

NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH KÍCH HOẠT THEO HƯỚNG CỦA ĐẦU DÒ CHẠM TRÊN MÁY PHAY CNC TRONG MẶT PHẪNG XY

INVESTIGATION OF THE DIRECTION-DEPENDENT TRIGGERING BEHAVIOR OF A TOUCH PROBE ON A CNC MILLING MACHINE IN THE XY PLANE

Hoàng Vĩnh Sinh^{1,*}, Phan Bùi Khôi¹, Bùi Văn Diện²

¹Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

²Công ty cổ phần Công nghiệp Weldcom

*Email tác giả liên hệ: sinh.hoangvinh@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Trong đo kiểm trên máy phay CNC bằng đầu dò chạm và lệnh G31, tọa độ ghi nhận được không chỉ chịu ảnh hưởng của sai số máy mà còn phụ thuộc vào đặc tính kích hoạt của đầu dò theo hướng tiếp cận. Bài báo đề xuất một phương pháp thực nghiệm để nhận dạng đặc tính này trong mặt phẳng XY thông qua phép đo các điểm trên vòng tròn xích đạo của quả cầu chuẩn có độ chính xác cao. Từ sai lệch giữa tọa độ đo được và tọa độ lý thuyết, phân bố sai số theo góc tiếp cận được xây dựng và tiếp tục xử lý bằng phương pháp đường tròn khớp tốt nhất để loại bỏ lệch tâm và lệch bán kính tổng thể. Kết quả cho thấy dữ liệu đo bằng G31 luôn chứa đồng thời thành phần sai số hệ thống của máy CNC, sai số lắp đặt đầu dò và sai số của bản thân đầu dò. Nghiên cứu là cơ sở để phát triển mô hình bù sai số theo góc tiếp cận cho đo kiểm bằng đầu dò chạm trên máy phay CNC.

Từ khóa: Đầu dò chạm; G31; Máy phay CNC; Đặc tính kích hoạt; Sai số dư hướng kính; Phân tích điều hòa; Bù sai số.

ABSTRACT

In on-machine measurement using a touch probe and the G31 command, the recorded coordinates are affected not only by machine tool errors but also by the direction-dependent triggering behavior of the probe. This paper proposes an experimental method to characterize this behavior in the XY plane by measuring points on the equatorial circle of a high-accuracy reference sphere. Based on the deviations between measured coordinates and theoretical coordinates, the angular error distribution is analyzed to determine the variation of probe triggering behavior with respect to the approach direction. The results show that G31-based measurements always contain both the systematic error of the CNC machine, the error of assembling & installing and the error of the probe. The proposed method provides a basis for developing angular compensation models for touch-probe measurements on CNC milling machines.

Keywords: Touch probe; G31; CNC milling machine; On-machine measurement; Direction-dependent triggering behavior; Best-fit circle; Radial residual error; Harmonic analysis; Error compensation.



1. MỞ ĐẦU

Đo kiểm trực tiếp trên máy CNC bằng đầu dò chạm ngày càng được sử dụng rộng rãi nhằm rút ngắn thời gian gá đặt, giảm số lần tháo lắp chi tiết và hỗ trợ kiểm tra kích thước ngay trong quá trình gia công [1], [2]. Tuy nhiên, kết quả đo không chỉ phụ thuộc vào độ chính xác hình học của máy mà còn chịu ảnh hưởng của đặc tính kích hoạt của đầu dò.

Đối với đầu dò chạm kiểu touch-trigger, hành trình tiền kích hoạt (pre-travel) thay đổi theo hướng tiếp cận, chiều dài stylus và cấu trúc cơ khí của đầu dò, từ đó tạo ra sai số phụ thuộc hướng hay dạng nhiều thùy (lobing) [3], [4]. Trên máy CNC, thành phần này không bị triệt tiêu hoàn toàn bởi các bước hiệu chuẩn thông thường, nên có thể gây sai số hệ thống theo góc tiếp cận [7], [9].

Bài báo này nghiên cứu đặc tính kích hoạt theo hướng của đầu dò chạm trong mặt phẳng XY thông qua phép đo các điểm trên vòng tròn xích đạo của quả cầu chuẩn bằng lệnh G31. Mục tiêu nghiên cứu là làm rõ ba vấn đề:

- (i) Sai số đo bằng G31 trong mặt phẳng XY có biểu hiện phụ thuộc hướng hay không;
- (ii) Sau khi loại bỏ các thành phần sai số hình học bậc thấp, sai số dư còn lại mang đặc trưng của máy hay của đầu dò;
- (iii) Việc quay đầu dò quanh trục chính có làm dịch chuyển dạng phân bố của sai số dư theo góc định hướng hay không.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC

Trong nghiên cứu này, với nguyên lý đo cho trên hình 1, đầu dò chạm được sử dụng

để đo các điểm nằm trên vòng tròn xích đạo của quả cầu chuẩn trong mặt phẳng XY. Gọi $O_c(X_c, Y_c)$ là tâm lý thuyết của vòng tròn xích đạo và R là bán kính danh nghĩa của quả cầu chuẩn. Với mỗi góc tiếp cận θ , tọa độ lý thuyết của điểm đo được xác định bởi công thức toán học sau:

$$\begin{cases} X_{th}(\theta) = X_c + R \cos \theta \\ Y_{th}(\theta) = Y_c + R \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

Sau khi thực hiện lệnh dò G31, hệ điều khiển CNC ghi nhận tọa độ thực đo tại thời điểm đầu dò phát tín hiệu kích hoạt, ký hiệu là: $X_m(\theta), Y_m(\theta)$.

Sai lệch tọa độ tại mỗi điểm đo được xác định theo công thức:

$$\begin{cases} d_x(\theta) = X_m(\theta) - X_{th}(\theta) \\ d_y(\theta) = Y_m(\theta) - Y_{th}(\theta) \end{cases} \quad (2)$$

Vector đơn vị theo phương hướng kính được xác định là:

$$\mathbf{u}_r(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Vector đơn vị theo phương tiếp tuyến được xác định là:

$$\mathbf{u}_t(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

Từ đó, sai số hướng kính $d_R(\theta)$ và sai số tiếp tuyến $e_t(\theta)$ được tính theo công thức toán học sau:

$$\begin{cases} d_R(\theta) = d_x(\theta) \cos \theta + d_y(\theta) \sin \theta \\ e_t(\theta) = -d_x(\theta) \sin \theta + d_y(\theta) \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó, $d_R(\theta)$ là đại lượng được sử dụng để nhận dạng đặc tính kích hoạt theo

hướng của đầu dò trong mặt phẳng XY.

Sai số hướng kính tại mỗi góc tiếp cận được mô tả dưới dạng:

$$d_R(\theta) = d_m(\theta) + d_p(\theta) + d_a(\theta) \quad (6)$$

Trong đó:

- $d_m(\theta)$ là thành phần sai số do máy CNC;
- $d_d(\theta)$ là thành phần sai số động do tốc độ dò, độ trễ truyền tín hiệu và độ trễ dừng của lệnh G31.

- $d_p(\theta)$ là thành phần sai số do đặc tính kích hoạt của đầu dò $d_p(\theta) = f(\theta)$.

Để thuận tiện cho việc xử lý, hàm $f(\theta)$ được xấp xỉ bằng chuỗi điều hòa Fourier hữu hạn:

$$d_p(\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^N [a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)] \quad (7)$$

Trong đó, a_0 , a_n và b_n là các hệ số cần xác định từ dữ liệu thực nghiệm. Biên độ của các thành phần điều hòa cho phép nhận dạng loại dạng phân bố chi phối trong dữ liệu, ví dụ bậc 2, bậc 3 hoặc bậc cao hơn.

3. PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

Hệ thống thí nghiệm gồm máy phay CNC trang bị đầu dò chạm lắp trên trục chính như hình 1. Đối tượng chuẩn là quả cầu chuẩn có độ chính xác hình học cao, được gá cố định trên bàn máy. Vòng tròn xích đạo của quả cầu được chọn làm tập điểm chuẩn để khảo sát đặc tính kích hoạt trong mặt phẳng XY. Hai hệ đo khác nhau được khảo sát. Hệ đo thứ nhất dùng để đánh giá đặc tính sai số tổng hợp ban đầu và kiểm tra tính lặp lại giữa nhiều lần đo. Hệ đo thứ hai dùng để phân tích ảnh hưởng của việc thay đổi góc định hướng của đầu dò đối với dạng sai số theo góc.

Các điểm đo được phân bố đều trên vòng tròn xích đạo của quả cầu. Tập phân tích chính gồm 32 điểm đầu tiên tương ứng với PNT1–PNT32, đều nằm trong mặt phẳng $Z = 0$. Tại mỗi góc tiếp cận, đầu dò được điều khiển tiếp cận bề mặt quả cầu bằng lệnh G31 cho đến khi phát tín hiệu kích hoạt và tọa độ dừng được lưu lại.

Tại mỗi góc θ_i , đầu dò được điều khiển tiếp cận bề mặt quả cầu bằng lệnh G31 cho đến khi đầu dò phát tín hiệu kích hoạt. Tọa độ dừng được lưu lại dưới dạng: $(X_m(\theta_i), Y_m(\theta_i))$.

Dữ liệu được xử lý theo các bước sau:

1) Tính tọa độ lý thuyết của từng điểm trên vòng tròn xích đạo.

2) Đo tọa độ thực tế và tính sai lệch tọa độ $d_x(\theta_i)$, $d_y(\theta_i)$.

3) Chuyển đổi sang sai số hướng kính $d_R(\theta_i)$ và sai số tiếp tuyến $e_t(\theta_i)$.

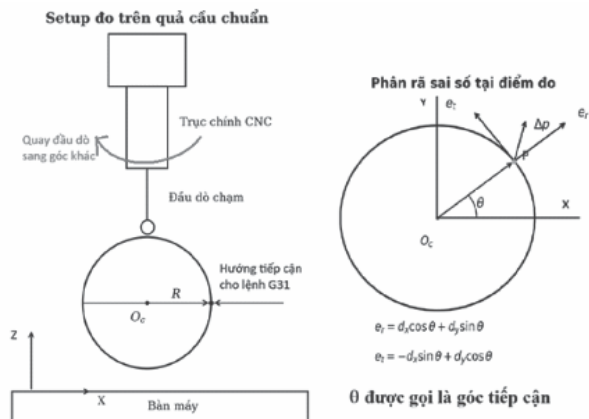
4) Xây dựng các đồ thị $d_x(\theta)$, $d_y(\theta)$, $d_R(\theta)$ và đồ thị tọa độ cực.

5) Áp dụng phương pháp đường tròn khớp tốt nhất để loại bỏ lệch tâm và lệch bán kính tổng thể.

6) Phân tích điều hòa sai số dư để nhận dạng các thành phần bậc trội.

Trên hệ đo thứ hai, phép đo được lặp lại với nhiều góc định hướng khác nhau của đầu dò quanh trục chính, trong khi chương trình đo và vị trí quả cầu chuẩn được giữ nguyên. Mục tiêu là kiểm tra xem dạng phân bố của sai số dư sau xử lý có cố định theo hệ trục máy hay quay theo góc định hướng của đầu dò.



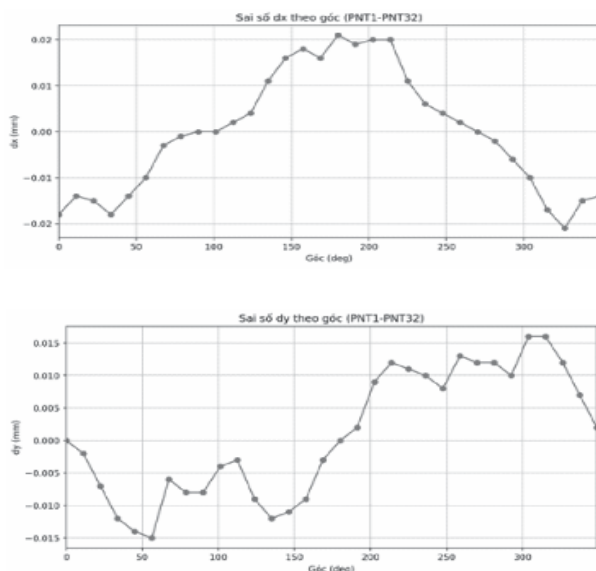


Hình 1. Sơ đồ nguyên lý thí nghiệm đo trên vòng tròn xích đạo của quả cầu chuẩn bằng đầu dò chạm và lệnh G31; đồng thời minh họa phân rã sai số theo phương hướng kính e_r , phương tiếp tuyến e_t và nguyên lý quay đầu dò để phân biệt thành phần sai số gắn với máy CNC và thành phần sai số gắn với đầu dò.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Kết quả ở hệ dữ liệu đo thứ nhất

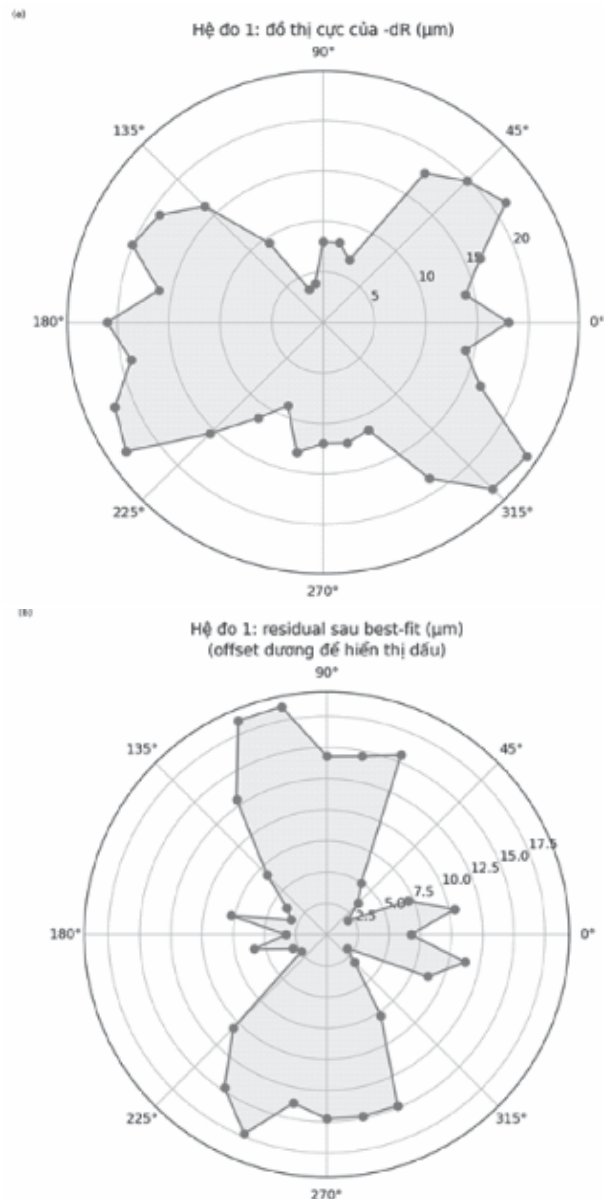
Sau khi lọc dữ liệu đúng trên mặt phẳng xích đạo $Z = 0$, tập phân tích chính gồm 32 điểm PNT1–PNT32.



Hình 2. Đồ thị sai số dx , dy theo góc tiếp cận θ

Kết quả trên hình 2 cho thấy sai số theo trục X và Y phân bố gần đối xứng quanh giá trị 0.

Điều này phù hợp với tính chất vật lý là tọa độ biến thiên theo hình sin và sai số cũng biến thiên theo điều này.



Hình 3. So sánh đồ thị tọa độ cực của sai số hướng kính d_R trước xử lý và sai số dư hướng kính sau khi áp dụng phương pháp đường tròn khớp tốt nhất trên hệ đo thứ nhất.

Sai số hướng kính d_R ở hình 3 có xu hướng âm trên toàn bộ vòng đo. Giá trị trung bình của d_R ban đầu vào khoảng $-15 \mu\text{m}$, cho thấy các điểm đo có xu hướng dịch vào phía trong so với vòng tròn chuẩn chứng tỏ hệ đo “tồn tại một thành phần sai số hướng tâm của đầu dò”.

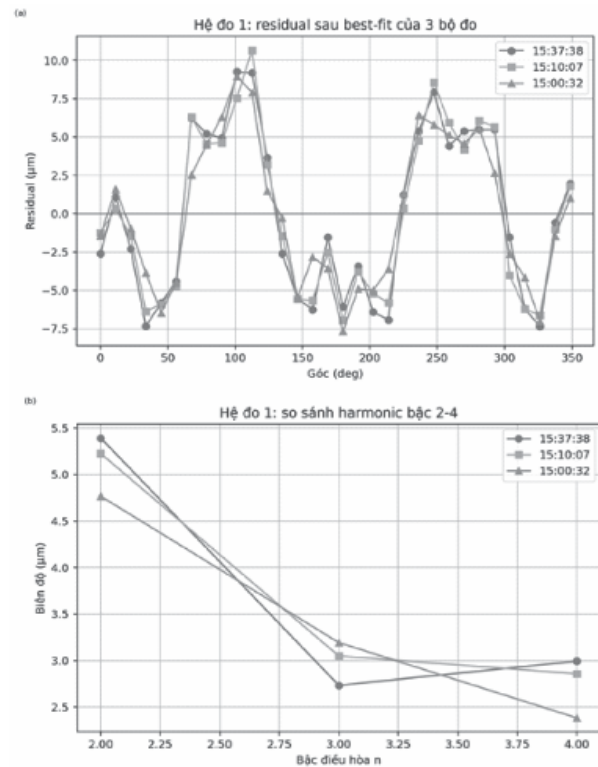
Việc dịch vào phù hợp với thực tế: Khi đầu dò chạm bề mặt thì phải cần một khoảng thời gian để kích hoạt tiếp điểm điện bên trong đầu dò và thời gian bộ xử lý dừng chuyển động của đầu dò. Khi đó, đầu dò đã đi vào một đoạn nhỏ rồi. Đoạn này chính là hành trình tiền kích hoạt (pre-travel). Nó hoàn toàn phụ thuộc vào cấu trúc và đặc tính của đầu dò.

Trên đồ thị đồ thị hình 3 cũng cho thấy mức co vào không đồng nhất theo góc, cho thấy ngay từ dữ liệu gốc đã “tồn tại một thành phần sai số phụ thuộc hướng tác động của đầu dò”.

Sau khi áp dụng phương pháp đường tròn khớp tốt nhất, một bộ dữ liệu điển hình cho tâm đường tròn khớp tốt nhất $(X_c, Y_c) = (-0,000239; 0,002227)$ mm với bán kính $R = 12,484841$ mm. Sai số dư hướng kính sau xử lý dao động từ $-7,357 \mu\text{m}$ đến $+9,257 \mu\text{m}$, với giá trị trung bình xấp xỉ 0 và độ lệch chuẩn khoảng $5,424 \mu\text{m}$. Kết quả này chứng tỏ phần dịch chuyển hướng tâm mang tính hệ thống trong dữ liệu gốc đã được loại bỏ đáng kể.

Đồ thị tọa độ cực của sai số dư sau xử lý chỉ còn biểu diễn phần méo theo góc quanh giá trị trung bình bằng không. Điều này cho thấy thành phần sai số phụ thuộc hướng.

Phân tích điều hòa sai số dư cho thấy thành phần bậc 2 là thành phần trội, với biên độ xấp xỉ $5,39 \mu\text{m}$, trong khi các thành phần bậc 3 và bậc 4 vào khoảng $2,73 \mu\text{m}$ và $2,99 \mu\text{m}$.



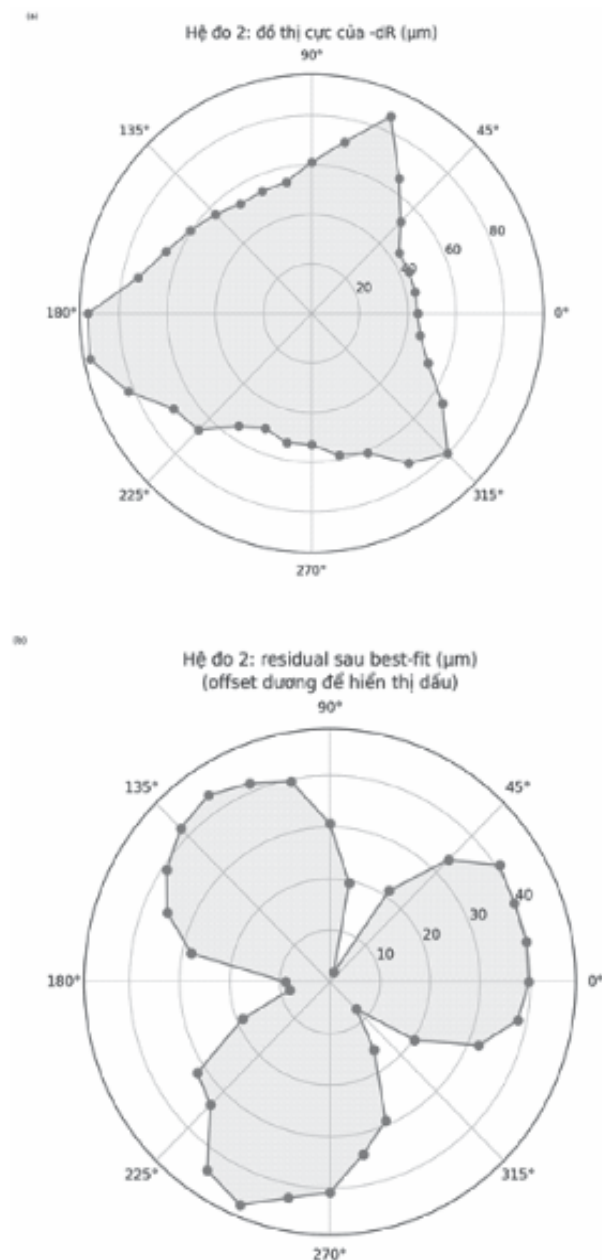
Hình 4. So sánh sai số dư hướng kính sau khi áp dụng phương pháp đường tròn khớp tốt nhất của ba bộ dữ liệu trên hệ đo thứ nhất và biên độ các thành phần điều hòa bậc 2 đến bậc 4. Dạng phân bố của sai số dư có tính lặp lại tốt giữa các lần đo, tuy nhiên vẫn chủ yếu bị chi phối bởi thành phần điều hòa bậc 2.

Nhìn vào hình 4, thành phần điều hòa bậc 2 vẫn lớn hơn thành phần điều hòa bậc 3 trong cả ba bộ dữ liệu, phần sai số dư còn lại sau xử lý ở hệ đo thứ nhất vẫn mang dấu ấn mạnh của máy CNC và động học của quá trình đo. Vì vậy, trên hệ đo này, đồ thị tọa độ cực của d_R cho thấy rõ sai số hệ thống theo hướng tâm, còn đồ thị tọa độ cực của sai số dư cho thấy vẫn tồn tại sai số theo góc, nhưng chưa đủ cơ sở để quy thành phần đó hoàn toàn cho đầu dò.

4.2. Kết quả ở hệ dữ liệu đo thứ hai

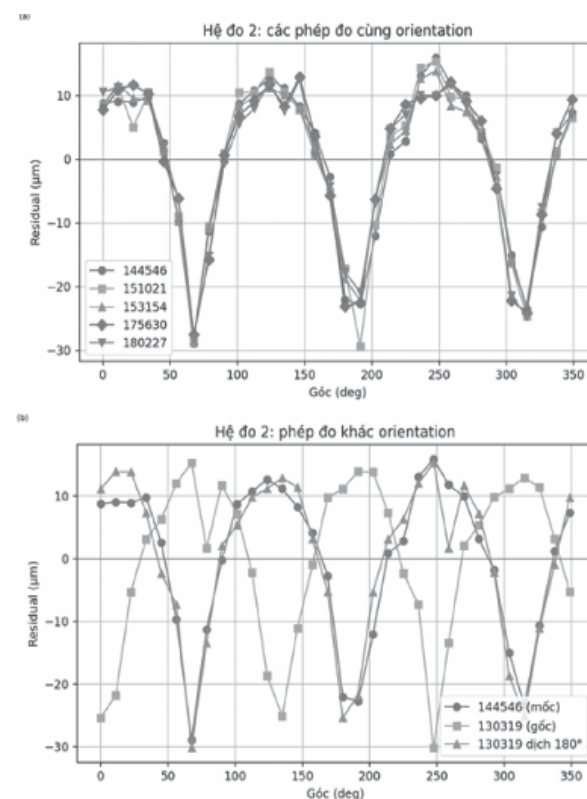
Thành phần điều hòa bậc 3 chiếm ưu thế rõ rệt, với biên độ nằm trong khoảng từ $14,7 \mu\text{m}$ đến $15,3 \mu\text{m}$.

μm đến $16,2 \mu\text{m}$, trong khi biên độ thành phần điều hòa bậc 2 chỉ vào khoảng $1,1 \mu\text{m}$ đến $2,7 \mu\text{m}$, nhỏ hơn đáng kể so với thành phần điều hòa bậc 3. Điều này cho thấy sai số dư sau xử lý có dạng ba thùy rõ rệt trong mặt phẳng XY.



Hình 5. So sánh đồ thị tọa độ cực của sai số hướng kính d_R trước xử lý và sai số sau khi áp dụng phương pháp đường tròn khớp tốt nhất trên hệ đo thứ hai

Năm trong sáu bộ dữ liệu cho dạng phân bố của sai số dư gần như trùng nhau khi so sánh trực tiếp theo cùng góc tiếp cận, với hệ số tương quan đạt từ $0,967$ đến $0,992$. Sai khác RMS giữa các sai số dư trong nhóm này chỉ vào khoảng $1,6 \mu\text{m}$ đến $3,1 \mu\text{m}$. Điều này cho thấy tại cùng góc định hướng của đầu dò, dạng sai số theo góc là rất ổn định. Một bộ dữ liệu có góc định hướng khác cho hệ số tương quan âm khi so sánh trực tiếp theo cùng góc với nhóm năm bộ còn lại, vào khoảng $-0,68$ đến $-0,73$. Tuy nhiên, khi dịch tín hiệu sai số dư của bộ dữ liệu này đi 16 điểm đo, tương ứng 180° trên trục góc lấy mẫu, hệ số tương quan tăng mạnh lên khoảng $0,97$ đến $0,98$. Từ góc nhìn của đồ thị tọa độ cực, điều đó có nghĩa là biên dạng ba thùy không biến mất mà chỉ quay sang một góc định hướng khác.



Hình 6. Ảnh hưởng của góc định hướng đầu dò đến sai số dư hướng kính sau khi áp dụng phương pháp đường tròn khớp tốt nhất trên hệ đo thứ hai

Nếu xét theo bản chất của thành phần điều hòa bậc 3, sự dịch pha 180° trên sai số dư tương ứng với một góc quay cơ học của đầu dò xấp xỉ 60° theo modulo 120° . Vì sai số dư bị chi phối bởi dạng ba thùy, chỉ cần quay đầu dò một góc khoảng 60° là đã làm dạng phân bố tại cùng hệ góc đo thay đổi mạnh.

4.3. Thảo luận

Kết quả trên hai hệ đo cho thấy hai tình huống khác nhau. Trên hệ đo thứ nhất, sai số dư sau xử lý chủ yếu bị chi phối bởi thành phần điều hòa bậc 2, cho thấy ảnh hưởng của máy CNC và động học quá trình đo vẫn còn chiếm ưu thế. Trên hệ đo thứ hai, sai số dư sau xử lý xuất hiện rõ thành phần điều hòa bậc 3 dạng 3 thùy và dạng phân bố này thay đổi khi quay đầu dò, cho thấy phần sai số đó gắn với đặc tính nội tại của đầu dò chạm.

Việc kết hợp giữa đồ thị tọa độ cực, phương pháp đường tròn khớp tốt nhất và phân tích điều hòa cho phép phân biệt rõ hơn hai loại ảnh hưởng: phần sai số gắn với máy CNC và phần sai số gắn với đầu dò. Trong nghiên cứu này, hệ đo thứ hai cung cấp bằng chứng thực nghiệm rõ ràng hơn về sự tồn tại của đặc tính kích hoạt phụ thuộc hướng.

5. KẾT LUẬN

Sai số đo bằng lệnh G31 trong mặt phẳng XY không chỉ phụ thuộc vào sai số máy

CNC mà còn chịu ảnh hưởng rõ rệt của đặc tính kích hoạt theo hướng của đầu dò chạm. Phương pháp kết hợp giữa đo quả cầu chuẩn, xử lý bằng phương pháp đường tròn khớp tốt nhất, phân tích sai số dư theo góc và phân tích điều hòa là cơ sở thích hợp để xây dựng mô hình bù sai số theo góc tiếp cận cho đo kiểm trên máy CNC bằng đầu dò chạm. ❖

Ngày nhận bài: 05/6/2026

Ngày phản biện: 15/6/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. P. Blecha, M. Holub, T. Marek, R. Jankovych, F. Mišún, J. Smolík, M. Machálka, “*Capability of measurement with a touch probe on CNC machine tools*”. Measurement, vol. 195, 111153, 2022.
- [2]. A. Weckenmann, W. T. Estler, G. Peggs, D. McMurtry, “*Probing systems in dimensional metrology*”. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 53, no. 2, pp. 657-684, 2004.
- [3]. Renishaw, OMP40 installation and user's guide, Renishaw plc.
- [4]. Renishaw, Technical note: Renishaw's strain gauge probing technology, Renishaw plc.
- [5]. S. Li, X. Yang, Y. Li, et al., “*An accurate probe pre-travel error compensation model for five-axis on-machine inspection system*”. Precision Engineering, vol. 62, pp. 256-264, 2020.
- [6]. M. Jankowski, A. Woźniak, M. Mayer, “*Mechanical model of errors of probes for numerical controlled machine tools*”. Measurement, vol. 77, pp. 317-326, 2016.