

GIẢI PHÁP ĐO ĐẶC VÀ ĐÈN BÙ CÁC LỖI ĐỊNH VỊ CHO CÁC THIẾT BỊ BÀN XOAY HAI TRỤC

A SOLUTION TO MEASURE AND COMPENSATE ALL LOCATION ERRORS RELATED TO 2-AXIS ROTARY TABLE

Nguyễn Hữu Nhân

Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng; nhnhan@dut.udn.vn

Tóm tắt - Trong quá trình công nghiệp hóa, hiện đại hóa ở nước ta hiện nay, các trung tâm gia công CNC đang được ứng dụng ngày càng nhiều và dần thay thế các máy công cụ truyền thống. Do đó, việc mở rộng khả năng công nghệ cũng như nâng cao chất lượng gia công của các máy CNC đang thu hút được rất nhiều sự chú ý. Trong đó, các thiết bị bàn xoay 2 trục luôn được xem là một trong những lựa chọn hàng đầu nhờ giá thành rẻ, dễ tích hợp với các trung tâm CNC 2, 3 trục và các máy công cụ truyền thống. Tuy nhiên, các lỗi hình học tồn tại trong các thiết bị này là nguyên nhân chính dẫn đến sự không chính xác trong quá trình gia công, đặc biệt là thành phần lỗi định vị. Trong nghiên cứu này, tác giả hướng đến việc thiết lập một quy trình đo đặc và đền bù các lỗi định vị cho bàn xoay 2 trục phổ biến nhất (A, C) bằng máy đo CMM. Kết quả thử nghiệm cho thấy, độ chính xác của thiết bị thử nghiệm được nâng cao hơn 50%.

Từ khóa - Trung tâm gia công CNC; bàn xoay 2 trục; lỗi hình học; lỗi định vị; máy đo CMM

1. Đặt vấn đề

Các trung tâm gia công phay CNC 5 trục bao gồm 3 trục tịnh tiến và 2 trục tròn xoay đang dần trở nên phổ biến nhờ khả năng công nghệ vượt trội trong gia công các chi tiết có hình dạng phức tạp và yêu cầu độ chính xác kỹ thuật cao. Trong đó, đặc biệt là dạng máy phay có 2 trục tròn xoay theo trục x (A) và trục z (C) được sử dụng nhiều hơn cả nhờ khả năng nâng cấp một cách dễ dàng từ máy phay CNC 3 trục tích hợp với thiết bị tròn xoay 2 trục riêng. Tuy nhiên, việc tích hợp thêm các thành phần riêng lẻ vào hệ thống động học chung của máy dẫn đến có nhiều hơn các thành phần lỗi ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của máy. Trong đó, lỗi hình học luôn được thừa nhận bởi nhiều nhà nghiên cứu và sản xuất là một trong những thành phần lỗi chính và có tác động nhiều nhất đến máy. Do đó, trong nhiều năm qua đã có nhiều nghiên cứu, giải pháp được đề ra với mục đích xác định và đền bù lỗi hình học của máy, đặc biệt là lỗi định vị gây ra bởi các trục xoay. Các tác giả trong [1] đã chứng minh, các thành phần lỗi của trục xoay gây nên 80% lỗi vị trí của dụng cụ cắt.

Sử dụng máy đo 6D laser interferometer luôn được xem là giải pháp hữu hiệu, phổ biến và tiết kiệm thời gian nhất trong việc đo đặc tất cả các thành phần lỗi hình học [2]. Gần đây, nhiều nghiên cứu đã giới thiệu thêm nhiều các thiết bị đo có độ chính xác cao như hệ thống Double ball bar (DBB). Đây là hệ thống rất hữu hiệu trong việc xác định các lỗi động học của hai trục tròn xoay khi đang hoạt động đồng thời [3]. Tuy nhiên, hệ thống này cần nhiều thời gian thiết lập và khá phức tạp để sử dụng cũng như phân tích kết quả đo. Các hệ thống, thiết bị đo kể trên được liệt vào các phương pháp đo trực tiếp. Bên cạnh các phương pháp đo trực tiếp, các phương pháp đo gián tiếp cũng thu hút nhiều nhà nghiên cứu. Một phương pháp đo điển hình nhất là gia công một mẫu thử

Abstract - In the process of industrialization and modernization in our country today, CNC machining centers are being applied more and more and gradually replacing traditional machine tools. Therefore, expanding technology capabilities as well as improving the machining quality of CNC machines is attracting a lot of attention. In particular, the 2-axis rotary tables are always considered as one of the top choices thanks to low cost, easiness to integrate with 2, 3-axis CNC centers and traditional machine tools. However, the geometry errors that exist in these devices are the main cause of inaccuracies in the machining process, especially the location errors. In this study, the authors aim to establish a process for measuring and compensating location errors for the most popular 2-axis rotary table (A, C) with a Coordinate Measuring Machine (CMM). Test results show that, the accuracy of the tested device is improved by more than 50%.

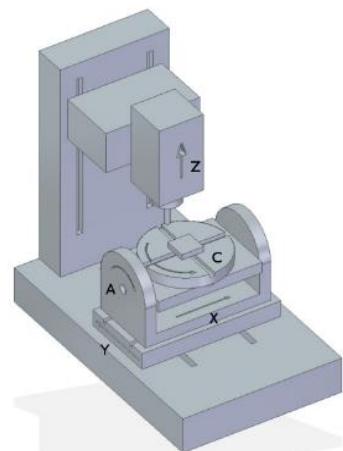
Key words - CNC machining centers; 2-axis rotary table; geometry errors; location errors; Coordinate Measuring Machine (CMM)

đặc biệt và đo đặc bằng các thiết bị đo chuyên dụng như máy CMM từ đó so sánh với thiết kế và đưa ra giá trị thành phần lỗi. Một dạng đo gián tiếp khác đó là sử dụng một vật mẫu như được đưa ra trong [4, 5, 6] và sau đó bằng cách so sánh vị trí tương quan của các vật mẫu trong quá trình hoạt động để đánh giá sai số động học của máy. Đây cũng là hướng phát triển chính trong bài báo này.

Trong bài báo này, các tác giả đưa ra một giải pháp mới để xác định các lỗi định vị của thiết bị bàn xoay hai trục bằng cách sử dụng vật mẫu (bao gồm các khối cầu tiêu chuẩn) và máy đo CMM. Về lý thuyết, ý tưởng đó là việc theo dõi và xác định vị trí tương quan của các khối cầu này trong hệ tọa độ máy và đưa vào các mô hình toán để đánh giá sai số.

2. Cấu hình máy và tập hợp lỗi định vị

2.1. Cấu hình máy



Hình 1. Cấu hình máy phay CNC 3 trục kết hợp bàn xoay 2 trục (A, C)

Như đã đề cập ở trên, thiết bị bàn xoay 2 trục (A, C) được tích hợp trên máy phay CNC 3 trục sẽ được sử dụng trong bài báo này. Tuy nhiên, ý tưởng của bài báo này có thể mở rộng cho các loại bàn xoay khác. Kết cấu chung của hệ thống máy phay CNC được thể hiện trên Hình 1.

2.2. Lỗi định vị

Như đã được đề cập trong [7] và bộ tiêu chuẩn ISO [2], định nghĩa của lỗi định vị là sai số của giá trị danh nghĩa về hướng và vị trí của trục được xét trong hệ tọa độ của máy. Trên thực tế, các lỗi định vị xuất hiện trong quá trình lắp ráp các thành phần động học của thiết bị, do đó nó còn được gọi là lỗi lắp ghép. Theo [8], đối với mỗi trục sẽ có tổng cộng 5 lỗi định vị (2 lỗi vị trí, 2 lỗi định hướng và 1 lỗi sai số góc), tuy nhiên lỗi sai góc quá nhỏ nên được bỏ qua. Bảng 1 liệt kê các lỗi định vị của trục A và trục C.

Bảng 1. Tập hợp các lỗi định vị của trục A và C

	Lỗi vị trí	Lỗi định hướng
Trục C	Sai số vị trí của trục C theo phương X [δ_{CX}]	Sai số góc của trục C theo phương X [α_{CX}]
	Sai số vị trí của trục C theo phương Y [δ_{CY}]	Sai số góc của trục C theo phương Y [α_{CY}]
Trục A	Sai số vị trí của trục A theo phương Y [δ_{AY}]	Sai số góc của trục A theo phương Y [α_{AY}]
	Sai số vị trí của trục A theo phương Z [δ_{AZ}]	Sai số góc của trục A theo phương Z [α_{AZ}]

3. Xây dựng mô hình lỗi và hệ tọa độ động học

Mô hình lỗi được xây dựng với mục đích miêu tả vị trí cũng như hướng của đầu dao cắt trong hệ tọa độ của phôi. Trong rất nhiều các nghiên cứu đã cho thấy, với giả thuyết là thiết bị được liên kết bằng các thành phần động học liên tiếp, hệ ma trận chuyển vị (Homogeneous Transformation Matrix) được xem như là một giải pháp hữu hiệu để miêu tả mối liên hệ giữa hai hệ tọa độ thành phần liên tiếp.

Dựa trên kết cấu máy như Hình 1 và chuỗi liên kết các hệ tọa độ thành phần động học máy được thể hiện như Hình 2, trong đó hệ tọa độ tham chiếu được đặt tại vị trí gốc của trục Z trong hệ tọa độ máy. Suy ra, tọa độ của đầu dao cắt sẽ được thể hiện trên hệ tọa độ của phôi gia công bằng phương trình sau:

$${}^wT_t = \left({}^rT_w \right)^{-1} \times {}^rT_t \quad (1)$$

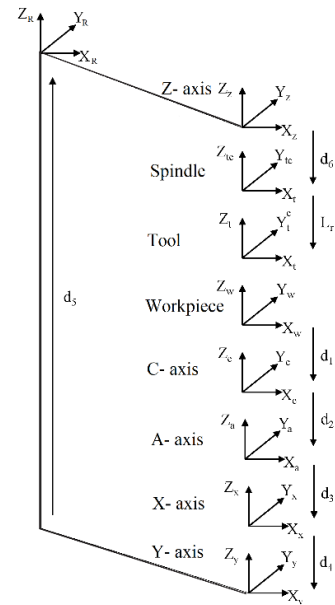
Trong đó, w, t và r lần lượt là hệ tọa độ của phôi (workpiece), dao (tool) và hệ tham chiếu. Do đó wT_t là ma trận chuyển vị biểu diễn hệ tọa độ t lên hệ tọa độ w, tương tự cho 2 trường hợp rT_t và rT_w . Suy ra, tọa độ [x, y, z] và hướng [i, j, k] của dao được xác định bằng công thức sau:

$$\begin{aligned} P &= [x \ y \ z \ 1]^T = {}^wT_t \times [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \\ Q &= [i \ j \ k \ 0]^T = {}^wT_t \times [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T \end{aligned} \quad (2)$$

Sử dụng phần mềm MATLAB để giải phương trình (2) cho kết quả như sau:

$$\begin{aligned} i &= \sin(A) \times \sin(C) \\ j &= \sin(A) \times \cos(C) \\ k &= \cos(A) \\ x &= (-D + Z) \times \sin(A) \times \sin(C) - Y \times \cos(A) \times \sin(C) - \\ &\quad - X \times \cos(C) + Y_{ac} \times \sin(C) \times (1 - \cos(A)) \\ y &= X \times \sin(C) - Y \times \cos(A) \times \cos(C) + \\ &\quad + (-D + Z) \times \cos(C) \times \sin(A) + Y_{ac} \times \cos(C) \times (1 - \cos(A)) \\ z &= (-D + Z) \times \cos(A) - d_1 - d_2 + Y \times \sin(A) + Y_{ac} \times \sin(A) \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó: $D = L_r + d_3 + d_4 - d_5 + d_6$. Ngoài ra, $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$ và Y_{ac} là tham số hình học của máy được quy định bởi nhà sản xuất. A, C, X, Y và Z là giá trị điều khiển các trục quay của máy CNC và bàn xoay. Từ phương trình (3), ta có thể thấy, giá trị định hướng hoàn toàn phụ thuộc vào các trục quay.



Hình 2. Chuỗi liên kết động học

Với việc thêm các thành phần lỗi trong Bảng 1 vào công thức (1), vị trí (P_t) và hướng (Q_t) thực tế của đầu dao cắt trong hệ tọa độ của phôi được tính bằng công thức sau đây:

$$\begin{aligned} P_t &= [x' \ y' \ z' \ 1]^T = {}^wT'_t \times [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \\ Q_t &= [i' \ j' \ k' \ 0]^T = {}^wT'_t \times [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T \end{aligned} \quad (4)$$

Phương trình (4) cho kết quả như sau:

$$\begin{aligned} i' &= \sin(A) \times \sin(C) - \alpha_{AY} \times \cos(C) - \\ &\quad - \alpha_{CY} \times \cos(A) \times \cos(C) - \alpha_{CZ} \times \cos(A) \times \sin(C) \\ j' &= \alpha_{AY} \times \sin(C) + \cos(C) \times \sin(A) + \\ &\quad + \alpha_{CX} \times \cos(A) \times \cos(C) + \alpha_{CY} \times \cos(A) \times \sin(C) \\ k' &= \cos(A) - \alpha_{CX} \times \sin(A) \\ x' &= (D \times \alpha_{AY} - \delta_{CX} - X - Y \times \alpha_{AZ} + d_2 \times \alpha_{CY}) \times \cos(C) - \\ &\quad - (\delta_{CY} + d_2 \times \alpha_{CX} - Y_{ac}) \times \sin(C) + \\ &\quad + (\alpha_{AZ} \times X - \delta_{AY} - Y - D \times \alpha_{CX}) \times \cos(A) \times \sin(C) + \\ &\quad + (Y \times \alpha_{CX} - X \times \alpha_{AY} - D - \delta_{AZ}) \times \sin(A) \times \sin(C) + \\ &\quad + (D + Y) \times \alpha_{CY} \times \cos(A) \times \cos(C) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y' = & (-\delta_{CY} - d2 \times \alpha_{CX} - Y_{ac}) \times \cos(C) + \\
 & + (\delta_{CX} + X - D \times \alpha_{AY} + Y \times \alpha_{AZ} - d2 \times \alpha_{CY}) \times \sin(C) + \\
 & + (X \times \alpha_{AZ} - \delta_{AY} - Y - D \times \alpha_{CX}) \times \cos(A) \times \cos(C) - \\
 & - (D + \delta_{AZ} + X \times \alpha_{AY} - Y \times \alpha_{CX}) \times \cos(C) \times \sin(A) - \\
 & - D \times \alpha_{CY} \times \cos(A) \times \sin(C) + Y \times \alpha_{CY} \times \sin(A) \times \sin(C) \\
 z' = & Y_{ac} \times \alpha_{CX} - d1 - d2 - X \times \alpha_{CY} + \\
 & + (-D - \delta_{AZ} - X \times \alpha_{AY} + Y \times \alpha_{CX}) \times \cos(A) + \\
 & + (\delta_{AY} + Y - X \times \alpha_{AZ} + D \times \alpha_{CX}) \times \sin(A)
 \end{aligned} \quad (5)$$

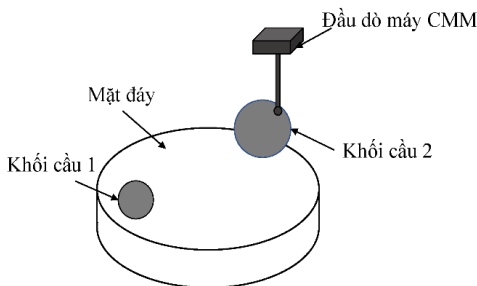
Việc xác định các giá trị số lỗi, cũng là phần quan trọng nhất trong bài báo này, sẽ được trình bày chi tiết trong Mục 4.

4. Quy trình đo đạc và đền bù lỗi

4.1. Thiết kế mẫu và thiết lập đo

Ý tưởng chính trong bài báo này là sử dụng phương pháp đo gián tiếp thông qua việc xác định vị trí của các khối cầu sau mỗi chuyển động của các trục xoay của thiết bị (Hình 3). Sau đó, so sánh các vector sai số được hình thành bởi quy trình trên với vector trục quay danh nghĩa của thiết bị, tất cả các lỗi được đề cập trong Bảng 1 sẽ được xác định.

Thiết kế mẫu đo bao gồm một tấm kim loại phẳng có đường kính $d = 150 \text{ mm}$, 2 khối cầu tiêu chuẩn được sử dụng trong ô bi cỡ lớn có độ chính xác về hình dáng cao, khối 1 có đường kính $D_1 = 26 \text{ mm}$ và khối 2 có đường kính $D_2 = 41 \text{ mm}$. Hai khối cầu này được bố trí cách càng xa trục quay càng tốt nhằm mục đích khuếch đại giá trị đo. Cuối cùng mẫu đo sẽ được lắp vào trục C của bàn xoay. Bàn xoay sẽ được tích hợp với bộ điều khiển và được đặt lên máy đo CMM để tiến hành đo đạc.



Hình 3. Sơ đồ thiết lập mẫu đo

4.2. Quy trình đo

4.2.1. Lỗi vị trí

Quy trình đo được tiến hành tuần tự theo các bước sau:

+ Bước 1: Sử dụng máy đo CMM để xác định tâm quay của trục C, sau đó đặt nó là gốc tọa độ tham chiếu. Bước này thực hiện bằng cách đo tọa độ 3 điểm tùy ý trên vòng tròn bàn xoay C và sử dụng chức năng Circle Fitting Function của máy CMM.

+ Bước 2:

Đối với trục C: điều khiển xoay lần lượt 12 lần, mỗi lần 30 độ (tổng cộng 360 độ). Với mỗi lần quay, sử dụng máy CMM đo tọa độ của 6 điểm tùy ý trên khối cầu 1 và 2. Sử dụng chức năng Sphere Fitting Function của máy CMM để xác định tọa độ gần đúng của tâm khối cầu 1 và 2.

Đối với trục A: tương tự được điều khiển quay tổng cộng 6 lần, mỗi lần 15 độ (tổng cộng 90 độ). Sau đó, các tọa độ tâm khối cầu 1 và 2 sẽ được xác định một cách tự động bằng máy CMM.

+ Bước 3: Từ tập hợp các vị trí tâm khối cầu 1 và 2, ta có thể xây dựng nên hai đường tròn tham chiếu gần đúng như trong Hình 4 và 5.

+ Bước 4: Vector nối tâm hai đường tròn tham chiếu từ bước 3 chính là trục quay thực tế của trục C và A. Chiếu vector đó lên mặt phẳng X_cOY_c (để đo lỗi vị trí trục C) và X_cOZ_c (để đo lỗi vị trí trục A) để xác định các lỗi vị trí của trục A và C (Hình 4 và 5). Một lưu ý là lỗi vị trí của trục A được tính gián tiếp thông qua công thức:

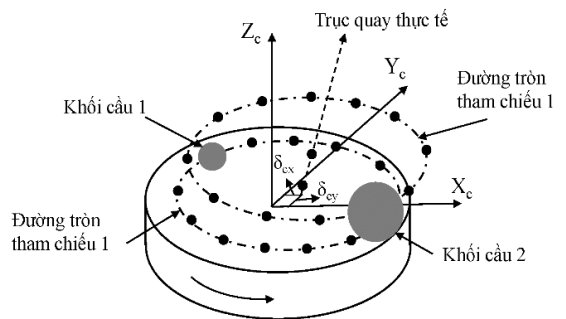
$$\begin{cases} \delta_{AY} = Y_{ac}' - Y_{ac} \\ \delta_{AZ} = Z_{ac}' - d_2 \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó: Y_{ac}' – Khoảng cách danh nghĩa của trục quay A đến trục quay C.

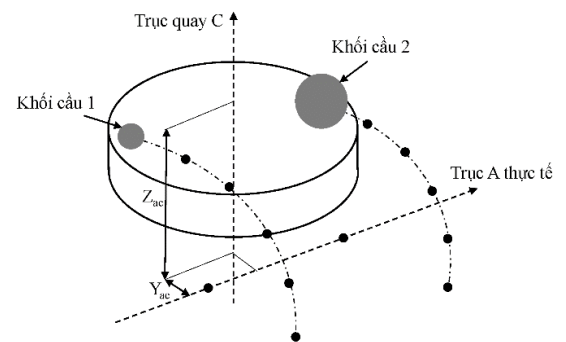
d_2 – Khoảng cách danh nghĩa của hệ tọa độ trục quay A đến hệ tọa độ trục quay C.

4.2.2. Lỗi định hướng

Sai số góc được xác định bằng cách chiếu các vector lỗi được tạo nên từ bước 4 ở Mục 4.2.1 lên các mặt phẳng tham chiếu tương ứng như Hình 4 và 5.



Hình 4. Sơ đồ đo lỗi vị trí của trục quay C



Hình 5. Sơ đồ đo lỗi vị trí của trục quay A

4.3. Giải pháp đền bù lỗi

Giải pháp đền bù lỗi là trực tiếp thay đổi các dòng lệnh điều khiển (NC codes) bằng cách thêm vào các giá trị đền bù để khiến cho đầu dao cắt về đúng vị trí và hướng cắt. Để hoàn thành việc này, một giải pháp đền bù được thực hiện qua các bước sau:

+ Bước 1: Giá trị đền bù cho trục quay để điều chỉnh về hướng cho dao cắt sẽ được tính trước dựa trên các thông số về định hướng Q_{tt} từ phương trình (5) như sau:

Từ Hình 8, có thể chứng minh được tính hiệu quả của quy trình được trình bày trong bài báo này. Có thể dễ dàng thấy, với mỗi cặp góc thử nghiệm (Hình 8), độ chính xác trong chuyển động tịnh tiến của hệ thống máy đã được cải thiện ít nhất là trên 50% và chuyển động quay của trục quay là trên 60%. Đặc biệt, giá trị lỗi định hướng được cải thiện đáng kể nhất. Điều đó hoàn toàn phù hợp với kết quả của phương trình (3) khi giá trị định hướng hoàn toàn phụ thuộc vào trục quay.

Một lưu ý đó là, kết quả đo này được thực hiện trong điều kiện không có tải cũng như đã bỏ qua các lỗi thành phần (một trong hai loại lỗi cấu thành nên lỗi động học [7]) và lỗi định vị của các trục tịnh tiến. Do đó về cơ bản vẫn không thể hoàn toàn loại bỏ các sai số khỏi hệ thống động học máy.

6. Kết luận

Giải pháp mới này đã chứng minh được sự hiệu quả trong việc nâng cao chất lượng hoạt động của các thiết bị bàn xoay 2 trục khi được tích hợp vào các máy CNC 3 trục bằng cách loại bỏ các lỗi định vị. Các ưu điểm của giải pháp này có thể kể đến như: (1) các giá trị lỗi được đo đạc một cách riêng lẻ và không bị ảnh hưởng bởi các yếu tố khác, (2) mẫu đo dễ chế tạo và lắp đặt, giá thành rẻ, (3) có thể mở rộng áp dụng cho các dạng bàn xoay khác. Tuy nhiên, thời gian đo đạc và xử lý số liệu tốn khá nhiều thời gian và cần có máy đo CMM.

Lời cảm ơn: Xin gửi lời cảm ơn đến Trường Đại học Bách

khoa - Đại học Đà Nẵng đã hỗ trợ nghiên cứu này. Mã số đề tài: T2019-02-07.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] W.-T. Lei, W.-C. Wang, and T.-C. Fang, "Ballbar dynamic tests for rotary axes of five-axis CNC machine tools", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 82–83, 2014, pp. 29–41.
- [2] ISO 230-1. Test Code for Machine Tools. Part 1. Geometric Accuracy of Machines Operating Under No-Load or Finishing Conditions, 1996, ISO, Geneva.
- [3] X. Jiang and R. J. Cripps, "A method of testing position independent geometric errors in rotary axes of a five-axis machine tool using a double ball bar", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 89, 2015, pp. 151–158.
- [4] S. Ibaraki, T. Iritani, and T. Matsushita, "Error Calibration on Five-axis Machine Tools by on-the-machine Measurement of Artifacts using a Touch-trigger Probe". in *Proceedings of Fourth CIRP International Conference on High-Performance Cutting*, 2010.
- [5] Trapet E, Waldele F, "A Reference Object Based Method to Determine the Parametric Error Components of Coordinate Measuring Machines and Machine Tools". *Measurement* 9:17–22, 1991.
- [6] Bringmann B, Ku" ng A, Knapp W, "A Measuring Artifact for True 3D Machine Testing and Calibration", *Annals of the CIRP* 54(1):471–474, 2005.
- [7] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, and F. Delbressine, "Geometric error measurement and compensation of machines - An update", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, 2008, pp. 660–675.
- [8] S. Ibaraki, T. Iritani, and T. Matsushita. "Calibration of location errors of rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 58, 2012, pp. 44–53.

(BBT nhận bài: 22/6/2019, hoàn tất thủ tục phản biện: 18/10/2019)