

## Điều khiển chuyển động bên của xe tự hành sử dụng bộ điều khiển trượt kết hợp với bộ quan sát trạng thái mở rộng

Nguyễn Tiến Dũng, Dương Quốc Tuấn, Trần Ngọc Châu, Nguyễn Văn Trung, Lê Đức Thịnh, Nguyễn Tùng Lâm, Nguyễn Danh Huy\*

Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội, số 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội.

\*Email: huy.nguyendanh@hust.edu.vn

Nhận bài: 11/9/2023; Hoàn thiện: 09/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.13-20>

### TÓM TẮT

Bài báo trình bày khả năng kiểm soát động học bên của xe ô tô tự hành dưới sự tác động của việc thay đổi thông số mô hình và ảnh hưởng của môi trường bằng việc sử dụng điều khiển trượt (SMC) kết hợp bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO). Mô hình động lực học của xe được xây dựng dưới sự tác động của nhiễu bất định và ảnh hưởng từ môi trường ngoài. Ngoài ra, bằng việc áp dụng phương pháp giảm bậc mô hình, động lực học nhanh và chậm của đối tượng được trình bày. Từ đó, chiến lược điều khiển gồm hai phần: đầu tiên là điều khiển vị trí ngang trực của đối tượng và phần thứ hai là điều khiển góc lái dựa trên sự sai lệch trạng thái góc xoay. Nghiên cứu này đề xuất bộ quan sát ESO kết hợp với SMC dựa trên Constant Rate Reaching Law để quan sát giá trị nhiễu, đảm bảo sự bền vững và giảm hiện tượng Chattering. Tiêu chuẩn ổn định Lyapunov và Hurwitz được áp dụng để chứng minh sự ổn định cục bộ và toàn cục của bộ điều khiển khi kết hợp với bộ quan sát. Cuối cùng phần mềm Matlab/Simulink được sử dụng để mô phỏng và kiểm chứng sự bền vững, hiệu quả và tính khả thi của hệ thống được đề xuất.

**Từ khóa:** Xe ô tô tự hành; Động lực học bên; Bộ quan sát trạng thái mở rộng; Constant Rate Reaching Law.

### 1. MỞ ĐẦU

Nghiên cứu xe tự hành là một lĩnh vực đang phát triển, tuy nhiên, bên cạnh những tiến bộ của xe tự hành vẫn còn một số thách thức liên quan đến nó gồm đảm bảo an toàn cho hành khách, tiết kiệm chi phí hoạt động và khả năng hoạt động trong các môi trường khác nhau. Bên cạnh đó, khả năng điều khiển của xe tự hành là vô cùng quan trọng, do đó, vấn đề chính của xe tự hành là tính ổn định của xe và khả năng tự lái để đạt được mục đích hiệu quả, chính xác. Kiểm soát theo dõi đường đi là mối quan tâm chính đối với xe tự hành trong quá trình chuyển động. Điều khiển theo dõi đường đi cho phép xe đi theo quỹ đạo mong muốn bằng cách điều chỉnh chuyển động bên và dọc của xe. Một số hệ thống điều khiển đã được đề xuất như điều khiển dự đoán [1], điều khiển chế độ trượt [2]. Bài viết này tập trung vào thiết kế hệ thống điều khiển cho động lực học bên của xe tự hành di chuyển trên đường cong. Điều khiển bên cho xe là một nhiệm vụ khó khăn do động lực học phức tạp, có nhiều thiết kế điều khiển cho động lực học bên của xe tự hành được đưa ra bao gồm LQR [3], PID [4], Feed-Back Linearization [5], Backstepping [6].

Các xe tự hành được mô hình hóa với mô hình xe đạp 3 bậc tự do (DOF). Với giả định động lực học theo chiều dọc được điều khiển bằng bộ điều khiển riêng thì mô hình hệ thống được giảm xuống 2 DOF tức là vị trí bên và góc xoay. Từ đó, mô hình xe tự hành trở thành một hệ thống một đầu vào nhiều đầu ra với đầu ra là góc xoay và vị trí bên. Theo kinh nghiệm, trong quá trình xe tự lái, vị trí bên là trạng thái chậm và góc xoay là trạng thái nhanh. Vì vậy, động lực học bên của xe tự hành có thể giảm xuống thành động lực học chậm và nhanh. Hệ thống này thường được điều khiển bằng bộ điều khiển energy-based [7], bộ điều khiển thông minh [8], bộ điều khiển phân cấp [9]. Bài viết này sử dụng phương pháp giảm mô hình dựa trên tính chất nhanh và chậm của động lực học bên của xe tự hành. Mô hình hệ thống được rút gọn thành hệ thống con nhanh và chậm với vị trí bên có động lực học chậm và vị trí góc xoay có động lực học nhanh. Điều này cho phép thiết kế hai bộ điều khiển con với một đầu vào điều khiển chính và một đầu

vào điều khiển phụ nhằm giảm sự phức tạp của hệ thống điều khiển. Sự ổn định của hệ thống điều khiển được kiểm chứng bằng phần mềm Matlab/Simulink.

Ngoài ra, một trong những hạn chế khi thiết kế bộ điều khiển là sự tồn tại của các thành phần bất định và ảnh hưởng từ môi trường ngoài. Để xử lý vấn đề này, bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO) [10] được sử dụng để quan sát chính xác các trạng thái của xe, từ đó tăng tính ổn định của hệ thống điều khiển. Bố cục các phần còn lại của bài báo như sau: Phần 2 trình bày mô hình xe tự hành; Phần 3 trình bày hệ thống điều khiển đề xuất và so sánh với bộ điều khiển SMC thông thường bằng phần mềm mô phỏng Matlab/Simulink; Phần 4 kết luận bài báo.

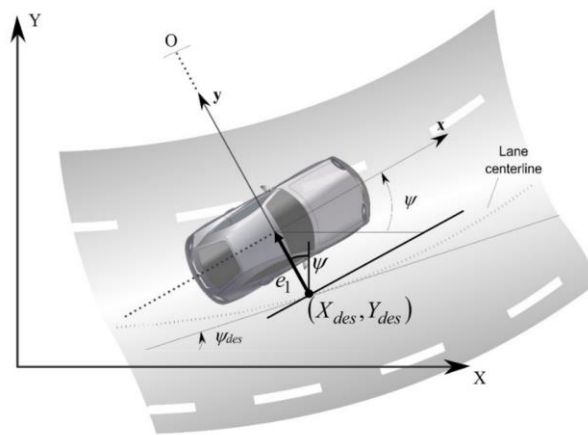
## 2. MÔ HÌNH XE TỰ HÀNH

Trong phần này, mô hình động lực học bên của một chiếc xe 4 bánh tự hành với hệ thống bánh lái trước được trình bày. Mô hình xe đạp được sử dụng để tạo ra mô hình phương tiện đơn giản hóa. Chuyển động của xe tự hành trên đường cong bị ảnh hưởng đáng kể bởi tương tác với địa hình nên tác động của lực này được đưa vào mô hình.

Các thông số của xe sử dụng trong bài được cho như sau:  $\bar{m} = 1500\text{kg}$  là khối lượng của xe;  $\bar{J} = 1350\text{kgm}^2$  là momen quán tính của xe theo trục Oz;  $\bar{d}_f = 1.5\text{m}$  là khoảng cách bánh trước đến trọng tâm xe;  $\bar{d}_r = 2\text{m}$  là khoảng cách bánh sau đến trọng tâm xe;  $\bar{C}_f = 55\text{kN/rad}$  là độ cứng lốp trước;  $\bar{C}_r = 120\text{kN/rad}$  là độ cứng lốp sau.

### 2.1. Mô hình động lực học bên

Khác với chuyển động trên đường thẳng, tác dụng của lực bên trở nên đáng kể khi xe chuyển động trên đường cong. Chuyển động của xe trên đường cong được mô tả trong hình 1. Hệ quy chiếu Oxy là hệ quy chiếu quán tính, CG là trọng tâm của xe, góc lái của xe được biểu diễn bằng  $\delta$  và  $v_x, v_y$  lần lượt là vận tốc của xe theo phương ngang, dọc. Góc xoay của xe là  $\psi$ .



Hình 1. Chuyển động của xe trên quỹ đạo cong [11].

#### 2.1.1. Giả thiết ban đầu

Giả thiết: Các lực tác dụng lên 2 bánh trước và 2 bánh sau của xe lần lượt là như nhau. Như vậy, khi đưa xe về mô hình xe đạp thì lực tác dụng lên mỗi bánh gấp đôi giá trị ban đầu. Ngoài ra, vận tốc của xe theo phương dọc  $v_x$  là không đổi. Từ đó, xe tự hành được xem xét dưới 2 phương chuyển động bên và chuyển động xoay thân xe ứng với vị trí bên y và góc xoay thân xe  $\psi$ .

#### 2.1.2. Xây dựng phương trình

Từ giả thiết trên, phương trình động lực học của xe theo 2 phương chuyển động như sau

$$\ddot{y} = \frac{F_{fy} + F_{ry} + F_b}{m} - v_x \dot{\psi}; \quad \ddot{\psi} = \frac{1}{J} (d_f F_{fy} - d_r F_{ry}) \quad (1)$$

Trong đó,  $F_{fy}, F_{ry}$  là lực tương tác giữa 2 bánh của xe với mặt đường,  $F_b = mgsin(\theta)$  là lực xuất hiện khi mặt đường nghiêng góc  $\theta$ .

## 2.2. Lực lốp

Trong bài viết này, mô hình xe của Dugoff được sử dụng để xác định lực bên của lốp xe. Đây là một mô hình thực nghiệm đưa ra mối liên hệ cho lực tương tác giữa xe và mặt đường như một hàm của góc trượt và tỷ lệ trượt.

$$F_{fy} = 2C_f \alpha_f; F_{ry} = 2C_r \alpha_r \quad (2)$$

Trong đó,  $\alpha_f$  và  $\alpha_r$  lần lượt là góc trượt của lốp trước và góc trượt của lốp sau [12]

$$\alpha_f = \delta - \frac{\dot{y} + d_f \dot{\psi}}{v_x}; \quad \alpha_r = -\frac{\dot{y} - d_r \dot{\psi}}{v_x} \quad (3)$$

## 2.3. Mô hình Affine

Từ các phương trình (1), (2) và (3), mô hình động lực học bên của xe tự hành như sau

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= -\frac{2(C_f + C_r)}{mv_x} \dot{y} - \left( \frac{2(C_f d_f - C_r d_r)}{mv_x} + v_x \right) \dot{\psi} + \frac{2C_f}{m} \delta + \frac{F}{m} + d_1 \\ \ddot{\psi} &= -\frac{2(C_f d_f^2 + C_r d_r^2)}{Jv_x} \dot{\psi} - \frac{2(C_f d_f - C_r d_r)}{Jv_x} \dot{y} + \frac{2C_f d_f}{J} \delta + d_2 \end{aligned} \quad (4)$$

Sai lệch vị trí bên và góc xoay thân xe được xác định  $e_1 = v_x(\psi - \psi_d) + \dot{y}$ ;  $e_2 = \psi - \psi_d$ . Thay vào (4), hệ phương trình sai lệch động lực học như sau:

$$\begin{aligned} \ddot{e}_1 &= -\frac{2(C_f + C_r)}{mv_x} \dot{e}_1 + \frac{2(C_f + C_r)}{m} e_2 + \left( -\frac{2(C_f d_f - C_r d_r)}{mv_x} - v_x \right) \dot{\psi}_d \\ &\quad - \frac{2(C_f d_f - C_r d_r)}{mv_x} \dot{e}_2 + \frac{2C_f}{m} \delta + d_1 + \frac{F_b}{m} \\ \ddot{e}_2 &= -\frac{2(C_f d_f^2 + C_r d_r^2)}{Jv_x} \dot{e}_2 - \frac{2(C_f d_f - C_r d_r)}{Jv_x} \dot{e}_1 + \frac{2C_f d_f}{J} \delta \\ &\quad + \frac{2(C_f d_f - C_r d_r)}{J} e_2 - \frac{2(C_f d_f^2 + C_r d_r^2)}{Jv_x} \dot{\psi}_d - \ddot{\psi}_d + d_2 \end{aligned} \quad (5)$$

Ngoài ra, trong quá trình xe chuyển động, các thông số của xe được biểu diễn dưới dạng không chắc chắn như sau:  $m = \bar{m} + \tilde{m}$ ,  $C_f = \bar{C}_f + \tilde{C}_f$ ,  $C_r = \bar{C}_r + \tilde{C}_r$ ,  $J = \bar{J} + \tilde{J}$ ,  $d_f = \bar{d}_f + \tilde{d}$ ,  $d_r = \bar{d}_r - \tilde{d}$ .

Thay vào phương trình (5), hệ phương trình sai lệch động lực học được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \ddot{e}_1 &= -\frac{2(\bar{C}_f + \bar{C}_r)}{\bar{m}v_x} \dot{e}_1 - \frac{2(\bar{C}_f \bar{d}_f - \bar{C}_r \bar{d}_r)}{\bar{m}v_x} \dot{e}_2 + \frac{2(\bar{C}_f + \bar{C}_r)}{\bar{m}} e_2 + \frac{2\bar{C}_f}{\bar{m}} \delta + \omega_1 \\ \ddot{e}_2 &= -\frac{2(\bar{C}_f \bar{d}_f^2 + \bar{C}_r \bar{d}_r^2)}{\bar{J}v_x} \dot{e}_2 - \frac{2(\bar{C}_f \bar{d}_f - \bar{C}_r \bar{d}_r)}{\bar{J}v_x} \dot{e}_1 + \frac{(\bar{C}_f \bar{d}_f - \bar{C}_r \bar{d}_r)}{\bar{J}} e_2 \\ &\quad + \frac{2\bar{C}_f \bar{d}_f}{\bar{J}} \delta + D_2 \end{aligned} \quad (6)$$

Trong đó,

$$\begin{aligned} \omega_1 = & - \left( v_x + \frac{2(C_f(\bar{d}_f + \tilde{d}) - C_r(\bar{d}_r - \tilde{d}))}{mv_x} \right) \dot{\psi}_d + d_1 + g\theta - \frac{2(\tilde{C}_f + \tilde{C}_r)}{\bar{m}v_x} \dot{e}_1 \\ & - \frac{3\tilde{m}}{\bar{m}} \ddot{e}_1 + \frac{2(\tilde{C}_f + \tilde{C}_r)}{\bar{m}} e_2 - \frac{2(\tilde{C}_f \bar{d}_f - \tilde{C}_r \bar{d}_r + (C_f + C_r)\tilde{d})}{\bar{m}v_x} \dot{e}_2 \\ D_2 = & - \frac{2(\tilde{C}_f \bar{d}_f^2 + \tilde{C}_r \bar{d}_r^2 + C_f(2\bar{d}_f \tilde{d} + \tilde{d}^2) + C_r(-2\bar{d}_r \tilde{d} + \tilde{d}^2))}{\bar{J}v_x} \dot{e}_2 + d_2 \\ & - \frac{2(C_f(\bar{d}_f + \tilde{d})^2 + C_r(\bar{d}_r - \tilde{d})^2)}{Jv_x} \dot{\psi}_d + \frac{2(\tilde{C}_f \bar{d}_f - \tilde{C}_r \bar{d}_r + (C_f + C_r)\tilde{d})}{\bar{J}} e_2 \\ & - \frac{2(\tilde{C}_f \bar{d}_f - \tilde{C}_r \bar{d}_r + (C_f + C_r)\tilde{d})}{\bar{J}v_x} \dot{e}_1 + \frac{(\tilde{C}_f(\bar{d}_f + \tilde{d}) + \tilde{C}_r \tilde{d})}{\bar{J}} \delta - \frac{4\bar{J}}{\bar{J}} \ddot{e}_2 - \ddot{\psi}_d \end{aligned} \quad (7)$$

Đặt  $q_1 = e_1, q_2 = \dot{e}_1, q_3 = e_2, q_4 = \dot{e}_2$ , phương trình (6) được rút gọn như sau

$$\dot{q}_1 = q_2 \quad (8)$$

$$\dot{q}_2 = \bar{k}_1 q_2 + \bar{k}_2 q_3 + \bar{k}_3 q_4 + \bar{\gamma}_1 \delta + \omega_1$$

$$\dot{q}_3 = q_4 \quad (9)$$

$$\dot{q}_4 = \bar{k}_4 q_2 + \bar{k}_5 q_3 + \bar{k}_6 q_4 + \bar{\gamma}_2 \delta + D_2$$

## 2.4. Phương pháp giảm bậc mô hình

Ở đây, giả định được đưa ra là đầu vào điều khiển  $\delta$  được thiết kế sao cho động lực học của (9) nhanh hơn nhiều so với động lực học của (8), tức là khi xe chuyển động ổn định thì đầu vào điều khiển của hệ (9) là  $\delta \rightarrow 0$  nên  $q_3$  sẽ tiến về giá trị ổn định  $\bar{q}_3$  trong khoảng thời gian ngắn. Hệ động lực học chậm (8) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 &= q_2 \\ \dot{q}_2 &= \bar{k}_1 q_2 + \bar{k}_2 q_3 + D_1 \end{aligned} \quad (10)$$

Trong đó,  $\bar{q}_3$  gần như ổn định và đóng vai trò đầu vào cho hệ động lực học chậm.

$$D_1 = \omega_1 + \bar{k}_2(q_3 - \bar{q}_3) + \bar{k}_3 q_4 + \bar{\gamma}_1 \delta$$

## 3. HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN

Trong phần này, bộ điều khiển SMC được thiết kế cho đối tượng theo hai đầu vào điều khiển riêng biệt lần lượt đáp ứng với (9), (10) hoạt động tương ứng như các hệ thống nhanh và chậm. Ngoài ra, bộ quan sát ESO cũng được đưa vào để quan sát trạng thái đối tượng và giảm số cảm biến cần thiết sử dụng trên đối tượng. Bộ điều khiển SMC và bộ quan sát ESO được thiết kế như sau.

### 3.1. Bộ điều khiển SMC kết hợp bộ quan sát ESO

#### 3.1.1. Bộ quan sát ESO

Dựa trên bộ quan sát tiêu chuẩn, với trạng thái quan sát là sai lệch vị trí bên và sai lệch góc xoay thân xe, bộ quan sát ESO được thiết kế cho (9) và (10) như sau:

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{q}}_1 &= \hat{q}_2 + \frac{a_1}{\varepsilon_1}(q_1 - \hat{q}_1) \\
 \dot{\hat{q}}_2 &= \hat{D}_1 + \bar{k}_1 \hat{q}_2 + \bar{k}_2 \bar{q}_3 + \frac{a_2}{\varepsilon_1^2}(q_1 - \hat{q}_1) \\
 \dot{\hat{D}}_1 &= \frac{a_3}{\varepsilon_1^3}(q_1 - \hat{q}_1) \\
 \dot{\hat{q}}_3 &= \hat{q}_4 + \frac{a_1}{\varepsilon_2}(q_3 - \hat{q}_3) \\
 \dot{\hat{q}}_4 &= \hat{D}_2 + \bar{k}_4 \hat{q}_2 + \bar{k}_5 \hat{q}_3 + \bar{k}_6 \hat{q}_4 + \bar{\gamma}_2 \delta + \frac{a_2}{\varepsilon_2^2}(q_3 - \hat{q}_3) \\
 \dot{\hat{D}}_2 &= \frac{a_3}{\varepsilon_2^3}(q_3 - \hat{q}_3)
 \end{aligned} \tag{11}$$

Mục tiêu của bộ quan sát là  $\hat{q}_1 \rightarrow q_1$ ,  $\hat{q}_2 \rightarrow q_2$ ,  $\hat{q}_3 \rightarrow q_3$ ,  $\hat{q}_4 \rightarrow q_4$ ,  $\hat{D}_1 \rightarrow D_1$ ,  $\hat{D}_2 \rightarrow D_2$  với  $\varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0$ ,  $a_1, a_2, a_3$  là các hằng số dương. Tính ổn định của bộ quan sát được chứng minh dựa trên tiêu chuẩn ổn định Lyapunov và Hurwitz trong [10].

### 3.1.2. Bộ điều khiển SMC

Khác với bộ điều khiển SMC thông thường, bộ điều khiển SMC được đề xuất sử dụng các trạng thái được quan sát từ bộ quan sát ESO.

$$\begin{aligned}
 s_1 &= p_1 q_1 + q_2 \\
 s_2 &= p_2 (q_3 - \bar{q}_3) + q_4 - \dot{\bar{q}}_3
 \end{aligned} \tag{12}$$

Áp dụng luật điều khiển Constant Rate Reaching Law cho (12). Hàm tanh được sử dụng thay thế hàm sgn để giảm hiện tượng Chattering trong hệ thống. Đầu vào điều khiển  $\delta$  ứng với hệ động lực học nhanh được thiết kế như sau

$$\delta = -\frac{1}{\bar{\gamma}_2} \left( -p_2 \dot{\bar{q}}_3 - \ddot{\bar{q}}_3 + \bar{k}_4 \hat{q}_2 + \bar{k}_5 \hat{q}_3 + \hat{q}_4 (p_2 + \bar{k}_6) + K_2 \tanh(\hat{s}_2) + \hat{D}_2 \right) \tag{13}$$

Và đầu vào điều khiển phụ  $\bar{q}_3$  ứng với hệ động lực học chậm

$$\bar{q}_3 = -\frac{1}{\bar{k}_2} \left( (\bar{k}_1 + p_1) \hat{q}_2 + K_1 \tanh(\hat{s}_1) + \hat{D}_1 \right) \tag{14}$$

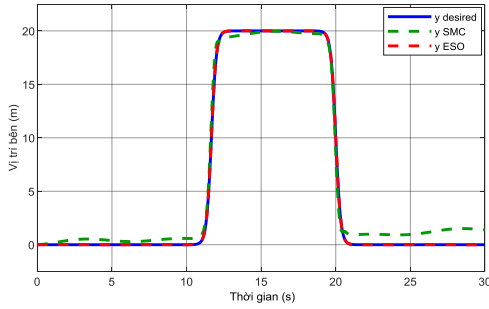
Trong đó,  $K_1, K_2 > 0$  thì hệ ổn định tiệm cận Lyapunov. Chứng minh: Với (14) và (13), hàm Lyapunov được xác định:  $V_1 = 0.5s_1^2$ ,  $V_2 = 0.5s_2^2$ . Từ phương trình (12), (13) và (14)

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_1 &= s_1 \left( (p_1 + \bar{k}_1)(q_2 - \hat{q}_2) + K_1 \tanh(\hat{s}_1) + D_1 - \hat{D}_1 \right) \\
 &\leq -\hat{s}_1 K_1 \tanh(\hat{s}_1) + K_1 |s_1 - \hat{s}_1| + \left( |D_1 - \hat{D}_1| + (p_1 + \bar{k}_1) |q_2 - \hat{q}_2| \right) |\hat{s}_1| \\
 &\quad + |s_1 - \hat{s}_1| \left( |D_1 - \hat{D}_1| + (p_1 + \bar{k}_1) |q_2 - \hat{q}_2| \right) \\
 &= -K_1 |\hat{s}_1| + K_1 |s_1 - \hat{s}_1| + \left( |D_1 - \hat{D}_1| + (p_1 + \bar{k}_1) |q_2 - \hat{q}_2| \right) |\hat{s}_1| \\
 &\quad + |s_1 - \hat{s}_1| \left( |D_1 - \hat{D}_1| + (p_1 + \bar{k}_1) |q_2 - \hat{q}_2| \right) \\
 \dot{V}_2 &= s_2 \left( (p_2 + \bar{k}_6)(q_4 - \hat{q}_4) + k_5 (q_3 - \hat{q}_3) + k_4 (q_2 - \hat{q}_2) - K_2 \tanh(\hat{s}_2) + D_2 - \hat{D}_2 \right) \\
 &\leq -\hat{s}_2 K_2 \tanh(\hat{s}_2) + K_2 |s_2 - \hat{s}_2| + |s_2| \left( \left( D_2 - \hat{D}_2 \right) + (p_2 + \bar{k}_6)(q_4 - \hat{q}_4) \right. \\
 &\quad \left. + k_5 (q_3 - \hat{q}_3) + k_4 (q_2 - \hat{q}_2) \right) \\
 &\quad + |s_2 - \hat{s}_2| \left( \left( D_2 - \hat{D}_2 \right) + k_5 (q_3 - \hat{q}_3) + k_4 (q_2 - \hat{q}_2) + (p_2 + \bar{k}_6)(q_4 - \hat{q}_4) \right) \\
 &= -K_1 |\hat{s}_2| + K_1 |s_2 - \hat{s}_2| + \left( (p_2 + \bar{k}_6) |q_4 - \hat{q}_4| + |D_2 - \hat{D}_2| + k_5 |q_3 - \hat{q}_3| \right) |\hat{s}_2| \\
 &\quad + k_4 |q_2 - \hat{q}_2| \\
 &\quad + |s_1 - \hat{s}_1| \left( |D_2 - \hat{D}_2| + (p_2 + \bar{k}_6) |q_4 - \hat{q}_4| + k_5 |q_3 - \hat{q}_3| + k_4 |q_2 - \hat{q}_2| \right)
 \end{aligned} \tag{15}$$

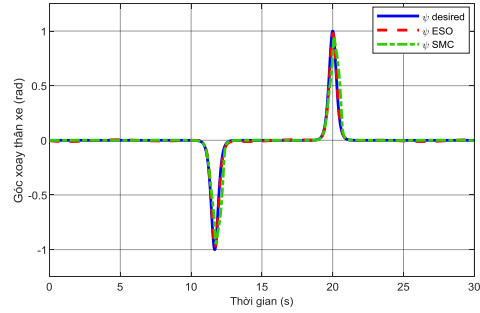
Do tính chất của bộ quan sát,  $\hat{q}_1 \rightarrow q_1$ ,  $\hat{q}_2 \rightarrow q_2$ ,  $\hat{q}_3 \rightarrow q_3$ ,  $\hat{q}_4 \rightarrow q_4$ ,  $\hat{D}_1 \rightarrow D_1$ ,  $\hat{D}_2 \rightarrow D_2$  nên với  $K_1, K_2 > 0$  thì hệ thống điều khiển ổn định tiệm cận Lyapunov.

### 3.2. Công cụ, kết quả mô phỏng

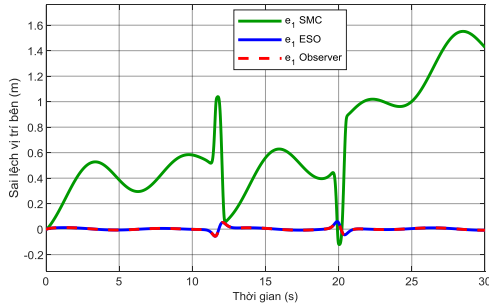
Hệ thống điều khiển đề xuất được mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink. Các kết quả thu được dùng để so sánh với quỹ đạo thực tế là  $\psi_d = \text{sech}^2(3t - 60) - \text{sech}^2(3t - 35)$  và  $y_d = 10(\tanh(3t - 35) - \tanh(3t - 60))$ . Xe di chuyển trong điều kiện mỗi trường có gió ảnh hưởng đến độ lớn gia tốc theo hai phương là  $d_1 = 3\sin(t) + \cos(t/2)$  và  $d_2 = 2.5\sin(t) - \cos(t)$ .



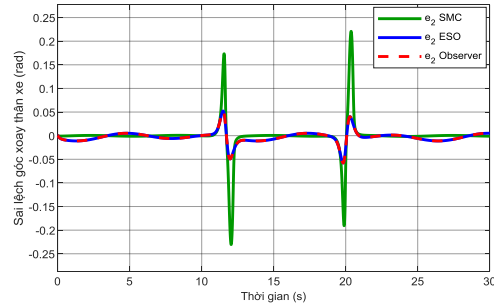
Hình 2. Vị trí bên của xe.



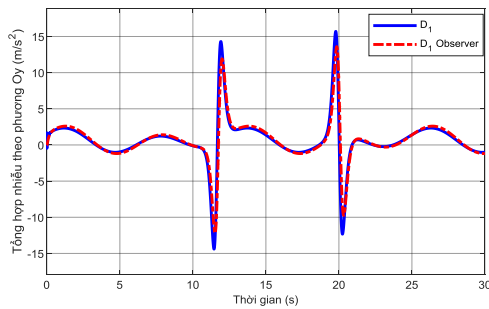
Hình 3. Góc xoay thân xe.



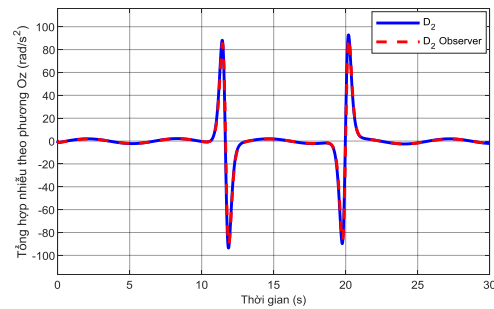
Hình 4. Sai lệch vị trí bên.



Hình 5. Sai lệch góc xoay thân xe.



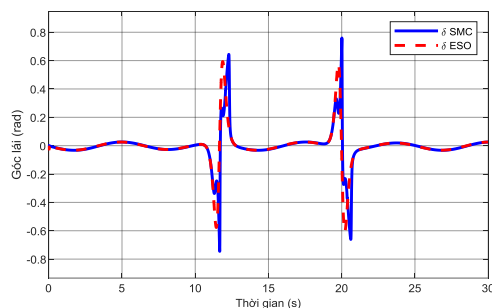
Hình 6. Tổng hợp nhiễu tác động lên xe theo phương Oy.



Hình 7. Tổng hợp nhiễu tác động lên xe theo phương Oz.

Các thành phần bất định của xe được xác định:  $\tilde{m} = 150\text{kg}$ ,  $\tilde{J} = 60\text{kgm}^2$ ,  $\tilde{C}_f = 2000\text{N/rad}$ ,  $\tilde{C}_r = 5000\text{N/rad}$ ,  $\tilde{d} = 0.2\text{m}$ ,  $\theta = 0.087\text{rad}$ . Tham số bộ điều khiển được chọn như sau:  $a_1 = 6$ ,  $a_2 = 11$ ,  $a_3 = 6$ ,  $\varepsilon_1 = 0.027$ ,  $\varepsilon_2 = 0.01$ ,  $p_1 = 12$ ,  $p_2 = 25$ ,  $K_1 = 0.05$ ,  $K_2 = 60$ . Dưới đây là

các biểu đồ biểu diễn trạng thái của xe theo thời gian khi sử dụng 2 bộ điều khiển SMC thông thường và hệ thống điều khiển đề xuất.



**Hình 8.** Góc lái.

### **3.3. Kết quả mô phỏng và bình luận**

Hình 2 và hình 3 trình bày bộ điều khiển đề xuất và bộ điều khiển SMC thông thường đều có thể duy trì việc lái xe bám theo quỹ đạo mong muốn. Tuy nhiên, so với bộ điều khiển SMC thì bộ điều khiển đề xuất có hiệu suất cao hơn khi có thể đáp ứng quỹ đạo trong những khúc cua hẹp. Hình 4 và hình 5 trình bày sai lệch vị trí bên và góc xoay thân xe so với quỹ đạo mong muốn. Có thể thấy sai lệch vị trí khi sử dụng hệ thống điều khiển đề xuất là nhỏ hơn so với bộ điều khiển SMC thông thường. Tính chính xác của bộ quan sát ESO được thể hiện qua hình 4, hình 5, hình 6 và hình 7 khi các giá trị quan sát bám sát với giá trị thực tế. Hình 6 và hình 7 biểu diễn giá trị nhiễu qua bộ quan sát ESO bám sát giá trị thực tế của chúng, từ đó tăng sự chính xác của tín hiệu điều khiển và đảm bảo tính ổn định của hệ thống điều khiển.

Hình 8 biểu diễn tín hiệu điều khiển đầu vào hệ thống khi sử dụng hai bộ điều khiển khác nhau. Tín hiệu điều khiển khi sử dụng hệ thống điều khiển đề xuất mượt mà và nhỏ hơn so với bộ SMC thông thường, giá trị khoảng 0.6 rad hợp lý trong điều kiện thực tế. Nói chung, hệ thống điều khiển đề xuất tốt hơn bộ điều khiển SMC thông thường theo kết quả mô phỏng và phân tích nêu trên.

## **4. KẾT LUẬN**

Trong bài viết này, hệ thống điều khiển sử dụng bộ điều khiển SMC kết hợp với bộ quan sát ESO được thiết kế. Hiệu suất điều khiển được đánh giá dựa trên kết quả thu được từ phần mềm mô phỏng Matlab/Simulink và so sánh với bộ điều khiển SMC thông thường. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống điều khiển đề xuất tạo ra tín hiệu điều khiển liên tục và mượt mà, đồng thời bộ quan sát cho ra giá trị quan sát nhiễu sát với thực tế, từ đó dẫn đến sai lệch vị trí nhỏ và đáp ứng được quỹ đạo mong muốn. Tóm lại, hiệu suất điều khiển của hệ thống điều khiển đưa ra cao hơn bộ SMC thông thường.

Đóng góp của bài viết bao gồm: Xây dựng mô hình toán học cụ thể của đối tượng khi xét đến các thông số bất định và ảnh hưởng từ môi trường ngoài; Kiểm chứng tính ổn định của hệ thống điều khiển sử dụng bộ điều khiển SMC kết hợp bộ quan sát ESO và so sánh với bộ điều khiển SMC thông thường. Hướng đi của bài toán điều khiển trong tương lai sẽ xem xét cải tiến bộ điều khiển và bộ quan sát để tăng tính ổn định và sự chính xác.

## **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1]. Y. Tian và các cộng sự, “Control Strategies on Path Tracking for Autonomous Vehicle: State of the Art and Future Challenges”, IEEE Access, (2020), DOI 10.1109/ACCESS.2020.3020075.
- [2]. A. Norouzi, M. Masoumi, A. Barari và S. Farrokhpour Sani, “Lateral control of an autonomous vehicle using integrated backstepping and sliding mode controller”, Proc. Inst. Mech. Eng., K, J. Multi-Body Dyn., vol. 233, no. 1, pp. 141–151, (2019).

- [3]. Q. Liu, Y. Liu, C. Liu, B. Chen, W. Zhang, L. Li, and X. Ji, “Hierarchical lateral control scheme for autonomous vehicle with uneven time delays induced by vision sensors,” *Sensors*, vol. 18, no. 8, p. 2544, (2018).
- [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).
- [5]. D.-C. Liaw and W.-C. Chung, “A feedback linearization design for the control of vehicle’s lateral dynamics,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 52, no. 4, pp. 313–329, (2008).
- [6]. C. M. Kang, W. Kim, and C. C. Chung, “Observer-based backstepping control method using reduced lateral dynamics for autonomous lanekeeping system,” *ISA Trans.*, vol. 83, pp. 214–226, (2018).
- [7]. K. Xu, X. Wu, M. Ma, and Y. Zhang, “Energy-based output feedback control of the underactuated 2D-TORA system with saturated inputs,” *Trans. Inst. Meas. Control*, vol. 42, no. 14, pp. 2822–2829, (2020).
- [8]. H. T. Nguyen, M. T. Nguyen, T. T. Doan, and C. P. Vo, “Designing PIDfuzzy controller for pendubot system,” *Robotica Manage.*, vol. 22, no. 2, pp. 21–27, (2017).
- [9]. 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*, vol. 17, no. 6, pp. 3027–3043, (2019).
- [10]. J. Liu, X. Wang, “Advanced sliding mode control”, Springer Berlin Heidelberg, pp. 174-177, (2011).
- [11]. A. Norouzi và các cộng sự, “Vehicle lateral control in the presence of uncertainty for lane change maneuver using adaptive sliding mode control with fuzzy boundary layer”, Sagepub, (2017), DOI 10.1177/0959651817733222.
- [12]. R. Rajamani, “Vehicle dynamics and control”, Springer Science & Business Media, pp. 27-32, (2011).

### ABSTRACT

#### **The lateral dynamics control of autonomous vehicles using the sliding mode controller combined with an extended state observer**

*The article presents the ability to control the lateral dynamics of autonomous vehicles under the influence of model parameter variations and environmental effects using Sliding Mode Control (SMC) combined with Extended State Observer (ESO). The dynamic model of the vehicle is constructed considering uncertain disturbances and external environmental influences. Furthermore, by employing model order reduction, both the fast and slow dynamics of the object are delineated. Based on this, the control strategy consists of two parts: firstly, controlling the lateral position of the object, and secondly, steering angle control based on the deviation of the rotational state angle. This study introduces an ESO observation unit coupled with SMC, employing the Constant Rate Reaching Law to observe noise values, ensuring sustainability, and reducing Chattering phenomena. Lyapunov and Hurwitz stability criteria are applied to demonstrate the local and global stability of the control system when integrated with the observer. Finally, the Matlab/Simulink software is utilized for simulation and verification, demonstrating the sustainability, effectiveness, and feasibility of the proposed system.*

**Keywords:** Autonomous vehicles; Lateral dynamics; State observer; Constant Rate Reaching Law.