

Thiết kế tối ưu robot song song 3RUU bằng phương pháp Atlas cải tiến

Lê Hữu Hùng¹, Phạm Thành Long^{2*}

¹Trường Cao đẳng Công nghệ và Thương mại, Phường Lương Sơn, TP. Sông Công, Thái Nguyên, Việt Nam;

²Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên, 666 Đường 3/2, TP. Thái Nguyên, Thái Nguyên, Việt Nam.

*Tác giả liên hệ: kalongkc@gmail.com

Nhận bài: 03/8/2024; Hoàn thiện: 26/10/2024; Chấp nhận đăng: 15/11/2024; Xuất bản: 06/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.164-170>

TÓM TẮT

Bài báo này nói về việc sử dụng phương pháp Atlas cải tiến để thiết kế tối ưu robot song song 3RUU. Mục tiêu của thiết kế này là xác định các kích thước hình học của robot sao cho các chỉ tiêu về tỉ suất chuyển đổi lực và vận tốc giữa không gian khớp, không gian công tác là tốt nhất. Có tất cả ba chỉ tiêu thiết kế được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm độ khéo léo của robot, hệ số truyền vận tốc tối thiểu và độ cứng vững. Phương pháp tối ưu hoá được dùng trong nghiên cứu này là phương pháp Atlas cải tiến. Phương pháp này cho phép chia nhỏ bài toán đa mục tiêu thành các bài toán đơn mục tiêu sau đó chồng chất các Atlas đặc tính để xác định vùng tối ưu. Tính mới của nghiên cứu thể hiện ở chỗ tác giả sẽ thay thế bước chồng chất Atlas bằng một kỹ thuật có tên gọi là trái phở, kỹ thuật này không đồ hoạ các đặc tính như phương pháp Atlas gốc mà nó chồng chất giá trị đại số của thuộc tính đang khảo sát trên một lưới điểm xác định trước trên không gian công tác của robot. Kết quả minh hoạ trong bài báo cho thấy phương pháp này có tiềm năng ứng dụng trên các robot song song đối xứng có số tham số cần tổng hợp đến 4 biến số.

Từ khoá: Robot song song; 3RUU; Hệ số truyền vận tốc tối thiểu; Độ khéo léo; Jacobian.

1. MỞ ĐẦU

Tổng hợp động học robot song song là bài toán đặt ra nhiều thách thức, điều này dẫn đến bài toán tối ưu đa mục tiêu như một sự tất yếu. Khi cấu thành bài toán tối ưu đa mục tiêu dựa trên các chỉ tiêu hiệu suất lấy ma trận Jacobian làm cơ sở [1-5], bài toán này có ba hướng giải khác nhau điển hình là:

- Trên cơ sở các đồ hoạ của thuộc tính mục tiêu cần tối ưu sẽ dựa vào chiều hướng quan hệ trực quan trên Atlas để biện luận chỉ ra một điểm cân bằng giữa các yếu tố có lợi và bất lợi [6-10].

- Chia nhỏ bài toán tối ưu ban đầu (đa tiêu chí) thành các bài toán bé hơn và có cách giải dễ dàng hơn bài toán gốc, chúng được giải riêng bằng Atlas sau đó dùng nguyên lý chồng chất để tìm lời giải cuối cùng [6, 11-14].

- Giữ nguyên bài toán gốc dưới dạng một bài toán lớn, giải bằng các phương pháp thuộc nhóm SPEA – II hoặc GA [15]. Phương pháp này có ưu điểm tính tổng quát khá cao, có thể áp dụng được cho nhiều kiểu robot khác nhau không hạn chế số biến tối ưu đồng thời cũng như không hạn chế số lượng chỉ tiêu tối ưu. Tuy nhiên, do sự phức tạp của giải thuật và chương trình nó ít được áp dụng hơn phương pháp ở nhóm thứ hai. Nó cũng không cho ra lời giải tối ưu dưới dạng miền chấp nhận được như phương án Atlas trong khi đây là đặc điểm rất hữu ích trong thiết kế cơ khí của phương pháp Atlas.

Nhóm phương pháp thứ hai có sự hợp lý trong cách tiếp cận do nó chia nhỏ bài toán lớn thành nhiều bài toán bé hơn, các bài toán này đạt được lời giải dễ hơn bài toán gốc và khi hoàn thành các bài toán này dẫn đến lời giải bài toán gốc khá dễ dàng. Để khắc phục việc phải chồng chất nhiều Atlas lên nhau nhằm tìm vùng chấp nhận được, bài báo này giới thiệu kỹ thuật trái phở thậm chí không cần vẽ các atlas như phương pháp gốc yêu cầu.

2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

2.1. Các chỉ tiêu thiết kế

2.1.1. Số điều kiện và độ khéo léo của robot

Gọi J là ma trận Jacobian của robot, Độ khéo léo (Dexterity) của robot là một chỉ tiêu quan trọng khi thiết kế robot song song.

$$K_2 = \|J\|_2 \cdot \|J^{-1}\|_2 \quad (1)$$

2.1.2. Hệ số truyền vận tốc tối thiểu

Về quan hệ vận tốc giữa hai không gian (x', q') . Giả sử trong không gian công tác Oxyz cần có các dịch chuyển với vận tốc đơn vị theo hướng bất kỳ mô tả dưới dạng một mặt cầu bán kính bằng 1 như ở (2):

$$x'^T \cdot x' = 1 \quad (2)$$

Thay $x' = J^{-1} \cdot q'$ vào (2) nhận được (3):

$$x'^T x' = q'^T (J^{-1})^T J^{-1} q' \quad (3)$$

2.1.3 Độ cứng vững của cơ cấu

Về quan hệ lực giữa hai không gian (τ, F) tích $J^T \cdot J$ lại biểu thị một ellipsoid lực. Giả sử có một bộ tác động đơn vị dưới dạng mặt cầu trong không gian khớp với bán kính 1. Khi ánh xạ sang không gian công tác trong trường hợp ba trị riêng của ellipsoid $J^T \cdot J$ bằng nhau, ta được một mặt cầu. Đây là trường hợp lý tưởng nhất. Phổ biến hơn ta sẽ nhận được một hình ellipsoid có các trị riêng $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$.

2.2. Phương pháp Atlas cải tiến

2.2.1. Quan hệ đổi biến số giữa hai không gian

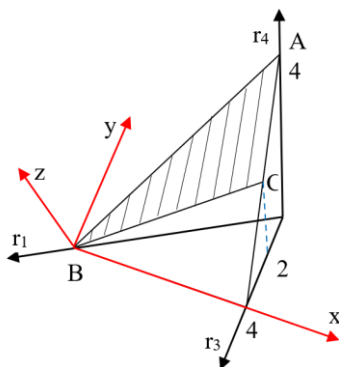
Gọi các tham số kết cấu của robot cần tổng hợp là l_i (mm) với $i = 1 - n$ và n không vượt quá 4. Các tham số này đầu tiên cần chuẩn hoá sang dạng không thứ nguyên như sau:

Gọi D là kích thước nền là số trung bình cộng của các kích thước đó:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} \quad (4)$$

Gọi r_i là tham số chuẩn hoá của l_i tương ứng và định nghĩa bởi (5):

$$r_i = \frac{l_i}{D} \quad (5)$$



Hình 1. Thiết lập không gian thiết kế dạng mặt chẵn.

Như vậy, l_i và D cùng thứ nguyên nên r_i là không có thứ nguyên. Thiết lập không gian thiết kế dạng mặt chắn như hình 1, do robot có tối đa đến 4 biến số. Phương trình không gian thiết kế là phương trình mặt chắn ABC dưới dạng như (6):

$$r_1 + r_2 + r_3 + r_4 = 4 \tag{6}$$

Quan hệ giữa không gian thiết kế r_i và không gian công tác Oxyz được xác định bằng công thức chuyển trục (7) dưới đây:

$$[\text{rot}(x,35^0).\text{rot}(y,-45^0).\text{trans}(z,-4)]^{-1}.P_{O1} = P_{O0} \tag{7}$$

2.2.2. Phương pháp trái phở

Nhằm khắc phục các hạn chế của phương pháp Atlas, phương pháp trái phở có ý tưởng như sau. Đầu tiên, trong mặt phẳng thiết kế r_i tiến hành chia lưới toàn bộ không gian đó thành các ô có mặt đều nhau. Điểm giao của các ô này gọi là nút có tọa độ r_i hoàn toàn xác định. Các r_i này về cơ bản do phép thiết lập không gian thiết kế đều có giới hạn với từng tham số rõ ràng:

$$r_{i\min} \leq r_i \leq r_{i\max} \tag{8}$$

Theo quan hệ đổi biến (7) sẽ tính được các giới hạn tương ứng với tham số trong không gian công tác của robot:

$$\begin{cases} x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max} \\ y_{i\min} \leq y_i \leq y_{i\max} \end{cases} \tag{9}$$

Để thay thế việc chồng chất Atlas như cách làm truyền thống, ý tưởng chia lưới để chồng chất giá trị như thấy trên hình 2 dưới đây được thiết lập.

STT	Tọa độ nút			Loại chỉ tiêu khảo sát					Tổng hàng
				A	B	C	D	E	
1	x_1	y_1	z_1	0.3	0.2	0.4	0.7	0.1	1.7
2	x_2	y_2	z_2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	1.6
				0.1	0.3	0.1	0.4	0.3	1.2
				0.4	0.3	0.1	0.3	0.7	1.9
				0.3	0.2	0.8	0.6	0.3	2.2
				0.5	0.3	0.2	0.3	0.3	1.6
				0.8	0.3	0.2	0.8	0.3	2.4
n	x_n	y_n	z_n	0.3	0.6	0.4	0.3	0.3	1.9
				0.1	0.3	0.3	0.5	0.9	...

Hình 2. Sơ đồ trái phở không đồ họa Atlas.

Trên hình 2 chỉ cần lấy tổng các chỉ tiêu theo hàng ngang, do các chỉ tiêu thiết kế được chuẩn hoá đều biến thiên trong [0, 1] nên hàng nào cho ra tổng đại số các số hạng lớn nhất thì tương ứng với tọa độ điểm tối ưu. Phương án tối ưu là phương án xác định từ bảng trái phở trên hình 2 tương ứng với điều kiện:

$$\max\left[\frac{1}{K} + \eta_{v\min} - \eta_{p\min}\right] \tag{10}$$

Ý nghĩa của (10) là robot khéo léo nhất, có vận tốc lớn nhất và có độ cứng vững lớn nhất, Những điều này cần đạt được trong cùng một phương án duy nhất.

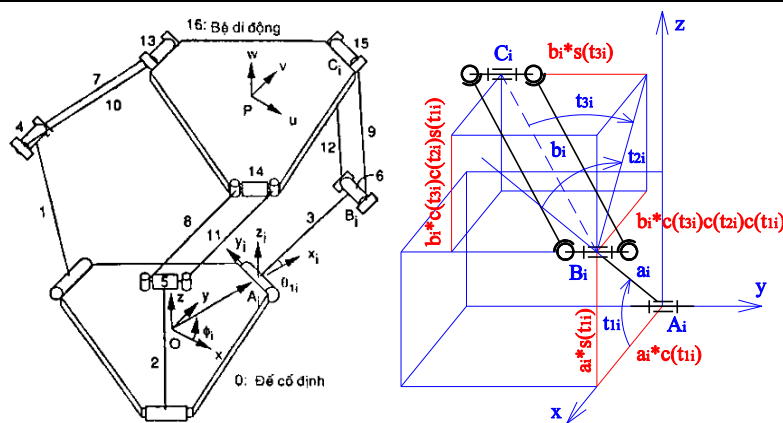
3. THIẾT KẾ ROBOT SONG SONG 3RUU

3.1. Mô hình động học robot

Sơ đồ động học của robot 3RUU nguyên mẫu thiết kế của đại học Maryland như thấy trên hình 3. Bộ cố định ở dưới, khớp R chủ động, nó có khâu tương ứng với b là cơ cấu bốn khâu bản lề. Trên hình 3 cho thấy mô hình khai triển của một chân robot 3RUU.

Bảng 1. Quan hệ giữa các thông số và đơn vị.

Tham số kết cấu thực (mm)	Ký hiệu biến tương ứng (mm)	Ký hiệu biến sau khi chuẩn hoá dạng không thứ nguyên
R: Bán kính bộ tĩnh	l_1	r_1
r: Bán kính bộ động	l_2	r_2
a: Khâu liên kết với bộ tĩnh	l_3	r_3
b: Khâu liên kết với bộ động	l_4	r_4



Hình 3. Sơ đồ động học robot 3RUU.

3.2. Tính toán các chỉ tiêu thiết kế

Phần bộ di động ứng với tham số l_2 theo mục đích sử dụng có thể xác định trước quan hệ với bộ cố định l_1 theo tỉ số $\frac{l_2}{l_1} = 0.75$ và do chúng phụ thuộc nhau nên sẽ giữ lại l_1 trong mô hình toán.

Lúc này bài toán còn 3 ẩn là l_1, l_3, l_4 hay r_1, r_3, r_4 sau chuẩn hoá đơn vị.

Chọn $l_1 = 200, l_2 = 150, l_3 = 150, l_4 = 350$ là phương án xuất phát. Các đặc tính được xây dựng theo phương án kết cấu này.

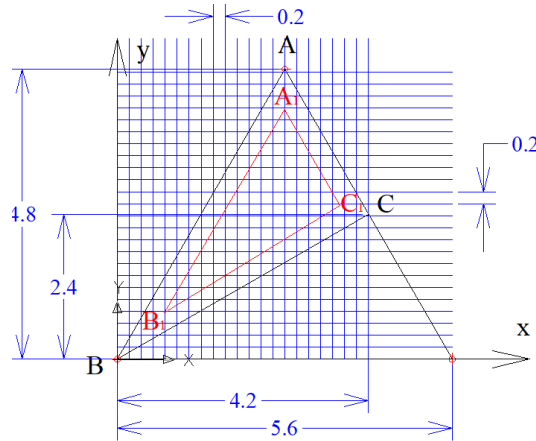
Chọn mô hình mặt chẵn dưới dạng (11):

$$r_1 + r_3 + r_4 = 4 \quad (11)$$

Do tính chất của cơ cấu về điều kiện lắp ráp, có thể tạm thời xác định khoảng biên thiên của từng tham số như (12):

$$r_1 \in [0, 4], r_3 \in [0, 2], r_4 \in [0, 4] \quad (12)$$

Tiến hành chia lưới toàn bộ không gian thiết kế với kích thước mắt sàng 0.2×0.2 mm như hình 4. Bài toán động học ngược được giải số bằng phương pháp Giảm Gradient tổng quát. Quá trình này được tự động lặp lại cho tất cả các điểm trong vùng làm việc của robot bằng VBA. Thử điểm $(4, 4, 420)$ nằm trong vùng làm việc như hình 5. Tất cả lưới điểm trên hình 5 được kết hợp với cao độ $z = H = 420$ (mm).



Hình 4. Không gian thiết kế sau điều chỉnh.

Hình 5. Giao diện bài toán động học ngược và tính các chỉ tiêu thiết kế.

3.3. Trả phở và tối ưu

- Kết quả trả phở (trích) cho thấy như trên hình 6:

Toạ độ điểm tối ưu (0,8,0,8,420)

STT	px	py	pz	1/K	Vmin	Pmin	1/K+Vmin-Pmin
1	0.8	0.8	420	0.010507	4.795571	22.9975	18.19142649
2	1	1	420	0.010578	4.842028	23.44523	18.59262537
3	1.2	1.2	420	0.010649	4.888115	23.89366	18.99489983
4	1.4	1.2	420	0.010728	4.951378	24.51614	19.55403502
5	1	1.4	420	0.010563	4.807815	23.11509	18.29670799
6	1.2	1.4	420	0.010642	4.870792	23.72461	18.84318134
7	1.4	1.4	420	0.01072	4.933839	24.34277	19.39820748
8	1.6	1.4	420	0.010799	4.996926	24.96927	19.96154268
9	1.8	1.4	420	0.010877	5.060039	25.60399	20.5330784
10	1.4	1.6	420	0.010712	4.916333	24.17033	19.24328552

Hình 6. Kết quả trả phở (trích).

Toạ độ điểm tối ưu trong không gian r_1 không thứ nguyên là (0,8,0,8,420) như hình 6. Chuyển đổi ngược lại không gian xyz nhận được điểm tương ứng là (0,24483, 0,65778, 3,10198).

Tương ứng với: $r_3 = 0.24483$, $r_4 = 0.65778$, $r_1 = 3.10198$.

Theo (2) $r_i = \frac{l_i}{D}$ hay $l_i = D \cdot r_i$ chọn $D = 200$ kết hợp với $\frac{l_2}{l_1} = 0.75$.

Kết quả tính toán cuối cùng cho thấy trong bảng 2 dưới đây:

Bảng 2. Kết quả tính toán cuối cùng của robot song song Maryland.

Tham số kết cấu thực (mm)	Ký hiệu biến tương ứng (mm)	Ký hiệu biến sau khi chuẩn hoá dạng không thứ nguyên
R: Bán kính bộ tĩnh	$l_1 = 620$	$r_1 = 3.10$
r: Bán kính bộ động	$l_2 = 464$	$r_2 = 2.32$
a: Khâu liên kết với bộ tĩnh	$l_3 = 48$	$r_3 = 0.24$
b: Khâu liên kết với bộ động	$l_4 = 130$	$r_4 = 0.65$

4. KẾT LUẬN

Các mục tiêu cho thấy trong bài này tập trung vào khía cạnh không chế tỉ suất chuyển đổi lực và vận tốc giữa hai không gian cũng như độ khéo léo của robot. Đây là những thông số quan trọng đối với khả năng làm việc của robot song song. Việc thiết kế thực sự xảy ra trong không gian chuẩn hoá không có thứ nguyên khác phục được sự khác nhau về thứ nguyên trong ma trận Jacobian. Khác với các phương pháp tối ưu đa mục tiêu khác, phương pháp Atlas tạo ra một tập hợp các lựa chọn khả thi chứ không phải một nghiệm duy nhất như phương pháp GA hay SPEA II. Khác với phương pháp Atlas truyền thống, chúng tôi đã thay đổi việc chôn chặt các đồ hoạ đặc tính thiết kế bằng kỹ thuật trải phổ để tránh phải sử dụng các nhận định chủ quan của người thiết kế. Điều này góp phần làm cho thuật toán sau khi cải tiến có khả năng chạy tự động cao hơn so với trước khi cải tiến nó. Phương pháp này có thể áp dụng cho thiết kế các robot song song có không quá 4 tham số cần tổng hợp, nhất là nhóm robot song song đối xứng trong kết cấu.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả cảm ơn sự tài trợ về kinh phí của Trường Đại học kỹ thuật công nghiệp cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Hee-Byoung Choi, Atsushi Konno, and Masaru Uchiyama, "Analytic Singularity Analysis of a 4-DOF Parallel Robot Based on Jacobian Deficiencies", International Journal of Control, Automation, and Systems 8(2):378-384, (2010).
- [2]. Yan Shi, Hongxin Yue, Yi Lu, Lianhe Guo, "Singularity Analysis of a Plane-Symmetry 3-RPS Parallel Robot Based on Translational/Rotational Jacobian Matrices", Applied Mechanics and Materials Vols 121-126, pp 1590-1594, (2012).
- [3]. Jianye Guo, Liang Zhao, Jiashun Shi, "The Analysis on the Singularity of a 3-TPT Parallel Robot", Advanced Materials Research, Vols 225-226, pp 903-906, (2011).
- [4]. Guanglei Wu, Shaoping Bai, "A Transmission Quality Index for a Class of Four-limb Parallel Schönflies Motion Generators", Journal of Mechanisms and Robotics, (2017).
- [5]. Hee-Byoung Choi, Atsushi Konno, and Masaru Uchiyama, "Analytic Singularity Analysis of a 4-DOF Parallel Robot Based on Jacobian Deficiencies", International Journal of Control, Automation, and Systems 8(2):378-384, (2010).
- [6]. Qizhi Meng, Fugui Xie, Xin-Jun Liu, "Design and development of a Schönflies-motion parallel robot with articulated platforms and closed-loop passive limbs", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, (2022).
- [7]. Xin Yuan, Qizhi Meng, Fugui Xie, Zhenguo Nie, and Xin-Jun Liu, "Design and Motion/Force Transmissibility Analysis of Two Motion-Decoupled 3T1R Parallel Robots with Full Rotational Capability", ICIRA 2021, LNAI 13015, pp. 460-469, (2021).
- [8]. Raymundo Ramos Alvarado and Eduardo Castillo Castañeda, "Optimum design of the reconfiguration system for a 6-degree-of-freedom parallel manipulator via motion/force transmission analysis", Journal of Mechanical Science and Technology 34 (3), (2020).
- [9]. Liviu Moldovan, "Geometrical Method for Description of the 6-PGK Parallel Robot's Workspace", Computer society IEEE, (2009).

- [10]. Dongming Gan, Jian S. Dai, Jorge Dias, Lakmal 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).
- [11]. Xin-Jun Liu, Jinsong Wang and Feng Gao, “Performance atlases of the workspace for planar 3-DOF parallel manipulators”, Robotica, volume 18, pp. 563–568, (2000).
- [12]. Xin-Jun Liu, Jinsong Wang, “A new methodology for optimal kinematic design of parallel mechanisms”, Mechanism and Machine Theory 42, 1210–1224, (2007).
- [13]. Zhuangsheng Zhu, Runliang Dou, “Optimum design of 2-DOF parallel manipulators with actuation redundancy”, Mechatronics 19, 761–766, (2009).
- [14]. Yuzhen Chen, Xin-Jun Liu and Xiang Chen, “Dimension Optimization of a Planar 3-RRR Parallel Manipulator Considering Motion and Force Transmissibility”, ICMA 2013, IEEE, (2013).
- [15]. Ridha Kelaiaia, Olivier Company, Abdelouahab Zaatri, “Multiobjective optimization of a linear Delta parallel robot”, Mechanism and Machine Theory 50, 159–178, (2012).

ABSTRACT

Optimum design of 3RUU parallel robot using improved Atlas method

This article talks about using the improved Atlas method to optimally design the 3RUU parallel robot. The goal of this design is to determine the geometric dimensions of the robot so that the indicators of force and velocity conversion ratio between joint space and working space are best. There are three design criteria used in this study including robot dexterity, minimum velocity transmission coefficient and rigidity. The optimization method used in this study is the improved Atlas method. This method allows dividing multi-objective problems into single-objective problems and then superimposing feature Atlases to determine the optimal region. The novelty of the research is that the author will replace the Atlas superposition step with a technique called spread spectrum, this technique does not plot the characteristics like the original Atlas method but it superimposes representative values. number of the attribute under investigation on a predetermined grid of points on the robot's working space. The illustrative results in the article show that this method has potential for application on symmetric parallel robots with less than 4 variables needing to be synthesized.

Keywords: Parallel robot; 3RUU; Minimum velocity transmission coefficient; Dexterity; Jacobian.