

ĐIỀU KHIỂN HƯỚNG CHUYỂN ĐỘNG CHO XE TỰ LÁI ĐỂ TRÁNH VA CHẠM

MOVING DIRECTION CONTROL FOR AUTONOMOUS VEHICLES TO AVOID COLLISIONS

Luu Đức Lịch^{1*}, Huỳnh Vinh Quang¹, Nguyễn Đắc Thành¹, Phạm Quốc Thái¹, Phạm Hữu Truyền²

¹Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

²Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh, Nghệ An, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: ldlich@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 28/10/2023; Sửa bài / Revised: 16/11/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 06/12/2023)

Tóm tắt - Việc điều khiển phương tiện tự lái đang là chủ đề được rất nhiều người quan tâm hiện nay bởi những ưu điểm như tăng độ an toàn, rút ngắn thời gian di chuyển, giảm chi phí đi lại, giảm ùn tắc giao thông. Khi di chuyển trên những con đường, các phương tiện tự lái có thể phát hiện được các chướng ngại vật cố định trên cùng làn đường. Bài báo này đề xuất một giải pháp thiết lập quỹ đạo chuyển động mong muốn được sử dụng để tính toán đường đi sao cho xe tự lái có thể vượt qua các chướng ngại vật cố định trên cùng làn đường di chuyển. Hàm quỹ đạo mong muốn, dựa trên thông tin từ các cảm biến về khoảng cách đến các phương tiện phía trước, tính toán thời điểm để vượt qua chướng ngại vật. Kịch bản quỹ đạo mong muốn được đề xuất thường xuyên gặp trong thực tế khi xe di chuyển, trong đó các chướng ngại vật cố định là xe phía trước đang dừng lại. Kết quả đã chứng minh tính hiệu quả của giải pháp thiết lập quỹ đạo đề xuất.

Từ khóa - Điều khiển phương tiện tự lái; lập quỹ đạo mong muốn; quỹ đạo chuyển động; tránh chướng ngại vật; động lực học ô tô.

1. Đặt vấn đề

Theo nghiên cứu của nhóm tác giả [1] đã đưa ra mục tiêu chính trong lĩnh vực xe tự hành có các hướng liên quan đến việc giảm mức tiêu thụ nhiên liệu, giảm thiểu khoảng cách giữa các phương tiện, giảm thời gian di chuyển và quan trọng nhất là cải thiện sự an toàn và thoải mái của mọi người. Để đạt được mục tiêu này, các phương tiện tự động phải thực hiện ba bước chính [2]: i) quan sát môi trường (cảm biến), tức là phát hiện cả chướng ngại vật trên đường và các phương tiện khác bằng cảm biến có sẵn; ii) để lập lịch trình chuyển động tiếp theo (quỹ đạo mong muốn), tức là ra quyết định hành động trong tương lai của ô tô bắt đầu từ các phép đo từ các cảm biến và iii) để thực hiện những gì hệ thống đã lên kế hoạch di chuyển, tức là xe sẽ duy trì đi theo quỹ đạo mong muốn đã vạch ra.

Trong những năm gần đây, chủ đề này nhận được nhiều sự quan tâm, cụ thể: nhiều công ty hoạt động trong lĩnh vực ô tô đang phát triển các hệ thống điều khiển cho phép phương tiện tự động hóa ở các cấp độ khác nhau. Một mô hình mô tả động lực học của xe đã được trình bày [3]. Các tác giả [4], nghiên cứu tập trung theo dõi quỹ đạo và vận tốc, trong khi kết hợp các phương pháp điều khiển ngang theo chiều dọc đã được đề cập trong [5]. Các nghiên cứu giữ làn đường được tìm thấy trong [6], tránh

Abstract - Controlling autonomous vehicles is a topic that attracts many people today due to their inherent advantages including increased safety, shortened travel times, thus reducing travel costs, and traffic congestion. When traveling on roads, autonomous vehicles can detect fixed obstacles in the same lane. This paper proposes a solution to establish the desired motion trajectory used to calculate the path so that autonomous vehicles can overcome fixed obstacles in the same travel lane. Based on information from sensors about the distance to the vehicles ahead, the desired trajectory function calculates the moment to overcome obstacles. The proposed desired trajectory scenario is frequently encountered in practice when the vehicle is moving, where the fixed obstacles are the stopped vehicle in front. The results demonstrated the effectiveness of the proposed trajectory-setting solution.

Key words - Controlling autonomous vehicles; trajectory planner; path planning; obstacle avoidance; vehicle dynamics control.

va chạm [7], lập kế hoạch và theo dõi quỹ đạo [8] - [9], kiểm soát hành trình [10], phân đội phương tiện và phân nhóm phương tiện [11].

Hiện tại đã có một số giải pháp tránh va chạm trong các ứng dụng điều khiển phương tiện cho xe tự lái, giải quyết các thách thức như: nhận biết chướng ngại vật tĩnh hoặc chuyển động [12], [13], phát hiện người đi bộ [14], chuyển làn [15] ghép làn [16], [17], hoặc quy hoạch đường đi [18].

Trong bài báo này, một chiến lược tránh chướng ngại vật tĩnh trên đường thực tế được đề xuất. Giải pháp gồm có hai phần: i) đề xuất một giải pháp mới cho việc thiết lập quỹ đạo tham chiếu, để xe quyết định hướng chuyển động trong tương lai gần, giải pháp đề xuất sử dụng cảm biến đo khoảng cách đến chướng ngại vật, đồng thời hệ thống tính toán thời điểm xe mục tiêu phải chuyển làn. Hơn nữa, những khoảng cách này được sử dụng để tính toán quỹ đạo mong muốn cho xe. ii) bộ điều khiển bên được thiết kế để điều khiển quỹ đạo mong muốn. Bộ điều khiển được phát triển bằng cách sử dụng mô hình tuyến tính động lực học ngang của phương tiện. Hiệu quả của phương pháp đề xuất được mô phỏng cho một xe tự lái khi đang di chuyển gặp một chiếc xe đang dừng ở phía trước, xe tự lái dựa vào khoảng cách với xe phía trước thực hiện chuyển làn và nhập làn để tránh xe phía trước. Kết quả mô phỏng cho

¹ The University of Danang - University of Science and Technology, Danang, Vietnam (Luu Duc Lich, Huynh Vinh Quang, Nguyen Dac Thanh, Pham Quoc Thai)

² Vinh University of Technology and Education, Nghean, Vietnam (Pham Huu Truyen)

thấy, xe tự lái đã bám sát quỹ đạo và tránh va chạm với chướng ngại vật cố định trên đường.

2. Xây dựng mô hình động lực học ngang cho xe tự lái

2.1. Mô hình phi tuyến động lực học ngang của ô tô

Hình 1 thể hiện mô hình động lực học chuyển động của xe con với hai cầu, tương ứng các lực chính tác dụng lên xe. Xét hệ trục tọa độ oxy lần lượt là các phương dọc và phương ngang theo khung xe, hệ trục tọa độ OXY là các phương dọc và phương ngang trong hệ quy chiếu tuyệt đối, ψ là góc quay của thân xe trong hệ quy chiếu OXY. Sử dụng nguyên lý D'Alambert thu được các phương trình vi phân chuyển động của ô tô trong Hình 1 được xác định như sau:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m.\dot{y}\dot{\psi} + F_{x_1} + F_{x_2} + F_{x_3} + F_{x_4} - F_r \\ m\ddot{y} = -m.\dot{x}\dot{\psi} + F_{y_1} + F_{y_2} + F_{y_3} + F_{y_4} \\ I\ddot{\psi} = a.(F_{y_1} + F_{y_2}) - b.(F_{y_3} + F_{y_4}) + c.(-F_{x_1} + F_{x_2} + F_{x_3} - F_{x_4}) \\ \dot{X} = \dot{x}.\cos\psi - \dot{y}.\sin\psi \\ \dot{Y} = \dot{x}.\sin\psi + \dot{y}.\cos\psi \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó, m và I lần lượt là khối lượng xe và mô men quán tính, a và b lần lượt là khoảng cách của trọng tâm xe đến cầu trước và cầu sau, $2c$ là chiều rộng cơ sở, F_{x1} , F_{x2} , F_{x3} , F_{x4} và F_{y1} , F_{y2} , F_{y3} , F_{y4} lần lượt là các lực tác dụng lên các bánh xe theo hướng x và y .

Các lực tác dụng lên lớp có thể thu được bằng cách sử dụng Mô hình lớp Pacejka phi tuyến [3], [4], mô hình của lớp được đề xuất cũng bao gồm ảnh hưởng của các lực tác dụng lên lớp trước và lớp sau được mô tả như sau:

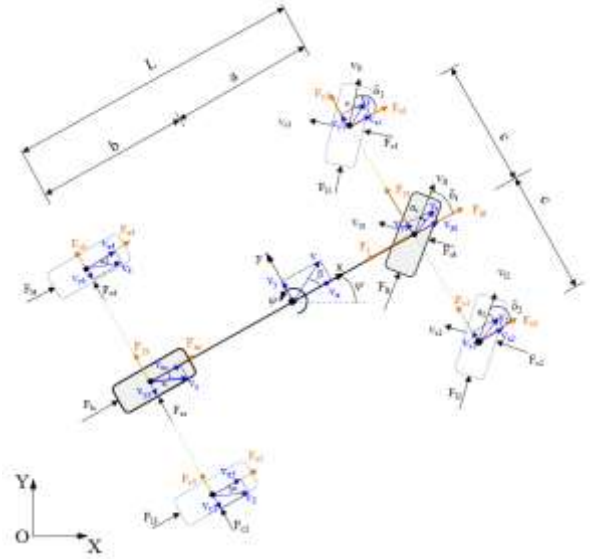
$$\begin{cases} F_{x_{1,2,3,4}} = f_x(\alpha_{1,2,3,4}, Z_{1,2,3,4}, k_{1,2,3,4}) \\ F_{y_{1,2,3,4}} = f_y(\alpha_{1,2,3,4}, Z_{1,2,3,4}, k_{1,2,3,4}) \end{cases} \quad (2)$$

Độ trượt của lớp khi có lực kéo (k_k) và lực phanh (k_p) được miêu tả như sau:

$$k_k = -\frac{\dot{x} - R_w.\omega_w}{R_w.\omega_w}; \quad k_p = -\frac{\dot{x} - R_w.\omega_w}{\dot{x}} \quad (3)$$

Mô hình một vết là mô hình được sử dụng nhiều nhất để mô tả động lực học ngang của xe, không mất tính tổng quát, sử dụng mô hình này cần thiết cho việc nghiên cứu điều khiển động lực học ngang của ô tô. Giả sử ô tô đối xứng qua mặt phẳng dọc, tức là bên trái và bên phải giống hệt nhau. Bằng cách gộp bánh xe bên phải và bên trái cho mỗi trục. Các lực ngang và lực dọc tác dụng lên lớp xe được biểu diễn trong Hình 1.

$$\begin{cases} F_{x_r} = F_{x_1} + F_{x_2}; & F_{x_s} = F_{x_3} + F_{x_4} \\ F_{y_r} = F_{y_1} + F_{y_2}; & F_{y_s} = F_{y_3} + F_{y_4} \end{cases} \quad (4)$$



Hình 1. Mô hình chuyển động của ô tô con trong mặt phẳng ngang

Sử dụng các phương trình (1)–(4), mô hình phi tuyến của động lực học một vết như sau:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m.\dot{y}\dot{\psi} + F_{x_r} + F_{x_s} - F_r \\ m\ddot{y} = -m.\dot{x}\dot{\psi} + F_{y_r} + F_{y_s} \\ I\ddot{\psi} = a.F_{y_r} - b.F_{y_s} \\ \dot{X} = \dot{x}.\cos\psi - \dot{y}.\sin\psi \\ \dot{Y} = \dot{x}.\sin\psi + \dot{y}.\cos\psi \end{cases} \quad (5)$$

2.2. Mô hình tuyến tính động lực học ngang của ô tô

Để có được một mô hình một vết tuyến tính trong mặt ngang, các giả định đã được xem xét như sau [3]:

- Góc lái của lớp sau δ_s bằng 0, xe được điều khiển bởi sự thay đổi của góc lái phía trước δ_r .
- Góc lái của lớp trước δ_r , có giá trị nhỏ $|\delta_r| \leq 0.1745$ (rad).
- Xe đang chuyển động với vận tốc dọc không đổi.
- Vận tốc dọc cao hơn nhiều so với vận tốc ngang.

Góc của lớp của cầu trước, cầu sau lần lượt được ký hiệu là β_r và β_s và được mô tả bởi [3]:

$$\begin{cases} \beta_r = \frac{v_{y_r}}{v_x} = \frac{v_y + a.\dot{\psi}}{v_x} \\ \beta_s = \frac{v_{y_s}}{v_x} = \frac{v_y - b.\dot{\psi}}{v_x} \end{cases} \quad (6)$$

Lực ngang của lớp được tính gần đúng như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2.C_{ar} + 2.C_{as}}{m.v_x} & 0 & 0 & -v_x - \frac{2.a.C_{ar} - 2.b.C_{as}}{m.v_x} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{2.a.C_{ar} - 2.b.C_{as}}{I_z.v_x} & 0 & -\frac{2.a^2.C_{ar} + 2.b^2.C_{as}}{I_z.v_x} & 0 \\ 1 & v_x & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \psi \\ \ddot{\psi} \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2.C_{ar}}{m} \\ 0 \\ \frac{2.a.C_{ar}}{I_z} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad \text{và} \quad \begin{bmatrix} \dot{y} \\ Y \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{v_x} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \psi \\ \ddot{\psi} \\ Y \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{cases} F_{y_1} = 2.C_{at}(\delta_t - \beta_t) = 2.C_{at} \cdot \left(\delta_t - \frac{v_y + a_t \dot{y}}{v_x} \right) \\ F_{y_s} = 2.C_{as}(\delta_s - \beta_s) = 2.C_{as} \cdot \left(-\frac{v_y - b_s \dot{y}}{v_x} \right) \end{cases} \quad (8)$$

Để đơn giản hóa mô hình và mô hình phi tuyến được xác định bởi (5), mô hình một vết tuyến tính có thể được biểu diễn dưới dạng không gian trạng thái (7) như [3].

3. Thiết lập quỹ đạo mong muốn

3.1. Quỹ đạo mong muốn

Trong phần này, thiết lập quỹ đạo chuyển động mong muốn có nhiệm vụ tạo ra một đường đi không có chướng ngại vật để ô tô duy trì ở giữa làn đường hoặc dẫn ô tô từ vị trí của nó đến vị trí mục tiêu

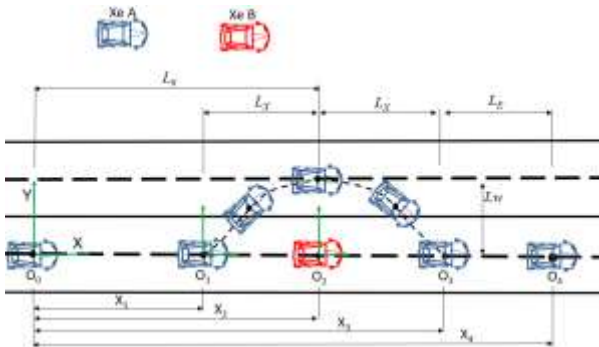
Việc thiết lập quỹ đạo tham chiếu trước khi chuyển làn là điều rất cần thiết và quan trọng. Chất lượng của quỹ đạo tham chiếu có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất của việc chuyển làn đường tự động vì vậy cần chọn hàm quỹ đạo phù hợp. Lập quỹ đạo chuyển làn và nhập làn sử dụng đa thức bậc 3 để tính toán quỹ đạo của xe. Hệ phương trình mô tả quỹ đạo chuyển động mong muốn ô tô di chuyển từ vị trí O_0 đến O_4 được minh họa như trong Hình 2:

$$\begin{cases} Y_{01} = 0 & X \in [0, X_1) \\ Y_{12}(X) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 & X \in [X_1, X_2] \\ Y_{23}(X) = a_4 + a_5X + a_6X^2 + a_7X^3 & X \in (X_2, X_3] \\ Y_{34} = 0 & X \in (X_3, X_4] \end{cases} \quad (9)$$

Để xác định các hệ số của đa thức, dựa vào quãng đường vận tốc theo phương ngang OY tại các vị trí (1), (2), (3):

$$\begin{cases} Y_{12}(X_1) = 0, & X = X_1 \\ \dot{Y}_{12}(X_1) = 0, & X = X_1 \\ Y_{12}(X_2) = L_w, & X = X_2 \\ \dot{Y}_{12}(X_2) = 0, & X = X_2 \\ Y_{23}(X_2) = L_w, & X = X_2 \\ \dot{Y}_{23}(X_2) = 0, & X = X_2 \\ Y_{23}(X_3) = 0, & X = X_3 \\ \dot{Y}_{23}(X_3) = 0, & X = X_3 \end{cases} \quad (10)$$

Các điều kiện (10) biểu thị các giá trị về vị trí, vận tốc theo phương ngang của xe ở các vị trí bắt đầu và kết thúc quá trình chuyển, ghép làn. Áp dụng các điều kiện này, nghiệm giải tích của hệ phương trình (10) được xác định:



Hình 2. Quỹ đạo mong muốn

$$\begin{cases} a_0 = 0; & a_1 = 0; & a_2 = \frac{3L_w}{L_x^2}; & a_3 = -\frac{2L_w}{L_x^3} \\ a_4 = 0; & a_5 = 0; & a_6 = \frac{3L_w}{L_x^2}; & a_7 = -\frac{2L_w}{L_x^3} \end{cases} \quad (11)$$

Quỹ đạo mong muốn duy trì giữ làn đường khi ô tô di chuyển từ vị trí (0) đến vị trí (4) bao gồm trạng thái chuyển động thẳng, chuyển làn và ghép làn để tránh xe phía trước được giả định như Hình 2 được miêu tả như sau:

$$Y^{ref} = \begin{cases} Y_{01} = 0 & X \in [0, X_1) \\ Y_{12}(X) = \frac{3L_w}{L_x^2}(X - X_1)^2 - \frac{2L_w}{L_x^3}(X - X_1)^3 & X \in [X_1, X_2] \\ Y_{23}(X) = \frac{3L_w}{L_x^2}(X_3 - X)^2 - \frac{2L_w}{L_x^3}(X_3 - X)^3 & X \in (X_2, X_3] \\ Y_{34} = 0 & X \in (X_3, X_4] \end{cases} \quad (12)$$

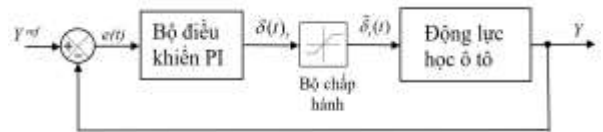
Biểu diễn theo thời gian di chuyển như sau:

$$Y^{ref} = \begin{cases} Y_{01} = 0 \\ Y_{12}(t) = \frac{3L_w}{t_{sc}^2}(t - t_1)^2 - \frac{2L_w}{t_{sc}^3}(t - t_1)^3 \\ Y_{23}(t) = \frac{3L_w}{t_{sc}^2}(t_3 - t)^2 - \frac{2L_w}{t_{sc}^3}(t_3 - t)^3 \\ Y_{34} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Trong đó, $t_1 = \frac{X_1}{V_H}$, $t_{sc} = \frac{L_x}{V_H}$, $t_3 = \frac{X_3}{V_H}$ lần lượt là thời gian cần thiết để xe bắt đầu chuyển làn, hoàn tất chuyển làn hoặc ghép làn.

3.2. Thiết kế bộ điều khiển

Trong bài báo này, tác giả thiết kế bộ điều khiển PI cho hệ thống. Mục đích điều khiển góc đánh lái bám theo quỹ đạo mong muốn Y^{ref} được tính toán trước để ô tô giữ được quỹ đạo chuyển động. Sơ đồ khối bộ điều khiển PI của hệ thống với bộ phận chấp hành bị giới hạn thể hiện trên Hình 3 gồm 3 khối chính là bộ điều khiển PI, bộ chấp hành và đối tượng điều khiển là mô hình động lực học theo phương ngang của ô tô. Trong đó, đại lượng đầu ra quan tâm của hệ thống là quỹ đạo chuyển động của ô tô $Y(t)$, Y^{ref} là quỹ đạo mong muốn của ô tô.



Hình 3. Sơ đồ khối của hệ thống sử dụng bộ điều khiển PI

Độ sai lệch giữa quỹ đạo chuyển động và quỹ đạo đầu vào mong muốn được miêu tả như sau:

$$e(t) = Y^{ref} - Y \quad (14)$$

Góc đánh lái được giới hạn bởi bộ phận chấp hành hệ thống lái:

$$\tilde{\delta}_i(t) = \text{sat}(\delta_i(t)) \begin{cases} \delta(t), & \text{khí } |\delta_i| \leq 0,1745 \\ 0,1745 & \text{khí } \delta_i > 0,1745 \\ -0,1745 & \text{khí } \delta_i < -0,1745 \end{cases} \quad (15)$$

Thuật toán bộ điều khiển PI được viết như sau [6]:

$$u(t) = K_r \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (16)$$

Các tham số của bộ điều khiển PI được xác định theo phương pháp của Ziegler-Nichols [19]: $K_r=0,2$; $T_i=2000$.

4. Kết quả mô phỏng

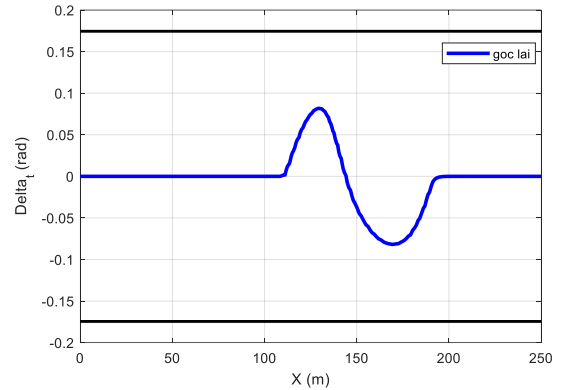
Một kịch bản mô phỏng được miêu tả như sau: một phương tiện tự lái đang di chuyển với vận tốc không đổi trên đường có hai làn đường cùng chiều. Tại một thời điểm nào đó, xe tự lái phát hiện một chướng ngại vật cố định (xe phía trước dừng lại) cần phải vượt qua và tránh bằng cách sử dụng công cụ thiết lập quỹ đạo chuyển động Y^{ref} được đề xuất như công thức (12). Kịch bản giả định rằng xe đang chuyển động với vận tốc không đổi, $V_x = 40 \text{ km/h}$, sau khi vượt xe trước, xe điều khiển sẽ trở lại làn đường ban đầu. Thiết lập quỹ đạo tạo ra một đường đi để xe tự lái bắt đầu chuyển làn khi đến gần chướng ngại vật với chiều rộng làn đường $L_w=3,5m$, khoảng cách bắt đầu thực hiện chuyển làn tránh xe phía trước $L_x=40m$, và các đường $Y = 0m$ và $Y = 3,5m$ trong Hình 6 thể hiện phần giữa của làn đường, khoảng cách ban đầu $L_0=150m$. Các tham số của mô hình được hiển thị trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số hệ thống [5]

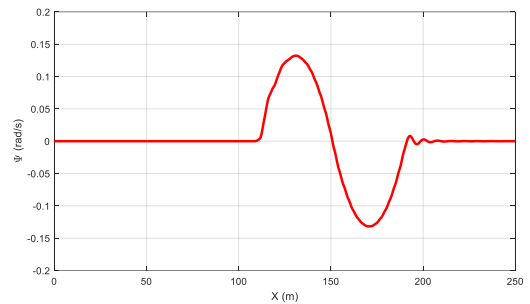
STT	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
1	m	kg	1094
2	C_t	N / rad	63291
3	C_s	N / rad	50041
4	a	m	1.108
4	b	m	1.392
6	I	$kg.m^2$	1608
7	$\delta_t^{min}, \delta_t^{max}$	rad	-0,1745; 0,1745
8	V_x	km / h	40

Cấu trúc điều khiển của động lực học ngang được biểu diễn trong Hình 4, trong đó đầu ra của hệ thống là vị trí của ô tô theo phương ngang. Tín hiệu điều khiển là góc đánh lái của lớp trước. Các kết quả về điều khiển ngang của xe được minh họa trong Hình 5, Hình 6 và Hình 7 tương ứng góc đánh lái, góc quay thân xe và quỹ đạo chuyển động.

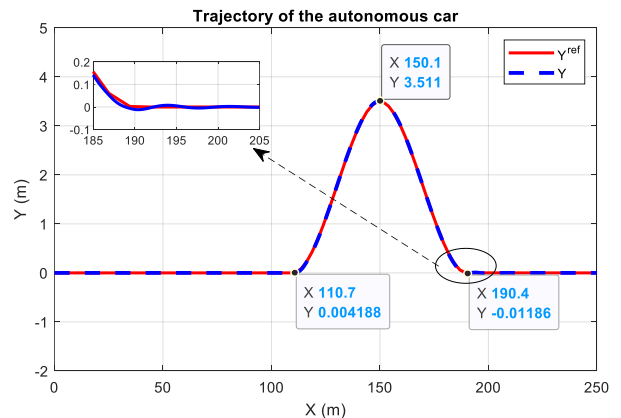
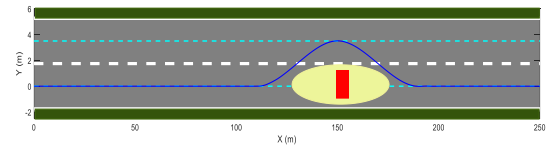
xảy ra va chạm giữa chúng. Kết quả cho thấy, bộ điều khiển thiết kế với mô hình tuyến tính phản ứng tốt. Vị trí bên tuân theo quỹ đạo mong muốn và góc đánh lái bánh trước thỏa mãn các điều kiện ràng buộc.



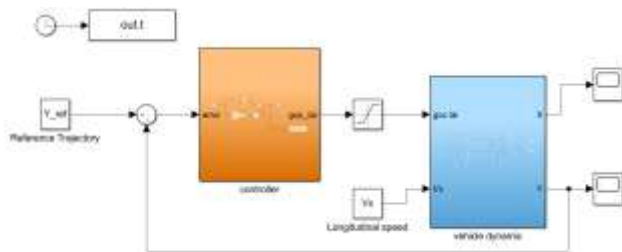
Hình 5. Góc đánh lái của ô tô



Hình 6. Góc quay của thân xe



Hình 7. Quỹ đạo chuyển động so với quỹ đạo mong muốn của ô tô



Hình 4. Sơ đồ Simulink mô phỏng động lực học hệ thống

Hàm toán học (12) thành công trong việc tạo ra một đường đi không có chướng ngại vật và bộ điều khiển bên của xe điều khiển xe bám đi theo tham chiếu quỹ đạo, trong đó Hình 7 có thể quan sát thấy xe đi sau bám sát theo quỹ đạo một cách an toàn, tránh va chạm với xe phía trước. Có thể nhận thấy rằng xe điều khiển có khả năng chuyển làn và nhập làn để vượt qua phương tiện khác. Ngoài ra, có thể quan sát thấy khi xe điều khiển trở lại làn đường đầu tiên, khoảng cách xấp xỉ 40m; điều này có nghĩa là không thể

5. Kết luận

Bài báo phân tích động lực học theo phương ngang của ô tô. Đóng góp của nghiên cứu này bao gồm xây dựng quỹ đạo mong muốn bằng hàm toán học bậc 3 và phát triển thuật toán điều khiển PI dựa trên mô hình tuyến tính của động lực học ngang của xe. Mục đích giải pháp đề xuất này đã được mô phỏng trong tình huống xe tự lái phải vượt qua

chướng ngại vật cố định trên cùng làn đường. Thuật toán điều khiển đã thành công trong việc điều khiển quỹ đạo chuyển động của xe bám theo quỹ đạo tham chiếu được thiết lập trước đó, cùng với giới hạn của bộ phận chấp hành hệ thống lái được thỏa mãn. Từ kết quả mô phỏng trong Matlab/Simulink, có thể thấy rằng hiệu suất tốt, hàm quỹ đạo tham chiếu đã tạo thành công quỹ đạo không va chạm khi có chướng ngại vật tĩnh ở phía trước. Công việc trong tương lai sẽ tập trung vào việc thiết lập quỹ đạo tham chiếu thích hợp cho xe tự lái vượt qua xe phía trước đang đi chuyên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C. Badue *et al.*, “Self-driving cars: A survey”, *Expert Systems with Applications*, vol. 165, pp. 113816, 2021.
- [2] B. Paden, M. Cap, S. Z. Yong, D. S. Yershov, and E. Frazzoli, “A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles”, *IEEE Transactions on intelligent vehicles*, vol. 1, no. 1, pp. 33-55, 2016.
- [3] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*. New York, USA: Springer, 2011.
- [4] Jiang, J. and Astolfi, A., 2018. “Lateral control of an autonomous vehicle”. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 3, no. 2, pp.228-237.
- [5] F. Lin, Y. Zhang, Y. Zhao, G. Yin, H. Zhang, and K. Wang, “Trajectory tracking of autonomous vehicle with the fusion of DYC and longitudinal-lateral control”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 32, no. 16, pp.1-16, 2019.
- [6] D. L. Luu, C. Lupu, H. Alshareefi, and L. Ismail, “Real-Time Longitudinal Control for Autonomous Mobile Robot Platform Using Multiple Infrared Sensors”, *In 2021 25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Romania, 2021, pp. 6-11.
- [7] K. Lee and D. Kum, “Collision avoidance/mitigation system: Motion planning of autonomous vehicle via predictive occupancy map”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 52 846–52 857, 2019.
- [8] F. Lin, Y. Zhang, Y. Zhao, G. Yin, H. Zhang, and K. Wang, “Trajectory tracking of autonomous vehicle with the fusion of DYC and longitudinal-lateral control”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 32, no. 1, 2019.
- [9] S. Li, Z. Li, Z. Yu, B. Zhang, and N. Zhang, “Dynamic trajectory planning and tracking for autonomous vehicle with obstacle avoidance based on model predictive control”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 132 074–132 086, 2019.
- [10] P. Ioannou and C. Chien, “Autonomous intelligent cruise control”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 42, no. 4, pp. 657–672, 1993.
- [11] Q. Wang and B. Ayalew, “A probabilistic framework for tracking the formation and evolution of multi-vehicle groups in public traffic in the presence of observation uncertainties”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 560–571, 2018.
- [12] O. Pauca, A. Maxim, and C.F. Caruntu, “Cooperative platoons merging for obstacle avoidance on highways”, *In 2021 25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Romania, 2021, pp. 25-30.
- [13] K. Akka, and F. Khaber, “Optimal fuzzy tracking control with obstacles avoidance for a mobile robot based on Takagi-Sugeno fuzzy model”, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 41, no. 10, pp. 2772-2781, 2019.
- [14] Y. Ali, Sharma, A. Haque, and M. Saifuzzaman, “The impact of the connected environment on driving behavior and safety: A driving simulator study”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 144, pp. 105643, 2020.
- [15] L. Gao, D. Chu, Y. Cao, L. Lu, and C. Wu, “Multi-lane convoy control for autonomous vehicles based on distributed graph and potential field”, *In IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, Auckland, New Zealand, 2019, pp. 2463–2469.
- [16] M. Atagozиеv, G. Schmidt, and W. Schmidt, “Lane change scheduling for connected and autonomous vehicles”, *Transportation research part C: emerging technologies*, vol. 147, pp. 103985, 2023.
- [17] M. Goli and A. Eskandarian, “MPC-based lateral controller with lookahead design for autonomous multi-vehicle merging into platoon”, *in American Control Conference*, 2019, pp. 5284–5291.
- [18] Z. Huang, D. Chu, C. Wu, and Y. He, “Path planning and cooperative control for automated vehicle platoon using hybrid automata”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 959–974, 2019.
- [19] N. D. Phuoc, *Linear control theory*, Science and Technology Publisher, 2007.
- [20] R. Isermann, *Automotive control: modeling and control of vehicles*, Berlin/Heidelberg, Springer, 2022.