

УДК 004.896+007.3+007.52+51-74+517.97+62-52+681.5
DOI 10.35211/1990-5297-2025-4-299-48-53

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

ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ С ОБХОДОМ ДВУХ СТАТИЧНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ МЕТОДОМ $VC/APF+BC_{\tau}^I$

Волгоградский государственный технический университет

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

В статье рассматривается вопрос применения ранее разработанного метода $VC/APF+BC_{\tau}^I$ (оптимального планирования движения робота с обходом одного стационарного препятствия) для обхода роботом двух статичных препятствий. Определяются критические случаи и предлагаются способы их устранения.

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

© Кошман А. М., Быков А. С., Леонард А. В., Шурыгин В. А., 2025.

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

PLANNING OF ROBOT MOTION ON THE HORIZONTAL PLANE WITH BYPASSING TWO STATIC OBSTACLES BY THE VC/APF+BC_τ¹ METHOD

Volgograd State Technical University

The article considers the issue of applying the previously developed VC/APF+BC_τ¹ method (optimal planning of robot motion with bypassing one stationary obstacle) to bypassing two static obstacles by a robot. Critical cases are identified and methods for their elimination are proposed.

Keywords: mobile robot, motion planning, calculus of variations, potential field method, optimal control, computer simulation.

Введение

Для планирования движения мобильных роботов используются различные методы, позволяющие исключить столкновение робота с несколькими препятствиями [1; 2]. Однако многие опубликованные методы могут быть применены на практике только для глобального планирования движения: информация о среде известна в полном объеме и неизменна во времени; прогнозируется исходно только (не гладкая) траектория движения центра масс робота (без синтеза временных законов движения, необходимых для управляющего контура АСУ); большое время (> 0,36 с при компьютерном моделировании, > 2 с при лабораторных испытаниях) исполнения алгоритма планирования движения робота [3].

Автором статей [4; 5] предложен метод оптимального планирования движения робота по горизонтальной плоскости VC/APF+BC_τ¹, основанный на совместном применении вариационного исчисления (VC), метода искусственных (пространственно ограниченных) отталкивающих силовых полей (APF) препятствий с разделением планирования на три этапа (глобальное планирование движения, обход препятствия, глобальное перепланирование движения за препятствием), при заданных начальных и конечных линейных координатах и скоростях, вре-

мени движения центра масс робота (BC_τ¹). Анализ теоретических результатов показывает, что предложенный метод:

- может быть использован для глобального и локального планирования движения робота в условиях неполной (изменяющейся) информации о среде;

- исходно синтезирует законы движения центра масс робота, траектория которого гладкая (отсутствуют изломы);

- затрачиваемое процессором время на исполнение алгоритма по планированию движения робота с обходом одного статичного препятствия не превосходит 7 мс [6].

Однако для предложенного метода (подхода) VC/APF+BC_τ¹ характерна проблема заиклиненного движения робота вблизи препятствия, аналогичная проблеме локальных минимумов классических методов искусственных силовых полей. Указанная проблема для предложенного метода может быть решена за счет смещения исходного центра потенциального поля препятствия [7].

1. Постановка задачи

Необходимо проверить работоспособность метода VC/APF+BC_τ¹ при наличии в оперативном пространстве робота между стартовой и финальной точками двух статичных препятст-

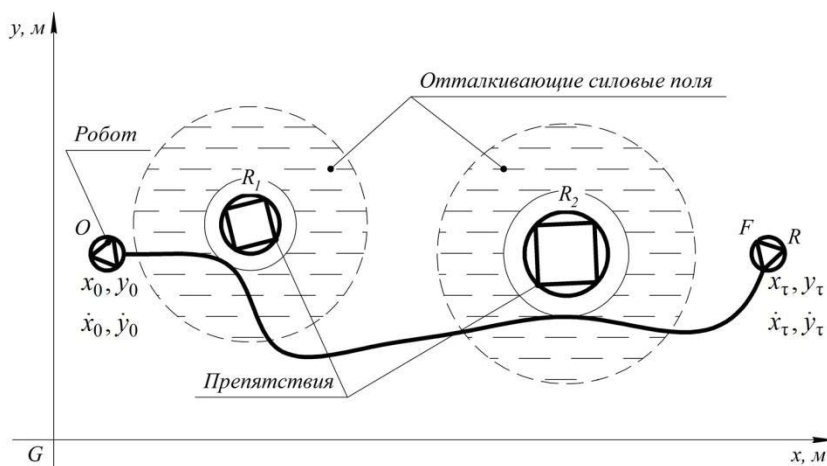


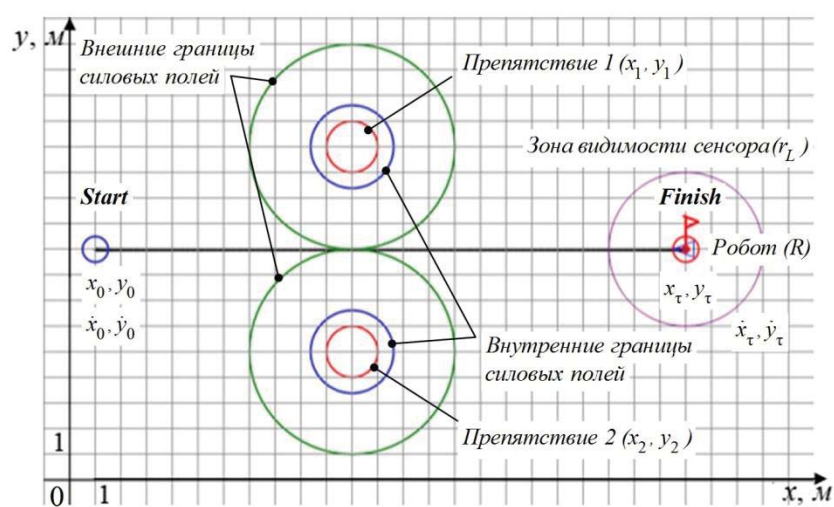
Рис. 1. Постановка задачи

вий. 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 скоростями центра масс робота: $x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0$ и $x_\tau, y_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau$ (рис. 1).

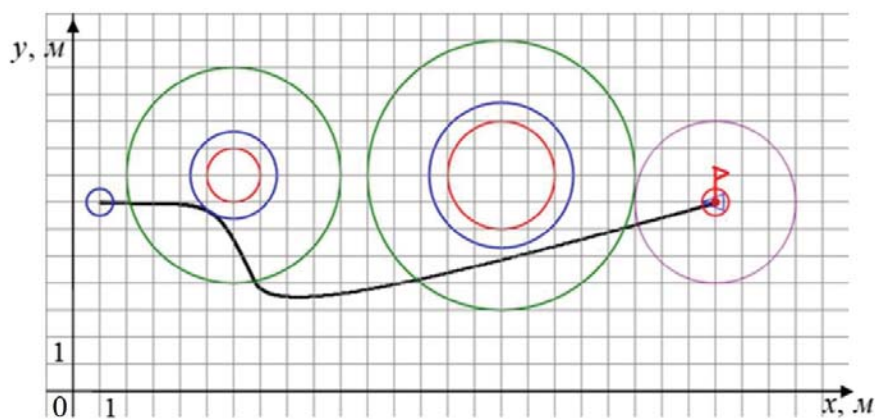
2. Компьютерное моделирование

Исследование возможности применения метода VC/APF+BC _{τ} ^I для автоматического безударного обхода роботом двух статичных препятствий осуществлялось с помощью авторско-

го программного инструмента, разработанного на языке программирования Visual C# (с визуализацией динамики движения робота). Для всех численных экспериментов (рис. 2–4) были приняты постоянными: масса робота $m=1$ кг, радиус окружности, описанной вокруг робота $R=0,5$ м, дальность видимости сенсора робота $r_L=3$ м, заданное оперативное время движения робота $\tau=10$ с, временной шаг расчета кинематических характеристик робота (ускорений, скоростей и координат) $dt=0,01$ с.



$$a - x_0 = 1 \text{ м}; y_0 = y_\tau = 9 \text{ м}; x_\tau = 24 \text{ м}; x_1 = x_2 = 11 \text{ м}; y_1 = 5 \text{ м}; y_2 = 13 \text{ м}$$



$$б - x_0 = 1 \text{ м}; y_0 = y_\tau = 7 \text{ м}; x_\tau = 24 \text{ м}; x_1 = 6 \text{ м}; y_1 = y_2 = 8 \text{ м}; x_2 = 16 \text{ м}$$

Рис. 2. Результаты численного тестирования при нулевых скоростях центра масс робота в начальной и конечной точках (см. также с. 51)

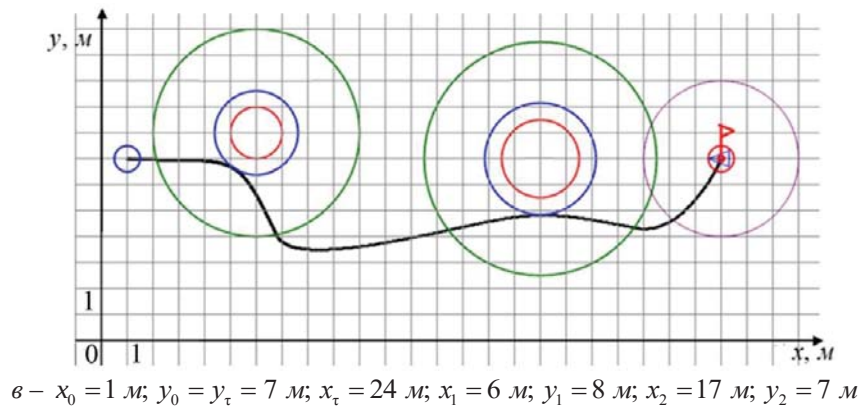


Рис. 2. Окончание

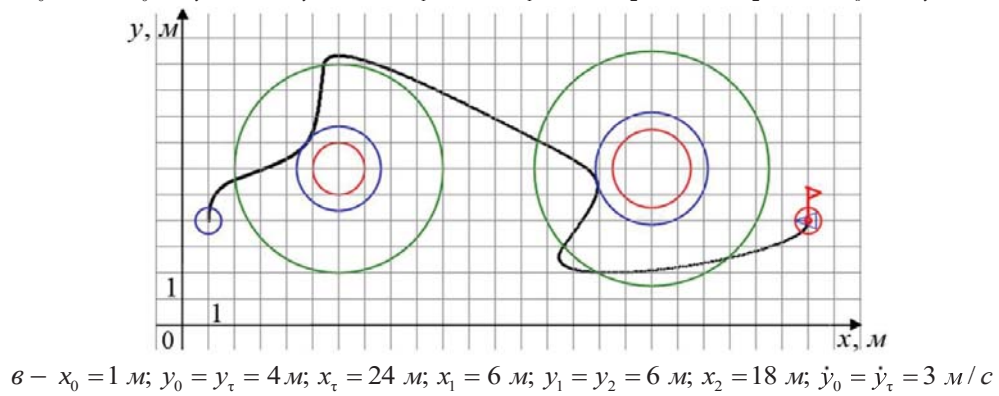
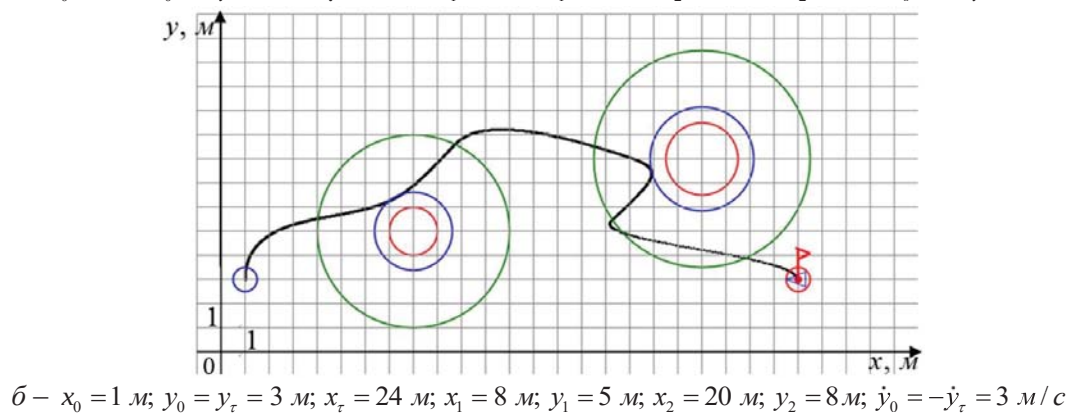
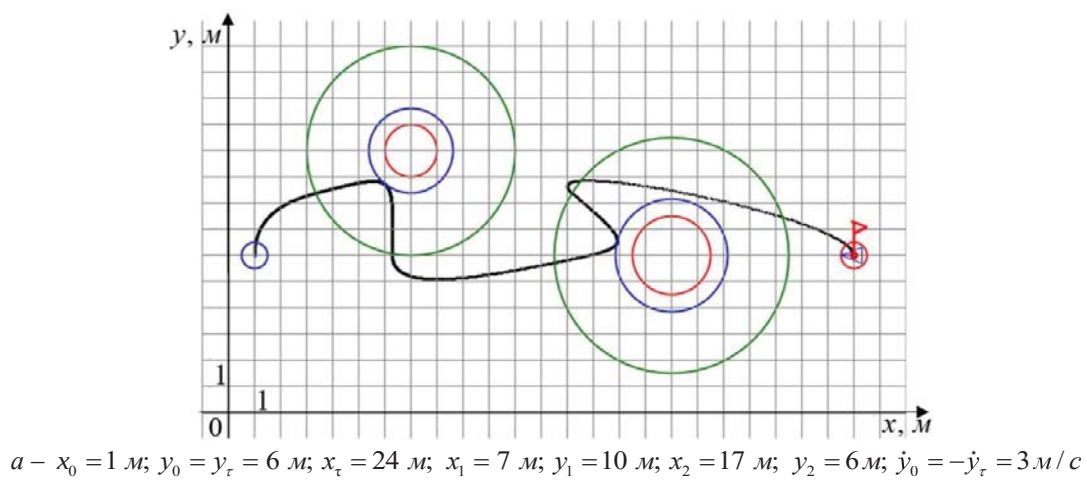
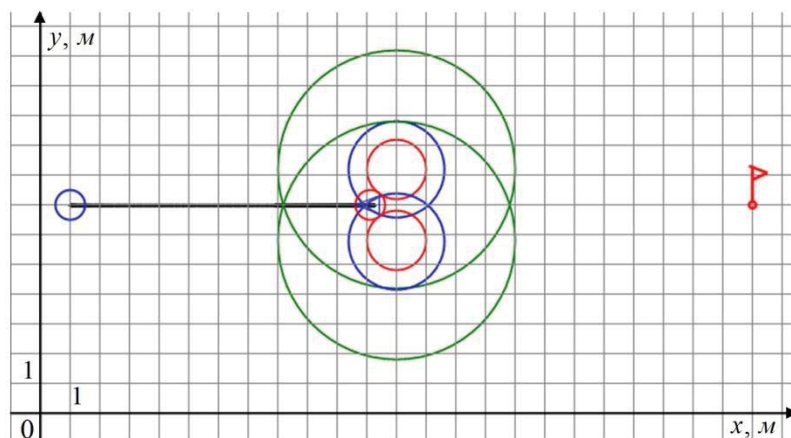
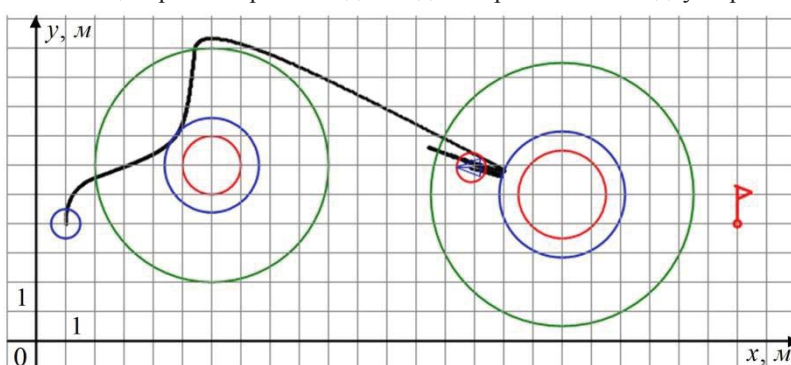


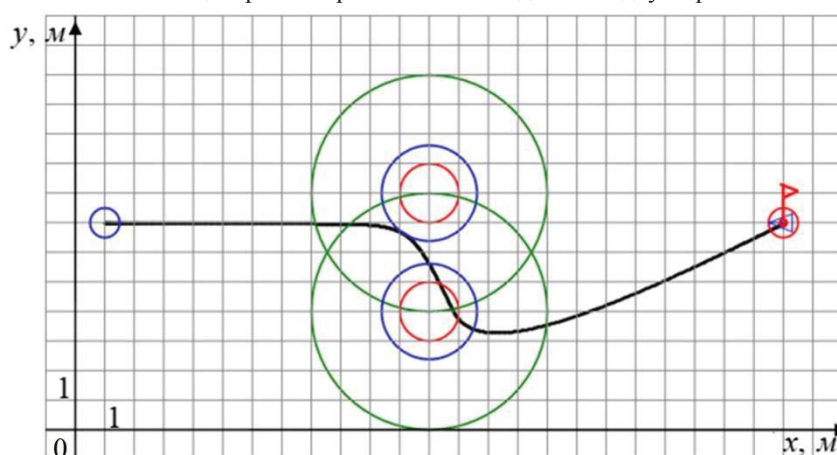
Рис. 3. Результаты численного тестирования при ненулевых скоростях центра масс робота в начальной и конечной точках



a – колебания центра масс робота вдоль одной прямой вблизи двух препятствий



б – колебания центра масс робота вблизи одного из двух препятствий



в – пересечение траекторией центра масс робота препятствия при наложении полей

Рис. 4. Экстремальные случаи планирования движения робота

Заключение

Анализ результатов численного тестирования (рис. 2 и 3) метода $VC/APF+BC_t^I$ показывает, что указанный метод, решая поочередно задачи уклонения сначала от первого затем от второго препятствий, позволяет роботу безударно обойти два препятствия и прийти в финальную точку за отведенное время с требуемыми линейными координатами и скоростями. Такой обход двух препятствий реализуется при расстоянии между двумя препятствиями много

большем диаметра габаритной окружности робота. Однако могут возникать экстремальные случаи. При совпадении или близости друг к другу линий вектора скорости центра масс робота и отталкивающей силы одного поля или результирующей силы полей двух препятствий робот начинает осциллировать (рис. 4, *a* и рис. 4, *б*), не доходя до финальной точки за отведенное время. Исключить осцилляцию робота при наложении полей двух препятствий можно путем объединения препятствий в одно вирту-

альное и применения смещения поля для виртуального препятствия [7]. В случае наложения отталкивающих полей двух препятствий траектория центра масс робота может пересекать внутреннюю границу поля одного из двух препятствий (рис. 4, в), что не допустимо (происходит соударение робота с препятствием). Данный экстремальный случай может быть устранен путем ввода в алгоритм метода $VC/APF+BC_{\tau}^I$ дополнительного прогнозирования столкновения робота со вторым препятствием и соответствующей коррекции законов движения центра масс робота в режиме уклонения от первого препятствия. Таким образом, предлагаемые модификации позволят улучшить исходный метод $VC/APF+BC_{\tau}^I$ (оптимального планирования движения робота) для обхода двух статичных препятствий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chunxi, Cheng Path planning and obstacle avoidance for AUV : A review / Chunxi Cheng, Qixin Sha, Bo He, Guangliang // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 235. Article 109355.
2. Казаков, К. А. Обзор современных методов планирования движения / К. А. Казаков, В. А. Семенов // Труды ИСП РАН. – 2016. – Т. 28, вып. 4. – С. 241–294.
3. Бросалин, Д. О. Интеграция локального и глобального планировщиков в систему управления мобильным роботом / Д. О. Бросалин, Б. В. Гуренко, М. Ю. Медведев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 6 (236). – С. 8–24.
4. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_{\tau}^I$). Ч. I Теория / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 34–42.
5. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_{\tau}^I$). Ч. II. Результаты / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 42–48.
6. Леонард, А. В. Особенности планирования движения наземного робота с обходом стационарного препятствия на основе подхода $VC/APF+BC_{\tau}^I$ / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (280) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 33–40.
7. Кошман, А. М. Планирование движения мобильного робота со смещением исходного центра потенциального поля статичного препятствия / А. М. Кошман, А. С. Быков, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (287) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – С. 65–71.