



AN OPTIMIZATION ALGORITHM FOR EVALUATING CYLINDRICITY FROM MEASURED DATA POINTS

Nguyen Thanh Trung, Vu Toan Thang, Vu Tien Dung*

Hanoi University of Science and Technology, No 1 Dai Co Viet Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 22/06/2021

Revised: 29/08/2021

Accepted: 14/09/2021

Published online: 15/10/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.8.11>

* *Corresponding author*

Email: dung.vutien@hust.edu.vn; Tel: +84 983852603

Abstract. Cylindricity deviation is a composite error that plays an important role in evaluating the quality of mechanical parts. The assessment of cylindricity deviation is usually based on measuring point data determined by Coordinate Measuring Machine or 3D scanner, roundness measuring instrument. Presently, there are 4 algorithms used to calculate the cylindricity deviation: Least Square Cylinder (LSC), Minimum Circumscribed Cylinder (MCC), Maximum Inscribed Cylinder (MIC) and Minimum Zone Cylinder (MZC). This paper presents a method using the optimal algorithm to calculate the diameter, cylindricity deviation from measuring point data set and compares the results of all four methods above with these from Coordinate Measuring Machine (CMM) with a deviation not exceeding 0,8 μm .

Keywords: Cylindricity error, Coordinate measuring machine, Nelder-Mead algorithm



SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU GIẢI BÀI TOÁN ĐÁNH GIÁ SAI LỆCH ĐỘ TRỤ TỪ BỘ DỮ LIỆU ĐIỂM ĐO

Nguyễn Thành Trung, Vũ Toàn Thắng, Vũ Tiến Dũng*

Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, Số 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 22/06/2021

Ngày nhận bài sửa: 29/08/2021

Ngày chấp nhận đăng: 14/09/2021

Ngày xuất bản Online: 15/10/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.8.11>

* Tác giả liên hệ

Email: dung.vutien@hust.edu.vn; Tel: +84 983852603

Tóm tắt. Sai lệch độ trụ là sai số tổng hợp đóng vai trò quan trọng trong đánh giá chất lượng các chi tiết cơ khí. Việc đánh giá sai lệch độ trụ thường dựa trên dữ liệu điểm đo xác định bằng máy đo ba toạ độ hoặc các máy quét 3D, máy đo độ tròn. Hiện nay, có 4 thuật toán được sử dụng để tính sai lệch độ trụ: mặt trụ bình phương tối thiểu (Least Square Cylinder – LSC), mặt trụ ngoại tiếp nhỏ nhất (Minimum Circumscribed Cylinder – MCC), mặt trụ nội tiếp lớn nhất (Maximum Inscribed Cylinder – MIC) và mặt trụ miền tối thiểu (Minimum Zone Cylinder – MZC). Bài báo trình bày phương pháp sử dụng thuật toán tối ưu tính toán đường kính, sai lệch độ trụ từ bộ dữ liệu điểm đo và so sánh kết quả theo cả 4 phương pháp trên với kết quả của máy đo toạ độ (Coordinate Measuring Machine - CMM) với độ sai lệch không vượt quá $0,8 \mu\text{m}$.

Từ khóa: Sai lệch độ trụ, máy đo toạ độ, thuật toán Neader-Mead.

MCC phù hợp để sử dụng tính toán đường kính chi tiết trục và MIC phù hợp để đo chi tiết lỗ. Bài báo này ứng dụng phương pháp tối ưu để giải bài toán tổng quát tính toán độ trụ và đường kính của chi tiết cơ khí theo cả 4 phương pháp trên và so sánh kết quả giữa chúng.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC TÌM MẶT TRỤ THAM CHIỀU

Bài toán tìm mặt trụ tham chiếu trong không gian là xác định đường tâm Δ và bán kính R. Đường tâm được xác định đi qua 1 điểm $M(x_M, y_M, z_M)$ và có véc tơ chỉ phương $\vec{u}(a, b, c)$. Phương trình đường thẳng Δ trong không gian đi qua điểm M có véc tơ chỉ phương \vec{u} là:

$$\frac{x-x_M}{a} = \frac{y-y_M}{b} = \frac{z-z_M}{c} \quad (1)$$

Khoảng cách từ một điểm $P(x, y, z)$ đến đường tâm Δ là:

$$d(P, \Delta) = \frac{|\overrightarrow{PM} \wedge \vec{u}|}{|\vec{u}|} = \frac{\sqrt{\left| \begin{matrix} x-x_M & y-y_M \\ a & b \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} y-y_M & z-z_M \\ b & c \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} z-z_M & x-x_M \\ c & a \end{matrix} \right|^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (2)$$

Trong đó: Toán tử $\overrightarrow{PM} \wedge \vec{u}$: tích có hướng của hai véc tơ \overrightarrow{PM} và \vec{u} .

Toán tử $|\vec{u}|$: độ dài của véc tơ \vec{u} .

Phương trình mặt trụ trong không gian Oxyz có thể thể hiện như sau:

$$d(P, \Delta) = R \quad (3)$$

Với mỗi điểm đo $P_i(x_i, y_i, z_i)$, khoảng cách từ các điểm đo đến đường tâm trụ được xác định bằng:

$$R_i = d(P_i, \Delta) = \frac{\sqrt{\left| \begin{matrix} x_i-x_M & y_i-y_M \\ a & b \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} y_i-y_M & z_i-z_M \\ b & c \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} z_i-z_M & x_i-x_M \\ c & a \end{matrix} \right|^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (4)$$

Bài toán tìm mặt trụ tham chiếu trở thành bài toán xác định đường tâm và bán kính thông qua 7 biến x_M, y_M, z_M, a, b, c và bán kính R.

Quay trở lại giải bài toán tổng quát tìm sai lệch độ trụ và đường kính trụ có thể giải quyết thông qua việc giải các bài toán tối ưu hóa phi tuyến tính [9]. Trong việc giải bài toán tối ưu thì hàm mục tiêu và phương pháp giải tối ưu là hai yếu tố quan trọng nhất giúp tính toán kết quả chính xác và thời gian tính toán hội tụ nhanh. Kết quả được trình bày trong bài báo này sử dụng phương pháp tối ưu để giải bài toán phi tuyến tìm ra 7 biến trên và tính toán kết quả độ trụ của chi tiết từ bộ điểm đo. Tuy nhiên với mỗi phương pháp thì hàm mục tiêu sẽ khác nhau. Cụ thể như sau:

2.1. Phương pháp trụ miền tối thiểu MZC

Phương pháp MZC phải tìm ra 2 mặt trụ tham chiếu đồng tâm có bán kính lần lượt là R_{\max} và R_{\min} bao lấy toàn bộ điểm đo sao cho hiệu bán kính giữa chúng là nhỏ nhất, và do đó hàm mục tiêu sử dụng để tìm mặt trụ tham chiếu trong phương pháp này là :

$$F(x_M, y_M, z_M, a, b, c) = \text{Min}\{[R_i]_{\max} - [R_i]_{\min}\} \quad (5)$$

2.2. Phương pháp bình phương tối thiểu LSC

Với phương pháp LSC, hàm mục tiêu là tìm ra mặt trụ tham chiếu sao cho tổng bình phương khoảng cách từ các điểm đo đến mặt trụ tham chiếu đạt nhỏ nhất. Khoảng cách từ điểm đo đến mặt trụ bằng hiệu khoảng cách từ điểm đo đến đường tâm Δ trừ đi bán kính của trụ R_{LSC} :

$$d(P_i, \text{mặt trụ}) = |d(P_i, \Delta) - R_{LSC}| = |R_i - R_{LSC}| \quad (6)$$

Hàm mục tiêu sử dụng trong phương pháp LSC:

$$F(x_M, y_M, z_M, a, b, c, R_{LSC}) = \text{Min}\{\sum_{i=1}^n (R_i - R_{LSC})^2\} \quad (7)$$

2.3. Phương pháp mặt trụ ngoại tiếp nhỏ nhất MCC

Phương pháp này phải tìm ra mặt trụ bao lấy tất cả các điểm đo nhưng có bán kính nhỏ nhất, hàm mục tiêu của phương pháp MCC là:

$$F(x_M, y_M, z_M, a, b, c) = \text{Min}\{[R_i]_{\max}\} \quad (8)$$

2.4. Phương pháp mặt trụ nội tiếp lớn nhất MIC

Ngược lại với phương pháp MCC, phương pháp này tìm ra mặt trụ nội tiếp bên trong tất cả các điểm đo và có bán kính lớn nhất, do vậy hàm mục tiêu của phương pháp MIC là:

$$F(x_M, y_M, z_M, a, b, c) = \text{Max}\{[R_i]_{\min}\} \quad (9)$$

Để đồng bộ giữa các phương pháp và thuận tiện trong việc giải bài toán tối ưu. Do R_i là khoảng cách từ điểm đo đến đường tâm nên R_i luôn dương. Công thức số (9) chuyển thành tìm hàm mục tiêu:

$$F(x_M, y_M, z_M, a, b, c) = \text{Min}\{[-R_i]_{\min}\} \quad (10)$$

Trong bốn phương pháp thì riêng phương pháp LSC là giải bài toán tối ưu với 7 biến còn 3 phương pháp còn lại cần giải bài toán với 6 biến. Tuy nhiên hàm mục tiêu của các phương pháp khác nhau nên kết quả tính toán cũng khác nhau. Phương pháp giải bài toán tối ưu đa biến được trình bày ở mục 3 sau đây.

3. PHƯƠNG PHÁP GIẢI BÀI TOÁN TỐI ƯU PHI TUYẾN

Bài toán cần giải quyết là tìm giá trị nhỏ nhất của hàm mục tiêu đã trình bày trong mục 2. Có nhiều phương pháp giải bài toán tối ưu phi tuyến để tìm giá trị hàm tối thiểu ví dụ sử dụng thuật toán đơn hình Nelder-Mead (the Nelder-Mead simplex algorithm) [10], hay thuật toán rào cản Lagrangian chuyển đổi toàn cục (the globally convergent Lagrangian barrier algorithm) [11]... Trong bài báo đã kiểm nghiệm các phương pháp và cho kết quả tương đương, nên để đơn giản trong phân xử lý, bài báo sử dụng thuật toán đơn hình Nelder-Mead, thuật toán có thể được mô tả như sau: với cấu trúc $n + 1$ điểm cho véc tơ n chiều x . Thuật toán đầu tiên tạo một cấu trúc xung quanh dự đoán ban đầu x_0 bằng cách thêm 5% của mỗi thành phần $x_0(i)$ vào x_0 và sử dụng n vectơ này làm phần tử của cấu trúc ngoài x_0 . (Thuật toán sử

dụng 0,00025 làm thành phần i nếu $x_0(i) = 0$.) Sau đó, thuật toán sửa đổi cấu trúc lặp lại theo quy trình sau:

Bước 1: Gọi $x(i)$ biểu thị danh sách các điểm trong cấu trúc hiện tại, $i = 1, \dots, n + 1$.

Bước 2: Thứ tự các điểm trong cấu trúc từ giá trị hàm thấp nhất $f(x(1))$ đến cao nhất $f(x(n+1))$. Tại mỗi bước trong lần lặp, thuật toán loại bỏ điểm xấu nhất hiện tại $x(n+1)$ và chấp nhận một điểm khác vào cấu trúc. (Hoặc, trong trường hợp của bước 7 dưới đây, nó thay đổi tất cả n điểm có giá trị trên $f(x(1))$).

Bước 3: Tạo điểm phản chiếu (reflected point):

$$r = 2m - x(n + 1) \quad (11)$$

Trong đó: $m = \frac{\sum x(i)}{n}$, với $i = 1 \dots n$, sau đó tính $f(r)$.

Bước 4: Nếu $f(x(1)) \leq f(r) < f(x(n))$, chấp nhận r và kết thúc lặp này. “Chọn điểm Phản chiếu”.

Bước 5: Nếu $f(r) < f(x(1))$, hãy tính điểm mở rộng s (expanded point):

$$s = m + 2(m - x(n + 1)) \quad (12)$$

và tính $f(s)$.

- a. Nếu $f(s) < f(r)$, chấp nhận s và kết thúc quá trình lặp. “Chọn điểm mở rộng”.
- b. Nếu không, chấp nhận r và kết thúc lặp. “Chọn điểm phản chiếu”.

Bước 6: Nếu $f(r) \geq f(x(n))$, thực hiện co lại còn khoảng giữa m và $x(n + 1)$ hoặc r , tùy thuộc vào giá trị nào có giá trị hàm mục tiêu thấp hơn.

- a. Nếu $f(r) < f(x(n + 1))$ (nghĩa là r tốt hơn $x(n + 1)$), hãy tính:

$$c = m + (r - m)/2 \quad (13)$$

và tính $f(c)$. Nếu $f(c) < f(r)$, chấp nhận c và kết thúc lặp. “Chọn điểm thu hẹp ngoài”.

Nếu không, hãy tiếp tục với Bước 7 (bước thu hẹp).

- b. Nếu $f(r) \geq f(x(n + 1))$, hãy tính:

$$cc = m + (x(n + 1) - m)/2 \quad (14)$$

và tính $f(cc)$. Nếu $f(cc) < f(x(n + 1))$, chấp nhận cc và kết thúc lặp. “Chọn điểm thu hẹp trong”.

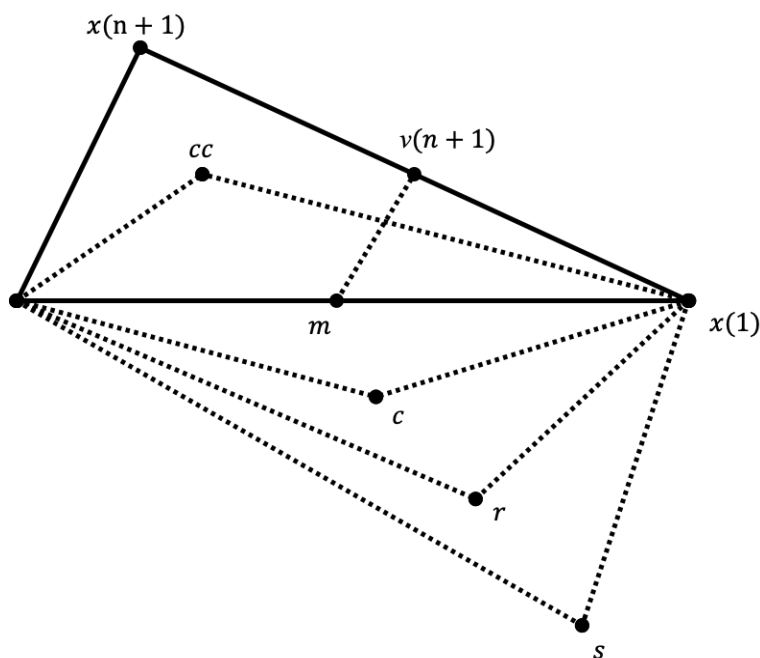
Nếu không, hãy tiếp tục với Bước 7 (bước thu hẹp).

Bước 7: Tính n điểm nội suy:

$$v(i) = x(1) + (x(i) - x(1))/2 \quad (15)$$

và tính $f(v(i))$, $i = 2, \dots, n + 1$. Cấu trúc ở lần lặp tiếp theo là $x(1), v(2), \dots, v(n + 1)$. “khoảng thu hẹp”.

Hình 3 biểu diễn các điểm mà phương pháp có thể tính toán trong quy trình, cùng với mỗi cấu trúc mới có thể có. Cấu trúc ban đầu có một đường viền đậm. Các bước lặp lại tiếp tục cho đến khi chúng đáp ứng tiêu chí dừng.



Hình 3. Các điểm tính toán trong quá trình lặp tìm điểm cực tiểu.

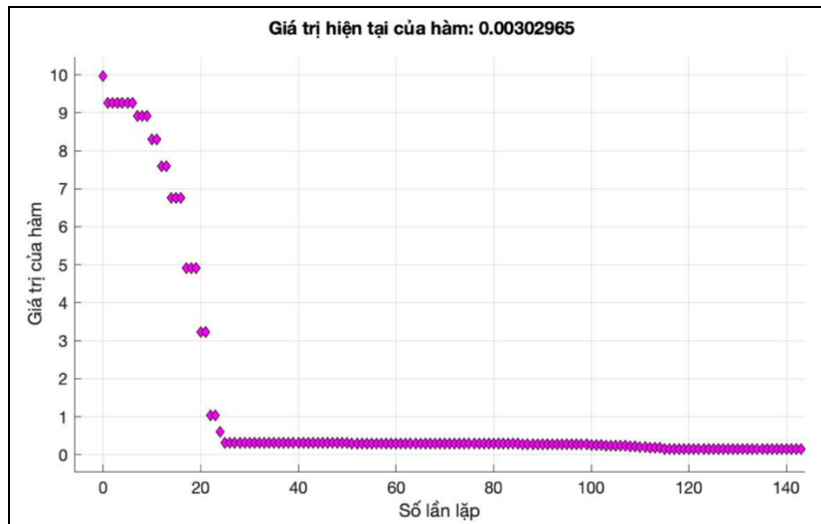
Mở rộng phương pháp trên cho bài toán nhiều biến, chúng tôi đã áp dụng bài toán tối ưu tìm điểm cực tiểu của hàm số 7 biến để tính toán độ trụ tổng quát với bộ dữ liệu điểm đo ứng hàm mục tiêu của từng phương pháp được giới thiệu tại mục 2.

Trong nghiên cứu này sử dụng thuật toán Nelder-Mead trên ngôn ngữ lập trình MATLAB. Các hàm mục tiêu và hàm tính toán được xây dựng kết hợp với 1 số hàm có sẵn trong công cụ tối ưu (MATLAB optimization toolbox) để xử lý kết quả bài toán tìm độ trụ tổng quát.

Thuật toán sẽ dừng nếu đáp ứng một trong các điều kiện sau:

- Số lần lặp đạt tối đa;
- Số lượng hàm đánh giá đạt tối đa;
- Độ thay đổi của các biến giữa hai lần lặp liên tiếp nhỏ hơn giá trị đặt trước;
- Độ thay đổi của giá trị hàm mục tiêu giữa hai lần lặp liên tiếp nhỏ hơn giá trị đặt trước;

Hình 4 biểu diễn quá trình thay đổi giá trị của hàm mục tiêu theo phương pháp bình phương tối thiểu (LSC).



Hình 4. Giá trị của hàm thay đổi về cực tiểu trong quá trình lặp.

Ứng với mỗi vòng lặp, khi số lần lặp tăng lên thì số lượng hàm đánh giá tăng, dẫn đến thời gian tính toán sẽ tăng. Để giảm thời gian tính toán, chúng tôi tiến hành nhiều vòng lặp trong đó những vòng đầu sẽ tìm giá trị thô với điều kiện dừng lặp ở mức thấp, vòng lặp sau thì điều kiện dừng lặp sẽ được nâng cao hơn để tăng độ chính xác kết quả. Việc sử dụng nhiều vòng lặp với các điều kiện dừng tăng dần sẽ giảm thời gian tính toán đi rất nhiều so với sử dụng một vòng lặp duy nhất với điều kiện dừng tương đương với vòng lặp cuối của phương án sử dụng nhiều vòng lặp mà kết quả tương đương. Trong những kết quả trình bày ở đây, bài báo sử dụng 3 vòng lặp với điều kiện dừng tăng dần như sau:

- Số lần lặp mỗi vòng lặp tối đa là 1000.
- Số lượng hàm đánh giá tối đa là 1000.
- Độ thay đổi giá trị biến giữa các lần lặp liên tiếp với vòng 1 nhỏ hơn 10^{-2} mm, vòng 2 nhỏ hơn 10^{-4} mm, và với vòng 3 nhỏ hơn 10^{-6} mm.
- Độ thay đổi giá trị hàm giữa các lần lặp liên tiếp cũng được chọn giống độ thay đổi của biến cụ thể với vòng 1 nhỏ hơn 10^{-2} mm, vòng 2 nhỏ hơn 10^{-4} mm, và với vòng 3 nhỏ hơn 10^{-6} mm.

Với điều kiện dừng như trên, thuật toán tối ưu tính toán ra kết quả trong khoảng từ 10 đến 20s và đạt độ chính xác tương đương với máy đo tọa độ. Để tăng độ chính xác của kết quả tính toán ta có thể tăng số vòng lặp, hay trong mỗi vòng lặp tăng số lần lặp và số lượng hàm đánh giá tối đa cũng như giảm độ thay đổi của hàm và biến giữa các lần lặp liên tiếp. Tuy nhiên thời gian tính toán sẽ tăng. Trong nghiên cứu này lựa chọn các thông số dừng để kết quả tính toán tương đương với kết quả từ máy đo tọa độ.

4. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

Để đánh giá thuật toán, một chi tiết lỗ chuẩn Mitutoyo 177-146 được sử dụng để đo độ trụ trên máy đo 3 tọa độ Mitutoyo Crysta Apex S544 (hình 5) có sai số cho phép lớn nhất $E_{0,MPE} = 2,2 + 4L/1000 \mu\text{m}$ đặt tại phòng thí nghiệm Hệ thống Đo lường nhà C5 phòng 213 trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.



Hình 5. Chi tiết lỗ chuẩn được đo trên máy đo tọa độ Apex S544 hãng Mitutoyo.

Cụm đầu đo bao gồm 3 mô đun: mô đun đầu đo (probe head) MH20i có góc xoay $A = 0 \div 90^\circ$ và $B = \pm 180^\circ$, mô đun dò chạm – cảm ứng (touch – trigger) TP20 STD của hãng Renishaw, và kim dò K651260 (chiều dài 27,5mm, đường kính đầu dò 3 mm). Để đo đường kính và độ trụ của chi tiết đo, trước hết chọn 3 mô đun của cụm đầu đo lần lượt là MH20i, TP20 STD, K651260. Tiếp theo, đầu đo được hiệu chuẩn với góc $A = 0^\circ$, $B = 0^\circ$ với quả cầu chuẩn của Mitutoyo (đường kính 19,97523 mm). Sau đó, đầu đo được dẫn động bán tự động đến n điểm đo (100 điểm đo) và dữ liệu tọa độ x, y, z của các điểm đo được xuất ra tệp văn bản (text file) như thể hiện ở bảng 2. Từ bộ dữ liệu này, độ trụ và đường kính của chi tiết được tính theo cả 4 phương pháp đã trình bày ở mục 2 và 3.

Bảng 1. Kết quả độ trụ theo 4 phương pháp LSC, MCC, MIC, MZC so sánh với kết quả trên máy đo tọa độ.

Phương pháp	Kết quả bằng phương pháp tối ưu				Kết quả trên máy đo tọa độ.
	LSC	MIC	MCC	MZC	MZC
Độ trụ (mm)	0,0049	0,0053	0,0048	0,0044	0,0044
Đường kính mặt trụ tham chiếu. (mm)	50,0009	49,9974	50,0058	50,0015	50,0015

Bảng 2. Tọa độ x, y, z của 100 điểm đo trên bề mặt chi tiết Lỗ chuẩn Mitutoyo 177-146

1; X: 25,0038; Y: -0,0223; Z: 3,9867	35; X: -10,6782; Y: 22,5949; Z: 7,9880	68; X: -20,2287; Y: -14,6990; Z: 11,9861
2; X: 24,2237; Y: 6,1891; Z: 3,9885	36; X: -15,9662; Y: 19,2256; Z: 7,9875	69; X: -15,9464; Y: -19,2635; Z: 11,9863
3; X: 21,9134; Y: 12,0335; Z: 3,9889	37; X: -20,2499; Y: 14,6527; Z: 7,9877	70; X: -10,6593; Y: -22,6239; Z: 11,9861
4; X: 18,2217; Y: 17,1125; Z: 3,9890	38; X: -23,2589; Y: 9,1584; Z: 7,9872	71; X: -4,7065; Y: -24,5654; Z: 11,9862
5; X: 13,3767; Y: 21,1108; Z: 3,9887	39; X: -24,8054; Y: 3,0950; Z: 7,9873	72; X: 1,5373; Y: -24,9659; Z: 11,9866
6; X: 7,6942; Y: 23,7785; Z: 3,9888	40; X: -24,8002; Y: -3,1535; Z: 7,9871	73; X: 7,6900; Y: -23,8003; Z: 11,9860
7; X: 1,5275; Y: 24,9432; Z: 3,9885	41; X: -23,2413; Y: -9,2148; Z: 7,9869	74; X: 13,3719; Y: -21,1358; Z: 11,9867
8; X: -4,7233; Y: 24,5393; Z: 3,9882	42; X: -20,2273; Y: -14,6989; Z: 7,9867	75; X: 18,2039; Y: -17,1465; Z: 11,9864
9; X: -10,6780; Y: 22,5941; Z: 3,9879	43; X: -15,9468; Y: -19,2623; Z: 7,9865	76; X: 18,2025; Y: -17,1485; Z: 15,9893
10; X: -15,9675; Y: 19,2256; Z: 3,9880	44; X: -10,6597; Y: -22,6234; Z: 7,9867	77; X: 21,8956; Y: -12,0775; Z: 15,9865
11; X: -20,2496; Y: 14,6516; Z: 3,9877	45; X: -4,7062; Y: -24,5652; Z: 7,9866	78; X: 24,2090; Y: -6,2492; Z: 15,9867
12; X: -23,2590; Y: 9,1592; Z: 3,9881	46; X: 1,5377; Y: -24,9653; Z: 7,9868	79; X: 25,0006; Y: -0,0295; Z: 15,9868
13; X: -24,8057; Y: 3,0944; Z: 3,9878	47; X: 7,6892; Y: -23,8004; Z: 7,9868	80; X: 24,2189; Y: 6,1889; Z: 15,9874
14; X: -24,7991; Y: -3,1533; Z: 3,9873	48; X: 13,3707; Y: -21,1359; Z: 7,9869	81; X: 21,9101; Y: 12,0323; Z: 15,9873
15; X: -23,2398; Y: -9,2151; Z: 3,9871	49; X: 18,2038; Y: -17,1467; Z: 7,9873	82; X: 18,2179; Y: 17,1094; Z: 15,9876
16; X: -20,2271; Y: -14,6984; Z: 3,9869	50; X: 21,8961; Y: -12,0777; Z: 7,9868	83; X: 13,3764; Y: 21,1074; Z: 15,9875
17; X: -15,9446; Y: -19,2614; Z: 3,9871	51; X: 21,8960; Y: -12,0769; Z: 11,9906	84; X: 7,6933; Y: 23,7749; Z: 15,9874
18; X: -10,6593; Y: -22,6224; Z: 3,9870	52; X: 24,2098; Y: -6,2484; Z: 11,9870	85; X: 1,5277; Y: 24,9409; Z: 15,9871
19; X: -4,7060; Y: -24,5627; Z: 3,9873	53; X: 25,0013; Y: -0,0300; Z: 11,9873	86; X: -4,7227; Y: 24,5379; Z: 15,9870
20; X: 1,5367; Y: -24,9652; Z: 3,9871	54; X: 24,2207; Y: 6,1889; Z: 11,9874	87; X: -10,6770; Y: 22,5946; Z: 15,9869
21; X: 7,6887; Y: -23,7995; Z: 3,9873	55; X: 21,9112; Y: 12,0333; Z: 11,9875	88; X: -15,9665; Y: 19,2258; Z: 15,9864
22; X: 13,3698; Y: -21,1365; Z: 3,9876	56; X: 18,2177; Y: 17,1109; Z: 11,9876	89; X: -20,2499; Y: 14,6523; Z: 15,9862
23; X: 18,2034; Y: -17,1474; Z: 3,9878	57; X: 13,3769; Y: 21,1079; Z: 11,9874	90; X: -23,2594; Y: 9,1591; Z: 15,9861
24; X: 21,8965; Y: -12,0771; Z: 3,9882	58; X: 7,6939; Y: 23,7754; Z: 11,9875	91; X: -24,8061; Y: 3,0925; Z: 15,9857
25; X: 24,2108; Y: -6,2501; Z: 3,9879	59; X: 1,5272; Y: 24,9426; Z: 11,9878	92; X: -24,8012; Y: -3,1526; Z: 15,9858
26; X: 24,2108; Y: -6,2480; Z: 7,9903	60; X: -4,7229; Y: 24,5393; Z: 11,9874	93; X: -23,2425; Y: -9,2154; Z: 15,9858
27; X: 25,0026; Y: -0,0305; Z: 7,9877	61; X: -10,6769; Y: 22,5943; Z: 11,9873	94; X: -20,2292; Y: -14,7001; Z: 15,9855
28; X: 24,2215; Y: 6,1894; Z: 7,9879	62; X: -15,9660; Y: 19,2254; Z: 11,9871	95; X: -15,9474; Y: -19,2645; Z: 15,9851
29; X: 21,9132; Y: 12,0326; Z: 7,9881	63; X: -20,2495; Y: 14,6526; Z: 11,9874	96; X: -10,6605; Y: -22,6250; Z: 15,9856
30; X: 18,2209; Y: 17,1118; Z: 7,9881	64; X: -23,2590; Y: 9,1586; Z: 11,9869	97; X: -4,7068; Y: -24,5669; Z: 15,9856
31; X: 13,3775; Y: 21,1101; Z: 7,9880	65; X: -24,8061; Y: 3,0949; Z: 11,9867	98; X: 1,5376; Y: -24,9668; Z: 15,9859
32; X: 7,6944; Y: 23,7767; Z: 7,9883	66; X: -24,8003; Y: -3,1538; Z: 11,9864	99; X: 7,6904; Y: -23,8006; Z: 15,9859
33; X: 1,5283; Y: 24,9423; Z: 7,9879	67; X: -23,2412; Y: -9,2157; Z: 11,9864	100; X: 13,3701; Y: -21,1353; Z: 15,9860
34; X: -4,7230; Y: 24,5394; Z: 7,9882		

Để kiểm tra tính ổn định của thuật toán và so sánh với kết quả của máy đo tọa độ 8 bộ dữ liệu 100 điểm đo tiếp tục được lấy và xử lý kết quả trong bảng 3:

Bảng 3. Kết quả tính độ trụ của 8 bộ dữ liệu theo 4 phương pháp LSC, MCC, MIC, MZC

Bộ dữ liệu thứ	Độ trụ và đường kính tính theo phương pháp tối ưu (mm)				Độ trụ (phương pháp sử dụng) và đường kính tính toán được từ máy đo toạ độ
	LSC	MIC	MCC	MZC	
1	0,0132	0,0117	0,0127	0,0115	0,0133 (LSC)
	49,9997	49,9869	50,0064	49,9975	50,0000
2	0,0099	0,0086	0,0099	0,0085	0,0097 (MCC)
	50,0007	49,9940	50,0065	50,0022	50,0070
3	0,0098	0,0091	0,0098	0,0089	0,0093 (MIC)
	50,0007	49,9928	50,0060	50,0015	49,9920
4	0,0106	0,0102	0,0110	0,0095	0,0090 (MZC)
	50,0005	49,9915	50,0061	50,0009	50,0010
5	0,0103	0,0099	0,0100	0,0089	0,0087 (MZC)
	50,0008	49,9927	50,0064	50,0011	50,0010
6	0,0097	0,0083	0,0091	0,0077	0,0091 (MIC)
	50,0006	49,9936	50,0067	50,0012	49,9936
7	0,0051	0,0050	0,0050	0,0047	0,0049 (MCC)
	50,0011	49,9971	50,0053	50,0014	50,0053
8	0,0051	0,0060	0,0053	0,0044	0,0051 (LSC)
	50,0009	49,9971	50,0056	50,0015	50,0009

Nhìn vào kết quả độ trụ ở bảng 1 và 3 cho thấy kết quả tính toán theo phương pháp tối ưu và kết quả từ máy đo toạ độ cùng sử dụng chung phương pháp tính độ trụ có độ tương đồng. Trong các phương pháp tính độ trụ thì MZC luôn luôn có giá trị nhỏ hơn 3 phương pháp còn lại, bởi vì hàm mục tiêu của phương pháp này là tìm giá trị nhỏ nhất của hiệu bán kính ($[R_i]_{max} - [R_i]_{min}$) và là phù hợp nhất với định nghĩa của ISO về độ trụ. LSC là phương pháp có hiệu năng tính toán cao nhất nên rất phù hợp với bộ dữ liệu điểm lớn để áp dụng trong các máy quét 3D mà sai lệch kết quả không quá lớn so với MZC (lớn nhất là 2 μm đối với bộ dữ liệu điểm 6 ở bảng 3). Còn phương pháp MIC là cố gắng tìm ra mặt trụ nội tiếp bên trong tất cả các điểm đo nên tính ra đường kính phù hợp cho các chi tiết lỗ, ngược lại, mục đích của MCC là tìm ra mặt trụ bao ngoài lấy tất cả các điểm đo nên đường kính danh nghĩa của trụ tính được phù hợp với các chi tiết trục. Ngoài ra các kết quả độ trụ tính theo phương pháp tối ưu hoàn toàn phù hợp với kết quả trên máy đo thương mại Mitutoyo Crysta Apex S544 với sai lệch lớn nhất là 0.8 μm ở bộ dữ liệu 6 phương pháp MIC. Điều này mở ra hướng

ứng dụng phương pháp xử lý số liệu cho các thiết bị đo độ tròn, đo tọa độ của các công ty của Việt Nam.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng được phương pháp tính toán độ trụ và đường kính mặt trụ tham chiếu với bộ dữ liệu điểm đo trong hệ tọa độ ba chiều. Phương pháp này giải được bài toán tính tổng quát cao áp dụng được với bộ dữ liệu điểm đo lớn với trụ có đường tâm của mặt trụ tham chiếu ở bất kỳ vị trí nào trong không gian. Cả bốn phương pháp tính toán độ trụ bao gồm: LSC, MIC, MCC, và MZC đều được đề cập và xử lý tính toán cũng như so sánh với kết quả của máy đo tọa độ thương mại Mitutoyo với độ sai lệch lớn nhất 0,8 μm . Kết quả bài báo có thể áp dụng để đo độ trụ cho các thiết bị quét 3D với đầu ra là dữ liệu đám mây điểm và các phương pháp tiếp xúc và không tiếp xúc khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Zhang, X, Wang, X, Wang, D, Wang, X, Yao, Z, Xi, L, Methodology to Improve the Cylindricity of Engine Cylinder Bore by Honing, Proceedings of the ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2016), 1: Processing (2016). <https://doi.org/10.1115/MSEC2016-8709>
- [2]. Y. Shao, Y. Yin, S. Du, T. Xia, L. Xi, Leakage Monitoring in Static Sealing Interface Based on Three-Dimensional Surface Topography Indicator, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 140 (2018) 101003. <https://doi.org/10.1115/1.4040620>
- [3]. ISO 12180-1:2011 Geometrical product specifications (GPS) - Cylindricity - Part 1: Vocabulary and parameters of cylindrical form. <<https://www.iso.org/standard/53611.html>>, 2011.
- [4]. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 7294-2:2003 Dung sai chung – Phần 2: Dung sai hình học của các chi tiết không có chỉ dẫn dung sai riêng. <<https://vanbanphapluat.co/tcvn-7294-2-2003-dung-sai-chung-phan-2-dung-sai-hinh-hoc-chi-tiet-khong-chi-dan>>, 2003.
- [5]. Nguyễn Tiên Thọ, Kỹ thuật đo lường kiểm tra trong chế tạo cơ khí, Lần thứ 3, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2007, 18-101.
- [6]. P. Zheng, D. Liu, F. Zhao, L. Zhang, An efficient method for minimum zone cylindricity error evaluation using kinematic geometry optimization algorithm, Measurement, 135 (2019) 886-895. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.046>
- [7]. W. Liu, X. Zhou, H. Li, S. Liu, J. Fu, An algorithm for evaluating cylindricity according to the minimum condition, Measurement, 158 (2020) 107698. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107698>
- [8]. Q. Chen, X. Tao, J. Lu, X. Wang, Cylindricity Error Measuring and Evaluating for Engine Cylinder Bore in Manufacturing Procedure, Advances in Materials Science and Engineering, 2016 (2016) 4212905. <https://doi.org/10.1155/2016/4212905>
- [9]. W. Sui, D. Zhang, Four Methods for Roundness Evaluation, Physics Procedia, 24 Part C (2012) 2159-2164. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.317>
- [10]. J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, P. E. Wright, Convergence Properties of the Nelder--Mead Simplex Method in Low Dimensions, SIAM Journal on Optimization, 9 (1998) 112-147. <https://doi.org/10.1137/S1052623496303470>
- [11]. A. R. Conn, N. Gould, Ph. L. Toint, A Globally Convergent Lagrangian Barrier Algorithm for Optimization with General Inequality Constraints and Simple Bounds. Mathematics of Computation, 66 (1997) 261-288. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-97-00777-1>