

A PROBLEM OF TOLERANCE CALCULATION OF SERIAL MANIPULATORS BASED ON PROCESSING TECHNOLOGY

Duong Quoc Khanh*, Pham Thanh Long

TNU - University of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 02/3/2021 Revised: 13/5/2021 Published: 24/5/2021	In mechatronic systems, the final quality assurance of accuracy often leads to the problem of ensuring the tolerance of actuator at the previous stage and the control problem at later stages. This paper introduces a numerical method of calculating fabrication tolerance for the mechanical structures of robots, in which sensibly allocating the tolerance values for each link so that the manufacturing cost is the lowest, paid particular attention to. The concept of the accuracy/ the reach ratio is given to characterize the design quality – mechanical fabrication of robots. We propose initial approximation values and use the numerical method, proposed by the group, to determine its optimal stop values, thereby determine the calculated tolerance of the robot. The results showed that the structure simultaneously ensures both economics and technicality. This method can be used for reference in actuator design of manipulators.
KEYWORDS Reach of the manipulator robot arm Radius error Accuracy Tolerance Numerical method	

BÀI TOÁN DUNG SAI CỦA CƠ CẤU ROBOT DẠNG CHUỖI HỖ TRÊN QUAN ĐIỂM TÍNH CÔNG NGHỆ GIA CÔNG

Dương Quốc Khánh*, Phạm Thành Long

Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 02/3/2021 Ngày hoàn thiện: 13/5/2021 Ngày đăng: 24/5/2021	Trong các hệ thống cơ điện tử, việc đảm bảo chất lượng cuối cùng về độ chính xác thường sẽ dẫn đến bài toán đảm bảo dung sai cơ cấu chấp hành ở giai đoạn trước và bài toán điều khiển ở giai đoạn sau. Bài báo này giới thiệu một phương pháp số tính toán dung sai chế tạo cho cơ cấu cơ khí của robot, trong đó đặc biệt chú ý đến việc phân bổ hợp lý giá trị dung sai cho từng khâu sao cho giá thành chế tạo là nhỏ nhất. Chúng tôi đưa ra khái niệm tỉ số độ chính xác/ tầm với của cơ cấu để đặc trưng cho chất lượng thiết kế - chế tạo cơ khí của cơ cấu. Đề xuất giá trị xấp xỉ đầu và sử dụng phương pháp số của nhóm để xác định giá trị dừng tối ưu của nó, từ đó xác định được dung sai cần tính của cơ cấu robot. Kết quả nhận được cho thấy cơ cấu đảm bảo tính kinh tế và tính kỹ thuật đồng thời, phương pháp có thể sử dụng để tham khảo ở bước thiết kế cơ cấu chấp hành của tay robot.
TỪ KHÓA Tầm với Bán kính sai số Độ chính xác Dung sai Phương pháp số	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4076>

* Corresponding author. Email: quockhanh19@tnut.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong các hệ servo, việc duy trì liên hệ ngược một hay nhiều vòng lặp chỉ đảm bảo rằng các tọa độ suy rộng của robot bám sát theo giá trị tính toán mà bài toán động học ngược cung cấp. Như vậy có nghĩa là chiến lược điều khiển này không cải thiện được độ chính xác của các tham số cơ khí như độ chính xác của kích thước DH, độ xê dịch tự do theo phương hướng kính và hướng trục của gối đỡ. Các tham số này không nằm trong vòng điều khiển phản hồi nên chúng chỉ có thể can thiệp từ khâu thiết kế. Để có giá trị của các tham số này, cần thiết lập mô hình quan hệ về chất lượng tổng thể của robot giữa dung sai biến suy rộng, dung sai kích thước DH, độ chính xác điểm cuối yêu cầu. Một cơ chế ngược trên mô hình đó để xuất phát từ độ chính xác khâu cuối cho trước tìm ra độ chính xác các khâu thành phần là cần thiết để lập các bản vẽ chế tạo.

Luận về các phương pháp tương tự khác để giải quyết vấn đề này, cần biết rằng các nghiên cứu trực tiếp chỉ ra dung sai khâu/ khớp bằng tính toán là rất hiếm, chủ yếu là kinh nghiệm và trực giác [1]. Một số nghiên cứu khác chủ yếu tập trung vào việc xác định trọng số ảnh hưởng đến khâu tác động cuối, nghĩa là chỉ có nghiên cứu định tính hơn là định lượng. Các tác giả R. Weill và B. Shani [2] đã phát triển một mô hình để đánh giá ảnh hưởng của sai số hình học của các khâu, khớp thành phần đến sai số vị trí và hướng của khâu tác động cuối R và xác định xem bộ phận nào có tác động lớn hơn. Tương tự, A. Liou [3] đã xác định rằng dung sai khớp có ảnh hưởng lớn hơn đến độ chính xác của vị trí và hướng của bàn kẹp bằng kỹ thuật thiết kế thực nghiệm dựa trên phương pháp Taguchi. Quá trình này được so sánh bằng kỹ thuật mô phỏng Monte Carlo. Vukobratovic [4] đã đánh giá ảnh hưởng của dung sai chế tạo đến độ chính xác của khâu tác động cuối và xem xét ảnh hưởng của từng thành phần đến vị trí và hướng của bàn kẹp. Jeong Kim [5] sử dụng phương pháp mô phỏng AFOSM để xác định ảnh hưởng của dung sai của các khâu và khớp đến sai số khâu tác động cuối của robot và đã được chứng minh bằng mô phỏng Monte Carlo. Đào Duy Sơn và Kazem Abhary [6] đã sử dụng Thiết kế Thí nghiệm (DOE) của Taguchi để xem xét ảnh hưởng của các thông số động học đến độ chính xác của rô bốt và thông số nào có tác động nhiều hơn đến độ chính xác của khâu tác động cuối của robot. Về mặt định lượng, một số nghiên cứu đã tập trung vào việc thể hiện mối quan hệ giữa dung sai của các khâu và khớp thành phần và chi phí chế tạo. Sun-Ho Kim [7] đã trình bày bài toán phân bổ dung sai nhỏ với chi phí thấp, nghĩa là giải bài toán tìm dung sai tối ưu của các tham số khâu và khớp của robot để có chi phí thấp nhất. Đặc biệt, mô hình tối ưu hóa chi phí sử dụng chương trình giả lập Boolean đã được thiết lập. Phạm vi dung sai vị trí và hướng của bàn kẹp là giới hạn. Rout và Mittal [1] đã sử dụng kỹ thuật tối ưu tiến hóa để chọn đồng thời các tham số và dung sai tối ưu trên cơ sở hàm chi phí nhỏ nhất. Các dung sai động học và động lực học được coi là giá trị ban đầu. Hàm chi phí có các ràng buộc là dung sai bắt buộc. Có thể thấy rằng, mặc dù việc phân bổ dung sai được thực hiện với các hàm chi phí chế tạo thấp nhất theo nhiều cách khác nhau, các nghiên cứu đã được thực hiện với các giả định về dung sai tham số không được tính toán ngay từ đầu. Đây là một hạn chế rất lớn cần được loại bỏ. Và, một cơ chế định lượng có thể kiểm tra hầu hết các khả năng tổ hợp thực tế là cần thiết. Đó cũng là mục đích của nghiên cứu được giới thiệu trong bài báo này.

2. Quan điểm tính công nghệ trong thiết kế dung sai robot

Tính công nghệ ở đây thể hiện ở chỗ chúng tôi định hướng tỉ số dung sai/ kích thước danh nghĩa của tất cả các khâu trong sơ đồ tính toán được sẽ như nhau. Như vậy nghĩa là các khâu có kích thước danh nghĩa lớn sẽ cho ra dung sai lớn và ngược lại. Trong chế tạo máy, nếu độ chính xác cao sẽ cần có nhiều nguyên công tham gia vào quy trình công nghệ, sai số sẽ giảm dần và độ chính xác được gia tăng sau mỗi nguyên công. Điều này cũng trực tiếp làm tăng giá thành sản phẩm. Lý giải việc tại sao khi không ràng buộc tỉ số dung sai/ kích thước danh nghĩa lại thiếu tính công nghệ, các khâu có dung sai lớn dễ chế tạo và có giá thành thấp, tuy nhiên có một số khâu bù lại có dung sai quá hẹp dẫn đến tăng giá thành. Giá thành gia công bị tăng quá mạnh ở các khâu này kéo theo tăng giá thành chung.

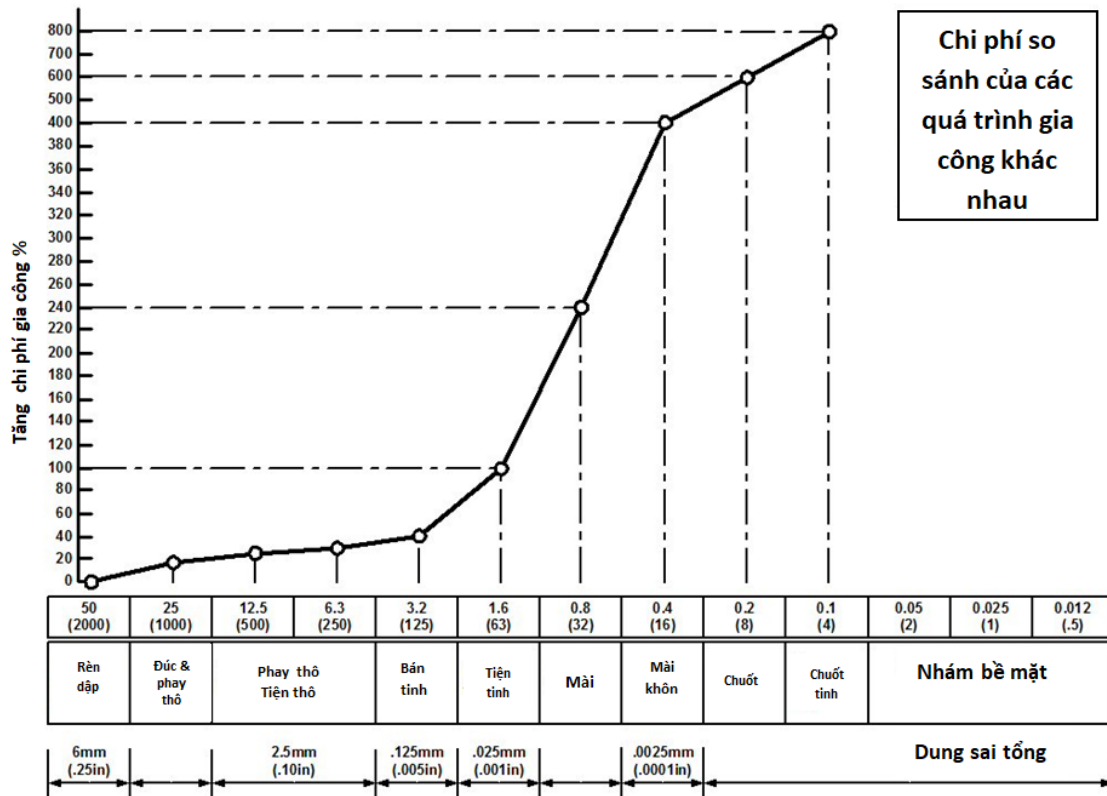
Gọi $a_i, \delta a_i$ lần lượt là kích thước danh nghĩa của khâu thứ i và dung sai tương ứng của nó;

Gọi c_i là chi phí gia công ứng với cấp chính xác đã chọn của khâu i ;

Khi đó tỉ số $\frac{\delta a_i}{a_i}$ nói lên độ chính xác của chi tiết gia công (thực tế độ chính xác gia công được

tra cứu theo hai tham số là dung sai và kích thước danh nghĩa của chi tiết);

Giá thành gia công sử dụng quan hệ giữa chi phí gia công với dung sai được tính theo hình 1 [9].



Hình 1. Biểu đồ quan hệ chi phí và dung sai chi tiết gia công

Theo phương án này [8], cần xác định giá cơ sở của chi tiết gia công (c_i), đây là phần giá hình thành do khối lượng vật tư sử dụng, chi phí máy dao, đồ gá, chi phí công... Phần thứ hai là phần giá trị xác định bởi dung sai (hay cấp chính xác, hệ số ký hiệu $\frac{\delta a_i}{a_i}$) có chức năng hiệu chỉnh giá

thành do yêu cầu của dung sai đặt ra. Giá thành gia công của toàn bộ mô hình có n khâu hợp thành chuỗi động được xác định theo (1):

$$Cost = \sum_{i=1}^n \frac{\delta a_i}{a_i} \cdot c_i \quad (1)$$

Theo Cauchy, (1) có dạng khai triển như sau:

$$\frac{1}{n} \left(\frac{\delta a_1}{a_1} \cdot c_1 + \frac{\delta a_2}{a_2} \cdot c_2 + \dots + \frac{\delta a_n}{a_n} \cdot c_n \right) \geq \sqrt[n]{\left(\frac{\delta a_1}{a_1} \cdot c_1 \right) \cdot \left(\frac{\delta a_2}{a_2} \cdot c_2 \right) \cdot \dots \cdot \left(\frac{\delta a_n}{a_n} \cdot c_n \right)} \quad (2)$$

Trong đó, giá thành nhỏ nhất có thể đạt được khi chế tạo một cơ cấu đảm bảo các ràng buộc kỹ thuật sẽ có giá trị chính xác là (3): $Min(Cost) = n \cdot \sqrt[n]{\left(\frac{\delta a_1}{a_1} \cdot c_1 \right) \cdot \left(\frac{\delta a_2}{a_2} \cdot c_2 \right) \cdot \dots \cdot \left(\frac{\delta a_n}{a_n} \cdot c_n \right)}$ (3)

Và cũng theo Cauchy điều này chỉ đạt được khi mà (4) được thỏa mãn:

$$\frac{\delta a_1}{a_1} \cdot c_1 = \frac{\delta a_2}{a_2} \cdot c_2 = \dots = \frac{\delta a_n}{a_n} \cdot c_n \quad (4)$$

Do các chi tiết máy trong chuỗi có cùng cấp chính xác nên chi phí gia công c_i của chúng đương nhiên là giống nhau. Vậy để (4) xảy ra ta cần có (5):

$$\frac{\delta a_1}{a_1} = \frac{\delta a_2}{a_2} = \dots = \frac{\delta a_n}{a_n} \quad (5)$$

Trên cơ sở kết luận nói trên, chúng tôi định hướng quá trình tính toán dung sai cơ cấu robot sao cho thỏa mãn đặc điểm (5). Đây chính là phương án có tính kinh tế tốt nhất còn đảm bảo ràng buộc kỹ thuật cho trước, cũng theo (3), khi kết hợp với (5) giá thành nhỏ nhất đạt được là (6):

$$\text{Min}(\text{Cost}) = n \cdot \frac{\delta a_i}{a_i} \cdot c_i \quad (6)$$

Như vậy, các thiết kế không có đặc điểm (5) sẽ chỉ thỏa mãn một tiêu chí là kỹ thuật mà không tối ưu về tính kinh tế.

3. Lựa chọn xấp xỉ đầu và phương pháp tính dung sai

Như đã nêu ở mục 2, việc nhận diện phương án thiết kế có tính kinh tế và kỹ thuật tối ưu được đưa ra bởi (5). Trong mục này, chúng tôi sẽ đề xuất một phương pháp số để xác định chính xác một thiết kế đảm bảo đồng thời hai yêu cầu là có tính kỹ thuật đặc trưng bởi (5) và có tính kinh tế đặc trưng bởi (6).

Gọi $r(\text{mm})$ là bán kính sai số cho phép của robot tại điểm thử nghiệm bất kỳ trong vùng làm việc, có nghĩa là để được coi là đảm bảo độ chính xác, tất cả các tổ hợp điểm chạm tại điểm thử nghiệm không phân bố ngoài mặt cầu bán kính r có tâm là điểm danh nghĩa.

$$\text{Gọi tầm với của toàn bộ cơ cấu là: } R = \sum_{i=1}^n a_i \quad (\text{mm}) \quad (7)$$

Trong đó, a_i là chiều dài của khâu thứ i ;

Gọi k là đại lượng không thứ nguyên định nghĩa bởi (8) tượng trưng cho chất lượng động học cơ cấu robot: $k = \frac{r}{R}$ (8)

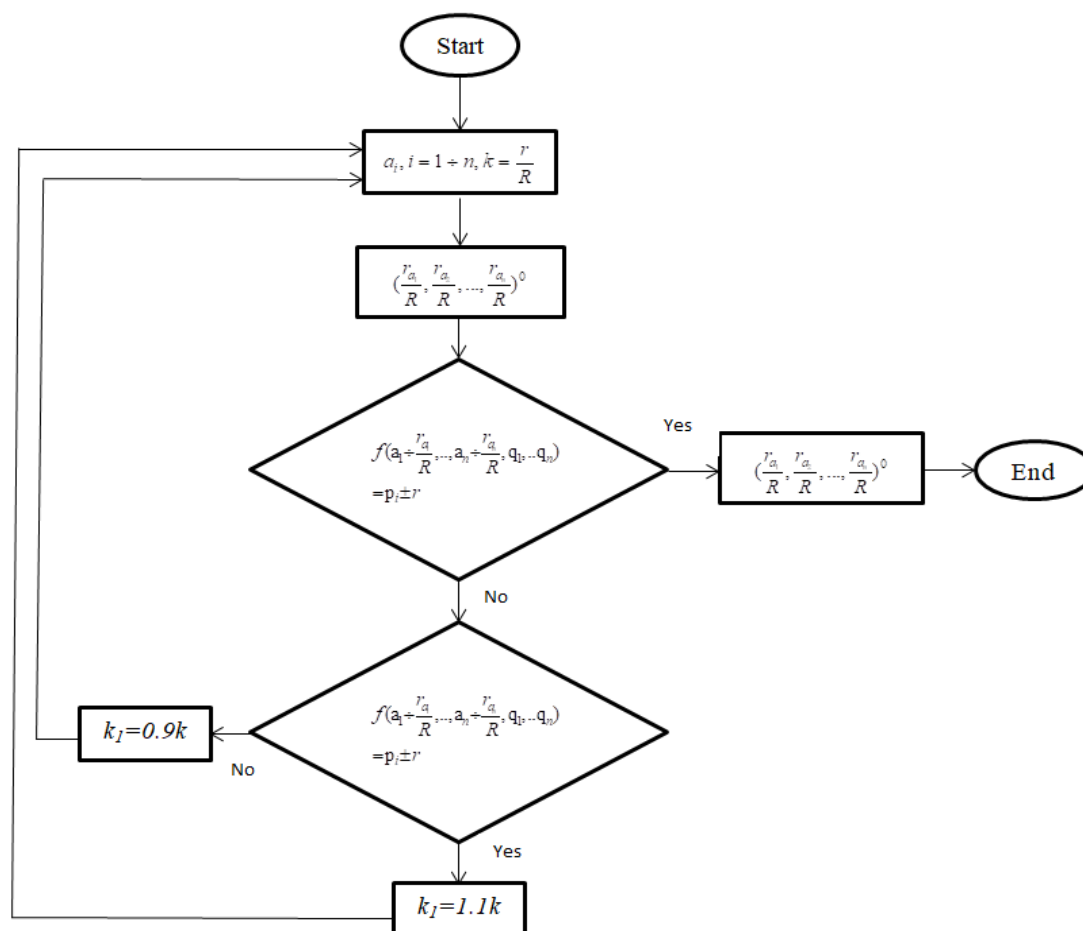
Lấy k làm xấp xỉ đầu để bắt đầu xác định giá trị dung sai của cơ cấu robot theo quan điểm đã nói ở (5) như sau: $k = \frac{r}{R} = \frac{\delta a_i}{a_i}$ (9)

Với các a_i đã biết trước, theo (9) dễ dàng có bộ giá trị xấp xỉ đầu của tất cả các dung sai thành phần như sau:

$$(\delta a_1, \delta a_2, \dots, \delta a_n)^{(0)} = \left(\frac{a_1 \cdot r}{R}, \frac{a_2 \cdot r}{R}, \dots, \frac{a_n \cdot r}{R} \right)^{(0)} \quad (10)$$

Sử dụng sơ đồ thuật toán hình 1 để tìm giá trị chính xác của bộ giá trị dung sai có xấp xỉ đầu đề xuất ở (10).

Theo như sơ đồ này, các điểm rơi từ xấp xỉ đầu được điều chỉnh gần tối đa đến biên của mặt cầu mô tả chất lượng động học nhằm nói rộng dung sai các khâu thành phần đến mức lớn nhất có thể được. Đây chính là cơ sở để một mặt tạo điều kiện giảm giá thành chế tạo do các khâu thành phần được phép cực đại hóa dung sai đến mức có thể, mặt khác vì điểm rơi không ra ngoài mặt cầu chất lượng nên yếu tố kỹ thuật của bài toán luôn đảm bảo.



Hình 2. Sơ đồ thuật toán xác định giá trị dừng của dung sai

4. Tính toán minh họa cho robot 6 bậc tự do

Trong mục này chúng tôi tính toán các dung sai kích thước cho robot sáu bậc tự do toàn khớp quay. Bảng DH của robot cho thấy trên hình. Các kích thước danh nghĩa của robot cho trước như sau: $d_1 = 335$ (mm); $a_2 = 270$ (mm); $d_4 = 295$ (mm); $d_6 = 80$ (mm);

Yêu cầu tính toán dung sai đề có độ chính xác điểm cuối với bán kính sai số $\delta = 0.5$ (mm);

Khớp i	q_i	d_i	a_i	α_i
1	(q_1)	d_1	0	$\pi/2$
2	(q_2)	0	a_2	0
3	(q_3)	0	0	$\pi/2$
4	(q_4)	d_4	0	$-\pi/2$
5	(q_5)	0	0	$\pi/2$
6	(q_6)	d_6	0	0

Hệ phương trình động học của robot xác định được điểm cuối lý thuyết là:

$$P_x = d_6 * (\sin(q_5) * (\sin(q_1) * \sin(q_4) + \cos(q_4) * (\cos(q_1) * \cos(q_2) * \cos(q_3) - \cos(q_1) * \sin(q_2) * \sin(q_3))) - \cos(q_5) * (\cos(q_1) * \cos(q_2) * \sin(q_3) + \cos(q_1) * \cos(q_3) * \sin(q_2))) + d_4 * (\cos(q_1) * \cos(q_2) * \sin(q_3) + \cos(q_1) * \cos(q_3) * \sin(q_2)) + a_2 * \cos(q_1) * \cos(q_2)$$

$$P_y = d_4 * (\cos(q_2) * \sin(q_1) * \sin(q_3) + \cos(q_3) * \sin(q_1) * \sin(q_2)) - d_6 * (\sin(q_5) * (\cos(q_1) * \sin(q_4) + \cos(q_4) * (\sin(q_1) * \sin(q_2) * \sin(q_3) - \cos(q_2) * \cos(q_3) * \sin(q_1))) + \cos(q_5) * (\cos(q_2) * \sin(q_1) * \sin(q_3) + \cos(q_3) * \sin(q_1) * \sin(q_2))) + a_2 * \cos(q_2) * \sin(q_1).$$

$P_z = d_1 - d_4 * (\cos(q_2) * \cos(q_3) - \sin(q_2) * \sin(q_3)) + d_6 * (\cos(q_5) * (\cos(q_2) * \cos(q_3) - \sin(q_2) * \sin(q_3)) + \cos(q_4) * \sin(q_5) * (\cos(q_2) * \sin(q_3) + \cos(q_3) * \sin(q_2))) + a_2 * \sin(q_2).$

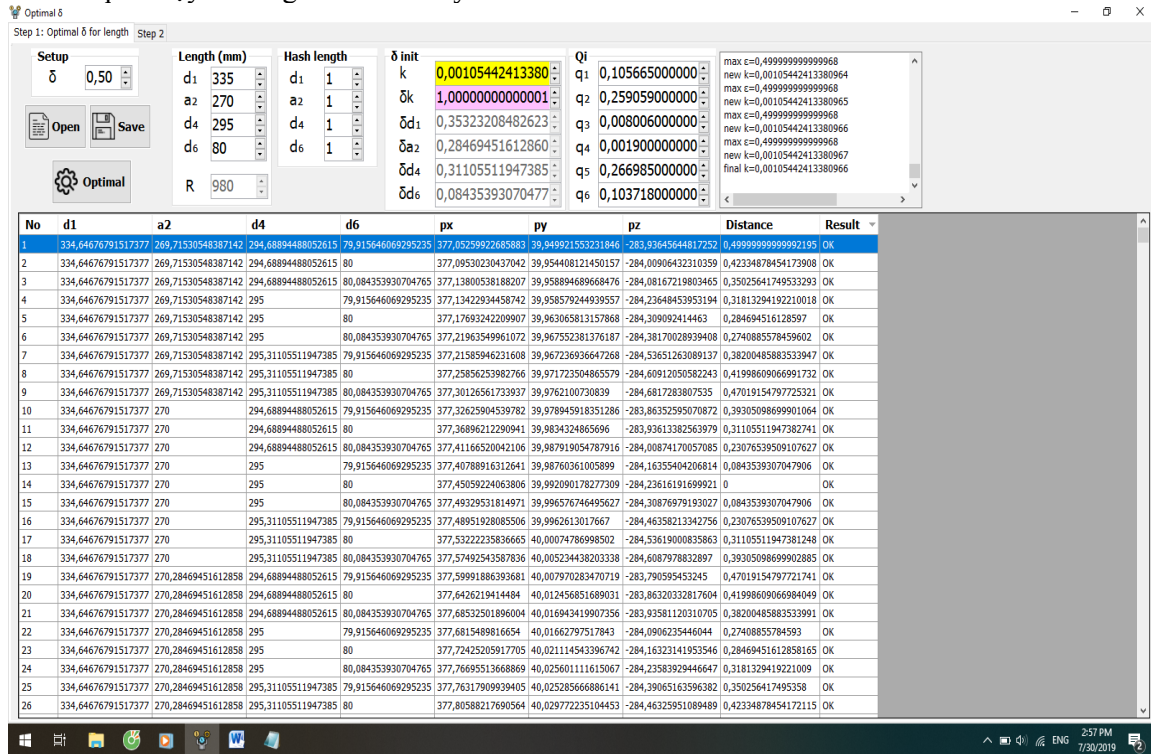
Tổng tâm với của hệ là $R = 980(\text{mm})$; Từ đó hệ số k có giá trị xấp xỉ đầu là:

$$k = \frac{\delta}{R} = \frac{0.5}{980} = 0.0005$$

Bộ giá trị xấp xỉ đầu của từng khâu tính được theo k là:

$$\delta_1 = 0.1709; \delta_2 = 0.1377; \delta_3 = 0.1505; \delta_4 = 0.0408$$

Kết quả chạy chương trình cho thấy trên hình 3:



Hình 3. Kết quả chạy chương trình xác định hệ số k

Sau khi được điều chỉnh tự động bởi chương trình tính do chúng tôi lập trình theo sơ đồ khối ở hình 1, các giá trị cuối cùng như thấy trên hình 2 bao gồm:

$$k = 0.00105; \delta d_1 = 0.35323; \delta a_2 = 0.28469; \delta d_4 = 0.31105; \delta d_6 = 0.08435$$

Thử nghiệm lắp lần 625 tổ hợp như hình 2 không có điểm rơi nào vượt ra ngoài mặt cầu mô tả chất lượng.

5. Kết luận

Kết hợp các yếu tố kinh tế và kỹ thuật khi mô hình hóa bài toán thiết kế cơ cấu robot là ý tưởng tốt để chỉ ra các phương án có lợi nhất. Chúng tôi đã chỉ ra cơ sở toán học của việc tỉ số k phải bằng nhau giữa các khâu trong cấu trúc để có giá thành nhỏ nhất. Chúng tôi cũng đã xây dựng một phương pháp số để giải quyết tính công nghệ trong thiết kế và chế tạo robot từ góc độ tính toán dung sai cơ cấu. Các khâu có tỉ số dung sai/ kích thước danh nghĩa giống nhau được nhận dạng nhanh chóng giúp cho quá trình thiết kế dễ dàng hơn rất nhiều. Việc vận dụng vào thực tiễn là hoàn toàn khả thi với sự trợ giúp của một chương trình máy tính như thấy ở đây.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] B. K. Rout and R. K. Mittal, "Optimal manipulator parameter tolerance selection using evolutionary optimization technique," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 21, pp. 509-524, 2008.
- [2] R. Weill and B. Shani, "Assessment of Accuracy of Robots in Relation with Geometrical Tolerances in Robot Links," *Ann. CIRP.*, vol. 40, pp. 395-399, 1991.
- [3] Y. H. Andrew Liou, P. P. Lin, R. R. Lindeke, and H. D. Chiang, "Tolerance specification of robot kinematic parameters using an experimental design technique-the Taguchi method," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 10, pp. 199-207, 1993.
- [4] M. Vukobratovic and B. Borovac, "Accuracy of the robot positioning and orientation assessed via its manufacturing tolerances," *Mech. Mach. Theory.*, vol. 30, pp. 11-32, 1995.
- [5] J. Kim, W. J. Song, and B. S. Kang, "Stochastic approach to kinematic reliability of open-loop mechanism with dimensional tolerance," *Appl. Math. Model.*, vol. 34, pp. 1225-1237, 2010.
- [6] S. D. Dao and K. Abhary, "Determination of the Significance of Tolerance Parameters on Robot Performance Using Taguchi's Tolerance Design Experiment," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 229-231, pp. 2100-2105, 2012.
- [7] S. -H. Kim, "The Optimal Tolerance Design for Kinematic Parameters of a Robot," *J. Des. Manuf. Autom.*, vol. 1, pp. 269-282, 2001.
- [8] Thang Nguyen Huu, Khanh Duong Quoc, "Manufacturing Cost of Robot Structures with Tolerance Calculated on the View of Kinetic Response and that of Technology," *Adv. Eng. Res. and Appl.*, vol. 104, pp. 462-470, 2019.
- [9] Shuping Ji and Xiaoli Li, "Tolerance synthesis using second-order fuzzy comprehensive evaluation and genetic algorithm," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 38, pp. 3471-3483, 2000.