

NHẬN DẠNG VÀ XÂY DỰNG MÔ HÌNH SAI SỐ THỂ TÍCH TRÊN TRUNG TÂM GIA CÔNG CNC 3 TRỤC BẰNG PHƯƠNG PHÁP BIẾN ĐỔI THUẬN NHẤT DỰA TRÊN CHUỖI ĐỘNG HỌC VẬT RẮN

VOLUMETRIC ERROR IDENTIFICATION AND MODEL CONTRIBUTION ON THE THREE AXES VERTICAL MACHINING CENTER USING HOMOGENEOUS TRANSFORMATION APPROACH BASED ON RIGID BODY KINEMATICS

Nhữ Quý Thơ

TÓM TẮT

Sai số thể tích bao gồm các sai số hình học và động học là những thành phần có ảnh hưởng quan trọng đến độ chính xác gia công chi tiết. Việc nghiên cứu tác động của các sai số này lên sai số tổng hợp khi gia công trên máy CNC được đặt ra cấp thiết. Bài báo trình bày phương pháp nhận dạng và xây dựng mô hình sai số thể tích trên trung tâm gia công CNC 3 trục dựa trên giả thiết chuỗi động học vật rắn máy công cụ và phương pháp biến đổi thuận nhất. Các phương trình sai số tổng hợp theo mỗi phương được thiết lập làm cơ sở toán học để đánh giá ảnh hưởng của từng sai số thành phần lên độ chính xác gia công cũng như xây dựng phương pháp bù sai số.

Từ khóa: Sai số hình học, sai số động học, sai số thể tích, biến đổi thuận nhất, máy công cụ CNC.

ABSTRACT

Volumetric errors including geometric and kinematic errors are the components which influence strongly on part cutting accuracy. Thus, researching the affect of the errors on total error in CNC machine is indispensable. This paper presents a volumetric error identification method as well as model contribution on 3 axis CNC machine based on rigid body kinematics assumption and homogeneous transformation. The total error equations for 3 axes are established to evaluate the affects of each component error on cutting accuracy and to build the error compensation method.

Keywords: Geometric errors, kinematic errors, volumetric errors, homogeneous transformation, CNC machine.

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

Email: thonhuquy@gmail.com

Ngày nhận bài: 15/01/2019

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/4/2019

Ngày chấp nhận đăng: 10/6/2019

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Độ chính xác của chi tiết gia công được đánh giá dựa trên sự sai khác giữa chi tiết thực và chi tiết thiết kế. Trong quá trình gia công cắt gọt thì độ chính xác phụ thuộc vào vị

trí tương quan tức thời giữa dụng cụ cắt và phôi. Những nhân tố gây sai lệch vị trí tương quan này sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác chi tiết gia công và được phân làm các loại như sau:

+ Các nhân tố liên quan đến biến dạng cấu trúc là những nhân tố có liên quan đến tải trọng động như: Lực cắt, rung động, mòn dao, mômen quán tính, vận tốc, gia tốc, va chạm,... hay các yếu tố tải trọng tĩnh như khối lượng chi tiết gia công, khối lượng bàn dao, đồ gá và các thành phần cấu trúc máy.

+ Các nhân tố nhiệt độ tác động lên máy, phôi và dụng cụ cắt

Các nguồn sinh ra nhiệt bao gồm: Nhiệt sinh ra từ quá trình cắt; nhiệt sinh ra từ máy; nhiệt thay đổi từ các hệ thống như tưới nguội, làm mát; nhiệt thay đổi từ con người tiếp xúc với quá trình chế tạo, nhiệt độ môi trường làm việc và của các máy móc kề bên. Nhiệt độ gây ra biến dạng nhiệt về hình dáng và kích thước các chi tiết cấu thành nên hệ thống công nghệ.

+ Các nhân tố liên quan đến hệ điều khiển chuyển động

Sai số gia công có thể xảy ra đối với hệ thống điều khiển chuyển động liên quan đến: Độ chính xác điều khiển vị trí, khe hở truyền động, thao tác điều khiển của người vận hành (chẳng hạn xét các điểm gốc phôi, gốc dao,...), phần mềm điều khiển nội suy, kỹ thuật điều khiển động cơ, sai lệch thời gian thực,...

+ Các sai số hình học và động học máy công cụ

Sai số hình học (*Geometric errors*) là những sai lệch hình học do chế tạo và lắp ráp các chi tiết, bộ phận của máy công cụ như sống trượt, ổ đỡ, vít me,... hoặc có nguyên nhân từ các va chạm hay mòn theo thời gian. Sai số động học (*Kinematic errors*) là những sai lệch về vị trí giữa vị trí chuyển động thực so với vị trí lý thuyết. Những sai lệch này gắn với các trục dịch chuyển theo thời gian thực dưới sự kiểm soát của hệ thống điều khiển. Các sai số động học có quan hệ rất gần gũi với sai số hình học, được xác định dựa trên cấu trúc động học máy và chuyển động của các trục.

Người ta sử dụng thuật ngữ sai số thể tích (*Volumetric errors*) để chỉ chung cho các loại sai số hình học và động học vì chúng được xác định dựa trên việc xây dựng một hệ tọa độ tham chiếu có tính đến các yếu tố chuyển động theo thời gian thực. Việc xác định các sai số hình học và động học là rất cần thiết đối với các nhà chế tạo máy. Nhờ đó các nhà sản xuất hiệu chuẩn (*Calibration*) máy để giảm ảnh hưởng của các sai số này.

Các nghiên cứu [1, 2, 3] chỉ ra rằng các sai số hình học, động học máy công cụ và nhiệt độ ảnh hưởng đến khoảng 70% sai số tổng hợp khi gia công trên máy công cụ CNC.

Độ chính xác hình học máy công cụ đã được nói đến từ những năm 1930. Giáo sư Schlesinger - Đức đã đưa ra các thông số kỹ thuật về độ chính xác và phương pháp đánh giá độ chính xác của máy mà sau này trở thành tiêu chuẩn đánh giá quốc gia và quốc tế. Sau đó vào năm 1970, Tlustý đề xuất một phương pháp dựa trên việc xác định sai số của các chuyển động cắt gọt và ảnh hưởng của chúng lên sai số của chi tiết gia công. Việc ra đời hệ thống đo bằng laser đã cho phép xác định sai số động học và hình học với độ chính xác cao hơn.

Donmez giới thiệu một phương pháp để nâng cao độ chính xác các máy công cụ bằng cách xây dựng mô hình toán, xây dựng quan hệ giữa sai lệch tương quan giữa dụng cụ cắt và phôi với các sai số các phần tử cấu trúc đơn lẻ của máy công cụ. Các sai số hình học và nhiệt độ đều được xem xét trong mô hình này. Sử dụng phép biến đổi thuận nhất với giả thiết là hệ cơ học rắn. Mỗi một trục chuyển động được gắn với một hệ tọa độ, được mô tả trong hệ tọa độ tương đối và hệ tọa độ cố định [4].

Ferreira và Liu đề xuất 1 mô hình phân tích bậc 4 để dự báo các sai số hình học của máy công cụ sử dụng chuỗi động học rắn. Mô hình này cho phép sự biến đổi các sai số vị trí và góc cũng như vector sai số tương quan tại các vị trí điểm trong không gian làm việc của máy tương ứng với điểm đó trong các hệ tọa độ về kích cỡ và dạng sai số của các khâu, khớp đơn lẻ trong chuỗi động học máy [5].

Okafor và Ertekin đã mô hình máy Cincinnati Milacron Sabre 750 ba trục CNC VMC bằng cách nhân các ma trận chuyển vị theo mỗi trục. Họ chứng minh được rằng sai số thể tích tăng lên theo thời gian sử dụng máy và thay đổi tùy theo cấu trúc của từng máy [6, 7].

Zhenya He đã xây dựng mô hình sai số máy công cụ trên quan điểm hệ nhiều vật và sử dụng phép đo véc tơ đường chéo để xác định các sai số từ đó đưa ra phương pháp bù. Kết quả cho thấy độ chính xác máy tăng lên 63% [2].

Hầu hết các nghiên cứu về sai số hình học và động học máy công cụ CNC đều coi hệ máy là hệ cơ học vật rắn để mô hình hóa các sai số. Từ đó xây dựng các phương trình sai số tổng hợp theo các khâu thành phần các thành phần chuỗi động học.

2. SAI SỐ THỂ TÍCH TRÊN MÁY CNC 3 TRỤC

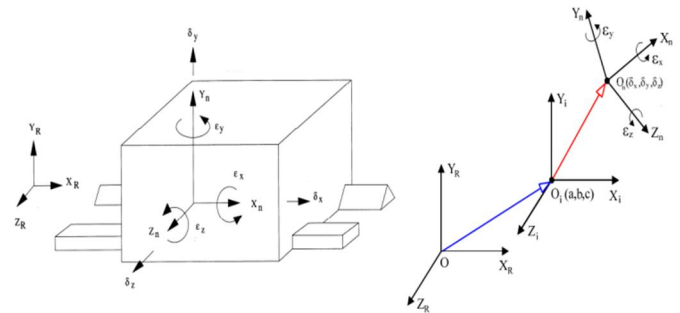
Nhìn chung, các sai số thể tích được phân tích dựa trên cấu trúc từng loại máy, đặc biệt là các trục chuyển động.

Chúng được xác định theo từng trục đơn lẻ và quan hệ giữa các trục với nhau.

Máy nhiều trục được xây dựng là sự kết nối của các khâu tuần tự thông qua các khớp quay hoặc tịnh tiến. Sử dụng động học vật rắn, mô hình mỗi trục chuyển động của máy gắn với một hệ tọa độ tham chiếu và được chuyển đổi giữa các hệ tọa độ bằng các ma trận biến đổi thuận nhất.

Vị trí của dao và phôi trên máy CNC được xét trên một hệ tọa độ cố định và nhờ đó có thể tính toán được sự tương quan giữa chúng. Trong quá trình hoạt động, các hệ tọa độ tương đối được thiết lập ứng với mỗi chuyển động tạo hình. Với trung tâm gia công CNC 3 trục có 3 chuyển động tịnh tiến theo phương X, Y, Z thì tương ứng có 3 hệ tọa độ tương đối. Vị trí một điểm bất kỳ trên dao (Thường là điểm quy ước cắt gọt) hay trên phôi (Điểm cắt gọt tức thời) được đặt trong các hệ tọa độ tương đối và được tính toán về hệ tọa độ cố định duy nhất. Việc tính toán này dựa trên các chuyển đổi giữa các hệ tọa độ tương đối liên tiếp với nhau và với hệ tọa độ cố định, trong đó các biến thay đổi là các dịch chuyển theo từng trục chuyển động.

Xét chuyển động theo một phương xác định chẳng hạn tịnh tiến theo trục X. Với yêu cầu dịch chuyển một điểm xác định theo phương X giá trị x mô tả như hình 2. Chuyển động này gắn với hệ tọa độ tương đối $O_n X_n Y_n Z_n$. Không gian làm việc được gắn với hệ tọa độ cố định $O X_R Y_R Z_R$



Hình 1. Mô hình hóa khớp trượt (trục tịnh tiến)

Một điểm xác định trong hệ tọa độ $O_n X_n Y_n Z_n$ sẽ có 6 chuyển động tự do là 3 chuyển động tịnh tiến theo 3 trục và 3 chuyển động quay quanh 3 trục. Các chuyển động này chính là các sai số hình học và động học, bao gồm:

+ $\delta_x(x)$ là sai số vị trí tương ứng dọc theo phương X: Đây là sai số theo phương chuyển động danh nghĩa, thay đổi theo vị trí và thời gian của chuyển động chạy dao tương ứng (Chuyển động theo trục X). Nguyên nhân gây ra các sai số này không chỉ do yếu tố hình học chế tạo máy mà còn do nhiều nguyên nhân khác như độ chính xác điều khiển, khe hở truyền động, biến dạng đàn hồi,... Vì sai số này gắn với chuyển động cơ bản nên còn gọi là sai số động học.

+ $\delta_y(x), \delta_z(x)$ là các sai số vị trí của trục X so với trục Y và Z. Chúng còn gọi là sai lệch về độ thẳng của trục X so với Y và Z. Về mặt lý tưởng các sai số này bằng 0.

+ $\epsilon_x(x), \epsilon_y(x), \epsilon_z(x)$ là các sai số góc giữa các trục X, Y, Z so với phương chuyển động X hay còn gọi là sai số roll, pitch, yaw theo phương X.

Tương tự đối với các chuyển động theo trục Y, Z có thêm 6 loại sai số theo mỗi trục. Ngoài ra còn có 3 sai số α_{xy} , α_{xz} , α_{yz} là các sai số độ vuông góc giữa trục X so với trục Y, X so với trục Z và Y so với trục Z.

Như vậy đối với trung tâm gia công CNC đứng 3 trục thì có các sai số hình học và động học như sau:

- + 3 sai số động học, vị trí (Position, kinematic errors): $\delta_x(x), \delta_y(y), \delta_z(z)$
- + 6 sai số về độ thẳng (Straightness errors): $\delta_y(x), \delta_z(x), \delta_x(y), \delta_z(y), \delta_x(z), \delta_y(z)$
- + 9 sai số về góc (Angular errors): $\epsilon_x(x), \epsilon_y(x), \epsilon_z(x), \epsilon_x(y), \epsilon_y(y), \epsilon_z(y), \epsilon_x(z), \epsilon_y(z), \epsilon_z(z)$
- + 3 sai số về độ vuông góc (Squareness errors): $\alpha_{xy}, \alpha_{xz}, \alpha_{yz}$

Tổng cộng có 21 sai số hình học và động học và được gọi chung là các sai số thể tích.

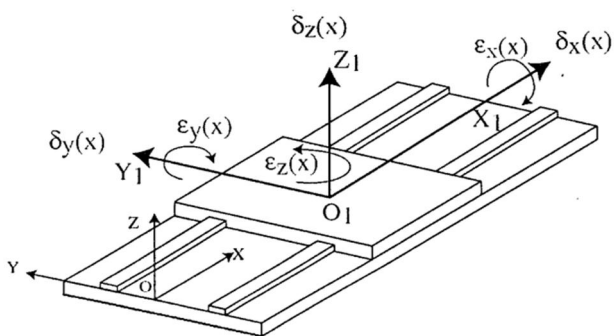
Để nghiên cứu ảnh hưởng của các sai số thành phần lên sai số tổng hợp tác động đến độ chính xác gia công thì phương trình động học máy cần được xây dựng với giả định cấu trúc máy là chuỗi động học rắn và xấp xỉ góc nhỏ.

3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH SAI SỐ THỂ TÍCH TRÊN MÁY CNC 3 TRỤC

3.1. Biến đổi thuận nhất các chuyển động tịnh tiến trong máy

Máy nhiều trục thông thường được xây dựng là sự kết nối của các khâu tuần tự thông qua các khớp quay hoặc tịnh tiến. Sử dụng chuỗi động học vật rắn, mô hình mỗi trục chuyển động của máy gắn với một hệ tọa độ tham chiếu và được chuyển đổi giữa các hệ tọa độ bằng các ma trận biến đổi thuận nhất.

Máy CNC 3 trục được chia thành các thành phần cơ bản là các khâu được kết nối với nhau bằng các khớp trượt. Mỗi chuyển động tịnh tiến trong hệ tọa độ tham chiếu (cố định) được xét với một hệ tọa độ chuyển đổi (tương đối) và sử dụng các ma trận chuyển đổi. Đối với một chuyển động tịnh tiến theo một trục nào đó, thì các sai số gồm 3 thành phần tịnh tiến được mô tả như hình 2.



Hình 2. Sai số khớp trượt (tịnh tiến)

Ma trận quay T_{ROT} biểu diễn các sai số góc được xác định bằng các ma trận chuyển đổi quay theo từng trục đơn lẻ:

$$T_{ROT} = T_{\theta_x} \cdot T_{\theta_y} \cdot T_{\theta_z}$$

$$T_{ROT} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x & 0 \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Từ đó ta có:

$$T_{ROT} = \begin{bmatrix} \cos\theta_x \cos\theta_z & -\cos\theta_x \sin\theta_z & \sin\theta_x & 0 \\ \sin\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z + \cos\theta_x \sin\theta_z & -\sin\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z + \cos\theta_x \cos\theta_z & -\sin\theta_x \cos\theta_y & 0 \\ -\cos\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z + \cos\theta_x \sin\theta_z & \cos\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z + \sin\theta_x \cos\theta_z & \cos\theta_x \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Với giả thiết là các góc quay nhỏ: giá trị cos của các góc là 1, $\tan(\alpha) \approx \alpha$, tích 2 sai số xấp xỉ 0 nên ma trận quay được biểu diễn:

$$T_{ROT} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z & -\epsilon_y & 0 \\ \epsilon_z & 1 & -\epsilon_x & 0 \\ -\epsilon_y & \epsilon_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ma trận sai số tịnh tiến tổng thể T_{TRANS} bao gồm 3 thành phần tịnh tiến theo 3 trục. Tương tự ma trận quay, ta có:

$$T_{TRANS} = T_x \cdot T_y \cdot T_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_{TRANS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y \\ 0 & 0 & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ma trận tổng hợp sai số E biểu diễn sai số của chuyển động tịnh tiến theo 1 trục:

$$E = T_{ROT} \cdot T_{TRANS}$$

Bỏ qua các giá trị bậc cao khi nhân các sai số, ta có:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z & -\epsilon_y & \delta_x \\ \epsilon_z & 1 & -\epsilon_x & \delta_y \\ -\epsilon_y & \epsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

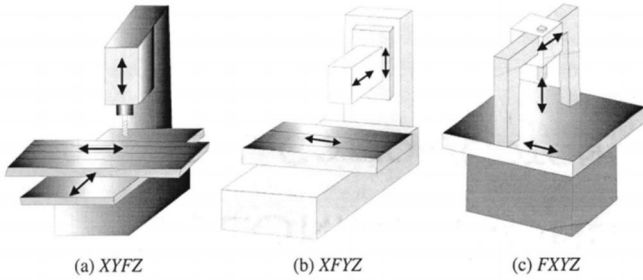
Vì trục tịnh tiến là trục X nên ta biểu diễn lại phương trình (5) như sau:

$$E_x = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z(x) & -\epsilon_y(x) & \delta_x(x) \\ \epsilon_z(x) & 1 & -\epsilon_x(x) & \delta_y(x) \\ -\epsilon_y(x) & \epsilon_x(x) & 1 & \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.2. Mô hình toán máy công cụ

Việc xây dựng mô hình toán để xác định vị trí tương quan giữa dao và chi tiết gia công. Từ đó xác định mà ma trận sai số tổng thể dẫn đến sai số gia công.

Nhìn chung, đối với máy gia công 3 trục có cấu trúc một trong 4 loại là FXYZ, XFYZ, XYFZ và XYZF trong đó ký tự trước F biểu thị chuyển động của phôi (bàn máy) theo các trục trong hệ tọa độ tham chiếu cố định còn các ký tự sau F chỉ hướng trục chuyển động của dao hoặc đầu đo (hình 3).



Hình 3. Các cấu trúc phổ biến của trung tâm 3 trục

Mô hình toán phụ thuộc vào cấu trúc máy công cụ và khác nhau đối với các cấu trúc khác nhau.

Trung tâm gia công CNC 3 trục TC500 có kiểu cấu trúc XYFZ nghĩa là bàn máy dịch chuyển theo trục X và Y trong hệ tọa độ cố định còn dụng cụ cắt dịch chuyển theo trục Z. Cấu trúc máy như hình 4.



Hình 4. Trung tâm phay CNC 3 trục TC500

Do kiểu máy không có trục xoay nên chỉ các ma trận chuyển đổi thuần nhất theo 3 trục tịnh tiến theo phương X, Y, Z được sử dụng để xây dựng mô hình toán.

Các bước xây dựng mô hình toán được thực hiện như sau:

- Bước 1: Gắn các hệ tọa độ cho mỗi chuyển động tịnh tiến.
- Bước 2: Xây dựng các chuyển đổi giữa các hệ trục.
- Bước 3: Xem xét 6 bậc tự do dịch chuyển theo mỗi trục từ đó xây dựng ma trận sai số.
- Bước 4: Nhân ma trận chuyển đổi hướng tương ứng với ma trận sai số để có các chuyển đổi thực tế thể hiện vị trí của điểm xác lập trong không gian làm việc trong hệ tọa độ tham chiếu cố định.

Cấu trúc máy được chia thành các ma trận chuyển đổi tọa độ với giả thiết là các vật rắn. Các ma trận này mô tả mối quan hệ tương quan giữa vị trí của mỗi trục với các hệ tọa độ tức thời. Nếu có N khâu nối tiếp nhau và các ma trận chuyển đổi xác định được thì vị trí của mũi dao (trục thứ N) được xác định trong hệ tọa độ tham chiếu cố định bằng cách nhân liên tiếp các ma trận chuyển đổi.

$${}^N_0T = \prod_{m=1}^N {}^m_{m-1}T = {}^1_0T \cdot {}^2_1T \cdot {}^3_2T \dots {}^N_{N-1}T \quad (7)$$

Bằng cách này, ta xác định vị trí tương quan của mũi dao cắt và 1 điểm trên phôi tiếp xúc với mũi dao.

Nếu T_{TOOL} là các ma trận chuyển đổi tổng hợp của dụng cụ cắt và T_{WORK} là ma trận chuyển đổi của điểm cắt phôi thì chúng phải giống nhau. Tuy nhiên do có các sai số trong quá trình cắt gọt, hai ma trận này được biểu diễn trong hai hệ tọa độ tách rời. Điều này chính là nguyên nhân gây sai số gia công.

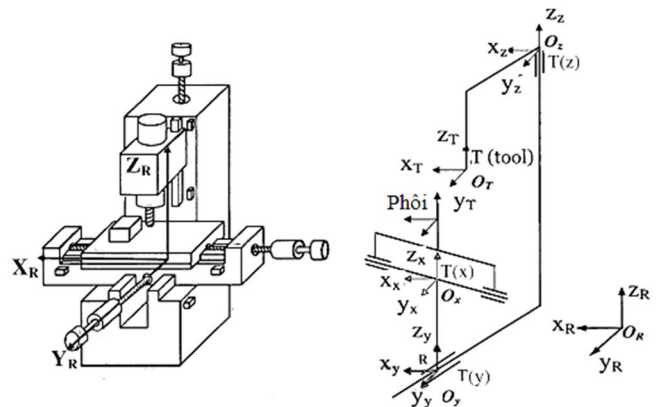
Ma trận sai số được biểu diễn thông qua phương trình:

$$T_{TOOL} = T_{WORK} \cdot E \quad (8)$$

Từ đó ta có:

$$E = T_{WORK}^{-1} T_{TOOL} \quad (9)$$

Đối với máy gia công kiểu cấu trúc XYFZ, việc gắn các hệ tọa độ tương đối sao cho các chuyển đổi là đơn giản nhất. Cấu trúc máy bao gồm: dụng cụ cắt, trục chính, thân máy, đường trượt và bàn máy. Trục chính kết nối với thân máy bằng một khớp trượt lẳng trụ. Các đường trượt nằm trên thân máy và kết nối với bàn máy bằng các khớp trượt. Cuối cùng dụng cụ cắt được gắn cùng với trục chính.



Hình 5. Mô hình hóa máy công cụ kiểu XYFZ

Hệ tọa độ tham chiếu cố định gắn với thân máy tương ứng điểm góc 0 của máy theo trục Y tại vị trí xuất phát. 1_0T là chuyển đổi giữa hệ tọa độ tham chiếu và hệ tọa độ đường trượt, 2_1T là chuyển đổi giữa đường trượt và bàn máy, 3_2T là chuyển đổi giữa hệ tọa độ trục chính và hệ tọa độ tham chiếu, 4_3T là chuyển đổi giữa hệ tọa độ gắn với trục chính và dụng cụ cắt.

Giả sử rằng các chuyển động quay và tịnh tiến của dụng cụ cắt là không có, khi đó các ma trận chuyển đổi được xác định như sau:

Đường trượt trên thân máy chỉ dịch chuyển theo một trục Y nên:

$${}^2_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Trong đó, y là biến chuyển động dọc theo trục Y.

Bàn máy dịch chuyển theo một trục X:

$${}^2_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Trong đó, x là biến chuyển động dọc theo trục X, Z₁ là hằng số.

Trục chính dịch chuyển theo 1 trục Z nên:

$${}^3_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z+Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Trong đó, z là biến chuyển động dọc theo trục Z, Z₂ là hằng số.

Đối với dụng cụ cắt:

$${}^4_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_t \\ 0 & 1 & 0 & Y_t \\ 0 & 0 & 1 & Z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Trong đó, X_t, Y_t, Z_t là các hằng số offset dao theo phương X, Y, Z.

Từ công thức (8) và (10) ta xác định được các ma trận chuyển đổi thực tế như sau:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(y) & \varepsilon_y(y) & \delta_x(y) \\ \varepsilon_z(y) & 1 & -\varepsilon_x(y) & \delta_y(y) \\ -\varepsilon_y(y) & \varepsilon_x(y) & 1 & \delta_z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(y) & \varepsilon_y(y) & \delta_x(y) \\ \varepsilon_x(y) & 1 & -\varepsilon_x(y) & y+\delta_y(y) \\ -\varepsilon_y(y) & \varepsilon_x(y) & 1 & \delta_z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^2_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & \delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & \delta_y(x) - x\alpha_{xy} \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_1T = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & x+\delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & \delta_y(x) - x\alpha_{xy} \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & Z_1+\delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^3_0T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z+Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(z) & \varepsilon_y(z) & \delta_x(z) - z\alpha_{xy} \\ \varepsilon_z(z) & 1 & -\varepsilon_x(z) & \delta_y(z) - z\alpha_{xy} \\ -\varepsilon_y(z) & \varepsilon_x(z) & 1 & \delta_z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_0T = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(z) & \varepsilon_y(z) & \delta_x(z) - z\alpha_{xy} \\ \varepsilon_z(z) & 1 & -\varepsilon_x(z) & \delta_y(z) - z\alpha_{xy} \\ -\varepsilon_y(z) & \varepsilon_x(z) & 1 & z+Z_2+\delta_z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Sử dụng các ma trận trong phương trình (13) và (16) ta có quan hệ giữa dụng cụ cắt và hệ tọa độ tham chiếu cố định được mô tả bằng phương trình:

$$T_{TOOL} = {}^3_0T {}^4_3T \quad (17)$$

Tương tự, quan hệ giữa phôi trong hệ tọa độ tham chiếu cố định được tính toán:

$$T_{WORK} = {}^1_0T {}^2_1T \quad (18)$$

Phương trình (9) mô tả mối quan hệ giữa dụng cụ cắt và phôi gia công để xác định được ma trận sai số với giả thiết sai số các góc lệch là rất nhỏ và tích giữa hai trong số chúng bằng 0.

Từ đó ta có:

$$E = T_{WORK}^{-1} T_{TOOL} = [R_E \ P_E] \quad (19)$$

$$P_E = \begin{bmatrix} P_E(x) \\ P_E(y) \\ P_E(z) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$P_E(x) = [-x - \delta_x(x) - \delta_x(y) + \delta_x(z) + x_t + y_t(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)) + z_t(-\varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)) - (z + Z_2)(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)) - y(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) - \alpha_{xz}z + z_t\varepsilon_y(x)]$$

$$P_E(y) = [-y - \delta_y(y) - \delta_y(x) + \delta_y(z) + y_t + x_t(-\varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(z)) + x\varepsilon_z(x) + z_t(\varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) + (z + Z_2)(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) - z_t\varepsilon_x(x) + x\alpha_{xz} - z\alpha_{xz}] \quad (21)$$

$$P_E(z) = [z + \delta_z(z) - \delta_z(x) - \delta_z(y) + y(\varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(x)) - x\varepsilon_y(x) + z_t - z_t + z_2 + x_t(\varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)) + y_t(-\varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(z))]$$

Thành phần vectơ vị trí trong ma trận sai số xác lập vị trí thực của dụng cụ cắt khi nó di chuyển đến các điểm (x, y, z). Các lượng bù sai số được tính toán dựa vào vectơ này.

Sự khác nhau giữa giá trị vị trí thực và giá trị mong muốn là các giá trị bù theo các trục chuyển động:

$$\Delta P(x) = [-\delta_x(x) - \delta_x(y) + \delta_x(z) + y_t(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)) + z_t(-\varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)) - (z + Z_2)(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)) - y(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) - \alpha_{xz}z + z_t\varepsilon_y(x)]$$

$$\Delta P(y) = [-\delta_y(y) - \delta_y(x) + \delta_y(z) + x_t(-\varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(z)) + x\varepsilon_z(x) + z_t(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) + (z + Z_2)(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) - z_t\varepsilon_x(x) + x\alpha_{xz} - z\alpha_{xz}] \quad (22)$$

$$\Delta P(z) = [\delta_z(z) - \delta_z(x) - \delta_z(y) + y(\varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(x)) - x\varepsilon_y(x) + x_t(\varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)) + y_t(-\varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(z))]$$

Như vậy, khi xác định được các sai số thành phần, ta có thể lập được bản đồ sai số tổng hợp theo các trục để từ đó xây dựng giải pháp bù sai số trên toàn vùng làm việc của máy.

4. KẾT LUẬN

Các sai số thể tích ảnh hưởng lớn sai số tổng hợp khi gia công trên máy CNC. Vì vậy việc bù các sai số này có ý nghĩa quan trọng trong việc nâng cao độ chính xác máy công cụ mà nhờ đó nâng cao được chất lượng gia công chi tiết. Các sai số hình học và động học sinh ra do quá trình chế tạo, lắp ráp, điều khiển và vận hành máy công cụ. Có 21 thành phần sai số hình học và động học là các sai số thể tích trên máy CNC 3 trục và việc bù sai số là yêu cầu bắt buộc đối với các máy CNC hiện đại.

Xây dựng phương trình sai số tổng hợp theo phương pháp giải tích là cơ sở toán học quan trọng để xét các ảnh hưởng của từng sai số thành phần lên sai số tổng hợp. Từ đó đưa ra các thuật toán bù sai số.

Để xác định sai số tổng hợp này cần có các kết quả đo đạc các sai số hình học và động học thành phần. Việc phân tích, đánh giá ảnh hưởng của chúng cũng như phương pháp bù sẽ được trình bày ở các bài báo tiếp theo.

[9]. Wenjie Tian, Weiguogao, Dawei Zhang, Tian, 2014. *A general approach for error modeling of machine tools*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 79 pp17-23.

[10]. Matuskosinar, Ivan Kuric, 2012. *Geometric errors in CNC machine tools*. The University of Zilina, pp21-26.

AUTHOR INFORMATION

Nhu Quy Tho

Faculty of Mechanical Engineering, Hanoi University of Industry

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. JieGu, John S. Agapiou, Sheri Kurgin, 2015. *CNC machine tool work offset error compensation method*. Journal of Manufacturing Systems 37, pp576-585.

[2]. Zhenya He, Jianzhong Fu, Xinhua Yao, 2009. *Volumetric Error Identification fo CNC Machine Tool Based on Multi-body System and Vector Diagonal Measurement*. International Symposium on Precision Engineering and Micro.

[3]. X.B. Chen, A. Geddam, Z.J. Yuan, 1997. *Accuracy Improvement of Three-Axis CNC Machining Centers by Quasi-Static Error Compensation*. Journal of Manufacturing Systems Vol.16, No.5.

[4]. M. A. Donmez, D. S. Blomquist, R.J. Hocken, C.R. Liu, M.M. Barash, 1986. *A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation*. Methodology for machine tool accuracy enhancement vol 8 No 4, pp 187-196.

[5]. P.M. Ferreira, C.R. Liu, 1986. *A Contribution to the Analysis and Compensation of the Geometric Error of a Machining Center*. Annals of the CIRP Vol.35.

[6]. A.C. Okafor, Yalcin M. Ertekin, 2000. *Derivation of machine tool errors models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics*, Machine Tool and Manufacture vol.40 pp1199-1213.

[7]. A. C Okafor, Yalcin M. Ertekin, 2000. *Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer*. Journal of Materials Processing Technology 105.

[8]. Mahbubur Rahman, Jouko Heikkala, Kauko Lappalainen, 2000. *Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools. Part I: theory*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 pp1535-1546.