности существующих методов уклонения от столкновения для мобильного робота // Плотников В.А. – Донецк: Штучный интеллект – 2010. – № 4. – С. 535–541.

17. Strom J., Slavov G., Chown E. Omnidirectional walking

using zmp and preview control for the nao humanoid robot // RoboCup 2009: robot soccer world cup XIII.: Springer, 2010. PP. 378–389

18. Евстигнеев Д. В. Программно-алгоритмическое обеспечение интеллектуальных систем управления автономными мобильными роботами: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.13.01 / Моск. гос. ин-т радиотехники, электроники и автоматики. – Москва, 2003. – 26 с.

19. Карманов В. Г. Математическое программирование / В.Г. Карманов. - 5. изд., стер. - М.: Физматлит, 2004. – 263 с.

20. RoboCup. [Электронный ресурс] URL: <http://www.robocup.org> (дата обращения: 22.06.2020).

Статья поступила в редакцию 28.07.2020

Статья принята к публикации 14.09.2020