

COMPARISON AND SELECTION OF A3 AND Z3 PARALLEL ROBOT STYLE SUPPORT STRUCTURES TO EXPAND THE TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF MILLING MACHINE

Nguyen Thi Trang Nhung*, Pham Thanh Long

TNU - University of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 07/8/2024	Three-axis CNC numerical control machine tools often have limited capabilities when machining three-dimensional surfaces. In this case, the kinematic chain is often extended using a fixture that has the structure of a parallel robot, called hybrid machine tools. In fact, when choosing this extension fixture, there may be more than one choice and comparing the suitability between candidates according to a series of different criteria to choose the optimal solution is often not simple. By researching and comparing two commonly used structures in industry, A3 and Z3, this paper proposes a solution to compare criteria related to pressure transmission angle. On that basis, the most suitable support structure to expand the technological capabilities of the milling machine can be selected. Through research, it was found that in the same control space, the A3 head outperforms the common Sprint Z3 head, being the better choice in this case. The proposed method is a suitable tool to support decision making in similar cases.
Revised: 07/10/2024	
Published: 08/10/2024	
KEYWORDS	
Parallel robot	
A3	
Z3	
Pressure transmission angle	
Comparison and selection	

SO SÁNH VÀ LỰA CHỌN CẤU TRÚC HỖ TRỢ MỞ RỘNG KHẢ NĂNG CÔNG NGHỆ CỦA MÁY PHAY KIỂU ROBOT SONG SONG A3 VÀ Z3

Nguyễn Thị Trang Nhung*, Phạm Thành Long

Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

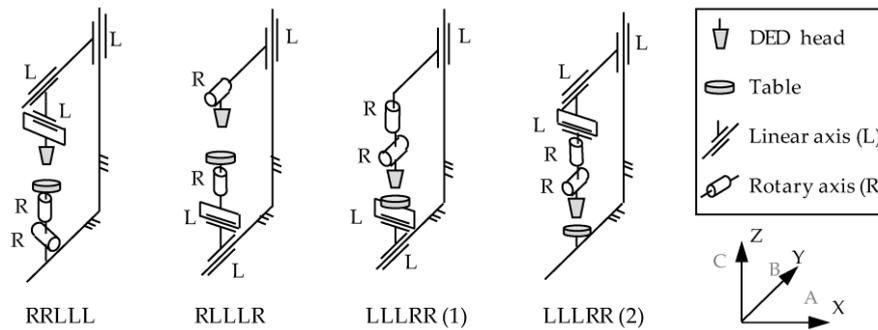
THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 07/8/2024	Các máy công cụ điều khiển số CNC ba trục thường bị giới hạn khả năng công tác khi gia công các bề mặt không gian ba chiều. Trong trường hợp này người ta thường mở rộng chuỗi động học của chúng bằng cách sử dụng một đồ gá có cấu trúc của một robot song song, được gọi là máy công cụ lai. Trên thực tế khi lựa chọn đồ gá mở rộng này có thể có nhiều hơn một lựa chọn và việc so sánh sự phù hợp giữa các ứng viên theo một loạt các chỉ tiêu khác nhau để chọn được phương án tối ưu thường không đơn giản. Với việc nghiên cứu và so sánh hai cấu trúc được sử dụng phổ biến trong ngành công nghiệp là A3 và Z3, bài báo này đề xuất một giải pháp so sánh các chỉ tiêu liên quan tới góc áp lực truyền. Trên cơ sở đó đưa ra được lựa chọn cấu trúc hỗ trợ mở rộng khả năng công nghệ của máy phay phù hợp nhất. Qua nghiên cứu thấy rằng trong cùng một không gian đối xứng, cấu trúc A3 vượt trội hơn cấu trúc Z3 thông thường, là lựa chọn tốt hơn trong trường hợp này. Phương pháp mà chúng tôi đề xuất ở đây là công cụ phù hợp hỗ trợ cho ra quyết định trong những trường hợp tương tự.
Ngày hoàn thiện: 07/10/2024	
Ngày đăng: 08/10/2024	
TỪ KHÓA	
Robot song song	
A3	
Z3	
Góc áp lực truyền	
So sánh và lựa chọn	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10893>

* Corresponding author. Email: trangnhung.dhktcn@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

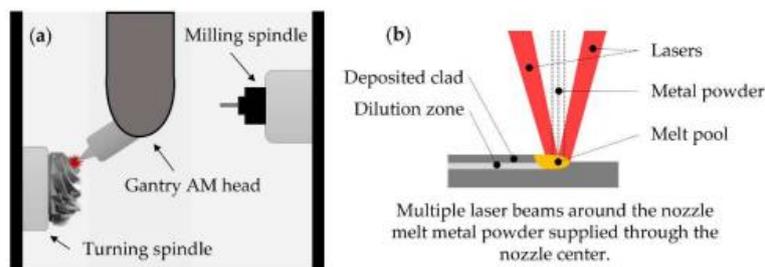
Các máy công cụ điều khiển số CNC là một thiết bị cơ điện tử, nó có cấu trúc cơ học là một robot dạng chuỗi hoặc dạng song song. Các máy có nhiều trục điều khiển năm hay sáu trục cho phép tạo ra chuyển động không gian phức tạp nhưng giá thành cao hơn nhiều các máy ba trục. Do đó, trong một số trường hợp người ta sẽ mở rộng khả năng công nghệ của các máy này bằng cách ghép các máy công cụ với các robot nhằm tăng thêm bậc tự do và mở rộng khả năng công nghệ của nó.



Hình 1. Một số sơ đồ phổ biến nhất của máy công cụ lai

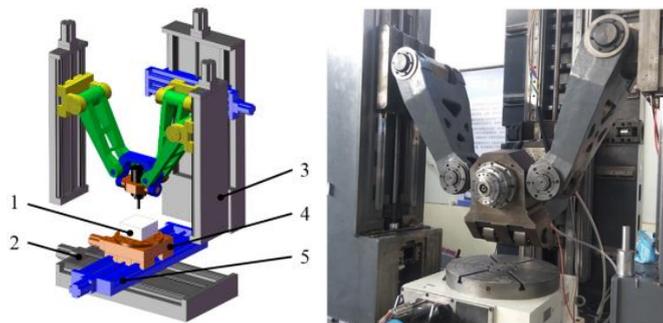
Có thể thấy rằng mục tiêu mà các cấu trúc này hướng tới là các nền tảng 5 trục, đây là cấu hình có độ linh hoạt cao có thể tiếp cận với bề mặt gia công ở mọi góc độ và có giới hạn chuyển động cơ học lớn do chuỗi động dài [1] – [3]. Gần đây máy công cụ lai đặc biệt phát triển mạnh mẽ ở lĩnh vực tích hợp các đầu in kim loại bột (DED head) lên các khung sườn máy công cụ CNC, về cơ bản các cấu hình thường gặp như trên hình 1.

Trong lĩnh vực hàng không vũ trụ các ngành công nghiệp năng lượng, khuôn mẫu và khuôn mẫu với sự trợ giúp của dòng sản phẩm lai LASERTEC 3D. Để đạt được mục đích đó, họ đã cung cấp hai giải pháp kết hợp khác nhau: LASERTEC 65 3D hybrid và LASERTEC 4300 3D hybrid, lần lượt ra mắt vào năm 2014 và 2016. Cái đầu tiên, có cấu hình RRLLL, đóng vai trò một trung tâm phay năm trục [4]. Cái thứ hai bao gồm chuyển động nghiêng trục B ở đầu và một chuỗi động học RLLLR, đóng vai trò như một trung tâm hỗn hợp tiện phay [5]. Trên hình 2 cho thấy sơ đồ tích hợp đầu in 3D in bột kim loại lên máy phay *Integrex I – 200S* điển hình cho xu hướng này.



Hình 2. Đầu in kim loại bột sử dụng laser Gantry AM kết hợp với máy *Integrex I – 200S* dạng cấu trúc lai [6]

Thông thường khi mở rộng cấu trúc, để đảm bảo độ cứng vững chung thì cấu trúc thêm vào đều là các cấu trúc song song. Do các chuyển động thay đổi vị trí của Tool Center Point (TCP) thuộc về máy công cụ nên phần robot song song được thêm vào chủ yếu đảm nhận việc điều hướng TCP. Hình 3 cho thấy một máy công cụ lai với bàn máy phay hai bậc tự do truyền thống và đầu dao được mở rộng bằng một robot song song 4 bậc tự do PKM có khả năng định hướng linh hoạt hơn nhiều so với máy phay truyền thống chỉ giữ trục dao vuông góc với bàn máy.



Hình 3. Hệ thống máy công cụ 3 bậc tự do và robot PKM 4 bậc tự do [7]

Việc xây dựng các cấu trúc lai có vấn đề kỹ thuật lớn nằm ở chỗ các robot song song được lựa chọn để tổ hợp cùng với máy công cụ phải đáp ứng các tiêu chí về động học và động lực học nhất định. Chen và cộng sự [8] trình bày một nghiên cứu so sánh giữa hai cấu trúc song song Z3 và A3 cho mục đích chọn ra một cơ cấu thích hợp với một loạt các chỉ tiêu trên cơ sở hệ số truyền vận tốc nhưng chỉ tiến hành xây dựng dữ liệu ở một vài lát cắt ngang qua vùng làm việc.

Do đây là công việc thường xuyên xảy ra trong kỹ thuật, trong bài này tác giả giới thiệu một phương pháp làm cơ sở để giải quyết vấn đề này.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Các chỉ tiêu kỹ thuật liên quan góc áp lực truyền trong lựa chọn robot song song

Đầu tiên về các chỉ tiêu liên quan góc áp lực truyền cần xuất phát từ khái niệm vít. Vít là một véc tơ kép gồm hai véc tơ trong không gian ba chiều hợp lại [9]. Một vít biểu diễn chuyển vị xoắn tổng quát sẽ như (1):

$$\$_1 = w(\omega_1; r_1 \times \omega_1 + h_1 \omega_1) \quad (1)$$

Một cờ lê biểu diễn lực tổng quát sẽ như (2):

$$\$_2 = f(f_2; r_2 \times f_2 + h_2 f_2) \quad (2)$$

Tích vô hướng giữa hai đại lượng này diễn tả công suất tức thời của truyền động đó và có dạng khai triển (3):

$$\begin{aligned} \$_1 \circ \$_2 &= (v_1 \cdot f_2 + \omega_1 \cdot \tau_2) \\ &= (h_1 + h_2) \cos \theta - d \sin \theta \end{aligned} \quad (3)$$

Để đánh giá quá trình truyền công suất giữa vít (1) và cờ lê (2), hệ số truyền công suất giữa chúng định nghĩa bởi (4):

$$\xi = \frac{|\$_1 \circ \$_2|}{|\$_1 \circ \$_2|_{\max}} = \frac{|(h_1 + h_2) \cos \theta - d \sin \theta|}{\sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d_{\max}^2}} \quad (4)$$

Trong đó, d_{\max} là độ dài tối đa của đường vuông góc chung giữa xoắn vít và xoắn cờ lê, hệ số ở (4) càng lớn càng cho khả năng truyền lực/ chuyển động tốt của robot. Với định nghĩa tổng quát như ở (4) thì hệ số này chỉ từ $0 \rightarrow 1$.

Nếu chuyển vị từ đầu nhánh (do động cơ tạo ra) ký hiệu bởi vít xoắn $\$_{i_i}$ (Input Twist Screw) truyền tới cuối nhánh và tạo ra lực tổng quát ký hiệu bởi xoắn cờ lê $\$_{w_i}$ thì hệ số truyền tương ứng gọi là hệ số truyền đầu vào ITI (Input Transmission Index):

$$ITI = \frac{|\$_{i_i} \circ \$_{w_i}|}{|\$_{i_i} \circ \$_{w_i}|_{\max}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

Phải xác định được vít truyền ra mới đủ cơ sở để xác định hiệu suất cấp truyền động từ đầu là vít cờ lê $\$_w$ đến vít ra $\$_0$. Vít truyền ra $\$_{0_i}$ không cụ thể với từng dạng chân như vít truyền vào $\$_1$ như trình bày ở trên, nó phụ thuộc số lượng nhánh và toạ độ liên kết giữa nhánh và bàn.

$$OTI = \frac{|\$_{wi} \circ \$_{oi}|}{|\$_{wi} \circ \$_{oi}|_{\max}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

Khi có hệ số truyền đầu vào (ITI) và hệ số truyền đầu ra (OTI), hệ số truyền toàn cục được hiểu là hệ số truyền xuyên suốt toàn tuyến, nó được tính bằng trị số nhỏ nhất trong số hai trị số ITI và OTI tại điểm đang xét.

$$LTI = \min (ITI, OTI) \quad (7)$$

Các công thức (5,6,7) tính OTI, ITI và LTI được liên kết với lời giải số bài toán động học ngược để tính giá trị của chúng trên toàn bộ vùng làm việc và thống kê trực tiếp các giá trị với từng ngưỡng phân vùng để làm dữ liệu đầu vào bài toán tối ưu.

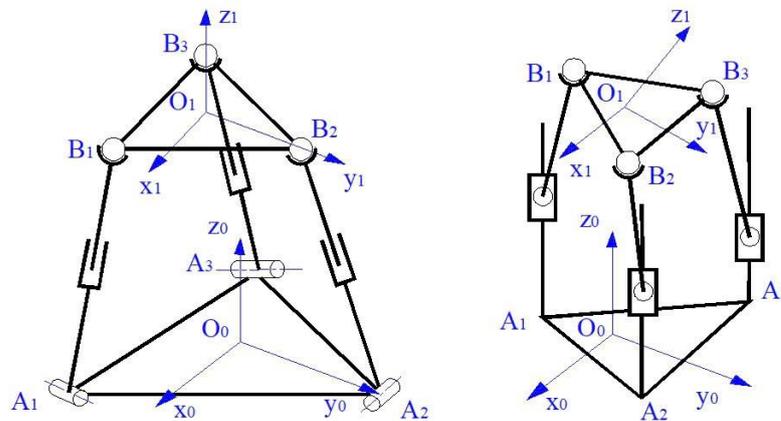
2.2. Giới thiệu bài toán

Trong mục này cho thấy quy trình so sánh hai robot song song cấu trúc Z3 và A3 với tư cách đề gá mở rộng khả năng công nghệ cho máy công cụ. Trên hình 4 robot A3 có cấu trúc 3RPS còn robot Z3 có cấu trúc 3PRS.

Quá trình so sánh sẽ diễn ra như sau. Do cả hai cơ cấu này có đặc điểm luôn giữ tâm bệ di động nằm trên phương của trục z thuộc hệ quy chiếu cơ sở, tức là giao tuyến của ba mặt phẳng mà mỗi cái trong đó chứa chân thứ i của robot và đường nối O_0O_1 . Khớp R trong nhánh không cho phép mặt phẳng này di chuyển nên cả hai cơ cấu này chỉ có khả năng di chuyển tâm của bệ di động trên trục Oz . Hay nói cách khác các điểm nằm trong vùng làm việc phải có dạng $(0,0,+z)$. Do đặc điểm động học đó cả hai cơ cấu này chỉ giữ vai trò định hướng là chính. Giả sử chúng cần hướng trục oz_1 vào một lưới điểm trên bán cầu mô tả vùng làm việc bằng cách thực hiện chuyển động pitch và Yaw trong giới hạn từ $0 \rightarrow 180^\circ$.

Sử dụng ba tiêu chí đánh giá bao gồm:

- Hệ số truyền đầu vào;
- Hệ số truyền đầu ra;
- Hệ số truyền toàn cục;

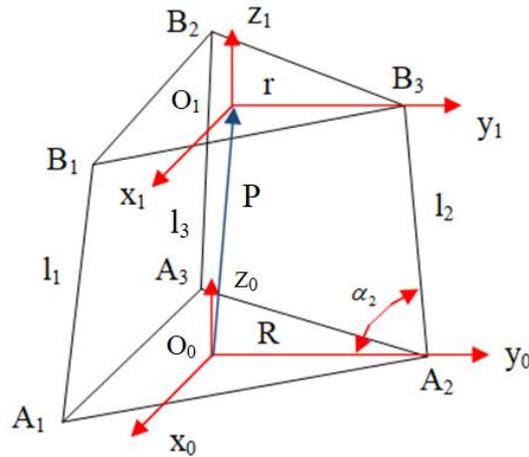


Hình 4. Robot A3 (3RPS trái) và Z3 (3PRS phải)

Chia lưới toàn bộ không gian công tác dạng chòm cầu và giải bài toán động học ngược sau đó tính và thống kê tất cả 3 tiêu chí nói trên dưới dạng định lượng cụ thể. Sử dụng các đặc tính hiệu suất để chọn phương án phù hợp hơn.

2.3. Mô hình toán học, không gian công tác và bài toán động học của robot

Mô hình toán học của cơ cấu 3RPS như hình 5. Gọi bán kính đường tròn ngoại tiếp bệ cố định và bệ di động lần lượt là R và r, hệ phương trình động học của robot có dạng như (8) (9) (10). Trong đó, p_x, p_y, p_z là tọa độ của góc O_1 trong hệ quy chiếu O_0 .



Hình 5. Sơ đồ động robot song song 3RPS và các hệ quy chiếu của nó

Chân 1:

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{R\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{R}{2} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_1 \cos q_1 \cos \varphi_1 \\ l_1 \cos q_1 \sin \varphi_1 \\ l_1 \sin q_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{r\sqrt{3}}{2} \cos \alpha \cos \beta - \frac{r}{2} (\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) \\ \frac{r\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \cos \beta - \frac{r}{2} (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) \\ -\frac{r\sqrt{3}}{2} \sin \beta - \frac{r}{2} \cos \beta \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (8)$$

Chân 2:

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{R}{2} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_2 \cos q_2 \cos \varphi_2 \\ l_2 \cos q_2 \sin \varphi_2 \\ l_2 \sin q_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{r\sqrt{3}}{2} \cos \alpha \cos \beta - \frac{r}{2} (\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) \\ \frac{r\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \cos \beta - \frac{r}{2} (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) \\ \frac{r\sqrt{3}}{2} \sin \beta - \frac{r}{2} \cos \beta \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (9)$$

Chân 3:

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ R \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_3 \cos q_3 \cos \varphi_3 \\ l_3 \cos q_3 \sin \varphi_3 \\ l_3 \sin q_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r (\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) \\ r (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) \\ r \cos \beta \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (10)$$

Tương tự với robot song song 3PRS, hệ phương trình động học của robot có dạng như (11) (12) (13).

Chân 1:

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -R \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ l \sin q_1 \\ l_1 + l \cos q_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -r (\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) \\ -r (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) \\ -r \cos \beta \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (11)$$

Chân 2:

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{R\sqrt{3}}{2} \\ \frac{R}{2} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} l \sin q_2 \\ -\frac{l}{2} \sin q_2 \\ l_2 + l \cos q_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{r\sqrt{3}}{2} \cos \alpha \cos \beta + \frac{r}{2} (\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) \\ \frac{r\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \cos \beta + \frac{r}{2} (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) \\ -\frac{r\sqrt{3}}{2} \sin \beta + \frac{r}{2} \cos \beta \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (12)$$

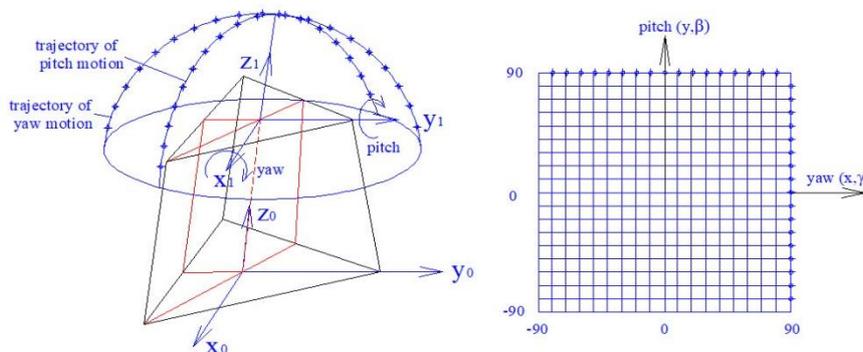
Chân 3:

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R\sqrt{3}}{2} \\ \frac{R}{2} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}l_1 \sin q_3 \\ \frac{l_2}{2} \sin q_3 \\ l_2 + l_1 \cos q_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{r\sqrt{3}}{2} \cos \alpha \cos \beta + \frac{r}{2} (\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) \\ -\frac{r\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \cos \beta + \frac{r}{2} (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) \\ \frac{r\sqrt{3}}{2} \sin \beta + \frac{r}{2} \cos \beta \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (13)$$

3. Kết quả và bàn luận

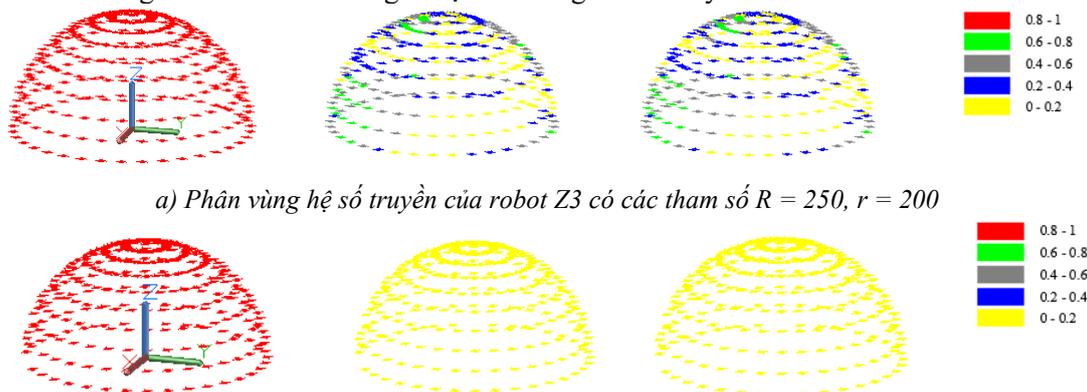
Từ hệ phương trình động học của robot A3 và Z3, sử dụng phương pháp giảm Gradient tổng quát để tìm vùng làm việc và các chỉ tiêu liên quan góc áp lực của mỗi robot. Trong nghiên cứu này chỉ xét đến điều khiển hướng của robot.

Do chuyển động xung quanh trục z_1 (roll) không làm thay đổi định hướng của TCP, xét hai chuyển động pitch và yaw như hình 6.



Hình 6. Quy đạo hai chuyển động định hướng của bệ

Quét hai chuyển động pitch và yaw trong khoảng $[0, 180^0]$ để tạo một mặt cầu định hướng như hình 6. Hệ số truyền trên cơ sở góc áp lực ứng với các yêu cầu định hướng đó được phân vùng dữ liệu làm 3 vùng như hình 7 và thống kê lại vào bảng 1 dưới đây.



a) Phân vùng hệ số truyền của robot Z3 có các tham số $R = 250, r = 200$

b) Phân vùng hệ số truyền của robot Z3 có các tham số $R = 250, r = 200, L = 500$

Hình 7. Các đồ thị phân vùng hệ số truyền với robot A3 và Z3

Từ đồ thị phân vùng hệ số truyền của robot A3 và Z3 thấy rằng vùng làm việc của robot A3 rộng hơn Z3, hệ số truyền đầu vào của cả hai robot đều tốt nhưng hệ số truyền đầu ra và hệ số truyền toàn cục của robot A3 tốt hơn hẳn so với robot Z3. Như vậy cấu trúc hỗ trợ mở rộng khả năng công nghệ của máy phay kiểu robot song song A3 phù hợp hơn kiểu robot song song Z3 trên cùng một không gian đối chứng.

4. Kết luận

Mở rộng khả năng công nghệ của máy công cụ bằng cách tổ hợp với cấu trúc hỗ trợ kiểu robot song là một hướng đi phổ biến trong công nghiệp. Nhưng không phải robot song song nào cũng phù hợp để kết hợp cùng máy công cụ. Việc tối ưu và phân vùng đồ họa các chỉ tiêu chất lượng liên quan tới góc áp lực truyền của cơ cấu là cơ sở để so sánh khả năng làm việc của các robot khi được tổ hợp với cùng một loại máy công cụ. Từ kết quả so sánh này chọn ra cơ cấu thích hợp đáp ứng các tiêu chí về động học. Trong trường hợp các chỉ tiêu ở bảng 1 không có phương án nào vượt trội hoàn toàn so với phương án còn lại thì cần áp dụng một trong các giải thuật ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) để ra quyết định lựa chọn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] W. Du, Q. Bai, and B. Zhang, "A Novel Method for Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of Metallic Parts," *Procedia Manuf.*, vol. 5, pp. 1018-1030, 2016.
- [2] T. Yamazaki, "Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining," *Proc. CIRP*, vol. 42, pp. 81-86, 2016.
- [3] J. M. Flynn, A. Shokrani, S. T. Newman, and V. Dhokia, "Hybrid additive and subtractive machine tools - Research and industrial developments," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 101, pp. 79-101, 2016.
- [4] DMG Mori, "Lasertec 65 3D Hybrid," 2024. [Online]. Available: <https://en.dmgmori.com/products/machines/advanced-technology/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-65-3d-hybrid>. [Accessed July 8, 2024].
- [5] Mazak, "Hybrid Multi-Tasking Machine—AM," 2024. [Online]. Available: <https://www.mazakeu.co.uk/machines-technology/technology/hybrid-multi-tasking-machine/>. [Accessed July 8, 2024].
- [6] M. Cortina, J. I. Arrizubieta, J. E. Ruiz, E. Ukar, and A. Lamikiz, "Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations," *Materials*, vol. 11, 2018, Art. no. 2583, doi:10.3390/ma11122583.
- [7] F. Xie, X. J. Liu, and X. Luo, "Optimal design of a novel 4-degree-of-freedom parallel mechanism with flexible orientation capability," *Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, vol. 233, September 2017, doi: 10.1177/0954405417731469.
- [8] X. Chen, X. J. Liu, F. G. Xie, and T. Sun, "A Comparison Study on Motion/Force Transmissibility of Two Typical 3-DOF Parallel Manipulators: The Sprint Z3 and A3 Tool Heads," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 11, 2014, doi: 10.5772/57458.
- [9] A. Rosyid, B. E. Khasawneh, and A. Alazzam, "Review article: Performance measures of parallel kinematics manipulators," *Mech. Sci.*, vol. 11, pp. 49-73, 2020, doi: 10.5194/ms-11-49-2020.