

OPTIMIZED DESIGN OF PKM STRUCTURE FOR APPLICATION ON HYBRID MACHINE TOOLS

Le Huu Hung*, Pham Thanh Long

TNU - University of Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	14/8/2024	With modern CAD/CAM systems, one can greatly improve machining capacity. Design efforts are kept intact if CNC machine tools can accommodate complex spatial shaping movements. Because of the need for dexterity and good force/velocity transmission coefficients throughout the entire working space, today's machine tools have a kinematic structure very close to robots, especially parallel mechanisms of the PKM (Parallel Kinematic Mechanism). This article presents an optimal design method for the PKM structure based on the improved Atlas method. The use of two dimensional and non-dimensional design spaces combined with the optimal spread spectrum technique allows determining the characteristic dimensions of the structure. Because the multi-objective problem takes the quality criteria as force/velocity transmission coefficient, the resulting structure, despite having a small working area typical of a parallel robot, has outstanding kinematic capabilities compared to other options. This design method has the potential to be applied to designs that require the force/velocity conversion ratio to be optimized at the same time as the transmission coefficient based on the pressure angle when designing complex parallel mechanisms.
Revised:	08/10/2024	
Published:	08/10/2024	
KEYWORDS		
Parallel robot		
PKM		
Optimized		
Pressure transmission angle		
Design		

THIẾT KẾ TỐI ƯU CƠ CẤU PKM ỨNG DỤNG TRÊN MÁY CÔNG CỤ LẠI

Lê Hữu Hùng*, Phạm Thành Long

Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	14/8/2024	Với các hệ thống CAD/CAM hiện đại người ta có thể nâng cao năng lực gia công lên rất nhiều. Các nỗ lực thiết kế được giữ nguyên nếu máy công cụ CNC có thể đáp ứng được các chuyển động tạo hình không gian phức tạp. Vì cần có độ khéo léo và hệ số truyền lực/ vận tốc tốt trên toàn bộ không gian công tác, máy công cụ ngày nay có cấu trúc động học rất gần với robot, nhất là các cơ cấu song song kiểu PKM (Parallel Kinematic Mechanism). Bài báo này trình bày một phương pháp thiết kế tối ưu cơ cấu PKM trên cơ sở phương pháp Atlas cải tiến. Việc sử dụng hai không gian thiết kế có thứ nguyên và không có thứ nguyên kết hợp với kỹ thuật trải phổ tối ưu cho phép xác định các kích thước đặc trưng của cơ cấu. Do bài toán đa mục tiêu lấy các chỉ tiêu chất lượng là hệ số truyền lực/ vận tốc nên cơ cấu nhận được sau đó dù có vùng làm việc nhỏ hẹp đặc trưng của robot song song nhưng lại có năng lực về động học vượt trội so với các phương án khác. Phương pháp thiết kế này có tiềm năng ứng dụng cho cả các thiết kế đòi hỏi tỉ suất chuyển đổi lực/ vận tốc cần tối ưu đồng thời với hệ số truyền trên cơ sở góc áp lực khi thiết kế các cơ cấu song song phức tạp.
Ngày hoàn thiện:	08/10/2024	
Ngày đăng:	08/10/2024	
TỪ KHÓA		
Robot song song		
PKM		
Tối ưu		
Góc áp lực truyền		
Thiết kế		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10941>

* Corresponding author. Email: lehuuhungtm@gmail.com

1. Giới thiệu

Máy công cụ là khâu chấp hành cuối trong các hệ thống CAD/CAM/CNC. Chúng thực chất là tập hợp các trục điều khiển số có liên kết thời gian thực để có thể tạo ra một quỹ đạo không gian chính xác bằng cách kết hợp các bậc tự do riêng biệt. Do năng lực thiết kế số ngày càng nâng cao đòi hỏi máy công cụ cũng ngày càng có khả năng động học tốt hơn đáp ứng các chuyển động ngày càng tự do hơn trong không gian công tác. Nếu máy công cụ truyền thống rất phức tạp với các bài toán về không chế dẫn động chính và dẫn động chạy dao sao cho tổn thất năng suất tối thiểu thì máy công cụ hiện đại với truyền dẫn servo đạt được điều này một cách hiển nhiên. Các máy công cụ hiện đại tập trung vào tối ưu hiệu suất truyền dẫn của cơ cấu khớp thấp và tỉ suất chuyển đổi lực/ vận tốc giữa hai không gian công tác và không gian khớp [1]. Sự thay đổi này đến từ chỗ các máy công cụ hiện đại thường sử dụng cấu hình của một cơ cấu song song PKM [2] trong cấu trúc.

Có thể nhận thấy việc thay đổi cấu trúc cơ học của máy công cụ sang các cơ cấu song song kiểu robot đã dẫn đến thay đổi cách thức thiết kế máy [3]. Vấn đề lúc này không phải là chống tổn thất năng suất của truyền dẫn cấp số nhân hay cấp số cộng mà nâng cao hiệu suất truyền dẫn lực/ vận tốc của cơ cấu khớp thấp và duy trì tỉ suất chuyển đổi lực/ vận tốc giữa hai không gian ở mức tiệm cận đẳng hướng trong toàn bộ vùng làm việc [4]. Bài toán chống tổn thất năng suất của máy công cụ truyền thống là bài toán với cơ cấu khớp cao còn bài toán với máy công cụ hiện đại lại là vấn đề với cơ cấu khớp thấp. Mô hình toán với thiết kế này sẽ dẫn đến tối ưu đa mục tiêu [5], sự khác biệt trong cách tiếp cận có thể là giữ nguyên bài toán gốc [6] - [8] hoặc chia nhỏ nó thành các bài toán có độ phức tạp nhỏ hơn và sử dụng nguyên lý chồng chất nghiệm như trong bài báo này làm với phương pháp Atlas. Sự đổi mới ở đây chính là sáng tạo về phương pháp đổi biến số và kỹ thuật trải phổ mà chúng tôi sử dụng khi giải bài toán tối ưu đa mục tiêu trong không gian không có thứ nguyên trước khi ánh xạ kết quả cuối cùng sang không gian công tác của robot để nhận được tham số thiết kế của cơ cấu. Phương pháp thiết kế này cũng cho phép điều chỉnh không gian công tác của cơ cấu thông qua kích thước nền L.

2. Phương pháp Atlas gốc, hạn chế và đề xuất cải tiến

Phương pháp tối ưu đa mục tiêu sử dụng Atlas [7] là một tiếp cận độc đáo với bài toán tối ưu đa mục tiêu. Các đặc điểm của nó bao gồm sẽ chia nhỏ bài toán gốc thành các bài toán con với độ phức tạp giải thuật thấp hơn để giải riêng rẽ. Kết quả cuối cùng sẽ được chồng chất atlas để tìm vùng tối ưu. Phương pháp này có thể xử lý các bài toán tối ưu không quá 4 tham số cần xác định. Thông qua kỹ thuật sử dụng mặt chắn làm quan hệ đổi biến số, nó luôn làm giảm một biến cần tính toán sau khi đổi biến và chuẩn hoá [8]. Với đặc điểm hai lần làm giảm độ phức tạp của bài toán gốc, đây là phương pháp rất được ưa chuộng trong thiết kế động học các cơ cấu song song [9]. Kỹ thuật thiết kế tối ưu bằng Atlas có bốn vấn đề lớn cần quan tâm:

- Kỹ thuật chuẩn hoá và đổi biến số giữa không gian công tác và không gian thiết kế;
- Quan hệ đặc tính đồng dạng giữa phương án cơ sở và phương án tối ưu;
- Xây dựng các chỉ tiêu dùng trong thiết kế;
- Chồng chất nghiệm và hậu nghiệm.

2.1. Các chỉ tiêu kỹ thuật liên quan góc áp lực truyền trong thiết kế 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 [10]. Một vít biểu diễn chuyển vị xoắn tổng quát sẽ như (1):

$$S_1 = w(\omega_1; r_1 \times \omega_1 + h_1 \omega_1) \quad (1)$$

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

$$S_2 = f(f_2; r_2 \times f_2 + h_2 f_2) \quad (2)$$

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

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

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

$$ITI = \frac{|\$_{fi} \circ \$_{wi}|}{|\$_{fi} \circ \$_{wi}|_{\max}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

Phải xác định được vít truyền ra mới đủ cơ sở để xác định hiệu suất cặp truyền động từ đầu là vít còn lại $\$_{wi}$ đến vít ra $\$_{oi}$. Vít truyền ra $\$_{oi}$ không cụ thể với từng dạng chân như vít truyền vào $\$_{fi}$ như trình bày ở trên, nó phụ thuộc số lượng nhánh và tọa độ liên kết giữa nhánh và bàn.

$$OTI = \frac{|\$_{wi} \circ \$_{oi}|}{|\$_{wi} \circ \$_{oi}|_{\max}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

Các công thức (4,5) tính OTI, ITI 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. Phương pháp Atlas gốc

Bản thân robot song song đang thiết kế có các thông số hình học l_i là chiều dài các khâu với $i = 1..n$ và a_i là kích thước bộ di động cần nhận dạng qua bài toán tối ưu. Bản thân l_i và a_i là các kích thước có thứ nguyên chiều dài (mm) khi biểu diễn trong không gian xyz. Để chuẩn hoá các thông số này sang dạng không thứ nguyên bằng cách tạo ra hệ số kích thước L (mm) xác định bởi:

$$L = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_m}{m} \quad (6)$$

Trong đó m là số lượng tham số kết cấu của robot cần xác định. Các thông số hình học l_i được chuẩn hoá trước khi cấu thành bài toán tối ưu không thứ nguyên ký hiệu r_i tạo thành không gian thiết kế định nghĩa như sau:

$$r_i = \frac{l_i}{L} \quad \text{với } i = 1 \dots m \quad (7)$$

Chọn một giá trị hệ số kích thước L ngẫu nhiên như phương án xấp xỉ đầu để xác định một cấu hình xuất phát của robot. Phương án l_i này gọi là phương án cơ sở đồng dạng, trong [5] người ta chứng minh được rằng tọa độ điểm tối ưu r_i^{OPT} nếu tối ưu với l_i thì cũng sẽ tối ưu với $L.l_i$. Khi đó các l_i cụ thể cho phép bắt đầu xây dựng các đặc tính ITI, OTI trong không gian xyz. Các thông số này được dùng như các chỉ tiêu để thiết kế tối ưu. Việc xác định tọa độ tối ưu trên atlas của l_i sẽ dẫn đến phương án $L.l_i$ mong muốn dựa trên tính đồng dạng của chúng [5].

Theo hình 1 cho thấy, trong trường hợp robot song song cần thiết kế có 4 tham số là r_1, r_2, r_3, r_4 và quan hệ giữa chúng có dạng mặt chắn sau khi chuẩn hoá:

$$r_1 + r_2 + r_3 + r_4 = 4$$

Giữa bốn biến số r_1, r_2, r_3, r_4 nếu chọn $r_4 = a \in [0, 4]$ làm mặt phẳng thiết kế, tức là chỉ còn ba tham số cần xác định r_1, r_2, r_3 . Mặt phẳng $r_4 = a$ luôn trùng với mặt phẳng $z = 0$ chính là mặt chắn

$$r_1 + r_2 + r_3 + r_4 = 4 - a \quad (8)$$

Mô hình lúc này còn 3 biến r_1, r_2, r_3 cần tìm và $r_4 = a$ đã chọn trước theo kết cấu thực tế của robot cụ thể đang thiết kế. Cách thứ hai để biến một mô hình 4 biến r_1, r_2, r_3, r_4 thành một mô hình ba biến là ràng buộc hai biến bất kỳ thỏa mãn một tỉ lệ kết cấu nào đó. Chẳng hạn r_1 là bán kính bộ di động, r_2 là bán kính bộ cố định và chúng cần thỏa mãn ràng buộc kết cấu cho trước dưới dạng:

$$\frac{r_1}{r_2} = const \tag{9}$$

Khi đó mô hình chỉ còn ba biến r_1, r_3, r_4 . Trong trường hợp này mặt phẳng thiết kế vẫn là mặt phẳng chuẩn hoá gồm 4 biến ban đầu có dạng:

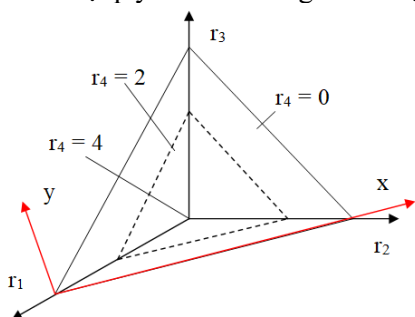
$$r_1 + r_3 + r_4 = 4 \tag{10}$$

Nói chung, bằng cách chọn trước một biến r_4 để xác định mặt phẳng thiết kế hoặc ấn định tỉ số giữa hai biến bất kỳ mô hình sẽ còn ba biến, phù hợp với không gian thiết kế tham số dạng mặt chẵn. Nếu ngay từ đầu chỉ có ba biến số, phương trình mặt chẵn không cần xử lý gì thêm mà có thể trực tiếp thực hiện tìm Atlas của các chỉ tiêu thiết kế.

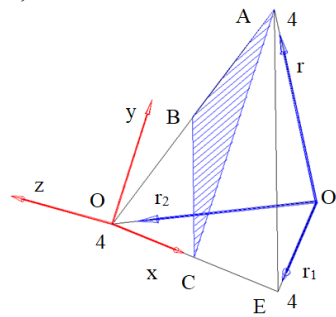
Về khả năng điều chỉnh tương quan biến số của hai không gian xyz và r_i sao cho giữa chúng luôn có giao thoa và xây dựng được quan hệ đối biến, đối cận giữa các tham số xyz và r_i .

Xem xét hình 2 dưới đây bao gồm hai hệ quy chiếu.

- O_0 là hệ quy chiếu của không gian thiết kế r_i ;
- O là hệ quy chiếu cơ sở gắn với bộ cố định của robot;



Hình 1. Tương quan không gian thiết kế và không gian công tác của robot



Hình 2. Quan hệ hình học giữa các hệ quy chiếu dùng trong thiết kế

Trong trường hợp ở hình 2, quan hệ chuyển trục trong trường hợp này có dạng (11):

$$[rot(x,35^0).rot(y,-45^0).trans(z,-4)]^{-1}.P_{O1} = P_{O0} \tag{11}$$

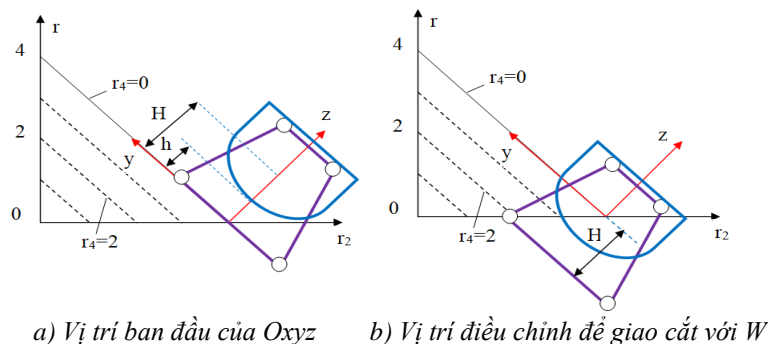
Hay dạng khai triển của (11) là (12):

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r \\ r_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.71429 & -0.40825 & 0.5873 & 0 \\ 0 & 0.82222 & 0.57154 & 0 \\ -0.71429 & -0.40825 & 0.5873 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \tag{12}$$

Tuy nhiên một số robot song song không gian, không có vùng làm việc ở cao độ $z = 0$, trong khi không gian thiết kế luôn có tọa độ $z = 0$ việc điều chỉnh tương quan hình học để xảy ra giao thoa giữa chúng là cần thiết. Để thay đổi hệ quy chiếu cơ sở trên robot song song đến cao độ $z = H$ thích hợp. Khi làm như vậy, nếu điều chỉnh $z = H$ mà tại đó có giao cắt của $z = H$ với vùng làm việc thì khi thiết lập với không gian thiết kế sẽ có giao cắt giữa hai không gian này.

Trên hình 3a, tại mặt phẳng $z = 0$ sẽ không có giao tuyến giữa vùng làm việc với mặt phẳng thiết kế (mặt chẵn). Trên hình 3a, mặt chẵn còn cách điểm thấp nhất của vùng làm việc một đoạn h theo phương oz. Để chắc chắn tạo giao thoa giữa mặt phẳng thiết kế (mặt chẵn) và vùng làm việc cần dịch robot và vùng làm việc thấp xuống một đoạn $(0,0,-H)$ tương đương với việc nâng cao hệ quy chiếu cơ sở lên một đoạn $(0,0,+H)$ như hình 3b.

Các đặc tính thiết kế của robot vẽ trên mặt phẳng $z = 0$ được gọi là Atlas, chúng được vẽ riêng rẽ trước khi chồng chất lên nhau trong không gian thiết kế và tìm ra vùng mà tại đó có tất cả các giá trị đồng thời tốt nhất theo mục tiêu thiết kế. Việc tìm ra vùng này dựa vào nhận định chủ quan của người thực hiện là hạn chế lớn nhất của phương pháp này.



a) Vị trí ban đầu của Oxyz b) Vị trí điều chỉnh để giao cắt với W
Hình 3. Dịch chuyển hệ quy chiếu cơ sở (0,0,+H) để hình thành giao cắt giữa không gian công tác và không gian thiết kế của robot

2.3. Phương pháp Atlas cải tiến

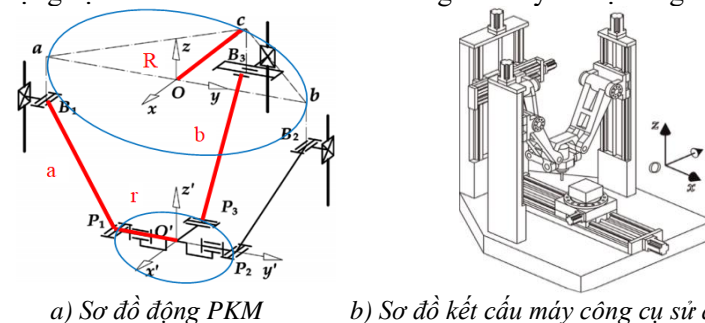
Trên cơ sở phương pháp Atlas gốc, để loại bỏ nhận định chủ quan của người thiết kế khỏi việc chồng chất nghiệm. Bài toán thay vì giải Atlas dưới dạng giải tích để chồng chất nghiệm sẽ được giải số. Toàn bộ lưới điểm trong không gian sẽ được rời rạc hoá thành các nút và tất cả các thuộc tính đều sẽ tính giá trị của nó trên lưới như hình 4. Việc chồng chất nghiệm riêng của các bài toán con lúc này trở thành bài toán tìm cực trị nút với tổng đại số biết trước, về bản chất bây giờ trải phổ là tìm tọa độ nút có tổng đại số các chỉ tiêu theo yêu cầu (max/min). Việc này được tự động hoá hoàn toàn, không liên quan đến nhận định của người thực hiện.

STT điểm	Toạ độ	η_{pmin}	1/K	η_{hmin}	Tổng
1	$x_1y_1z_1$	0.55	0.62	0.34	1.96
2	$x_2y_2z_2$				-
3	$x_3y_3z_3$				-
4	$x_4y_4z_4$				-
5	$x_5y_5z_5$				-
6	$x_6y_6z_6$				$\sum \max$
7	$x_7y_7z_7$				$\sum \max$
...	...				-
...	...				-
...	...				-
n	$x_ny_nz_n$				-

Hình 4. Bảng trải phổ các thuộc tính thiết kế theo đề xuất cải tiến

3. Kết quả minh hoạ thiết kế tối ưu cơ cấu PKM

Cơ cấu PKM (hình 5a) thay cho trục chính truyền thống ở máy phay (hình 5b). Giờ đây thay vì chỉ có lựa chọn giữ phương dụng cụ luôn vuông góc với mặt bàn máy, cơ cấu PKM cho phép xoay nghiêng trục dụng cụ có điều khiển chính xác trong khi duy trì độ cứng vững rất cao.



a) Sơ đồ động PKM b) Sơ đồ kết cấu máy công cụ sử dụng PKM
Hình 5. Sơ đồ động học robot song song dư dẫn động PKM (trái) trong cấu trúc máy phay
 Cấu hình của các chân 1,2,3 lần lượt là PRRR, PRRR, PCR.

Vấn đề đặt ra ở đây là cơ cấu PKM là cơ cấu khớp thấp, các kích thước động học của nó lựa chọn như thế nào để các chỉ tiêu ITI, OTI, LTI nhắc đến ở mục 2.1 là cực đại trên toàn bộ vùng làm việc. Đây là cơ cấu bất đối xứng, nó sẽ có 4 kích thước cần nhận dạng như hình 5a. Robot PKM sẽ đặc trưng bởi 4 kích thước gồm R bán kính bộ tĩnh đi qua các điểm B₁B₂B₃, r bán kính bộ động đi qua các điểm P₁P₂P₃, a chiều dài hai nhánh B₁P₁ và B₂P₂, b chiều dài của nhánh B₃P₃. Theo kết cấu thực tế thì bộ động chỉ có thể di chuyển theo các phương x'y'z' và quay quanh trục y' của hệ quy chiếu di động. Bài toán động học của robot được giải số như trên hình 6 và kết quả của nó được liên kết với các chỉ tiêu ITI và OTI phục vụ trải phổ sau đó.

Phân tích động học cơ cấu ứng với chân 1,2,3 lần lượt như sau:

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -R \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -l_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ a.cq_{11} \\ a.sq_{11} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} cq_{31} & 0 & sq_{31} \\ 0 & 1 & 0 \\ -sq_{31} & 0 & cq_{31} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ r.cq_{21} \\ r.sq_{21} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ R \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -l_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ a.cq_{12} \\ a.sq_{12} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} cq_{32} & 0 & sq_{32} \\ 0 & 1 & 0 \\ -sq_{32} & 0 & cq_{32} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ r.cq_{22} \\ r.sq_{22} \end{pmatrix} \quad (14)$$

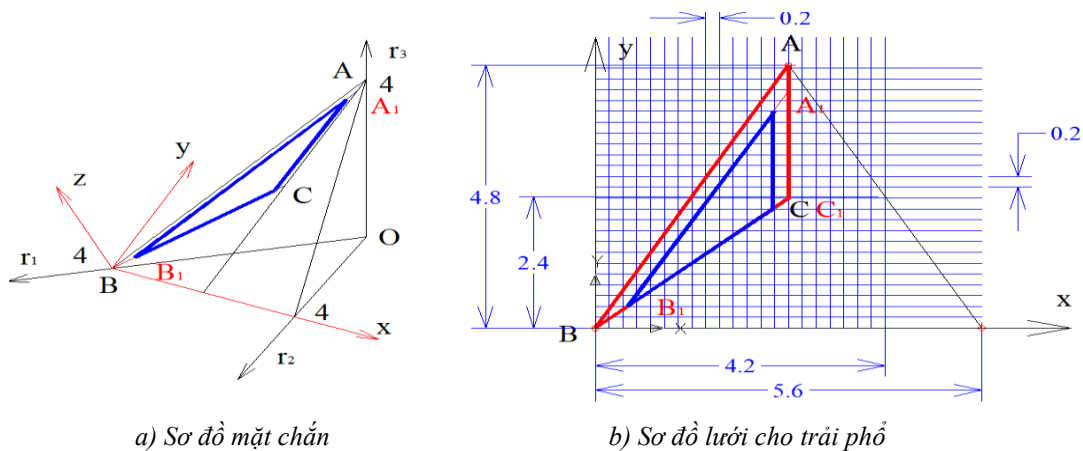
$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ p_y \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -l_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b.cq_{13} \\ 0 \\ b.sq_{13} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r.cq_{23} \\ 0 \\ r.sq_{23} \end{pmatrix} \quad (15)$$

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
px	py	pz	q11	q21	q31=q32	q12	q22	q32=q31	q13	q23	trượt 3	R	r	a	b	l1	l3	l2
22	25	-532	-0.90649	-1.57021	-0.27859	-2.03774	-1.57022	-0.27859	-1.17446	-0.59642	25	160	80	300	300	218.88	210.32	187.199
f1	2.8E-15																	
f2	3.2E-17																	
f3	4.8E-17																	
f4	3.2E-17																	
f5	1.2E-17																	
f6	2.3E-17																	
f7	3.5E-21																	
f8	5.4E-19																	
f9	1.6E-21																	
F	2.9E-15																	

Hình 6. Bài toán động học ngược giải số với phương pháp GRG

Bảng 1. Gán biến và chọn xấp xỉ đầu

STT	Biến góc (mm)	Chuẩn hoá	Xấp xỉ đầu (mm)
1	R	r ₁	160
2	r	r ₂	80
3	a = b	r ₃	300



Hình 7. Thiết lập không gian thiết kế và quan hệ chuyển trục

Trong số 4 biến R, r, a, b do bộ cố định và bộ di động có thể quan niệm nằm trên nửa vòng tròn như hình 6 nên có thể hình dung thực chất $a = b$. Cấu trúc lại biến số như trên bảng 1.

Sử dụng quan hệ mặt chắn $r_1+r_2+r_3 = 4$, để tránh triệt tiêu kích thước nào đó sẽ lấy offset vào trong biên 0,6 mm tính từ đường bao mặt chắn như hình 7, quan hệ chuyển trục ở đây là (14).

Như vậy sơ đồ tọa độ nút để trải phổ được xác định như hình 7b. Bảng phổ trích một phần như hình 8 dưới đây, độ cao mặt phẳng thiết kế định vị ở $z = 532$ như hình 6 đã thử nghiệm.

18	2	2	532	-0.91077	-1.84864	-0.026	-2.04151	-1.84864	-0.026	-1.26522	-0.4582	2	218.102	210.511	187.721	6.9E-18	0.78997	0.30084	1.09081
19	2.2	2	532	-0.91078	-1.84859	-0.0286	-2.04153	-1.84859	-0.0286	-1.2644	-0.45924	2	218.103	210.511	187.727	2.6E-17	0.78998	0.30163	1.09161
20	1.6	2.2	532	-0.91057	-1.84664	-0.02079	-2.04134	-1.84664	-0.02079	-1.26688	-0.45612	2.2	218.085	210.511	187.644	1.7E-16	0.78985	0.29926	1.08912
21	1.8	2.2	532	-0.91058	-1.84666	-0.02339	-2.04135	-1.84666	-0.02339	-1.26605	-0.45716	2.2	218.086	210.511	187.65	1.5E-17	0.78986	0.30005	1.08991
22	2	2.2	532	-0.9106	-1.84655	-0.02598	-2.04137	-1.84655	-0.02598	-1.26522	-0.4582	2.2	218.087	210.511	187.655	2.1E-18	0.78987	0.30084	1.09071
23	2.2	2.2	532	-0.91061	-1.8465	-0.02858	-2.04138	-1.8465	-0.02858	-1.2644	-0.45924	2.2	218.088	210.511	187.662	1.9E-16	0.78988	0.30163	1.09151
24	2.4	2.2	532	-0.91063	-1.84645	-0.03118	-2.0414	-1.84645	-0.03118	-1.26357	-0.46029	2.2	218.09	210.511	187.669	3E-17	0.78989	0.30242	1.09231
25	1.8	2.4	532	-0.91042	-1.84451	-0.02337	-2.04121	-1.84451	-0.02337	-1.26605	-0.45716	2.4	218.071	210.511	187.584	1.2E-17	0.78976	0.30005	1.08981
26	2	2.4	532	-0.91043	-1.84446	-0.02597	-2.04122	-1.84446	-0.02597	-1.26522	-0.4582	2.4	218.072	210.511	187.59	1.2E-15	0.78977	0.30084	1.09061
27	2.2	2.4	532	-0.91045	-1.84441	-0.02857	-2.04123	-1.84441	-0.02857	-1.2644	-0.45924	2.4	218.074	210.511	187.596	3.3E-17	0.78978	0.30163	1.09141
28	2.4	2.4	532	-0.91047	-1.84436	-0.03116	-2.04125	-1.84436	-0.03116	-1.26357	-0.46029	2.4	218.075	210.511	187.603	3E-17	0.78979	0.30242	1.09221
29	2	2.6	532	-0.91027	-1.84237	-0.02595	-2.04107	-1.84237	-0.02595	-1.26522	-0.4582	2.6	218.057	210.511	187.525	3.8E-20	0.78967	0.30084	1.09051
30	2.2	2.6	532	-0.91029	-1.84232	-0.02855	-2.04109	-1.84232	-0.02855	-1.2644	-0.45924	2.6	218.059	210.511	187.532	7.6E-17	0.78968	0.30163	1.09131

Hình 8. Kết quả trải phổ với robot PKM

Theo kết quả trải phổ cho thấy tọa độ điểm tối ưu trong không gian không thứ nguyên sau khi chuyển trục theo (12) như trong hình 9.

nghịch đảo của rot(x)rot(y)tran(z)				điểm tối ưu		r
0.71429	-0.40825	0.5873	0	2.4 x	0.81615 r2	
0	0.82222	0.57154	0	2.2 y	1.80888 r3	
-0.71429	-0.40825	0.5873	4	0 z	1.38758 r1	
0	0	0	1	1	1	

Hình 9. Kết quả chuyển đổi tọa độ từ không gian công tác sang không gian thiết kế

Tổng các tọa độ r_1, r_2, r_3 bằng 4. Điều đó chứng tỏ điểm tối ưu thuộc mặt chắn. Lấy L=300, tính được các tham số kết cấu cụ thể của robot như bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thiết kế tối ưu

STT	Biến góc (mm)	Chuẩn hoá	Giá trị tối ưu (mm)
1	R	r_1	416
2	r	r_2	245
3	a = b	r_3	543

4. Kết luận

Phương pháp atlas là một tiếp cận hay trong thiết kế robot song song đa mục tiêu. Nó giảm độ phức tạp giải thuật do tách bài toán lớn thành các bài toán nhỏ và dùng kỹ thuật đổi biến trên cơ sở mặt chắn làm giảm số biến tham gia vào bài toán. Phương pháp này cũng lợi thế hơn các phương pháp giải bài toán đa mục tiêu khác do nó xác định cả một vùng chấp nhận được thay vì chỉ một điểm duy nhất, điều này rất thuận tiện cho việc tiếp tục kết hợp các yêu cầu công nghệ để chọn nghiệm sau giải bài toán lỗi. Hạn chế của phương pháp Atlas chính là ở chỗ khi bắt đầu chong chất nhiều Atlas để tìm vùng tối ưu, tối đa có thể lên đến 6 atlas gồm ba atlas liên quan với góc áp lực và ba atlas liên quan với tỉ suất chuyển đổi lực vận tốc sẽ khó lòng quan sát khu vực tối ưu. Trong trường hợp đó, đề xuất trải phổ của chúng tôi như trong bài báo này là vô cùng hữu ích. Không chỉ thế nó còn giúp thuật toán có thể tự động hoá hoàn toàn, tránh các nhận định chủ quan của người giải.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] 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.

-
- [2] D. 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] F. Xie and X. J. Liu, "Optimization of a redundantly actuated parallel kinematic mechanism for a 5-degree-of-freedom hybrid machine tool," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, November 2014, doi: 10.1177/0954405414522450.
- [6] D. Gan, J. S. Dai, J. Dias, and L. D. Seneviratne, "Optimal Design of a metamorphic parallel Mechanism with reconfigurable 1T2R and 3R motion base on unified motion/ force transmissibility," *Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE*, 2016, doi: 10.1115/DETC2016-59042.
- [7] X. J. Liu and J. Wang, "A new methodology for optimal kinematic design of parallel mechanisms," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 42, pp. 1210-1224, 2007.
- [8] X. J. Liu, J. Wang, and F. Gao, "Performance atlases of the workspace for planar 3-DOF parallel manipulators," *Robotica*, vol. 18, pp. 563-568, 2000.
- [9] F. Xie, X. J. Liu, X. Chen, and J. Wang, "Optimum Kinematic Design of a 3-DOF Parallel Kinematic Manipulator with Actuation Redundancy," *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, vol. 7101, pp. 250-259, 2011.