

УДК 007.52

# МЕТОД ЛОКАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ГЛАДКОГО ПУТИ ДЛЯ ОБЪЕЗДА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ В ПУТЕВЫХ КООРДИНАТАХ

**М.И. Макаров**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: makarov.mi@phystech.edu

**Ключевые слова:** планирование пути, координаты Френе, путевые координаты, беспилотный транспорт, робототехника.

**Аннотация:** В докладе рассматривается задача планирования пути для транспортной платформы с поточечным изменением участков заранее подготовленной гладкой траектории движения транспортного средства в режиме реального времени с учетом возникающих препятствий и сохранением гладкости. Предлагается метод локального планирования пути в системе координат дорожного полотна при наличии препятствий заданных координатами их центра. Метод основывается на вариации точек исходной гладкой траектории с использованием метода потенциального поля. Обеспечение гладкости получаемого пути достигается за счет введения функций штрафа за кривизну с последующим решением задачи дискретной оптимизации целевого функционала. Особенности предлагаемого метода заключаются в использовании путевой системы координат, что снижает количество варьируемых переменных и ускоряет время работы по сравнению с работой в декартовой системе координат.

## 1. Введение

Современные достижения в полупроводниковой отрасли позволили создавать высокопроизводительные компьютеры, обладающие малыми габаритами и высокой производительностью при малом энергопотреблении, что привело к увеличению интереса автоматизации транспортных платформ. Их создание требует решения ряда прикладных и фундаментальных задач, одной из которых является локальное планирование пути. Более точно, задача ставится так: необходимо построить локально оптимальный путь объезда препятствий в режиме реального времени, имея данные об окружающей среде, полученные с различных датчиков, оставаясь в границах дорожного полотна и не сходя с исходного маршрута. В условиях движения с низкой скоростью и только статическими препятствиями часто ограничиваются глобальным планированием траектории, когда целевой маршрут строится заранее, а за объезд препятствий и следование по этому маршруту отвечают используемые законы управления [1]. В современных крупных транспортных

системах, таких как автомобильные, возникают новые вызовы, связанные с узкими дорожными полосами, переменными препятствиями и высокими скоростями движения. Традиционные методы часто не справляются с этими проблемами из-за их вычислительной сложности. Решением является разделение задачи на два этапа: локальное планирование маршрута и управление движением. При локальном планировании используются данные с датчиков для создания оптимального маршрута, учитывающего все препятствия и ограничения. Затем на этапе управления движением осуществляется точное следование по этому маршруту, минимизируя отклонения и поддерживая эффективность движения.

Производить локальное планирование пути в декартовой системе координат (СК) оказывается неудобным в связи с трудностями описания взаимного расположения транспортного средства, дороги и возникающих препятствий. Для наглядного задания положения транспортного средства (ТС), окружающих его объектов и дороги используется путевая система координат (система координат Френе) [2]. В этой СК положение транспортного средства задается как значение параметра гладкой кривой (опорной) в ближайшей к ТС точке кривой и расстоянием до этой кривой. В данной работе предлагается метод локального планирования, уделяющий особое внимание гладкости построенного пути и времени на работу алгоритма. Для сохранения гладкости используется усовершенствованный путем введения горизонта и перехода в СК Френе метод, описанный в работе [3]. В данной работе предлагается модификация данного метода, позволяющая сократить число варьируемых переменных и, как результат, снизить время работы алгоритма.

## 2. Сглаживание кривизны в СК Френе

В исследовании [3] описывается метод, который улучшает В-сплайновую кривую для обхода препятствий, варьируя координаты точек в произвольных направлениях исходной декартовой СК. Этот метод изначально предназначался для глобального планирования маршрута. Однако, его применение в контексте локального планирования требует учета  $n \cdot dim$  переменных, где  $n$  количество точек горизонта, а  $dim$  – размерность пространства. В данном исследовании предложено использовать систему координат Френе, где модифицируется только параметр  $d$  – поперечное смещение относительно гладкой опорной кривой. Такой подход позволяет уменьшить количество переменных до  $n$ . Представление вариации  $i$ -й координаты точки в новой системе координат будет иметь форму  $q_i = (s_i, d_i^0 + d_i) = (s_i, \tilde{d}_i)$ , где  $\tilde{d}_i$  – вариация поперечного смещения  $i$ -й координаты относительно опорной кривой.

Для минимизации кривизны получаемого пути необходимо минимизировать сумму квадратов норм векторов  $\tilde{d}_i - \tilde{d}_{i-1}$  и  $\tilde{d}_{i-1} - 2\tilde{d}_i + \tilde{d}_{i+1}$  по переменной  $d_i$ . Для всего выделенного горизонта эта сумма квадратов записывается в матричном виде:

$$(1) \quad S(\tilde{d}_h) = \tilde{d}_h^T (H_1 + H_2) \tilde{d}_h,$$

где:

$$H_i = C_i^T C_i, H_i \in \mathbb{R}^{n \times n}, i \in [1, 2],$$

$$\tilde{d}_h = [\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_n],$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \ddots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix}, C_1 \in \mathbb{R}^{(n-1) \times n},$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & \ddots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix}, C_2 \in \mathbb{R}^{(n-2) \times n}.$$

Для того, чтобы контролировать подвижность отдельных течек, вводится функционал штрафа за вариацию точек, определяемый формулой

$$(2) \quad P(d_h) = \gamma d_h^T D d_h, \quad D \in \mathbb{R}^{n \times n},$$

где  $\gamma > 0$ ,  $d_h = [d_1, d_2, \dots, d_n]$  – поперечная вариация точек горизонта и  $D$  – диагональная матрица, значения которых соответствуют весовому коэффициенту штрафа за вариацию соответствующей точки. Чем больше весовой коэффициент, тем меньшей вариации будет подвержена данная точка.

### 3. Отталкивающий потенциал

При использовании метода искусственного потенциального поля, расстояние до объекта задает степень влияния отталкивающего потенциала на ТС. Сила отталкивания, действующая на ТС увеличивается по мере уменьшения расстояния до препятствия и пропадает, когда оно выходит из зоны его действия. Потенциальное поле  $i$ -го объекта [4] имеет вид:

$$(3) \quad U_{\text{rep}}^i(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta \left( \frac{1}{\rho_i(q, q_{\text{obst}}^i)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \rho_i(q, q_{\text{obst}}^i) \leq \rho_0, \\ 0, & \rho_i(q, q_{\text{obst}}^i) > \rho_0 \end{cases},$$

где  $U_{\text{rep}}^i(q)$  – значение отталкивающего поля для  $i$ -го препятствия,  $\eta$  – постоянная коэффициента отталкивания, являющаяся положительным параметром.  $q_{\text{obst}} = (x_{\text{obst}}, y_{\text{obst}})^T = (s_{\text{obst}}, d_{\text{obst}})^T$  обозначает центр препятствия,  $q = (x, y)^T = (s, d)^T$  точка пространства, в которой считается потенциал,  $\rho_i(q, q_{\text{obst}}^i)$  – расстояние от точки  $q$  до  $i$ -го препятствия.  $\rho_0$  – радиус влияния препятствия.

Потенциал всего планируемого горизонта рассчитывается как сумма потенциалов для каждого из объектов, которые в свою очередь являются суммой потенциалов (3) для всех точек этого горизонта:

$$(4) \quad U_{\text{hor}}(s_h, \tilde{d}_h) = \sum_{i=0}^{n_{\text{obst}}} \sum_{q=q(s_0, \tilde{d}_0)}^{q(s_n, \tilde{d}_n)} U_{\text{rep}}^i(q),$$

где  $s_h = [s_1, s_2, \dots, s_n]$ .

## 4. Формирование целевого функционала

Ранее уже были введены функции, задающие штрафы за кривизну, длину и наезд на препятствие. В классических задачах планирования пути с применением потенциального поля границ дорожного полотна задается так-же в виде потенциального поля [5], в данной работе предлагается воспользоваться ограничением на вариацию параметра  $d$ , который фактически характеризует поперечное смещение и не должен превышать координаты границы препятствия для соответствующего продольного смещения  $s$ . В тех случаях, когда границы дороги не известны, вводится штраф за отклонения от опорной кривой, что обеспечивает движение вблизи исходного глобального пути:

$$(5) \quad M(\tilde{d}_h) = \tilde{d}_h \tilde{d}_h^T.$$

С учетом (1), (2), (4) и (5) целевой функционал рассчитываемого горизонта будет иметь вид:

$$(6) \quad \Phi_{\text{hor}}(s_h, d_h) = \frac{1}{2}S(d_h^0 + d_h) + \frac{1}{2}P(d_h) + U_{\text{hor}}(s_h, d_h^0 + d_h) + \frac{1}{2}M(d_h^0 + d_h),$$

где  $d_h^0 = [d_1^0, d_2^0, \dots, d_n^0]$  – начальные смещения выделенного горизонта относительно опорной кривой. В случае совпадения точек горизонта и опорной кривой  $d_j^0 = 0 \forall j \in [1, \dots, n]$ .

Поиск горизонта в итоге сходится к задаче дискретной оптимизации:

$$(7) \quad d_h^* = \underset{\{d_1, \dots, d_n\}}{\operatorname{argmin}} \Phi_{\text{hor}}(s_h, d_h), \quad D_i^l \leq (d_i^0 + d_i) \leq D_i^r, \quad d_h^* \in \mathbb{R}^n,$$

где  $D_i^r \in \mathbb{R}^n$  и  $D_i^l \in \mathbb{R}^n$  – ограничения на ширину дорожного полотна вносимые правой и левой границей соответственно.

## 5. Заключение

Предложен метод локального планирования гладкого пути для объезда статических препятствий, аппроксимируемых окружностью. Метод решает задачу планирования траектории в путевой системе координат для транспортной платформы, позволяя в реальном времени корректировать участки заранее подготовленной гладкой траектории с учетом возникающих препятствий, сохраняя при этом ее гладкость. Основа метода - вариация точек исходной главной траектории с использованием метода потенциального пол.

## Список литературы

1. Basavanna M., Dr. Shivakumar M. An Overview of Path Planning and Obstacle Avoidance Algorithms in Mobile Robots // INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT). 2019. Vol. 08, No. 12.

2. Werling M., et al. Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a frenet frame // 2010 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, 2010. P. 987-993.
3. Гилимьянов Р.Ф., Рапопорт Л.Б. Метод деформации пути в задачах планирования движения роботов при наличии препятствий // Проблемы управления. 2012. № 1. С. 70-76.
4. Shin Y., Kim E. Hybrid path planning using positioning risk and artificial potential fields // Aerospace Science and Technology. 2021. Vol. 112. P. 106640.
5. Lu B. et al. Hybrid path planning combining potential field with sigmoid curve for autonomous driving // Sensors. 2020. Vol. 20, No. 24. P. 7197.
6. Гилимьянов Р.Ф., Пестерев А.В., Рапопорт Л.Б. Сглаживание кривизны траекторий, построенных по зашумленным измерениям в задачах планирования пути для колесных роботов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 5. С. 148-156.
7. Lu B., et al. Adaptive potential field-based path planning for complex autonomous driving scenarios // Ieee Access. 2020. Vol. 8. P. 225294-225305.