

Алгоритм предиктивного управления автономным транспортным средством в среде с препятствиями

С.А.К. Диане ^{1,2}, В.И. Назаркин ², А.В. Бессонова ², А.В. Суслова ²

¹Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация – Ключевыми задачами при эксплуатации автономного транспортного средства, как известно, являются следование намеченному маршруту и избегание столкновений с препятствиями. В настоящей работе предложен алгоритм управления, основанный на прогнозирующей имитационной модели беспилотной платформы, который позволяет реализовать такое предиктивное поведение. В качестве методологической основы использован метод Эйлера для численного решения дифференциальных уравнений кинематики транспортного средства, метод динамического окна для оценки и выбора возможных траекторий транспортного средства при различных управляющих уставках, а также редуцированный метод нечетко-логического вывода при выборе целевых точек маршрута. Эксперименты, проведенные в виртуальной среде, подтверждают эффективность подхода на тестовых сценариях движения.

Ключевые слова – предиктивное управление, среда с препятствиями, метод динамического окна, автономный транспорт, нечеткая логика.

ВВЕДЕНИЕ

Задача организации пассажирских и грузовых перевозок является критически важной при обеспечении жизнедеятельности крупных городов, промышленных предприятий, организаций розничной торговли. По последним оценкам транспортная сфера формирует около 6% валового внутреннего продукта России [1].

Наряду с созданием и внедрением в повседневную жизнь беспилотных транспортных средств (БТС) для повышения оперативности и безопасности городского дорожного движения активное внимание к разработке автономных транспортных платформ (АТП) проявляется со стороны владельцев крупных складских предприятий.

В обоих случаях существенной научно-технической проблемой в решении транспортно-логистических задач является сложность организации безопасного маневрирования транспортных средств в условиях

нелинейности и неголономности их кинематики, динамичности и неполнозаданности внешней среды.

Существующие подходы к решению обозначенной проблемы опираются на принципы ситуационного управления [2, 3], графовые методы планирования движений [4], методы мультимодальной фильтрации цифровых сигналов [5], технологии навигации [6], методы адаптивного регулирования [7], технологии интеллектуальной обработки информации [8], а также алгоритмы предиктивного анализа данных [9, 10].

Целью настоящей работы является разработка математической формализации для моделирования задачи целенаправленного движения АТП в среде с препятствиями и совместимого с ней алгоритма управления, учитывающего параметры платформы и внешней среды.

В основе предлагаемого подхода лежит метод динамического окна [11, 12] и аналитические принципы оценки пересечения геометрических фигур [13]. При этом преимуществами разработанного алгоритма являются применение редуцированного нечетко-логического вывода для оценки значимости рассогласований до ближайших отрезков маршрута и учет полигональной формы подвижных объектов на пути следования АТП.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В целях обеспечения достоверности и повторяемости результатов исследования опишем математическую модель АТП и среды ее перемещения, допускающую применение метода Эйлера для численного решения дифференциальных уравнений кинематики.

Рассмотрим четырехколесную АТП с рулевой рейкой в передней части. Выберем за основу широко известную велосипедную кинематику [14]:

$$\begin{aligned}x_{t+1} &= x_t + v \cos(\alpha) \Delta t, \\y_{t+1} &= y_t + v \sin(\alpha) \Delta t, \\ \alpha_{t+1} &= \alpha_t + \frac{v \operatorname{tg}(\theta)}{L} \Delta t,\end{aligned}\tag{1}$$

где x_t, y_t – координаты центра платформы на плоскости, α_t – угол поворота платформы, v – скорость движения платформы, θ – угол поворота рулевых колес, Δt – шаг расчета.

Зададим маршрут G движения АТП, состоящий из K опорных точек, и фактическую траекторию робота H , пополняемую с течением времени t , в виде следующих множеств:

$$G = \{g_1, \dots, g_K\} \in \mathbb{R}^{2K}, \quad (2)$$

$$H = \{h_1, \dots, h_t\} \in \mathbb{R}^{2t}. \quad (3)$$

Корпус робота P и геометрию препятствий Q внешней среды определим, соответственно, в формате многоугольников

$$P = \{p_1, \dots, p_M\} \in \mathbb{R}^{2M}, \quad (4)$$

$$Q = \{q_1, \dots, q_N\} \in \mathbb{R}^{2N}, \quad (5)$$

вершины которых перечислены в порядке обхода против часовой стрелки.

Учтем также возможность задания внешней трансформации препятствия (5) с указанием координат центральной точки и угла поворота многоугольника:

$$\Theta_Q = \{x_Q, y_Q, \beta\}. \quad (6)$$

Дополнительно с каждым препятствием (5) в рабочей среде АТП ассоциируем параметры движения – его линейную и угловую скорости:

$$\Phi_Q = \{v_x, v_y, \omega\}. \quad (7)$$

На Рис. 1 показана схема движения платформы в среде с препятствиями. Наряду с основными геометрическими элементами указаны ошибки e_t рассогласования АТП с маршрутом и точка p_c потенциального столкновения с препятствием.

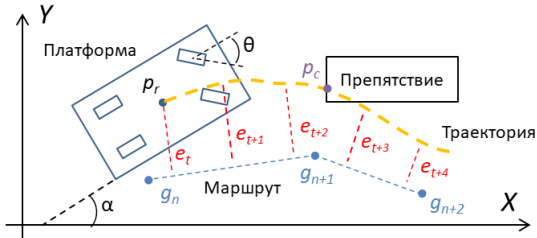


Рис. 1. Схема целенаправленного движения робота в среде с препятствиями

Требуется решить задачу: обеспечить движение АТП по траектории H близкой к маршруту G при одновременном уклонении от одного или нескольких подвижных препятствий $Q^+ = \{Q_1, \dots, Q_J\}$.

Отметим, что базовый закон управления транспортной платформой может быть основан на пропорциональном регулировании угла поворота рулевых колес:

$$e_\alpha = (\text{atan2}(y_g - y_r, x_g - x_r) - \alpha_t) \rightarrow [-\pi; \pi), \quad (8)$$

$$u_\theta = k_p e_\alpha + k_d \dot{e}_\alpha, \quad (9)$$

$$\Delta \theta = u_\theta \Delta t, \quad (10)$$

где e_α – угловое рассогласование, (x_g, y_g) – координаты целевой точки, (x_r, y_r) – координаты робота, u_θ –

управляющая уставка, k_p – коэффициент пропорционального регулирования, k_d – коэффициент дифференциального регулирования, $\Delta \theta$ – приращение угла за такт моделирования, $\rightarrow$ – операция приведения угла к стандартному диапазону на тригонометрической окружности.

Однако применение данного базового закона управления дает высокую ошибку следования траектории и не учитывает наличие подвижных препятствий – следовательно, требуется более эффективный метод.

II. ПРЕДИКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ

Улучшенный предиктивный закон управления предлагается строить на предположении о возможности рекуррентного прогноза состояния АТП $s_t = \{x_t, y_t, \alpha_t\}$ на несколько шагов времени вперед:

$$s_{t+1} = f_{\text{robot}}(s_t, u_t), \quad (11)$$

где f_{robot} реализуется на основе (1), а также на основе аналогичного прогноза состояний (трансформаций) препятствий:

$$\Theta_{Q,t+1} = f_{\text{obstacle}}(\Theta_{Q,t}, \Phi_{Q,t}), \quad (12)$$

где f_{obstacle} реализуется на основе законов равномерного движения с учетом параметров (6), (7).

Входом алгоритма являются начальное состояние робота s_{t_0} , целевой маршрут движения G , геометрия ближайших препятствий внешней среды Q^+ , а также их параметры движения Θ_Q, Φ_Q .

На выходе алгоритма в каждый дискретный момент времени определяется серия управляющих воздействий:

$$U_\theta = \arg \min_{U_\theta} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+N_h} e_t(s_t(s_{t_0}, u_{t_0}, \dots, u_{t-1}), G, P, Q^+), \quad (13)$$

$$U_\theta = \{u_{t_0}, \dots, u_{t_0+N_h-1}\} \in \mathbb{R}^{2N_h}, \quad (14)$$

где u_t – уставки по скорости движения и углу руления, N_h – горизонт прогноза, G – маршрут движения, P – геометрия корпуса платформы, Q^+ – геометрия ближайших к АТП препятствий внешней среды.

В рамках основных этапов алгоритма проводится решение оптимизационной задачи (13) с численным моделированием робота по формуле (11) и динамических препятствий по формуле (12).

Далее выполняется управление u_{t_0} , соответствующее первому элементу множества (14). Последующие же уставки отбрасываются в ожидании перепланирования движений АТП на очередном шаге моделирования.

Уточненное выражение для ошибки в каждой точке $h_t = p_r(t)$ движения робота имеет следующий вид:

$$e_t = k_1 \lambda(h_t, g_{n-1}, g_n) + k_2 \lambda(h_t, g_n, g_{n+1}) + \rho_G + \rho_Q, \quad (15)$$

где g_n – опорная точка маршрута, λ – геометрическая функция вычисления расстояния от точки до отрезка,

ρ_G – некоторый штраф за пропуск опорной точки маршрута, ρ_Q – некоторый штраф за столкновение с препятствием, k_1 – коэффициент стремления к текущей опорной точке, k_2 – коэффициент стремления к следующей опорной точке.

Расчет коэффициентов k_1 , k_2 проводится на основе упрощенной реализации нечетко-логических правил:

«Если робот ближе к точке g_n чем к точке g_{n+1} , то k_1 – высокий, k_2 – низкий»;

«Если робот ближе к точке g_{n+1} чем к точке g_n , то k_1 – низкий, k_2 – высокий».

Алгебраическая реализация данных правил выполнена следующим образом:

$$k_1 = \frac{\|h_t - g_{n+1}\|^2}{\|h_t - g_n\|^2 + \|h_t - g_{n+1}\|^2}, \quad (16)$$

$$k_2 = 1 - k_1. \quad (17)$$

Событие пропуска точки маршрута отслеживается в случае увеличения дистанции от АТП до этой точки, но недостижении порогового расстояния ε_G на недавнем отрезке времени:

$$\begin{cases} \min_{t^* \in [t_{prev}, t]} \|h_{t^*} - g_n\| > \varepsilon_G, \\ \frac{d}{dt} \|h_t - g_n\| > 0, \end{cases} \quad (18)$$

где t_{prev} – время прохождения прошлого отрезка маршрута или начала моделирования.

Критерием опасности сближения объектов (АТП и препятствия) считается уменьшение кратчайшего расстояния D между точками их многоугольников ниже критической отметки.

Оценка взаимного расположения многоугольников опирается на расчет функции для проверки круговой упорядоченности трех произвольных точек a , b и c :

$\zeta(p_a, p_b, p_c) = (y_c - y_a)(x_b - x_a) > (y_b - y_a)(x_c - x_a)$, (19) которая принимает значение 1, если точки идут против часовой стрелки и 0, иначе.

Рассмотрим три типовых случая взаимного расположения многоугольников (Рис. 2): (1) вхождение нескольких точек одного многоугольника в другой, (2) наложение двух многоугольников без вхождений точек и (3) соседство многоугольников.

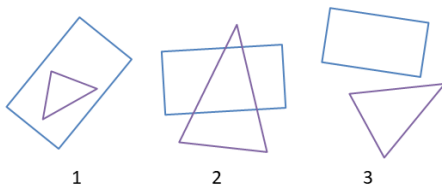


Рис. 2. Случаи взаимного расположения двух многоугольников: 1 – вхождение, 2 – наложение, 3 – соседство

Для 1-го случая примем $D=0$. Состоятельность 1-го случая определяется фактом ξ принадлежности некоторой точки p^* многоугольнику Q , что в свою

очередь зависит от четности числа δ фактов сонаправленности ориентированных углов обхода этой точки с общим направлением обхода многоугольника:

$$\xi(p^*, Q) = \begin{cases} 1, \text{ если } \sum_{i=1}^{N+1} \delta(p^*, Q, i) \in \{2n\}, n \in \mathbb{N}, \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases} \quad (20)$$

$$\delta(p^*, Q, i) = \begin{cases} \zeta(p^*, q_i, q_{i+1}), \text{ если} \\ \min(y_{q_i}, y_{q_{i+1}}) \leq y^* < \max(y_{q_i}, y_{q_{i+1}}), \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases} \quad (21)$$

где $i = 1, \dots, N$, $q_{N+1} = q_0$; причем углы обхода образуются лучами p^*q_i , и p^*q_{i+1} , проходящими лишь через те вершины многоугольника Q , которые проекционно связаны с точкой p^* по оси ординат (для сокращения числа вычислений).

Для 2-го случая также примем $D=0$. Состоятельность 2-го случая определяется фактом пересечения χ хотя бы одного отрезка (p_a, p_b) , принадлежащего первому многоугольнику и отрезка (p_c, p_d) в составе второго многоугольника:

$$\exists (p_a, p_b) \in P, (p_c, p_d) \in Q:$$

$$\chi(p_a, p_b, p_c, p_d) = \zeta(p_a, p_c, p_d) \neq \zeta(p_b, p_c, p_d) \wedge \zeta(p_a, p_b, p_c) \neq \zeta(p_a, p_b, p_d) = 1. \quad (22)$$

Для 3-го случая D определяется по формуле ортогонального расстояния от точки p^* до отрезка (p_a, p_b) :

$$D(p^*, p_a, p_b) = \begin{cases} |x^* - x_a|, \text{ если } x_a = x_b, \\ \frac{|k(x^* - x_a) - (y^* - y_a)|}{\sqrt{k^2 + 1}}, k = \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a}, \text{ иначе.} \end{cases} \quad (23)$$

Из всевозможных сочетаний точек первого и второго многоугольников следует выбрать то, которое дает минимальное расстояние:

$$D_{\min} = \min(\min_{\substack{p \in P, q_a \in Q, \\ q_b \in Q}} D(p, q_a, q_b), \min_{\substack{q \in Q, p_c \in P, \\ p_d \in P}} D(q, p_c, p_d)). \quad (24)$$

Полученная оценка расстояния между многоугольниками используется в формуле (15) для расчета штрафа ρ_Q и способствует выбору безопасной траектории движения АТП.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Методика проведения экспериментальных исследований заключалась в программной реализации предложенного алгоритмического обеспечения; в сравнении базового режима движения (на основе траекторных П-регулятора и ПД-регулятора) с усовершенствованным предиктивным алгоритмом управления транспортным средством; а также в формировании выводов о применимости подхода.

Программная реализация классических и предиктивного режимов движения АТП выполнена на языке Python 3 с применением библиотек numpy, pygame.

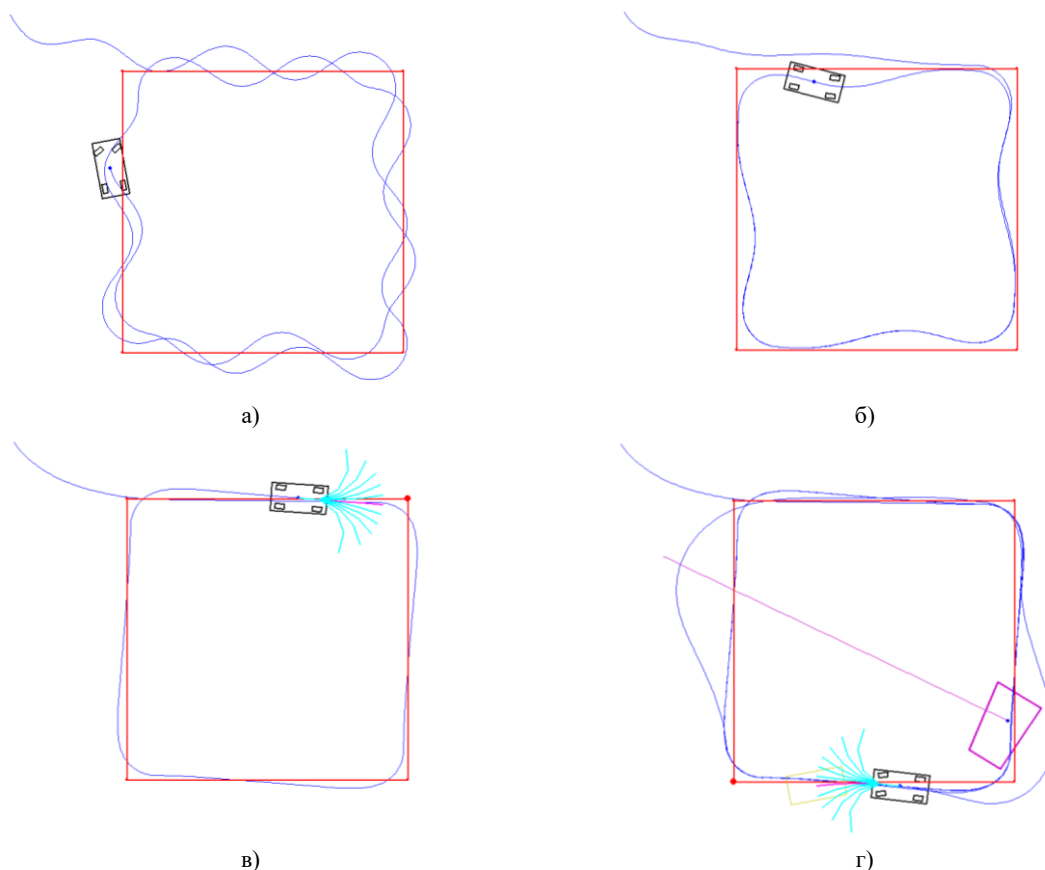


Рис. 3. Траектории АТП при различных режимах и условиях управления: а) траекторное П-регулирование; б) траекторное ПД-регулирование; в) предиктивное управление без препятствий; г) предиктивное управление с динамическим препятствием

Моделировалась АТП размером $4\text{ м} \times 2\text{ м}$, перемещающаяся по циклической траектории в форме квадрата размером $20\text{ м} \times 20\text{ м}$. Тестовая скорость движения АТП была выбрана равной 1 м/с .

Для режима П-регулирования была получена траектория, представленная на Рис. 3, а. Видны значительные отклонения от маршрута

Для режима ПД-регулирования была получена траектория, представленная на Рис. 3, б. Гладкость движений повысилась, а ошибка следования маршруту уменьшилась.

Для режима предиктивного управления в среде без препятствий была получена траектория, представленная на Рис. 3, в. Качество траектории существенно выше, чем при базовом подходе. Представленный на рисунке всер потенциальных маршрутов отражает специфику применения метода динамического окна, где из нескольких альтернатив по управляющим уставкам робот выбирает наилучшую.

Для режима предиктивного управления в среде с динамическим препятствием была получена траектория, представленная на Рис. 3, г. Качество траектории не уступает предыдущему эксперименту. Отклонения от маршрута обусловлены требованием безопасности движения вблизи препятствия (показано фиолетовым цветом). Бежевым цветом показано

прогнозируемое положение робота согласно выбранной альтернативе движения на горизонте прогнозирования 80 шагов (4 секунды). Отметим, что для запечатленного момента времени (292 секунда моделирования) отсутствие пересечений с многоугольником препятствия обеспечивает нулевой штраф ρ_Q в ошибке (15). Равным образом нулевое значение имеет штраф ρ_G , ввиду приближения АТП к очередной позиции (красная точка на Рис. 3, г).

Таким образом, можно сформировать вывод о применимости и эффективности предложенного подхода к предиктивному управлению с многокритериальной оценкой ошибки на базе редуцированной схемы нечетко-логического вывода и геометрического подхода к вычислению расстояний между ограничивающими многоугольниками объектов.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была предложена математическая формализация подхода к предиктивному управлению автономной транспортной платформой, основанного на комплексном использовании метода Эйлера численного решения дифференциальных уравнений в части расчета велосипедной кинематики транспортного

средства, методов динамического окна и нечеткой логики, а также элементов аналитической геометрии в части оценки потенциальных траекторий движения АТП.

Проведённые экспериментальные исследования полностью подтверждают применимость данного подхода и его повышенную эффективность при обработке траекторий в формате ломаных линий, в т.ч. замкнутого типа. Предложенный алгоритм хорошо справляется с уклонением от динамических препятствий.

Дальнейшие перспективы развития исследования сопряжены с разработкой алгоритма адаптивного выбора порога прогнозирования, а также расширения постановки задачи до полномасштабной навигации АТП в пределах моделируемого фрагмента городской среды. Определенный интерес представляет комбинирование режимов ПД-регулирования и предиктивного управления.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Транспортный комплекс входит в пятерку крупнейших российских отраслей // Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. URL: <https://ac.gov.ru/news/page/transportnyj-kompleks-vhodit-v-paterku-krupnejshih-rossijskih-otraslej-28261> (дата обращения: 25.06.2026).
- [2] Wang Zh., Li P., Li Q., Wang Zh., Li Zh. Motion planning method for car-like autonomous mobile robots in dynamic obstacle environments // IEEE Access. – 2023. – vol. 11. – pp. 137387–137400.
- [3] Fraichard Th., Garnier Ph. Fuzzy control to drive car-like vehicles // Robotics and Autonomous Systems. – vol. 34. – iss. 1. – 2001. – pp. 1–22.
- [4] Zhang R., Guo H., Sotelo M. A., Du H., Darius A., Li Z. New RRT-based method for vehicle path planning in curve scenarios considering path oscillations // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2025. – vol. 74. – no. 12. – pp. 18445–18459.
- [5] Farag W. Kalman-filter-based sensor fusion applied to road-objects detection and tracking for autonomous vehicles // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. – 2020. – Vol. 235. – no. 3. – pp. 095965182097552.
- [6] Chen W., Chi W., Ji S., Ye H., Liu J., Jia Y., Yu J., Cheng J. A survey of autonomous robots and multi-robot navigation: Perception, planning and collaboration // Biomimetic Intelligence and Robotics. – 2025. – vol. 5. – no. 2. – pp. 100203.
- [7] Kebbaty Y., Oufroukh N. A., Vigneron V., Ichalal D., Gruyer D. Optimized self-adaptive PID speed control for autonomous vehicles // 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC 2021). – 2021. – pp. 1–6.
- [8] Ofoegbu E. Artificial intelligence and machine learning in autonomous driving: current trends and future directions: a review // J. Eng. Appl. Sci. – 2026. – vol. 73. – no. 251.
- [9] Архирейский М.М., Диане С.А.К. Мониторинг и прогнозирование состояний электроприводов колесного робота // Системная инженерия и инфокоммуникации. – 2025. – № 3. – С. 4–8.
- [10] Кутузов Д.В., Осовский А.В., Мальцева Н.С., Мартынов С.В. Свойства трафика видеоконференций 5G и его прогнозирование методами искусственного интеллекта // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2025. – no. 1. – pp. 103–116.
- [11] Fox D., Burgard W., Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 1997. – V. 4 (1). – pp. 23–33.
- [12] Zhang Y., Xiao Zh., Yuan X., Li S., Liang S. Obstacle avoidance of two-wheeled mobile robot based on DWA algorithm. – 2019. – pp. 5701–5706.
- [13] Van Den Berg J., Lin M., Manocha D. Reciprocal n-body collision avoidance // Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. – 2011. – pp. 3–19.
- [14] Kien D., Quoc Phong P., Hai N., Thuong L., Hao H. Study on kinematic of two-wheeled and four-wheeled steering systems // Journal of science and development economics. – 2026. – no. 1. – pp. 79–91.

Информация об авторах

Диане Секу Абдель Кадер, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ИИУ РАН, доцент кафедры проблем управления РТУ МИРЭА, Москва, Россия, e-mail: diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422

Назаркин Владимир Иванович, аспирант РТУ МИРЭА, Москва, Россия, nazarkin.v.i@edu.mirea.ru

Бессонова Александра Викторовна, аспирант РТУ МИРЭА, Москва, Россия, bessonova@mirea.ru

Суслова Анастасия Владиславовна, магистрант РТУ МИРЭА, suslova.a.v2@edu.mirea.ru

Predictive control algorithm for an autonomous vehicle in an environment with obstacles

Sekou A. K. Diane ^{1,2}, Vladimir I. Nazarkin ²,
Alexandra V. Bessonova ², Anastasia V. Suslova ²

¹V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Moscow, Russia

²MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract – The key tasks in the operation of an autonomous vehicle are known to be following the intended route and avoiding collisions with obstacles. In this paper, a control algorithm is proposed based on a predictive simulation model of an unmanned platform, which allows for the implementation of such predictive behavior. The methodological framework includes the use of the Euler method for numerically solving the vehicle's kinematics differential equations, the dynamic window method for evaluating and selecting possible vehicle trajectories under different control decisions, and the reduced fuzzy logic inference method for selecting route target points. Experiments conducted in a virtual environment confirm the effectiveness of the approach in test motion scenarios.

Keywords – predictive control, obstacle avoidance, dynamic window method, autonomous transport, fuzzy logic.

REFERENCES

- [1] The transport complex is one of the five largest Russian industries // Analytical Center for the Government of the Russian Federation. URL: <https://ac.gov.ru/news/page/transportnyj-kompleks-vhodit-v-paterku-krupnejshih-rossijskih-otraslej-28261> (accessed on 25.06.2026) (In Russ.).
- [2] Wang Zh., Li P., Li Q., Wang Zh., Li Zh. Motion planning method for car-like autonomous mobile robots in dynamic obstacle environments // IEEE Access. – 2023. – vol. 11. – pp. 137387–137400.
- [3] Fraichard Th., Garnier Ph. Fuzzy control to drive car-like vehicles // Robotics and Autonomous Systems. – vol. 34. – iss. 1. – 2001. – pp. 1–22.
- [4] Zhang R., Guo H., Sotelo M. A., Du H., Darius A., Li Z. New RRT-based method for vehicle path planning in curve scenarios considering path oscillations // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2025. – vol. 74. – no. 12. – pp. 18445–18459.
- [5] Farag W. Kalman-filter-based sensor fusion applied to road-objects detection and tracking for autonomous vehicles // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. – 2020. – Vol. 235. – no. 3. – pp. 095965182097552.
- [6] Chen W., Chi W., Ji S., Ye H., Liu J., Jia Y., Yu J., Cheng J. A survey of autonomous robots and multi-robot navigation: Perception, planning and collaboration // Biomimetic Intelligence and Robotics. – 2025. – vol. 5. – no. 2. – pp. 100203.
- [7] Kebbaty Y., Oufroukh N. A., Vigneron V., Ichalal D., Gruyer D. Optimized self-adaptive PID speed control for autonomous vehicles // 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC 2021). – 2021. – pp. 1–6.
- [8] Ofoegbu E. Artificial intelligence and machine learning in autonomous driving: current trends and future directions: a review // J. Eng. Appl. Sci. – 2026. – vol. 73. – no. 251.
- [9] Archierevskiy M.M., Diane S.A.K. Monitoring and predicting the states of electric drives of a wheeled robot // System Engineering and Infocommunications. – 2025. – No. 3. – pp. 4–8. (In Russ.)
- [10] Kutuzov D. V., Osovsky A. V., Maltseva N. S., Martynov S. V. Properties of 5G video conferencing traffic and its prediction by artificial intelligence methods // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science, and Informatics. – 2025. – No. 1. – pp. 103–116. (In Russ.)
- [11] Fox D., Burgard W., Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 1997. – V. 4 (1). – pp. 23–33.
- [12] Zhang Y., Xiao Zh., Yuan X., Li S., Liang S. Obstacle avoidance of two-wheeled mobile robot based on DWA algorithm. – 2019. – pp. 5701–5706.
- [13] Van Den Berg J., Lin M., Manocha D. Reciprocal n-body collision avoidance // Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. – 2011. – pp. 3–19.
- [14] Kien D., Quoc Phong P., Hai N., Thuong L., Hao H. Study on kinematic of two-wheeled and four-wheeled steering systems // Journal of science and development economics. – 2026. – no. 1. – pp. 79–91.

Information about the authors

Sekou Abdel Kader Diane, Ph.D. (Eng.), Senior Researcher at the Institute of Control Sciences RAS, Associate Professor at the Department of Problems of Control at RTU MIREA, Moscow, Russia, e-mail: diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422

Vladimir Ivanovich Nazarkin, Postgraduate Student, RTU MIREA, Moscow, Russia, nazarkin.v.i@edu.mirea.ru

Alexandra Viktorovna Bessonova, Postgraduate Student, RTU MIREA, Moscow, Russia, bessonova@mirea.ru

Anastasia Vladislavovna Suslova, Master's Student, RTU MIREA, suslova.a.v2@edu.mirea.ru