



EVALUATING UNCERTAINTY OF SURFACE MEASUREMENT SYSTEM BY LASER SCAN MICROMETER METHOD

Le Xuan Cam^{1,2}, Nguyen Van Vinh¹, Hoang Hong Hai¹, Nguyen Thi Kim Cuc^{1*}

¹Ha Noi University of Science and Technology, No. 1 Đại Co Viet street, Hai Ba Trung District, Ha Noi, Viet Nam

²Institute of Technology/ General Department of Defence Industry, Duc Thang Ward, Bac Tu Liem District, Ha Noi City

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 24/07/2021

Revised: 03/10/2021

Accepted: 14/10/2021

Published online: 15/10/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.9.9>

* *Corresponding author*

Email: cuc.nguyenthikim@hust.edu.vn; Tel: +84 966078567

Abstract. The use of three-dimensional (3D) data in the field of industrial metrology has become increasingly popular due to the rapid development of laser scanning techniques. However, the accuracy and uncertainty of these types of measurement methods are rarely investigated. In this study, an uncertainty evaluation and presentation model for the measurement of cylindrical deviations of standard cylindrical parts was proposed using the Laser Scan Micrometer (LSM) measuring system. Experiments were performed using the inverse method to measure the cylindricity in the laboratory with two component deviations in the cross section and in the axial section. Experimental results of the cylinder deviation measurement by laser scanning method to measure the profile of the standard cylindrical parts with the uncertainty of measuring the profile cross section of $1.68 \mu\text{m}$ and the axial section of $6 \mu\text{m}$ with a reliable probability 95%.

Keywords: 3D measurement, measurement uncertainty, cylinder deviation, reverse solution.



ĐÁNH GIÁ ĐỘ KHÔNG ĐẢM BẢO ĐO TRONG PHÉP ĐO ĐỘ TRỤ CHI TIẾT TRÒN XOAY BẰNG PHƯƠNG PHÁP QUÉT LASER

Lê Xuân Cam^{1,2}, Nguyễn Văn Vinh¹, Hoàng Hồng Hải¹, Nguyễn Thị Kim Cúc^{1*}

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

²Viện Công nghệ/ Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng, Phường Đức Thắng - Quận Bắc Từ Liêm - TP Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 24/07/2021

Ngày nhận bài sửa: 03/10/2021

Ngày chấp nhận đăng: 14/12/2021

Ngày xuất bản Online: 15/12/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.9.9>

* Tác giả liên hệ

Email: cuc.nguyenthikim@hust.edu.vn; Tel: +84 966078567

Tóm tắt. Việc sử dụng dữ liệu ba chiều (3D) trong lĩnh vực đo lường công nghiệp ngày càng trở nên phổ biến do sự phát triển nhanh chóng của kỹ thuật quét laser. Tuy nhiên, độ chính xác và độ không đảm bảo đo của các loại phương pháp này chưa được nghiên cứu nhiều. Trong nghiên cứu này, một mô hình đánh giá và trình bày độ không đảm bảo đo cho phép đo sai lệch độ trụ của các chi tiết tròn xoay đã được đề xuất và áp dụng cho thiết bị đo biên dạng chi tiết tròn xoay sử dụng hệ thống đo Laser scan micrometer (LSM). Các thí nghiệm đã được thực hiện bằng cách sử dụng phương pháp đảo ngược để đo sai lệch độ trụ trong phòng thí nghiệm với hai sai lệch thành phần theo mặt cắt ngang và mặt cắt dọc trục. Kết quả thực nghiệm phép đo độ trụ bằng phương pháp quét laser đo biên dạng chi tiết tròn xoay chế tạo có độ không đảm bảo đo mặt cắt ngang trục là 1,68 μm và dọc trục là 6 μm với xác suất tin cậy 95%.

Từ khóa: Đo lường 3D, độ không đảm bảo đo, sai lệch độ trụ, giải pháp đảo ngược.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kỹ thuật quét laser 3D đã được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực đo lường. Việc quét một đối tượng từ khoảng cách xa tạo điều kiện thuận lợi cho việc thu nhận biên dạng của đối tượng dưới dạng dữ liệu 3D, cụ thể là đám mây điểm [1-4]. Vì vậy, việc sử dụng các thiết bị đo lường dựa trên laser là một giải pháp tốt vì chúng là các hệ thống không tiếp xúc rất hiệu quả để tái tạo 3D [5-6]. Tuy nhiên, dữ liệu đám mây điểm không tránh khỏi sai số do các yếu tố liên quan đến môi trường bên ngoài và chính hệ thống đo lường [7-8]

Có nhiều nguyên nhân trong gia công dẫn đến sai số biên dạng như: sai số truyền chuyển động của máy công cụ; biến dạng do tác động nhiệt độ, áp suất hoặc ứng suất; do mòn dao và rung động trong quá trình gia công, ... Việc xác định các sai số biên dạng là rất quan trọng quyết định việc điều chỉnh công nghệ gia công nhằm đáp ứng chất lượng các sản phẩm đầu ra [9-10]. Đặc biệt với các chi tiết vũ khí, đạn dược, khí tài, tên lửa, ... biên dạng ảnh hưởng rất lớn tới tính năng hoạt động của nó trong chiến đấu.

Phép đo độ tròn có thể được áp dụng để kiểm soát chất lượng của các chi tiết tròn xoay nếu giả định rằng sai số độ thẳng của chi tiết là tương đối nhỏ so với sai số độ tròn của một mặt cắt ngang bất kỳ của chi tiết. Các phép đo độ tròn cũng đủ khi giả định rằng biên dạng độ tròn ở tất cả các mặt cắt ngang của trục rất giống nhau. Nếu không, cần tiến hành đo độ cong trục để xác định các lỗi biên dạng trên toàn bộ chi tiết được khảo sát. Phép đo độ tròn và phép đo biên dạng dọc trục dễ thực hiện và dễ phân tích hơn bởi vì nó là một bài toán đo lường hai chiều, trong khi độ lệch hình trụ phải được phân tích một cách tương đối trong một không gian ba chiều [11-12].

Độ không đảm bảo đo (ĐKĐBĐ) trong kết quả đo thường gồm các thành phần khác nhau có thể được nhóm thành hai loại theo cách các trị số của chúng được ước lượng [13]. Độ không đảm bảo chuẩn chia làm hai loại:

Thành phần loại A được đánh giá bằng các phương pháp thống kê và được đặc trưng bởi phương sai ước lượng (hoặc "độ lệch chuẩn" ước lượng) và số bậc tự do.

Thành phần loại B được đánh giá bằng các công cụ khác và được đặc trưng bởi các đại lượng u_j^2 , có thể được coi là xấp xỉ với phương sai tương ứng, giả định là tồn tại. Các đại lượng u_j^2 có thể được xử lý giống như phương sai và đại lượng u_j giống như độ lệch chuẩn.

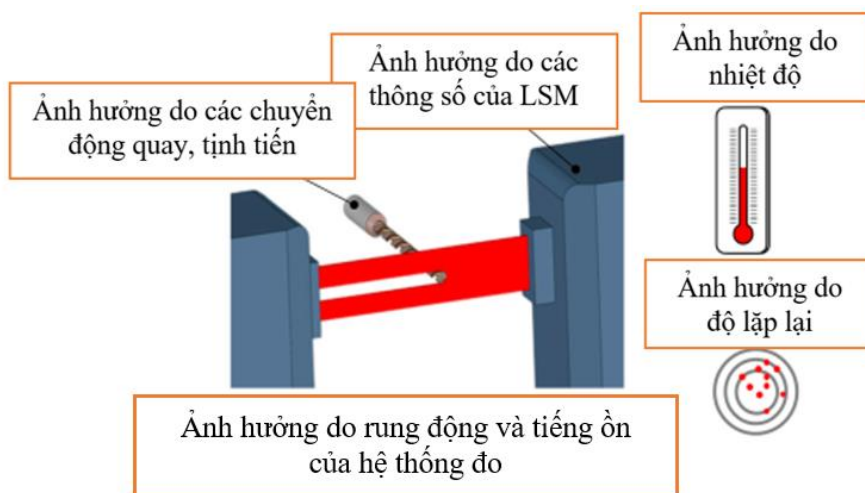
Trong bài báo này, để đánh giá độ tin cậy của phương pháp đo biên dạng trụ chi tiết tròn xoay sử dụng quét laser và giải pháp đảo ngược đề xuất cần tính toán ĐKĐBĐ của phương pháp. ĐKĐBĐ được trình bày theo Tiêu chuẩn TCVN 9595-3 : 2013 (ISO/IEC GUIDE 98-3:2008) [14-15]. Kết quả đo sau hiệu chỉnh đối với các ảnh hưởng hệ thống được thừa nhận vẫn chỉ là ước lượng giá trị của đại lượng đo vì độ không đảm bảo xuất hiện từ các ảnh hưởng ngẫu nhiên và từ sự hiệu chỉnh kết quả không hoàn chỉnh đối với ảnh hưởng hệ thống.

2. PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ ĐỘ KHÔNG ĐẢM BẢO ĐO

Phép đo biên dạng chi tiết tròn xoay sử dụng quét laser và giải pháp đảo ngược đề xuất được sử dụng nhằm nâng cao độ chính xác của phương pháp đo. Giải pháp đảo ngược trong phép đo độ trụ được thực hiện bằng cách sử dụng 2 tín hiệu đầu đo trên và đầu đo dưới đối xứng của cảm biến LSM. Giải pháp đảo ngược nhằm khử sai lệch tâm tại từng điểm đo. Khi chi tiết quay kết quả đo thu được từ đầu đo trên (đầu đo dưới) sẽ bao gồm biên dạng chi tiết và độ lệch tâm. Khi chi tiết đảo ngược (Quay 180°) thì kết quả đo của đầu đo dưới (đầu đo

trên) đồng thời phản ánh giá trị đo biên dạng và độ lệch tâm nhưng ngược dấu. Do đó, kết hợp hai bộ dữ liệu đo này ta xác định được biên dạng chi tiết và loại bỏ được độ lệch tâm tại từng vị trí góc quay.

Để đánh giá độ tin cậy của phép đo biên dạng chi tiết tròn cần tính toán ĐKĐBĐ của phương pháp. Trước tiên, cần nhận biết các yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác của phép đo đang được xem xét sau đó ĐKĐBĐ của các yếu tố này sẽ được ước tính và trình bày.



Hình 1. Các yếu tố ảnh hưởng đến độ không đảm bảo đo.

Hình 1 trình bày sơ đồ đo với các yếu tố ảnh hưởng đến phép đo độ trụ. Chi tiết đo được đặt trong vùng đo và vừa quay tròn vừa tịnh tiến. Tia laser được điều chế thành chùm tia dạng phẳng nhờ một gương đa giác quay. Đường kính của chi tiết đo tỷ lệ với thời gian chùm tia bị che khuất. Các yếu tố chính ảnh hưởng đến ĐKĐBĐ khi đo biên dạng chi tiết tròn xoay như Hình 1 bao gồm:

- Ảnh hưởng do các thông số của cảm biến đo Laser scan micrometer (Loại B).
- Ảnh hưởng do các chuyển động quay (Encoder), tịnh tiến của chi tiết đo (Thước quang) (Loại B).
- Ảnh hưởng do nhiệt độ, độ ẩm, rung động và tiếng ồn môi trường (Loại B).
- Ảnh hưởng do độ lặp lại giá trị đọc (Loại A).

Để đánh giá ĐKĐBĐ biên dạng toàn bộ chi tiết tròn xoay, ta xét ĐKĐBĐ biên dạng theo hai phương: phương ngang trục và phương dọc trục.

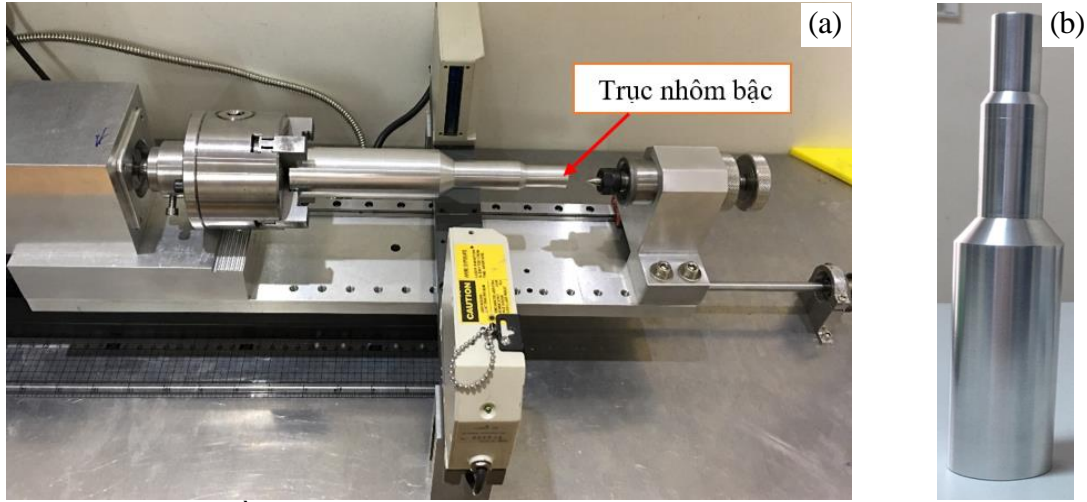
2.1. ĐKĐBĐ biên dạng theo phương ngang trục

Các yếu tố ảnh hưởng đến sai số đo biên dạng theo phương ngang trục được xác định thông qua sai số loại A và loại B.

Thiết bị và điều kiện thí nghiệm: Thiết bị thực nghiệm đo biên dạng chi tiết tròn xoay sử dụng quét laser gồm các bộ phận chính như cụm chuyển động quay, cụm chuyển động tịnh tiến, bộ hiển thị tọa độ, hộp điều khiển, cảm biến đo góc quay và dịch chuyển dọc trục (Hình 2 a). Thiết bị thực nghiệm sử dụng cảm biến đo quét laser LSM của hãng Keyence - Nhật Bản có model LS-5041T/R với bộ điều khiển LS-5001 với độ phân giải: $0,05 \mu\text{m}$, độ lặp lại $\pm 0,3 \mu\text{m}$, độ chính xác: $\pm 2 \mu\text{m}$. Cảm biến LSM có tốc độ và vận tốc quét cố định: 1200 lần quét/giây và vận tốc quét laser: 121 m/giây. Thiết bị sử dụng cảm biến đo góc S48-8-6000 VL và thước quang đo dịch chuyển dọc trục JCXE0.2-B/400 của chi tiết đo. Thiết bị và mẫu đo

được đặt trong phòng thí nghiệm trước 3h nhằm ổn định và đồng đều nhiệt độ, được vệ sinh sạch bằng dung môi, khăn sạch để đảm bảo các kết quả đo không bị ảnh hưởng bởi bụi bẩn. Cảm biến LSM được bật trước 15 phút khi thực hiện mỗi phép đo để đảm bảo ổn định nguồn laser, động cơ quay gương đa giác.

Thí nghiệm được tiến hành ở điều kiện phòng chuẩn (Nhiệt độ 20 ± 5 °C, độ ẩm 60 ± 10 %RH). Xét thí nghiệm đo biên dạng trục nhôm bậc trên mặt cắt ngang như thể hiện trong



Hình 2. Sơ đồ đo biên dạng trục nhôm bậc trên máy 3D-LSM-01(a), Trục nhôm bậc (b).

hình 2b.

a. Tính toán ĐKĐBĐ loại B:

Sai số loại B bao gồm: Sai số do đầu đo trên và đầu đo dưới của cảm biến LSM; Sai số do các yếu tố môi trường: Nhiệt độ, độ ẩm, rung động, độ ồn; Sai số do chuyển động quay chi tiết.

ĐKĐBĐ loại B được xác định như sau:

$$u_B = \sqrt{\frac{u_{daudo}^2}{2} + u_{gocquay}^2 + u_{moitruong}^2} \quad (1)$$

Trong đó:

- ĐKĐBĐ của đầu đo u_{daudo} bao gồm ĐKĐBĐ của đầu đo trên $T_{dege}(z,\theta)$ và dưới $B_{dege}(z,\theta)$ được xác định với u_{LSM} là ĐKĐBĐ do sai số của cảm biến LSM như sau:

$$U_{daudo} = \sqrt{\frac{U_{Tdege}^2 + U_{Bdege}^2}{2}} = \sqrt{u_{LSM}^2} = u_{LSM} \quad (2)$$

ĐKĐBĐ do sai số của cảm biến LSM được ước lượng theo phân bố hình chữ nhật [11] với độ chính xác đầu đo là $a = \pm 2 \mu\text{m}$:

$$u_{LSM} = \frac{\bar{a}}{2\sqrt{3}} = \frac{2-(2)}{2\sqrt{3}} = 1,15 (\mu\text{m})$$

- ĐKĐBĐ do các yếu tố môi trường $u_{moitruong}$:

$$u_{moitruong} = \sqrt{u_{nhietdo}^2 + u_{doam}^2 + u_{rungdong}^2 + u_{doon}^2} \quad (3)$$

Trong đó: $u_{nhietdo}$ là độ không đảm bảo do yếu tố nhiệt độ môi trường;
 u_{doam} là độ không đảm bảo do yếu tố độ ẩm môi trường;

$u_{rungdong}$ là độ không đảm bảo do yếu tố rung động môi trường;

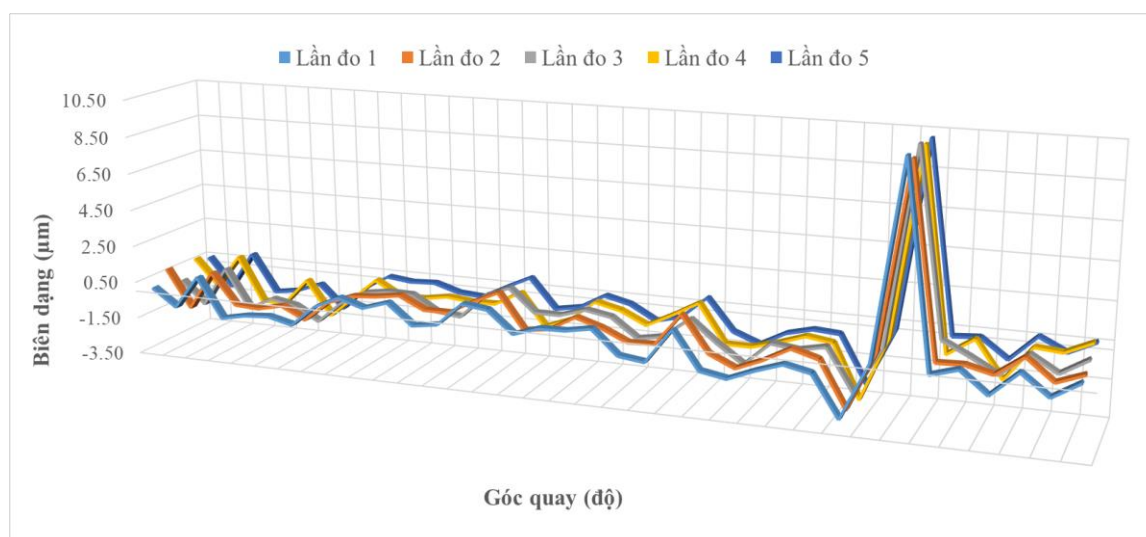
u_{doon} là độ không đảm bảo do yếu tố độ ồn môi trường;

Do các thực nghiệm được thực hiện ở phòng tiêu chuẩn có nhiệt độ, độ ẩm được đảm bảo ổn định và hạn chế rung động, độ ồn nên ảnh hưởng của các yếu tố này là rất nhỏ và có thể bỏ qua ($u_{nhietdo} \approx 0$, $u_{doam} \approx 0$, $u_{rungdong} \approx 0$, $u_{doon} \approx 0$).

• ĐKĐBĐ do góc quay $u_{gocquay}$: Xét chi tiết đo có đường kính 40 mm (thiết bị quét LS-5041T/R có giới hạn đo lớn nhất là 40 mm) và với độ phân giải của Encoder góc 24000 xung/vòng thì giá trị nhỏ nhất đo được trên chu vi mặt cắt tròn là $40\pi/24000 = 0,0052$ (mm). Với bài toán đo sai lệch biên dạng thì chiều cao nhấp nhô nhỏ hơn 1000 lần so với bước của nhấp nhô, cụ thể chiều cao nhấp nhô ở đây nhỏ hơn 0,0052 μ m. Do đó, có thể bỏ qua thành phần sai số đo góc quay ($u_{gocquay} \approx 0$).

b. Tính toán ĐKĐBĐ loại A: sai số do độ lặp lại các kết quả đo ngang trục

Chi tiết nhôm trục bậc được gá đặt lên máy đo biên dạng. Tiến hành đo biên dạng tại một mặt cắt ngang theo giải pháp đảo ngược. Để tính toán độ lệch chuẩn tiến hành đo 5 lần biên dạng. Kết quả biên dạng mặt cắt ngang chi tiết trục nhôm bậc của 5 lần đo được thể hiện trên hình 3. Trục tung chỉ thị giá trị sai lệch của biên dạng mặt cắt ngang. Trục hoành chỉ thị giá trị góc quay của chi tiết ở một tiết diện mặt cắt ngang. Giá trị độ tròn trung bình đo được xác định là 13,02 μ m.



Hình 3. Kết quả 5 lần đo lặp lại biên dạng.

Độ lệch chuẩn của kết quả đo được tính toán bằng công thức:

$$\sigma(L) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2} \quad (4)$$

Trong đó: n là số lần đo ($n = 5$), L_i là kết quả đo biên dạng của lần đo thứ i , \bar{L} là kết quả trung bình của các lần đo.

Để đảm bảo tin cậy cho mọi điểm đo cần phải chọn điểm đo có độ lệch chuẩn lớn nhất, như vậy điểm được chọn chính là điểm đo có độ lệch chuẩn 0,47 μ m.

$$u_A = \frac{\sigma(L)}{\sqrt{n}} = \frac{0,47}{\sqrt{5}} = 0,21 (\mu\text{m}) \quad (5)$$

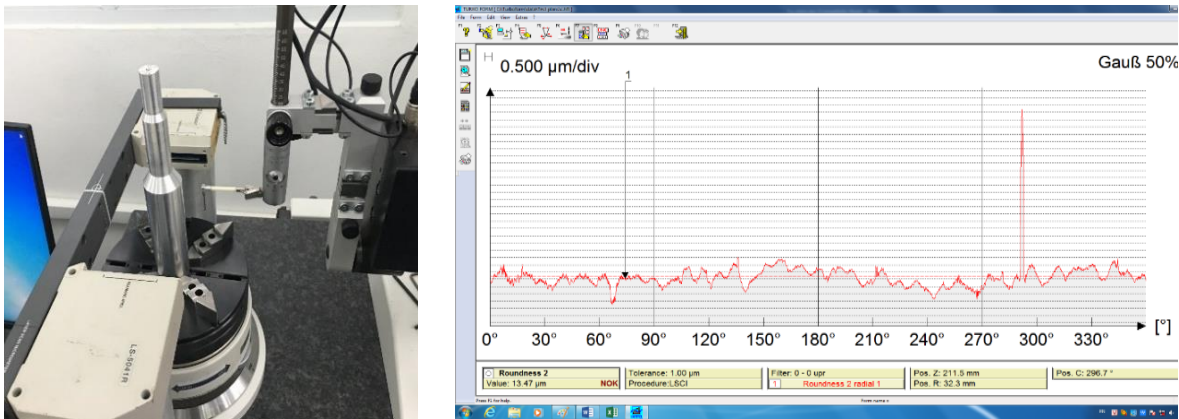
c. ĐKĐBB tổng hợp:

$$U_c = \sqrt{U_A + U_B} = \sqrt{U_A + \frac{U_{daudo}^2}{2}} \quad (6)$$

Thay $u_A = 0,21 \mu\text{m}$ và $u_{daudo} = 1,15 \mu\text{m}$ vào công thức (6), ta được ĐKĐBB tổng hợp $u_c = 0,84 \mu\text{m}$. Với hệ số phủ $k = 2$, xác suất tin cậy 95%, ĐKĐBB mở rộng là: $U = ku_c = 2,0,84 = 1,68 (\mu\text{m})$.

Như vậy, với thí nghiệm đo biên dạng mặt cắt ngang trục này thì giá trị độ tròn tại mặt cắt đo sẽ là $13,02 \pm 1,68 (\mu\text{m})$.

Để khẳng định tính khả thi của phương pháp đo xây dựng, tiến hành so sánh kết quả đo biên dạng chi tiết nhôm tại cùng 1 mặt cắt trên máy đo độ tròn công nghiệp model F135 của hãng JENOPTIK.



Hình 4. a) Sơ đồ bố trí thí nghiệm, b) Kết quả đo biên dạng tại mặt cắt có chiều cao $z=211,5 \text{ mm}$ trên máy đo độ tròn F135.

Biên dạng thu được ở cả hai phương pháp là tương đồng (Hình 3 và Hình 4b) với hệ số tương quan mạnh bằng nghiên cứu sử dụng hệ số tương quan r_{xy} để đánh giá thay vì lập đồ thị so sánh:

$$r_{xy} = \frac{Cov_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}} = 0,89 \quad (7)$$

Kết quả độ tròn đo được trên máy đo độ tròn F135 là $13,47 \mu\text{m}$ và trên thiết bị quét laser là $13,02 \mu\text{m}$, chênh lệch giá trị độ tròn của hai phương pháp $0,45 \mu\text{m}$ (chênh lệch này do nhiều nguyên nhân như ĐKĐBB của phương pháp quét laser, máy đo độ tròn F135, chất lượng bề mặt mẫu, ...).

2.2. ĐKĐBĐ biên dạng theo phương dọc trục

Các yếu tố ảnh hưởng đến sai số đo biên dạng theo phương dọc trục được xác định thông qua sai số loại A và loại B.

a. Tính toán ĐKĐBĐ loại B:

Sai số loại B bao gồm: Sai số do đầu đo trên và đầu đo dưới của cảm biến LSM; Sai số do chuyển động tịnh tiến chi tiết; Sai số do các yếu tố môi trường: Nhiệt độ, độ ẩm, rung động, độ ồn. Tương tự như phân tích ở mục 2.1, ta có ĐKĐBĐ loại B:

$$u_B = \sqrt{\frac{u_{\text{đầu đo}}^2}{2} + u_{\text{tịnh tiến}}^2} \quad (8)$$

Độ không đảm bảo do chuyển động tịnh tiến chính là độ không đảm bảo đo của thước quang (Độ chính xác $\pm 5 \mu\text{m}$) và được ước lượng theo phân bố hình chữ nhật:

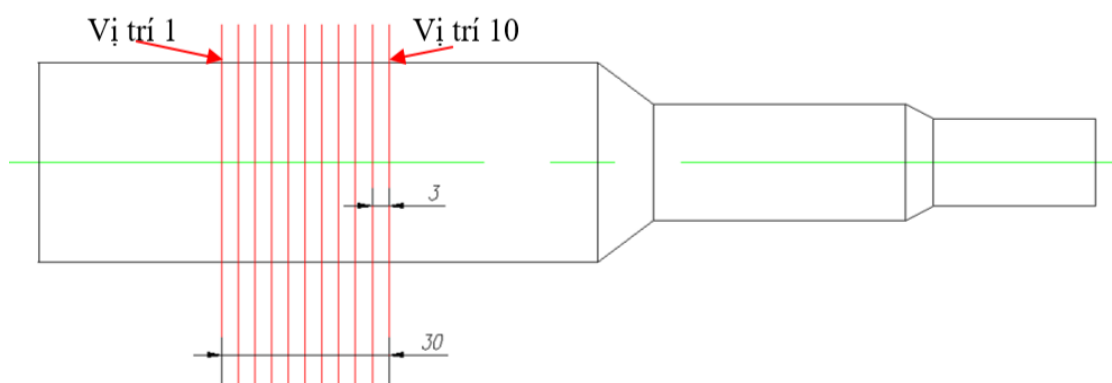
$$u_{\text{tịnh tiến}} = \frac{5 - (-5)}{2\sqrt{3}} = \frac{10}{2\sqrt{3}} = 2,89(\mu\text{m})$$

ĐKĐBĐ loại B được xác định theo công thức (7) như sau:

$$u_B = \sqrt{\frac{1,15^2}{2} + 2,89^2} \approx 3(\mu\text{m})$$

b. Tính toán ĐKĐBĐ loại A:

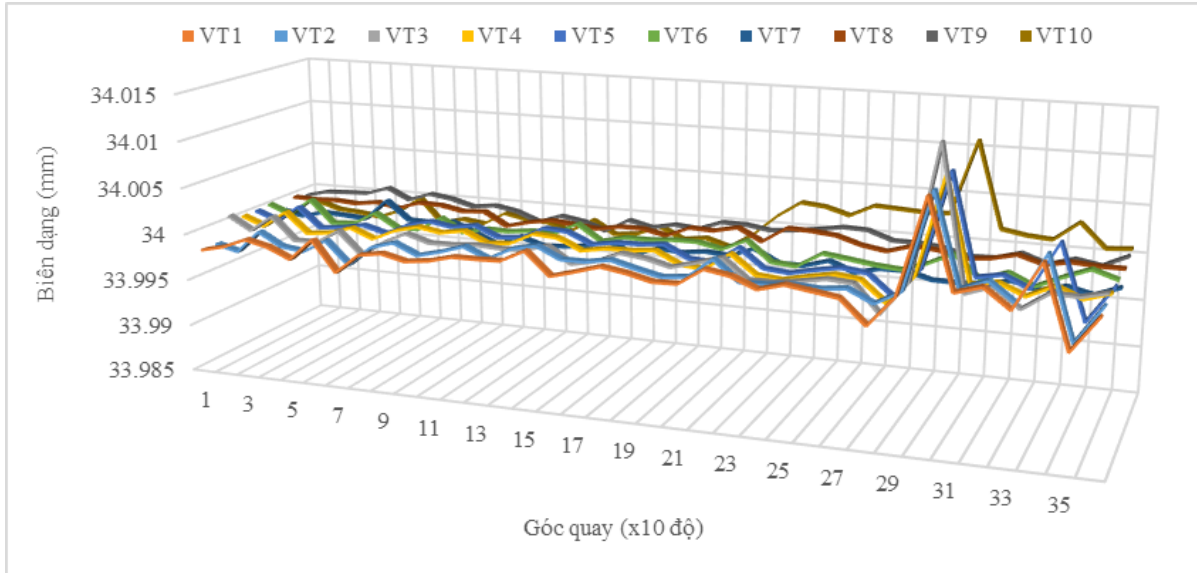
Thực nghiệm đo biên dạng dọc trục chi tiết trục nhôm bậc với dữ liệu 3D đám mây điểm đo tại một mặt cắt ngang có góc quay 60° trên chiều dài 30 mm với bước đo 3 mm như Hình 5.



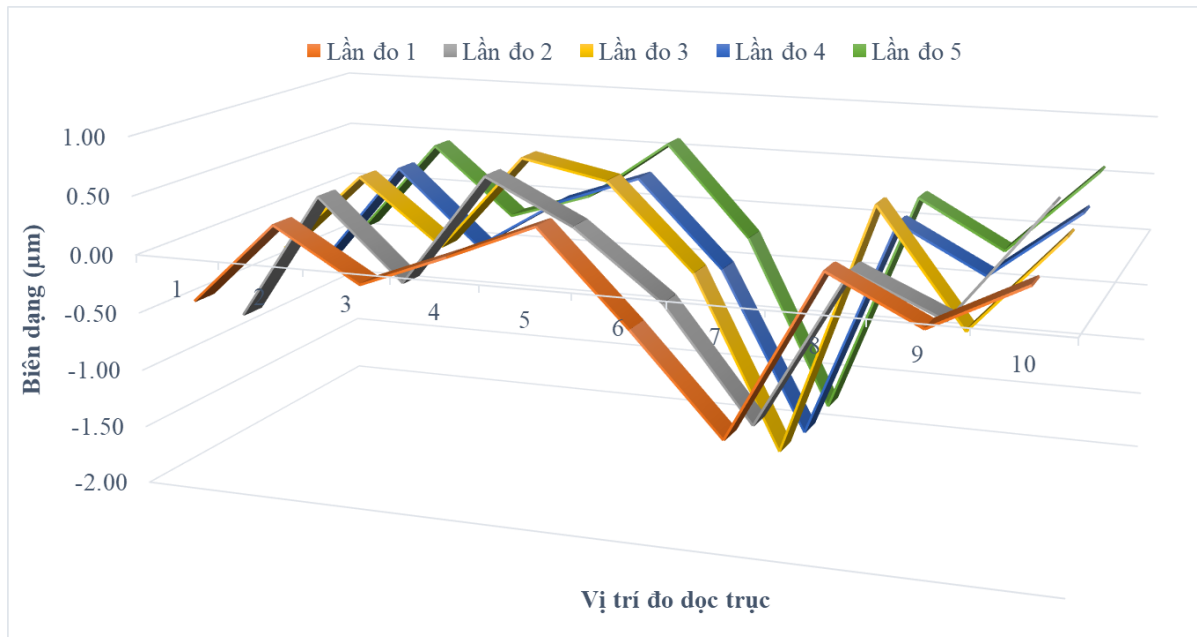
Hình 5: Vị trí đo biên dạng dọc trục chi tiết trục nhôm bậc.

Kết quả đo biên dạng mặt cắt dọc trên đoạn chiều dài 30 mm trục nhôm bậc được thể hiện trên Hình 6.

Từ bộ dữ liệu biên dạng trên để xét biên dạng dọc trục ở góc quay nào chỉ cần lọc kết quả đo biên dạng tại góc quay đó. Ví dụ xét biên dạng dọc trục ở góc quay 60° với 5 lần đo được biên dạng dọc trục như Hình 7.



Hình 6. Biên dạng ngang trục đoạn 30 mm trục nhôm bậc.



Hình 7: Biên dạng dọc trục chi tiết trục nhôm bậc ở góc quay 60°.

Từ bảng tính toán độ lệch chuẩn tại các mặt cắt đo nhận thấy mặt cắt đo thứ 6 có độ lệch chuẩn lớn nhất bằng 0,31 μm . Độ không đảm bảo đo loại A:

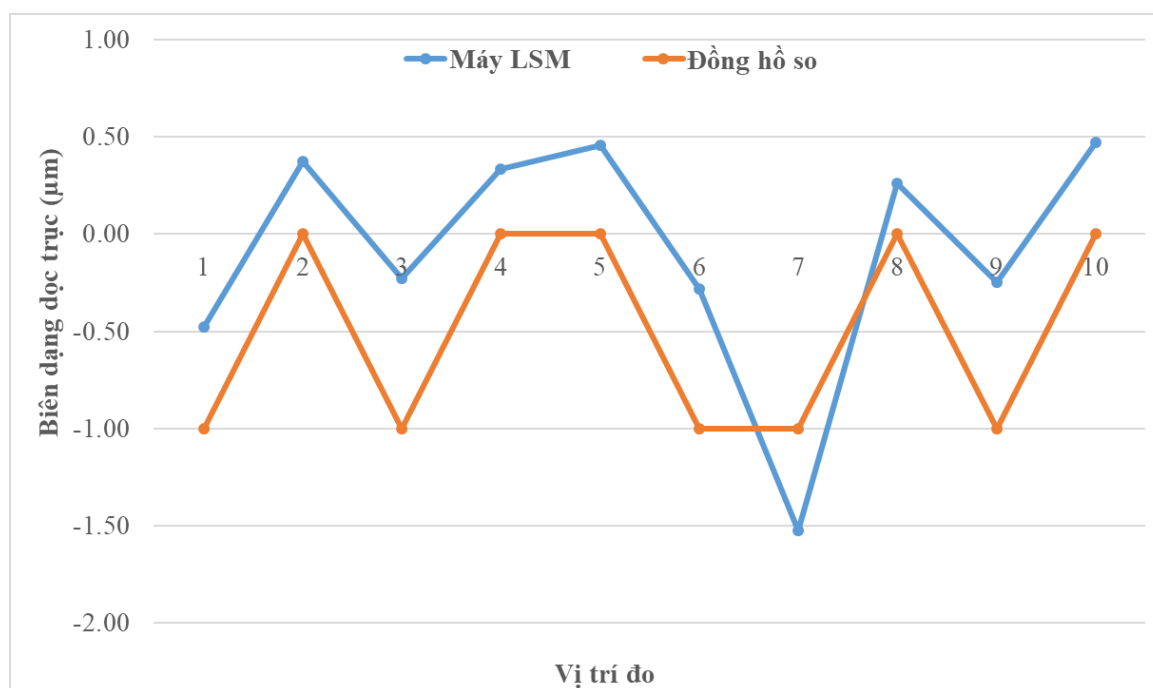
$$u_A = \frac{\sigma(L)}{\sqrt{n}} = \frac{0,31}{\sqrt{5}} = 0,14(\mu\text{m})$$

c. Độ không đảm bảo đo tổng hợp:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,14^2 + 3^2} \approx 3(\mu\text{m})$$

Với hệ số phủ $k = 2$, xác suất tin cậy 95%, độ không đảm bảo đo mở rộng là: $U = k \cdot u_c = 2 \cdot 3 = 6(\mu\text{m})$.

Như vậy, với thực nghiệm đo biên dạng dọc trục thì bên cạnh kết quả đo biên dạng dọc trục cần bổ xung độ không đảm bảo đo mở rộng $U = 6 \mu\text{m}$ với hệ số phủ $k = 2$ và xác suất tin cậy là 95%.



Hình 8: Biên dạng dọc trục chi tiết trục nhôm đo trên máy LSM và bằng đồng hồ so.

Tiến hành đo biên dạng dọc trục chi tiết trục nhôm tại góc quay 60° trên cùng hệ chuyển động dọc trục máy 3D-LSM-01. Kết quả biên dạng thể hiện trên Hình 8 với hệ số tương quan mạnh bằng 0,79.

3. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một mô hình đánh giá ĐKĐBĐ cho phép đo sai lệch độ trụ của chi tiết tròn xoay dựa trên lý thuyết và thực nghiệm. Mô hình ước lượng và trình bày ĐKĐBĐ của phép đo sai lệch độ trụ được xây dựng. Để xác minh mô hình đánh giá độ không đảm bảo, hai thí nghiệm thực hiện phép đo độ trụ theo biên dạng mặt cắt ngang và mặt cắt dọc trục đã được thực hiện. Các kết quả thực nghiệm của việc đánh giá ĐKĐBĐ luôn khớp tốt với các kết quả đo trên máy đo độ tròn. So sánh các kết quả trên thiết bị thực nghiệm và thiết bị đo độ tròn, đồng hồ đo với hệ số tương quan mạnh tương ứng là 0,89 và 0,79 khẳng định tính khả thi của phương pháp đề xuất. Do đó, mô hình đánh giá ĐKĐBĐ sai lệch độ trụ có thể cung cấp một phương pháp đáng tin cậy cho các phép đo thực tế, chứng minh tính hợp lệ của mô hình đề xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. K. Endo, W. Gao, S. Kiyono, A new multi-probe arrangement for surface profile measurement of cylinders, JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 46 (2003) 1531–1537. <https://doi.org/10.1299/jsmec.46.1531>

- [2]. C. Sun, H. Wang, Y. Liu, X. Wang, B. Wang, C. Li, J. Tan, A cylindrical profile measurement method for cylindricity and coaxiality of stepped shaft, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111 (2020) 2845-2856. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06296-5>
- [3]. Q. Li, Y. Shimizu, T. Saito, H. Matsukuma, W. Gao, Measurement Uncertainty Analysis of a Stitching Linear-Scan Method for the Evaluation of Roundness of Small Cylinders, *Applied Sciences*, 10 (2020) 4750. <https://doi.org/10.3390/app10144750>
- [4]. G. Gayton, R. Su, R. Leach, L. Bradley, Uncertainty evaluation of fringe projection based on the linear systems theory, Conference: 35th Annual Coordinate Metrology Soc, Orlando, USA, 2019.
- [5]. J. Lee, Y. Noh, Y. Arai, W. Gao, C. Park, Precision measurement of cylinder surface profile on an ultra-precision machine tool, *Measurement Science Review*, 9 (2009) 49–52. <https://doi.org/10.2478/v10048-009-0008-4>
- [6]. A. Costanzo, M. Minasi, G. Casula, M. Musacchio, M. F. Buongiorno, Combined use of terrestrial laser scanning and IR Thermography applied to a historical building, *Sensors*, 15 (2014) 194–213. <https://doi.org/10.3390/s150100194>
- [7]. N. Senin, S. Catalucci, M. Moretti, R. K. Leach, Statistical Point Cloud Model to Investigate Measurement Uncertainty in Coordinate Metrology, *Precision Engineering*, 70 (2021) 44–62. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.01.008>
- [8]. Z. Du, Z. Wu, J. Yang, Error ellipsoid analysis for the diameter measurement of cylindroid components using a laser radar measurement system, *Sensors*, 16 (2016) 714. <https://doi.org/10.3390/s16050714>
- [9]. S. Mekid, K. Vacharanukul, In-process out-of-roundness measurement probe for turned workpieces, *Measurement*, 44 (2011) 762–766. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.01.011>
- [10]. M. Zhang, Y. Liu, C. Sun, X. Wang, J. Tan, A systematic error modeling and separation method for the special cylindrical profile measurement based on 2-dimension laser displacement sensor, *Review of Scientific Instruments*, 90 (2019) 105006. <https://doi.org/10.1063/1.5111350>
- [11]. G. L. Leonard Schild, A. Kraemer, D. Reiling, H. Wu, Influence of surface roughness on measurement uncertainty in Computed Tomography, 8th Conference on Industrial Computed Tomography, 2018, Wels Australia (iCT), 6-9. <http://www.ndt.net/?id=21910>
- [12]. M. Ren, C. Cheung, L. Kong, S. Wang, Quantitative analysis of the measurement uncertainty in form characterization of freeform surfaces based on Monte Carlo simulation, *Procedia CIRP*, 27 (2015) 276–280. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.078>
- [13]. ITTC, “ITTC – Recommended Procedures and Guidelines ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines Guide to the Expression of Uncertainty in Experimental Hydrodynamics ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, 2014. <https://www.ittc.info/> truy cập ngày 15 tháng 8 năm 2021
- [14]. Tiêu chuẩn Việt nam, TCVN9595-3:2013-Độ không đảm bảo đo- Phần 3: Hướng dẫn trình bày độ không đảm bảo đo (GUM:1995), <https://tieuchuan.vsqi.gov.vn/tieuchuan/view?sohieu=TCVN%209595-3:2013>, truy cập ngày 15 tháng 8 năm 2021.
- [15]. Joint Committee for Guides in Metrology, Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement, Propagation of distributions using a Monte Carlo method, JCGM 101 (2008) 90. <https://www.iso.org/sites/JCGM/GUM-introduction/>, truy cập ngày 15 tháng 8 năm 2021.