

АЛГОРИТМ ЛОКАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТИ ДЛЯ ОБЪЕЗДА ПРЕПЯТСТВИЙ В ПУТЕВЫХ КООРДИНАТАХ

М. И. Макаров

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

✉ maxim.i.makarov@gmail.com

Аннотация. Представлен алгоритм локального планирования пути в системе координат дорожного полотна. Он основан на варьировании точек исходной траектории с применением метода потенциального поля и обеспечения гладкости получаемого пути относительно новой системы координат. Реализация алгоритма основывается на решении задачи минимизации целевого функционала. Рассматривается решение задачи применительно к планированию пути беспилотной транспортной платформы, для чего требуется изменять участки заранее подготовленной гладкой траектории движения транспортного средства в режиме реального времени с учетом возникающих препятствий и с сохранением гладкости. Использование новой системы координат дает преимущество во времени выполнения алгоритма по сравнению с его работой в декартовой системе координат. Алгоритм реализован на языке Python. Выделение горизонта планирования позволяет сочетать предложенный подход с различными алгоритмами следования по пути, которые сами по себе не реализуют методы обхода препятствий. Численное моделирование выполнено для характерных примеров, по которым можно оценить эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: планирование пути, система координат Френе, беспилотный транспорт.

ВВЕДЕНИЕ

С учетом последних достижений в области лидарной техники, высокопроизводительных графических процессоров и машинного обучения автономные технологии претерпевают революционные изменения, которые позволяют реализовать новые возможности. Особенно много внимания уделяется беспилотным транспортным платформам, для создания которых необходимо решить целый ряд как фундаментальных, так и прикладных задач, одной из которых является планирование пути. Задача состоит в том, чтобы, имея данные об окружающей среде, полученные с различных датчиков, построить локально оптимальный путь объезда препятствий в реальном времени, оставаясь в границах дорожного полотна и не сходя с исходного маршрута.

В робототехнике активно применяются подходы только глобального планирования пути, когда

заранее строится целевой маршрут, по линии которого робот должен двигаться. В таких случаях за объезд препятствий отвечают законы управления, работающие на борту робота [1]. В работе с крупными транспортными средствами (ТС), например автомобилями, и при появлении новых условий (таких, как ограничение на ширину полосы движения, динамические препятствия и высокая скорость движения) данные подходы становятся неприменимы в силу их вычислительной сложности. Современным подходом к преодолению описанных недостатков является декомпозиция задачи отдельно на локальное планирование пути и управление движением по этому пути. Локальное планирование учитывает данные об окружающей среде, полученные с датчиков, и строит локально оптимальный путь объезда препятствий с соблюдением всех требуемых ограничений. Решение же задачи управления должно обеспечить следование по этому локальному пути с минимальными отклонениями.

Планирование локального пути в декартовой системе координат (СК) оказывается не очень удобным в связи с трудностями описания взаимного расположения ТС, дороги и возникающих препятствий. В статье [2] вводится понятие системы координат Френе (путевой СК), в которой положение ТС задается как путь, пройденный вдоль заранее заданной гладкой кривой (опорной), и поперечное смещение относительно нее, что лучше и нагляднее описывает возможности маневров ТС в пределах дорожного полотна. Там же предлагается варьировать поперечное смещение с дискретным шагом, что отлично подходит для решения задач управления движением по автомобильным дорогам, так как оно может осуществляться только по заранее выделенным полосам. В случаях, когда полосы отсутствуют и движение возможно в любом месте дорожного полотна, задача локального планирования становится вычислительно сложной, так как шаг смещения становится мал и генерируется множество возможных траекторий для каждого из них. Другие подходы, лишенные этого недостатка, например те, что опираются на управление с прогнозирующими моделями (УПМ) [3], требуют как можно точнее воссоздать цифровую модель ТС, которым нужно управлять, что не всегда просто сделать на практике, особенно если предполагается использовать различные ТС. К тому же, громоздкий процесс перерасчета постоянно перезапускается, чтобы обеспечить точное следование по траектории, даже если на пути не появляются новые объекты.

В данной работе предполагается подход к решению задачи локального планирования пути в системе координат Френе, который лишен перечисленных выше недостатков. Решение задачи оптимизации с применением функции штрафа позволяет обеспечить объезд препятствий, сохранив гладкость получаемого пути, и свести шаг дискретности поперечного смещения к требуемой точности, обеспечив время работы алгоритма, применимое в реальном времени.

1. ПЕРЕХОДЫ МЕЖДУ СИСТЕМАМИ КООРДИНАТ

1.1. Путевая система координат

Система Френе (путевая СК) – это один из способов задать положение объекта на плоскости относительно опорной кривой с помощью двух ко-

ординат (s, d) , где s – длина дуги, отсчитываемая от начала опорной кривой (продольное смещение), а d – поперечное смещение относительно этой же кривой (рис. 1). Иными словами, происходит переход в систему координат, привязанную к дорожному полотну, где s – это длина дорожного полотна от начальной точки до текущей, а d – смещение относительно её центра. На рисунке положение автомобиля в системе Френе задается координатами $(2, 1)$. При движении по пути a_1 координата d на всем пути будет неизменна: $d = 1$.

Для перехода в систему Френе сначала нужно задать опорную кривую, которая и будет определять эту СК. Пусть имеется гладкая, трижды непрерывно дифференцируемая кривая в декартовой системе координат с натуральной параметризацией $p = p(s)$. Тогда существует отображение f , задающее преобразование радиус-вектора точек кривой декартовой системы координат в параметр s .

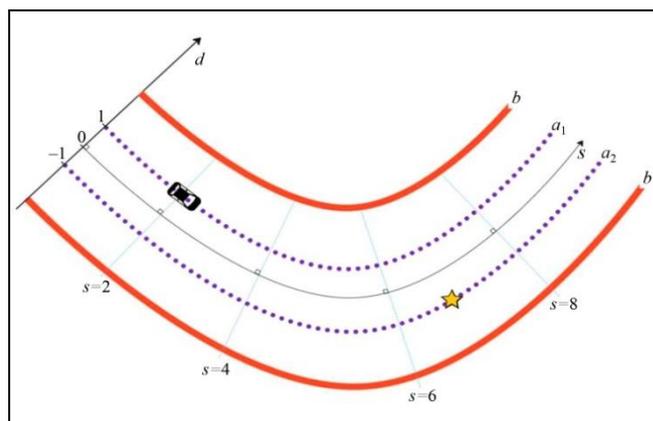


Рис. 1. Расположение объекта на дороге в системе координат Френе: s – опорная кривая, формирующая одну из осей, d – ось поперечного смещения относительно опорной кривой; b – границы дорожного полотна; a_1, a_2 – пути с постоянными координатами $d = 1$ и $d = -1$

1.2. Переход из декартовой системы в систему Френе

В декартовой системе координат положение любой точки исходной кривой определяется радиус-вектором \vec{R}_p как это отображено на рис. 2. Положение точки кривой восстанавливается по параметру s .

Произвольная точка P с радиус-вектором \vec{r} получается из сложения векторов \vec{R}_p и \vec{d}_p , где \vec{d}_p перпендикулярен касательной к опорной кривой в точке s_p , являющейся ближайшей к точке P .

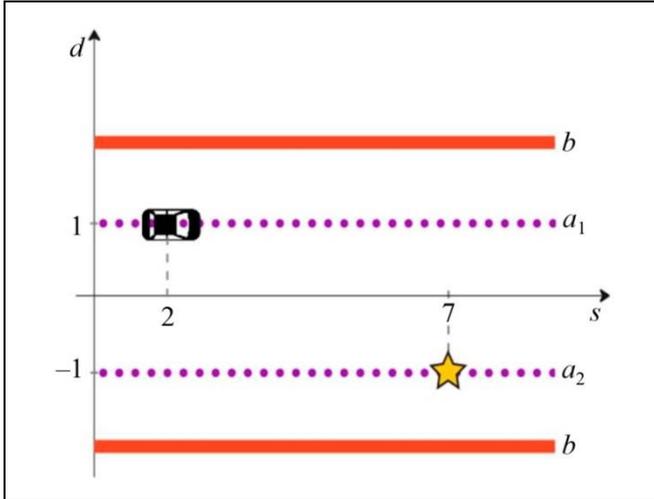


Рис. 2. Представление дороги, изображенной на рис. 1, в системе координат Френе: s – опорная кривая, задающая новую ось координат, d – нормаль к опорной кривой, формирующая вторую ось; b – границы дорожного полотна; a_1, a_2 – пути с постоянными координатами $d = 1$ и $d = -1$

Введем $\theta_s(\vec{R}_p)$ – угол наклона касательной к опорной кривой в декартовой СК в точке S_p (рис. 3), θ_d – угол наклона вектора \vec{d}_p , тогда переход в путевую систему координат выглядит следующим образом:

$$s_p = f(\vec{R}_p),$$

$$d_p = \text{sign}(\theta_s - \theta_d) |\vec{d}|.$$

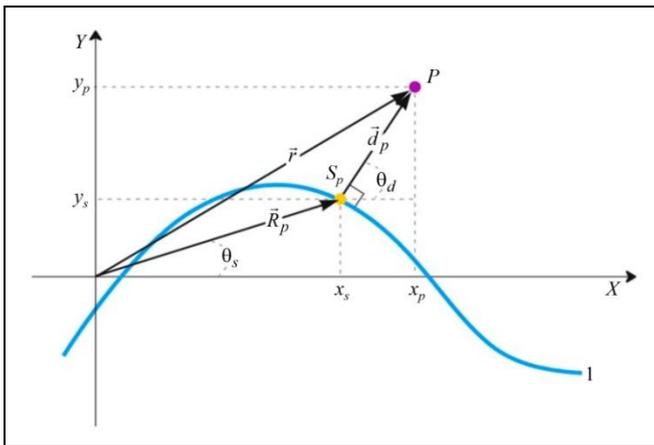


Рис. 3. Переход между декартовой СК и СК Френе: P – произвольная точка в пространстве, 1 – опорная кривая, S_p – ближайшая точка к P на опорной кривой

1.3. Переход из системы координат Френе в декартову систему координат

Поскольку итоговый путь должен быть представлен в декартовой системе координат, рассмот-

рим и обратный переход. Он получается путем определения координат точки опорной кривой в декартовой системе координат из параметризованного уравнения кривой и добавления поперечного смещения \vec{d} :

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + |\vec{d}_p| \begin{bmatrix} -\sin \theta_d \\ \cos \theta_d \end{bmatrix}.$$

2. ПОСТРОЕНИЕ ГОРИЗОНТА В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ФРЕНЕ

Горизонтом будем называть упорядоченный набор координат фиксированного размера, являющийся частью глобального пути, для которого в данный момент времени выполняется локальное планирование. Длина горизонта определяется дальностью действия внешних сенсоров, передающих данные о внешних объектах, и вычислительными мощностями ЭВМ. Система координат Френе оказывается удобной для расчета горизонта. В данной СК все объекты задаются их положением на дорожном полотне, а значит, намного проще определять, лежит ли препятствие на текущей траектории движения, в том числе на искривленных участках траектории. В новой ортогональной СК горизонт аппроксимируется кубическими В-сплайнами.

Требуется построить горизонт таким образом, чтобы он обеспечивал объезд статических препятствий. В работе [4] рассматривается обход препятствий и сглаживание В-сплайновой кривой путем вариации точек в произвольном направлении в исходном декартовом пространстве. Воспользовавшись этими результатами, будем варьировать точки сплайна в полученной новой СК. Причем для уменьшения количества варьируемых переменных достаточно ограничиться вариацией только по оси d . Положение i -й точки в системе координат Френе будет иметь вид $q_i = (s_i, d_i^0 + d_i) = (s_i, \tilde{d}_i)$, где d_i – вариация поперечного смещения i -й координаты относительно опорной кривой.

Из результатов работ [4, 5] следует, что для уменьшения кривизны кривой относительно новой СК следует минимизировать сумму квадратов норм векторов $\tilde{d}_i - \tilde{d}_{i-1}$ и $\tilde{d}_{i-1} - 2\tilde{d}_i + \tilde{d}_{i+1}$, задающих соответственно первую и вторую производные функции, которой описывается кривая. Эта сумма записывается как

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



где

$$H_1 = C_1^T C_1, H_1 \in R^{n \times n}, H_2 = C_2^T C_2, H_2 \in R^{n \times n},$$

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

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

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

Для контроля подвижности отдельных точек вводится функционал штрафа за вариацию точек, определяемый формулой

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

где $d_h = d_1, d_2, \dots, d_n$ – поперечная вариация точек горизонта и D – диагональная матрица, элементы которой пропорциональны штрафу за вариацию соответствующей точки.

3. ОТТАЛКИВАЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ

В данной работе рассматриваются только точечные препятствия, их объезд обеспечивается путем создания потенциального поля вокруг объекта в путевой СК. Каждый объект O_j в этой СК задается двумя координатами $(s^{(j)}, d^{(j)})$. Каждая точка планируемого горизонта h при этом тоже задается двумя координатами (s_i, d_i) ($s_h = s_1, s_2, \dots, s_n$). Тогда потенциал по всем объектам от всех точек горизонта имеет вид

$$U_{\text{hor}}(s_h, \tilde{d}_h) = \frac{1}{2} \eta \sum_{j=1}^{n_{\text{obj}}} \sum_{i=1}^n \exp(-(s^{(j)} - s_i)^2 + (d^{(j)} - \tilde{d}_i)^2), \quad (3)$$

где $\eta > 0$, n_{obj} – количество обнаруженных препятствий.

Таким образом, чем дальше точки горизонта находятся от обнаруженных препятствий, тем меньше величина потенциального поля.

4. ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИОНАЛ

Ранее уже были введены функции, задающие штрафы за кривизну и длину пути и сближение ТС с препятствием. В большинстве прикладных задач

также необходимо учитывать края дорожного полотна, что достигается ограничением допустимого диапазона вариации параметра d , причем для каждой точки можно указать свои границы, что особенно актуально в условиях разной ширины дорожного полотна. В тех случаях, когда границы дороги неизвестны, вводится штраф за отклонения от опорной кривой, что обеспечивает движение вблизи исходного глобального пути:

$$M(d_h) = d_h d_h^T. \quad (4)$$

С учетом выражений (1–4) целевой функционал будет иметь вид

$$\Phi_{\text{hor}}(s_h, d_h) = \frac{1}{2} S(d_h^0 + d_h) + \frac{1}{2} P(d_h) + U_{\text{hor}}(s_h, d_h^0 + d_h) + \gamma M(d_h^0 + d_h), \quad (5)$$

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

Отыскание горизонта сводится к задаче оптимизации (поиску минимума)

$$d_h^* = \operatorname{argmin}_{\{d_1, \dots, d_n\}} \Phi_{\text{hor}}(s_h, d_h), \quad (6)$$

$$D_i^l \leq (d_i^0 + d_i) \leq D_i^r, d_h^* \in R^n,$$

где $D_i^r \in R^n$ и $D_i^l \in R^n$ – матрицы расстояний от каждой точки опорной кривой до ближайшей к ней точки на правой и левой границе дорожного полотна соответственно.

Решение задачи минимизации функционала (5) может потребовать знания градиента этого функционала. Поскольку варьируются только поперечные смещения, соответствующие градиенты имеют вид

$$\nabla S(\tilde{d}_h) = 2(H_1 + H_2) \tilde{d}_h,$$

$$\nabla P(d_h) = 2P d_h,$$

$$\nabla M(\tilde{d}_h) = 2\tilde{d}_h,$$

$$\nabla U_{\text{hor}}(s_h, \tilde{d}_h) = - \sum_{j=1}^{n_{\text{obj}}} \sum_{i=1}^n \eta (d^{(j)} - d_i) \times \exp(-(s^{(j)} - s_i)^2 + (d^{(j)} - \tilde{d}_i)^2).$$

5. АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ГОРИЗОНТА

Основная идея алгоритма заключается в использовании в качестве начального приближения

горизонта, полученного на предыдущей итерации выполнения алгоритма, с перенесением начальных координат в текущее местоположение и последующим продлением пути до нужной длины (рис. 4). Под горизонтом H будем понимать упорядоченный набор векторов $h_i = (s_i, \tilde{d}_i)$:

$$H = \begin{bmatrix} h_1^T & h_2^T & \dots & h_N^T \end{bmatrix}^T \in R^{2 \times n}.$$

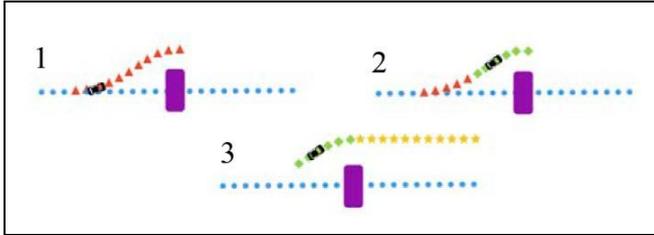


Рис. 4. Процесс формирования начального приближения для горизонта: круглые точки – опорная траектория; треугольные – горизонт, полученный на предыдущем этапе алгоритма; ромбы – точки, перенесенные в начало горизонта; звездочки – точки, дополняющие его до нужной длины

Инициализация. На вход подается заранее подготовленный массив из N точек, формирующий гладкую опорную кривую с равным расстоянием между соседними точками Δs [4]. Смещение вдоль опорной кривой для i -й точки массива будет таким: $s = i \Delta s$.

Шаг 1. Получаем местоположение ТС в декартовой системе координат.

Шаг 2. Обходя все точки опорной кривой, находим номер p ближайшей к положению ТС точки и расстояние d_p до нее $(s_p, d_p) = (p \Delta s, d_p)$.

Шаг 3. Инициализируем горизонт следующим образом:

$$H = \begin{bmatrix} s_p & s_p + \Delta s & \dots & s_p + (n-1) \Delta s \\ d_p & d_p & \dots & d_p \end{bmatrix}^T \in R^{2 \times n},$$

что характеризует движение вдоль опорной кривой с сохранением исходного поперечного отклонения.

Шаг 4. Повторяем шаги 1 и 2.

Шаг 5. Рассмотрим две возможные ситуации:

- Смещение вдоль опорной кривой оказалось вне текущего горизонта т. е. текущее смещение s_p не содержится в матрице H . Повторяем шаг 3.

- Положение ТС находится внутри текущего горизонта, т. е. текущее смещение s_p содержится в матрице H .

Введем индекс m координаты s в горизонте, соответствующий смещению s_p . Уберем все первые строки горизонта до $(m-1)$ -й включительно, переместив таким образом начало массива в строку, соответствующую координате s_p . Дополним горизонт до нужной длины, добавив в конец необходимые координаты s , продолжая оставшийся ряд с заданным шагом Δs и ставя в пару последнее известное поперечное смещение.

Шаг 6. Решаем поставленную задачу минимизации (6), используя алгоритм Бroyдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно (BFGS).

Шаг 7. Переводим полученные координаты горизонта H обратно в декартову систему координат. Передаем их на вход алгоритма следования по траектории.

Шаг 8. Повторяем шаги 4–7 алгоритма до тех пор, пока не достигнем конца опорной кривой. Для экономии вычислительных ресурсов запуск новой итерации алгоритма производится при появлении нового препятствия или уже при приближении к концу текущего горизонта за $0,1n$ точек до конца.

6. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Для тестирования предлагаемого алгоритма планирования будем использовать сторонний алгоритм следования по сгенерированному горизонту [6]. В качестве опорной кривой используется набор точек, полученных из прореженного набора координат GNSS-приемника, записанных в процессе движения ТС, переведенных в систему UTM и сглаженных методом, представленным в работе [4]. Здесь $D \in R^{n \times n}$ – диагональная матрица со значениями $\{25, 25, 0, 0\}$ на главной диагонали.

На рис. 5 показан путь, построенный с использованием значений параметров $\gamma = 0,5$, $\eta = 2$ и штрафа за отклонения от опорной кривой [3], поэтому траектория [1] все время стремится вернуться к опорной; ограничения на ширину дорожного полотна не учитывались.

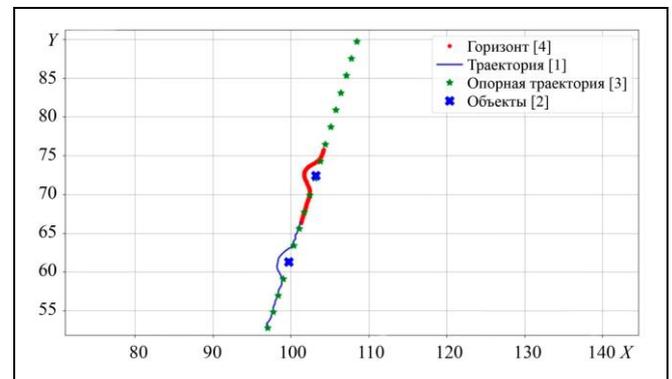


Рис. 5. Путь, пройденный ТС [1] по исходным точкам маршрута [3], с объездом точечных препятствий [2] и дальнейшим планируемым горизонтом [4] в UTM-координатах

На рис. 6 приведен случай, в котором снижено значение коэффициента, отвечающего за сближение с целевой траекторией, и введено ограничение на ширину дороги $\gamma = 0,001$, $\eta = 2$; $D \in R^{n \times n}$ – диагональная матрица со значениями $\{25, 25, 0, 0\}$ на главной диагонали. В этом случае было совершено перестроение для объезда препятствий и движение продолжилось на некотором удалении от исходной траектории.

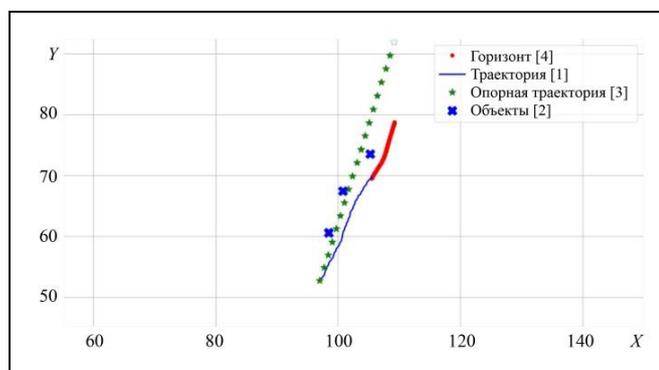


Рис. 6. Путь, пройденный ТС [1] по исходным точкам маршрута [3], с объездом точечных препятствий [2] и дальнейшим планируемым горизонтом [4] в UTM-координатах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача локального планирования пути для беспилотных транспортных средств в системе координат дорожного полотна с учетом точечных препятствий. Существующие методы локального планирования, такие как методы на основе потенциального поля и подходы, использующие прогнозирующие модели управления (УПМ), либо не обеспечивают достаточной гибкости при маневрах, либо требуют значительных вычислительных ресурсов для точного предсказания траектории. Существующие методы локального планирования никак не учитывают гладкость строящейся кривой.

Предложен алгоритм локального планирования горизонта в путевой системе координат, который позволяет эффективно обходить точечные препятствия. В отличие от традиционных методов, использующих декартову систему координат, данный алгоритм варьирует поперечное смещение вдоль опорной кривой в системе координат Френе, что улучшает вычислительную эффективность и упрощает обработку маневров.

На основе численных примеров показано, что алгоритм обеспечивает построение гладкого пути при наличии нескольких препятствий в реальном времени, эффективно демонстрируя точность и вычислительную простоту. Алгоритм также инте-

грируется с различными методами следования по траектории, которые не реализуют методы объезда препятствий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гилимьянов Р.Ф., Рапопорт Л.Б. Метод деформации пути в задачах планирования движения роботов при наличии препятствий // Проблемы управления. – 2012. – № 1. – С. 70–76. [Rapoport, L.B., Gilimyanov, R.F. Path Deformation Method for Robot Motion Planning Problems in the Presence of Obstacles // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol. 74, no. 12. – P. 2163–2172.]
2. Basavanna, M., Shivakumar, M. An Overview of Path Planning and Obstacle Avoidance Algorithms in Mobile Robots // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2019. – Vol. 08, iss. 12.
3. Lu, B., Li, G., Yu, H., et al. Adaptive Potential Field-Based Path Planning for Complex Autonomous Driving Scenarios // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 225294–225305. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3044909.
4. Werling, M., Ziegler, J., Kammel, S., Thrun, S. Optimal Trajectory Generation for Dynamic Street Scenarios in a Frenet Frame. Proceedings // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Anchorage, 2010. – P. 987–993. – DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509799.
5. 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. [Gilimyanov, R.F., Pesterev, A.V., Rapoport, L.B. Smoothing Curvature of Trajectories Constructed by Noisy Measurements in Path Planning Problems for Wheeled Robots // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2008. – Vol. 47, no. 5. – P. 812–819.]
6. Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., et al. Stanley: The Robot That Won the DARPA Grand Challenge // In: The 2005 DARPA Grand Challenge. Springer Tracts in Advanced Robotics. Vol 36. Ed. by M. Buehler, K. Iagnemma, S. Singh. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. – P. 1–43.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Л.Б. Рапопортом.

Поступила в редакцию 17.04.2023,
после доработки 13.05.2024.
Принята к публикации 21.05.2024.

Макаров Максим Игоревич – инженер, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва,
✉ maxim.i.makarov@gmail.com.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4854-5910>.

© 2024 г. Макаров М. И.



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

A LOCAL PATH PLANNING ALGORITHM FOR AVOIDING OBSTACLES IN THE FRENET FRAME

M. I. Makarov

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ maxim.i.makarov@gmail.com

Abstract. This paper presents a local path planning algorithm in the coordinate system of the roadbed. The algorithm is based on varying initial trajectory points using the potential field method and ensuring the smooth resulting path in a new coordinate system. This algorithm is executed by minimizing an objective functional. The problem is solved with application to path planning for an unmanned transport platform: it is necessary to change the vehicle's global smooth trajectory points in real time while maintaining smoothness and avoiding emerging obstacles. Compared to the Cartesian coordinate system, the new coordinate system is advantageous in terms of the execution time of the algorithm. The algorithm is implemented in Python. With a planning horizon being specified, this approach can be combined with various path-following algorithms that have no obstacle avoidance methods. Computer simulation results are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: path planning, Frenet coordinate system, unmanned vehicles.