

Nâng cao chất lượng điều khiển bám cho anten vệ tinh trên hệ truyền động song song dạng Stewart Platform

Trần Trung Kiên¹, Nguyễn Trung Kiên², Đặng Nam Kiên^{1*}

¹Viện Tự động hóa Kỹ thuật quân sự, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 89B Lý Nam Đế, Cửa Đông, Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam;

²Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 17 Hoàng Sâm, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

*Email: dangnamkien@gmail.com

Nhận bài: 15/01/2024; Hoàn thiện: 06/3/2024; Chấp nhận đăng: 14/3/2024; Xuất bản: 01/4/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.CAPITI.2024.26-33>

TÓM TẮT

Bài báo xây dựng bộ điều khiển trượt hữu hạn thời gian hội tụ (Terminal Sliding Mode Control - TSM) cho từng động cơ của sáu chân xy lanh trong hệ truyền động song song dạng Stewart Platform trong bài toán bám vệ tinh của anten. Bộ điều khiển đề xuất đã hạn chế được những điểm yếu của các bộ điều khiển đã được nghiên cứu, mang lại chất lượng tốt hơn, đảm bảo được khả năng bám vệ tinh cho anten trong cả những trường hợp có biên độ góc lớn nhất. Kết quả nghiên cứu được mô phỏng minh chứng trên MATLAB.

Từ khóa: Robot song song; Hexapod; Stewart platform; Điều khiển chế độ trượt; TSM.

1. MỞ ĐẦU

Hiện nay việc sử dụng các anten tự động bám bắt vệ tinh đã được sử dụng rộng rãi, trong đó có nhiều hệ thống được truyền động bằng các hệ hai bậc tầm hướng, tuy nhiên, các hệ thống này thường gặp phải hiện tượng “lỗ khóa” (key hole) khi dịch chuyển gần khu vực đỉnh đầu (khi anten hướng vuông góc với mặt đất) [1]. Để giải quyết vấn đề này các hệ thống đưa thêm một trục quay thứ ba, cách bố trí này gọi là “khớp X-Y” [1], những hệ thống như vậy vẫn bộc lộ hạn chế với các trường hợp dư chấn động đòi hỏi giải quyết bài toán tối ưu.



Hình 1. Một hệ thống anten vệ tinh sử dụng cơ cấu truyền động dạng Stewart Platform của Viện Hàn lâm khoa học Việt Nam [2-3].

Khi vận hành các hệ thống đòi hỏi có tải trọng lớn các cơ cấu truyền động song song được lựa chọn vì ưu điểm vượt trội về độ cứng vững so với các cơ cấu nối tiếp mà đặc biệt là các cơ cấu nối tiếp càng nhiều khớp sẽ càng làm giảm độ cứng vững và khả năng chịu tải của hệ thống. Ngoài ra một số cấu hình của robot song song còn mang đến một đặc điểm nổi trội đó là tính đối xứng quanh trục thẳng đứng, giúp cho các anten vệ tinh đặt trên đó có khả năng bám các góc hướng quay đủ

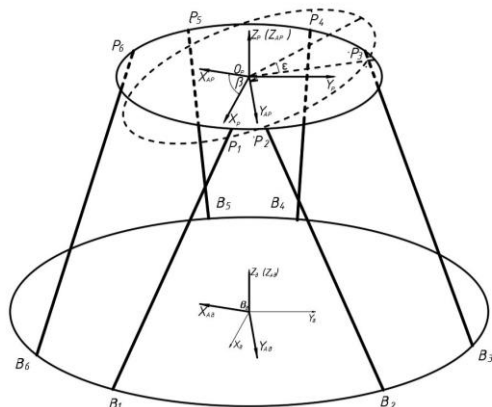
360⁰ dễ dàng. Vì vậy, cấu hình robot song song phổ biến được sử dụng cho anten bám vệ tinh là dạng Stewart Platform.

Trong bài toán bám quỹ đạo của vệ tinh dùng anten đặt trên nền hệ truyền động song song nhiều tác giả sử dụng các bộ điều khiển PID [2, 4-6], tuy nhiên, khi so sánh với các bộ điều khiển trượt [6-7] có tính bền vững khi tải trọng các chân thay đổi thì điều khiển PID bộc lộ hạn chế. Nhưng bộ điều khiển trượt thông thường có thời gian hội tụ không xác định có thể ảnh hưởng đến chất lượng bám của anten. Do vậy, tác giả đề xuất nâng cấp các hệ thống điều khiển hiện có bằng bộ điều khiển trượt hữu hạn thời gian hội tụ (TSM).

2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

2.1. Động hình học của bài toán bám quỹ đạo vệ tinh cho anten có hệ truyền động song song

Trong các nghiên cứu về robot song song dạng Stewart Platform bài toán động hình học ngược đã được giải quyết [3-7], tuy nhiên, với bài toán bám vệ tinh đặc biệt với những quỹ đạo có biên độ lớn vượt qua giới hạn trong cấu hình hình học của hệ truyền động song song cần có phương pháp giải bài toán động hình học ngược khác. Do cấu hình đối xứng của hệ truyền động song song dạng Stewart Platform, với các góc bám yêu cầu của vệ tinh là ϵ, β (theo thứ tự là góc tầm, góc hướng trong hệ tọa độ cố định ENU (East North Up)) thay vì quay trực tiếp 3 góc tư thế roll, pitch, yaw thì có thể trực tiếp quay anten về góc tầm ϵ từ chính tại trục vuông góc với hướng yêu cầu của vệ tinh. Khi đó, cần xác định được tọa độ của các khớp nối trên hệ tọa độ động gắn với hướng yêu cầu của vệ tinh.



Hình 2. Hệ trục tọa độ động gắn với góc hướng β .

Giả sử hệ tọa độ động đặt tại mặt đế của hệ truyền động tại góc hướng β là $O_B X_{BA} Y_{BA}$, khi đó, tương tự như [3] tọa độ các khớp tại chân đế:

$$B_{Ai} = \begin{bmatrix} r_B \cos(\phi_i - \beta) \\ r_B \sin(\phi_i - \beta) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{Aix} \\ B_{Aiy} \\ B_{Aiz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Với $\phi_i = \frac{(i-1)\pi}{3} - \frac{\alpha_B}{2}$ khi $i = 1, 3, 5$; $\phi_i = \phi_{i-1} + \alpha_B$.

Tương tự có thể tính được tọa độ các khớp nối mặt công tác:

$$P_{Ai} = \begin{bmatrix} r_P \cos(\theta_i - \beta) \\ r_P \sin(\theta_i - \beta) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{Aix} \\ P_{Aiy} \\ P_{Aiz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Với $\theta_i = \frac{(i-2)\pi}{3} - \frac{\alpha_p}{2}$ khi $i = 1, 3, 5$; $\theta_i = \theta_{i-1} + \alpha_p$.

Khi đó, ma trận quay với góc tầm ϵ sẽ là:

$$R_{AT} = R_y(\epsilon) = \begin{bmatrix} \cos(\epsilon) & 0 & \sin(\epsilon) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\epsilon) & 0 & \cos(\epsilon) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Do tọa độ tâm của mặt công tác không chuyển động trong quá trình bám vệ tinh có thể đặt tại vị trí trung gian chính giữa để đảm bảo được các biên độ góc bám vệ tinh được lớn nhất:

$$T = [0 \ 0 \ Z_0]^T \quad (4)$$

Với Z_0 là chiều cao của mặt công tác tính từ mặt đế khi các chân dẫn động đều nằm ở vị trí trung bình [3]. Khi đó, tọa độ của tâm mặt công tác trên hệ tọa độ động vẫn được giữ nguyên:

$$T_A = T \quad (5)$$

Tương tự như [3], trong hệ tọa độ động, vector chiều dài chân dẫn động được tính bởi:

$$L_{Ai} = R_{AT} \cdot P_{Ai} + T_A - B_{Ai} \quad (6)$$

Khi đó, chiều dài chân dẫn động thực tế là:

$$l_i = \sqrt{L_{Aix}^2 + L_{Aiy}^2 + L_{Aiz}^2} \quad (7)$$

Như vậy, với (6) và (7) có thể tính toán được độ dài các chân dẫn động cho hệ truyền động song song của anten từ các thông số về vị trí của vệ tinh (góc tầm và góc hướng). Khi có các chiều dài chân dẫn động yêu cầu, bộ điều khiển của từng động cơ của các chân cần phải bám theo giá trị này.

2.2. Mô hình động cơ điện một chiều từng trục xy lanh của hệ thống truyền động

Tương tự như nghiên cứu trong [8], phương trình động học sai số cho động cơ từng chân dẫn động được mô tả bởi:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -a_1 x_1 - a_2 x_2 + f(t) - bu \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó, a_1, a_2, b là các tham số dương; x_1, x_2 lần lượt là sai số vận tốc và gia tốc của góc quay động cơ và $f(t)$ là tải đặt lên chân dẫn động, đối với hệ truyền động song song dạng Stewart Platform thì $f(t)$ là tải bất định giới nội:

$$|f(t)| \leq M \quad (9)$$

Với M là một giá trị dương biết trước.

2.3. Điều khiển bám vị trí từng trục động cơ bằng bộ điều khiển trượt thông thường (SMC)

Xác định biến trượt cho hệ (8):

$$S = cx_1 + x_2 \quad (10)$$

Trong đó c là một số dương.

Khi đó đạo hàm của biến trượt được tính bởi:

$$\dot{S} = cx_1 + \dot{x}_2 \quad (11)$$

Thế (8) vào (11) thu được:

$$\dot{S} = cx_2 - a_1x_1 - a_2x_2 + f(t) - bu \quad (12)$$

Đầu vào điều khiển của các bộ điều khiển trượt được tạo thành bởi hai thành phần, điều khiển tương đương u_{eq} và thành phần gián đoạn u_d :

$$u = u_{eq} + u_d \quad (13)$$

Trong đó, thành phần tương đương đảm bảo biến trượt S nằm trên mặt trượt $S=0$ hay $\dot{S} = 0$, khi đó tìm được u_{eq} :

$$u_{eq} = \frac{1}{b} [cx_2 - a_1x_1 - a_2x_2] \quad (14)$$

Thành phần gián đoạn có dạng:

$$u_d = K \text{sign}(S) \quad (15)$$

Trong đó, K là một hằng số dương, được chọn sao cho $b.K \geq M$ hay:

$$b.K = M + \sigma, \text{ với } \sigma \geq 0 \quad (16)$$

Khi đó, thay (13), (14) và (15) vào (12), ta có:

$$\dot{S} = -bK\text{sign}(S) + f(t) \quad (17)$$

Chọn hàm ứng viên Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2}S^2 \quad (18)$$

Khi đó, đạo hàm của V sẽ là:

$$\dot{V} = S\dot{S} = -bK|S| + S.f(t) \quad (19)$$

Kết hợp với điều kiện (9), ta có:

$$\dot{V} < -bK|S| + |S|.M = (-bK + M)|S| = -\sigma|S| \leq 0 \quad (20)$$

Theo (20) luôn có $\dot{V} \leq 0$, hay hệ ổn định theo Lyapunov.

2.4. Điều khiển bám vị trí từng trục động cơ bằng bộ điều khiển trượt hữu hạn thời gian hội tụ (TSM)

Xác định biến trượt cho hệ (8):

$$S = cx_1^{\frac{p}{q}} + x_2 \quad (21)$$

Trong đó, p, q là các số nguyên dương lẻ thỏa mãn $q = 2p - 1$; c là một số dương.

Khi đó, đạo hàm của biến trượt được tính bởi:

$$\dot{S} = c\frac{p}{q}x_1^{\frac{p-q}{q}}\dot{x}_1 + \dot{x}_2 \quad (22)$$

Thế (8) vào (22) thu được:

$$\dot{S} = c\frac{p}{q}x_1^{\frac{p-q}{q}}x_2 - a_1x_1 - a_2x_2 + f(t) - bu \quad (23)$$

Đầu vào điều khiển của các bộ điều khiển trượt được tạo thành bởi hai thành phần, điều khiển tương đương u_{eq} và thành phần gián đoạn u_d :

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{eq} + \mathbf{u}_d \quad (24)$$

Trong đó, thành phần tương đương đảm bảo biến trượt S nằm trên mặt trượt $S=0$ hay $\dot{S} = 0$, khi đó tìm được \mathbf{u}_{eq} :

$$\mathbf{u}_{eq} = \frac{1}{b} \left[c \frac{p}{q} x_1^{\frac{p-q}{q}} x_2 - a_1 x_1 - a_2 x_2 \right] \quad (25)$$

Thành phần gián đoạn có dạng:

$$\mathbf{u}_d = \mathbf{K} \text{sign}(S) \quad (26)$$

Trong đó, K là một hằng số dương, được chọn sao cho $\mathbf{b} \cdot \mathbf{K} \geq \mathbf{M}$ hay:

$$\mathbf{b} \cdot \mathbf{K} = \mathbf{M} + \sigma, \text{ với } \sigma \geq \mathbf{0} \quad (27)$$

Khi đó, thay (24), (25) và (26) vào (23), ta có:

$$\dot{S} = -\mathbf{bK} \text{sign}(S) + \mathbf{f}(t) \quad (28)$$

Chọn hàm ứng viên Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (29)$$

Khi đó, đạo hàm của V sẽ là:

$$\dot{V} = S\dot{S} = -\mathbf{bK}|S| + S \cdot \mathbf{f}(t) \quad (30)$$

Kết hợp với điều kiện (9), ta có:

$$\dot{V} < -\mathbf{bK}|S| + |S| \cdot \mathbf{M} = (-\mathbf{bK} + \mathbf{M})|S| = -\sigma|S| \leq \mathbf{0} \quad (31)$$

Theo (31) luôn có $\dot{V} \leq \mathbf{0}$, hay hệ ổn định theo Lyapunov.

3. MÔ PHỎNG, KẾT QUẢ, THẢO LUẬN

Để thực hiện các mô phỏng, ta đưa vào các tham số động hình học cho hệ thống truyền động song song đảm bảo cho khả năng bám bắt được vệ tinh với biên độ lớn nhất, trong bài báo này giới hạn cho các góc tầm và hướng của vệ tinh được cho như sau:

$$\begin{cases} \frac{\pi}{18} \leq \epsilon \leq \frac{\pi}{2} \\ -\frac{\pi}{2} < \beta < \pi/2 \end{cases} \quad (32)$$

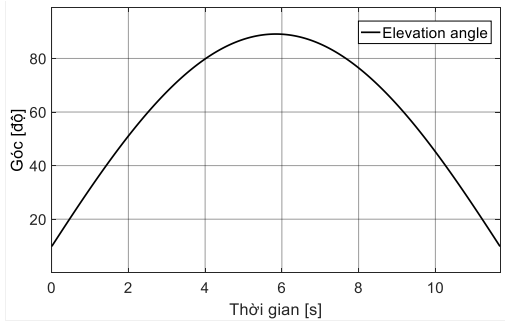
Các giá trị biến đổi theo thời gian của hai góc này được thể hiện trên hình 3 và 4.

Chọn cấu hình động hình học cho hệ truyền động song song dạng Stewart Platform với thông số sau để thực hiện mô phỏng:

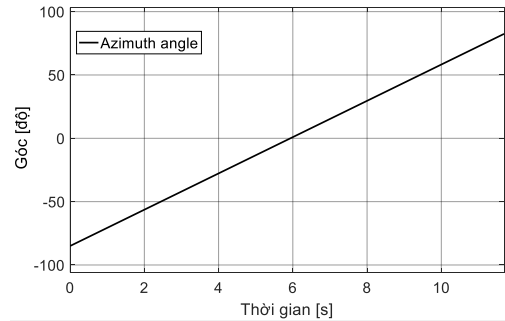
$$\begin{cases} L_{max} = 2720.5 \text{ mm} \\ L_{min} = 1520.5 \text{ mm} \\ r_B = 1000 \text{ mm} \\ r_P = 515 \text{ mm} \\ \alpha_B = 105 \text{ độ} \\ \alpha_P = 15 \text{ độ} \end{cases} \quad (33)$$

Sử dụng phần mềm mô phỏng Matlab Simulink cho hệ thống bám vệ tinh của anten đặt trên hệ thống truyền động song song 6 trục dạng Stewart Platform, kết quả mô phỏng được thể hiện từ

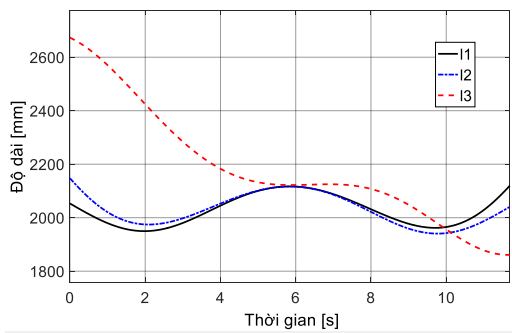
hình 5 đến hình 12. Trong đó, hình 5, 6 thể hiện sự thay đổi chiều dài chân dẫn động của hệ truyền động khi bám theo quỹ đạo vệ tinh cho bởi (32).



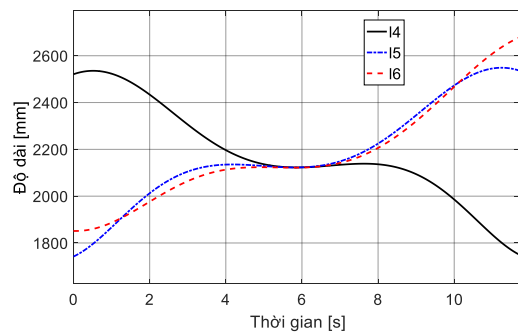
Hình 3. Góc tâm của vệ tinh.



Hình 4. Góc hướng của vệ tinh.



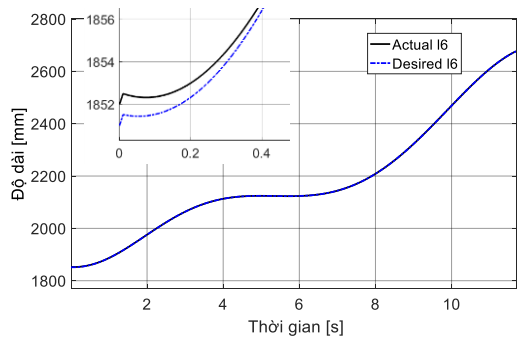
Hình 5. Chiều dài chân 1, 2, 3.



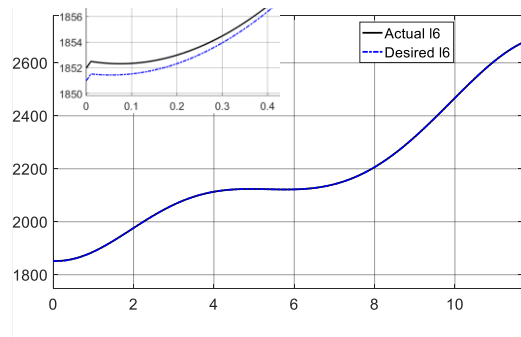
Hình 6. Chiều dài chân 4, 5, 6.

Các hình 7 đến hình 10 thể hiện khả năng bám chiều dài một chân dẫn động (chân thứ 6) theo giá trị mong muốn của động cơ với hai bộ điều khiển: trượt thông thường (SMC) và TSM trong đó sai số bám chiều dài của cả hai bộ điều khiển rất nhỏ (dưới 0.005 mm), đặc biệt là với TSM thì sai số còn nhỏ hơn.

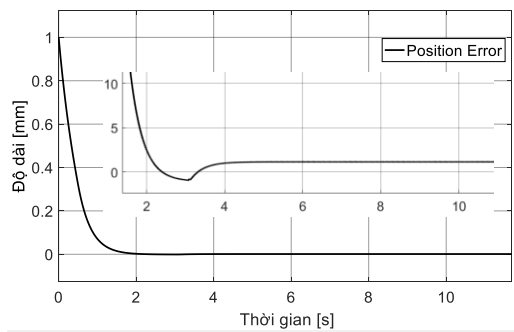
Hình 11 và hình 12 thể hiện sai số bám góc tâm và góc hướng của vệ tinh bởi hai bộ điều khiển, trong đó bộ điều khiển TSM thể hiện được chất lượng tốt hơn, đặc biệt khi góc tâm ở quanh vị trí 90^0 , trong khi sai số của SMC có thể đến 0.005^0 , sai số này tương ứng với độ lệch vị trí của vệ tinh ở độ cao 680 km (vệ tinh VNREDSat-1) là 60 m.



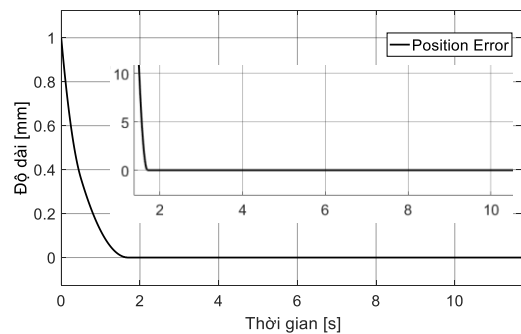
Hình 7. Chiều dài thực tế và mong muốn của chân 6 (SMC).



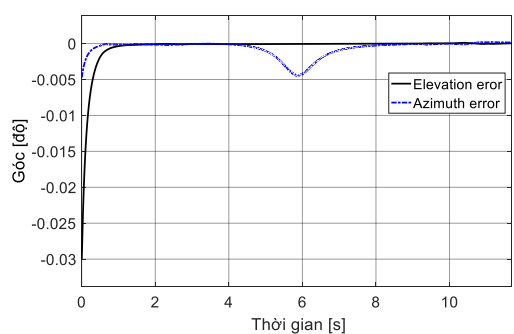
Hình 8. Chiều dài thực tế và mong muốn của chân 6 (TSM).



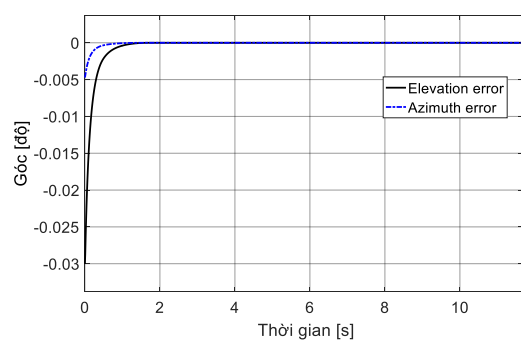
Hình 9. Sai số vị trí của chân 6 (SMC).



Hình 10. Sai số vị trí của chân 6 (TSM).



Hình 11. Sai số bám góc tầm và hướng của vệ tinh (SMC).



Hình 12. Sai số bám góc tầm và hướng của vệ tinh (TSM).

Các kết quả này khẳng định được việc sử dụng bộ điều khiển TSM đã nâng cao được chất lượng bám quỹ đạo của vệ tinh bằng anten gắn trên hệ truyền động dạng Stewart Platform.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng bộ điều khiển TSM mới áp dụng cho anten bám vệ tinh đặt trên hệ truyền động song song dạng Stewart Platform có chất lượng tốt hơn so với bộ điều khiển trượt thông thường. Với kết quả đó, phương pháp này có thể áp dụng cho các hệ thống có cơ cấu truyền động song song tương tự để đảm bảo hiệu quả cao. Kết quả nghiên cứu được chứng minh một cách chặt chẽ về mặt toán học và mô phỏng trực quan.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. N.V.Afzulpurkar B.E, “Kinematics, design, programming and control of a robotic platform for satellite tracking and other applications”, Thesis for degree of Doctor of Philosophy, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, (1990).
- [2]. Trần Văn Hội, “Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo thiết bị thu mặt đất với cơ chế tự động phát hiện và bám vệ tinh dùng cho hệ thống thông tin vệ tinh Vinasat”, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Công Nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội, (2018).
- [3]. Trần Trung Kiên, Nguyễn Vũ, Nguyễn Trung Kiên, Vũ Đức Tuấn, Phạm Minh Tân, “Xây dựng Forward kinematics cho hệ Stewart trong một số trường hợp riêng”, Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, Số Đặc san Hội thảo Quốc gia FEE, (2020).
- [4]. Ngô Duy Tân, Đặng Quốc Đại, Vương Huy Hoàng, “Nghiên cứu và thiết kế bộ đỡ kiểu hexapod cho hệ thống anten bám theo vệ tinh nhỏ quan sát Trái đất”, Tạp chí Tự động hóa ngày nay, Số 218. Tr.28 – 30, ISSN 1859-0551, (2019).
- [5]. Ngo Duy Tan, Le Ngoc Giang, Nguyen Duc Viet, “Modelling and simulation of a hexapod antenna system for tracking VNREDSAT-1 satellite”, 2020 IEEE International Conference on Environment and

- Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2020, Madrid, Spain, (2020).
- [6]. S. Iqbal, A.I. Bhatti, Q. Ahmed, “*Dynamic Analysis and Robust Control Design for Stewart Platform with Moving Payloads*”, IFAC Proceedings Volumes, Volume 41, Issue 2, Pages 5324-5329, ISSN 1474-6670, ISBN 9783902661005, (2008), <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00897>.
- [7]. Selçuk Kizir and Zafer Bingul. “*Position Control and Trajectory Tracking of the Stewart Platform*”, Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Dynamics, Control and Optimization, Dr. Serdar Kucuk (Ed.), ISBN: 978-953-51-0437-7, InTech, (2012).
- [8]. Utkin, V.I., “*Sliding mode control design principles and applications to electric drives*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 1, pp. (23–36), ISSN 1042-296X, (1993).

ABSTRACT

Improve the quality of tracking control for satellite antenna on Stewart platform parallel drive system

This article builds a Terminal Sliding Mode Control (TSM) for each motor of six cylinder legs in a Stewart Platform parallel drive system of satellite tracking antenna. The proposed controller has limited the weaknesses of the controllers that have been researched, providing better quality and ensuring satellite tracking ability for the antenna in even cases with the largest angular amplitudes. The research results are simulated and demonstrated on MATLAB. The research results are simulated and demonstrated on MATLAB.

Keywords: Parallel robot; Hexapod; Satellite tracking antenna; SMC; TSM.