

# ĐIỀU KHIỂN CHẾ ĐỘ TRƯỢT CHO ROBOT SONG SONG 6 BẬC TỰ DO - STEWART PLATFORM - DỰA TRÊN BỘ QUAN SÁT TRẠNG THÁI MỞ RỘNG

SLIDING MODE CONTROL FOR 6 DEGREE OF FREEDOM PARALLEL ROBOT - STEWART PLATFORM - BASED ON EXTENDED STATE OBSERVER

Trần Trung Kiên<sup>1</sup>, Vũ Đức Cường<sup>2</sup>, Nguyễn Tùng Lâm<sup>2</sup>,  
Nguyễn Trung Kiên<sup>3</sup>, Nguyễn Vũ<sup>3,\*</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huieh5804.2025.314>

## TÓM TẮT

Stewart platform là một hệ thống robot song song sáu bậc tự do, bao gồm 6 cơ cấu truyền động (gọi là các chân) kết nối một bệ cố định và bệ di chuyển. Nhờ cấu trúc song song 6 bậc tự do, Stewart platform có khả năng di chuyển với tốc độ cao và độ chính xác cao, do đó, được ứng dụng nhiều trong các ứng dụng đòi hỏi sự chính xác và tốc độ. Bài báo này tập trung nghiên cứu về cấu trúc điều khiển phi tuyến - bộ điều khiển chế độ trượt (Sliding Mode Control) dựa trên Bộ quan sát trạng thái mở rộng (Extended State Observer) - cho hệ thống Stewart platform. Để thiết kế điều khiển cho mô hình, trong nghiên cứu này, bước đầu, tập trung mô hình hóa, xây dựng phương trình vi phân, mô tả động học của hệ thống dưới ảnh hưởng của đầu vào. Sau đó, dựa trên mô hình động lực học hệ thống, xây dựng bộ điều khiển SMC và bộ quan sát ESO. Đáp ứng và hiệu suất của bộ điều khiển này được đánh giá qua các mô phỏng dựa trên mô hình bán vật lý Simscape Multibody.

**Từ khóa:** Stewart platform, Robot song song, điều khiển chế độ trượt, bộ quan sát trạng thái mở rộng, Simscape Multibody.

## ABSTRACT

The Stewart platform is a six-degree-of-freedom parallel robotic system comprising six actuators (referred to as legs) that connect a fixed base to a moving platform. Due to its six-degree-of-freedom parallel structure, the Stewart platform exhibits high-speed motion and high precision, making it suitable for applications requiring both accuracy and rapid movement. This paper focuses on the study of a nonlinear control structure - Sliding Mode Control (SMC) based on an Extended State Observer (ESO) - for the highly nonlinear Stewart platform. To design the control system for this model, the study first emphasizes modeling and deriving the differential equations that describe the system's dynamics under input influence. The controller and observer are designed based on the equation of motion. The controller's response and performance, along with the designed observer, are evaluated through numerical simulations. Furthermore, to provide a more objective assessment, a MATLAB/Simulink model based on Simscape Multibody is utilized for simulation.

**Keywords:** Stewart platform, Parallel robot, Sliding Mode Control, Extended State Observer, Simscape Multibody.

<sup>1</sup>Viện Tự động hóa Kỹ thuật Quân sự, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

<sup>2</sup>Phòng thí nghiệm Điều khiển chuyển động và robot ứng dụng (MoCAR), Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

<sup>3</sup>Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

\*Email: vutudonghoa@yahoo.com.vn

Ngày nhận bài: 26/6/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 28/8/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/9/2025

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Stewart platform là một hệ thống robot song song sáu bậc tự do (DOF) có cấu trúc phức tạp, được ứng dụng rộng

rãi trong nhiều lĩnh vực yêu cầu độ chính xác cao và phản hồi nhanh [1, 2]. Như được đề cập trong nhiều tài liệu nghiên cứu [3], Stewart platform bao gồm ba thành phần

chính: (1) một bộ cố định dùng để gắn kết hệ thống với các nền tảng cứng khác; (2) một bộ chuyển động sáu bậc tự do; (3) sáu chân truyền động dạng lăng trụ kết nối hai bộ này. Điều khiển Stewart platform được thực hiện thông qua việc điều chỉnh độ dịch chuyển của các chân truyền động, từ đó thay đổi vị trí và tư thế của bộ chuyển động.

Với cấu trúc song song, Stewart platform mang lại độ cứng vững cao, khả năng chịu tải lớn và phản hồi nhanh, giúp nó trở thành lựa chọn lý tưởng cho các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao như mô phỏng chuyển động trong ngành hàng không và ô tô [4] thực tế ảo và giải trí [5], cũng như các nghiên cứu liên ngành từ thiên văn học [6] đến y học [7]. Đặc biệt, nhờ vào cấu trúc đặc thù, Stewart platform có thể hoạt động hiệu quả trong các môi trường có điều kiện phức tạp, đảm bảo khả năng điều khiển chính xác ngay cả khi chịu tải động.

Stewart platform yêu cầu các thuật toán điều khiển tiên tiến để đảm bảo hệ thống theo dõi chính xác trạng thái mong muốn. Có hai hướng tiếp cận chính trong điều khiển Stewart platform: điều khiển dựa trên động học và điều khiển dựa trên động lực học. Điều khiển dựa trên động học tập trung vào việc xác định động học thuận và động học nghịch của hệ thống [8], sau đó tính toán tham số điều khiển cho các cơ cấu chấp hành dựa trên động học nghịch. Tuy nhiên, phương pháp này có thể gặp các vấn đề như xung đột giữa các bộ truyền động và độ chính xác giảm do không xét đến động lực học hệ thống [9, 10]. Do đó, điều khiển dựa trên động lực học thường được ưa chuộng trong các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao hơn, vì nó sử dụng các mô hình toán học như cơ học Lagrange [11] hoặc cơ học Newton [12] mô tả đầy đủ hành vi của hệ thống.

Các phương pháp điều khiển khác nhau đã được đề xuất để đảm bảo bộ chuyển động của Stewart platform có thể theo dõi chính xác trạng thái tham chiếu. Bộ điều khiển PID (Proportional-Integral-Derivative) được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống robot song song [13]. Bên cạnh đó, các phương pháp điều khiển như PD và LQR cũng được áp dụng để tối ưu hóa hiệu suất hệ thống [14]. Tuy nhiên, do bản chất phi tuyến của Stewart platform, các phương pháp điều khiển hiện đại như Active Disturbance Rejection Control (ADRC) [15] và Sliding Mode Control (SMC) [16] ngày càng được quan tâm do khả năng bù nhiễu và xử lý các bất định trong mô hình hệ thống.

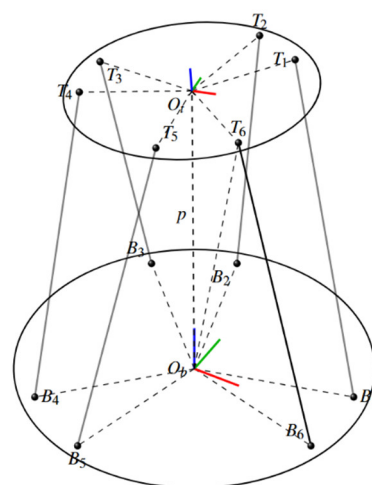
Do cấu trúc phức tạp, Stewart platform phải đối mặt với nhiều thách thức, bao gồm tác động của nhiễu, ma sát, cũng như sự thay đổi tải trọng trong quá trình vận hành. Chẳng hạn, trong các ứng dụng như mô phỏng chuyển động của phương tiện hoặc điều chỉnh tải trọng

không đối xứng, các đặc tính khối lượng và quán tính của bộ trên có thể thay đổi đáng kể. Những thay đổi này làm suy giảm hiệu suất điều khiển do mô hình cũ không còn phản ánh chính xác hệ thống. Để giải quyết vấn đề này, nghiên cứu này đề xuất một bộ quan sát trạng thái mở rộng (Extended State Observer - ESO) [17] nhằm ước lượng trạng thái hệ thống và bù nhiễu. Bằng cách này, bộ điều khiển có thể thích nghi với những thay đổi của tải trọng và đảm bảo hiệu suất điều khiển tối ưu.

Nghiên cứu này đóng góp vào việc nâng cao hiệu suất điều khiển Stewart platform theo các khía cạnh sau: 1) Xây dựng mô hình động học chi tiết, bao gồm động học thuận và nghịch, trong đó động học thuận được giải quyết thông qua một bài toán tối ưu hóa. Sau đó, mô hình động lực học được thiết lập dựa trên cơ học Lagrange; 2) Kết hợp giữa bộ điều khiển chế độ trượt (SMC), có tác dụng làm ổn định hệ thống, đảm bảo sai lệch bám tiến về 0, và bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO), để ước lượng trạng thái, nhiễu và tương tác giữa các thành phần trong hệ thống; 3) Thực hiện mô phỏng trên nền tảng Simscape của MathWorks để đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy của kết quả mô phỏng.

Bài báo được chia thành 5 phần. Phần 1 giới thiệu về mô hình Stewart platform và ứng dụng, đặt vấn đề và đóng góp của bài báo. Phần 2 đưa ra mô hình toán học mô tả chuyển động của hệ thống bằng cơ học Lagrange. Sau đó, kết quả chính của nghiên cứu - thuật toán điều khiển SMC-ESO được đề xuất trong phần 3. Phần 4 thực hiện mô phỏng dựa trên mô hình bán vật lý Simscape Multibody để đánh giá hiệu suất của bộ điều khiển đề xuất. Kết luận được đưa ra trong phần 5.

**2. MÔ HÌNH HÓA ROBOT SONG SONG 6 BẬC TỰ DO - STEWART PLATFORM**



Hình 1. Mô hình robot song song 6 bậc tự do Stewart Platform

Bệ Stewart là một cơ cấu robot song song với 6 bậc tự do (DOF), có khả năng hoạt động với độ chính xác cao và phản hồi nhanh. Hệ thống bao gồm một bộ cố định (gắn với hệ quy chiếu  $O_b$ ) và một bộ di động (gắn với hệ quy chiếu  $O_t$ ). Hai bộ này được kết nối thông qua 6 chân truyền động dạng trượt (prismatic joint) tại các điểm  $B_i$  và  $T_i$ . Vị trí và góc quay của bộ di động có thể được điều chỉnh bằng cách thay đổi độ dài của các chân truyền động.

**Phân tích động học.** Xét các đại lượng mô tả vị trí, góc quay của bộ di động và trạng thái của các chân truyền động  $P = [p_x \ p_y \ p_z]^T$  là vị trí của bộ Stewart trong không gian ba chiều, và  $\theta = [\theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^T$  là góc quay Euler của bộ di động. Độ dài và hướng của các chân được xác định thông qua:

$$L_j = \overline{B_j T_j} = T_j^{O_b} - B_j^{O_b} = T_j R(\theta) + P - B_j, \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

trong đó,  $B_i^{O_b} = B_i$  và  $T_i^{O_b}$  được tính thông qua ma trận quay  $R(\theta)$ .

Khi đó, phương trình động học nghịch của hệ thống có thể được biết dưới dạng sau:

$$(l_j)_{1 \leq j \leq 6} = \|(L_j)_{1 \leq j \leq 6}\| = f_{inv}(P, \theta)$$

Về động học thuận cho hệ thống, trạng thái của bộ di động có thể tìm được thông qua chiều dài của các chân bằng các tìm nghiệm của phương trình  $f_{inv}$ . Tuy nhiên, các nghiệm tường minh rất khó để tìm được. Do đó, bài báo này đề xuất sử dụng một phương pháp giải nghiệm gần đúng dựa trên bài toán tối ưu least square như sau:

$$(P^T, \theta^T)^T = f_{tw}((l_j)_{1 \leq j \leq 6}) = \underset{P, \theta}{\operatorname{argmin}} \|(l_j)_{1 \leq j \leq 6} - f_{inv}(P, \theta)\|$$

Bài toán tối ưu trên có thể giải một cách tương đối dễ dàng bằng các phương pháp như Gradient-Descent, Trust Region Method, hoặc Levenberg-Marquardt... [18].

**Phân tích động lực học.** Sử dụng phương pháp Euler-Lagrange, với hệ trục tọa độ tổng quát và tín hiệu điều khiển được chọn là:

$$x = [p_x \ p_y \ p_z \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^T \in \mathbb{R}^{6 \times 1} \quad (2)$$

$$F = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4 \ F_5 \ F_6]^T \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$$

Khi đó, phương trình động lực học được viết dưới dạng như sau:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = \tau, \quad \mathcal{L} = T - V \quad (3)$$

trong đó,  $T$  và  $V$  lần lượt là động năng và thế năng, còn  $\tau = F^T$  là lực tác động thông qua ma trận Jacobian. Hệ phương trình chuyển động được biểu diễn như sau:

$$M(x)\ddot{x} + C(x, \dot{x})\dot{x} + G(x) = J(x)^T F \quad (4)$$

trong đó,  $M(x)$  là ma trận quán tính,  $C(x, \dot{x})\dot{x}$  biểu diễn lực ly tâm và Coriolis,  $G(x)$  là vector lực trọng trường,  $J(x)$  là ma trận Jacobian.

**Phân tích năng lượng của hệ thống.** Để xây dựng được mô hình toán học của hệ thống, năng lượng của toàn hệ thống  $T$  và  $V$  có thể được xây dựng bằng việc đưa ra năng lượng của từng thành phần trong hệ thống, cụ thể, với mô hình Stewart platform, năng lượng của các chân và của bộ di động cần được đưa ra, dựa trên hệ trục tọa độ tổng quát. Đối với bộ di động, ta có  $K_u = K_{u(trans)} + K_{u(rot)}$ , trong đó,  $K_u$  là động năng của bộ,  $K_{u(trans)}$  và  $K_{u(rot)}$  lần lượt là động năng tịnh tiến và động năng quay. Động năng của hệ có thể viết được dưới dạng toàn phương như sau:

$$K_u = \frac{1}{2} \dot{x}^T M_u \dot{x} = \frac{1}{2} \dot{x}^T \begin{bmatrix} m_{1 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \Omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

với

$$\Omega = \begin{bmatrix} l_x c^2 \theta_z + l_y s^2 \theta_z & (l_x - l_y) c \theta_x c \theta_z s \theta_z & 0 \\ (l_x - l_y) c \theta_x c \theta_z s \theta_z & c^2 \theta_x (l_x s^2 \theta_z + l_y c^2 \theta_z) + l_z s^2 \theta_x & -l_z s^2 \theta_x \\ 0 & -l_z s^2 \theta_x & l_z \end{bmatrix}$$

và thế năng của bộ di động được biểu diễn bằng  $T_u = m \bar{g}^T x$ , với  $\bar{g} = [0 \ 0 \ g]^T$ .

Tương tự, động năng của các chân được tính tương tự ở dạng toàn phương như sau:

$$K_i = \frac{1}{2} \dot{x}^T M_i \dot{x},$$

$$M_i = (m_t + m_b) [J_2^T (\operatorname{diag}(h_i) \otimes I_3 - J_1^T \operatorname{diag}(k_i) J_1) J_2]$$

$$h_i = \left( \hat{l} + \frac{m_t}{m_b + m_t} \right)^2, \quad k_i = h_i - \frac{m_t}{m_t + m_b},$$

$$\hat{l} = \frac{2\delta m_b l_1 - m_t l_2}{2(m_t + m_b)} \quad (6)$$

trong đó,  $I_3$  là ma trận đơn vị có kích thước  $3 \times 3$ ;  $m$ ,  $l_x$ ,  $l_y$ ,  $l_z$  là khối lượng và mô men quán tính theo các trục của bộ di động;  $m_t$ ,  $m_b$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  theo thứ tự là khối lượng và chiều dài của phần trên và phần dưới của xy lanh;  $\delta$  là khoảng cách từ điểm dưới cùng đến trọng tâm của phần dưới xy lanh (do các cơ cấu thường đi liền với động cơ, có khối lượng đáng kể và làm lệch khối tâm của của phần dưới xy lanh). Bên cạnh đó, ma trận Jacobian được đưa ra chi tiết trong [18]. Và thế năng của các chân cũng có thể tính dễ dàng khi đã biết vị trí của từng chân:

$$V_l = (m_t + m_b) \sum_{i=1}^6 \bar{g}^T p_{i-leg}, \quad p_{i-leg} = \left( \hat{\ell} + \frac{m_t}{m_b + m_t} L_i \right) \frac{L_i}{\|L_i\|} \quad (7)$$

Khi đó, phương trình mô tả hệ thống được biểu diễn qua (4), trong đó  $M(x) = M_u + M_l$ ,  $G(x) = \frac{\partial(P_u + P_l)}{\partial x}$ ,  $J(x) = J_1 J_2$  và ma trận Coriolis tìm được bằng Christofel symbol [9, 18].

### 3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN CHẾ ĐỘ TRƯỢT (SMC) DỰA TRÊN BỘ QUAN SÁT TRẠNG THÁI MỞ RỘNG (ESO)

Trong phần này, các tác giả sẽ thiết kế bộ điều khiển chế độ trượt (Sliding Mode Control) đảm bảo bám quỹ đạo cho bộ di chuyển dựa trên phương trình trạng thái của hệ thống. Sau đó, bộ quan sát trạng thái mở rộng được sử dụng để quan sát vận tốc và nhiễu tổng của hệ thống, nhằm cải thiện chất lượng của bộ điều khiển SMC đã thiết kế. Trước hết, xem xét mô hình hệ thống được viết lại như sau với  $x_1 = x$  và  $x_2 = \dot{x}$ , bên cạnh đó, nhiễu  $D$  được bổ sung để thể hiện tính không chắc chắn của mô hình hóa. Dễ thấy, hệ thống trên có thành phần  $G(x_1)$  là ảnh hưởng của gia tốc trọng trường lên hệ thống. Nếu ta xem xét, gia tốc trọng trường này có thể bù bằng một tín hiệu điều khiển  $F_c = J^{-T}G(x)$  thì phương trình (4) trở thành:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -M(x_1)^{-1} \left( C(x_1, x_2)x_2 + D(t, x_1, x_2) \right) + M(x_1)^{-1} J^T F \end{aligned} \quad (8)$$

#### Thiết kế bộ điều khiển dựa trên chế độ trượt (Sliding Mode Control, SMC)

Giả sử rằng, yêu cầu mục tiêu điều khiển là đưa bộ di chuyển bám theo một giá trị đặt nào đó cho bởi  $x_r = x_{1r}$  và  $\dot{x}_r = x_{2r}$ , khi đó, sai lệch bám được biểu diễn như sau:

$$e_1 = x_1 - x_{1r} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}, \quad e_2 = x_2 - x_{2r} \in \mathbb{R}^{6 \times 1} \quad (9)$$

Định nghĩa biến trượt  $s$  và siêu mặt trượt  $S$  bởi:

$$s = (s_i)_{6 \times 1} = s_2 + ke_1, \quad S \triangleq \{e_1, e_2 \mid s = 0_{6 \times 1}\} \quad (10)$$

**Nhận xét 1:** Nếu tồn tại một luật điều khiển buộc biến trượt  $s$ , với một tham số xác định dương  $k$ , đạt đến mặt trượt  $S$  thì các giá trị sai số được định nghĩa trong (10) hội tụ về không.

Khi đó, luật điều khiển chế độ trượt có thể được tiếp cận dựa trên tiêu chuẩn ổn định Lyapunov bằng việc xem xét một hàm Lyapunov (Lyapunov candidate), cụ thể, trong trường hợp này, hàm Lyapunov được chọn ở dạng toàn phương của mặt trượt  $V(t) = \frac{1}{2} s^T s$ . Theo tiêu chuẩn

ổn định Lyapunov, để mặt trượt ổn định và hội tụ về 0,  $\dot{V} < 0$  với mọi  $s$ , do đó, nếu chọn  $\dot{V} = -p|s| - qs^2$ ,  $p, q > 0$  (hoặc cũng có thể chọn khác hàm khác, đảm bảo đạo hàm của  $V$  nhỏ hơn 0 với mọi  $s$ ), ta có tín hiệu điều khiển cho hệ thống như sau:

$$F = b(x_1, x_2)^{-1} \begin{pmatrix} x_{2r} - f(x_1, x_2) - d(t, x_1, x_2) \\ -ke_2 - psign(s) - qs \end{pmatrix} \quad (11)$$

với  $f(x_1, x_2) = -M(x_1)^{-1}(C(x_1, x_2)x_2 + G(x_1))$ , và  $b(x_1, x_2) = M^{-1}(x_1)J^T$ . Khi đó, với tín hiệu điều khiển được đề xuất trong (15), ta có từng phần tử trong siêu mặt trượt  $s$  tiến về 0. Do đó, sai lệch của hệ thống cũng tiến về 0, khi  $t \rightarrow \infty$  [19].

**Nhận xét 2:** Có thể thấy rằng, luật điều khiển đưa ra trong (11) phụ thuộc vào thành phần  $d$  - thành phần nhiễu, không được mô hình hóa. Do đó, việc xác định  $d$  là cần thiết để đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định dưới thành phần không chắc chắn của mô hình. Thêm vào đó, việc xác định thành phần  $x_2$  cũng không đơn giản, do thành phần đạo hàm trong thực tế rất nhạy cảm với nhiễu. Do đó, để giải quyết hai vấn đề trên, trong phần sau, một bộ quan sát trạng thái mở rộng sẽ được đề xuất để ước lượng thành phần nhiễu không chắc chắn và quan sát vận tốc của hệ thống.

**Thiết kế bộ quan sát trạng thái mở rộng (Extended State Observer).** Xem xét hệ động lực học cho bởi phương trình (11), theo [17], ta có cấu trúc bộ quan sát trạng thái mở rộng (tuyến tính) như sau:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + \frac{\alpha_1}{\epsilon} (x_1 - \hat{x}_1); \quad \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 + \frac{\alpha_2}{\epsilon^2} (x_1 - \hat{x}_1) + bF; \\ \dot{\hat{x}}_3 &= \frac{\alpha_3}{\epsilon^3} (x_1 - \hat{x}_1) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{với } \alpha_1, \alpha_2 \text{ và } \alpha_3 \text{ thỏa mãn } \alpha = \begin{bmatrix} -\alpha_1 I_{6 \times 6} & I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ -\alpha_2 I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & I_{6 \times 6} \\ -\alpha_3 I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix} \text{ có}$$

các giá trị riêng nằm bên trái trục ảo và tham số  $\epsilon$  đủ bé. Khi đó, mô hình (12) có thể được viết lại như sau với  $E = [0_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 6} \quad I_{6 \times 6}]^T$

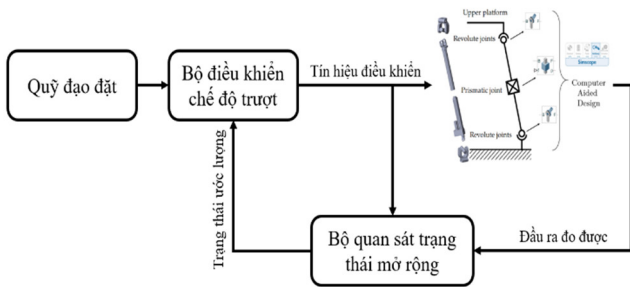
$$\epsilon \dot{\delta} = \alpha \delta + \epsilon E \left( f(x_1, x_2) + d(t, x_1, x_2) \right) \quad (13)$$

trong mô hình bộ quan sát trạng thái mở rộng này,  $\hat{x}_1$  là giá trị quan sát được của  $x_1$ ,  $\hat{x}_2$  là giá trị quan sát được của  $x_2$ , và  $\hat{x}_3$  là giá trị quan sát được của thành phần "nhiễu tổng"  $f(x_1, x_2) + d(t, x_1, x_2)$ . Chúng minh ổn định của bộ quan sát trạng thái mở rộng có thể tìm thấy trong

tài liệu [17]. Khi đó, thay kết quả ước lượng được vào (13), ta được luật điều khiển chế độ trượt dựa trên bộ quan sát trạng thái mở rộng như sau, với  $\hat{e}_1, \hat{s}$  là các giá trị ước lượng tương ứng của  $e_1, s$ :

$$F = b(\hat{x}_1, \hat{x}_2)^{-1}(x_{2r} - \hat{x}_3 - k\hat{e}_2 - p\text{sign}(\hat{s}) - q\hat{s}) \quad (14)$$

Như thế, cấu trúc điều khiển của hệ thống có thể tổng quát lại trong hình 2.



Hình 2. Cấu trúc điều khiển kết hợp giữa SMC và ESO

#### 4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG DỰA TRÊN MÔ HÌNH BÁN VẬT LÝ

Trong phần này, thuật toán điều khiển và quan sát được kiểm chứng qua mô phỏng dựa trên mô hình bán vật lý (Simscape Multibody), như trong hình 2. Các thông số chi tiết về động học và động lực học của hệ thống có thể tìm được trong phần Simulation của bài báo [18]. Bên cạnh đó, thông số được cài đặt cho bộ điều khiển bao gồm  $k = 20.I_6, p = q = \text{diag}(5, 5, 5, 20, 20, 20)$  và bộ quan sát bao gồm  $\epsilon = 0,05, \alpha_1 = 3, \alpha_2 = 3$  và  $\alpha_3 = 3$ .

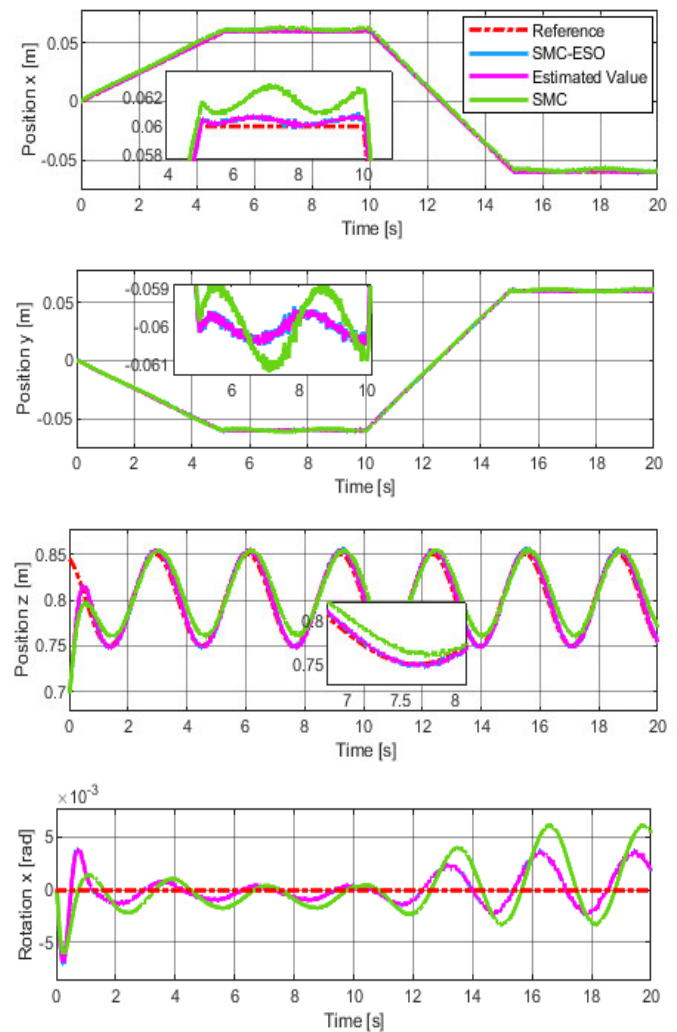
**Nhận xét:** Về các tham số của bộ điều khiển và bộ quan sát ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển. Về tham số  $k$  của bộ điều khiển, nó ảnh hưởng đến tốc độ hội tụ về 0 của biến trạng thái, khi mà biến trượt đã tiến về mặt trượt, trong khi  $p$  và  $q$  ảnh hưởng lớn đến tốc độ tiến về mặt trượt của biến trượt. Về các tham số của bộ quan sát, các tham số  $\alpha_1, \alpha_2$  và  $\alpha_3$  cần được chọn để thỏa mãn Hurwitz của ma trận  $a$ . Tốc độ hội tụ sẽ phụ thuộc vào độ lớn của giá trị riêng của ma trận  $a$  cũng như tham số độ lợi  $\epsilon$ .

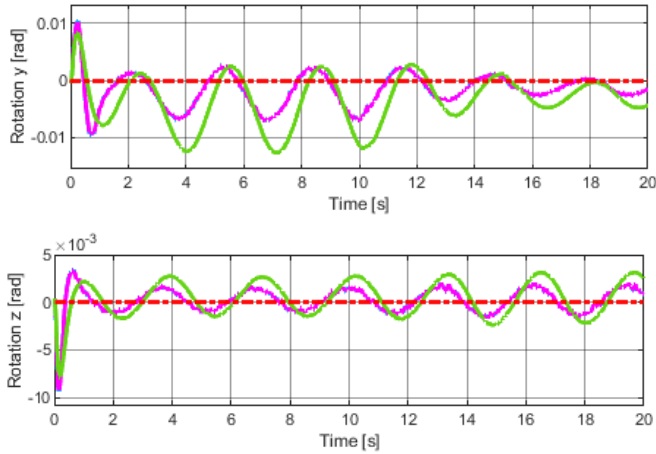
Trong kịch bản mô phỏng dưới, các tín hiệu đo được giả sử là có nhiễu ngẫu nhiên Gauss, bên cạnh đó, thành phần nhiễu  $d$  được đặt ngẫu nhiên bằng cách đưa ngẫu nhiên các thành phần ma sát nhớt vào các khớp trong mô hình bán vật lý, khối lượng và mô men quán tính của bệ di chuyển cũng được chọn ngẫu nhiên để thể hiện tính không chắc chắn của mô hình điều khiển.

Kết quả mô phỏng được thể hiện trong hình 3 và 4, minh họa rõ ràng khả năng bám theo tín hiệu đặt của cả

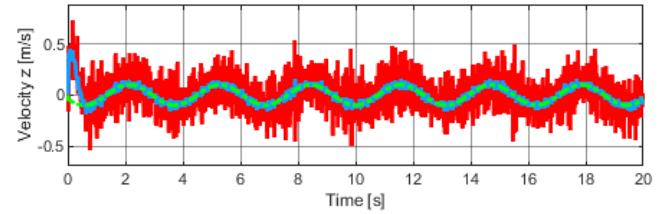
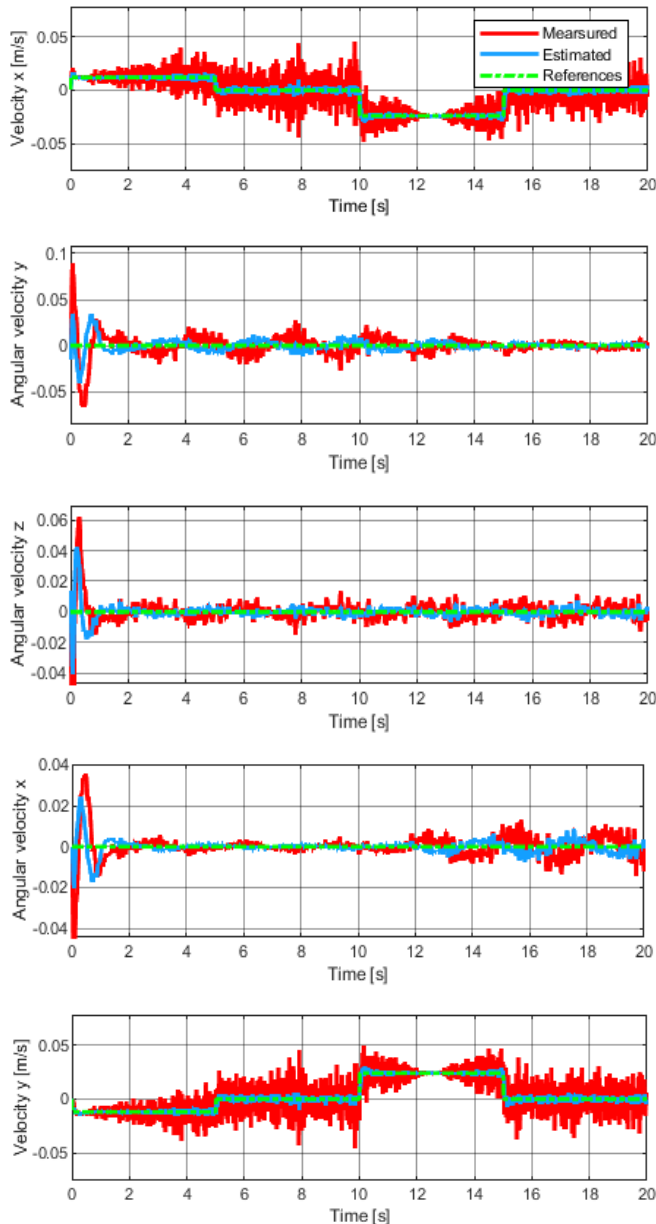
hai bộ điều khiển: SMC cơ bản và SMC-ESO. Có thể thấy rằng, mặc dù cả hai bộ điều khiển đều đạt được mục tiêu điều khiển, nhưng sự khác biệt về hiệu suất là đáng kể. Cụ thể, bộ điều khiển SMC-ESO được đề xuất không chỉ giúp hệ thống hội tụ nhanh hơn mà còn giảm thiểu đáng kể sai lệch trong quá trình vận hành so với bộ điều khiển SMC truyền thống. Điều này được thể hiện rõ trong đáp ứng vị trí ở hình 3, khi mà sai số theo dõi của SMC-ESO nhỏ hơn đáng kể so với SMC thông thường.

Một điểm đặc biệt quan trọng của bộ điều khiển SMC-ESO là khả năng quan sát và ước lượng trạng thái của hệ thống thông qua bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO). ESO không chỉ có khả năng ước lượng chính xác cả vị trí và vận tốc của hệ thống mà còn đóng vai trò như một bộ lọc hiệu quả, giúp loại bỏ các nhiễu tác động đến hệ thống. Điều này góp phần cải thiện chất lượng điều khiển tổng thể, đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định hơn ngay cả trong điều kiện có nhiễu và bất định. Hiệu quả của ESO được minh chứng rõ ràng trong đáp ứng quan sát vị trí ở hình 3 và đáp ứng quan sát vận tốc ở hình 4.





Hình 3. Đáp ứng vị trí của robot Stewart platform dưới tác động của bộ điều khiển SMC truyền thống và SMC kết hợp với bộ quan sát ESO



Hình 4. Đáp ứng của bộ quan sát trạng thái mở rộng trong việc quan sát vận tốc và bám vận tốc đặt

### 5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đề xuất và phân tích một phương pháp điều khiển nâng cao cho Stewart platform, kết hợp giữa bộ điều khiển chế độ trượt (SMC) và bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO). Kết quả mô phỏng cho thấy rằng phương pháp đề xuất không chỉ giúp hệ thống bám sát tín hiệu đặt với độ chính xác cao mà còn cải thiện đáng kể khả năng thích nghi với các yếu tố bất định và nhiễu động. So với phương pháp SMC truyền thống, bộ điều khiển SMC-ESO có tốc độ hội tụ nhanh hơn và sai lệch nhỏ hơn, góp phần nâng cao hiệu suất tổng thể của hệ thống. Một điểm nổi bật của nghiên cứu này là việc áp dụng ESO để ước lượng trạng thái và bù nhiễu, giúp Stewart platform hoạt động ổn định ngay cả trong điều kiện tải trọng thay đổi hoặc chịu tác động của nhiễu bên ngoài. Điều này đặc biệt quan trọng trong các ứng dụng thực tế, nơi mà đặc tính động lực học của hệ thống có thể biến đổi liên tục. Bên cạnh đó, nghiên cứu đã xây dựng một mô hình động học và động lực học chi tiết, đồng thời triển khai mô phỏng trên nền tảng Simscape để kiểm chứng tính hiệu quả của phương pháp điều khiển. Kết quả mô phỏng khẳng định rằng sự kết hợp giữa SMC và ESO là một hướng tiếp cận khả thi, giúp nâng cao độ chính xác, độ tin cậy cũng như khả năng thích ứng của hệ thống điều khiển Stewart platform.

Về nhược điểm của phương pháp này, bộ điều khiển SMC kết hợp với bộ ESO chỉ có thể bền vững với những thành phần bất định nhỏ, như là nhiễu đo lường hoặc là các sai số không đáng kể trong mô hình. Đối với những thành phần bất định lớn hơn, như là có sự thay đổi lớn về tải, sẽ tồn tại những sai lệch tĩnh, và nó trở nên đáng kể khi khối lượng của tải tăng. Tham khảo tài liệu [19] để xem những phân tích về đáp ứng thay đổi tải trọng của bộ điều khiển SMC.

Trong tương lai, nghiên cứu có thể được mở rộng theo hai hướng chính. Thứ nhất, triển khai kiểm chứng trên hệ thống thực tế để đánh giá hiệu suất điều khiển trong điều kiện vận hành thực. Thứ hai, kết hợp các thuật toán điều khiển thông minh, chẳng hạn như điều khiển thích nghi

hoặc học máy, nhằm tối ưu hóa hơn nữa khả năng tự động hiệu chỉnh của hệ thống trong môi trường có nhiều yếu tố bất định.

### LỜI CẢM ƠN

Vũ Đức Cường được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2024.ThS.11.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom," in *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, 180, 1, 371-386, 1965.
- [2]. H. D. Taghirad, *Parallel robots: mechanics and control*. CRC press, 2013.
- [3]. D. Zhang, *Parallel robotic machine tools*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [4]. P. V. Lukianov, V. V. Kabanyachyi, "Mathematical model of stable equilibrium operation of the flight simulator based on the Stewart platform," *Aviation*, 27, 2, 119-128, 2023.
- [5]. K. Herbuś, P. Ociepa, "Integration of the virtual model of a Stewart platform with the avatar of a vehicle in a virtual reality," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 42018, 2016.
- [6]. G. Kazezkhan, B. Xiang, N. Wang, A. Yusup, "Dynamic modeling of the Stewart platform for the NanShan Radio Telescope," *Advances in Mechanical Engineering*, 12, 7, 1687814020940072, 2020.
- [7]. V. Patel, S. Krishnan, A. Goncalves, K. Goldberg, "SPRK: A low-cost Stewart platform for motion study in surgical robotics," in *2018 International Symposium on Medical Robotics (ISMR)*, 1-6, 2018.
- [8]. R. V. Petrescu, R. Aversa, A. Apicella, S. Kozaitis, T. Abu-Lebdeh, -F. I. Petrescu, "Inverse kinematics of a Stewart platform," *Journal of Mechatronics and Robotics*, 2, 1, 45-59, 2018.
- [9]. G. Leuret, K. Liu, F. L. Lewis, "Dynamic analysis and control of a Stewart platform manipulator," *J Robot Syst*, 10, 5, 629-655, 1993.
- [10]. K. Liu, J. M. Fitzgerald, F. L. Lewis, "Kinematic analysis of a Stewart platform manipulator," *IEEE Transactions on industrial electronics*, 40, 2, 282-293, 1993.
- [11]. D. Li, S. E. Salcudean, "Modeling, simulation, and control of a hydraulic Stewart platform," in *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, 3360-3366, 1977.
- [12]. B. Dasgupta, T. S. Mruthyunjaya, "A Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator," *Mech Mach Theory*, 33, 8, pp. 1135-1152, 1998.
- [13]. M. Taghizadeh, M. Javad Yarmohammadi, "Development of a self-tuning PID controller on hydraulically actuated Stewart platform stabilizer with base excitation," *Int J Control Autom Syst*, 16, 2990-2999, 2018.

[14]. E. Akgül, *PID and LQR control of a planar head stabilization platform*. Middle East Technical University, 2011.

[15]. H. Wu, et al., "A Control Algorithm of Active Wave Compensation System Based on the Stewart Platform," *Journal of Physics: Conference Series*, 12040, 2023.

[16]. Y. Zhou, J. She, F. Wang, M. Iwasaki, "Disturbance rejection for Stewart platform based on integration of equivalent-input-disturbance and sliding-mode control methods," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023.

[17]. B. Z. Guo, Z. Zhao, "On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty," *Syst Control Lett*, 60, 6, 420-430, 2011. doi: 10.1016/j.sysconle.2011.03.008.

[18]. D. C. Vu, T. L. Nguyen, D. H. Nguyen, "A novel approach of Consensus-based Finite-time Distributed Sliding Mode Control for Stewart platform manipulators motion tracking," *Results in Engineering*, 25, 103872, 2025. doi: 10.1016/j.rineng.2024.103872.

[19]. T. K. Tran, D. C. Vu, D. H. Nguyen, T. L. Nguyen, T. K. Nguyen, and V. Nguyen, "Load adaptive sliding mode control for 6-degree-of-freedom parallel robot system Stewart platform," *Journal of Measurement, Control, and Automation*, vol. 29, no. 2, pp. 1-8, Jun. 2025.

### AUTHORS INFORMATION

**Tran Trung Kien<sup>1</sup>, Vu Duc Cuong<sup>2</sup>, Nguyen Tung Lam<sup>2</sup>,  
Nguyen Trung Kien<sup>3</sup>, Nguyen Vu<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Academy of Military Science and Technology, Vietnam

<sup>2</sup>Motion Control and Applied Robotics Laboratory, School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

<sup>3</sup>Academy of Military Science and Technology, Vietnam