

А. С. Быков, А. М. Кошман, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин

**КОМБИНИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ
ДВУМЕРНЫХ ДАННЫХ О СРЕДЕ И ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ
МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ**

Волгоградский государственный технический университет

alexanderbs00@mail.ru, artkoshman@gmail.com, alex-leonard@yandex.ru, au@vstu.ru

В статье рассматривается вопрос совместного моделирования алгоритмов обработки данных о среде, получаемых от 2D-лидара, и использования этих данных в модифицированном алгоритме планирования движения мобильного робота. Описано поэтапное функционирование комбинированного алгоритма, представлена его общая схема и определены его особенности.

Ключевые слова: мобильный робот, планирование движения, обход препятствий, метод потенциальных полей, компьютерное моделирование, техническое зрение

A. S. Bykov, A. M. Koshman, A. V. Leonard, V. A. Shurygin

**COMBINED SIMULATION OF PROCESSING TWO-DIMENSIONAL
ENVIRONMENTAL DATA AND PLANNING THE MOVEMENT
OF A MOBILE ROBOT ALONG A HORIZONTAL PLANE**

Volgograd State Technical University

The article discusses the joint modeling of algorithms for the processing of environmental data obtained from a two-dimensional lidar (2D-lidar) and the use of these data in a modified algorithm for the planning of the movement of a mobile robot. It describes the step-by-step operation of the integrated algorithm, presents its general scheme and determines its features.

Keywords: mobile robot, motion planning, obstacle avoidance, artificial potential field, computer simulation, computer vision

Введение

Современные автономные робототехнические системы требуют эффективного взаимодействия с динамичной средой, что обуславливает необходимость обработки данных от различных сенсоров. Существуют подходы по сканированию окружающей среды мобильного робота на основе применения лидаров [1], видеокамер [2] и ультразвуковых датчиков [3]. Двумерные лидары демонстрируют преимущества в задачах навигации мобильных роботов [4]. Для автоматического синтеза законов движения (траекторий) робота в недетерминированной среде необходимо совместное использование алгоритмов обработки сенсорной информации и алгоритмов планирования движения, обеспечивающих безопасное уклонение робота от препятствий.

1. Постановка задачи

Ранее в работах [5, 6] были предложены алгоритмы обработки данных об окружающей среде мобильного робота. Описанные алгоритмы позволяют обрабатывать данные, поступающие от виртуального двумерного лидара: формировать общий массив геометрических точек видимых границ препятствий; разбивать его на массивы точек, характеризующие препятствия; классифицировать препятствия и производить их аппроксимацию (расчет координат x_i , y_i центров габаритных окружностей препятствий и их радиусов R_i).

В качестве метода планирования движения центра масс мобильного робота (ЦМ МР) используется способ, основанный на методе $VC/APF+BC_\tau^I$ [7, 8]. Данный метод обеспечивает теоретически безударный обход статических

препятствий, используя отталкивающую силу, которая действует в поле препятствия между внешней r_0 и внутренней r_{min} его границами.

Требуется интегрировать указанные алгоритмы друг с другом и проверить работоспособность комбинированного алгоритма с помощью численных экспериментов.

2. Описание комбинированного алгоритма

В качестве исходных данных задаются: начальные и конечные координаты, скорости ЦМ МР, масса робота, размер его габаритной окружности, оперативное время t , временной шаг Δt и др. Для упрощения отладки алгоритмов в качестве источника данных вместо реального устройства (двумерного лидара) используется программный инструмент, моделирующий его работу. Данный программный блок позволяет настраивать дальность видимости моделируемого устройства и угловой шаг поворота его излучателя-детектора. Препятствия и окружающая местность робота задаются в виде двумерного изображения с заданным масштабом. Преграды изображаются черным цветом, соответственно признаком обнаружения препятствия является нахождение пикселя черного цвета на луче моделируемого лидара. Функционирование данного модуля описано в статье [5]. В результате ра-

боты программного модуля формируется массив данных, характеризующих обнаруженные точки границ препятствий возле робота.

Массив, полученный на этапе сбора информации об окружающей среде, используется в следующем программном модуле, который отвечает за идентификацию препятствий. На основании сравнения расстояний между точками с пороговым параметром идентификации первоначальный массив разделяется на множество массивов, каждый из которых характеризует отдельное препятствие.

Затем следует этап классификации препятствий [6]. В зависимости от присвоенного класса для каждого из препятствий рассчитываются его параметры. Для алгоритма планирования законов движения робота входными параметрами являются координаты (x_1, y_1) центра окружности, характеризующей препятствие, и ее радиус R_1 .

Набор параметров для препятствия передается в программный блок, отвечающий за планирование движения мобильного робота. В данной работе, в отличие от работ [7, 8], параметры препятствия изначально неизвестны, на каждом временном шаге они определяются при нахождении препятствия в зоне видимости лидара радиуса r_L и передаются в модифицированный алгоритм планирования движения мобильного робота.

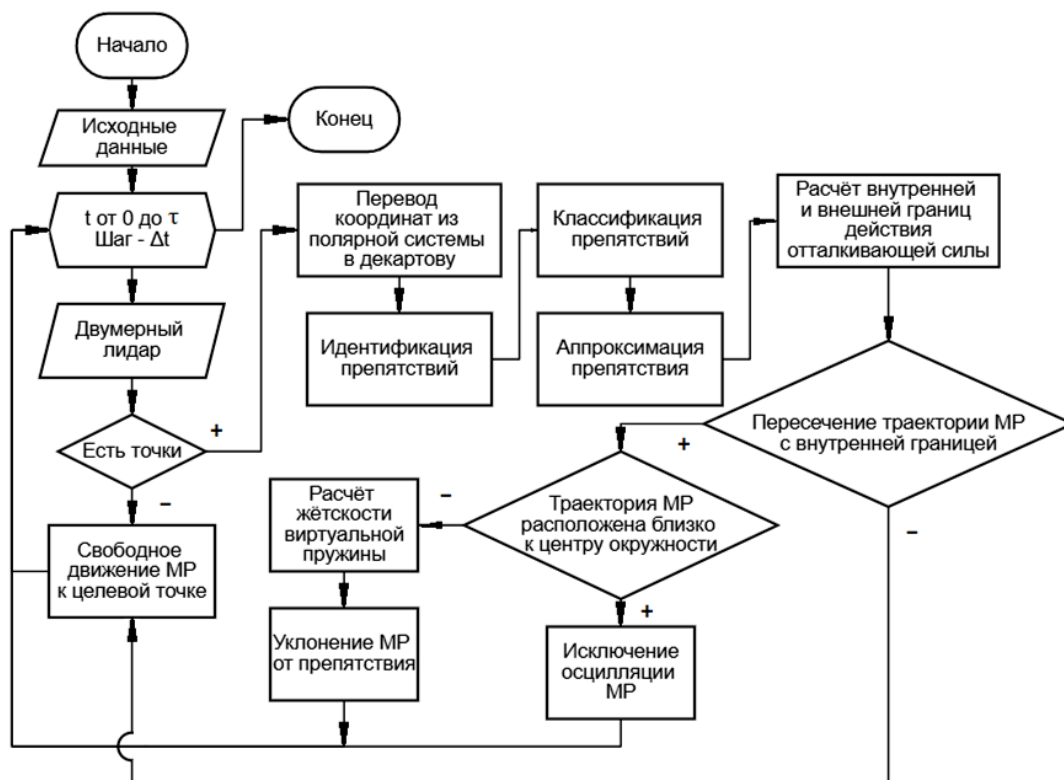


Рис. 1. Блок-схема комбинированного алгоритма

На следующем этапе рассчитываются значения радиуса r_{min} внутренней границы и радиуса r_0 внешней границы силового поля вокруг препятствия. Проверяется наличие пересечения аналитической траектории (получающейся в результате применения законов движения в интегральной форме) [7] и внутренней границы поля. При установлении пересечения минимальное расстояние между аналитической траекторией и центром описанной вокруг препятствия окружности сравнивается с пороговым значением. Если расстояние меньше, чем пороговое значение, то запускается режим исключения осцилляций мобильного робота [9]. Если расстояние больше либо равно пороговому значению, то запускается режим уклонения от препятствия: происходит определение жесткости виртуальной пружины c и рассчиты-

ваются координаты (скорости, ускорения) ЦМ МР с учетом влияния отталкивающей силы. В случае если пересечения нет, движение мобильного робота происходит по кратчайшей траектории до целевой точки. Данная процедура повторяется каждый раз, когда робот фиксирует препятствие.

В общем виде блок-схема комбинированного алгоритма представлена на рис. 1.

3. Моделирование процесса работы комбинированного алгоритма

На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования обхода роботом статичного препятствия в виде квадрата со стороной 1 м за заданное время, где на рис. 2–5: «Start» – начальное положение ЦМ МР, «Goal» – целевое (требуемое) конечное положение ЦМ МР.

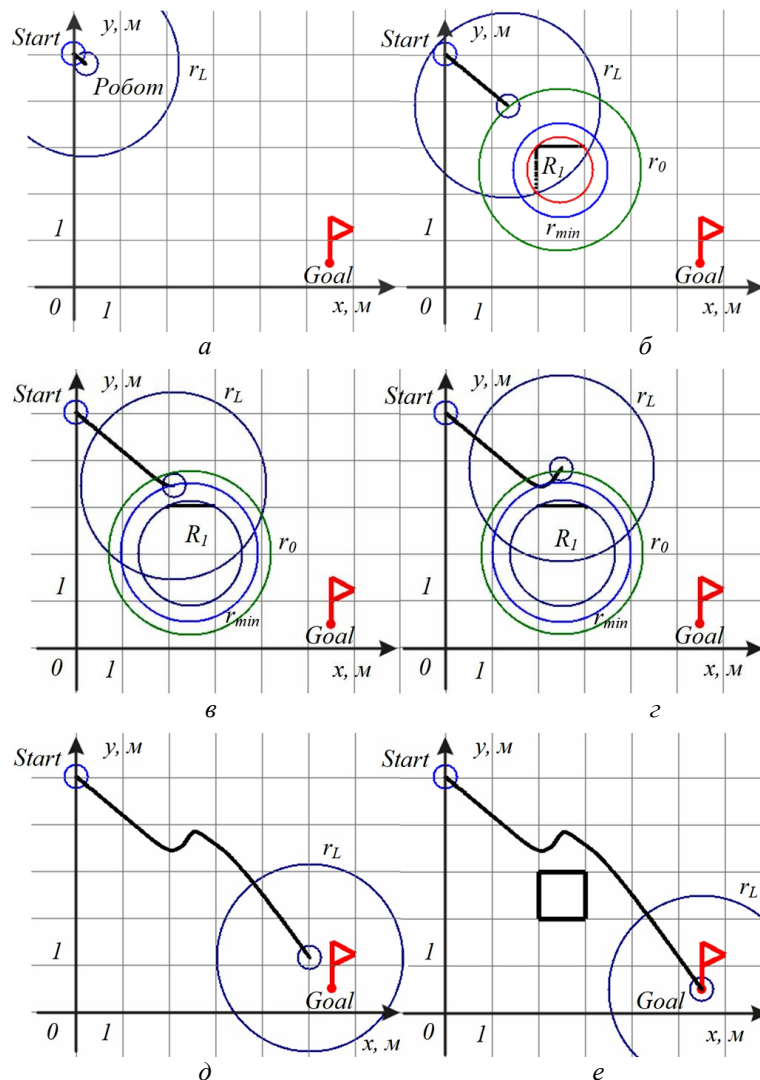


Рис. 2. Целевое движение робота с обходом препятствия:

a – свободное движение, препятствие вне зоны видимости лидара r_L ; *б* – обнаружение препятствия, расчет параметров препятствия; *в* – уклонение от препятствия с переопределением параметров; *г* – выход из отталкивающего, адаптивного поля препятствия; *е* – итог объезда препятствия за заданное время

Для оценки влияния расчетных параметров препятствия на результат планирования движения центра масс мобильного робота были проведены численные эксперименты для случаев,

когда препятствие направлено углом к роботу (рис. 3, *а*) и когда препятствие расположено ребром к роботу (рис. 3, *б*).

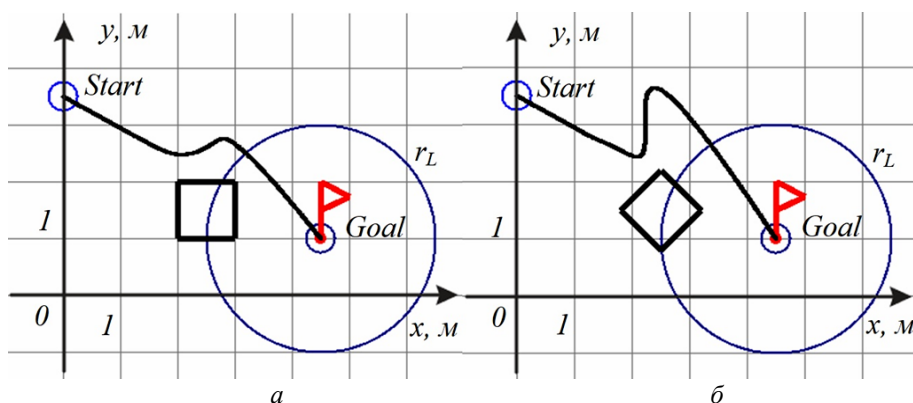


Рис. 3. Влияние ориентации препятствия на синтезируемую траекторию:
а – препятствие – углом к роботу; *б* – препятствие – ребром к роботу

С целью сравнения алгоритмов планирования движения без модификации и с описанной модификацией в составе комбинированного

алгоритма были проведены численные эксперименты, результаты которых представлены на рис. 4.

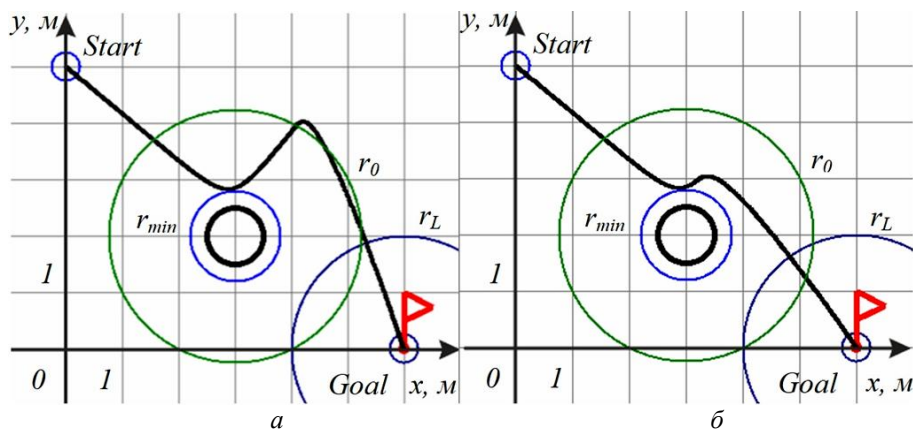


Рис. 4. Сравнение алгоритмов планирования движения робота:
а – работа алгоритма без модификации; *б* – работа модифицированного алгоритма

Предложенный подход к решению проблемы осцилляции мобильного робота под действием отклоняющей силы [9] был интегрирован в комбинированный алгоритм. Для оценки ра-

ботоспособности данного подхода в составе комбинированного алгоритма были проведены численные эксперименты, результаты которых представлены на рис. 5.

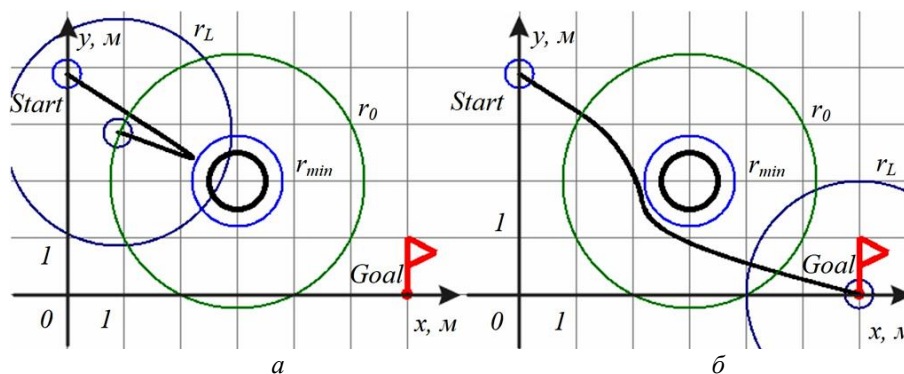


Рис. 5. Сравнение алгоритмов уклонения робота от препятствия:
 а – на основе силы, направленной от центра препятствия к центру робота;
 б – на основе силы, перпендикулярной вектору скорости центра масс робота

Заключение

Проведенные численные эксперименты показывают, что комбинированный алгоритм в общем случае работоспособен. Моделируемый мобильный робот с помощью виртуального сенсора обнаруживает препятствия, рассчитывает их параметры и совершает безударный обход препятствий (рис. 2).

Как следует из рис. 3, при преодолении роботом одного и того же препятствия с разной его пространственной ориентацией, информация об окружающей среде робота существенно влияет на получаемые траектории (законы) движения центра масс мобильного робота к целевой точке.

Введение повторяющейся проверки пересечения аналитической траектории и внутренней границы поля препятствия позволяет сократить время движения мобильного робота (рис. 4) под действием отталкивающей силы (уменьшить значения максимальных ускорений).

Использование отклоняющей силы (перпендикулярной вектору скорости центра масс робота) в модифицированном алгоритме планирования движения мобильного робота обеспечивает синтез более гладких траекторий (законов) движения центра масс робота без его осцилляций (рис. 5).

Комбинированный алгоритм может быть рассмотрен к применению в системах управления мобильных роботов, использующих в качестве основного сенсора двумерный лидар.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yan, K. Mapless Navigation Based on 2D LIDAR in Complex Unknown Environments / K. Yan, B. Ma // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, no. 20. – Art. 5802. – DOI: 10.3390/s20205802.
2. Dang, T.-V. Obstacle Avoidance Strategy for Mobile Robot Based on Monocular Camera / T.-V. Dang, N.-T. Bui // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12, no. 8. – Art. 1932. – DOI: 10.3390/electronics12081932.
3. Azeta, J. Obstacle detection using ultrasonic sensor for a mobile robot / J. Azeta, C. Bolu, D. Hinvi, A. Abioye // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 707. – Art. 012012. – DOI: 10.1088/1757-899X/707/1/012012.
4. Liu, Y. A Review of Sensing Technologies for Indoor Autonomous Mobile Robots / Y. Liu, S. Wang, Y. Xie, T. Xiong, M. Wu // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, no. 4. – Art. 1222. – DOI: 10.3390/s24041222.
5. Быков, А. С. Разработка и совместное моделирование алгоритмов обработки данных о среде, полученных 2D-LIDAR / А. С. Быков, А. М. Кошман, А. В. Леонард // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2023. – С. 29–33.
6. Быков, А. С. Классификация препятствий и способы их аппроксимации для задач обхода статических препятствий / А. С. Быков, А. М. Кошман, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (287) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2024. – С. 35–40.
7. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени (VC/APF+BC_τ⁻¹). Ч.1 Теория / А. В. Леонард // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(268) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2022. – С. 34–42.
8. Кошман, А. М. Планирование движения наземного робота с учетом его 2D-пространственной ориентации и обходом одного статического препятствия / А. М. Кошман, А. С. Быков, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(275) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2023. – С. 51–57.
9. Быков, А. С. Способ обхода роботом статического препятствия на горизонтальной плоскости с помощью отклоняющей силы / А. С. Быков, А. М. Кошман, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(299) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2025.