

Метод обхода препятствий беспилотным автомобилем в динамической среде на основе управления с прогнозируемой моделью

© Н.П. Деменков, Цзоу Кай

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проведенное исследование посвящено проблеме обхода препятствий беспилотным автомобилем в городских дорожных условиях. Проанализированы характеристики городской среды, а также особенности и недостатки существующих методов, основанных на структуре планирования–отслеживания. Разработан метод планирования локального маршрута, основанный на идее искусственного потенциального поля и управлении с прогнозируемой моделью с целью унифицировать процесс планирования и отслеживания маршрута, чтобы эффективно справиться с динамичной городской средой. В соответствии с характеристиками дорожной среды метод искусственного потенциального поля использован для моделирования полосы движения и автомобилей в дорожной среде для планирования маршрута и обхода препятствий. Функции потенциального поля вводятся в задачу планирования маршрута в качестве ограничений. На основе управления с прогнозируемой моделью разработан контроллер планирования маршрута, в сочетании с физическими ограничениями автомобиля, чтобы избежать препятствий и выполнить ожидаемые команды с уровня планирования поведения в качестве цели для выполнения задачи планирования локального маршрута. При совместном моделировании использованы программы MATLAB и CarSim для проверки осуществимости предложенного метода планирования маршрута. Результаты показывают эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: обход препятствия, планирование маршрута, беспилотный автомобиль, теория управления с прогнозируемой моделью, искусственное потенциальное поле

Введение. Беспилотные автомобили (БА) являются многообещающим фактором развития современных транспортных технологий и передовых систем помощи водителю и, как предполагается, станут устойчивым будущим в повышении безопасности дорожного движения, эффективности транспортного потока и снижении расхода топлива при одновременном повышении мобильности и, следовательно, общего благополучия [1]. БА должны «уметь» справляться со сложными ситуациями дорожного движения, особенно в городских условиях. Для этого требуется разработка и взаимодействие множества технологий.

Технология планирования маршрута (ПМ) является одним из ключевых звеньев, а также и ключом к обеспечению безопасного вождения БА. Технология ПМ была широко изучена в области робототехники, и БА можно рассматривать как колесный робот, поэтому

многие методы заимствуют из области робототехники. Однако между ними существует и большое различие. Окружающая среда, с которой сталкиваются БА, очень динамична и сложна, необходимо также учитывать структуру и правила дорожного движения. Кроме того, скорость БА значительно выше, чем у колесного робота, предъявляются более высокие требования к работе БА в режиме реального времени.

Существующие методы ПМ включают методы на основе поиска, на основе дискретной оптимизации и т. д. [1]. Применение этих методов часто обусловлено высокими требованиями к точности карты и большим объемом вычислений, что не способствует удовлетворению требований реального времени. Поскольку структура метода искусственного потенциального поля (ИПП) проста, а различные функции потенциального поля могут быть использованы для описания разных препятствий, то ИПП является методом, который способствует эффективной реализации локального ПМ и обеспечивает обход препятствий, для его реализации требуется меньше вычислительных ресурсов [2, 3]. Управление с прогнозируемой моделью является подходящей технологией для БА, поскольку ее применение позволяет справляться с различными ограничениями и с неопределенностью динамической среды, широко используемой в технологии планирования маршрута и отслеживания [4–6].

В работе [7] метод ИПП используют для моделирования окружающей среды и получения желаемого маршрута, а также на основе управления с прогнозируемой моделью проектируют контроллер отслеживания траектории для выполнения задачи планирования локального маршрута. Аналогичная структура используется в работах [8, 9], в которых сначала планируется траектория, а затем отслеживается траектория, завершающая процесс локального планирования и обхода препятствий. Однако вычислительная нагрузка этих методов велика, эффективность ПМ в условиях динамичной городской среды недостаточна.

В работе [10] предлагается контроллер на основе теории управления с прогнозируемой моделью, причем планируется, что управляющая команда непосредственно воздействует на исполнительный механизм. Этот метод позволяет избежать отсутствия структуры планирования–отслеживания, соответствующей режиму работы водителя. Однако конструкция функции потенциального поля не учитывает влияния скоростных факторов и не соответствует характеристикам городской среды. В то же время использование управляющей величины в качестве критерия оптимизации может вызвать большие колебания. В работе [11] предложен метод моделирования окружающей среды, сочетающий идею сетки и идею ИПП, а контроллер предназначен для выполнения задачи планирования на основе этого.

Однако этот метод несколько прост в использовании модели автомобиля, применим только в условиях соблюдения постоянной скорости, его адаптивность не очень хороша. В целом, в большинстве методов, использующих структуру планирования–отслеживания, процесс громоздок и неэффективен, координация между процессами планирования и отслеживания сопряжена с некоторыми трудностями, особенно в тех случаях, когда динамические изменения в городской среде приводят к сбою результатов планирования.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы разработать метод планирования локального маршрута, который может адаптироваться к высокодинамичным характеристикам городской среды, обеспечивает возможность эффективно избегать препятствия и удовлетворяет потребностям в реальном времени. Унифицирован процесс планирования и отслеживания, а также путем координации целей и ограничений планирования необходимо обеспечить рациональность и стабильность результатов планирования.

Модель динамики автомобиля. В процессе планирования, чтобы сбалансировать эффективность и сложность вычислений, при моделировании динамики автомобиля используется модель велосипеда [12]. Обозначения, используемые в модели автомобиля, пояснены на рис. 1.

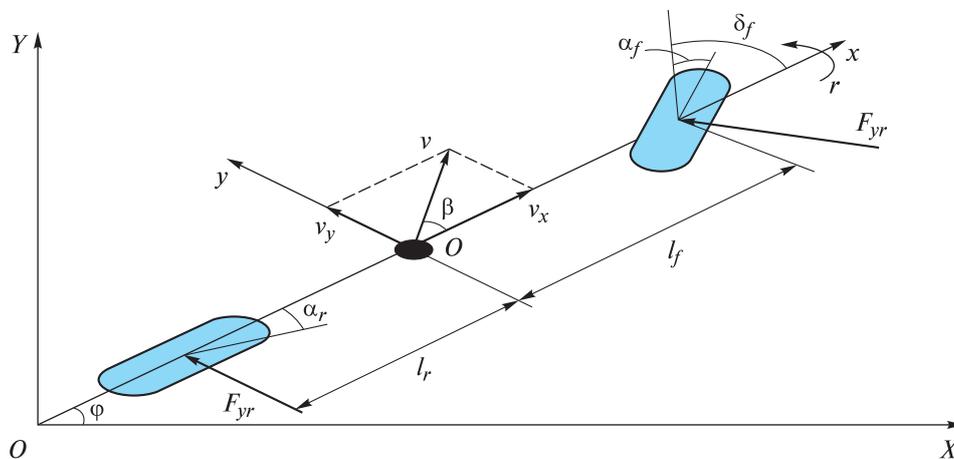


Рис. 1. Модель автомобиля

Уравнения движения модели:

$$m(\dot{v}_y + v_x \times r) = F_{yf} + F_{yr}; \quad (1)$$

$$m \times a_x = F_x; \quad (2)$$

$$I_z \dot{r} = l_f F_{yf} - l_r F_{yr}; \quad (3)$$

$$\dot{\phi} = r; \quad (4)$$

$$\dot{X} = v_x \cos \phi - v_y \sin \phi; \quad (5)$$

$$\dot{Y} = v_y \cos \phi + v_x \sin \phi, \quad (6)$$

где m — масса автомобиля; v_x, v_y, r — продольная скорость, поперечная скорость и скорость рыскания автомобиля в его центре тяжести; F_{yf}, F_{yr} — суммарные поперечные силы передних и задних колес; F_x — общая продольная сила колес; a_x — продольное ускорение; I_z — инерционный момент автомобиля вокруг его вертикальной оси; l_f, l_r — расстояние между центроидом и передней и задней колесной базой; X, Y, ϕ — продольное и поперечное положение и угол рыскания автомобиля в глобальной системе координат.

В предположении, что автомобиль является переднеприводным, из-за небольшого угла поперечного скольжения передних и задних колес для поперечных сил колеса используется линейная модель [13]:

$$F_{yf} = C_f \alpha_f = C_f \left(\frac{v_y + l_f r}{v_x} - \delta_f \right); \quad (7)$$

$$F_{yr} = C_r \alpha_r = C_r \left(\frac{v_y - l_r r}{v_x} \right), \quad (8)$$

где α_f, α_r — углы поперечного скольжения передних и задних колес; δ_f — угол поворота переднего колеса; C_f, C_r — величины жесткости на поворотах передних и задних колес.

В этой системе вектор состояния $\bar{x} = [X, Y, \phi, v_x, v_y, r]$ и вектор управления $\bar{u} = [a_x, \delta_f]$. После линеаризации получим модель системы в виде

$$\dot{\bar{x}} = \mathbf{A}\bar{x} + \mathbf{B}\bar{u}, \quad (9)$$

$$\text{где } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_1 & B_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_2 & B_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & C_1 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix}; \quad A_1 = \frac{C_f + C_r}{mv_x};$$

$$A_2 = \frac{l_f C_f - l_r C_r}{I_z v_x}; \quad B_1 = -v_x + \frac{l_f C_f - l_r C_r}{m v_x}; \quad B_2 = \frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{I_z v_x};$$

$$C_1 = -\frac{C_f}{m}; \quad C_2 = -\frac{l_f C_f}{I_z}.$$

Моделирование дорожной среды на основе ИПП. При моделировании дороги выделяют две части: границы дороги и разделительные линии полос движения. Границы дороги должны создавать отталкивающие потенциальные поля, чтобы предотвратить пересечение границы автомобилем, значение потенциального поля должно быть большим. Заданная линия разделения полос движения создает силу отталкивания, чтобы предотвратить ненужное переключение БА на смену полосы движения и удерживать автомобиль вдоль центральной линии полосы движения. В то же время сила отталкивания должна быть и достаточно малой, чтобы автомобиль мог перемещаться между полосами движения в попутном направлении, когда необходимо сменить полосу движения во избежание столкновения с препятствием. Кроме того, по мере увеличения скорости автомобиля приходится усиливать потенциальное поле, чтобы удерживать автомобиль на полосе движения. Для моделирования используется следующая функция:

$$U_R(X, Y) = K_{Ro} \left(d(X, Y) - d_{oc}(X_{oc}, Y_{oc}) \right)^2 e^{\lambda v}, \quad o = 1, 2, \quad (10)$$

где $U_R(X, Y)$ — значение ИПП; K_{Ro} — параметр интенсивности ИПП; $d(X, Y)$ — положение автомобиля; $d_{oc}(X_{oc}, Y_{oc})$ — положение осевой линии полосы движения; o — индекс, означающий границу полосы и линию разделения полосы; λ — коэффициент регулировки скорости; v — скорость автомобиля.

Модельная схема ИПП двухполосной дорожной среды показана на рис. 2.

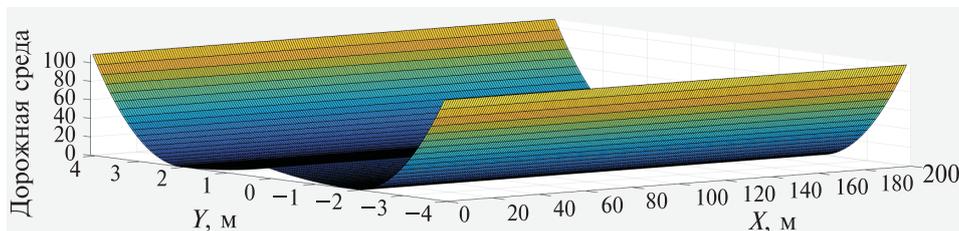


Рис. 2. Схема искусственного потенциального поля дороги

Моделирование автомобиля. В городской дорожной среде существуют различные виды препятствий. Далее основное внимание в качестве препятствия уделяется другим автомобилям, движущимся

в потоке относительно БА. Моделирование перемещений автомобиля в окружающей среде всегда было в центре внимания, и чем выше скорость, тем выше требования к моделированию, например, в дорожных условиях на шоссе [14]. В городских условиях скорость автомобиля остается примерно в диапазоне 30...60 км/ч.

Эти автомобили могут быть динамическими (находиться в движении) или статическими (неподвижными). Когда БА находится на безопасном расстоянии от другого автомобиля в потоке, этот автомобиль не влияет на БА. В противном случае необходимо установить соответствующее поле отталкивания. Безопасное расстояние используется для определения момента, когда требуется сменить полосу движения, связано с абсолютной скоростью БА и относительной скоростью между автомобилями. Эта величина имеет разные определения, но различия невелики. Здесь принимается следующая формула [15]:

$$D = d_0 + v_x T_0 + \frac{\Delta v^2}{2a_{\max}}, \quad (11)$$

где d_0 — минимальное расстояние между двумя автомобилями; v_x — продольная скорость БА; T_0 — безопасный временной интервал (компенсация времени обнаружения датчика и времени реакции); Δv — относительная скорость между автомобилями; a_{\max} — максимальное замедление автомобиля.

Предположим, что в течение короткого периода времени направление и скорость автомобиля не изменяются. Тогда прогнозирование состояния получится следующим:

$$X_{obs}(t) = v_{obs}t \cos(\varphi_{obs}) + X_{obs0}; \quad (12)$$

$$Y_{obs}(t) = v_{obs}t \sin(\varphi_{obs}) + Y_{obs0}, \quad (13)$$

где $X_{obs}(t)$, $Y_{obs}(t)$ — положение в момент времени t ; v_{obs} — скорость автомобиля; φ_{obs} — угол рыскания; X_{obs0} , Y_{obs0} — положение начального момента.

В дорожных условиях воздействие на БА других движущихся автомобилей в поперечном и попутном (продольном) направлениях различно. В продольном направлении между автомобилями необходимо поддерживать большое безопасное расстояние, на котором абсолютная скорость автомобиля и относительная скорость между автомобилями также имеют значение. В поперечном направлении обычно можно поддерживать очень близкое расстояние. Поэтому форма конструкции ИПП должна соответствовать характеристикам распределения поперечного и продольного направлений, а при необходимости обхода препятствий — способствовать разумной смене полосы дви-

жения. Для построения функций ИПП используется функция Гаусса. В то же время скорость, правила дорожного движения и другие факторы вводятся в переменную функции для получения простого и эффективного ИПП отталкивания. Поэтому устанавливается следующая функция потенциального поля:

$$U_{obs} = K_{o1} \exp \left[(\alpha - 1) \frac{(X - X_{obs})^2}{\delta_x^2} - \frac{(Y - Y_{obs})^2}{\delta_y^2} \right] e^{\lambda v}; \quad (14)$$

$$\alpha = \gamma (K_{o2} v + K_{o3} (v - v_{obs})),$$

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{при } X < X_{obs}; \\ -10 & \text{при } X \geq X_{obs}; \end{cases}$$

$$\delta_x = K_{o4} D; \delta_y = K_{o5} d.$$

Здесь $K_{oi} (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ — весовые коэффициенты интенсивности потенциального поля; $\alpha, \gamma, \delta_{x,y}$ — параметры, которые регулируют распределение потенциального поля; X, Y, X_{obs}, Y_{obs} — координаты центра БА и автомобиля-препятствия; v, v_{obs} — скорость БА и автомобиля-препятствия; d — ширина дороги; λ — коэффициент регулировки скорости.

При синтезе функции известны различные методы расчета расстояния между двумя автомобилями, существует очень точный метод расчета [14, 16], применив который, в случае затора из-за низкоскоростного автомобиля будет получен немного лучший эффект, в большинстве других случаев — эффекта не будет, но увеличатся объемы расчета. В рассматриваемом случае непосредственно используются координаты центра автомобиля, влияние длины кузова вводится для компенсации безопасного расстояния, а также регулируется распределение потенциального поля, что позволяет эффективно справляться с различными ситуациями, а объем расчета невелик. Модельная схема ИПП автомобиля показана на рис. 3.

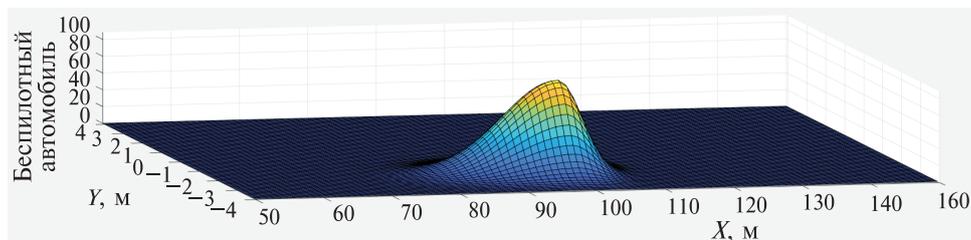


Рис. 3. Схема искусственного потенциального поля автомобиля

Проектирование контроллера ПМ. Задача контроллера состоит в том, чтобы спланировать разумные команды по движению на основе информации о текущем состоянии автомобиля, информации об окружающей среде и команде, поступающей с уровня планирования поведения, для завершения планирования локального маршрута. Контроллер, разработанный на основе теории управления с прогнозируемой моделью, может оптимизировать управляющую величину \bar{u} в соответствии с изменяющейся информацией о среде в реальном времени. Проектирование контроллера в основном включает создание прогнозируемой модели, описание целевой функции и условий ограничений. Чем длительнее по времени шаг прогнозирования N_p и шаг управления N_c , тем лучше результат, но в то же время объем вычислений будет увеличиваться. Поэтому обычно уменьшают шаг управления для снижения объема вычислений, получая баланс между объемом вычислений и точностью [17].

Прогнозируемая модель в контроллере может быть получена путем дискретизации динамической модели. Посредством преобразования математической модели критерий оптимизации преобразуется в приращение управляющей величины для улучшения оптимизации:

$$\bar{x}(t+1) = f(\bar{x}(t), \bar{u}(t)); \quad (15)$$

$$\bar{u}(t) = \bar{u}(t-1) + \Delta\bar{u}(t), \quad (16)$$

где $\Delta\bar{u}(t)$ — приращение управляющей величины в момент времени t ; $\bar{x}(t)$ — величина состояния в момент времени t ; $\bar{u}(t-1)$ — управляющая величина в предыдущий момент времени.

Проектирование контроллера в этой работе основано на известных командах поведения, т. е. на заданном поперечном положении и продольной скорости $\bar{y}_ж = [Y_ж \ v_{хж}]^T$. Желаемая команда поведения вводится в целевую функцию в качестве цели отслеживания. Разработанные функции ИПП дорожной среды вводятся в целевую функцию контроллера для реализации функции обхода препятствий и разумного планирования, когда это необходимо. В то же время для обеспечения рациональности и стабильности планируемых результатов управляющая величина и приращение управляющей величины также вводятся в целевую функцию. Таким образом, получается следующая целевая функция:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} U(t+i|t) + \|\bar{y}_{t+i,t} - \bar{y}_{ж,t+i,t}\|_{Q1}^2 + \|\bar{u}(t+i-1|t)\|_{Q2}^2 + \|\Delta\bar{u}(t+i-1|t)\|_{Q3}^2, \quad (17)$$

где $(t+i|t)$ — прогнозируемое значение шага i после текущего времени t ; N_p — временной горизонт прогнозирования; $Q1$, $Q2$, $Q3$ — веса каждой части.

При разработке условий ограничения сначала рассматриваются физические ограничения маневренности автомобиля, т. е. ограничения величины управления и приращения величины управления. Таким образом, эту задачу планирования можно отнести к следующей задаче оптимизации:

$$\min_{\Delta u(t)} \{J(\bar{x}(t), \bar{u}(t-1), \Delta \bar{u}(t))\}$$

при соблюдении ограничений:

$$\bar{x}(k+1) = f(\bar{x}(k), \bar{u}(k));$$

$$\bar{u}(k) = \bar{u}(k-1) + \Delta \bar{u}(k);$$

$$\bar{u}_{\min}(k) \leq \bar{u}(k) \leq \bar{u}_{\max}(k);$$

$$\Delta \bar{u}_{\min}(k) \leq \Delta \bar{u}(k) \leq \Delta \bar{u}_{\max}(k).$$

В каждый момент времени, согласно полученной информации о дороге и о состоянии автомобиля, контроллер минимизирует целевую функцию, оптимизирует угол переднего колеса, действующий на автомобиль, и завершает задачу планирования маршрута.

Ситуации для тестирования. Среда вождения БА в городских условиях более сложная, но все же из нее можно выделить несколько типичных ситуаций. Рассмотрим три ситуации, выбранные для тестирования. Предполагается, что дорожная среда является двухполосной.

Первая ситуация распространена и относительно проста (рис. 4, а). В той же полосе перед БА движется автомобиль с низкой скоростью, БА нужно переместиться на другую полосу. Кроме того на соседних полосах движения стоят автомобили. С помощью этой ситуации можно проверить алгоритм смены полосы движения на постоянной скорости и функцию автономного обхода препятствий.

Вторая ситуация заключается в том, что на одной и той же полосе автомобиль, движущийся с низкой скоростью, появляется перед БА в то время как аналогичный автомобиль на скорости приближается по соседней полосе (рис. 4, б). В этом случае возможной стратегией вождения является ускорение и переключение (смена) полосы движения.

Третья ситуация заключается в том, что на той же полосе перед БА находится низкоскоростной автомобиль, в то время как на сосед-

ней полосе появляется автомобиль, движущийся с более высокой скоростью (рис. 4, в). В этом случае прямая смена полосы движения нецелесообразна, необходимо поддерживать безопасную дистанцию до автомобиля, следующего впереди. Следовательно, возможная стратегия — снизить скорость, чтобы поддерживать безопасное расстояние до впереди идущего автомобиля, а затем сменить полосу движения после того, как пространство соседних полос освободится.

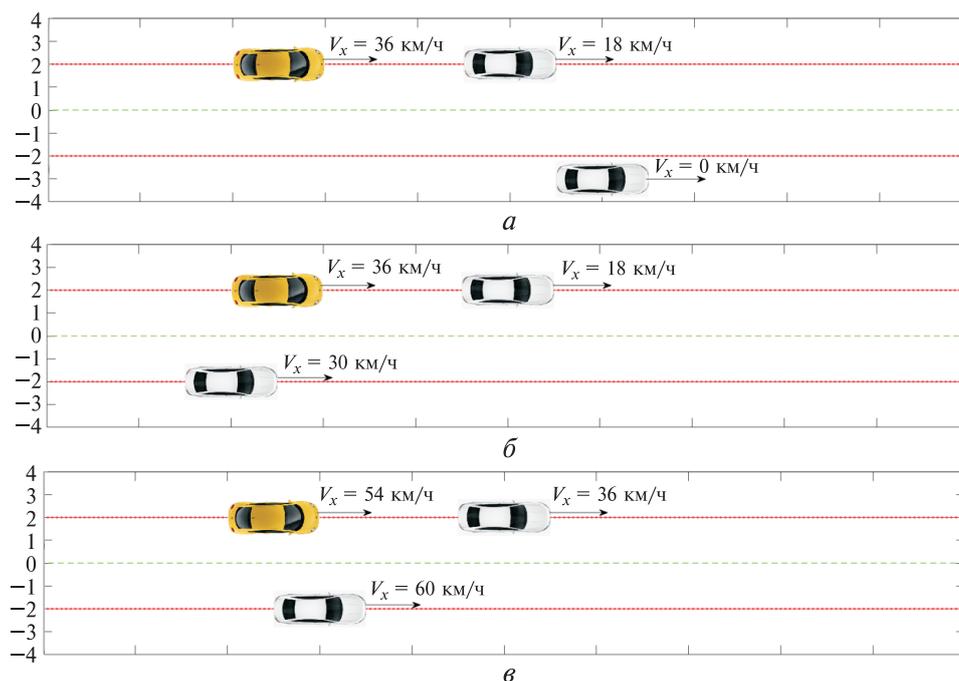


Рис. 4. Ситуации вождения беспилотного автомобиля, выбранные для тестирования

Результаты моделирования и анализ. Верификация моделирования использует совместное моделирование MATLAB/Simulink и CarSim. Параметры модели БА и контроллера приведены в таблице.

В первой ситуации БА сначала необходимо переключить (сменить) полосу движения, чтобы избежать столкновения с автомобилем, движущимся впереди; полученная команда поведения должна быть $[-2, 36 \text{ км/ч}]$. После этого на обочине дороги впереди снова будет препятствие — припаркованный автомобиль, и соответствующая команда поведения также обновляется в это время, например $[-1, 36 \text{ км/ч}]$. Здесь не изменяются команды для проверки действия установленного ИПП, автомобиль избегает препятствий только под действием потенциального поля окружающей среды.

Как показано на рис. 5, а, БА меняет полосу движения в соответствии с командой в течение 3 с, и цель достигается в течение примерно 6 с.

Параметры контроллера

Параметр	Значение	Параметр	Значение
m , кг	2160	T , с	0,1
l_f , м	1,35	N_p	20
l_r , м	1,5	N_c	10
C_f, C_r , Н/рад	87594	$Q1$	[5 0; 0 2]
I_z , кг·м ²	3411	$Q2$	[0,5 0; 0 200]
d , м	4	$Q3$	[5 0; 0 2000]
K_{R1}	10	\bar{u}_{\min} , (м/с ² , рад)	[-5 -0,44]
K_{R2}	0,3	\bar{u}_{\max} , (м/с ² , рад)	[5 0,44]
λ	0,1	$\Delta\bar{u}_{\min}$, (м/с ² , рад)	[-1 -0,035]
d_0 , м	8	$\Delta\bar{u}_{\max}$, м/с ² , рад)	[1 0,035]
T_0 , с	2	K_{o3}	0,01
a_{\max} , м/с ²	5	K_{o4}	0,33
K_{o1}	50	K_{o5}	0,8
K_{o2}	0,03	—	—

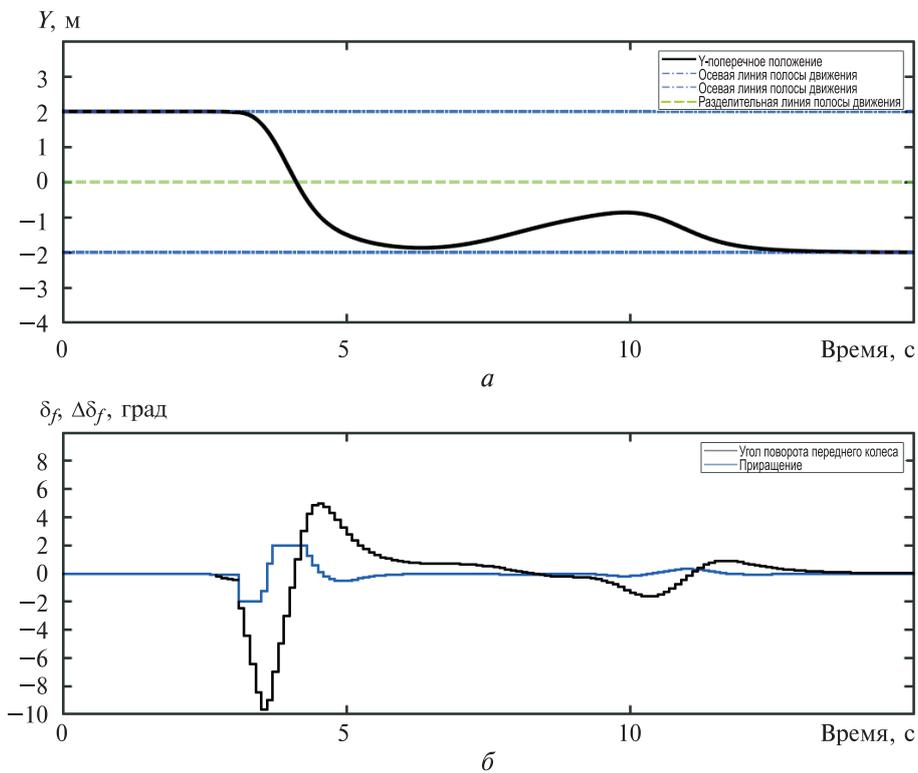


Рис. 5. Результаты моделирования первой ситуации:

a — поперечное положение; b — изменение угла поворота переднего колеса и приращения

Процесс смены полосы движения длится 3–4 с, что является разумным результатом. Впоследствии впереди появился неподвижный автомобиль, припаркованный на обочине дороги. БА необходимо избежать столкновения с этим транспортным средством и выдержать дистанцию, но ему не нужно менять полосу движения. Результаты показывают, что БА может успешно избегать препятствий без обновления команды, что доказывает эффективность установленных функций ИПП. Согласно рис. 5, использование приращения угла в качестве величины оптимизации позволило сделать изменение угла поворота переднего колеса устойчивым, а весь процесс вождения — очень плавным.

Во второй ситуации проведен тест на увеличение скорости БА при смене полосы движения, который фактически можно рассматривать как операцию слияния полосы движения. Команда смены полосы движения должна начаться на 5-й с, БА должен ускориться до 45 км/ч (рис. 6).

В этой ситуации другой автомобиль находится сзади БА на соседней полосе движения ближе к БА, поэтому БА не может быстро сменить полосу движения, так как он подвержен риску столкновения. Как видно на рис. 6, *a*, из-за необходимости держать дистанцию и до впереди идущего автомобиля, и до транспортного средства, движущегося сзади по соседней полосе, процесс смены полосы движения БА происходит более плавно. Время смены полосы движения также было увеличено, что также может дать автомобилю, следующему сзади, определенное время реакции. Кроме того, в соответствии с командой поведения, БА начинает менять полосу движения и ускоряется с 5-й с. На рис. 6, *b* и 6, *г* видно, что перед этим в течение короткого периода времени движение БА замедленное. Это связано с простой структурой команды: прежде чем команда будет получена БА, из-за воздействия ИПП дорожной среды и автомобиля-препятствия контроллер выдает результаты планирования с запаздыванием. Это также доказывает важную роль ИПП окружающей среды.

Третья ситуация на самом деле представляет собой сочетание операции замедления движения БА для следования за автомобилем, который движется впереди, и операции ускорения при смене полосы движения. Команда по вождению здесь заключается в том, чтобы начать замедляться на 3-й с и двигаться за автомобилем, идущим впереди с низкой скоростью, и на 5-й с — чтобы начать смену полосы движения и ускоряться.

Сравнивая изображения на рис. 6, *a* и 7, *a*, можно также увидеть, что когда сзади отсутствует помеха в виде автомобиля, БА быстрее меняет полосу движения. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что контроллер работает эффективно. Отклонение, показанное на рис. 7, *г*, в основном связано с простой структурой желаемой команды поведения, которая здесь используется только для тестирования.

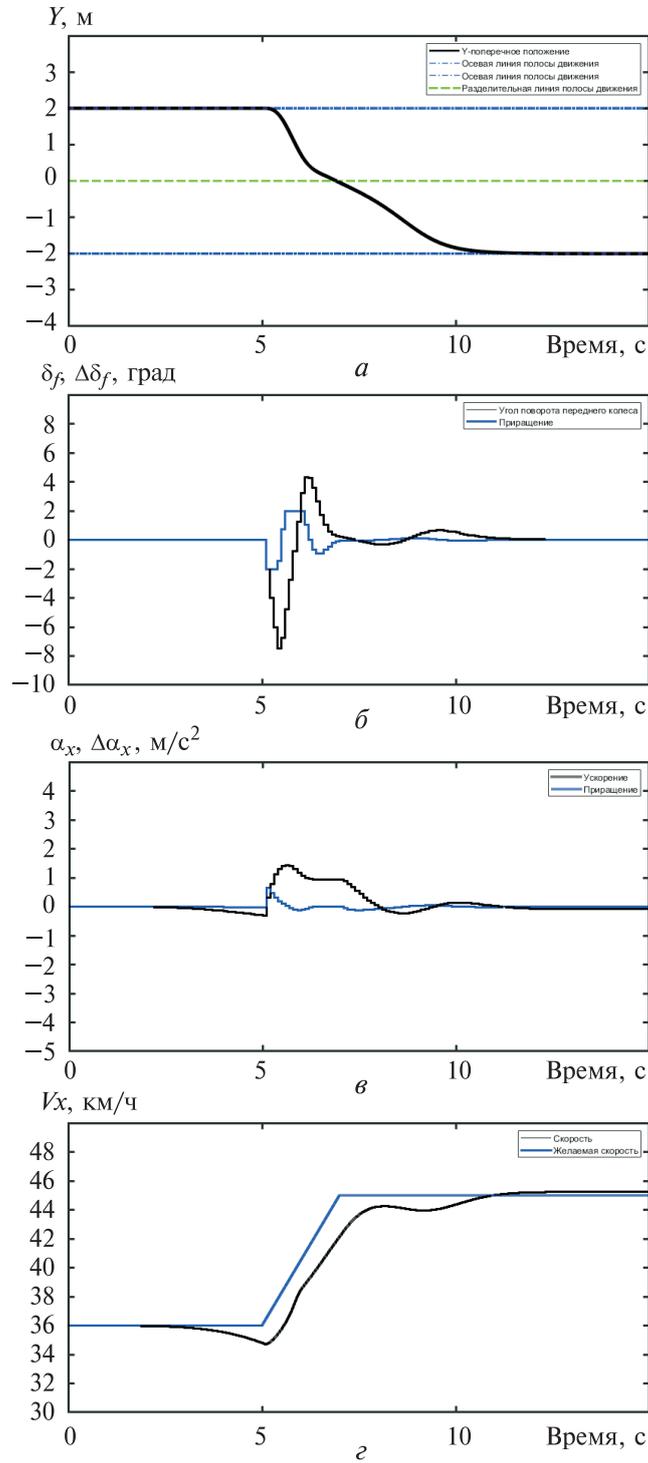


Рис. 6. Результаты моделирования второй ситуации:

a — поперечное положение; *б* — изменение угла поворота переднего колеса и приращения;
в — изменение ускорения и приращения; *г* — изменение скорости

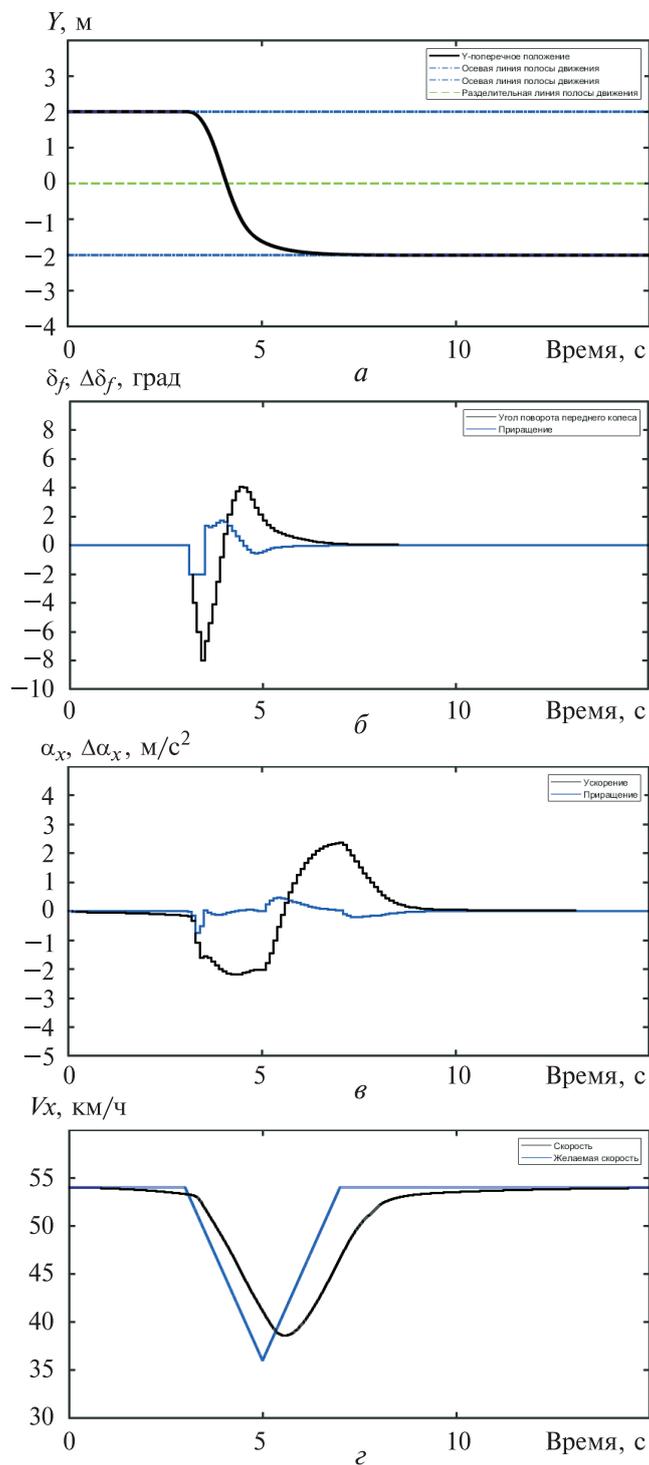


Рис. 7. Результаты моделирования третьей ситуации:
 a — поперечное положение; $б$ — изменение угла поворота переднего колеса и приращения;
 $в$ — изменение ускорения и приращения; $г$ — изменение скорости

По результатам всего имитационного теста можно сделать вывод, что применение предлагаемого метода позволяет эффективно выполнять задачи локального планирования, такие как следование в выбранном направлении, изменение полосы движения и обхода препятствий. Кроме того, параметры регулировки весов, введенные в алгоритм работы контроллера, влияют на координацию и баланс между взаимно влияющими целями и также могут быть скорректированы в соответствии с реальной ситуацией для лучшей адаптации к динамической среде. Используя весовую функцию или детальный дизайн потенциального поля, можно провести оптимизацию в определенной степени. Например, в условиях низкой скорости на переполненных дорогах расстояние между автомобилями может быть рассчитано в соответствии с более сложной конструкцией формы ИПП, принимая во внимание ошибку системы обнаружения и отслеживания и т. д.

Заключение. Предложен метод локального ПМ, который объединяет процесс планирования и отслеживания и реализует функцию обхода препятствий, эффективно справляясь с динамической неопределенностью в городской среде. Идея ИПП используется для моделирования дорожной среды, которая может не только помочь процессу планирования в сочетании с командой уровня планирования поведения, но также и обеспечить планирование движения в реальном времени без команды поведения, что является более простым и производительным. Контроллер, разработанный на основе управления с прогнозируемой моделью, может своевременно и успешно реагировать на динамические изменения в городской среде. Применение динамической модели в качестве модели прогнозирования обеспечивает рациональность результатов планирования, а использование приращения управляющей величины в качестве величины оптимизации обеспечивает стабильность результатов планирования. Программное обеспечение CarSim учитывает реальные динамические характеристики автомобиля, используется для проверки моделирования. Выполненное в этом пакете моделирование подтверждает рациональность и результативность планирования.

Эта работа фокусируется на процессе ПМ для обхода препятствий автомобилем, а кинематическая модель используется для прогнозирования координат положения других динамических целей в будущем периоде времени в окружающей среде, что эффективно только для относительно несложных ситуаций. В сложных ситуациях, в силу законов физики, поведение автомобиля можно предсказать лишь за относительно короткий промежуток времени (1-2 с). Для того чтобы прогнозировать поведение транспортного средства за более длительный промежуток времени, нужно учитывать большее число

влияющих на процесс факторов, в том числе взаимодействие между движущимися объектами, правила дорожного движения, мультимодальные характеристики будущего поведения и др. [18]. Поэтому возникает необходимость в более эффективных методах прогнозирования траектории объектов, таких как другие транспортные средства, в окружающей среде, в соответствии с реальной сложной динамической обстановкой, с которой технология планирования неразрывно связана. Прогнозирование траектории других объектов также тесно связано с уровнем принятия решений и нуждается в более глубоком изучении.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] González D., Pérez J., Milanés V., Nashashibi F. A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 1135–1145. DOI: 10.1109/TITS.2015.2498841
- [2] Abbas M.A., Milman R., Eklund J.M. Obstacle Avoidance in Real Time With Nonlinear Model Predictive Control of Autonomous Vehicles. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2017, vol. 40, no. 1, pp. 12–22. DOI: 10.1109/CJECE.2016.2609803
- [3] Kitazawa S., Kaneko T. Control target algorithm for direction control of autonomous vehicles in consideration of mutual accordance in mixed traffic conditions. *Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Munich University of Applied Sciences, 13–16 September*. Munich, Germany, 2016, pp. 151–156.
- [4] Viana Í.B., Aouf N. Distributed Cooperative Path-Planning for Autonomous Vehicles Integrating Human Driver Trajectories. *2018 IEEE International Conference on Intelligent Systems (IS), 25–27 September, Funchal, Portugal*. 2018, pp. 655–661. DOI: 10.1109/IS.2018.8710544
- [5] Viana Í.B., Kanchwala H., Aouf N. Cooperative Trajectory Planning for Autonomous Driving Using Nonlinear Model Predictive Control. *2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 4–8 November, Graz, Austria*. 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCVE45908.2019.8965227
- [6] Guo H., Liu F., Yu R. Regional path moving horizon tracking controller design for autonomous ground vehicles. *Sci. China Inf. Sci.*, 2017, vol. 60, no. 013201. <https://doi.org/10.1007/s11432-016-0310-1>
- [7] Ji J., Khajepour A., Melek W.W., Huang Y. Path Planning and Tracking for Vehicle Collision Avoidance Based on Model Predictive Control With Multiconstraints. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, vol. 66, no. 2, pp. 952–964. DOI: 10.1109/TVT.2016.2555853
- [8] Noto N., Okuda H., Tazaki Y., Suzuki T. Steering assisting system for obstacle avoidance based on personalized potential field. *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Anchorage, AK, USA*. 2012, pp. 1702–1707. DOI: 10.1109/ITSC.2012.6338628
- [9] Kanchwala H., Bezerra Viana I., Aouf N. Cooperative path-planning and tracking controller evaluation using vehicle models of varying complexities. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020. DOI: 10.1177/0954406220945468

- [10] Rasekhipour Y., Khajepour A., Chen S., Litkouhi B. A Potential Field-Based Model Predictive Path-Planning Controller for Autonomous Road Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 1255–1267. DOI: 10.1109/TITS.2016.2604240
- [11] Chen H. Moving Horizon Path Planning for intelligent Vehicle Considering Dynamic Obstacle Avoidance. *China Journal Highway Transportation*, 2019, vol. 32, no. 1.
- [12] Dixit Sh., Fallah S., Montanaro U., Dianati M., Stevens A., McCullough F., Mouzakitis A. Trajectory planning and tracking for autonomous overtaking: State-of-the-art and future prospects. *Annual Reviews in Control*, 2018, vol. 45, pp. 76–86.
- [13] Dahmani H., Chadli M., Rabhi A., El Hajjaji A. Road curvature estimation for vehicle lane departure detection using a robust Takagi—Sugeno fuzzy observer. *Vehicle System Dynamics*, 2013, vol. 51, no. 5, pp. 581–599. DOI: 10.1080/00423114.2011.642806
- [14] Dixit S., Montanaro U., Dianati M., Oxtoby D. Trajectory Planning for Autonomous High-Speed Overtaking in Structured Environments Using Robust MPC. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol. 21, no. 6, pp. 2310–2323. DOI: 10.1109/TITS.2019.2916354
- [15] Bella F., Russo R. A Collision Warning System for rear-end collision: a driving simulator study. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 2011, vol. 20, pp. 676–686. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.075>
- [16] Rosolia U., De Bruyne S., Alleyne A.G. Autonomous Vehicle Control: A Nonconvex Approach for Obstacle Avoidance. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 469–484. DOI: 10.1109/TCST.2016.2569468
- [17] Guo H., Shen C., Zhang H., Chen H., Jia R. Simultaneous Trajectory Planning and Tracking Using an MPC Method for Cyber-Physical Systems: A Case Study of Obstacle Avoidance for an Intelligent Vehicle. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, vol. 14, no. 9, pp. 4273–4283. DOI: 10.1109/TII.2018.2815531
- [18] Mozaffari S., Al-Jarrah O.Y., Dianati M., Jennings P., Mouzakitis A. Deep Learning-Based Vehicle Behavior Prediction for Autonomous Driving Applications: A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020. DOI: 10.1109/TITS.2020.3012034

Статья поступила в редакцию 11.05.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Деменков Н.П., Цзоу Кай. Метод обхода препятствий беспилотным автомобилем в динамической среде на основе управления с прогнозируемой моделью. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 5.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-5-2082>

Деменков Николай Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: dnr@bmstu.ru

Цзоу Кай — аспирант кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: zoukaichn@gmail.com

A method for avoiding obstacles of a self-driving car in the dynamic environment based on model predictive control

© N.P. Demenkov, Zou Kai

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper discusses the problem of obstacle avoidance of a self-driving car in urban road conditions. The artificial potential field method is used to simulate traffic lanes and cars in a road environment. The characteristics of the urban environment, as well as the features and disadvantages of existing methods based on the structure of planning-tracking, are analyzed. A method of local path planning is developed, based on the idea of an artificial potential field and model predictive control in order to unify the process of path planning and tracking to effectively cope with the dynamic urban environment. The potential field functions are introduced into the path planning task as constraints. Based on model predictive control, a path planning controller is developed, combined with the physical constraints of the vehicle, to avoid obstacles and execute the expected commands from the top level as the target for the task. A joint simulation was performed using MATLAB and CarSim programs to test the feasibility of the proposed path planning method. The results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: obstacle avoidance, path planning, self-driving car, model predictive control, artificial potential field

REFERENCES

- [1] González D., Pérez J., Milanés V., Nashashibi F. A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 1135–1145. DOI: 10.1109/TITS.2015.2498841
- [2] Abbas M.A., Milman R., Eklund J.M. Obstacle Avoidance in Real Time With Nonlinear Model Predictive Control of Autonomous Vehicles. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2017, vol. 40, no. 1, pp. 12–22. DOI: 10.1109/CJECE.2016.2609803
- [3] Kitazawa S., Kaneko T. Control target algorithm for direction control of autonomous vehicles in consideration of mutual accordancy in mixed traffic conditions. *Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Munich University of Applied Sciences, 13–16 September*. Munich, Germany, 2016, pp. 151–156.
- [4] Viana Í.B., Aouf N. Distributed Cooperative Path-Planning for Autonomous Vehicles Integrating Human Driver Trajectories. 2018 *IEEE International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 25–27 September, Funchal, Portugal. 2018, pp. 655–661. DOI: 10.1109/IS.2018.8710544
- [5] Viana Í.B., Kanchwala H., Aouf N. Cooperative Trajectory Planning for Autonomous Driving Using Nonlinear Model Predictive Control. 2019 *IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, 4–8 November, Graz, Austria. 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCVE45908.2019.8965227
- [6] Guo H., Liu F., Yu R. Regional path moving horizon tracking controller design for autonomous ground vehicles. *Sci. China Inf. Sci.*, 2017, vol. 60, no. 013201. <https://doi.org/10.1007/s11432-016-0310-1>

- [7] Ji J., Khajepour A., Melek W.W., Huang Y. Path Planning and Tracking for Vehicle Collision Avoidance Based on Model Predictive Control With Multiconstraints. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, vol. 66, no. 2, pp. 952–964. DOI: 10.1109/TVT.2016.2555853
- [8] Noto N., Okuda H., Tazaki Y., Suzuki T. Steering assisting system for obstacle avoidance based on personalized potential field. *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Anchorage, AK, USA*. 2012, pp. 1702–1707. DOI: 10.1109/ITSC.2012.6338628
- [9] Kanchwala H., Bezerra Viana I., Aouf N. Cooperative path-planning and tracking controller evaluation using vehicle models of varying complexities. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020. DOI: 10.1177/0954406220945468
- [10] Rasekhipour Y., Khajepour A., Chen S., Litkouhi B. A Potential Field-Based Model Predictive Path-Planning Controller for Autonomous Road Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 1255–1267. DOI: 10.1109/TITS.2016.2604240
- [11] Chen H. Moving Horizon Path Planning for intelligent Vehicle Considering Dynamic Obstacle Avoidance. *China Journal Highway Transportation*, 2019, vol. 32, no. 1.
- [12] Dixit Sh., Fallah S., Montanaro U., Dianati M., Stevens A., Mccullough F., Mouzakitis A. Trajectory planning and tracking for autonomous overtaking: State-of-the-art and future prospects. *Annual Reviews in Control*, 2018, vol. 45, pp. 76–86.
- [13] Dahmani H., Chadli M., Rabhi A., El Hajjaji A. Road curvature estimation for vehicle lane departure detection using a robust Takagi—Sugeno fuzzy observer. *Vehicle System Dynamics*, 2013, vol. 51, no. 5, pp. 581–599. DOI: 10.1080/00423114.2011.642806
- [14] Dixit S., Montanaro U., Dianati M., Oxtoby D. Trajectory Planning for Autonomous High-Speed Overtaking in Structured Environments Using Robust MPC. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol. 21, no. 6, pp. 2310–2323. DOI: 10.1109/TITS.2019.2916354
- [15] Bella F., Russo R. A Collision Warning System for rear-end collision: a driving simulator study. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 2011, vol. 20, pp. 676–686. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.075>
- [16] Rosolia U., De Bruyne S., Alleyne A.G. Autonomous Vehicle Control: A Nonconvex Approach for Obstacle Avoidance. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 469–484. DOI: 10.1109/TCST.2016.2569468
- [17] Guo H., Shen C., Zhang H., Chen H., Jia R. Simultaneous Trajectory Planning and Tracking Using an MPC Method for Cyber-Physical Systems: A Case Study of Obstacle Avoidance for an Intelligent Vehicle. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, vol. 14, no. 9, pp. 4273–4283. DOI: 10.1109/TII.2018.2815531
- [18] Mozaffari S., Al-Jarrah O.Y., Dianati M., Jennings P., Mouzakitis A. Deep Learning-Based Vehicle Behavior Prediction for Autonomous Driving Applications: A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020. DOI: 10.1109/TITS.2020.3012034

Demenkov N.P., Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: dnp@bmstu.ru

Zou Kai is a post-graduate student of the Department of Automatic Control Systems at Bauman Moscow State Technical University. e-mail: zoukaichn@gmail.com