

Bộ điều khiển bên của xe tự hành dựa trên bộ điều khiển trượt kết hợp với luật tiệm cận tiếp cận theo cấp số nhân

Nguyễn Văn Trung, Trần Ngọc Châu, Nguyễn Như Toàn, Lê Đức Thịnh,
Nguyễn Danh Huy, Nguyễn Tùng Lâm, Hoàng Đức Chính*

Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội.

*Email: chinh.hoangduc@hust.edu.vn

Nhận bài: 30/8/2022; Hoàn thiện: 10/11/2022; Chấp nhận đăng: 28/11/2022; Xuất bản: 23/12/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2022.65-72>

TÓM TẮT

Bài báo này sẽ trình bày về điều khiển bên cho ô tô tự hành bằng cách sử dụng bộ điều khiển trượt dựa trên luật tiệm cận để đảm bảo tín hiệu điều khiển không bị dao động như bộ điều khiển trượt truyền thống. Theo phương pháp giảm bậc mô hình, ô tô sẽ được chia thành động lực học chậm và động lực học nhanh và được điều khiển riêng biệt bởi kỹ thuật điều khiển trên. Sự ổn định của hệ thống sẽ được chứng minh bằng cách định nghĩa hàm Lyapunov và dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov. Hiệu quả của bộ điều khiển mới là tốt hơn bộ điều khiển cũ khi tín hiệu góc lái không bị thay đổi quá nhiều, đảm bảo cơ cấu chấp hành của xe sẽ đáp ứng được và giúp xe bám quỹ đạo mong muốn trong thực tế. Kết quả mô phỏng của tín hiệu góc lái, độ bám quỹ đạo và góc xoay thân xe của hai bộ điều khiển sẽ được minh họa và so sánh bằng phần mềm Matlab/Simulink.

Từ khóa: Điều khiển bên của xe; Xe tự hành; Bộ điều khiển trượt; Luật tiệm cận; Ổn định Lyapunov; Tự động chuyển làn, động lực học bên.

1. MỞ ĐẦU

Hiện nay, xe tự hành là lĩnh vực đã và đang được nghiên cứu phát triển rất nhiều [1], nó có nhiều ưu điểm như giảm thiểu tai nạn giao thông, giảm thiểu tiêu thụ nhiên liệu hóa thạch, giảm ô nhiễm môi trường. Tuy nhiên, để được đưa vào sử dụng thì xe tự hành cũng phải đáp ứng rất nhiều yêu cầu, trong đó, quan trọng nhất là đảm bảo an toàn cho hành khách. Một trong những nhiệm vụ đặt ra là xe cần bám quỹ đạo mong muốn để có thể vượt hoặc tránh chướng ngại vật trên đường đi bằng cách điều chỉnh động lực học dọc và động lực học bên của xe. Động lực học dọc được xem xét khi xe khởi động, tăng tốc hoặc phanh, trong khi đó, động lực học bên được quan tâm khi xe chuyển làn hay di chuyển trên đoạn đường cong [2, 3]. Bài báo này sẽ trình bày về một kỹ thuật mới để điều khiển động lực học bên cho xe khi chuyển làn.

Điều khiển bên cho xe tự hành là lĩnh vực phức tạp và đã có nhiều nghiên cứu về vấn đề này như: Điều khiển PID [4], LQR [5], Backstepping [6], Fuzzy Logic [7], điều khiển trượt [8], điều khiển trượt kết hợp với Backstepping [9]. Với bộ điều khiển trượt truyền thống khi mô phỏng thì quỹ đạo chuyển động và góc xoay thân xe đã bám so với giá trị mong muốn với sai lệch nhỏ. Tuy nhiên, tín hiệu điều khiển, chính là góc lái lại dao động quá nhiều, điều này dẫn đến việc bộ điều khiển này chưa thể sử dụng trong thực tế vì các cơ cấu chấp hành của xe là không thể đáp ứng được việc thay đổi góc lái quá nhanh như vậy. Với bộ điều khiển trượt dựa trên luật tiệm cận, bằng cách thay đổi cách chọn mặt trượt, tín hiệu góc lái sẽ thay đổi chậm để đáp ứng được trong thực tế và qua đó việc bám quỹ đạo cũng như bám góc xoay thân xe có sai lệch so với giá trị đặt là nhỏ hơn bộ điều khiển thông thường [10].

Nhìn chung, một xe tự hành có thể được mô phỏng bằng mô hình xe 3 bậc tự do, tuy nhiên, khi nghiên cứu về điều khiển bên cho xe, ta giả thiết vận tốc trục dọc của xe là hằng số và bỏ qua động lực học dọc của xe nên mô hình giảm xuống 2 bậc tự do là vị trí bên và góc xoay thân xe. Hệ trở thành hệ SIMO với đầu vào là tín hiệu góc lái, 2 đầu ra là 2 bậc tự do của xe. Đã có các nghiên cứu về điều khiển hệ SIMO như là: bộ điều khiển PID-Fuzzy [11], bộ điều khiển phân

cấp [12], Energy-Based Controllers [13]. Bài báo này sẽ áp dụng phương pháp giảm bậc mô hình, coi vị trí bên của xe là động lực học chậm, góc xoay thân xe là động lực học nhanh và sẽ tạo tín hiệu điều khiển ảo để điều khiển hệ động lực học chậm, tín hiệu điều khiển thực sẽ dựa theo tín hiệu ảo này để điều khiển hệ nhanh. So sánh kết quả mô phỏng của hai bộ điều khiển sẽ cho thấy hiệu quả của kỹ thuật điều khiển mới là tốt hơn và có thể ứng dụng được trong thực tế. Một số đóng góp chính của bài báo này có thể kể đến như sau:

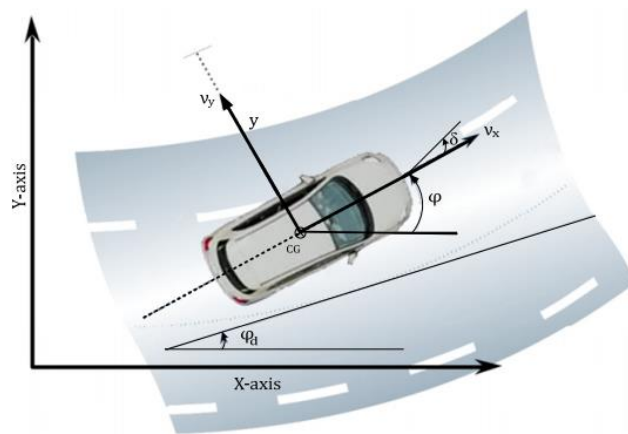
- Bộ điều khiển được đề xuất cho kết quả bám các giá trị đặt với sai số nhỏ hơn bộ điều khiển trượt thông thường.
- Cung cấp một cấu trúc điều khiển mới cho hệ SIMO, giúp đơn giản hóa bộ điều khiển cho đối tượng này.

Cấu trúc của bài báo gồm 4 phần: Phần 1 là phần mở đầu. Phần 2 là mô hình xe tự hành và thiết kế bộ điều khiển trượt. Phần 3 là kết quả mô phỏng trên Matlab/Simulink của hai bộ điều khiển. Cuối cùng là phần 4, kết luận của bài báo.

2. MÔ HÌNH XE TỰ HÀNH VÀ THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

2.1. Mô hình động lực học bên của xe

Khi xe di chuyển ở tốc độ cao, giả thiết vector vận tốc ở mỗi bánh xe trùng với hướng của bánh xe không còn chính xác, vì vậy, thay vì sử dụng mô hình động học bên, ta sử dụng mô hình động lực học cho chuyển động ngang của xe. Mô hình xe hai bậc tự do được sử dụng, trong đó, hai bậc tự do được biểu thị bằng vị trí bên của xe y và góc xoay thân xe φ . Vị trí bên của xe được đo dọc theo trục bên của xe đến điểm O là tâm xoay tức thời của xe. Góc xoay thân xe φ được xét theo trục X. Vận tốc dọc của xe tại trọng tâm xe được kí hiệu là V_x .



Hình 1. Động lực học bên của xe [3].

Áp dụng định luật II Newton cho chuyển động dọc theo trục y :

$$ma_y = F_{yf} + F_{yr} \quad (1)$$

trong đó, a_y là gia tốc quán tính của xe tại trọng tâm xe theo trục y , m là khối lượng của xe và F_{yf}, F_{yr} là lực lốp bên lần lượt của bánh trước và bánh sau. Gia tốc quán tính của xe a_y bao gồm 2 thành phần là gia tốc \ddot{y} do chuyển động dọc theo trục y và gia tốc hướng tâm của xe $V_x \dot{\varphi}$. Phương trình chuyển động tịnh tiến của xe theo phương ngang:

$$m(\ddot{y} + V_x \dot{\varphi}) = F_{yf} + F_{yr} \quad (2)$$

Bên cạnh đó, khi xét momen quanh trục z thu được phương trình momen quanh trục z :

$$I_z \ddot{\varphi} = l_f F_{yf} - l_r F_{yr} \quad (3)$$

với I_z là moment xoay theo trục z , l_f, l_r là khoảng cách từ trọng tâm tới bánh trước và bánh sau, F_{yf}, F_{yr} là lực lốp bên lần lượt của bánh trước và bánh sau. Trong bài báo này, mô hình động lực

học 2 bậc tự do được sử dụng. Mô hình này gồm 2 bậc tự do là vị trí bên y và góc xoay thân xe φ của xe. Mô hình động học này đã được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển cùng với giả định rằng vận tốc dọc của xe không đổi và mối quan hệ giữa lực bên và góc trượt của lốp được giả thuyết là tuyến tính. Mô hình động lực học bên của xe tự hành được viết như sau [14]:

$$\ddot{y} = \frac{F_{yf} + F_{yr}}{m} - \frac{V_x \dot{\varphi}}{m}, \ddot{\varphi} = \frac{l_f F_{yf} - l_r F_{yr}}{I_z} \quad (4)$$

Bằng phương pháp thực nghiệm, ta thấy rằng khi góc trượt của lốp nhỏ thì lực lốp bên sẽ tỉ lệ thuận với góc trượt của lốp. Góc trượt của lốp được định nghĩa là góc giữa hướng của lốp xe với hướng vector vận tốc của xe. Góc trượt của bánh trước được xác định theo công thức [3]:

$$\alpha_f = \delta - \theta_{vf} \quad (5)$$

trong đó, θ_{vf} là góc giữa trục dọc và hướng vector vận tốc dọc của xe và δ là góc đánh lái của xe.

Tương tự, ta xác định được góc trượt của bánh sau:

$$\alpha_r = -\theta_{vr} \quad (6)$$

Do đó, lực lốp bên của bánh trước và bánh sau có thể được viết như sau [3]:

$$F_{yf} = 2C_{\alpha f}(\delta - \theta_{vf}), F_{yr} = 2C_{\alpha r}(-\theta_{vr}) \quad (7)$$

trong đó, $C_{\alpha f}, C_{\alpha r}$ là độ cứng của lốp trước và sau (hằng số tỉ lệ), δ là góc đánh lái của xe và θ_{vf}, θ_{vr} lần lượt là góc giữa trục dọc và hướng vector vận tốc dọc của xe tại bánh trước và bánh sau. Nếu xét θ_{vf}, θ_{vr} là góc nhỏ và thay $V_y = \dot{y}$ ta thu được:

$$\theta_{vf} = \frac{\dot{y} + l_f \dot{\varphi}}{V_x}, \theta_{vr} = \frac{\dot{y} - l_r \dot{\varphi}}{V_x} \quad (8)$$

Thay các công thức (7), (8) vào công thức (2), (3) thu được mô hình động lực học bên của xe:

$$\ddot{y} = -\frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mV_x} \dot{y} - \left(V_x + \frac{2C_{\alpha f}l_f - 2C_{\alpha r}l_r}{mV_x} \right) \dot{\varphi} + \frac{2C_{\alpha f}}{m} \delta \quad (9)$$

$$\ddot{\varphi} = -\frac{2l_f C_{\alpha f} - 2l_r C_{\alpha r}}{I_z V_x} \dot{y} - \frac{2l_f^2 C_{\alpha f} + 2l_r^2 C_{\alpha r}}{I_z V_x} \dot{\varphi} + \frac{2l_f C_{\alpha f}}{I_z} \delta \quad (10)$$

Để thiết kế bộ điều khiển, sai số vị trí và sai số định hướng của xe đối với đường được xác định như sau [3, 10]: e_1 là khoảng cách giữa trọng tâm xe so với đường tham chiếu, e_2 là sai số góc xoay thân xe giữa thực tế và giá trị tham chiếu. Các sai số này được xác định bằng cách sử dụng các trạng thái của mô hình như sau:

$$\dot{e}_1 = \dot{y} + V_x(\varphi - \varphi_d), \dot{e}_2 = \varphi - \varphi_d \quad (11)$$

Dựa vào định nghĩa sai số từ (11), mô hình sai số của xe được trình bày như sau [3]:

$$\begin{aligned} \ddot{e}_1 = & -\frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mV_x} \dot{e}_1 + \frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{m} e_2 - \frac{2C_{\alpha f}l_f - 2C_{\alpha r}l_r}{mV_x} \dot{e}_2 \\ & + \left(-V_x - \frac{2C_{\alpha f}l_f - 2C_{\alpha r}l_r}{mV_x} \right) \dot{\varphi}_d + \frac{2C_{\alpha f}}{m} \delta \end{aligned} \quad (12)$$

$$\ddot{e}_2 = -\frac{2l_f^2 C_{af} + 2l_r^2 C_{ar}}{I_z V_x} \dot{e}_2 - \frac{2l_f C_{af} - 2l_r C_{ar}}{I_z V_x} \dot{e}_1 + \frac{2l_f C_{af} - 2l_r C_{ar}}{I_z} e_2 + \frac{2l_f C_{af}}{I_z} \delta - \frac{2l_f^2 C_{af} + 2l_r^2 C_{ar}}{I_z V_x} \dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_d \quad (13)$$

Để đơn giản hơn, đặt $x_1 = e_1; x_2 = \dot{e}_1; x_3 = e_2; x_4 = \dot{e}_2$. Ta được mô hình có dạng:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = k_1 x_2 + k_2 x_3 + k_3 x_4 + \gamma_1 \delta \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = k_4 x_2 + k_5 x_3 + k_6 x_4 + \gamma_2 \delta \end{cases} \quad (15)$$

trong đó, $k_1 = -\frac{2C_{af} + 2C_{ar}}{mV_x}; k_2 = -V_x k_1; k_3 = -\frac{2C_{af}l_f - 2C_{ar}l_r}{mV_x}; \gamma_1 = \frac{2C_{af}}{m};$

$$k_4 = -\frac{2l_f C_{af} - 2l_r C_{ar}}{I_z V_x}; k_5 = -V_x k_4; k_6 = -\frac{2l_f^2 C_{af} + 2l_r^2 C_{ar}}{I_z V_x}; \gamma_2 = \frac{2l_f C_{af}}{I_z}.$$

2.2. Thiết kế bộ điều khiển

Chúng ta giả thiết rằng, đầu vào điều khiển δ được thiết kế sao cho động lực học ở hệ phương trình (15) nhanh hơn nhiều so với động lực học của hệ phương trình (14). Do đó, trong thời gian ngắn, x_3 sẽ tiến tới trạng thái “gần như ổn định” trong khi x_4 và δ tiến tới 0. Sau đó, động lực học chậm được ước tính bằng:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = k_1 x_2 + k_2 \bar{x}_3 \end{cases} \quad (16)$$

với \bar{x}_3 là trạng thái “gần như ổn định” và hoạt động như đầu vào ảo cho động lực học chậm. Trong bài báo này, luật điều khiển sẽ được thiết kế cho hệ thống bậc giảm của (14), (15). Hai đầu vào điều khiển riêng biệt được thiết kế với hệ phương trình (14), (15) hoạt động lần lượt như là hệ thống chậm và nhanh. Tín hiệu đầu vào điều khiển nhanh δ theo dõi tín hiệu điều khiển ảo \bar{x}_3 , và sẽ dẫn đến sự ổn định của động lực học chậm. Để thiết kế bộ điều khiển trượt, chúng ta sẽ chọn các mặt trượt cho vị trí bên và góc xoay của xe lần lượt là:

$$s_1 = p_1 x_1 + x_2 \quad (17)$$

$$s_2 = p_2 (x_3 - \bar{x}_3) + x_4 - \dot{\bar{x}}_3 \quad (18)$$

Đầu tiên, ta thiết kế tín hiệu ảo \bar{x}_3 dựa trên bộ điều khiển trượt áp dụng luật tiệm cận [15].

Xét mặt trượt (17) và hàm Lyapunov có dạng: $V_1 = \frac{1}{2} s_1^2$. Đạo hàm của V_1 theo thời gian có dạng:

$$\dot{V}_1 = s_1 \dot{s}_1 \quad (19)$$

$$\dot{V}_1 = s_1 (p_1 x_2 + k_1 x_2 + k_2 \bar{x}_3) \quad (20)$$

Sử dụng luật tiệm cận theo cấp số nhân, ta có:

$$\dot{s}_1 = -K_1 s_1 - \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1), K_1 > 0, \varepsilon_1 > 0 \quad (21)$$

Với bộ điều khiển trượt thông thường $\dot{s}_1 = \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1)$, còn khi sử dụng luật tiệm cận, ta thêm thành phần $-K_1 s_1$ để tăng tốc độ tiến về mặt trượt (s_1 tiến về 0 nhanh hơn so với bộ điều khiển thông thường) ngoài ra $-K_1 s_1$ giúp làm giảm thành phần ε_1 để giảm bớt hiện tượng rung.

Với K_1, ε_1 là hằng số dương. Tín hiệu điều khiển ảo thu được:

$$\bar{x}_3 = -\frac{1}{k_2}((k_1 + p_1)x_2 + K_1 s_1 + \varepsilon_1 \text{sgn}(s_1)) \quad (22)$$

Thay tín hiệu điều khiển ảo (22) vào (20) ta được:

$$\dot{V}_1 = s_1(-\varepsilon_1 \text{sgn}(s_1) - K_1 s_1) \quad (23)$$

Do $\dot{V}_1 \leq 0$ và $V_1 > 0$ nên đảm bảo tính ổn định tiệm cận của động lực học chậm. Tiếp theo, để thiết kế bộ điều khiển cho động lực học chậm, ta sử dụng mặt trượt (18) với hàm Lyapunov được chọn là: $V_2 = \frac{1}{2} s_2^2$. Đạo hàm của V_2 theo thời gian ta được:

$$\dot{V}_2 = s_2 \dot{s}_2 \quad (24)$$

$$\dot{V}_2 = s_2(-p_2 \dot{\bar{x}}_3 - \ddot{\bar{x}}_3 + k_4 x_2 + k_5 x_3 + (p_2 + k_6)x_4 + \gamma_2 \delta) \quad (25)$$

Sử dụng luật tiệm cận theo cấp số nhân, ta có:

$$\dot{s}_2 = -K_2 s_2 - \varepsilon_2 \text{sgn}(s_2), K_2 > 0, \varepsilon_2 > 0 \quad (26)$$

Tương tự như công thức (21), với luật tiệm cận, ta thêm thành phần $-K_2 s_2$ để hệ có đáp ứng nhanh hơn và giảm bớt hiện tượng rung so với bộ điều khiển trượt thông thường.

Với K_2, ε_2 là hằng số dương. Tín hiệu điều khiển thu được:

$$\delta = \frac{-1}{\gamma_2}(-p_2 \dot{\bar{x}}_3 - \ddot{\bar{x}}_3 + k_4 x_2 + k_5 x_3 + (p_2 + k_6)x_4 + K_2 s_2 + \varepsilon_2 \text{sgn}(s_2)) \quad (27)$$

Thay tín hiệu điều khiển (27) vào (25) ta được:

$$\dot{V}_2 = s_2(-\varepsilon_2 \text{sgn}(s_2) - K_2 s_2) \quad (28)$$

Do $\dot{V}_2 \leq 0$ và $V_2 > 0$ nên đảm bảo sự ổn định của hệ thống. Để hạn chế hiện tượng rung, hàm bão hòa sat(s) được thay thế cho hàm sgn(s).

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để thực hiện mô phỏng đối tượng xe trên Matlab/Simulink ta sử dụng các thông số xe như sau: khối lượng xe (m): 1500 kg; vận tốc dọc của xe (V_x): 20 m/s; Moment quán tính (I_z): 1350 kgm^2 ; khoảng cách từ trọng tâm xe tới bánh trước (l_f): 1.5 m; khoảng cách từ trọng tâm xe tới bánh sau (l_r): 2 m; độ cứng của bánh trước (C_{af}): 55 kN/rad; độ cứng của bánh sau (C_{ar}): 120 kN/rad.

3.1. Xây dựng đường chuyển làn tham chiếu

Nhiều nghiên cứu khác nhau đã được thực hiện để thiết kế đường chuyển làn của xe tự hành. Một trong những phương pháp phổ biến để xây dựng đường chuyển làn là sử dụng hàm đa thức bậc 5. Phương trình (29) chính là quỹ đạo chuyển làn của xe:

$$y(t) = at^5 + bt^4 + ct^3 + dt^2 + et + f \quad (29)$$

Do lúc bắt đầu và kết thúc chuyển làn, xe di chuyển trên một đường thẳng nên gia tốc và vận tốc bên bằng 0, ta được hệ phương trình (30):

$$\dot{y}|_{t=t_i} = 0, \ddot{y}|_{t=t_i} = 0, \dot{y}|_{t=t_f} = 0, \ddot{y}|_{t=t_f} = 0 \quad (30)$$

Với $t_i = 0s$ và $t_f = 10s$ lần lượt là thời điểm bắt đầu và kết thúc quá trình chuyển làn. Vị trí

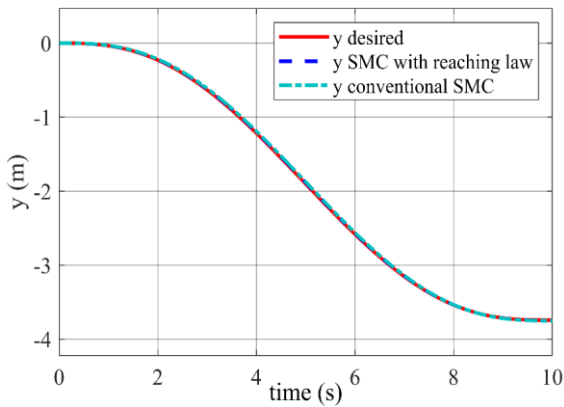
bên khi bắt đầu và kết thúc quá trình chuyển làn lượt là $y = 0$ (m) và $y = 3.75$ (m). Ta có hệ phương trình (31):

$$y|_{t=t_i} = 0, y|_{t=t_f} = 3.75 \quad (31)$$

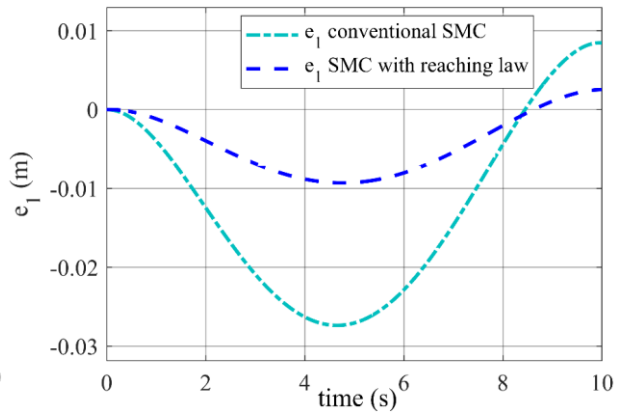
Giải hệ phương trình (30) và (31) ta thu được phương trình quỹ đạo chuyển làn mong muốn của xe:

$$y = 2,25 \cdot 10^{-4} t^5 - 5,625 \cdot 10^{-3} t^4 + 0,0375 t^3 \quad (32)$$

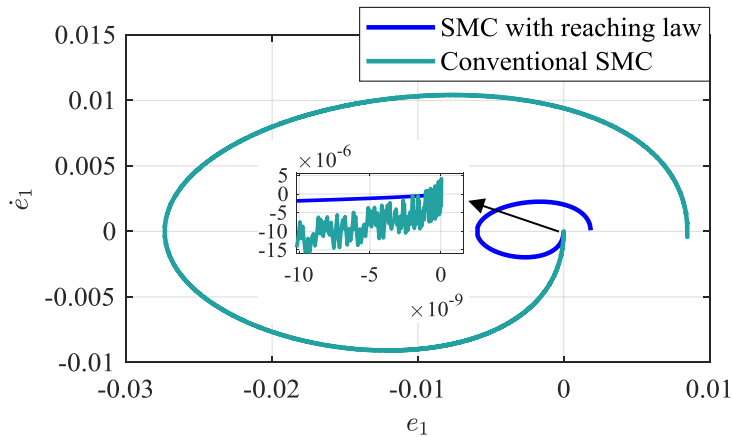
3.2. Kết quả mô phỏng và nhận xét



Hình 2. Vị trí bên của xe khi sử dụng 2 bộ điều khiển.



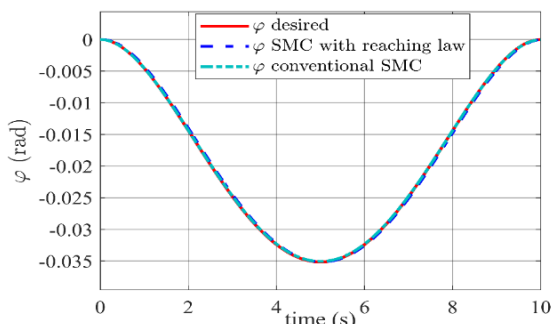
Hình 3. Sai lệch vị trí so với giá trị đặt.



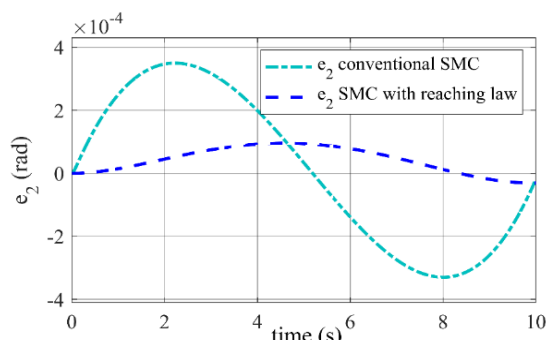
Hình 4. Quỹ đạo pha của hai bộ điều khiển.

Hình 2 cho thấy, quỹ đạo của xe khi sử dụng bộ điều khiển trượt thông thường và bộ điều khiển dựa trên luật tiệm cận, cả hai đều bám theo quỹ đạo mong muốn. Nhưng sai số vị trí của bộ điều khiển mới so với giá trị đặt nhỏ hơn bộ điều khiển thông thường ở hình 3. Điều này là do quỹ đạo pha của hai bộ điều khiển ở hình 4 cho thấy bộ điều khiển mới có tốc độ tiến về mặt trượt nhanh hơn. Ngoài ra, hình 4 cũng cho thấy có hiện tượng rung khi sử dụng bộ điều khiển trượt thông thường.

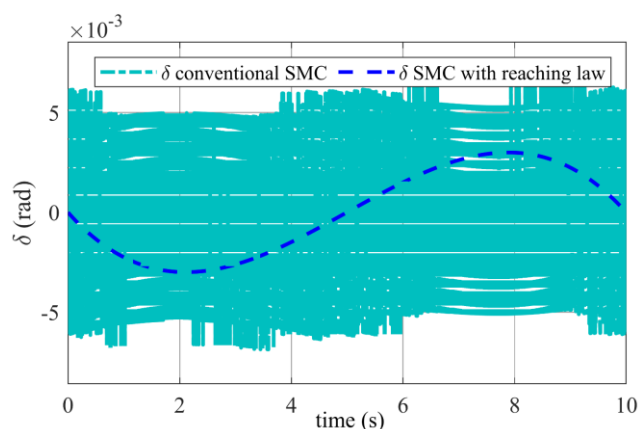
Tương tự với vị trí bên, góc xoay thân xe của 2 bộ điều khiển cũng bám khá tốt theo giá trị đặt, bộ điều khiển mới cũng có sai số nhỏ hơn điều khiển trượt thông thường có thể thấy trong hình 5 và hình 6.



Hình 5. Góc xoay thân xe khi sử dụng 2 bộ điều khiển.



Hình 6. Sai lệch góc xoay thân xe so với giá trị đặt.



Hình 7. Đầu vào điều khiển của bộ SMC và SMC kết hợp luật tiệm cận.

Hình 7 thể hiện rõ nhất hiệu quả của bộ điều khiển trượt dựa theo luật tiệm cận so với bộ điều khiển trượt thông thường. Tín hiệu góc lái của bộ điều khiển cũ dao động quá nhiều, điều này dẫn đến nó không thể sử dụng trong thực tế vì không có cơ cấu chấp hành nào của xe có thể đáp ứng được với sự thay đổi góc lái nhanh như vậy. Còn bộ điều khiển mới, tín hiệu góc lái có tần số thay đổi nhỏ hơn nhiều.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, với việc sử dụng hàm đa thức bậc 5 và các ràng buộc động lực học của xe, đường chuyển làn dành cho xe đã được thiết kế. Một bộ điều khiển mới sử dụng bộ điều khiển trượt kết hợp với luật tiệm cận theo cấp số nhân đã được đề xuất. Tính ổn định của bộ điều khiển đã được chứng minh bằng cách chọn một hàm Lyapunov thích hợp và chứng minh, phân tích độ ổn định của nó. Mô phỏng của bài báo này đã được thực hiện trên Matlab/Simulink, tạo ra một mô hình đối tượng đầy đủ để nghiên cứu. Các kết quả mô phỏng thu được chỉ ra việc chuyển làn của bộ điều khiển được đề xuất tốt hơn so với bộ điều khiển trượt truyền thống.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách Khoa Hà Nội (HUST) trong đề tài mã số T2022-PC-003.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. C. Badue et al., "Self-Driving Cars: A Survey," Expert Syst Appl, vol. 165, p. 113816, Jan. (2019), [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1901.04407>
- [2]. C. M. Filho, D. F. Wolf, V. Grassi, F. S. Osorio, "Longitudinal and lateral control for autonomous ground vehicles," IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, pp. 588–593, (2014), doi: 10.1109/IVS.2014.6856431.

- [3]. R. Rajamani, “*Vehicle Dynamics and Control*”. Boston, MA: Springer US, (2012). doi: 10.1007/978-1-4614-1433-9.
- [4]. R. Marino, S. Scalzi, and M. Netto, “*Nested PID steering control for lane keeping in autonomous vehicles*,” *Control Eng Pract*, vol. 19, no. 12, pp. 1459–1467, (2011), doi: 10.1016/J.CONENGPRAC.2011.08.005.
- [5]. Q. Liu et al., “*Hierarchical Lateral Control Scheme for Autonomous Vehicle with Uneven Time Delays Induced by Vision Sensors*,” *Sensors* 2018, Vol. 18, Page 2544, vol. 18, no. 8, p. 2544, (2018), doi: 10.3390/S18082544.
- [6]. C. M. Kang, W. Kim, and C. C. Chung, “*Observer-based backstepping control method using reduced lateral dynamics for autonomous lane-keeping system*,” *ISA Trans*, vol. 83, pp. 214–226, Dec. (2018), doi: 10.1016/J.ISATRA.2018.09.016.
- [7]. X. Wang, M. Fu, H. Ma, and Y. Yang, “*Lateral control of autonomous vehicles based on fuzzy logic*,” *Control Eng Pract*, vol. 34, pp. 1–17, (2015), doi: 10.1016/j.conengprac.2014.09.015.
- [8]. G. Tagne, R. Talj, and A. Charara, “*Higher-order sliding mode control for lateral dynamics of autonomous vehicles, with experimental validation*,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, pp. 678–683, (2013), doi: 10.1109/IVS.2013.6629545.
- [9]. A. Norouzi, M. Masoumi, A. Barari, and S. Farrokhpour Sani, “*Lateral control of an autonomous vehicle using integrated backstepping and sliding mode controller*,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, vol. 233, no. 1, pp. 141–151, (2019), doi: 10.1177/1464419318797051.
- [10]. R. Khan, F. M. Malik, N. Mazhar, A. Raza, R. A. Azim, and H. Ullah, “*Robust Control Framework for Lateral Dynamics of Autonomous Vehicle Using Barrier Lyapunov Function*,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 50513–50522, (2021), doi: 10.1109/ACCESS.2021.3068949.
- [11]. A. I. Al-Odienat and A. A. Al-Lawama, “*The Advantages of PID Fuzzy Controllers Over The Conventional Types*,” *Am J Appl Sci*, vol. 5, no. 6, pp. 653–658, (2008).
- [12]. D. H. Vu, S. Huang, and T. D. Tran, “*Hierarchical robust fuzzy sliding mode control for a class of simo under-actuated systems with mismatched uncertainties*,” *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 17, no. 6, pp. 3027–3043, (2019), doi: 10.12928/TELKOMNIKA.V17I6.13176.
- [13]. K. Xu, X. Wu, M. Ma, and Y. Zhang, “*Energy-based output feedback control of the underactuated 2DTORA system with saturated inputs*,” *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 42, no. 14, pp. 2822–2829, (2020), doi: 10.1177/0142331220933475.
- [14]. J. Jiang and A. Astolfi, “*Lateral Control of an Autonomous Vehicle*,” *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 3, no. 2, pp. 228–237, (2018), doi: 10.1109/TIV.2018.2804173.
- [15]. J. Liu and Xinhua. Wang, “*Advanced sliding mode control for mechanical systems : design, analysis and MATLAB simulation*”. Springer, (2012).

ABSTRACT

Lateral control for the autonomous vehicles using a sliding mode controller based on exponential reaching law

This article presents lateral dynamics control for the autonomous cars by using a sliding mode controller based on the exponential reaching law to avoid the chattering phenomenon of conventional sliding mode control. Following the model reduction approach, the slow and fast dynamics of the system are separately controlled using the proposed control technique. The stability of the system will be proved by defining the Lyapunov function and based on the Lyapunov stability theorem. The performance of the proposed control technique is better than conventional sliding mode control, control input is smooth to guarantee actuator can respond realistically. The simulation results of steering angle and path tracking are illustrated and compared in Matlab/Simulink.

Keywords: Lateral control; Autonomous vehicle; SIMO system; Sliding mode controller; Reaching law; Automatic lane change; Lyapunov-based controllers.