

THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ ĐỘ KHÔNG ĐẢM BẢO TRONG PHÉP ĐO ĐƯỜNG KÍNH MẶT CẦU BẰNG MÁY ĐO TỌA ĐỘ

EXPERIMENTAL EVALUATION OF UNCERTAINTY IN SPHERICAL DIAMETER MEASUREMENT USING A COORDINATE MEASURING MACHINE

Nguyễn Thành Trung

Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

Email: trung.nguyenthanh2@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Máy đo tọa độ (CMM) được sử dụng rộng rãi trong đo lường cơ khí để xác định các đặc trưng hình học của chi tiết từ dữ liệu tọa độ ba chiều. Đối với bề mặt dạng cầu, đường kính được xác định từ tập hợp điểm đo thông qua một tiêu chí xử lý dữ liệu nhất định. Vì vậy, kết quả đo không chỉ chịu ảnh hưởng của sai số CMM và số lượng điểm đo, mà còn phụ thuộc vào tiêu chí xử lý dữ liệu và sai lệch hình dạng của chi tiết đo. Nghiên cứu này xây dựng phương pháp đánh giá độ không đảm bảo đo đường kính mặt cầu theo định hướng của ISO 15530-3 trên cơ sở dữ liệu thực nghiệm định lượng. Thực nghiệm được thực hiện trên máy CMM Mitutoyo Crysta-Apex S544 với hai quy trình lấy mẫu gồm 12 điểm và 20 điểm. Mô hình đánh giá xét đến các thành phần liên quan đến chi tiết chuẩn, độ lặp lại của quy trình đo, sai số hệ thống và sai lệch độ cầu của chi tiết đo. Kết quả cho thấy độ không đảm bảo đo mở rộng lần lượt là 0,00616 mm và 0,00514 mm đối với quy trình đo 12 điểm và 20 điểm, với hệ số phủ $k = 2$.

Từ khóa: Sai lệch độ cầu; Đường kính mặt cầu; Độ không đảm bảo đo; Máy đo tọa độ; Tiêu chí đánh giá.

ABSTRACT

Coordinate measuring machines (CMMs) are widely used in mechanical metrology to determine the geometric characteristics of components from three-dimensional coordinate data. For spherical surfaces, the diameter is determined from a set of measured points using a specific data processing criterion. Therefore, the measurement result is affected not only by CMM errors and the number of measured points, but also by the selected data processing criterion and the form error of the measured workpiece. This study develops a method for evaluating the measurement uncertainty of spherical diameter measurement in accordance with the general approach of ISO 15530-3, based on quantitative experimental data. Experiments were conducted on a Mitutoyo Crysta-Apex S544 CMM using two sampling strategies consisting of 12 and 20 measured points. The evaluation model considers uncertainty components related to the calibrated workpiece, repeatability of the measurement process, systematic error, and sphericity error of the measured workpiece. The results show that the expanded uncertainties are 0.00616 mm and 0.00514 mm for the 12-point and 20-point measurement procedures, respectively, with a coverage factor of $k = 2$.

Keywords: Sphericity error; Sphere diameter; Measurement uncertainty; Coordinate measuring machine; Evaluation criteria.

1. GIỚI THIỆU

Trong nền công nghiệp cơ khí chế tạo hiện nay của Việt nam, các chi tiết được chế tạo phải tuân thủ nghiêm ngặt các yêu cầu về kích thước, vị trí và hình dạng để có thể làm việc đúng chức năng, có hiệu năng cao và cạnh tranh so với sản phẩm của đối thủ. Các bề mặt cầu của các chi tiết như khuôn đúc, khuôn dập, khớp cầu,... thường không thể đo được, hoặc rất khó bảo đảm hiệu quả và độ chính xác đo khi sử dụng các dụng cụ đo thông dụng như panme, đồng hồ so hoặc cầu kế. Do đó, các dạng bề mặt này thường được kiểm tra trên máy đo tọa độ (CMM – Coordinate Measuring Machine), dữ liệu thu được từ CMM được biểu diễn trong hệ tọa độ Oxyz và được xử lý để đồng thời trích xuất ra cả thông số về sai lệch hình dạng và kích thước. Khi đánh giá đường kính và sai lệch độ cầu, dữ liệu tọa độ từ CMM thường được xử lý theo bốn tiêu chí: mặt cầu bình phương tối thiểu (LSS – Least Square Sphere), mặt cầu nội tiếp lớn nhất (MIS – Maximum Inscribed Sphere) [2], mặt cầu ngoại tiếp nhỏ nhất (MCS – Minimum Circumscribed Sphere) [3] và mặt cầu miền tối thiểu (MZS – Minimum Zone Sphere) [4].

Hiện nay, các tiêu chuẩn quốc tế chủ yếu tập trung vào việc thiết lập cơ sở chung cho dung sai hình học, chẳng hạn như ISO 1101 [5], TCVN 5906 [6], hoặc đưa ra các nguyên tắc chung về đánh giá độ không đảm bảo đo [7, 8]. Đối với phép đo đường kính và sai lệch độ cầu trên CMM, tiêu chuẩn ISO 15530-3 [9] cũng chỉ cung cấp khung hướng dẫn tổng quát cho việc đánh giá độ không đảm bảo đo, mà chưa định lượng cụ thể số lượng điểm đo cần thiết cũng như mức độ ảnh hưởng của sai lệch hình học bề mặt đến kết quả đánh giá. Trong một số trường hợp, tiêu chuẩn này còn khuyến nghị bỏ qua ảnh hưởng của sai lệch hình dáng. Tuy nhiên, trên thực tế sai lệch độ cầu có thể

ảnh hưởng đáng kể đến kết quả đo đường kính và độ không đảm bảo đo, đặc biệt khi số lượng điểm lấy mẫu còn hạn chế hoặc phân bố điểm đo chưa hợp lý. Vì vậy, việc khảo sát thực nghiệm với các số lượng điểm đo khác nhau nhằm đánh giá ảnh hưởng của dữ liệu lấy mẫu đến kết quả tính toán độ không đảm bảo đo là cần thiết và có ý nghĩa thực tiễn. Do vậy, bài báo này trình bày phương pháp thực nghiệm tính toán độ không đảm bảo đo đối với đường kính mặt cầu dựa trên dữ liệu tọa độ ba chiều từ CMM.

2. PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ ĐỘ KHÔNG ĐẢM BẢO ĐO

ISO 15530-3 [9] đã quy định phương pháp đánh giá độ không đảm bảo đo đối với các kết quả đo thu được bằng máy đo tọa độ CMM thông qua việc sử dụng chi tiết chuẩn đã hiệu chuẩn hoặc chuẩn đo lường. Theo phương pháp này, phép đo đánh giá độ không đảm bảo được thực hiện trong các điều kiện và quy trình tương tự như phép đo thực tế; tuy nhiên, chi tiết cần đo được thay thế bằng chi tiết chuẩn đã hiệu chuẩn có hình dạng và kích thước tương đồng. Trước khi tiến hành đo, CMM cần được thiết lập, cấu hình và hiệu chuẩn đầu dò theo hướng dẫn vận hành của nhà sản xuất. Đồng thời, cần bảo đảm trạng thái cân bằng nhiệt phù hợp giữa chi tiết chuẩn và CMM. Các yếu tố liên quan đến gá kẹp, số lượng và chiến lược lấy điểm, quy trình gá/tháo chi tiết, tốc độ đo cũng cần được duy trì tương đương với điều kiện đo thực tế.

Một chu kỳ đo thực tế trên chi tiết bao gồm các thao tác gá đặt, xử lý chi tiết và thực hiện phép đo. Khi đánh giá độ không đảm bảo theo [9], chi tiết cần đo được thay thế bằng chi tiết chuẩn đã hiệu chuẩn, trong khi quy trình đo, điều kiện đo và chiến lược đo được duy trì tương tự phép đo thực tế. Trong báo cáo đo, kết

quả đo y và độ không đảm bảo đo mở rộng U được biểu diễn dưới dạng $y \pm U$. Độ không đảm bảo mở rộng được xác định theo:

$$U = k \sqrt{u_{\text{cal}}^2 + u_p^2 + u_b^2 + u_w^2} \quad (1)$$

Trong đó:

- k là hệ số phủ, thường lấy $k = 2$ tương ứng với xác suất phủ xấp xỉ 95%;
- u_{cal} là độ không đảm bảo chuẩn liên quan đến độ không đảm bảo hiệu chuẩn của chi tiết chuẩn, được nêu trong chứng nhận hiệu chuẩn;

- u_p là độ không đảm bảo chuẩn liên quan đến quy trình đo;

- u_b là độ không đảm bảo chuẩn do sai số hệ thống của quy trình đo;

- u_w là độ không đảm bảo chuẩn liên quan đến sự khác biệt giữa chi tiết chuẩn và chi tiết cần đo.

Các thành phần đóng góp vào độ không đảm bảo của phép đo được liệt kê trong bảng 1 dưới đây:

Bảng 1. Các thành phần độ không đảm bảo và cách xem xét trong đánh giá độ không đảm bảo đo.

Thành phần độ không đảm bảo	Phương pháp đánh giá theo GUM	Ký hiệu
Sai số hình học của CMM	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Nhiệt độ của CMM	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Độ trôi của CMM	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Nhiệt độ của chi tiết	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Sai số hệ thống của hệ thống đầu dò	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Độ lặp lại của CMM	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Độ phân giải thước đo của CMM	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Gradient nhiệt độ của CMM	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Sai số ngẫu nhiên của hệ thống đầu dò	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Độ không đảm bảo khi thay đổi đầu dò	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Sai số gây ra bởi quy trình gá kẹp,...	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Sai số gây ra bởi bụi bẩn	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Sai số gây ra bởi chiến lược đo	A	Được đánh giá gộp trong u_p
Độ không đảm bảo hiệu chuẩn của chi tiết chuẩn đã hiệu chuẩn	B	u_{cal}
Tất cả yếu tố đóng góp vào u_p và nhiệt độ trong quá trình đánh giá chi tiết chuẩn	B	u_b
Sự khác biệt giữa chi tiết cần đo và chi tiết đã hiệu chuẩn về: độ nhám, sai lệch hình dạng,...	A hoặc B	u_w

Các độ không đảm bảo chuẩn riêng lẻ được đánh giá như sau.

*** Độ không đảm bảo chuẩn của chi tiết chuẩn đã hiệu chuẩn u_{cal} :**

Được xác định từ độ không đảm bảo đo mở rộng U_{cal} và hệ số phủ k , được cho trong chứng nhận hiệu chuẩn.

$$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k} \quad (2)$$

*** Độ không đảm bảo do quy trình đo**

a) Độ không đảm bảo chuẩn u_p của quy trình đo được xác định theo công thức:

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

Với $\bar{y}$ là giá trị trung bình của các lần đo y_i , n là số lần đo.

Thực chất công thức này chính là độ lệch chuẩn thực nghiệm của tập dữ liệu đo, tức đánh giá kiểu A theo GUM. Nó phản ánh tổng hợp các ảnh hưởng như: độ lặp lại của CMM, sai số đầu dò, chiến lược đo, gá đặt, thay đổi nhiệt, bụi bẩn, thao tác người vận hành.

b) Sai số hệ thống b :

Sai số hệ thống là chênh lệch giữa giá trị chỉ thị của CMM và giá trị đã hiệu chuẩn của chi tiết chuẩn (x_{cal}):

$$b = \bar{y} - x_{cal} \quad (4)$$

Theo khuyến nghị của GUM, kết quả đo phải được hiệu chỉnh theo lượng sai số hệ thống. Trong trường hợp việc hiệu chỉnh này không khả thi, kết quả đo có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$Y = y - b \pm U \quad (5)$$

Trong trường hợp này, độ không đảm bảo u_b được tính theo:

$$u_b = (T - 20^\circ\text{C}) \times u_\alpha \times l \quad (6)$$

Trong đó:

- u_α là độ không đảm bảo chuẩn của hệ số giãn nở nhiệt của chi tiết chuẩn đã hiệu chuẩn;
- T là nhiệt độ trung bình của chi tiết chuẩn đã hiệu chuẩn trong quá trình đánh giá độ không đảm bảo đo;
- l là kích thước được đo.

*** Độ không đảm bảo chuẩn u_w từ quá trình chế tạo**

Các biến thiên của sai lệch hình dạng và độ nhám do quá trình chế tạo thay đổi, cũng như các biến thiên về độ dẻo do thay đổi vật liệu và tính chất bề mặt của các chi tiết đo, sẽ ảnh hưởng đến độ không đảm bảo của phép đo. Độ không đảm bảo chuẩn u_{wp} bao gồm các ảnh hưởng này. Nếu không thể bỏ qua các đóng góp độ không đảm bảo của quá trình chế tạo, thì phải xem xét thêm các yếu tố bổ sung trong u_{wp} . Các dung sai tương ứng về hình dạng và độ nhám có thể được dùng để đánh giá các đóng góp này.

Ngoài ra, một đóng góp độ không đảm bảo đáng kể phát sinh từ sự biến thiên của hệ số giãn nở nhiệt của các chi tiết được đo. Đại lượng này, u_{wt} , được tính bằng:

$$u_{wt} = (T - 20^\circ\text{C}) \times u_\alpha \times l \quad (7)$$

Trong đó:

- u_α là độ không đảm bảo chuẩn của hệ số giãn nở nhiệt của các chi tiết; giá trị này có thể được đánh giá từ dải hệ số giãn nở nhiệt do nhà cung cấp vật liệu cung cấp;

- T là nhiệt độ trung bình của chi tiết trong quá trình đo;
- l là kích thước được đo.

Khi đó, u_w được tính như sau:

$$u_w = \sqrt{u_{wt}^2 + u_{wp}^2} \quad (8)$$

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

Quả cầu chuẩn Mitutoyo có đường kính hiệu chuẩn 19,97523 mm và sai lệch độ cầu 0,13 μm , được sử dụng làm chi tiết chuẩn đã hiệu chuẩn. Theo giấy chứng nhận hiệu chuẩn, độ không đảm bảo đo mở rộng của đường kính quả cầu chuẩn là $U_{cal} = 0,2 \mu\text{m}$ với hệ số phủ $k = 2$. Dựa trên hướng dẫn chung của ISO 15530-3 [9] về đánh giá độ không đảm bảo đo bằng chi tiết chuẩn, quả cầu chuẩn được đo lặp lại tổng cộng 40 lần, trong đó gồm 20 lần đo theo chiến lược 12 điểm và 20 lần đo theo chiến lược 20 điểm. Sau khi hoàn thành phép đo trên quả cầu

chuẩn, bi cầu cần đo được gá đặt tại vị trí gần với quả cầu chuẩn nhằm duy trì điều kiện đo tương đồng. Bi cầu này sau đó được đo lặp lại 10 chu kỳ cho mỗi chiến lược đo, tương ứng với 12 điểm và 20 điểm đo trên bề mặt cầu. Các phép đo được thực hiện trên máy đo tọa độ Mitutoyo Crysta Apex S544 có sai số cho phép lớn nhất $E_{0,MPE} = 2,2 + 4L/1000 \mu\text{m}$, như thể hiện trong Hình 1 trong điều kiện nhiệt độ $26 \pm 0,5^\circ\text{C}$, độ ẩm tương đối $60 \pm 5\%$. Kết quả đo đường kính của mặt cầu chuẩn và bi cầu đo được trình bày ở Bảng 2.



Hình 1. Quả cầu đã hiệu chuẩn được đo trên máy đo tọa độ Mitutoyo Crysta Apex S544.

Bảng 2. Kết quả đo đường kính của quả cầu chuẩn và bi cầu đo trên CMM (mm)

Lần đo	Quả cầu chuẩn, 12 điểm	Quả cầu chuẩn, 20 điểm	Bi cầu đo, 12 điểm	Bi cầu đo, 20 điểm
Giá trị trung bình	19,97576	19,97422	20,00119	20,00154
Độ lệch chuẩn s_D	0,00145	0,00126	0,00271	0,00223
Khoảng biến thiên $\Delta = D_{max} - D_{min}$	0,0055	0,0048	0,0098	0,0066

Như trình bày ở mục 2, độ không đảm bảo đo chuẩn của phép đo đường kính mặt cầu được xác định từ bốn thành phần chính:

- Thứ nhất, độ không đảm bảo đo chuẩn liên quan đến độ không đảm bảo hiệu chuẩn của chi tiết chuẩn được lấy theo chứng nhận hiệu chuẩn: $u_{cal} = 0,0001 \text{ mm}$.

- Thứ hai, độ không đảm bảo đo do độ lặp lại của quy trình đo được xác định từ độ lệch chuẩn của các kết quả đo lặp lại. Cụ thể, đối với quy trình đo 12 điểm và 20 điểm:

$$u_{p,12} = s_{D,12} = 0,00145 \text{ mm}$$

$$u_{p,20} = s_{D,20} = 0,00126 \text{ mm}$$



- Thứ ba, độ không đảm bảo đo chuẩn liên quan đến sai số hệ thống của quy trình đo được xác định theo ảnh hưởng của sai lệch nhiệt độ so với nhiệt độ chuẩn 20°C bằng công thức (6), với $l \approx 20 \text{ mm}$ và $u_a = 1,0 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$, giá trị độ không đảm bảo đo do thành phần này là $u_b = 0,00012 \text{ mm}$. Giá trị u_b được áp dụng giống nhau cho cả hai quy trình đo 12 điểm và 20 điểm. Tuy nhiên, kết quả đường kính đo được cần được hiệu chỉnh theo sai số hệ thống b , với các giá trị tương ứng: $b_{12} = 0,00053 \text{ mm}$ và $b_{20} = -0,00101 \text{ mm}$.

- Thứ tư, độ không đảm bảo đo chuẩn do quá trình chế tạo của chi tiết đo u_w bao gồm hai thành phần u_{wt} và u_{wp} . Trong các phép đo thực nghiệm, chi tiết đo coi như có cùng điều kiện nhiệt độ với quả cầu chuẩn; đồng thời kích thước và độ không đảm bảo đo của hệ số giãn nở nhiệt được xem là tương đương. Do đó, thành phần $u_{wt} = 0,00012 \text{ mm}$.

Đối với u_{wp} , ảnh hưởng của tính đàn hồi và tính chất bề mặt được xem là không đáng kể do chi tiết đo là vật liệu kim loại cứng, bề mặt không có lớp phủ mềm và phép đo được thực hiện bằng đầu đo tiếp xúc với lực đo nhỏ. Ảnh hưởng của độ nhám bề mặt cũng không được xét riêng, do đầu đo cầu có đường kính lớn hơn nhiều so với kích thước đặc trưng của các nhấp nhô tế vi; vì vậy ảnh hưởng này được xem là nhỏ và đã được phản ánh trong thành phần độ lặp lại của quy trình đo u_p .

Do đó, u_{wp} được xem là ảnh hưởng chủ yếu của sai lệch hình dạng bề mặt. Ảnh hưởng này có thể được đánh giá thông qua độ lệch chuẩn của các kết quả đo đường kính khi đo lặp lại chi tiết, hoặc ước lượng theo sai lệch độ cầu quy định trên bản vẽ. Trong nghiên cứu này, chi tiết dạng cầu được đo lặp lại 10 lần đối với mỗi quy trình đo 12 điểm và 20 điểm. Vì vậy, u_{wp} được lấy bằng độ lệch chuẩn s_D của các kết quả đo đường kính, với:

$$\begin{aligned} u_{wp,12} &= 0,00271 \text{ mm} \\ u_{wp,20} &= 0,00223 \text{ mm} \end{aligned}$$

Từ các thành phần trên, độ không đảm bảo đo chuẩn tổng hợp đối với quy trình đo 12 điểm và 20 điểm được xác định như sau:

$$\begin{aligned} u_{c,12} &= \sqrt{u_{cal}^2 + u_{p,12}^2 + u_b^2 + u_{w,12}^2} = 0,00308 \text{ mm} \\ u_{c,20} &= \sqrt{u_{cal}^2 + u_{p,20}^2 + u_b^2 + u_{w,20}^2} = 0,00257 \text{ mm} \end{aligned}$$

Do đó, kết quả đo đường kính của bi cầu khi áp dụng quy trình đo 12 điểm và 20 điểm được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} D_{12} &= \bar{D}_{12} - b_{12} + k \cdot u_{c,12} \\ &= 20,00065 \pm 0,00616 \text{ mm} \end{aligned}$$

và:

$$\begin{aligned} D_{20} &= \bar{D}_{20} - b_{20} + k \cdot u_{c,20} \\ &= 20,00255 \pm 0,00514 \text{ mm} \end{aligned}$$

Trong đó, $k = 2$ là hệ số phủ, tương ứng với mức tin cậy xấp xỉ 95%.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã áp dụng phương pháp thực nghiệm đánh giá độ không đảm bảo đo đường kính mặt cầu trên máy đo tọa độ CMM theo hướng dẫn của ISO 15530-3. Phương pháp sử dụng quả cầu chuẩn đã hiệu chuẩn để xác định các thành phần độ không đảm bảo liên quan đến quy trình đo, sai số hệ thống của CMM và kết hợp thêm thành phần do sai lệch hình dạng của chi tiết đo chưa được hiệu chuẩn.

Kết quả thực nghiệm trên máy CMM Mitutoyo Crysta-Apex S544 cho thấy quy trình đo 20 điểm cho kết quả ổn định hơn so với quy trình đo 12 điểm. Độ không đảm bảo đo mở rộng của phép đo đường kính bi cầu giảm từ

0,00616 mm xuống 0,00514 mm khi số điểm đo tăng từ 12 lên 20 điểm, tương ứng mức giảm khoảng 16,6% với hệ số phủ $k = 2$. Điều này cho thấy việc tăng số điểm lấy mẫu có thể làm giảm ảnh hưởng của sai lệch hình dạng cục bộ và cải thiện độ tin cậy của kết quả xác định đường kính mặt cầu trên CMM. Kết quả cũng cho thấy khi đo chi tiết chưa được hiệu chuẩn, việc xét đến thành phần độ không đảm bảo do sai lệch hình dạng của chi tiết đo là cần thiết. Thành phần này giúp mô hình đánh giá độ không đảm bảo đo phản ánh sát hơn điều kiện đo thực tế, thay vì chỉ dựa vào độ lệch chuẩn của đường kính chi tiết chuẩn. Vì vậy, đối với các phép đo đường kính mặt cầu từ tập hợp điểm đo trên CMM, cần xem xét đồng thời sai số của thiết bị đo, chiến lược lấy điểm, tiêu chí xử lý dữ liệu và đặc điểm hình dạng của chi tiết đo. ❖

Ngày nhận bài: 10/6/2026

Ngày phản biện: 25/6/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Chen, K. W., & Papadopoulos, A. S. (1996), "Comparison of the linear least squares and nonlinear least squares spheres". *Microelectronics Reliability*, 36(1), 37-46.
- [2]. Fanwua, M. E. N. G., Chunguang, X. U., Haiming, L. I., & Juan, H. (2011), "Sphericity evaluation using maximum inscribed sphere method". *Procedia Engineering*, 24, 737-742.
- [3]. Feng, H. Y., Endrias, D. H., Taher, M. A., & Song, H. (2013), "An accurate and efficient algorithm for determining minimum circumscribed circles and spheres from discrete data points". *Computer-Aided Design*, 45(2), 105-112.
- [4]. Huang, J. (1999), "An exact minimum zone solution for sphericity evaluation". *Computer-Aided Design*, 31(13), 845-853.
- [5]. ISO 1101:2017, "Geometrical product specifications (GPS) - Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location and run-out".
- [6]. Tiêu chuẩn Quốc Gia TCVN 5906:2007, "Đặc tính hình học của sản phẩm (GPS) - dung sai hình học – dung sai hình dạng, hướng, vị trí và độ đảo".
- [7]. ISO/IEC GUIDE 98-3:2008(E), "Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)".
- [8]. JCGM 100:2008, "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement".
- [9]. ISO 15530-3, "Geometrical product specifications (GPS) - Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards".