

Điều khiển chế độ trượt cho robot Stewart Platform: Tiếp cận dựa trên mô hình bán vật lý

Trần Trung Kiên^{1*}, Vũ Đức Cường², Nguyễn Danh Huy², Nguyễn Trung Kiên³

¹Viện Tự động hóa Kỹ thuật quân sự, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

²Trường Điện – Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam;

³Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

*Email: kienttcapit@gmail.com

Nhận bài: 04/9/2024; Hoàn thiện: 11/11/2024; Chấp nhận đăng: 15/11/2024; Xuất bản: 06/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.20-26>

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày thiết kế và triển khai chiến lược điều khiển chế độ trượt (SMC) cho robot song song 6 bậc tự do, được biết đến với tên gọi Stewart Platform. Stewart Platform là một loại robot song song với cấu trúc gồm sáu thanh nối giữa nền cố định và nền di động, cho phép di chuyển và điều khiển chính xác trong không gian ba chiều. Nghiên cứu bắt đầu với việc mô hình hóa toán học chi tiết cho Stewart Platform, nắm bắt các đặc tính động học và động lực học phức tạp của hệ thống. Dựa trên mô hình động lực học của hệ thống, bài báo trình bày phương pháp điều khiển dựa trên chế độ trượt cho hệ thống Stewart Platform. Sau đó, mô hình Simscape, một môi trường mô phỏng dựa trên MATLAB, được đưa ra để kiểm tra và xác thực hiệu suất cũng như độ chính xác của bộ điều khiển. Các mô phỏng cho thấy sự cải thiện đáng kể về độ chính xác và độ ổn định, khẳng định tiềm năng của SMC trong việc nâng cao hiệu quả hoạt động của robot song song. Kết quả mô phỏng được đưa ra trong video: <https://youtu.be/7Y0hBNNKAZE>

Từ khóa: Stewart Platform; Mô hình hóa; Điều khiển chế độ trượt; Mô hình bán vật lý; Simscape/MATLAB.

1. MỞ ĐẦU

Stewart Platform hay còn được gọi là Stewart – Gough Platform là mô hình robot song song 6 bậc tự do. Stewart Platform được đưa ra và sử dụng lần đầu vào năm 1954 tại Vương quốc Anh bởi Eric Gough, thiết kế sau đó được công bố bởi D. Stewart vào năm 1965 [1]. Stewart Platform bao gồm 1 phần đế cố định và 1 platform di chuyển bằng 6 chân kết nối có khả năng thay đổi chiều dài và có khả năng quay linh hoạt. Do đó, Stewart Platform được sử dụng rộng rãi từ mô phỏng lái, mô phỏng bay [2], giải trí, thực tế ảo [3] cho đến sử dụng trong y tế [4], chống rung cho các hệ thống hàng hải [5], điều hướng rada, kính thiên văn [6],... Một điểm chung về các ứng dụng của hệ thống sử dụng Stewart Platform là các mục đích này yêu cầu độ chính xác cao và tốc độ đáp ứng nhanh. So sánh với robot nối tiếp, các cánh tay của robot nối tiếp liên kết tuần tự với nhau qua các khớp và chỉ khớp cuối cùng kết nối với end-effector, thì ở robot song song, nhiều cánh tay kết nối chung với end-effector, do đó, robot song song có khả năng thực hiện các tác vụ với thời gian đáp ứng và sai số rất nhỏ so. Tuy nhiên, do mô hình Stewart Platform với bậc tự do cao, nhiều chân kết nối với end-effector nên hiện tượng xen kẽ giữa các khớp là rất lớn và làm cho mô hình động lực học trở nên phức tạp và khối lượng tính toán trở nên vô cùng lớn. Điều này mở ra những thách thức cho việc thiết kế điều khiển và thực nghiệm mô hình này.

Về mô hình động lực học của Stewart Platform, trong các nghiên cứu trước đây đã đưa ra các phương pháp để tìm được phương trình mô tả chuyển động của hệ thống theo 2 phương pháp chính bao gồm Euler-Lagrange [7] và Euler-Newton [8]. Đối với phương pháp Euler-Newton, các tác giả xây dựng mô hình toán học của hệ thống dựa trên việc xem xét các lực tác động vào hệ thống dựa trên định luật II Newton, từ đó tổng hợp các lực và phương trình để xây dựng được phương trình đầy đủ. Đối với Euler-Lagrange [9, 10], phương pháp này yêu cầu một hàm Lagrange liên quan đến năng lượng của hệ thống phụ thuộc vào các biến trạng thái, hàm Lagrange tương đối đơn giản để

có thể tìm được, tuy nhiên, việc giải phương trình cơ học Lagrange rất phức tạp do khối lượng tính toán lớn. Mặc dù phức tạp, vấn đề này có thể giải quyết dễ dàng bằng máy tính, vậy nên, tiếp cận các mô hình động lực học của robot bằng cơ học Lagrange vẫn là một cách tiếp cận được ưa chuộng hơn cả.

Trong các nghiên cứu về thiết kế điều khiển, có thể thấy rằng, có hai cách tiếp cận chính là điều khiển dựa trên động học và động lực học. Trong bài toán thiết kế điều khiển dựa trên động học, từ các giá trị mong muốn của bộ di chuyển, bài toán động học thuận dễ dàng được đưa ra để tính được chiều dài mong muốn của các khớp, việc điều khiển chiều dài của các khớp sẽ được đẩy cho cơ cấu chấp hành. Trong bài toán thiết kế điều khiển dựa trên động lực học, phương pháp điều khiển này cho phép điều khiển chính xác hơn, giảm thiểu sai số và hạn chế việc xung đột giữa các cơ cấu chấp hành. Đối với phương pháp này, trạng thái của bộ di chuyển có thể được phản hồi trực tiếp về từ cảm biến gắn trên bộ (ví dụ như sử dụng IMU) hoặc có thể tính toán gián tiếp qua các cảm biến trên động cơ bằng động học thuận. Từ đó, hoặc là có thể điều khiển trực tiếp trên hệ quy chiếu của bộ di chuyển hoặc là có thể điều khiển gián tiếp trên hệ quy chiếu của cơ cấu chấp hành. Ưu điểm của hệ thống Stewart Platform là một hệ đủ cơ cấu chấp hành (actuated system), do đó, rất nhiều phương pháp điều khiển phù hợp với hệ thống như là điều khiển phân tán PID [11], hoặc là điều khiển tối ưu LQR (Linear Quadratic Regulator) [12], MPC (Model Predictive Control) [13], hoặc có thể sử dụng các bộ điều khiển có khả năng bù nhiễu và bền vững với nhiễu [14].

Trong các nghiên cứu trước đây về điều khiển mô hình Stewart Platform, các tác giả thường tập trung vào việc đưa ra lý thuyết điều khiển, sau đó áp dụng lên các mô hình mô phỏng toán học hoặc triển khai trên mô hình thực nghiệm. Đối với việc triển khai trên mô hình toán học, các kết quả có thể sẽ không còn chính xác với thực tế, và chi phí cao đối với việc triển khai trên mô hình thực nghiệm. Do đó, trong nghiên cứu này, một mô hình Quasi-Physical (mô hình bán vật lý) của Stewart Platform được đưa ra và triển khai điều khiển với thuật toán điều khiển mặt trượt (Sliding Mode Control, SMC) nhằm đưa ra một đánh giá khách quan hơn, các hành vi chính xác hơn mô hình toán học được xây dựng.

Nghiên cứu này bao gồm 5 phần: phần 1 giới thiệu, đưa ra cái nhìn chung về mô hình hóa và điều khiển cho hệ thống Stewart Platform; chi tiết mô hình hóa của hệ thống và thiết kế điều khiển được đưa ra lần lượt trong phần 2 và phần 3; kết quả mô phỏng kiểm chứng với mô hình bán vật lý Simscape được đưa ra trong phần 4; và phần 5 là kết luận cũng như hướng phát triển trong tương lai.

2. MÔ HÌNH HÓA

Phần này tập trung giới thiệu mô hình động lực học của Stewart Platform thông qua cơ học Lagrangian. Trước hết, theo cơ học Lagrange, mô hình động lực học của Stewart Platform có thể được tính thông qua phương trình sau

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (1)$$

trong đó, L là hàm Lagrange được định nghĩa là hiệu của tổng động năng trừ đi tổng thế năng, \mathbf{q} được gọi là biến trạng thái của hệ thống và \mathbf{J} , \mathbf{F} lần lượt là ma trận Jacobian và lực tác động vào cơ cấu chấp hành. Do đó, mô hình của hệ thống có thể tìm được bằng cách xem xét năng lượng của từng thành phần trong hệ thống. Tuy nhiên, trước đó cần phải phân tích hệ trục tọa độ của hệ thống, các biến vào ra và động học của hệ thống.

2.1. Hệ trục tọa độ tổng quát và lực đưa vào hệ thống

Trước tiên, xem xét mục tiêu điều khiển của hệ thống là trạng thái của bộ di chuyển với 6 bậc tự do, do đó, hệ trục tọa độ tổng quát trong phương trình chuyển động, hay biến trạng thái của hệ thống và các lực đầu vào \mathbf{F} được định nghĩa như sau:

$$\mathbf{q} = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^\top \in \mathbb{R}^{6 \times 1}; \mathbf{F} = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4 \ F_5 \ F_6]^\top \in \mathbb{R}^{6 \times 1} \quad (2)$$

trong đó, $\mathbf{P} = [x \ y \ z]^\top$ là vị trí của bộ di chuyển và $\mathbf{O} = [\alpha \ \beta \ \gamma]^\top$ là hướng của bộ di chuyển được biểu diễn theo góc Euler. Tất cả các biến trạng thái được xem xét trong hệ trục tọa độ quán tính.

2.2. Động học nghịch

Động học ngược được định nghĩa là một hàm $L(\mathbf{q})$ có thể tính được trạng thái của cơ cấu chấp hành từ trạng thái của end-effector. Trong trường hợp này, $L: \mathbb{R}^6 \rightarrow \mathbb{R}^6$, tức là từ các biến trạng thái \mathbf{q} của hệ thống có thể tính được chiều dài của từng chân, tức là

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{t}_i \mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) + \mathbf{P} - \mathbf{b}_i \quad (3)$$

trong đó, $\mathbf{l}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là vector chiều dài của chân thứ i , $\mathbf{t}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là vị trí của khớp kết nối của chân thứ i với bộ di chuyển (nhìn trong hệ quy chiếu gắn với bộ di chuyển), $\mathbf{b}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là vị trí của khớp kết nối của chân thứ i với bộ cố định (nhìn tổng hệ quy chiếu gắn với bộ cố định) và $\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận quay của bộ di chuyển. Do đó, chiều dài của cơ cấu chấp hành được tính là chuẩn của vector \mathbf{l}_i .

2.3. Ma trận Jacobian

Ma trận Jacobian của Stewart Platform được định nghĩa như sau

$$\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{J}_1 \mathbf{V}_T \quad ; \quad \mathbf{V}_T = \mathbf{J}_2 \dot{\mathbf{q}} \quad (4)$$

trong đó, $\mathbf{V}_T = (\mathbf{V}_{T_i}) \in \mathbb{R}^{18 \times 1}$, $i = 1, \dots, 6$ là vận tốc của khớp trên.

2.4. Năng lượng của bộ di chuyển

Năng lượng của bộ di chuyển bao gồm động năng và thế năng. Trong đó, động năng được tính bằng động năng tịnh tiến và động năng quay của bộ di chuyển. Tổng động năng của bộ di chuyển tương đối dễ dàng để tìm và nó có thể viết dưới dạng toàn phương của ma trận khối lượng – quán tính \mathbf{M}_{mp} , cụ thể

$$K_{mp} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^\top \mathbf{M}_{mp} \dot{\mathbf{q}} \quad (5)$$

trong đó, ma trận khối lượng quán tính có thể dễ dàng tính toán, phụ thuộc vào m và $\mathbf{I} = [I_x \ I_y \ I_z]^\top$ lần lượt là khối lượng và mô men quán tính của bộ di chuyển. các ký hiệu góc lượng giác được viết $c()$ cho hàm $\cos()$ và $s()$ cho hàm $\sin()$. Cuối cùng, thế năng của bộ di chuyển chỉ phụ thuộc vào độ cao của bộ di chuyển và gia tốc trọng trường.

2.5. Năng lượng của các chân

Trong một số các nghiên cứu kinh điển như là [10], năng lượng của phần chân được xem xét như là năng lượng của một điểm chuyển động, tức là các tác giả sẽ tập trung khối lượng của chân trên và chân dưới của từng chân thành một điểm trọng tâm biên thiên theo trạng thái của hệ thống. Tương tự như cách tính năng lượng của phần bộ di chuyển, năng lượng của tất cả các chân cũng có thể được viết dưới dạng toàn phương như sau

$$K_{legs} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^\top \mathbf{M}_{legs} \dot{\mathbf{q}}; \mathbf{M}_{legs} = m[\mathbf{J}_2^\top (\mathbf{H} - \mathbf{J}_1^\top \mathbf{K} \mathbf{J}_1) \mathbf{J}_2]; \mathbf{H} = \text{diag}(h_i) \otimes \mathbf{I}_{3 \times 3}; \mathbf{K} = \text{diag}(k_i) \quad (6)$$

với “ \otimes ” là tích Kronecker, $h_i = \left(\frac{\hat{l}}{L_i} + \frac{m_2}{m_1 + m_2}\right)^2$, $k_i = h_i - \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2}\right)^2$ và $\hat{l} = \frac{2\delta m_1 l_1 - m_2 l_2}{2(m_1 + m_2)}$. Với các tham số mô hình bao gồm khối lượng của phần chân dưới m_1 , khối lượng của phần chân trên m_2 và khoảng cách từ chân dưới đến trọng tâm của nó δ . Sau đó, thế năng của các chân có thể dễ dàng tính được bởi phương trình sau

$$P_{legs} = (m_1 + m_2) \sum_{i=1}^6 \mathbf{g}^\top \mathbf{P}_{i-legs}; \quad \mathbf{P}_{i-legs} = \left(\hat{l} + \frac{m_2}{m_1 + m_2} L_i\right) \frac{\mathbf{l}_i}{\|\mathbf{l}_i\|} \quad (7)$$

2.6. Phương trình động lực học của toàn bộ hệ thống

Từ phương trình cơ học Lagrange (1), kết hợp với các phương trình năng lượng của hệ thống được đề cập ở trên, mô hình động lực học của toàn bộ hệ thống Stewart Platform được viết dưới dạng ma trận như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{D}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{J}(\mathbf{q})^\top \mathbf{F} \quad (8)$$

trong đó, $\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \mathbf{M}_{mp} + \mathbf{M}_{legs}$; $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{q}} - \frac{\partial(K_{mp} + K_{legs})}{\partial \mathbf{q}}$; $\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \frac{\partial(P_{mp} + P_{legs})}{\partial \mathbf{q}}$;

$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}_1 \mathbf{J}_2$; và $\mathbf{D}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \text{diag}(d_i)(\mathbf{J}^\top)^2 \dot{\mathbf{q}}$ với d_i là hệ số ma sát của chân thứ i .

3. THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN

Trong phần này, chúng tôi đề xuất bộ điều khiển chế độ trượt (Sliding Mode Control, SMC) cho việc ổn định vị trí di chuyển của Stewart Platform. Xem xét mục tiêu điều khiển là giá trị của biến trạng thái \mathbf{q} bám theo giá trị đặt \mathbf{q}_r . Khi đó, sai lệch giữa biến trạng thái và giá trị đặt và đạo hàm của nó được định nghĩa như sau

$$\mathbf{e} = \mathbf{q} - \mathbf{q}_r; \dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_r \quad (9)$$

Khi đó, biến trượt được định nghĩa với hệ số \mathbf{k} là ma trận đường chéo với các phần tử lớn hơn 0 như sau:

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}\mathbf{e} \quad (10)$$

và mặt trượt được định nghĩa là tập hợp những giá trị của \mathbf{e} và $\dot{\mathbf{e}}$ sao cho biến trượt bằng 0,

$$\mathbf{S} = \{\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}} \mid \mathbf{s} = \mathbf{0}\} \quad (11)$$

Dễ thấy, nếu tồn tại một tín hiệu điều khiển sao cho biến trượt \mathbf{s} tiến đến mặt trượt \mathbf{S} thì sai lệch của hệ thống tiến về 0. Điều này có thể dễ dàng chứng minh bởi khi $\mathbf{s} = \mathbf{0}$ thì nghiệm của phương trình (10) hội tụ về 0. Viết lại phương trình mô tả chuyển động của hệ thống (8) như sau

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q})\mathbf{F} \quad (12)$$

trong đó, $\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G} - \mathbf{D})$ và $\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^\top$. Khi đó, tín hiệu điều khiển cho toàn hệ thống dựa theo luật điều khiển chế độ trượt như sau:

$$\mathbf{F} = \mathbf{g}(\mathbf{q})^{-1}(-\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \ddot{\mathbf{q}}_r - \mathbf{k}\dot{\mathbf{e}} - \mathbf{k}_s \text{sign}(\mathbf{s}) - \eta\mathbf{s}) \quad (13)$$

với các hằng số điều khiển \mathbf{k}_s và η là ma trận đường chéo với các giá trị dương.

Định lý 1: Xem xét mô hình hệ thống Stewart Platform được mô tả trong phương trình (8) và được viết lại trong phương trình (12), nếu hệ thống được điều khiển bằng luật điều khiển mặt trượt được mô tả trong phương trình (13) thì biến trượt được mô tả trong phương trình (10) sẽ tiến đến mặt trượt (11). Khi đó, sai lệch của hệ thống hội tụ về không.

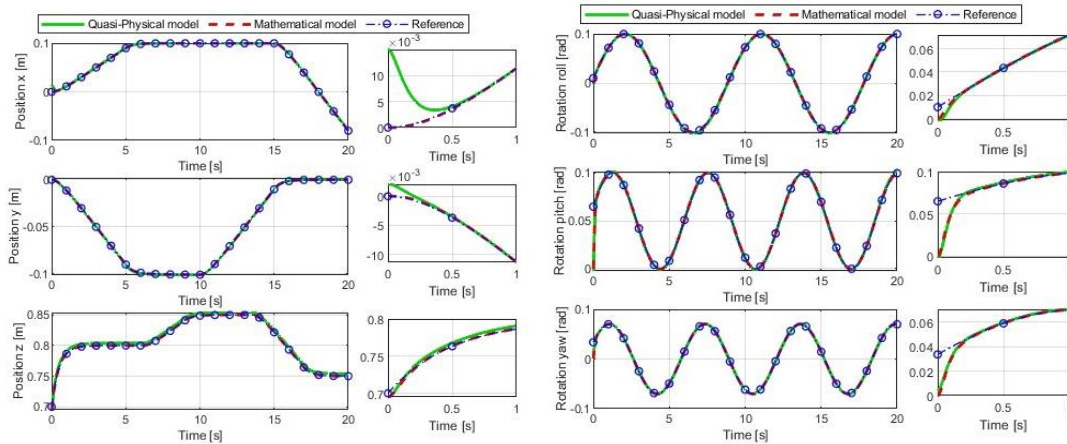
Chứng minh: Định lý này có thể dễ dàng được chứng minh qua lý thuyết ổn định Lyapunov với hàm Lyapunov được chọn là $V = \mathbf{s}^T \mathbf{s}$.

4. MÔ PHỎNG

Trong phần này, các lý thuyết được đưa ra ở trên sẽ được kiểm chứng thông qua mô phỏng. Để tăng độ tin cậy của chiến lược điều khiển được đưa ra, chúng tôi sử dụng mô hình Stewart Platform được xây dựng trên Simscape Multibody. Các kết quả mô phỏng được so sánh giữa mô hình toàn học và mô hình xây dựng trên Simscape. Trong cả mô phỏng trên mô hình bán vật lý và mô hình toán học, chúng tôi đo về chiều dài chân, và suy ra được trạng thái của bộ di chuyển. Chú ý rằng, việc giải hàm ngược từ động học nghịch trong phương trình (12) rất khó khăn, do đó, trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một thuật toán tối ưu trong từng bước mô phỏng cho phép giải hàm ngược một cách đơn giản hơn từ giá trị phản hồi về của chiều dài chân L^*

$$\mathbf{q}^* = \arg \min(L(\mathbf{q}) - L^*) \quad (14)$$

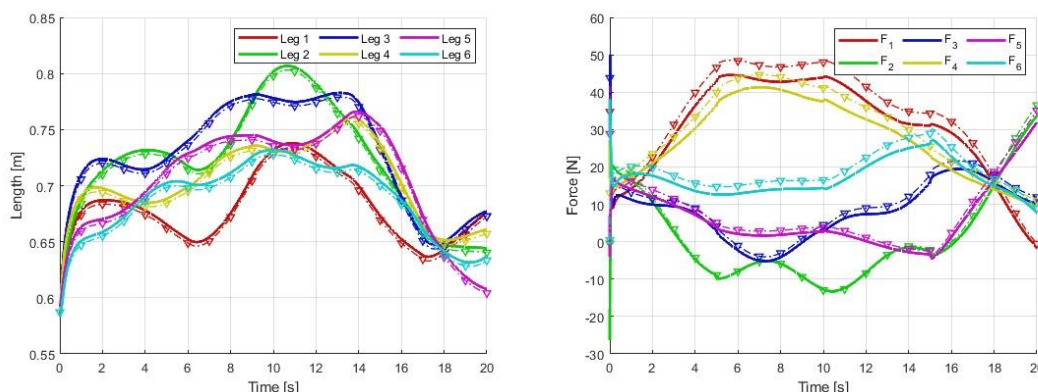
Các tham số mô hình bao gồm: các điểm kết nối khớp trên $\mathbf{t}_1 = [155.6; 155.6; -66.5]$, $\mathbf{t}_2 = [56.9; 212.5; -66.5]$, $\mathbf{t}_3 = [-212.5; 56.9; -66.5]$, $\mathbf{t}_4 = [-212.5; -56.4; -66.5]$, $\mathbf{t}_5 = [56.9; -212.5; -66.5]$, $\mathbf{t}_6 = [155.6; -155.6; -66.5]$, các điểm kết nối khớp dưới $\mathbf{b}_1 = [309.1; 82.8; 66.5]$, $\mathbf{b}_2 = [-82.8; 309.1; 66.5]$, $\mathbf{b}_3 = [-226.3; 226.3; 66.5]$, $\mathbf{b}_4 = [-226.3; -226.3; 66.5]$, $\mathbf{b}_5 = [-82.8; -309.1; 66.5]$, $\mathbf{b}_6 = [309.1; -82.8; 66.5]$ (đơn vị tính: mm), khối lượng bộ di chuyển $m = 9$ kg, khối lượng chân dưới $m_1 = 0.8$ kg, khối lượng chân trên $m_2 = 0.2$ kg, mô men quán tính của bộ di chuyển $I_x = 0.121$ kgm², $I_y = 0.121$ kgm², $I_z = 0.242$ kgm², chiều dài chân dưới $l_1 = 0.47$ m, chiều dài chân trên $l_2 = 0.33$ m, khoảng cách từ chân dưới đến trọng tâm của nó $\delta = 0.2$ m, và hệ số ma sát $d_i = 1$. Các tham số điều khiển $\mathbf{k} = 20\mathbf{I}_{6 \times 6}$, $\mathbf{k}_s = \text{diag}(4, 4, 8, 16, 16, 16)$ và $\boldsymbol{\eta} = \text{diag}(4, 4, 8, 16, 16, 16)$. Thuật toán tối ưu (17) được giải bằng phương pháp Levenberg – Marquardt với điểm bắt đầu tối ưu nhất là giá trị trước đó đo được.



Hình 1. Đáp ứng vị trí và hướng của Stewart platform.

Hình 1 và hình 2 trình bày kết quả mô phỏng bao gồm đáp ứng đầu ra và trạng thái của cơ cấu chấp hành của hệ thống với thuật toán điều khiển được thiết kế trong phần 3 dưới mô hình được mô tả trong phương trình (8) (Mathematical Model) và mô hình được xây dựng qua Simscape trên nền tảng MATLAB (Quasi-Physical Model). Đầu tiên, có thể thấy rằng, các đáp ứng trạng thái của mô hình bán vật lý và mô hình toán học cho thấy không có sự khác biệt đáng kể. Lưu ý rằng, tại

thời điểm bắt đầu, do mô hình bán vật lý được thiết kế không dựa trên việc tự xây dựng, biến đổi các phương trình toán học chi tiết mà thiết kế dựa trên các phần mềm CAD, các phương trình toán học của từng cơ cấu ghép nối với nhau của phần mềm, nên có sự dung sai về giá trị ban đầu giữa mô hình toán học và mô hình bán vật lý. Thêm vào đó, đối với các đáp ứng của bộ điều khiển được đưa ra trong hai hình trên, sự sai lệch trong mô hình toán học và mô hình bán vật lý là không đáng kể, sai lệch này có thể được chấp nhận trong thực tế, nguyên nhân chủ yếu do các yếu tố không được xem xét trong mô hình lý tưởng. Thứ hai, với các giá trị bắt đầu khác nhau của cả mô hình bán vật lý và mô hình toán học, có thể thấy rằng thuật toán điều khiển đều có thể lái các biến trạng thái này tiến về giá trị đặt, điều này chứng minh rằng chiến lược điều khiển đề xuất khả thi và đúng đắn. Mô tả kết quả mô phỏng Simscape được đưa ra trong video: <https://youtu.be/7Y0hBNNKAZE>



Hình 2. Chiều dài chân và lực tác động của cơ cấu chấp hành của Stewart platform. Đường nét liền là giá trị của mô hình bán vật lý và đường nét đứt được đánh dấu tam giác là giá trị của mô hình toán học.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này trình bày chi tiết từng bước xây dựng mô hình của đối tượng sau đó thiết kế điều khiển dựa trên luật điều khiển chế độ trượt. Bên cạnh đó, các tác giả xây dựng mô hình và điều khiển cho hệ thống trên cả mô hình bán vật lý và toán học để thực hiện mô phỏng. Các kết quả mô phỏng cho thấy: 1) Mô hình toán học đề xuất được xây dựng có tính dẫn trong việc mô tả hành vi của hệ thống; 2) Luật điều khiển chế độ trượt được đề xuất và thiết kế có thể kiểm soát các trạng thái của hệ thống tới giá trị đặt. Tuy nhiên, như đã thấy, vẫn tồn tại các sai lệch nhỏ trong trạng thái của cơ cấu chấp hành, và luật điều khiển được đề xuất tại thời điểm ban đầu đưa ra các giá trị có biên độ lớn và bão hòa, do đó, trong tương lai, các phương pháp điều khiển tiên tiến hơn như sử dụng các dữ liệu từ mô hình và trí tuệ nhân tạo để có thể đạt được sai số nhỏ hơn trong mô hình. Đồng thời, các phương pháp điều khiển mạnh mẽ hơn, cho tốc độ đáp ứng tốt hơn và giảm thiểu sai lệch tĩnh sẽ được nghiên cứu.

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]. M. Furqan, M. Suhaib, and N. Ahmad, "Studies on Stewart platform manipulator: A review," Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 31, pp. 4459–4470, (2017).
- [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, p. 1436, (2016).
- [3]. K. Herbús 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, p. 42018, (2016).

- [4]. V. Patel, S. Krishnan, A. Goncalves, and K. Goldberg, “*SPRK: A low-cost Stewart platform for motion study in surgical robotics*,” in 2018 International Symposium on Medical Robotics (ISMR), pp. 1–6, (2018).
- [5]. A. L. Madsen and S. G. Kristensen, “*Design of Stewart platform for wave compensation*,” Aalborg University, (2012).
- [6]. G. Kazezkhan, B. Xiang, N. Wang, and A. Yusup, “*Dynamic modeling of the Stewart platform for the NanShan Radio Telescope*,” Advances in Mechanical Engineering, vol. 12, no. 7, p. 1687814020940072, (2020).
- [7]. D. Li and S. E. Salcudean, “*Modeling, simulation, and control of a hydraulic Stewart platform*,” in Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, pp. 3360–3366, (1997).
- [8]. B. Dasgupta and T. S. Mruthyunjaya, “*A Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator*,” Mech Mach Theory, vol. 33, no. 8, pp. 1135–1152, (1998).
- [9]. M.-J. Liu, C.-X. Li, and C.-N. Li, “*Dynamics analysis of the Gough-Stewart platform manipulator*,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 16, no. 1, pp. 94–98, (2000).
- [10]. G. Lebret, K. Liu, and F. L. Lewis, “*Dynamic analysis and control of a Stewart platform manipulator*,” J Robot Syst, vol. 10, no. 5, pp. 629–655, (1993), doi: 10.1002/rob.4620100506.
- [11]. A. Şumnu, İbrahim Halil 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).
- [12]. E. Akgül, “*PID and LQR control of a planar head stabilization platform*,” Middle East Technical University, (2011).
- [13]. M. R. C. Qazani, H. Asadi, S. Mohamed, C. P. Lim, and S. Nahavandi, “*A time-varying weight MPC-based motion cueing algorithm for motion simulation platform*,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 23, no. 8, pp. 11767–11778, (2021).
- [14]. 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).

ABSTRACT

Sliding Mode Control for Stewart platform manipulators: A quasi-physical model-based approach

This paper presents the design and implementation of a Sliding Mode Control (SMC) strategy for a 6-degree-of-freedom parallel robot, the Stewart Platform. The Stewart Platform is a type of parallel robot characterized by a structure consisting of six links connecting a fixed base to a movable platform, allowing for precise movement and control. This research begins with a detailed mathematical modeling of the Stewart Platform, capturing the system's complex kinematic and dynamic characteristics. Based on the system's dynamic model, the paper introduces a control method utilizing SMC for the Stewart Platform. Subsequently, a Simscape model, a simulation environment based on MATLAB, is provided to validate the performance and accuracy of the proposed control strategy. The simulations demonstrate significant improvements in the precision and stability of SMC in enhancing the operational efficiency of parallel robots. The simulation results are available at: <https://youtu.be/7Y0hBNNKAZE>.

Keywords: Stewart Platform; System modeling; Sliding Mode Control; Quasi-Physical Model; Simscape/MATLAB.