

УДК 004.896

# ИЕРАРХИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ С ИЗБЕГАНИЕМ ПРЕПЯТСТВИЙ И ПРОХОЖДЕНИЕМ ПРОЕМОВ НА ЧЕТЫРЕХКОЛЕСНОМ МОБИЛЬНОМ РОБОТЕ

**К.Ф. Муравьев**

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН*

Россия, 119333, Москва, ул. Вавилова, 44к2

E-mail: muraviev@isa.ru

**М. Алхаддад**

*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

Россия, 141701, Долгопрудный, ул. Институтский пер., 9

E-mail: alkhaddad.m@phystech.edu

**А.И. Панов**

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

Россия, 119333, Москва, ул. Вавилова, 44к2

E-mail: panov.ai@mipt.ru

**К.В. Миронов**

*Уфимский университет науки и технологий*

Россия, 450076, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

E-mail: mironovconst@gmail.com

**Ключевые слова:** Модельно-предиктивное управление, планирование траектории, мобильные роботы

**Аннотация:**

Навигация до заданной точки является одной из ключевых задач, решаемых в системах управления мобильным роботом. В данной работе предлагается трехуровневый метод навигации мобильного робота, состоящий из алгоритма построения глобального пути, алгоритма построения локальной траектории и алгоритма генерации управляющих воздействий. Предлагаемый подход основан на модельно-предиктивном управлении с учетом размера и кинодинамических ограничений робота, что позволяет избегать столкновения с препятствиями на роботе произвольной формы. Проведено экспериментальное исследование предлагаемого подхода на четырехколесном мобильном роботе прямоугольной формы. В ходе экспериментов решалась задача доезда робота до заданной целевой точки в среде с препятствиями, при этом целевая точка была отделена от робота узким проемом. С помощью предлагаемого подхода все навигационные задачи в тестовой среде были успешно выполнены.

## 1. Введение

Автономная навигация (достижение заданной целевой точки) является одним из ключевых аспектов автономного функционирования мобильных роботов. При этом главными требованиями к алгоритму автономной навигации мобильного робота являются безопасность и эффективность – робот не должен сталкиваться с препятствиями и должен достигать целевой точки по траектории, близкой к оптимальной, для сокращения времени выполнения миссии [1]. Для выполнения этих требований, как правило, информация об окружающих препятствиях наносится на карту проходимости, и на основе этой карты планируется траектория движения робота до целевой точки с учетом избегания препятствий.

Траектория движения робота может планироваться напрямую путем решения задачи оптимального управления [2, 3]. Однако при больших расстояниях между позицией робота и целевой точкой такой подход неприменим для работы в реальном времени в силу больших вычислительных затрат на решение оптимизационной задачи. В таком случае применяются алгоритмы глобального планирования пути по карте проходимости, например, [4, 5]. Такие алгоритмы позволяют сравнительно быстро сгенерировать путь до целевой точки, однако этот путь не учитывает кинодинамические ограничения робота и может оказаться невыполнимым с точки зрения управления, либо привести к столкновению с препятствием.

В данной работе для безопасного достижения целевой точки используется трехуровневый иерархический подход. Сначала с помощью метода глобального планирования генерируется полный путь до целевой точки по карте проходимости. Затем начальный отрезок сгенерированного пути используется как начальное приближение для поиска безопасной и кинодинамически выполнимой локальной траектории. Такая траектория ищется с помощью модельно-предиктивного управления [6]. Движение до целевой точки выполняется методом следования локальной траектории. Локальная траектория обновляется на каждом шаге алгоритма навигации. Такой подход позволяет выполнять перепланирование маршрута в реальном времени даже при больших расстояниях между роботом и целью, и также позволяет избегать столкновения с препятствиями за счет учета кинодинамических параметров робота.

## 2. Постановка задачи

В данной работе рассматривается задача навигации мобильного робота до заданной точки. На каждом шаге  $t$  робот находится в состоянии  $s_t = (\mathbf{p}_t, \theta_t, \mathbf{v}_t, w_t)$ , где  $\mathbf{p}_t \in \mathbb{R}^2$  – позиция робота,  $\theta_t \in \mathbb{R}$  – его ориентация,  $\mathbf{v}_t \in \mathbb{R}^2$  – линейная скорость, а  $w_t \in \mathbb{R}$  – угловая скорость. Движение робота задается его динамикой:  $s_{t+1} = f(s_t, \mathbf{u}_t)$ , где  $\mathbf{u}_t$  – это управляющий вектор, который подается на вход контроллеру робота на шаге  $t$ . На вход алгоритму навигации в момент времени  $t$  подается состояние робота  $s_t$ , а также двумерная карта проходимости  $M \in \mathbb{R}^{N \times N}$ . Также на вход подается целевое состояние  $s_G = (\mathbf{p}_g, \theta_g, \mathbf{v}_g = 0, w_g = 0)$ . Выход алгоритма навигации  $\pi$  на

шаге  $t$  – это управляющий вектор  $\mathbf{u}_t$ , который подается на вход контроллеру для достижения целевого состояния  $s_G$ :

$$\pi(s_1, s_G, M) = \mathbf{u}_1, \dots, \pi(s_T, s_G, M) = \mathbf{u}_T; f(s_T, \mathbf{u}_T) = s_{T+1}.$$

Задача заключается в поиске алгоритма (стратегии управления)  $\pi$ , который приводит в целевое состояние  $s_G$  с заданной точностью:

$$\pi(s_T, s_G, M) = u_T; f(s_T, \mathbf{u}_T) = s_{T+1} = (\mathbf{p}_{T+1}, \theta_{T+1}, \mathbf{v}_{T+1}, w_{T+1});$$

$$\|\mathbf{p}_{T+1} - \mathbf{p}_g\| < \varepsilon; \|\theta_{T+1} - \theta_g\| < \delta; \mathbf{v}_t = 0; w_t = 0.$$

### 3. Описание метода

В данной работе предлагается трехуровневый метод навигации до точки, состоящий из алгоритмов глобального планирования пути по карте, построения локальной траектории и управления движением робота (генерации управляющих воздействий). Ниже приведено подробное описание всех трех алгоритмов.

**Глобальное планирование.** Глобальный путь до целевой точки строится с помощью алгоритма Theta\* [4]. Это эвристический алгоритм поиска пути на графах в виде сетки, позволяющий строить путь под произвольным углом, а не только по линиям сетки. В качестве графа для планирования пути используется сетка занятости (Occupancy Grid). В качестве эвристической функции используется евклидово расстояние.

Для учета габаритов робота применяется двухступенчатое «раздутие препятствий» на сетке занятости (см. рис. 1 слева). Все ячейки, находящиеся на расстоянии менее  $r_1$  от ближайшего препятствия, помечаются как занятые (содержащие препятствие). Все ячейки, находящиеся на расстоянии более  $r_1$  и менее  $r_2$  от ближайшего препятствия, помечаются как «близкие к препятствию». Стоимость переходов в такую ячейку и из нее в графе домножается на коэффициент  $k$ . Таким образом, алгоритм планирования избегает близких к препятствию путей, но при отсутствии далеких от препятствий путей (например, при проезде через узкий проем) успешно прокладывает путь. Радиусы  $r_1$  и  $r_2$  выбираются как внутренний и внешний радиусы робота соответственно.

**Предсказание траектории с помощью модельно-предиктивного управления.** Модельно-предиктивное управление (Model Predictive Control, MPC) – это подход к управлению с обратной связью, который прогнозирует следующие состояния робота с помощью его модели движения и определяет следующее управляющее воздействие путем решения задачи оптимального управления на горизонте прогнозирования при наличии различных ограничений на параметры системы. Для решения задачи оптимального управления используется квадратичная функция, учитывающая как минимизацию отклонения локального пути робота от глобального пути до горизонта прогнозирования, так и максимизацию расстояний от локального пути до окружающих препятствий. Данная функция описана в работе [7]. На рисунке 1 справа показан пример решения задачи MPC для планирования локального пути четырехколесного робота шириной 67 см через проем шириной 82 см. Красными точками показан глобальный путь, а синей кривой

– искомый локальный путь. Центры окружностей обозначают координаты точек препятствий.

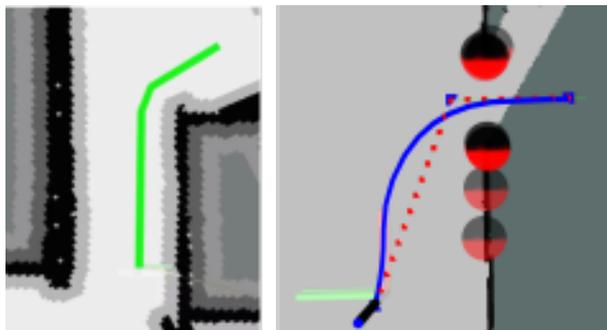


Рис. 1. Раздутие препятствий при локальном планировании (слева) и локальная траектория робота через проем в сравнении с глобальным путем (справа)

**Управление движением.** Движение до целевой точки осуществляется с помощью алгоритма следования спланированной траектории. Алгоритм принимает на вход точки пути, а также текущее положение и линейную скорость робота и генерирует команды линейной и угловой скоростей в качестве выходных данных. Кроме того, в алгоритме используются некоторые параметры для достижения плавности перемещения и физических ограничений. Для следования запланированному пути  $(x_p(k), y_p(k)), k = 1, \dots, N$  используется пропорциональный регулятор, учитывающий линейное ускорение для обеспечения плавного перемещения робота. Общие законы управления линейной и угловой скоростями задаются следующим образом:

$$\omega_{cmd} = K_1(\theta_p - \theta_t); \mathbf{v}_{cmd} = K_2(\mathbf{v}_r + \mathbf{a} * dt); \mathbf{u}_t = (\mathbf{v}_{cmd}, \omega_{cmd}),$$

где  $K_1, K_2$  – коэффициенты регулятора,  $\theta_t, \theta_p$  – ориентация робота и ориентация на следующую точку пути соответственно,  $\mathbf{v}_r$  – измеренная линейная скорость робота,  $\mathbf{a}$  – желаемое ускорение. Коэффициенты регулятора  $K_1, K_2$  не являются постоянными значениями для всей траектории движения, а адаптируются в соответствии с определенными параметрами: разностью между углом ориентации робота  $\theta_r$  и углом направления локальной траектории  $\theta_p$ , а также расстоянием между роботом и конечной точкой траектории. Ориентация  $k$ -й точки пути  $\theta_p(k)$  задается следующим выражением:

$$\theta_p(k) = \arctan \left( \frac{y_p(k) - y_p(k-1)}{x_p(k) - x_p(k-1)} \right).$$

## 4. Экспериментальное исследование

Для проверки качества разработанного подхода к навигации до целевой точки были проведены эксперименты на четырехколесном мобильном роботе Clearpath Husky с дифференциальным приводом. Размеры робота составили  $0.67 \times 1$  м. В ходе экспериментов решалась задача доезда до целевой точки, отделенной от робота проемом шириной от 0.82 м до 0.88 м. Пример навигации через проем шириной 0.82 м показан на рисунке 2. На рисунке красные круги обозначают препятствия, штриховая линия – начальный путь (глобальный путь), а непрерывная

кривая – оптимальный локальный путь, полученный с помощью MPC. В ходе тестирования робот успешно выполнил все задания, проехав к целевой точке через проем без столкновения с препятствиями. Таким образом, разработанный алгоритм продемонстрировал высокую точность построения локальной траектории и движения вдоль нее.

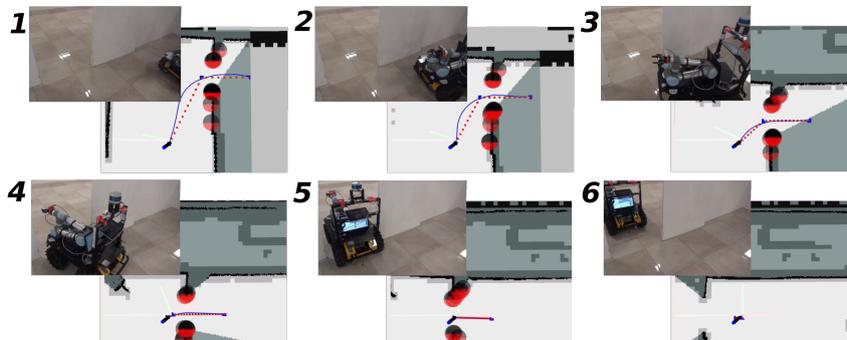


Рис. 2. Локальный путь и движение через проем

## 5. Заключение

В настоящей работе предложен иерархический подход к решению задачи навигации до заданной целевой точки. Предложенный подход состоит из глобального планирования пути, построения траектории на его начальном отрезке методом модельно-предиктивного управления и следования построенной траектории. Он обладает преимуществами обоих типов подходов к навигации: быстрое планирование глобального пути и точное избегание препятствий методами оптимального управления. Проведенные эксперименты на четырехколесном мобильном роботе показали точное избегание препятствий, в том числе при преодолении узких проемов.

## Список литературы

1. Миронов К. и др. STRL-Robotics: интеллектуальное управление поведением робототехнической платформы в человеко-ориентированной среде // Искусственный интеллект и принятие решений. 2023. № 2. С. 45–63.
2. Брайсон А, Хо Ю.Ш. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972. 544 с.
3. Fethi D. et al. Simultaneous localization, mapping, and path planning for unmanned vehicle using optimal control // Advances in Mechanical Engineering. 2018. Vol. 10. No. 1.
4. Daniel K., Nash A., Koenig S., Felner A. Theta\*: Any-angle path planning on grids // Journal of Artificial Intelligence Research. 2010. Vol. 39. P. 533-579.
5. Yakovlev K., Baskin E., Hramoin I. Grid-based angle-constrained path planning // KI 2015: Advances in Artificial Intelligence: 38th Annual German Conference on AI, Dresden, Germany, September 21-25, 2015, Proceedings 38. Springer International Publishing, 2015. P. 208-221.
6. Morari M., Lee J. H. Model predictive control: past, present and future // Computers & chemical engineering. 1999. Vol. 23. No. 4-5. P. 667-682.
7. Алхаддад М., Миронов К., Дергачев С., Муравьев К., Панов А. Локальное планирование траектории колесного робота в ограниченной среде на основе модельного прогнозирующего управления // Робототехника и техническая кибернетика. 2023. Том. 11. С. 205–214.