

Điều khiển trượt thích nghi tải cho hệ robot song song 6 bậc tự do Stewart platform

Load adaptive sliding mode control for 6-degree-of-freedom parallel robot system Stewart platform

Trần Trung Kiên¹, Vũ Đức Cường², Nguyễn Danh Huy², Nguyễn Tùng Lâm², Nguyễn Trung Kiên³ and Nguyễn Vũ³

¹Viện Tự động hóa Kỹ thuật Quân sự

²PTN Điều khiển chuyển động và robot ứng dụng (MoCAR), Trường Điện – Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội

³Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

*Corresponding author E-mail: vutudonghoa@yahoo.com.vn

DOI: <https://doi.org/10.64032/mca.v29i2.257>

Abstract

The Gough-Stewart platform, also known as the Stewart platform, is a six-degree-of-freedom parallel robot with a complex interaction structure. It is widely used in applications requiring high precision and fast response, such as vehicle simulation, automobile, ship, and boat, as well as aerospace and medical. As a result, dealing with load changes during operation might lead the system to lose its high accuracy when using dynamic-based control models. To address this issue, this work begins with employing sliding mode control, a commonly utilized method for controlling high-order nonlinear systems. Then, for estimating the moving platform's mass and moment of inertia, an adaptive load management strategy for the system is introduced. To objectively demonstrate the proposed control structure's effectiveness, simulations are performed on the quasi-physical, Simscape simulation platform, provided by MATLAB. The simulation results demonstrate the outweigh performance of the proposed adaptive structure.

Keywords: Stewart platform; Sliding Mode Control; Load adaptive control; High precision control

Symbols

Symbols	Units	Description
m_u	kg	khối lượng bộ di chuyển
m_t	kg	khối lượng chân gắn với bộ di chuyển
m_b	kg	khối lượng chân gắn với bộ cố định
l_1	m	chiều dài chân gắn với bộ cố định
l_2	m	chiều dài chân gắn với bộ di chuyển
δ	m	khoảng cách từ điểm xoay đến trọng tâm chân gắn với bộ cố định
J_x, J_y, J_z	kgm ²	mô men quán tính bộ di chuyển
T_j	m	điểm kết nối với chân trên bộ di chuyển
B_j	m	điểm kết nối với chân dưới bộ cố định
F_j	N	lực phát động của các khớp trượt
L_j	N	vector hướng và độ lớn của chân
p_x, p_y, p_z	m	vị trí bộ di chuyển
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	rad	góc hướng bộ di chuyển
g	ms ⁻²	gia tốc trọng trường

Tóm tắt

Gough-Stewart platform, còn được gọi là Stewart platform, là một robot song song sáu bậc tự do với cấu trúc xen kẽ phức tạp được ứng dụng rộng rãi trong những yêu cầu đòi hỏi độ chính xác cao và đáp ứng nhanh như là ứng dụng trong mô phỏng phương tiện, ô tô, tàu, thuyền, cho đến các ứng dụng trong hàng không vũ trụ và y tế.

Do đó, việc đối mặt với vấn đề thay đổi về tải trọng trong quá trình hoạt động có thể làm mất tính chính xác của hệ thống này khi dựa vào những mô hình điều khiển động lực học không có tính thích nghi. Để giải quyết vấn đề này, nghiên cứu này tiếp cận điều khiển mô hình robot Stewart platform theo phương pháp điều khiển chế độ trượt, được sử dụng rộng rãi với các hệ phi tuyến mạnh. Sau đó, cung cấp một chiến lược điều khiển thích nghi tải trọng cho hệ thống qua việc ước lượng các tham số về khối lượng và mô men quán tính của bộ di chuyển. Để chứng minh hiệu quả của cấu trúc điều khiển đề xuất một cách khách quan, các mô phỏng được thực hiện trên nền tảng mô phỏng bán vật lý Simscape, được cung cấp bởi MATLAB. Các kết quả mô phỏng chứng minh hiệu quả vượt trội của cấu trúc thích nghi đề xuất.

1. Đặt vấn đề

Gough-Stewart platform, còn được gọi là Stewart platform, là một loại robot song song phức tạp có 6 bậc tự do (DOF) [1]. Cấu tạo của robot bao gồm 3 phần chính: 1) một bộ cố định để cố định hệ thống; 2) một bộ di động với 6 bậc tự do, được kết nối bởi 3) sáu chân khớp trượt có khả năng thay đổi chiều dài. Trong bối cảnh này của Stewart platform, vị trí và góc quay của bộ di động có thể được điều khiển bằng cách điều chỉnh sự di chuyển của các chân. Do cấu trúc song song, robot Stewart nói riêng, và các hệ thống điều khiển song song nói chung, thường được sử dụng trong các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao và phản hồi nhanh. Ví dụ, [2] đã ứng dụng Stewart platform trong

việc mô phỏng chuyển động cho các phương tiện như là ô tô hoặc máy bay. Hơn nữa, nó còn được ứng dụng trong thực tế ảo và giải trí [3]. Bên cạnh đó, Stewart platform có thể được ứng dụng trong các nghiên cứu liên ngành, từ thiên văn học [4] đến y học [5].

Về khía cạnh điều khiển, mục tiêu điều khiển của robot Stewart platform là điều khiển trạng thái của nó - bao gồm hướng và vị trí - bám theo giá trị đặt với sai số nhỏ nhất có thể. Do đó, có hai loại phương pháp điều khiển cho Stewart platform: 1) điều khiển dựa trên động học và 2) điều khiển dựa trên động lực học. Thứ nhất, phương pháp điều khiển dựa trên động học yêu cầu xác định động học thuận và nghịch của hệ thống [6]. Sau đó, các cơ cấu chấp hành sẽ bám theo kết quả tính toán động học nghịch, là độ dài tham chiếu cho mỗi chân. Tuy nhiên, phương pháp điều khiển này có thể gặp một số vấn đề như xung đột giữa các cơ cấu chấp hành và độ chính xác giảm do sai lệch trong tính toán động học. Vì vậy, điều khiển dựa trên động lực học được ưu tiên sử dụng trong các trường hợp yêu cầu độ chính xác cao và tốc độ đáp ứng nhanh. Khác với điều khiển dựa trên động học, phương pháp điều khiển dựa trên động lực học đòi hỏi khối lượng tính toán lớn về toán học và vật lý. Khi đó, Stewart platform được phân tích thông qua phương trình vi phân bậc hai [7], [8]. Điều này cho phép mô tả hành vi của hệ thống chính xác hơn và đảm bảo rằng điều khiển dựa trên mô hình ổn định và giảm thiểu sai số.

Nhiều chiến lược điều khiển đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước đó để điều khiển trạng thái của bộ di động bám trạng thái tham chiếu dưới mô hình động lực học. Một trong những chiến lược điều khiển cổ điển với hiệu suất tốt, PID (điều khiển tỷ lệ-tích phân-đạo hàm), được đưa ra trong rộng rãi [9]. Cụ thể hơn, trong [10] có trình bày hai phương pháp điều khiển PD (tỷ lệ-đạo hàm) cho các robot song song trong 2 không gian mô hình động lực học: 1) trong không gian của end-effector (task space), với vị trí và hướng của bộ di động là các biến trạng thái [11], và 2) trong không gian của các chân, với độ dịch chuyển của cơ cấu chấp hành được sử dụng để mô tả hệ thống [12]. Để tối ưu các tham số của bộ điều khiển PD, góc nhìn của điều khiển tuyến tính tối ưu (LQR, LQG) [13], [14] các tham số có thể được xác định bằng cách tối ưu hóa hàm chi phí bậc hai của các trạng thái và tín hiệu điều khiển dưới các trọng số kèm theo. Với sự phát triển của tính toán số trong những năm gần đây, các kỹ thuật điều khiển robot tiên tiến được áp dụng rộng rãi để phù hợp với các hệ phi tuyến mạnh như Stewart platform. Ví dụ, trong [15], [16], phương pháp điều khiển chống nhiễu chủ động (ADRC) là một phương pháp điều khiển PD nâng cao, đã được sử dụng rộng rãi để bù nhiễu và các thành phần bất định trong mô hình và đo lường. Hơn nữa, cho các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao và phản hồi nhanh, trong các nghiên cứu [17], [18] đã trình bày phương pháp điều khiển chế độ trượt (SMC) dựa trên mô hình. SMC đã trở nên phổ biến trong những năm gần đây vì khả năng xử lý các yếu tố không chắc chắn và phi tuyến hiện diện trong động lực học của Stewart platform, đồng thời duy trì tính ổn định và sự bền vững dưới sự thay đổi của môi trường và nhiễu. Hơn nữa, chiến lược chế độ trượt có lợi thế lớn ở khả năng dễ dàng cải tiến và kết hợp với các phương pháp khác để thích nghi, và bù nhiễu [19], hoặc phát hiện lỗi [16].

Như đã đề cập ở trên, Stewart platform được ứng dụng trong các ứng dụng yêu cầu có tải trọng, do đó, nó có thể đối mặt với thay đổi tải trọng trong quá trình làm việc. Cụ thể hơn, trong các ứng dụng liên quan đến các mô phỏng phương tiện, nâng

tải, khi đó thuộc tính tải trọng, khối lượng và mô men quán tính, có thể thay đổi trong quá trình hoạt động, các thuộc tính của bộ di chuyển có thể thay đổi bởi khối lượng và mô men quán tính. Hệ quả là, khi tải trọng thay đổi, mô hình mô tả cũ trở nên lỗi thời, dẫn đến giảm hiệu suất điều khiển đáng kể. Trong điều khiển chế độ trượt, ta đã biết rằng đây là chiến lược điều khiển dựa trên mô hình, nghĩa là tín hiệu điều khiển phụ thuộc vào các tham số mô hình, bao gồm khối lượng và mô men quán tính của tải trọng. Để giải quyết vấn đề này, một mô hình thích nghi được trình bày trong công bố này. Cụ thể hơn, dựa trên cấu trúc vốn có của bộ điều khiển chế độ trượt (SMC), được thể hiện dựa trên mô hình động lực học của hệ thống, liên quan chặt chẽ và mật thiết với các thuộc tính cơ học (khối lượng, mô men quán tính), các tác giả đề xuất một tín hiệu điều khiển dựa các giá trị ước lượng được của khối lượng và mô men quán tính. Saaddos, các tác giả đề xuất một luật cập nhật cho các giá trị ước lượng của các thuộc tính cơ học này. Luật tiếp cận này được chứng minh ổn định dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov.

Thêm vào đó, để đánh giá một cách khách quan hiệu suất cũng như tính đúng đắn của bộ điều khiển được đề xuất, các tác giả xây dựng mô hình bán vật lý (Quasi-Physical Model) của Stewart platform. Mô hình bán vật lý được xây dựng trên nền tảng MATLAB/Simulink bằng việc sử dụng Simscape Multibody Toolbox. Với công cụ này, bằng việc thiết lập những khớp nối, khớp chuyển động và cơ cấu chấp hành của robot, ta có thể mô hình hóa robot một cách trực quan và thể hiện được gần đúng những đáp ứng của robot so với thực tế.

Đóng góp của công trình:

1. Cung cấp một thuật toán thích nghi tải dựa trên kỹ thuật điều khiển mặt trượt để xác định thuộc tính tải, và đáp ứng với những thay đổi của tải trong quá trình hoạt động.
2. Đưa ra các mô phỏng dựa trên mô hình bán vật lý (Simscape - MATLAB) để kiểm chứng hiệu quả của chiến lược điều khiển được đề xuất. Kết quả được so sánh với cách tiếp cận điều khiển chế độ trượt truyền thống.

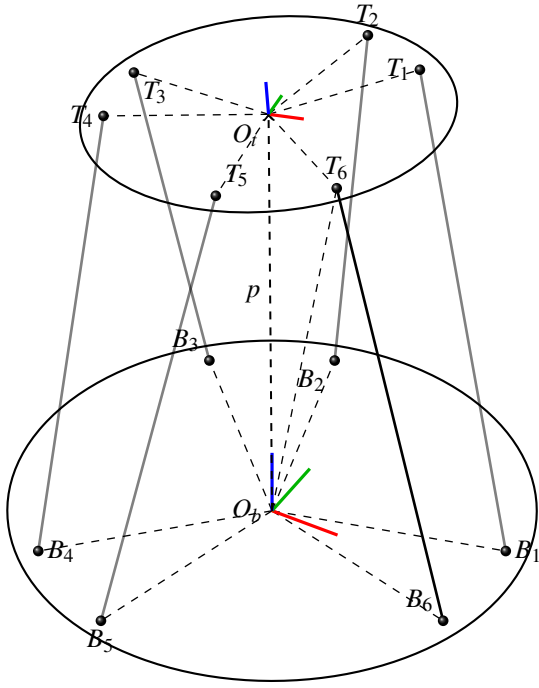
Bài nghiên cứu này gồm năm phần. Phần đầu tiên là phần giới thiệu. Trong phần tiếp theo, chúng tôi đưa ra mô hình toán học của Stewart platform một cách chi tiết. Các kết quả chính được phân tích trong phần thứ ba. Phần 4 triển khai mô phỏng bán vật lý và kết luận được thể hiện trong phần cuối cùng.

2. Mô hình hóa hệ thống Stewart platform

Stewart platform là một robot song song 6 bậc tự do (DOF) phức tạp, hoạt động với độ chính xác cao và phản hồi nhanh (như trong Hình 1), bao gồm một bộ cố định (được gắn với hệ quy chiếu O_b) và một bộ di động (được gắn với hệ quy chiếu O_t). Bộ cố định và bộ di chuyển được kết nối bởi 6 chân là 6 khớp truyền động dạng trượt (prismatic joint) tại các điểm B_i và T_i . Khi đó, vị trí và góc quay của bộ di chuyển có thể được điều khiển bằng việc thay đổi độ dài các khớp trượt. Trước hết, ta cần có các giả định như sau:

Giả định 1. Bộ cố định được gắn trên hệ quy chiếu quán tính

Giả định 2. Ma sát tại các khớp quay tại các điểm kết nối giữa chân và bộ trên, bộ dưới đủ nhỏ, có thể bỏ qua.



Hình 1: Mô hình robot Gough-Stewart platform

2.1. Động học

Khi xem xét các robot nói chung và robot song song nói riêng, các đề về động học cần phải xem xét một cách kỹ lưỡng. Trước hết, định nghĩa các biến thể hiện vị trí, góc quay của bộ trên, và trạng thái của các chân, được quyết định bởi chiều dài của chân như sau:

$$P = [p_x \quad p_y \quad p_z]^T \quad (1)$$

là vị trí của Stewart platform trong không gian 3 chiều với hệ quy chiếu gắn với bộ cố định,

$$\theta = [\theta_x \quad \theta_y \quad \theta_z]^T \quad (2)$$

là góc quay Euler của bộ di chuyển. Khi đó, dưới ràng buộc về động học của hệ thống, véc tơ độ lớn và hướng của các chân được đưa ra như sau

$$\overrightarrow{B_j T_j} = T_j^{O_b} - B_j^{O_b}, \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (3)$$

với $B_i^{O_b} = B_i$ và $T_i^{O_b}$ được tính qua ma trận quay tương ứng của góc quay $R(\theta)$ và vị trí của bộ di chuyển P . Khi đó, phương trình động học ngược của Stewart platform (3) có thể viết thành

$$\overrightarrow{B_j T_j} = L_j = T_j R(\theta) + P - B_j = f_{inv}(P, \theta), \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

trong đó L_j là vector độ lớn và hướng của các chân, cụ thể $l_j = \|L_j\|$ là độ dài và $u_j = L_j/l_j$ là hướng của các chân. Khi đó, động học thuận của hệ thống được đưa ra như sau

$$x = [P^T \quad \theta^T]^T = f_{inv}^{-1}(L_j), \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (5)$$

Do sự phức tạp của việc tìm hàm ngược của f_{inv} , ta có thể xấp xỉ kết quả động học ngược bằng các phương pháp giải tối ưu dựa trên các thuật toán giải số như Gradient-Descent hoặc Levenberg-Marquardt khi khái quát hóa bài toán tối ưu là

$$x^* = \operatorname{argmin}_x (f_{inv}(x) - L) \quad | \quad x \in \mathcal{X} \quad (6)$$

2.2. Động lực học

Động lực học chi tiết của hệ Stewart platform được đưa ra trong rất nhiều các tài liệu dựa trên phương pháp Euler-Lagrange [20] bằng việc xem xét hàm Lagrange như sau

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = \tau; \quad \mathcal{L} = T - V \quad (7)$$

với T và V lần lượt là tổng động năng (T_u : tổng động năng của phần bộ di chuyển và T_l tổng động năng của các chân) và tổng thế năng của hệ (V_u : tổng thế năng của phần bộ di chuyển và V_l tổng thế năng của các chân), và x là biến trạng thái bao gồm vị trí và hướng của bộ di chuyển, thành phần $\tau = J^T F$ là lực và mô men tác động lên bộ di chuyển được tính qua ma trận Jacobian và lực cung cấp vào 6 chân, $F = (F_j)_{6 \times 1}$. Khi đó, mô hình không gian trạng thái của Stewart platform được viết dưới dạng ma trận như sau

$$M(x)\ddot{x} + C(x, \dot{x})\dot{x} + G(x) = J(x)^T F \quad (8)$$

trong đó $M(x) = M_u + M_l$; $C(x, \dot{x})\dot{x} = \dot{M}\dot{x} - \frac{\partial(T_u + T_l)}{\partial q}$; $G(x) = \frac{\partial(V_u + V_l)}{\partial x} = G_u(x) + G_l(x)$; $J(x) = J_1 J_2$. Chi tiết được cung cấp ở bên dưới.

Nhận xét 1. Đã được đề cập trong [20], $\partial T_l / \partial \dot{x}$ đại diện cho thành phần Coriolis trong phương trình chuyển động của hệ thống rất khó để tính toán. Điều này xảy ra do tính xen kẽ mạnh giữa các chân. Hơn nữa, trong các ứng dụng của Stewart platform, thành phần này chỉ ảnh hưởng nhỏ đến hệ thống nên có thể được bỏ qua.

3. Điều khiển thích nghi tải cho Stewart platform

Trong phần này, thuật toán điều khiển thích nghi tải được đưa ra dựa trên cách tiếp cận của luật điều khiển chế độ trượt.

3.1. Tiếp cận dựa trên điều khiển chế độ trượt (SMC)

Trước hết, phương trình chuyển động của hệ Stewart platform có thể được viết dưới dạng hệ phương trình vi phân bậc nhất bằng cách đặt $x_1 = x$ and $x_2 = \dot{x}$, khi đó

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -M(x_1)^{-1} \left(C(x_1, x_2)x_2 + G(x_1) \right) + M(x_1)^{-1} J^T F \end{aligned} \quad (9)$$

Giả sử rằng, mục tiêu điều khiển của hệ thống Stewart platform yêu cầu bám theo các giá trị đặt của vị trí và vận tốc của các biến trạng thái $x_r = x_{1r}$ and $\dot{x}_r = x_{2r}$, khi đó, sai lệch được biểu diễn qua

$$e_1 = x_1 - x_{1r} \in \mathbb{R}^{6 \times 1} \quad (10)$$

$$e_2 = x_2 - x_{2r} \in \mathbb{R}^{6 \times 1} \quad (11)$$

Tiếp cận SMC theo cách đơn giản, ta định nghĩa biến trượt s_i , và chọn $k_i > 0$ của ma trận đường chéo k , với siêu mặt trượt S

$$s = (s_i)_{6 \times 1} = e_2 + k e_1 \quad (12)$$

$$S \triangleq \{e_1, e_2 | s = 0_{6 \times 1}\} \quad (13)$$

Khi đó, ta có nhận xét sau:

$$M_u = \begin{bmatrix} m_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_u & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_x \cos^2 \theta_z + J_y \sin^2 \theta_z & \cos \theta_x \cos \theta_z \sin \theta_z J_x - J_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta_x \cos \theta_z \sin \theta_z J_x - J_y & J_y \cos^2 \theta_z + J_x \sin^2 \theta_z \cos^2 \theta_x + J_z \sin^2 \theta_x & -J_z \sin^2 \theta_x \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -J_z \sin^2 \theta_x & J_z \end{bmatrix}$$

$$T_u = \frac{1}{2} \dot{x}^\top M_u \dot{x}; \quad V_u = m_u g p_z; \quad G_u(x) = [0 \quad 0 \quad g m_u \quad 0 \quad 0 \quad 0]^\top$$

$$M_l = (m_t + m_b) \left[J_2^\top \left(\left(\text{diag}(h_i) \otimes I_3 \right) - J_1^\top \text{diag} \left(\left(\frac{2\delta m_b l_1 - m_t l_2}{2(m_t + m_b) L_i} + \frac{m_t}{m_b + m_t} \right)^2 - \frac{m_t}{m_t + m_b} \right) J_1 \right) J_2 \right]$$

$$T_l = \frac{1}{2} \dot{x}^\top M_l \dot{x}; \quad V_l = (m_t + m_b) \sum_{i=1}^6 [0 \quad 0 \quad g]^\top \left(\frac{2\delta m_b l_1 - m_t l_2}{2(m_t + m_b)} + \frac{m_t}{m_b + m_t} L_i \right) u_i; \quad G_l(x) = \frac{\partial V_l}{\partial x}$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} u_1^\top & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & u_2^\top & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_3^\top & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u_4^\top & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & u_5^\top & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u_6^\top \end{bmatrix}, J_2 = \begin{bmatrix} I_3 & R_Y S_X R_X R_Z T_1 & S_Y R_Y R_X R_Z T_1 & R_Y R_X S_Z R_Z T_1 \\ I_3 & R_Y S_X R_X R_Z T_2 & S_Y R_Y R_X R_Z T_2 & R_Y R_X S_Z R_Z T_2 \\ I_3 & R_Y S_X R_X R_Z T_3 & S_Y R_Y R_X R_Z T_3 & R_Y R_X S_Z R_Z T_3 \\ I_3 & R_Y S_X R_X R_Z T_4 & S_Y R_Y R_X R_Z T_4 & R_Y R_X S_Z R_Z T_4 \\ I_3 & R_Y S_X R_X R_Z T_5 & S_Y R_Y R_X R_Z T_5 & R_Y R_X S_Z R_Z T_5 \\ I_3 & R_Y S_X R_X R_Z T_6 & S_Y R_Y R_X R_Z T_6 & R_Y R_X S_Z R_Z T_6 \end{bmatrix}$$

$$S_X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad S_Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad S_Z = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Chi tiết ma trận động lực học của hệ thống Stewart platform (8)

Nhận xét 2. Nếu tồn tại một luật điều khiển có thể đẩy biến trượt (12) tiến về mặt trượt (13), thì sai số được định nghĩa trong (10) và (11) tiến về 0. Điều này có thể dễ dàng được chứng minh do $k > 0$.

Tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển chế độ trượt có thể tìm được bằng một hàm Lyapunov đơn giản ở dạng toàn phương của biến trượt

$$V(t) = \frac{1}{2} s^\top s \quad (14)$$

Theo lý thuyết ổn định Lyapunov, ta có đạo hàm của hàm Lyapunov được biến đổi sao cho thỏa mãn

$$\frac{d}{dt} V(t) = \dot{V}(t) = s^\top \dot{s} < 0 \quad (15)$$

Khi đó, chọn k_s và η xác định dương, với luật điều khiển

$$F = J^{-\top} M \left(\ddot{x}_{2r} + M^{-1}(C\dot{x} + G) - k e_2 - \eta \text{sat}(s) - k_s s \right) \quad (16)$$

thay vào (15), ta có

$$\dot{V}(t) = -s^\top (\eta \text{sat}(s) + k_s s) < 0; \quad \forall s \quad (17)$$

Do đó, $\lim_{t \rightarrow \infty} = 0$, theo Nhận xét 2, $\lim_{t \rightarrow \infty} x_1 - x_{1r} = 0_{6 \times 1}$ và $\lim_{t \rightarrow \infty} x_2 - x_{2r} = 0_{6 \times 1}$.

Nhận xét 3. Để thấy rằng, điều khiển chế độ trượt SMC là một cấu trúc điều khiển dựa vào mô hình, nghĩa là nó phụ thuộc vào các thành phần M , C , và G , hiển nhiên sẽ phụ thuộc chặt chẽ vào khối lượng và mô men quán tính của bộ di chuyển. Khi đó, tải của bộ di chuyển thay đổi sẽ dẫn đến mô hình cũ

bị lỗi gây ra các hệ quả điều khiển như là sai lệch tĩnh ở đáp ứng vị trí gây ra bởi khối lượng và ở đáp ứng góc gây ra bởi mô men quán tính. Để giải quyết vấn đề này, trong phần tiếp theo của nghiên cứu trình bày một phương pháp ước lượng các thành phần khối lượng $\hat{m}_u$ và $\hat{J}_u = [\hat{J}_x, \hat{J}_y, \hat{J}_z]$ để cập nhật giá trị của các ma trận động lực học của hệ thống, như mô tả trong Hình 2.

3.2. Thách nghiệm tải dựa trên hàm Lyapunov

Trước hết, giả sử rằng, các giá trị khối lượng và mô men quán tính được ước lượng là $\hat{m}_u$ và $\hat{J}_u = [\hat{J}_x, \hat{J}_y, \hat{J}_z]$. Định nghĩa Δm_u và ΔJ_u là sai lệch của tham số ước lượng

$$\Delta m_u = \hat{m}_u - m_u \quad (18)$$

$$\Delta J_u = [\Delta J_x \quad \Delta J_y \quad \Delta J_z] = \hat{J}_u - J_u \quad (19)$$

Khi đó, sai lệch giữa các giá trị ước lượng ma trận được biểu diễn tương tự

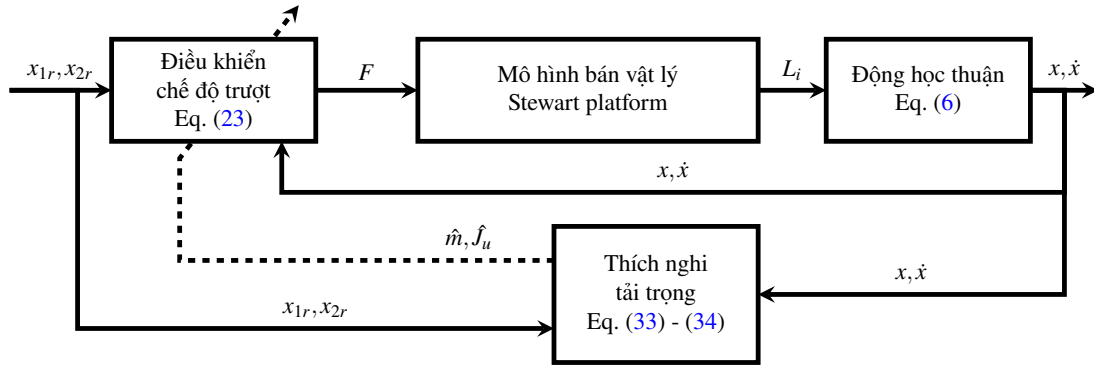
$$\Delta M(x_1) = \hat{M}(x_1) - M(x_1) \quad (20)$$

$$\Delta C(x_1, x_2) = \hat{C}(x_1, x_2) - C(x_1, x_2) \quad (21)$$

$$\Delta G(x_1) = \hat{G}(x_1) - G(x_1) \quad (22)$$

Giả định 3. Giả sử rằng, các tham số ước lượng được là dương, tức là $\hat{M}(x_1)$ là xác định dương và tham số điều khiển k_s được chọn đủ lớn để $2\hat{M}k_s > \hat{M}$

Nhận xét 4. Được định nghĩa trong (16), tham số của bộ điều khiển k_s được định nghĩa là xác định dương. Như đã biết, trong luật điều khiển chế độ trượt, hệ số k_s ảnh hưởng đến sự bền vững của hệ thống, quyết định tốc độ tiến về mặt trượt của biến



Hình 2: Cấu trúc điều khiển thích nghi tải trọng cho Stewart platform

trượt. Khi hệ số k_s tăng lên đủ lớn, theo Giả định 3, thời gian tiến về mặt trượt của biến trượt sẽ nhanh hơn, điều này đánh đổi với việc tín hiệu điều khiển xuất hiện vọt lố, hoặc tiến tới vùng bão hòa trong khoảng thời gian ban đầu, khi khởi động hệ thống. Tuy nhiên, khi biến trượt tiến về mặt trượt, tức là $s = 0$, ảnh hưởng của k_s lên hệ thống giảm đáng kể. Vậy nên, theo Giả định 3, tùy vào ứng dụng cụ thể của Stewart platform, hệ số k_s có thể được chọn một cách phù hợp mà không quá ảnh hưởng đến quá trình hoạt động của hệ thống, khi nó đã ổn định tại mặt trượt.

Với các giá trị ước lượng của tải, ta có tín hiệu điều khiển được tổng hợp lại từ (16) như sau

$$F = J^{-T} \hat{M} (\ddot{x}_{2r} + \hat{M}^{-1} (\hat{C}\dot{x} + \hat{G}) - ke_2 - \eta \text{sat}(s) - k_s s) \quad (23)$$

Thay (23) vào mô hình động lực học (8), ta được

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + C\dot{x} + G \\ = \hat{M}\ddot{x}_{2r} + \hat{C}\dot{x}_2 + \hat{G} + \hat{M}(-ke_2 - \eta \text{sat}(s) - k_s s) \end{aligned} \quad (24)$$

Kết hợp với (20), (21), và (22),

$$M\ddot{x} = \hat{M}\ddot{x}_{2r} + \Delta C\dot{x} + \Delta G - \hat{M}(ke_2 + \eta \text{sat}(s) + k_s s) \quad (25)$$

Như được định nghĩa trong (12),

$$s = e_2 + ke_1 \Rightarrow \dot{x}_2 - \dot{x}_{2r} = s - ke_1,$$

Do đó, ta có

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_{2r} + s - ke_2.$$

Thay vào (25) ta có phương trình:

$$\begin{aligned} M\dot{s} = -M\dot{x}_{2r} + Mke_2 + \hat{M}\dot{x}_{2r} + \\ \Delta C\dot{x} + \Delta G - \hat{M}(ke_2 + \eta \text{sat}(s) + k_s s) \end{aligned} \quad (26)$$

Biến đổi (26) ta có:

$$\begin{aligned} M\dot{s} = \Delta M\ddot{x} + \Delta C\dot{x} + \Delta G + \Delta M[(\dot{x}_{2r} - \dot{x}_2) - ke_2] \\ - \hat{M}(\eta \text{sat}(s) + k_s s), \end{aligned} \quad (27)$$

Viết lại thành:

$$M\dot{s} = \Delta M\ddot{x} + \Delta C\dot{x} + \Delta G + \Delta M[-\dot{e}_2 - ke_2] - \hat{M}(\eta \text{sat}(s) + k_s s). \quad (28)$$

Phương trình trên tương đương với

$$\hat{M}\dot{s} = \Delta M\ddot{x} + \Delta C\dot{x} + \Delta G - \hat{M}(\eta \text{sat}(s) + k_s s). \quad (29)$$

Mặt khác, từ các biểu thức trong bài báo (8) và (19)-(22) ta có:

$$\Delta M\ddot{x} + \Delta C\dot{x} + \Delta G = J^T F. \quad (30)$$

Vì ma trận $\hat{M}$ là ma trận xác định dương, để (29) ổn định và kết hợp với (30) bài báo đề xuất hàm Lyapunov như sau:

$$V_a = \frac{1}{2} s^T \hat{M} s + \frac{1}{2} \lambda_1 \Delta m_u^2 + \frac{1}{2} \Delta J^T \lambda \Delta J \quad (31)$$

với λ_1 và $\lambda = \text{diag}(\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)$ là các tham số lần lượt xác định dương. Do đó, đạo hàm của hàm Lyapunov V_a là

$$\dot{V}_a = s^T \hat{M}\dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{\hat{M}}s + \frac{\Delta m_u \dot{\hat{m}}_u}{\lambda_1} + \frac{\Delta J_x \dot{\hat{J}}_x}{\lambda_2} + \frac{\Delta J_y \dot{\hat{J}}_y}{\lambda_3} + \frac{\Delta J_z \dot{\hat{J}}_z}{\lambda_4} \quad (32)$$

Khi đó, với luật thích nghi được đề xuất

$$\dot{\hat{m}}_u = \frac{-\lambda_1}{\Delta m_u} \sum_{i=1}^3 s_i \Gamma_i \quad (33)$$

$$\dot{\hat{J}}_x = \frac{-\lambda_2 \Gamma_4 s_4}{\Delta J_x}; \dot{\hat{J}}_y = \frac{-\lambda_3 \Gamma_5 s_5}{\Delta J_y}; \dot{\hat{J}}_z = \frac{-\lambda_4 \Gamma_6 s_6}{\Delta J_z} \quad (34)$$

với $A = \Delta M\ddot{x} + \Delta C\dot{x} + \Delta G$ và Γ_j là hàng thứ j của ma trận A . Thay luật cập nhật vào (32),

$$\dot{V}_a = s^T \hat{M}\dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{\hat{M}}s - \sum_{i=1}^6 s_i \Gamma_i = s^T \hat{M}\dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{\hat{M}}s - s^T A \quad (35)$$

Khi đó,

$$\begin{aligned} \dot{V}_a = s^T (\Delta M\ddot{x} + \Delta C\dot{x} + \Delta G) + \frac{1}{2} s^T \dot{\hat{M}}s - s^T A \\ + s^T \hat{M}(-\eta \text{sat}(s) - k_s s) \end{aligned} \quad (36)$$

Theo định nghĩa của ma trận A , dễ thấy

$$\dot{V}_a = -s^T \hat{M}(\eta \text{sat}(s) + k_s s) + \frac{1}{2} s^T \dot{\hat{M}}s \quad (37)$$

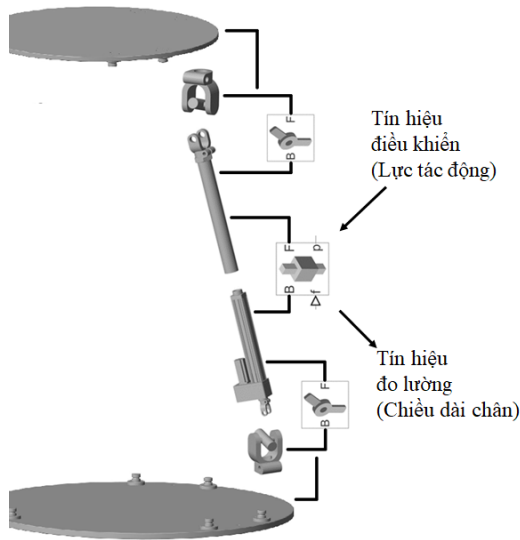
Theo Giả định 3,

$$\dot{V}_a = -s^T \hat{M}\eta \text{sat}(s) - s^T \hat{M}k_s s + \frac{1}{2} s^T \dot{\hat{M}}s < 0; \quad \forall s \quad (38)$$

Vậy, s , $\hat{m}_u$ and $\hat{J}_u$ bị chặn và dễ thấy rằng $s \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$.

Bảng 1: Tham số mô hình Stewart platform được thiết kế

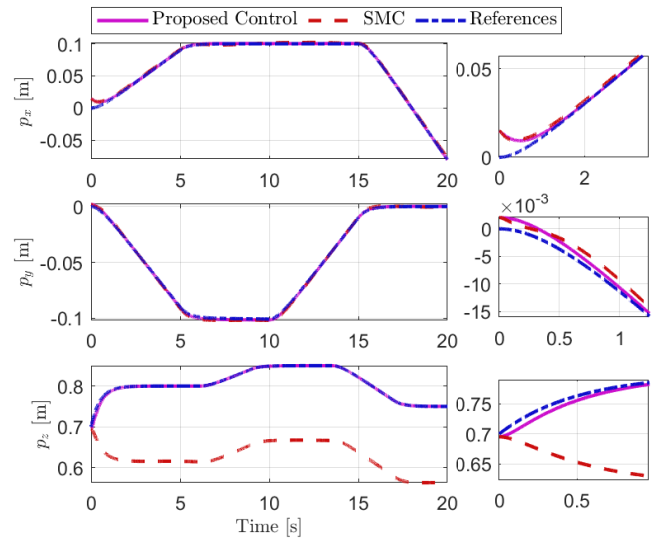
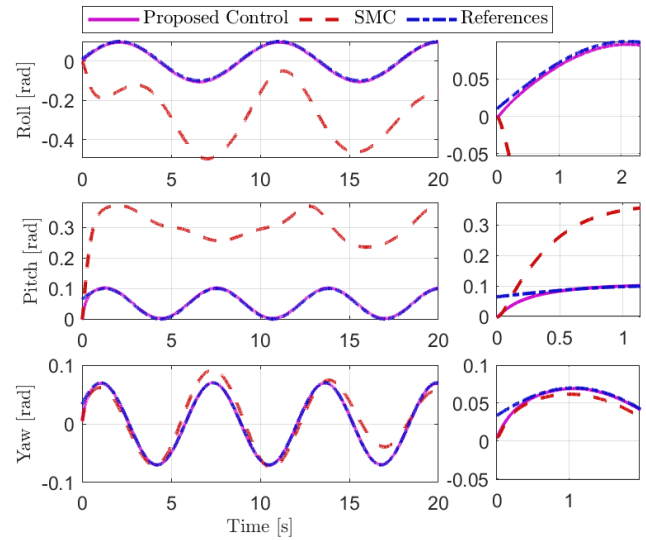
Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
T_1	$[0.16, 0.16, -0.07]$	B_1	$[0.31, 0.08, 0.07]$	m	9kg	l_1	0.47m
T_2	$[0.06, 0.21, -0.07]$	B_2	$[-0.08, 0.31, 0.07]$	m_t	0.2kg	l_2	0.33m
T_3	$[-0.21, 0.06, -0.07]$	B_3	$[-0.23, 0.23, 0.07]$	m_b	0.8kg	δ	0.2m
T_4	$[-0.21, -0.06, -0.07]$	B_4	$[-0.23, -0.23, 0.07]$	J_x	0.12kgm^2	$F_{j\max}$	200N
T_5	$[0.06, -0.21, -0.07]$	B_5	$[-0.08, -0.31, 0.07]$	J_y	0.12kgm^2	g	9.81m.s^{-2}
T_6	$[0.16, -0.16, -0.07]$	B_6	$[0.31, -0.08, 0.07]$	J_z	0.24kgm^2		

**Hình 3:** Mô hình thiết kế Simscape cho Stewart platform

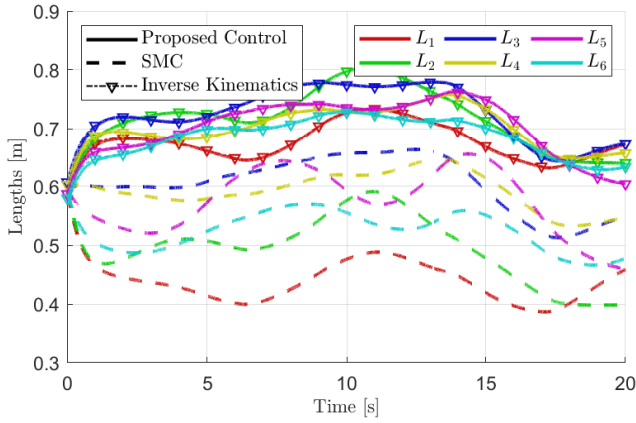
4. Mô phỏng

Trong phần này, Stewart platform được thực hiện mô phỏng dưới mô hình bán vật lý dựa trên Simscape, được cung cấp bởi MATLAB để làm tăng độ tin cậy của kết quả mô phỏng thay vì mô phỏng thuần túy trên nền tảng toán học xây dựng được trong phần 2. Mô hình Stewart platform được thiết kế trên một nền tảng CAD được hỗ trợ bởi bên thứ ba và nhúng vào MATLAB Simulink dưới sự hỗ trợ của toolbox Simscape-Multibody như trong Hình 3. Các tham số thiết kế của mô hình Stewart platform được đưa ra trong Bảng 1. Đồng thời, các kết quả mô phỏng cũng được so sánh với cách tiếp cận dựa trên điều khiển chế độ trượt truyền thống với chung một bộ tham số bao gồm: $k = 20$, $k_s = \text{diag}(1, 1, 4, 4, 4)$, and $\eta = \text{diag}(1, 1, 4, 4, 4)$. Sự thật rằng, chất lượng các tham số của bộ điều khiển SMC được chọn tương đối kém so với những gì có thể làm được. Tuy nhiên với các tham số bổ sung cho thuật toán thích nghi $\beta_1 = 1, \beta_j = 1, j = 2, 3, 4$, các kết quả mô phỏng được cải thiện một cách rõ ràng.

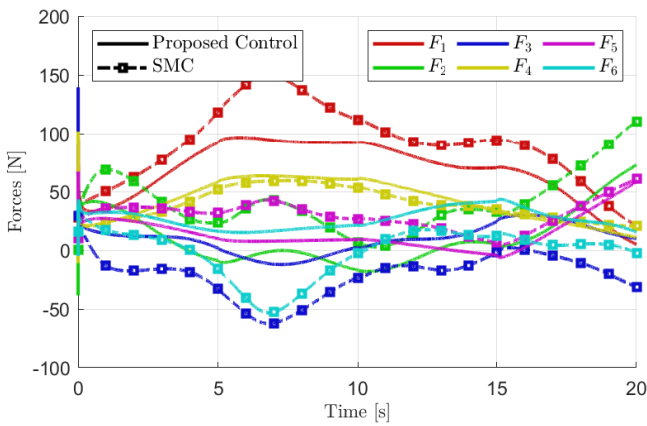
Các Hình 4, 5, 6 thể hiện đáp ứng của hệ thống Stewart platform khi thực hiện mô phỏng với quỹ đạo ngẫu nhiên với một tải có khối lượng 8kg được đặt lên vị trí bất kỳ trên bề di chuyển. Từ kết quả mô phỏng, ta có thể thấy rằng, mặc dù chất lượng của

**Hình 4:** Đáp ứng vị trí của Stewart platform**Hình 5:** Đáp ứng góc của Stewart platform

bộ điều khiển đề xuất tương đối kém và việc kết hợp thêm cấu trúc thích nghi đã cải thiện một cách rõ ràng hiệu suất bám, bao gồm bám vị trí và bám góc, hệ quả là kết quả chiều dài chân bám theo các giá trị đặt của động học nghịch với sai số nhỏ hơn rất nhiều so với cấu trúc ban đầu. Lưu ý rằng, η và k được chọn tương đối nhỏ, sai số tĩnh của bộ điều khiển SMC truyền thống phụ thuộc lớn vào tham số η và k , tuy nhiên, việc



Hình 6: Đáp ứng chiều dài chân của Stewart platform



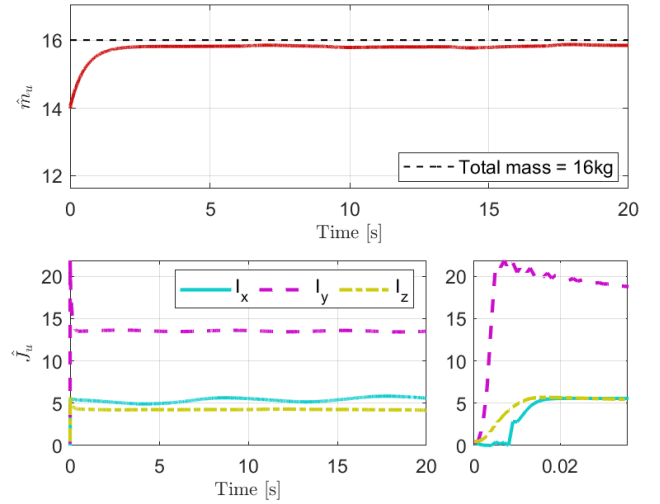
Hình 7: Lực tác động của các chân

tăng hai tham số này không làm cải thiện được hiệu suất điều khiển hệ thống như cách mà bộ điều khiển thích nghi đề xuất đã đưa ra. Mặt khác, việc tăng các tham số η và k có thể ảnh hưởng đến hệ thống tại khoảng thời gian đầu tiên, tín hiệu điều khiển có xu hướng biến đổi nhanh đến giá trị bão hòa trong thời gian rất nhỏ, khi đó, áp lực gây lên cơ cấu chấp hành là rất lớn. Tuy nhiên, bằng việc giảm tham số η và k kết hợp với thuật toán thích nghi, việc xảy ra hiện tượng biến đổi nhanh tại giai đoạn đầu tiên của tín hiệu điều khiển không còn xuất hiện. Điều này có thể dễ dàng nhìn thấy trong Hình 7. Thêm vào đó, việc triệt tiêu đi sai lệch tính trong điều khiển bảm Stewart platform, đặc biệt với những tải không đối xứng, giúp các tín hiệu điều khiển không bị vọt lố, điều này còn giúp cải thiện về mặt năng lượng cho hệ thống.

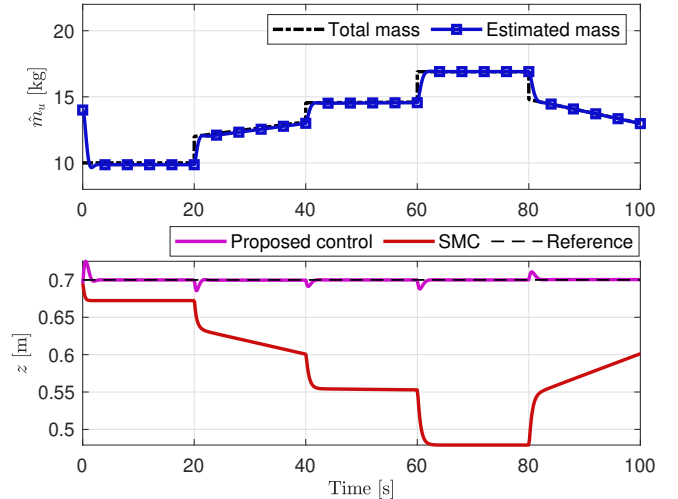
Hình 8 đưa ra đáp ứng của cấu trúc thích nghi với giá trị ban đầu là 14kg cho hệ thống (các giá trị ban đầu này cũng được sử dụng cho mô hình SMC thông thường), nó đã cho thấy rằng thuật toán có khả năng thích nghi với sự thay đổi của tải một cách rõ ràng và hiệu quả. Thêm vào đó, như trong Hình 9, với tải có khối lượng thay đổi theo thời gian, cấu trúc này vẫn thể hiện được tính ưu việt và vượt trội mà nó mang lại.

5. Kết luận

Tổng kết lại, công trình này đã giới thiệu về hệ thống robot song song 6 bậc tự do được sử dụng rộng rãi nhiều trong các hệ thống yêu cầu có độ chính xác cao trong phần 1. Tuy nhiên,



Hình 8: Đáp ứng thích nghi của cấu trúc đề xuất



Hình 9: Đáp ứng thích nghi của cấu trúc đề xuất với tải thay đổi

dưới cấu trúc điều khiển trượt thông thường, với các tải không cố định thì hiệu suất của hệ thống có thể bị suy giảm một cách đáng kể, do đó, một thuật toán thích nghi tải trọng của mô hình đã được đưa ra. Bài toán được tiếp cận bằng việc điều khiển chế độ trượt, được trình bày trong phần 3.1 với mô hình được xây dựng trong phần 2. Sau đó, một luật thích nghi dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov được đưa ra trong phần 3.2 và được mô phỏng kiểm chứng tính hiệu quả dựa trên góc nhìn khách quan từ mô hình bán vật lý được xây dựng trên Simscape trong phần 4. Các kết quả cho thấy sự vượt trội về hiệu suất cũng như độ chính xác mà cấu trúc này mang lại, chứng tỏ rằng nó có thể được ứng dụng một cách hiệu quả trong các mô hình thực tế.

Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, mô hình nhiễu chưa được xem xét, do đó, trong tương lai, nhóm nghiên cứu sẽ đề xuất thêm các chiến lược điều khiển mới nhằm cải thiện hiệu suất điều khiển dưới tác động của nhiễu và triển khai trên mô hình thực nghiệm.

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] V. Gough, "Contribution to discussion to papers on research in automobile stability and control and in tire performance," *Proc. of the Automotive Division of the Institute of Mechanical Engineers*, 1957, vol. 180, pp. 392–394, 1957.
- [2] Y. Huang, D. M. Pool, O. Stroosma, Q. P. Chu, and M. Mulder, "A review of control schemes for hydraulic stewart platform flight simulator motion systems," in *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, 2016, p. 1436. DOI: [10.2514/6.2016-1436](https://doi.org/10.2514/6.2016-1436).
- [3] K Herbuś and P Ociepka, "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*, IOP Publishing, vol. 145, 2016, p. 042018. DOI: [10.1088/1757-899X/145/4/042018](https://doi.org/10.1088/1757-899X/145/4/042018).
- [4] H. Yun, L. Liu, Q. Li, W. Li, and L. Tang, "Development of an isotropic stewart platform for telescope secondary mirror," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 127, pp. 328–344, 2019. DOI: [10.1016/j.ymsp.2019.03.001](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.03.001).
- [5] M. Wapler, V. Urban, T. Weisener, J. Stallkamp, M. Dürr, and A. Hiller, "A stewart platform for precision surgery," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 25, no. 4, pp. 329–334, 2003. DOI: [10.1191/0142331203tm092](https://doi.org/10.1191/0142331203tm092).
- [6] K. Liu, J. M. Fitzgerald, and F. L. Lewis, "Kinematic analysis of a stewart platform manipulator," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 40, no. 2, pp. 282–293, 1993. DOI: [10.1109/41.222651](https://doi.org/10.1109/41.222651).
- [7] B. Dasgupta and T. Mruthyunjaya, "A newton-euler formulation for the inverse dynamics of the stewart platform manipulator," *Mechanism and machine theory*, vol. 33, no. 8, pp. 1135–1152, 1998. DOI: [10.1016/S0094-114X\(97\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(97)00118-3).
- [8] D Li and S. E. Salcudean, "Modeling, simulation, and control of a hydraulic stewart platform," in *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, vol. 4, 1997, pp. 3360–3366. DOI: [10.1109/ROBOT.1997.606801](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1997.606801).
- [9] A. Şumnu, İ. H. Güzelbey, and M. V. Çakir, "Simulation and pid control of a stewart platform with linear motor," *Journal of mechanical science and technology*, vol. 31, pp. 345–356, 2017. DOI: [10.1007/s12206-016-1238-7](https://doi.org/10.1007/s12206-016-1238-7).
- [10] H. D. Taghirad, *Parallel robots: mechanics and control*. CRC press, 2013.
- [11] H. S. Kim, Y. M. Cho, and K.-I. Lee, "Robust nonlinear task space control for 6 dof parallel manipulator," *Automatica*, vol. 41, no. 9, pp. 1591–1600, 2005. DOI: [10.1016/j.automatica.2005.04.014](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2005.04.014).
- [12] M. Becerra-Vargas, A. M. Bueno, O. D. Vargas, and J. M. Balthazar, "Robust joint space control of a 6 dof parallel robot," in *2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, Ieee, 2016, pp. 1404–1407. DOI: [10.1109/CCA.2016.7588003](https://doi.org/10.1109/CCA.2016.7588003).
- [13] H. Tourajizadeh and S Manteghi, "Design and optimal control of dual-stage stewart platform using feedback-linearized quadratic regulator," *Advanced Robotics*, vol. 30, no. 20, pp. 1305–1321, 2016. DOI: [10.1080/01691864.2016.1212735](https://doi.org/10.1080/01691864.2016.1212735).
- [14] K. S. Grewal, R. Dixon, and J. Pearson, "Lqg controller design applied to a pneumatic stewart-gough platform," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 9, pp. 45–53, 2012. DOI: [10.1007/s11633-012-0615-7](https://doi.org/10.1007/s11633-012-0615-7).
- [15] W. Chen, S. Wang, J. Li, *et al.*, "An adrc-based triple-loop control strategy of ship-mounted stewart platform for six-dof wave compensation," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 184, p. 105289, 2023. DOI: [10.1016/j.mechmachtheory.2023.105289](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2023.105289).
- [16] X. Qu, Z. Li, Q. Chen, C. Peng, and Q. Wang, "Research on improved active disturbance rejection control strategy for hydraulic-driven stewart stabilization platform," *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 2024. DOI: [10.1108/IR-03-2024-0086](https://doi.org/10.1108/IR-03-2024-0086).
- [17] Y. Zhou, J. She, F. Wang, and 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. DOI: [10.1109/TMECH.2023.3237135](https://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3237135).
- [18] N. Xavier, B. Bandyopadhyay, J. Reger, and L. Watermann, "Robust continuous finite-time tracking control with finite-time observer for a stewart platform," in *2022 IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (AMC)*, IEEE, 2022, pp. 306–310. DOI: [10.1109/AMC51637.2022.9729266](https://doi.org/10.1109/AMC51637.2022.9729266).
- [19] G.-H. Kim and K.-S. Hong, "Adaptive sliding-mode control of an offshore container crane with unknown disturbances," *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 24, no. 6, pp. 2850–2861, 2019. DOI: [10.1109/TMECH.2019.2946083](https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2946083).
- [20] G. Lebret, K. Liu, and F. L. Lewis, "Dynamic analysis and control of a stewart platform manipulator," *Journal of Robotic systems*, vol. 10, no. 5, pp. 629–655, 1993. DOI: [10.1002/rob.4620100506](https://doi.org/10.1002/rob.4620100506).