

УДК 004.896+007.3+007.52+51-74+517.97+62-52+681.5
DOI 10.35211/1990-5297-2025-9-304-31-35

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

**ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ
С ОБХОДОМ ДВУХ СТАТИЧНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ,
РАСПОЛОЖЕННЫХ НА НЕЗНАЧИТЕЛЬНОМ УДАЛЕНИИ ДРУГ ОТ ДРУГА**

Волгоградский государственный технический университет

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

В статье рассматривается модификация метода автоматического планирования движения мобильного робота ($VC/APF+BC_{\tau}^1$), позволяющая обеспечить роботу целевое движение (с нулевыми начальными и конечными линейными скоростями) за отведенное время с безударным обходом двух статичных препятствий. При этом препятствия (как и сам робот) расположены на горизонтальной плоскости на незначительном удалении друг от друга.

Ключевые слова: мобильный робот, планирование движения, вариационное исчисление, метод потенциального поля, оптимальное управление, компьютерное моделирование.

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

**PLANNING THE MOVEMENT OF THE ROBOT ALONG A HORIZONTAL
PLANE BYPASSING TWO STATIC OBSTACLES LOCATED
AT A SMALL DISTANCE FROM EACH OTHER**

Volgograd State Technical University

The article considers the modification of the method of automatic motion planning of a mobile robot ($VC/APF+BC_{\tau}^1$), which allows the robot to provide targeted movement (with zero initial and final linear velocities) in the allotted time with a shock-free bypass of two static obstacles. In this case, the obstacles (as well as the robot itself) are located on a horizontal plane at a small distance from each other.

Keywords: mobile robot, motion planning, calculus of variations, artificial potential field method (APF), optimal control, computer simulation

Введение

При автоматическом планировании движения мобильного робота в сложно структурированной среде, одной из задач робота является задача его маневрирования среди нескольких препятствий. Нередко расстояние между препятствиями незначительно превышает размер самого робота. То есть роботу необходимо совместно уклоняться от столкновения с двумя и более препятствиями. Уклонение робота от первого препятствия может привести к необходимости оперативной корректировки траектории (законов движения) робота для исключения столкновения со вторым препятствием.

Решения подобных задач рассматривались в различных работах, например [1, 2]. Многие опубликованные решения имеют следующие особенности (ограничивающие их практическое применение): требуется заранее подготовленная и обработанная карта оперативного пространства робота; достижение целевой точки носит вероятностный характер (время движения робота не фиксировано); продуцируемая

траектория робота имеет вид ломанной кривой (требуется ее сглаживание); методы исходно не синтезируют законы перемещения мобильного робота (необходимые для физической реализации его движения).

В работе [3] рассматривалось решение задачи обхода двух статичных препятствий ранее предложенным методом $VC/APF+BC_{\tau}^1$ [4]. Данный метод не имеет вышеописанных особенностей, снижающих уровень его практической применимости. При расстоянии между двумя статичными препятствиями много большем размера робота, робот безударно обходит препятствия и приходит в финальную точку за отведенное время. Однако, если расстояние между препятствиями сопоставимо с размерами робота, то могут возникнуть случаи, когда траектория центра масс мобильного робота пересекает второе препятствие (при уклонении от первого).

Таким образом, возникает необходимость в модификации исходного метода автоматического планирования движения $VC/APF+BC_{\tau}^1$, позволяющей оперативно корректировать дви-

жение мобильного робота при близком расположении препятствий (расстояние между габаритными окружностями препятствий незначительно превышает размер робота).

1. Постановка задачи

Требуется модифицировать исходный алгоритм планирования движения мобильного робота (VC/APF+BC_τ¹) для обхода двух препятствий, расстояние d между которыми незначи-

тельно больше размера робота ($d > 2R$, где R – радиус габаритной окружности робота). Движение мобильного робота происходит из начальной точки O в конечную точку F , в которую необходимо попасть за отведенное время τ с заданными начальными и конечными линейными координатами и (нулевыми) скоростями центра масс робота: $x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0; x_\tau, y_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau$ (рис. 1). Робот обладает массой m .

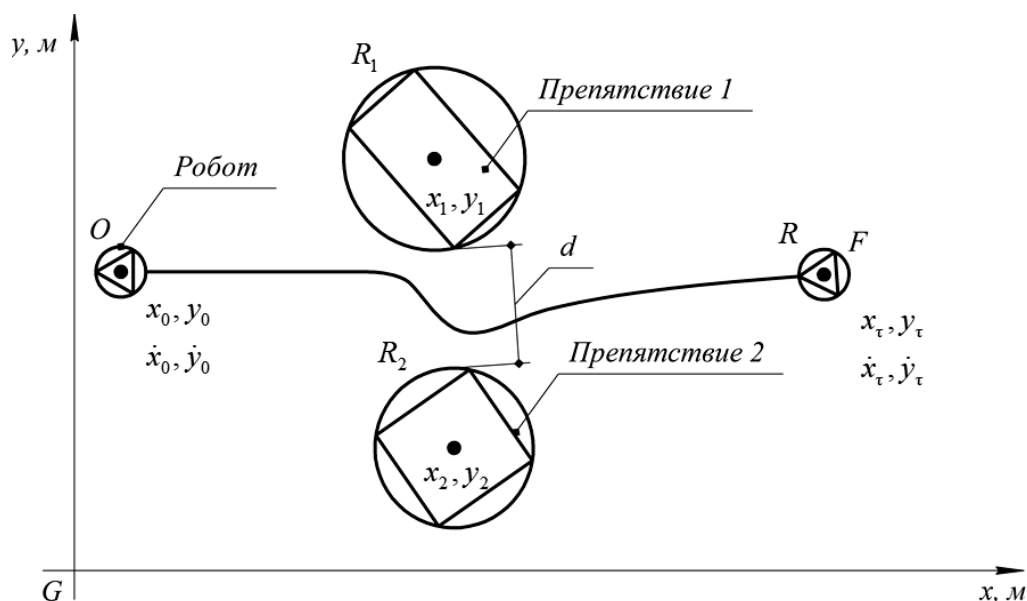


Рис. 1. Постановка задачи

2. Решение

Алгоритм автоматического планирования движения робота (реализуемый при совместном учете двух препятствий и исходных данных) можно описать следующей последовательностью действий:

1. Производится проверка аналитической траектории центра масс (ЦМ) мобильного робота (МР) на пересечение внутренних границ (с радиусами $r_{\min_1}, r_{\min_2}$) силовых полей препятствий (границ опасных зон) [4].

1.1. Если траектория ЦМ МР пересекает внутреннюю границу поля первого препятствия $r_{\min_1}$, то запускается режим уклонения робота от первого препятствия [4]. Поле второго препятствия выключено и не воздействует на робот. Во время движения мобильного робота производится проверка виртуальной аналитической траектории на пересечения с границами опасных зон препятствий на каждом временном шаге.

1.2. Если траектория ЦМ МР не пересекает внутреннюю границу поля (границу опасной

зоны) первого препятствия $r_{\min_1}$, но пересекает внутреннюю границу поля второго препятствия $r_{\min_2}$, то производится:

1.2.1. перерасчет радиуса внешней границы силового поля второго препятствия по формуле (1):

$$r_{0_2} = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2}; \quad (1)$$

где x, y – координаты центра масс робота в текущий момент времени; x_2, y_2 – координаты центра второго препятствия.

1.2.2. проверка условия (2) расчета неотрицательной жесткости виртуальной пружины второго препятствия [5] для его учета в процессе движения робота:

$$\sin^2 \gamma \Big|_{r=r_{0_2}} \leq \frac{r_{\min_2}^2}{r_{0_2}^2} \quad (2)$$

где γ – угол между вектором скорости на внешней границе поля второго препятствия и линией, соединяющей центр масс робота и центр второго препятствия.

1.2.2.1. Если условие (2) не выполняется, то реализуется движение ЦМ МР по аналитической траектории без маневрирования (поля обоих препятствий неактивны) и выполняются действия 1.2.1. и 1.2.2. повторно.

1.2.2.2. Если условие (2) выполняется, то реализуется движение робота в режиме уклонения от второго препятствия. Поле первого препятствия выключено, поле второго препятствия включено.

1.2.3. Происходит возврат к пункту 1 алгоритма.

1.3. Если аналитическая траектория ЦМ МР не пересекает границ полей (опасных зон) препятствий с радиусами $r_{\min_1}, r_{\min_2}$, то производится движение ЦМ МР по аналитическим законам без маневрирования.

В общем виде блок-схема рассматриваемого алгоритма планирования движения робота (при учете в движении робота двух препятствий) представлена на рис. 2.

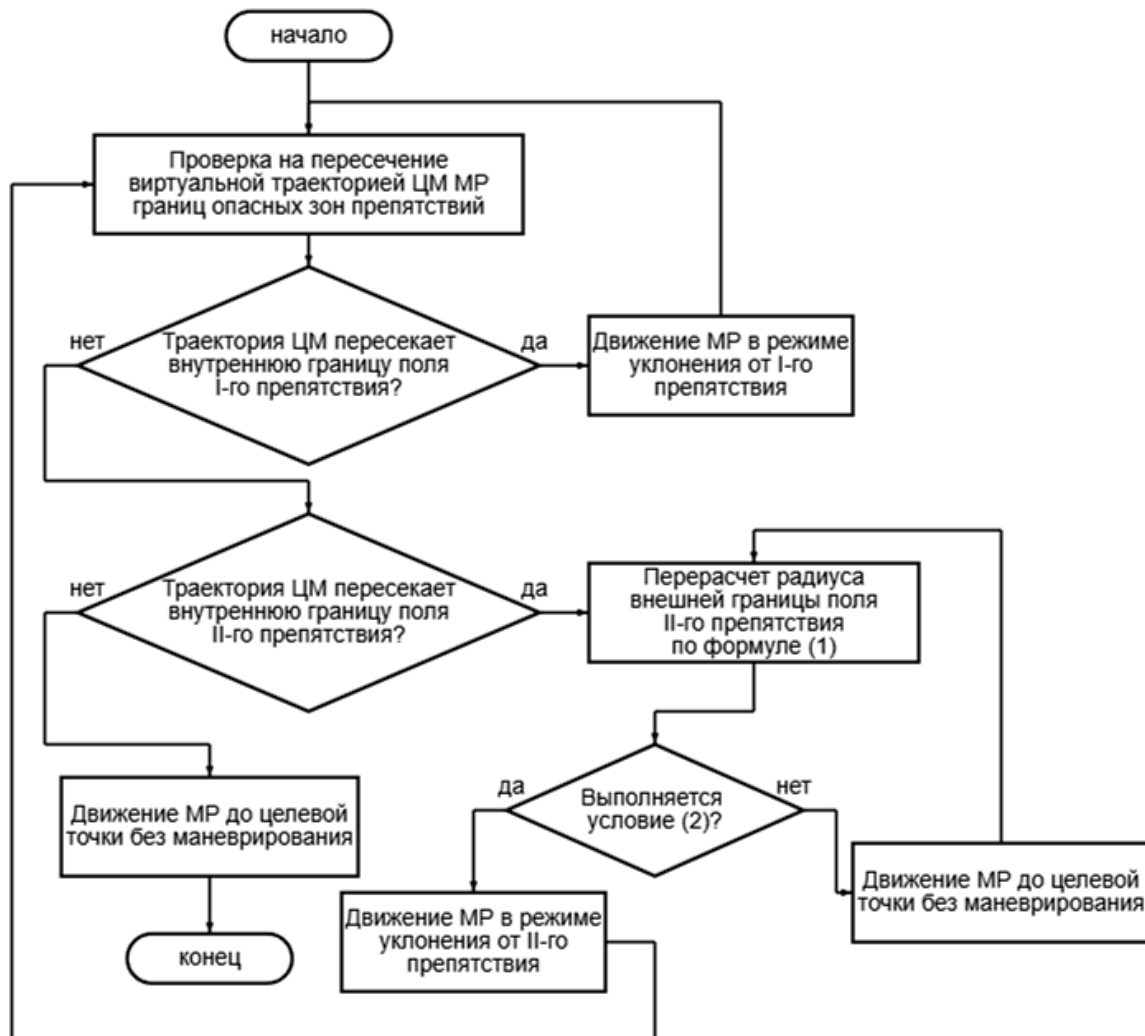
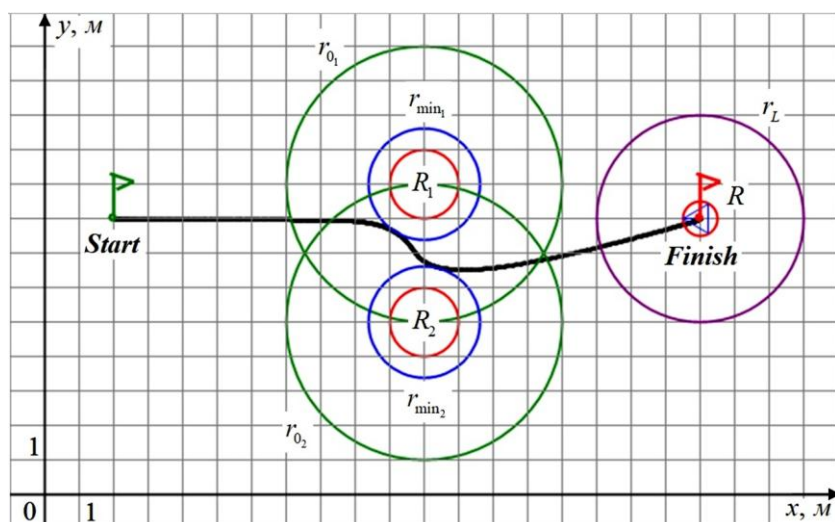


Рис. 2. Блок-схема рассматриваемого алгоритма планирования движения

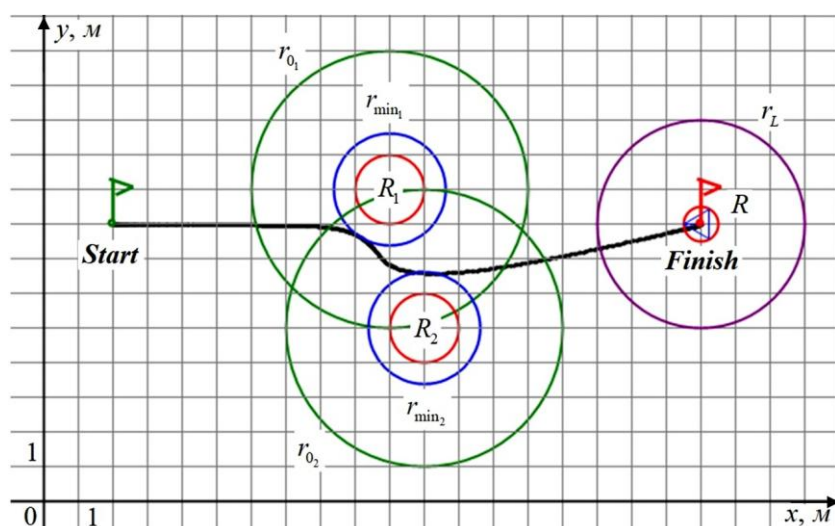
3. Компьютерное моделирование

Для серии численных экспериментов (рис. 3) были приняты постоянными следующие параметры: масса робота $m = 1$ кг; радиус окружности, описанной вокруг робота $R = 0,5$ м; дальность видимости сенсора робота $r_L = 3$ м; размеры габаритных окружностей препятствий $R_1 = R_2 = 1$ м; заданное оперативное время дви-

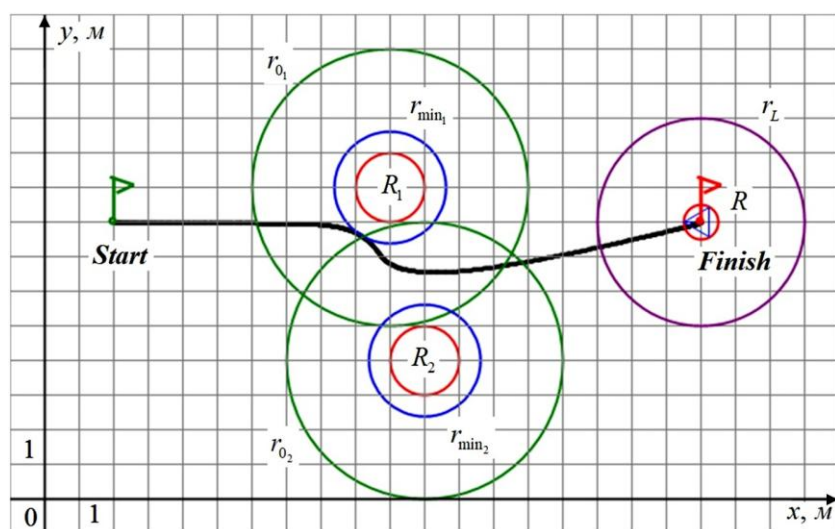
жения робота $\tau = 10$ с, временной шаг расчета кинематических характеристик робота (ускорений, скоростей и координат) $dt = 0,01$ с. Используется теоретическое допущение, что сканирующее устройство мобильного робота получает необходимую информацию об окружающем пространстве в полном объеме и мгновенно.



$a - x_0 = 2 \text{ м}; y_0 = y_\tau = 8 \text{ м}; x_\tau = 19 \text{ м}; x_1 = x_2 = 11 \text{ м}; y_1 = 9 \text{ м}; y_2 = 5 \text{ м}$



$б - x_0 = 2 \text{ м}; y_0 = y_\tau = 8 \text{ м}; x_\tau = 19 \text{ м}; x_1 = 10 \text{ м}; x_2 = 11 \text{ м}; y_1 = 9 \text{ м}; y_2 = 5 \text{ м}$



$в - x_0 = 2 \text{ м}; y_0 = y_\tau = 8 \text{ м}; x_\tau = 19 \text{ м}; x_1 = 10 \text{ м}; x_2 = 11 \text{ м}; y_1 = 9 \text{ м}; y_2 = 4 \text{ м}$

Рис. 3. Результаты численного тестирования алгоритма с нулевыми начальными и конечными линейными скоростями центра масс робота:
«Start» – начальное положение ЦМ МР, «Finish» – конечное (целевое) положение ЦМ МР (см. также с. 35)

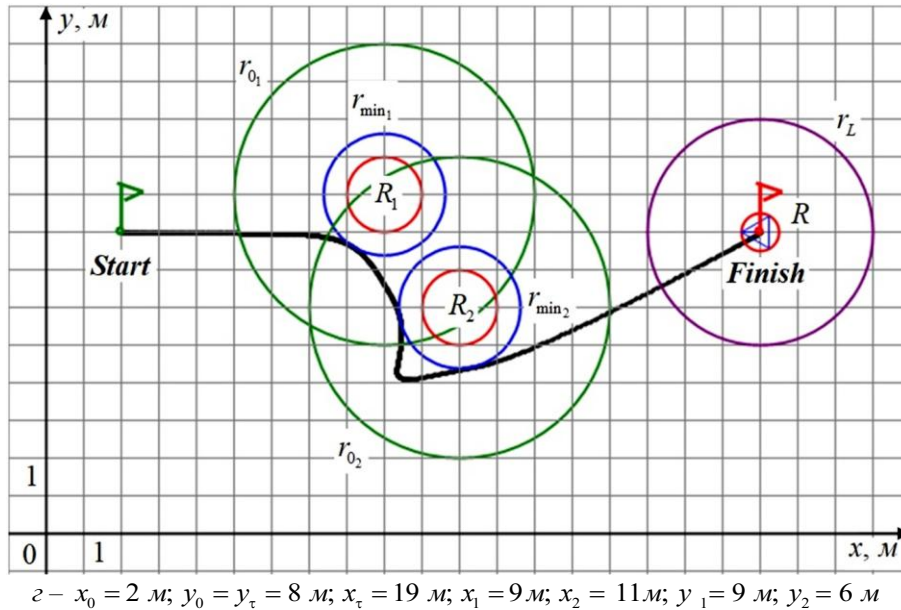


Рис. 3. Окончание

Заключение

Рис. 3, а и 3, б иллюстрируют поочередный обход роботом двух статичных препятствий при последовательном включении (отключении) центрально-симметричных отталкивающих силовых полей препятствий. На рис. 3, в представлен случай преодоления роботом препятствий, когда проверка (в процессе движения робота в силовом поле первого препятствия) установила возможность перехода в режим движения ЦМ МР к целевой точке по оптимальным аналитическим законам движения (без соударения робота с препятствиями). Движение робота из начального в конечное положение с совместным обходом двух близкорасположенных препятствий (рис. 3, г) возможно также при последовательном включении поля первого препятствия, его отключении с активацией поля второго препятствия и переходе к движению ЦМ МР по аналитическим законам (поле второго препятствия отключается).

Анализ полученных результатов показывает, что рассмотренная модификация алгоритма автоматического планирования движения мобильного робота в общем случае позволяет роботу обойти два статичных препятствия, расположенных на незначительном удалении друг от друга, и прийти в финальное положение за за-

данное время при нулевых начальных и конечных скоростях центра масс мобильного робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фархуд, А. К. Управление мобильным роботом с применением нейронной сети для планирования движения в некартографированной среде с препятствиями / А. К. Фархуд // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 6 (223). – С. 99–114.
2. Pshikhopov, V. Trajectory planning algorithms in two-dimensional environment with obstacles / V. Pshikhopov, M. Medvedev, V. Kostjukov, F. Houssein, A. Khadim // Informatics and automation. Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН. – 2022. – Vol. 21, № 3. – С. 459–492.
3. Кошман, А. М. Планирование движения робота по горизонтальной плоскости с обходом двух статичных препятствий методом $VC/APF+BC_T^1$ / А. М. Кошман, А. С. Быков, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (299) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2025. – С. 49–53.
4. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_T^1$). Ч. 1. Теория / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 42–48.
5. Леонард, А. В. Особенности планирования движения наземного робота с обходом стационарного препятствия на основе подхода $VC/APF+BC_T^1$ / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(280) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 33–40.