

MỘT GIẢI PHÁP TÍNH TOÁN ĐẢM BẢO SAI SỐ KHÂU CUỐI ROBOT Nằm trong miền giới hạn định trước

Phạm Thành Long*, Dương Quốc Khánh, Lê Thị Thu Thủy
Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên

TÓM TẮT

Độ chính xác của cơ cấu robot trước hết là hệ quả của nỗ lực thiết kế cơ khí, sau đó là điều khiển và hiệu chỉnh cơ cấu. Trong phạm vi bài báo này chúng tôi tập trung trình bày một phương pháp tính đảm bảo chất lượng ban đầu của cơ cấu cơ khí theo yêu cầu cho trước, có kể đến ảnh hưởng của dung sai biến suy rộng, dung sai của khâu (dung sai kích thước Denavit-Hartenberg (D-H)) và dung sai độ di động tự do của toàn bộ ổ lăn trong sơ đồ động. Phương thức tiến hành định lượng các giá trị này là xác định từng đại lượng riêng lẻ trong các bài toán nhỏ làm xấp xỉ đầu sau đó kiểm tra phối hợp bằng đáp ứng động học thuận của robot. Trên thế giới việc nghiên cứu dung sai cơ cấu robot có hai chiều hướng là nghiên cứu định tính bằng quy hoạch và nghiên cứu định lượng thông qua hiệp phương sai. Các phương pháp này hoặc không cho giá trị dung sai chế tạo mà chỉ cho chiều hướng ảnh hưởng của từng tham số khảo sát lên dung sai hoặc chỉ đảm bảo trong phạm vi độ tin cậy nhất định. Phương pháp đề xuất trong bài báo này là một phương pháp số, đảm bảo rà soát hết các khả năng có thể có khi chế tạo nên về phương diện tin cậy nó vượt trội các phương pháp truyền thống khác.

Từ khóa: Độ chính xác robot; kích thước D-H; dung sai; sai số ổ lăn; biến suy rộng.

Ngày nhận bài: 04/6/2019; Ngày hoàn thiện: 25/8/2019; Ngày đăng: 26/8/2019

A COMPUTATIONAL SOLUTION TO ENSURE ROBOT END-EFFECTOR ERROR WITHIN A PREDETERMINED LIMIT AREA

Pham Thanh Long*, Duong Quoc Khanh, Le Thi Thu Thuy
University of Technology - TNU

ABSTRACT

The accuracy of manipulators is the result of processes of mechanical design, control and structural calibration (adjustment). In this paper, we propose a method to calculate and ensure the initial quality of mechanical structures as required, in which the influence of tolerances of joint variables, links (tolerances of D-H parameters) and all bearings in the dynamic diagram is considered. To find these values, we have to determine each quantity in small problems as the first approximation and then put into forward kinematic responses to test. In the world, the study of the tolerance of robot structure has two main trends: Qualitative research by planning and quantitative research through covariance. These methods have some main disadvantages such as do not show manufacturing tolerances but only provide the effect of each survey parameter on tolerance or only within a certain reliability range. The method proposed in this paper is a numerical method that can assuredly check all possibilities so its reliability is superior to other traditional methods.

Keywords: Robot accuracy; D-H parameter; tolerance; roller bearing error; joint variable

Received: 04/6/2019; Revised: 25/8/2019; Published: 26/8/2019

* Corresponding author. Email: kalongkc@gmail.com

1. Giới thiệu

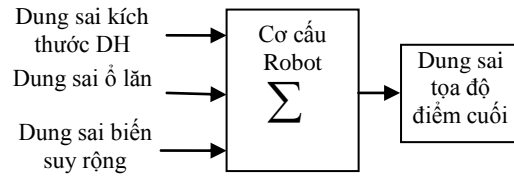
Dung sai cơ khí khi chế tạo cơ cấu robot có ảnh hưởng lớn đến độ chính xác động học, theo [1] dung sai kích thước D-H và biến dạng đàn hồi của cơ cấu cơ khí chiếm đến 70% sai số của cơ cấu. Trước khi chế tạo cơ cấu cơ khí cho robot người ta phải hoàn thành việc tính toán dung sai cho từng khâu hợp thành để đảm bảo cơ cấu này có độ chính xác nằm trong giới hạn cho phép.

Nghiên cứu về xác định dung sai chế tạo khâu [2] cho rằng khi quá trình chế tạo hoàn tất, kích thước thực của khâu không phải là giá trị ngẫu nhiên nữa. Điều này chứng tỏ việc tính toán xác định ảnh hưởng của các tham số động học trên khâu cuối là đúng đắn. Đối với sai số khe hở hướng kính, ngay cả khi quá trình chế tạo hoàn tất thì ảnh hưởng của loại sai số này đến độ chính xác vị trí khâu cuối vẫn là ngẫu nhiên [3]. Theo đó, vị trí của tâm chốt trong lòng ổ là ngẫu nhiên, do đó nó sinh ra sai số vị trí của khâu gắn với nó. Tuy vậy hệ quả kế tiếp của vấn đề này là khe hở giữa trục và ổ còn sinh ra góc xoay không mong muốn là sai số kích thước trong bộ tham số D-H. Sự phức tạp ở đây là tại các vị trí ngẫu nhiên sẽ sinh ra các sai số của tham số D-H cũng ngẫu nhiên, cần đánh giá được ảnh hưởng của sai số này đến độ chính xác định vị khâu cuối, đặc biệt là cần tính toán được sai số cho phép này bằng bao nhiêu ngay từ khâu thiết kế mà các nghiên cứu trước chưa đề cập. Chúng tôi giới thiệu phương pháp số do nhóm tự phát triển, trong đó độ chính xác điểm cuối cho trước và có kể đến ba yếu tố ảnh hưởng ngẫu nhiên lên kết quả mô phỏng bao gồm dung sai kích thước D-H, dung sai độ xô dịch tự do của ổ đỡ, dung sai biến suy rộng theo độ phân giải động cơ sử dụng trên từng khớp động. Đây là mô hình sát với thực tiễn và kết quả tính trực tiếp được sử dụng để chọn động cơ, ghi các bản vẽ chế tạo cơ khí cũng như chọn ổ đỡ khi thiết kế cơ khí cho robot.

2. Mô hình bài toán độ chính xác điểm cuối

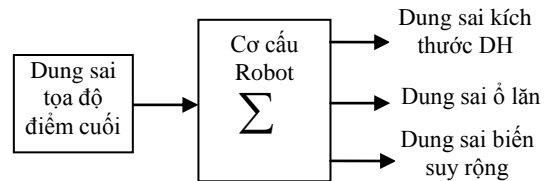
Theo quan điểm của chúng tôi cũng như tổng kết từ một số nghiên cứu [4-6], có ba yếu tố

cần kể đến khi muốn điểm cuối của chuỗi động học đến đúng vị trí mong muốn, bao gồm tham số động học D-H, ổ lăn và biến suy rộng.



Hình 1. Bài toán thuận dung sai tọa độ điểm cuối

Việc xác định một cơ chế hai chiều với bài toán này trong quá trình thiết kế là cần thiết. Theo hình 1, bài toán thuận cho trước dung sai các thành phần, cần xác định dung sai tọa độ điểm cuối. Ở bài toán ngược có dung sai tọa độ điểm cuối cho trước, cần xác định các dung sai thành phần sao cho đảm bảo chất lượng ban đầu theo yêu cầu, được đánh giá qua ba giá trị dung sai như trên hình 2, với tất cả các tổ hợp có thể có.



Hình 2. Bài toán ngược dung sai tọa độ điểm cuối

Trong thiết kế, bài toán ngược thường được giải trước để sơ bộ xác định giá trị của các dung sai thành phần. Tiếp đó, bài toán thuận được sử dụng để kiểm tra các giá trị nhận được và đánh giá mức độ hợp lý của các giá trị này, từ đó có thể xác định chúng có cần điều chỉnh hay không.

Có thể xem cơ cấu robot trong tình huống này là một cơ cấu vi sai, có chức năng tổng hợp kênh ở bài toán thuận và chức năng phân tách kênh ở bài toán ngược. Điểm mấu chốt ở đây là các đại lượng được tổng hợp không cùng thứ nguyên, chúng có cả kích thước dài (mm) và kích thước góc (rad).

Theo quy tắc D-H, mô hình động học của bài toán không kể đến dung sai sẽ có dạng:

$$f(O_i, a_i, d_i, q_i) = p_i \quad i = 1 \div n \quad (1)$$

Trong đó: O_i , a_i , d_i , q_i , p_i lần lượt là vị trí gốc tọa độ thứ i , kích thước D-H, tọa độ suy rộng

và tọa độ điểm cuối của cơ cấu đang khảo sát. Nếu nhìn nhận dưới quan điểm độ chính xác cơ cấu thực, sẽ tồn tại các dung sai thành phần, khi đó phương trình (1) có dạng (2).

$$f(O_i \pm \delta o_i, a_i \pm \delta a_i, d_i \pm \delta d_i, q_i \pm \delta q_i) = p_i \pm \delta \quad (2)$$

$$i = 1 \div n$$

Trong đó δ tượng trưng cho bán kính sai số mong muốn của điểm cuối. Để khắc phục tính chông chắt khi giải bài toán ngược (hình 2), việc chia nhỏ bài toán (2) thành các trường hợp riêng là cần thiết. Tuy nhiên điểm độ dao ở đây là thay vì chia (2) thành ba bài toán con (từ sai lệch khâu cuối xác định dung sai các tham số kích thước khâu, dung sai khớp và dung sai biến suy rộng), chúng tôi chỉ chia thành hai bài toán con như sau:

- Chỉ xét ảnh hưởng của kích thước D-H và độ xô dịch tâm ổ đỡ:

$$f(O_i \pm \delta o_i, a_i \pm \delta a_i, d_i \pm \delta d_i, q_i) = p_i \pm \delta \quad (3)$$

$$i = 1 \div n$$

- Chỉ xét ảnh hưởng của biến suy rộng:

$$f(O_i, a_i, d_i, q_i \pm \delta q_i) = p_i \pm \delta \quad (4)$$

$$i = 1 \div n$$

Rõ ràng bài toán (3) và (4) có số lượng biến nhỏ hơn bài toán gốc (2) sẽ cho ra lời giải dễ dàng hơn khi muốn xác định một bộ giá trị

$$A_{i+1}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \pm \delta_{oi}^x \\ 0 & 1 & 0 & \pm \delta_{oi}^y \\ 0 & 0 & 1 & \pm \delta_{oi}^z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha.c\beta & s\alpha.s\beta & (a_i \pm \delta a_i).c\alpha \\ s\alpha & c\alpha.c\beta & -c\alpha.s\beta & (a_i \pm \delta a_i).s\alpha \\ 0 & s\beta & c\beta & d_i \pm \delta d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.2. Chỉ xét ảnh hưởng của biến suy rộng

Trường hợp này góc O_{i+1} được xác định chỉ phụ thuộc vào độ phân giải của động cơ dẫn động:

$$A_{i+1}^i = \begin{bmatrix} c(\alpha_i \pm \delta \alpha_i) & -s(\alpha_i \pm \delta \alpha_i).c\beta & s(\alpha_i \pm \delta \alpha_i).s\beta & a_i.c(\alpha_i \pm \delta \alpha_i) \\ s(\alpha_i \pm \delta \alpha_i) & c(\alpha_i \pm \delta \alpha_i).c\beta & -c(\alpha_i \pm \delta \alpha_i).s\beta & a_i.s(\alpha_i \pm \delta \alpha_i) \\ 0 & s\beta & c\beta & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Để tiến hành phân tích được cần mô hình hóa đầy đủ tọa độ thực điểm cuối như (8):

$$\prod_{i=0}^6 A_{i+1}^i \cdot O_0 \leq p_j \pm \delta \quad \text{với} \quad j = 1 \div n \quad (8)$$

Với số điểm khảo sát j đủ lớn, sẽ cho giá trị dung sai sơ bộ của bài toán ngược được xét riêng rẽ. Các giá trị này không phải lời giải

khởi xuất để đưa vào điều chỉnh theo sơ đồ trên hình 3.

3. Phân tích độc lập các tham số thiết kế

Với mục tiêu xác định bộ giá trị xấp xỉ ban đầu của dung sai, trong mục 2 đã đề xuất chia bài toán (2) thành hai bài toán con là (3) và (4) khảo sát riêng rẽ. Trong mục này sẽ đề cập chi tiết việc giải hai phương trình (2,3) này như thế nào.

3.1. Chỉ xét ảnh hưởng của kích thước DH và độ xô dịch tâm ổ đỡ

Xê dịch góc của hệ quy chiếu bất kỳ theo cả ba phương xuất hiện khi tính đến khe hở cơ học của nó. Nhà sản xuất có công bố thông số này, tuy nhiên để chọn được cấp chính xác của ổ cần xác định được các giá trị khe hở làm căn cứ. Mô hình xê dịch góc tọa độ O_i sẽ cho bởi (5) như sau:

$$\delta O_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \pm \delta_{oi}^x \\ 0 & 1 & 0 & \pm \delta_{oi}^y \\ 0 & 0 & 1 & \pm \delta_{oi}^z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Như vậy xê dịch góc của hệ quy chiếu O_{i+1} tính cả dung sai kích thước D-H mô tả bởi (6):

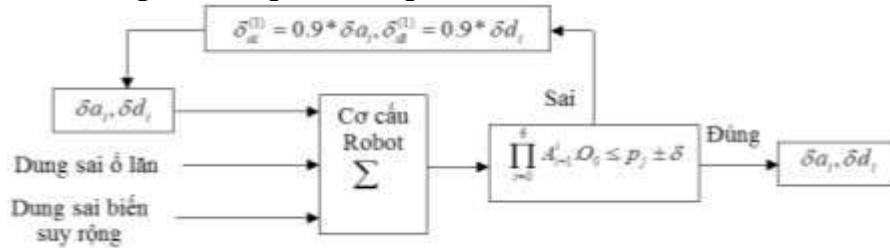
cùng, nó là xấp xỉ đầu để thực hiện bài toán kiểm tra thuận theo sơ đồ trên hình 1. Các điều chỉnh giảm độ rộng miền dung sai là

cần thiết khi điểm rơi có bán kính lớn hơn giá trị mong muốn δ cho trước. Việc giải lặp lại các phương trình (8) với độ chính xác cao được thực hiện như ở [7].

3.3 Kiểm tra kết hợp và hiệu chỉnh tham số thiết kế

Các giá trị dung sai tính được ở mục 2 chỉ là xấp xỉ đầu, việc tìm giá trị dừng của chúng

dựa trên thực hiện kiểm tra thực tế đáp ứng của chuỗi động tính theo sơ đồ hình 3. Lý do của việc không chấp nhận giá trị xấp xỉ đầu này làm giá trị thiết kế là bởi hệ có tính phi tuyến nên đương nhiên không thể cộng các tác động theo kiểu cơ học. Nói cách khác, việc phân tách hệ (2) thành hai hệ (3) và (4) là không tương đương.



Hình 3. Sơ đồ kiểm tra kết hợp ba tham số khảo sát tại vị trí điểm cuối

Như minh họa trên Hình 3, quá trình hiệu chỉnh tham số chỉ cần tác động đến dung sai kích thước D-H. Dung sai ổ lăn đã được định trước bởi nhà sản xuất. Dung sai biến suy rộng do tùy thuộc động cơ dẫn động nên cũng không thuận tiện cho việc thay đổi. Như vậy, chỉ có dung sai kích thước D-H là liên quan đến khâu chế tạo, dễ dàng điều chỉnh được trong trường hợp này.

4. Ví dụ minh họa

Trong ví dụ này chúng tôi minh họa việc tính toán riêng rẽ và kiểm tra dung sai giới hạn kết hợp khi thiết kế robot S900w theo các quan điểm trình bày ở trên.

Bảng 1. Bảng thông số D-H của robot S900w

Khớp	R_z	T_z	T_x	R_x
1	(α_1)	d_1	a_1	90°
2	(α_2)	0	a_2	0
3	(α_3)	0	a_3	90°
4	(α_4)	d_4	0	-90°
5	(α_5)	0	0	90°
6	(α_6)	d_5+d_6	0	0

Các kích thước cụ thể của robot nói trên sử dụng khi tính toán như sau (mm):

$$d_1 = 335, a_1 = 75, a_2 = 270, a_3 = 90, d_4 = 295, d_5+d_6 = 80$$

Nếu yêu cầu độ chính xác khâu cuối không vượt quá một mặt cầu bán kính $R = 1\text{mm}$. Dựa trên phương pháp Generalized Reduced Gradient (GRG), giải độc lập các bài toán tìm

dung sai tọa độ suy rộng và tìm dung sai chiều dài khâu như [8] cho kết quả như sau:

$$q_1, q_2, q_3: \delta q = 0,000786 \text{ rad}$$

Chia đều hai biên miền dung sai, tức là:

$$\delta q = -0,000393 \div 0,000393 \text{ (rad);}$$

$$q_4, q_5, q_6: \delta q = 0,000628 \text{ rad, hay:}$$

$$\delta q = -0,000314 \div 0,000314 \text{ (rad);}$$

Theo [9] chọn ổ lăn có khe hở hướng kính các trục 1, 2, 3 là 0.013 (mm);

Chọn ổ lăn có khe hở hướng kính các trục 4, 5, 6 là 0.007 (mm);

Dung sai các kích thước D-H tính toán được dưới dạng độc lập là:

$$d_1 = 335 \text{ (mm)} \quad \delta d_1 = -0,15 \div 0,15$$

$$a_1 = 75 \text{ (mm)} \quad \delta a_1 = -0,1 \div 0,1$$

$$a_2 = 270 \text{ (mm)} \quad \delta a_2 = -0,15 \div 0,15$$

$$a_3 = 90 \text{ (mm)} \quad \delta a_3 = -0,1 \div 0,1$$

$$d_4 = 295 \text{ (mm)} \quad \delta d_4 = -0,1 \div 0,1$$

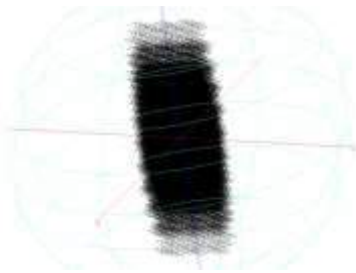
$$d_5 + d_6 = 80 \text{ (mm)} \quad \delta(d_5+d_6) = -0,1 \div 0,1$$

Một phần mềm chuyên dụng đã được nhóm tác giả xây dựng và kiểm chứng, dựa trên quan hệ bài toán động học thuận robot, nhằm kiểm tra tính lắp lẫn ngẫu nhiên của tất cả các trường hợp có khả năng xảy ra đối với từng sai lệch khâu, khớp thành phần. Đưa kết quả tính vào kiểm tra phối hợp trên phần mềm cho kết quả tính như hình 4 và kết quả mô phỏng điểm cuối trong mặt cầu sai số như hình 5.

Axis	Value	Error	Step number	Step n.
Axis #1 (x)	20.00000	0.00000	2	0.10
Axis #1 (x)	20.00000	0.00000	2	0.1
Axis #2 (y)	20.00000	0.00000	2	0.10
Axis #2 (y)	20.00000	0.00000	2	0.1
Axis #3 (z)	20.00000	0.00000	2	0.10
Axis #3 (z)	20.00000	0.00000	2	0.1
Axis #4 (a)	20.00000	0.00000	2	0.1
Axis #4 (a)	20.00000	0.00000	2	0.1
Axis #5 (b)	20.00000	0.00000	2	0.00000
Axis #5 (b)	20.00000	0.00000	2	0.00000
Axis #6 (c)	20.00000	0.00000	2	0.00000
Axis #6 (c)	20.00000	0.00000	2	0.00000
Axis #7 (d)	20.00000	0.00000	2	0.00000
Axis #7 (d)	20.00000	0.00000	2	0.00000
Axis #8 (e)	20.00000	0.00000	2	0.00000
Axis #8 (e)	20.00000	0.00000	2	0.00000
Axis #9 (f)	20.00000	0.00000	2	0.00000
Axis #9 (f)	20.00000	0.00000	2	0.00000
Axis #10 (g)	20.00000	0.00000	2	0.00000
Axis #10 (g)	20.00000	0.00000	2	0.00000

Hình 4. Kết quả kiểm tra sai số điểm cuối kết hợp theo phương án vét cạn

Kết quả kiểm tra cho thấy, không còn điểm nào vượt ra ngoài mặt cầu mô tả chất lượng định vị khâu cuối mà đầu bài đưa ra là $r = 1$ (mm). Tọa độ các điểm cuối thu được hoàn toàn nằm trong vùng cầu giới hạn định trước như minh họa trên hình 5.



Hình 5. Mô phỏng các tọa độ điểm cuối của robot S900w trong mặt cầu giới hạn định trước $R=1\text{mm}$

5. Kết luận

Một phương pháp định lượng được các giá trị dung sai của các chi tiết cơ khí hợp thành robot là cần thiết cho người làm công tác thiết kế. Cách tiếp cận của chúng tôi ở đây là chia bài toán lớn thành các bài toán với quy mô nhỏ hơn. Sau khi các tham số được khảo sát độc lập, giá trị nhận được chỉ là xấp xỉ đầu. Việc đưa ra mô hình tọa độ thực điểm cuối với đầy đủ các ảnh hưởng kết hợp để thử nghiệm vét cạn đã chỉ ra đây là mô hình khá toàn diện. Với quy trình rõ ràng, dễ vận dụng trong thiết kế, cách làm mà chúng tôi đề xuất có khả năng ứng dụng thực tiễn cao. Cơ cấu cơ khí với chất lượng ban đầu đúng theo quy

hoạch là cơ sở để đạt độ chính xác mong muốn khi ứng dụng thực tế.

Kết quả tính toán được thực hiện với các thông số của robot S900w trong gói đầu tư phòng thí nghiệm Cơ điện tử của các tác giả bài báo này. Kết quả tính toán đã được đối chứng và tương đồng với kênh của nhà sản xuất. Giải pháp đã đề xuất trong bài báo do vậy có thể là một phương pháp thuận tiện và chặt chẽ cho những nghiên cứu khác về độ chính xác của cơ cấu cơ khí kiểu robot.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin cảm ơn sự tài trợ kinh phí cho nghiên cứu này của trường Đại học Kỹ thuật Công Nghiệp- Đại học Thái Nguyên thông qua đề tài cơ sở mã số T2019 – B07.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Weill R., Shani B., "Assessment of Accuracy of Robots in Relation with Geometrical Tolerances in Robot Links", *Ann CIRP*, 40, pp. 395-399, 1991.
- [2]. Kim S. H., "The Optimal Tolerance Design for Kinematic Parameters of a Robot", *J. Des Manuf Autom.*, 1, pp. 269-282, doi:10.1080/15320370108500213, 2001.
- [3]. Zhu J., Ting K., "Uncertainty analysis of planar and spatial robots with joint clearances", *Mech Mach Theory*, 35, pp. 1239-1256, 2000.
- [4]. Zhang J., Cai J., "Error Analysis and Compensation Method Of 6-axis Industrial Robot", *International Journal On Smart Sensing*

And Intelligent Systems 6(4), pp. 1383-1399, 2013.
[5]. Abderrahim M., Khamis A., Garrido S., Moreno L., *Accuracy and Calibration Issues of Industrial Manipulators*, 2006.
[6]. Ji S., Li X., Cai H., "Optimal Tolerance Allocation Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation and Genetic Algorithm", *Int. J. Adv. Manuf Technol*, 16, pp. 461-468, 2000.
[7]. Phạm Thành Long, Nguyễn Hữu Công, Lê Thị Thu Thủy, *Ứng Dụng Phương Pháp Giảm*

Gradient Tổng Quát Trong Kỹ Thuật Robot, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2017.
[8]. Trung T. T., Li W. G., Long P. T., "Tolerance Design of Robot Parameters Using Generalized Reduced Gradient Algorithm", *Int J. Mater Mech Manuf*, 5, pp. 96-105, doi:10.18178/ijmmm.2017.5.2.298, 2017.
[9]. Motion & Control, NSK, CAT. N0. E1102e – 2007, truy cập tại <http://nsk.com>, 6/2019.