

# Tổng quan về robot song song sáu bậc tự do

■ **TS. PHẠM VĂN TRIỆU\***

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

■ **KS. ĐẶNG VĂN TRỌNG**

Viện Điện - Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

■ **ThS. VŨ TÀI TÚ**

Viện Vũ khí - Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng

\* Email: phanvantrieu@vumaru.edu.vn

**TÓM TẮT:** Bài báo là sự tổng hợp các nghiên cứu trước đây về đối tượng Stewart Platform - robot song song sáu bậc tự do. Những phân tích về đối tượng, động học, động lực học, luật điều khiển đã sử dụng được đưa ra thảo luận, qua đó xác định được các xu hướng nghiên cứu của vấn đề này và các vấn đề chưa được giải quyết.

**TỪ KHÓA:** Robot song song, phân tích động học, phân tích động lực học, phương pháp điều khiển.

**ABSTRACT:** This paper is a synthesis of previous research on Stewart Platform object - robot parallel to six degrees of freedom. The analysis of the object, kinematic, dynamics and control method are discussed. Thereby, the research trends of this problem and the unresolved issues are identified.

**KEYWORDS:** Stewart Platform, kinematic analysis, dynamic analysis, control method.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

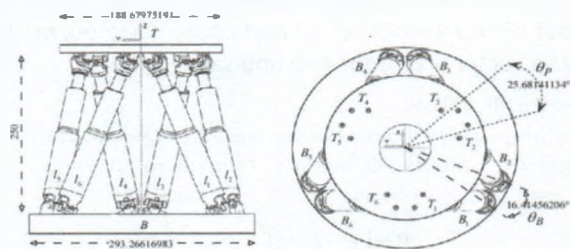
Stewart Platform là robot song song gồm sáu chân. Trong những năm gần đây, nhu cầu thiết kế những thiết bị có chuyển động chính xác đang tăng lên. Do đó, những robot song song có độ bền cao và khả năng làm việc chính xác đã trở nên phổ biến. Robot song song có cả những tiềm năng để ứng dụng vào các hệ thống bên ngoài không gian như hệ thống ăng-ten vệ tinh, hệ thống định vị kính viễn vọng và thiết bị trở [1]. Công nghệ quan trọng nhất là kiểm soát và giảm chấn giữa thiết bị và nguồn nhiễu đã được áp dụng vào giao thoa không gian, liên lạc bằng laser giữa các tàu vũ trụ. Ngoài ra, nó được ứng dụng trong rất nhiều lĩnh vực như: mô phỏng chuyển bay và phương tiện giao thông, máy móc với độ chính xác cao, thiết bị phẫu thuật, giải trí... [2]. Robot song song sáu bậc tự do là một cơ cấu khép kín bao gồm bề mặt cố định nằm phía dưới, bề mặt chuyển động nằm phía trên và liên kết với nhau bằng 6 chân, hai đầu của mỗi chân có các khớp chuyển động linh hoạt. Cơ chế này lần đầu được đề xuất vào năm 1949 với ứng dụng là máy kiểm tra lớp đa năng [3] bởi Gough, sau đó được Stewart nghiên cứu lại và

công bố trước giới khoa học dưới dạng thiết bị mô phỏng chuyển bay [4] vào năm 1965. Rough là người đầu tiên phát hiện ra lợi ích của cơ chế này nhưng những nghiên cứu sau này được thực hiện bởi Stewart nên cơ chế đó thường được gọi là Stewart Platform.

Mục đích của bài báo này là trình bày những kết quả nghiên cứu cho robot song song sáu bậc tự do. Từ việc phân tích động học, động lực học và thiết kế điều khiển sẽ xác định được nội dung đã nghiên cứu và phạm vi phát triển. Bài viết được trình bày như sau: Phần 2: Mô tả cấu trúc của robot song song sáu bậc tự do. Phần 3: Những hướng xây dựng động học đối tượng. Phần 4: Những phương pháp xây dựng phương trình động lực học hệ thống. Phần 5: Những thiết kế điều khiển đã được trình bày. Cuối cùng, phần 6 là kết luận và hướng phát triển.

## 2. MÔ TẢ CẤU TRÚC

Robot song song được sử dụng trong nghiên cứu này (Hình 2.1), là một cơ chế song song 6 - DOF, bao gồm một tấm di chuyển thân cứng, được kết nối với một tấm đế cố định thông qua 6 chân động học độc lập.



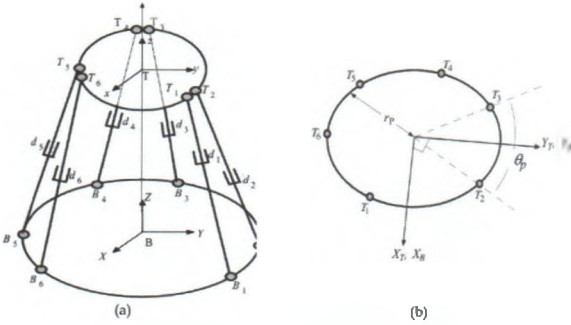
Hình 2.1: Mô hình 3D của robot song song

Để mô tả rõ ràng chuyển động của bề mặt chuyển động, các hệ tọa độ được minh họa trong Hình 2.1. Hệ tọa độ  $(B_{XYZ})$  được gắn với khung tọa độ cố định và hệ tọa độ  $(T_{XYZ})$  nằm ở trọng tâm của bề mặt chuyển động. Điểm  $(B_1$  và  $T_1)$  là các điểm kết nối với mặt cố định và mặt chuyển động. Những điểm này được đặt trên các bề mặt cố định và di chuyển (ngoài ra, các góc giữa các điểm  $(T_3$  và  $T_4$  và  $T_5, T_1$  và  $T_6)$  được ký hiệu là  $\theta_p$ . Theo cách tương tự, các góc giữa các điểm  $(B_1$  và  $B_2, B_3$  và  $B_4, B_5$  và  $B_6)$  được ký hiệu là  $\theta_B$ .

## 3. PHÂN TÍCH ĐỘNG HỌC

Trong cuối những năm 1980 và đầu những năm 1990,

bài toán chuyển động của 6 chân thông qua việc xác định vị trí và hướng có vị trí trung tâm trong nghiên cứu robot song song.



Hình 3.1: Sơ đồ của robot song song

Từ Hình 3.1, vị trí của điểm liên kết  $i^{th}$  ( $T_i$ ) trên bề mặt di chuyển có thể được tìm thấy (phương trình 1).  $r_p$  và  $r_b$  là bán kính của bề mặt di chuyển và bề mặt cố định. Bằng cách sử dụng phương pháp tương tự, vị trí của điểm liên kết  $i^{th}$  ( $B_i$ ) trên bề mặt cố định có thể được lấy từ công thức 2.

$$GT_i = \begin{bmatrix} GT_{zi} \\ GT_{pi} \\ GT_{xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p \cos(\lambda_i) \\ r_p \sin(\lambda_i) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \lambda_i = \frac{i\pi}{3} - \frac{\theta_p}{2} \quad i = 1,3,5$$

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} + \theta_p \quad i = 2,4,6 \quad (1)$$

$$B_i = \begin{bmatrix} B_{zi} \\ B_{yi} \\ B_{xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_b \cos(\nu_i) \\ r_b \sin(\nu_i) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \nu_i = \frac{i\pi}{3} - \frac{\theta_b}{2} \quad i = 1,3,5$$

$$\nu_i = \nu_{i-1} + \theta_b \quad i = 2,4,6 \quad (2)$$

Hình dạng của bề mặt chuyển động có thể được mô tả bằng một vector vị trí  $P$  và một ma trận  $R$ . Ma trận quay được xác định bởi ba góc quay. Cụ thể là, phép quay  $\alpha$  quanh trục  $x$  cố định, theo sau là phép quay  $\beta$  quanh trục  $y$  cố định và phép quay  $\gamma$  về trục  $z$  cố định. Theo cách này, ma trận xoay của bề mặt di chuyển đối với hệ tọa độ cố định. Vị trí vector  $P$  biểu thị vector tịnh tiến điểm gốc của bề mặt di chuyển đối với bề mặt cố định. Do đó, ma trận xoay và vector vị trí được cho như sau:

$${}^B R_T = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\gamma\sin\alpha\sin\beta - \cos\alpha\sin\gamma & \sin\alpha\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma\sin\beta \\ \cos\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma + \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \cos\gamma\sin\alpha \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\alpha & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P = [x \quad y \quad z]^T \quad (4)$$

Xem lại Hình 3.1, các vector  $G_{Ti}$  và  $B_i$  được chọn làm vector vị trí. Vector  $L_i$  của liên kết  $i$  nhận được là:

$$L_i = R_{XYZ}GT_i + P - B_i \quad i = 1,2,\dots,6 \quad (5)$$

Để đưa giải pháp hoàn chỉnh của vấn đề khá khó khăn, nhiều cách tiếp cận đã được thực hiện bởi các nhà nghiên cứu khác nhau, sau đây là một vài cách tiếp cận để giải quyết vấn đề này:

Phương pháp tiếp cận [5] đã trực tiếp sử dụng đến việc giải phương trình phi tuyến, các thuật toán có lợi thế tính toán trong hầu hết các trường hợp thực tế khi chỉ cần một nghiệm nhưng chúng không phù hợp cho trường hợp lý thuyết vì nó không xác định được tất cả các nghiệm. Một

thuật toán tìm kiếm đơn chiều để tìm tất cả các nghiệm cũng được phát triển bởi Innocenti và Parenti-Castelli [6]. Thuật toán này tạm thời thay thế một trong các chân của robot song song 6 bậc tự do bằng một chân ảo có chiều dài thay đổi để chuyển nó thành robot song song 5 bậc tự do, để giải quyết các cấu trúc đã được sửa đổi bằng phương pháp chuyển biệt của Innocenti và Parenti-Castelli [7]. Một thuật toán dự đoán và sửa chữa được phát triển bởi Dasgupta và Mruthyunjaya [8] sử dụng một thuật toán tìm kiếm 3D hiệu quả để tìm kiếm các nghiệm thực từ hình học. Tất cả các phương pháp trên đều hữu ích để tìm ra các nghiệm thực duy nhất và không thể được sử dụng để dự đoán tất cả các nghiệm. Giải pháp số thành công nhất cho mục đích này được cung cấp bởi Raghavan [9], người đã đưa ra bài toán dưới dạng một hệ đa thức và giải nó bằng phương pháp mở rộng của Morgan [10]. Đã tìm thấy 40 nghiệm trong miền phức, ông kết luận rằng giới hạn trên của số lượng nghiệm cho trường hợp chung là 40 nghiệm.

Phương pháp phân tích [11] đối với bài toán động học vị trí đã tuyến tính hóa một số phương trình để giảm tổng bậc của hệ đa thức thành 64, ít nhất là trong trường hợp cơ sở phẳng. Tuy nhiên, các giải pháp số của hệ thống đa thức hoặc vi phân số của một đa thức đơn biến nhấn mạnh giới hạn trên của số lượng nghiệm là 40. Wen và Liang [12] đã theo một cách tiếp cận khác và phân tích giải quyết vấn đề cho robot song song 6 bậc tự do bằng cách rút gọn các phương trình động học thành một đa thức đơn biến và thiết lập giới hạn trên của 40 nghiệm. Cuối cùng, để hoàn thiện, cần đề cập đến giải pháp mạng nơ-ron đã được khám phá bởi Geng và Haynes [13] cho lời giải của bài toán động học vị trí.

#### 4. PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC

So với lượng lớn tài liệu nghiên cứu về động học của robot song song thì các nghiên cứu về động lực học tương đối ít. Động lực học phức tạp thường dẫn đến việc đơn giản hóa mô hình làm giảm sự chính xác. Để khắc phục điều này, xác định động học và động lực học chính xác là cần thiết, đặc biệt trong việc thiết kế điều khiển. Tuy nhiên, mô hình động lực học của robot song song khá phức tạp vì cấu trúc vòng kín của chúng, mối quan hệ kết hợp giữa các tham số hệ thống, tính phi tuyến và các ràng buộc động học. Một số phương pháp xây dựng phương trình động lực học được trình bày trong phần này như sau:

Phương pháp Newton-Euler đòi hỏi chúng ta phải tính toán đầy đủ các lực của đối tượng, sau đó sử dụng định luật chuyển động để cân bằng tổng các lực với tổng động lượng. Do và Yang [14] đã giải quyết động lực học của robot song song bằng phương pháp Newton-Euler và giả định các khớp không có ma sát và chân không đối xứng. Dasgupta và Mruthyunjaya [15] đã phát triển một công thức hoàn chỉnh của vấn đề động lực học thông qua phương pháp Newton-Euler, tạo ra một thuật toán giảm thiểu việc tính toán và được chứng minh là rất phù hợp việc tính toán song song. Cụ thể, Guo và Li [16] sau khi biểu diễn các lực ràng buộc, thì phương trình động lực học được đưa ra như sau:



$$m_p \ddot{\mathbf{q}}_c = -\sum_{i=1}^6 (f_p)_i + m_p \mathbf{g} \quad (6)$$

Với:  $m_p$  - Khối lượng của bề mặt chuyển động;  
 $(f_p)_i$  - Biểu thức của lực ràng buộc;  
 $\mathbf{q}_c$  - Gia tốc của bề mặt chuyển động.

Phương pháp Lagrange được sử dụng để mô tả động lực học của một hệ thống cơ khí từ khái niệm về công và năng lượng. Geng cùng cộng sự [17] và Liu cùng cộng sự [18] đã phát triển các phương trình động lực học Lagrangian bằng việc đơn giản hóa các giả định liên quan đến hình học và phân bố quán tính của cơ cấu điều khiển. Abdellatif và Heimann [19] đưa ra kết luận rõ ràng và bộ phương trình vi phân 6 chiều chi tiết mô tả động lực học của robot song song 6 bậc tự do. Họ đã chứng minh rằng có thể tạo ra mô hình rõ ràng bằng cách sử dụng Lagrangian để tính toán hiệu quả và không có sự đơn giản hóa. Cụ thể, Bingul và Karahan [20] đã trình bày một cách cụ thể công và năng lượng của robot để đưa ra phương trình động lực học như sau:

Công thức Lagrange được sử dụng để lấy mô hình động lực học của robot song song. Coi  $q$  và  $\tau$  lần lượt là các tọa độ tổng quát và các lực tổng quát:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial K(q, \dot{q})}{\partial q} + \frac{\partial P(q)}{\partial q} = \tau \quad (7)$$

Trong đó:  $K(q, \dot{q})$  - Động năng và  $P(q)$  - Thế năng.

Tọa độ tổng quát  $q$  được thay thế bằng tọa độ để các (X). Phương trình động lực học được suy ra từ phương trình 30 có thể được viết dưới dạng:

$$\mathbf{J}^T(\mathbf{X})\mathbf{F} = \mathbf{M}(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{c}_m(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}})\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{G}(\mathbf{X}) \quad (8)$$

Trong đó:  $\mathbf{F} = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6]^T$  - Lực tác dụng bởi cơ cấu truyền động của chân  $i$ ;  $\mathbf{J}$  - Ma trận Jacobian;  $\mathbf{M}$  - Ma trận quán tính;  $\mathbf{V}_m$  - Ma trận Coriolis và  $\mathbf{G}$  trọng lực.

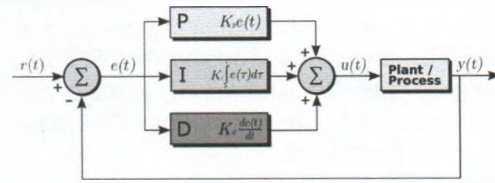
Ngoài ra, đối với mô hình động lực học của robot song song, nhiều phương pháp đã được phát triển, chẳng hạn như nguyên tắc công ảo trong [21], phương pháp của Kane trong [22] và phương pháp ma trận đệ quy [23]. Mặc dù nguồn gốc các phương trình về động lực học của robot song song thể hiện các mức độ phức tạp khác nhau và khối lượng tính toán nhưng kết quả của các lực/mô-men truyền động được tính toán bởi các cách tiếp cận là tương đương nhau. Mục tiêu chính của các phương pháp tiếp cận được đề xuất gần đây là giảm thiểu số lượng các khó khăn liên quan đến việc tính toán động lực học của robot.

### 5. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Từ những kế thừa của những nghiên cứu trên về phân tích, phát triển mô hình động lực và động lực học, những công bố tiếp theo đã phát triển bộ điều khiển cho robot song song.

Bộ điều khiển PID được sử dụng với mục tiêu điều khiển giúp giảm sai lệch quỹ đạo, quỹ đạo thực tế tiến dần đến quỹ đạo đặt đã được trình trong [24]. Đặc điểm nổi bật của bộ điều khiển PID là khả năng sử dụng ba thuật ngữ điều khiển tỷ lệ, tích phân và đạo hàm ảnh hưởng đến đầu ra bộ điều khiển để áp dụng điều khiển chính xác và tối ưu.

Bộ điều khiển PID liên tục tính toán và giảm thiểu giá trị lỗi  $e(t)$  giữa giá trị đặt và đầu ra  $y(t)$ .



Hình 5.1: Sơ đồ khối của bộ điều khiển PID

Đối với robot song song mà ta đang xem xét thì giá trị lỗi  $e(t)$  được định nghĩa là quỹ đạo đặt và quỹ đạo đầu ra của từng chân.

$$e(t) = \text{Leg Trajectory} - \text{Leg Real}$$

Với  $K_p, K_i, K_d$  lần lượt là độ lợi của khâu tỷ lệ, khâu tích phân và khâu vi phân thì tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển PID được tính toán như sau:

$$\tau_m = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t') dt' + K_d \frac{d(e(t))}{dt} \quad (9)$$

Bộ điều khiển trượt được đề xuất trong [25] giúp đưa quỹ đạo tiến dần về quỹ đạo đặt. Trong chế độ trượt, chúng ta định nghĩa một mặt phẳng là mặt trượt. Cách tiếp cận thiết kế này bao gồm hai thành phần, đầu tiên là giai đoạn đạt tới mặt phẳng trượt và thứ hai là giai đoạn trượt. Ngoài ra, Guo và cộng sự [26] đã thực hiện điều khiển tăng cho thành phần dẫn động bằng thủy lực của robot song song 6 bậc tự do. Lee và cộng sự [6] thực hiện điều khiển vị trí bằng cách kết hợp điều khiển động lực học ngược với xấp xỉ gần đúng động lực học và bộ điều khiển  $H_\infty$ .

### 6. KẾT LUẬN

Qua bài này, nhóm tác giả đã trình bày được một bảng tổng hợp của nghiên cứu trên robot song song 6 bậc tự do. Bài báo tập trung vào các nghiên cứu đã thực hiện bằng nhiều phương pháp khác nhau và xác định các lĩnh vực vấn đề chưa được giải quyết, qua đó thấy được những ưu, nhược điểm của các phương pháp giúp chúng ta dễ dàng kế thừa để phát triển cho những nghiên cứu sau này.

Những vấn đề sau đây được đánh giá là những nghiên cứu sẽ phát triển trong thời gian sắp tới:

**Hướng nghiên cứu 1:** Để giảm độ cứng của các khớp, nên thiết kế một khớp dẻo hình hypebol giữa chân và bề mặt chuyển động bằng cách sử dụng vật liệu siêu đàn hồi.

**Hướng nghiên cứu 2:** Điều khiển robot song song thiếu thông tin hệ thống thông qua việc xấp xỉ các thành phần chưa biết. Việc xấp xỉ này sẽ giảm sự phức tạp trong quá trình phân tích động học và động lực học hệ thống.

**Hướng nghiên cứu 3:** Điều khiển robot theo luật học củng cố thông qua việc tìm hàm chi phí tối ưu và tín hiệu điều khiển tối ưu.

**Hướng nghiên cứu 4:** Điều khiển hệ gồm nhiều robot song song làm việc cùng nhau, có sự trao đổi thông tin với nhau.

### Tài liệu tham khảo

[1]. Stewart, D. (1965), *A platform with six degrees of freedom*, Proc. Instn Mech. Engrs, Part A: J. Power and

Energy, 180(15), 371-386.

[2]. A. Ghobakhloo, M. Eghtesad and M. Azadi (2006), *Position control of a Stewart-Gough platform using inverse dynamics method with full dynamics*, Advanced Motion Control. 9<sup>th</sup> IEEE International Workshop on, IEEE 50-55.

[3]. Ting, Y., Chen, Y. S. and Jar, H. C. (2004), *Modeling and control for a Gough - Stewart platform CNC machine*, J. Robot. Syst., 21(11), 609-623.

[4]. Kosuge, K., Okuda, M., Fukuda, T., Koduka, T. and Mizuno (1993), T., *Input/output force analysis of Stewart platform type of manipulators*, In Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent robots and systems, Yokohama, Japan, pp.1666-1673.

[5]. H. McCallion, P.D. Truong, in: Proc (1979), *5th Wld Congr. Theory Mach*, Mech, pp.611±616.

[6]. L.-C.T. Wang, C.C. Chen (1993), *IEEE Trans, Robot, Automn* 9 (3) 272±285.

[7]. C. Innocenti, V. Parenti-Castelli, Trans, ASME, J. Mech. Des. 115 515±521 (1993).

[8]. B. Dasgupta, T.S. Mruthyunjaya, Mech. Mach. Theory 31 (6) 799±811 (1996).

[9]. M. Raghavan, Trans. ASME, J. Mech. Des. 115 277±282 (1993).

[10]. A. Morgan (1987), *Solving Polynomial Systems using Continuation for Engineering and Scientific Problems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

[11]. S.V. Srinivasan, P. Nanua, Robotics (1992), *Spatial Mechanisms and Mechanical Systems*, ASME-45 99±106.

[12]. F. Wen, C. Liang, Mech. Mach. Theory 29 (4) 547±557 (1994).

[13]. Z. Geng, L. Haynes, in: Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automn, pp. 2650±2655 (1991).

[14] W.Q.D. Do, D.C.H. Yang, J. Robot. Sys. 5 (3) 209±227 (1988).

[15]. B. Dasgupta, T.S. Mruthyunjaya, Mech. Mach. Theory 33 (8) 1135±1152 (1998).

[16]. Guo, H. & Li, H. (2006), *Dynamic analysis and simulation of a six degree of freedom Stewart platform manipulator*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol.220, pp.61-72.

[17]. Z. Geng, L.S. Haynes, J.D. Lee, R.L. Carroll (1992), *Robotics and Autonomous Systems*, 9, 237±254.

[18]. K. Liu, M. Fitzgerald, D.W. Dawson, F.L. Lewis (1991), *Control of Systems with Inexact Dynamic Models* ASME33 83±89.

[19]. Abdellatif, H. & Heimann, B. (2009), *Computational efficient inverse dynamics of 6-DOF fully parallel manipulators by using the Lagrangian formalism*, Mechanism and Machine Theory, 44, pp.192-207.

[20]. Z. Bingul and O. Karahan (2012), *Dynamic modeling and simulation of Stewart platform*, INTECH Open Access Publisher.

[21]. Tsai L-W. (2000), *Solving the inverse dynamics of Stewart-Gough manipulator by the principle of virtual work*, J Mech Des, 122, pp.3-9.

[22]. Liu, M.J.; Li, C.X.; Li, C.N. (2000), *Dynamics analysis*

*of the Gough-Stewart platform manipulator*, IEEE Trans. Robot. Automat. 16 (1), pp.94-98.

[23]. Staicu, S. & Zhang, D. (2008), *A novel dynamic modelling approach for parallel mechanisms analysis*, Robot ComputIntegrManufact, 24, pp.167-172.

[24]. Sumnu, A., Güzelbey, İ. H., & Çakir, M. V. (2017), *Simulation and PID control of a Stewart platform with linear motor*, Journal of Mechanical Science and Technology, 31(1), 345-356.

[25]. Kumar P, R., Chalanga, A., & Bandyopadhyay, B. (2015), *Smooth integral sliding mode controller for the position control of Stewart platform*, ISA Transactions, 58, 543-551.

[26]. H. Guo, Y. Liu, G. Liu and H. Li (2008), *Cascade control of a hydraulically driven 6-DOF parallel robot manipulator based on a sliding mode*, Control Engineering Practice, 16, 1055-1068.

**Ngày nhận bài: 07/4/2021**

**Ngày chấp nhận đăng: 06/5/2021**

**Người phản biện: TS. Phạm Việt Hưng  
TS. Lưu Quang Hiệu**