

ĐỘNG HỌC MÁY PHAY CNC NHIỀU TRỤC KIỂU PSK: HEXAPOD- CNC 3 TRỤC

Nguyễn Hồng Thái

Viện Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Email: hongthai-dtm@mail.hut.edu.vn

Đến Tòa soạn: 15/8/2009; Chấp nhận đăng: 12/12/2012

TÓM TẮT

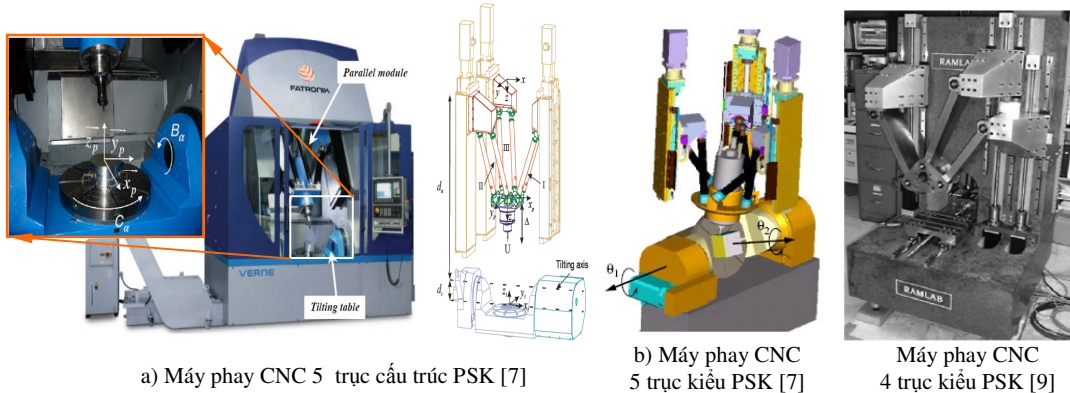
Thông thường các máy phay CNC truyền thống thường có chuỗi động học hở. Tuy nhiên, trong những năm gần đây các máy CNC có cấu trúc động học song song đang được nhiều nước phát triển nghiên cứu và phát triển. Trong bài báo tác giả trình bày một giải pháp điều khiển máy CNC nhiều trục kiểu PSK kết hợp giữa modul CNC 3 trục với modul robot song song hexapod. Giải pháp này nhằm tăng tính linh hoạt và mở rộng không gian làm việc của máy cũng như khắc phục sai số định hướng và định vị dụng cụ trong quá trình gia công bề mặt phức tạp trên máy CNC 5 trục. Ngoài ra, tác giả đề xuất thuật toán điều khiển định hướng trục dụng cụ bằng cách xoay quanh một véc tơ tại một điểm cố định sau đó tịnh tiến để kiểm soát thông số điều khiển hình động học nhằm tránh va chạm giữa các chân của modul robot song song hexapod khi gia công bề mặt phức tạp. Trên cơ sở đó tiến hành lập trình tính toán thông số điều khiển động học của máy khi gia công bề mặt elíp xóit bằng dao phay ngón đầu cầu nhằm chứng minh cho các thuật toán đề xuất.

Từ khóa. máy CNC nhiều trục, gia công bề mặt phức tạp

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Máy công cụ có cấu trúc động học song song PKMT (Parallel Kinematic Machine Tool) được nghiên cứu và phát triển bắt đầu từ năm 1990, cụ thể là máy Octahedral Hexapod được hãng Ingersoll (Mỹ) giới thiệu vào năm 1990 hay máy Variax được giới thiệu bởi hãng Gidding & Lewis (Mỹ) vào năm 1994 [1], đến nay đã cho ra đời nhiều mẫu máy khác nhau, hầu hết các công trình công bố về lĩnh vực này cho đến gần đây 2009 [2 - 4] đều chỉ mô tả chung chung về giải pháp và đưa ra các kết quả nghiên cứu, nội dung cụ thể về thuật toán cũng như phương pháp không được trình bày do bản quyền của các hãng cũng như các dự án nghiên cứu. Ví dụ David Daney [5], đưa ra phương pháp đo xác định sai số điều khiển (*vị trí và hướng của cơ cấu chấp hành*) cho trung tâm gia công Hexapod từ đó đưa ra giải pháp bù sai số. Tuy nhiên, trong công bố nội dung chi tiết không được trình bày do không được phép của CMW. Mặt khác, hầu hết các trung tâm gia công PKMT trước đây chỉ áp dụng duy nhất modul RBSS mang đầu dao trục chính hoặc mang phôi. Cho đến những năm gần đây xuất hiện các mẫu máy PSK (Parallel-Serial Kinematic) kết hợp giữa 2 modul cơ khí chính xác chuỗi động học song song (ĐHSS) và chuỗi động học hở (ĐHH) truyền thống. Hình 1 dưới đây là các mẫu máy kiểu động học PSK.

Qua một số công trình công bố mới đây [6 - 9] cho thấy các máy CNC nhiều trục kiểu động học PKS được các nhà nghiên cứu quan tâm và là các mẫu máy mới nhất hiện nay. Trong nghiên cứu này tác giả trình bày thuật toán điều khiển hình động học trong gia công bề mặt phức tạp cho máy phay CNC nhiều trục kiểu PSK phối hợp giữa modul robot song song (RBSS) và modul CNC 3 trục, với modul RBSS là Hexapod, nhằm khắc phục miền làm việc hạn chế của máy ĐHSS và nâng cao tính linh hoạt của máy.



Hình 1. Các máy phay CNC nhiều trục cấu trúc PSK đã được thiết kế chế tạo những năm gần đây.

2. TÍNH ĐỊNH VỊ VÀ ĐỊNH HƯỚNG TRỤC DỤNG CỤ TRONG GIA CÔNG BỀ MẶT PHỨC TẠP BẰNG PHAY MÁY CNC NHIỀU TRỤC

Hiện nay các phương pháp tính đường dụng cụ (ζ) phổ biến thường được sử dụng trong các phần mềm CAM thương mại như: phương pháp đẳng phẳng, đẳng tham số, chiều cao nhấp nhô không đổi [10, 11]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này tác giả sử dụng phương pháp điểm tiếp xúc CC_i trên bề mặt gia công $\sum S$, dựa trên cơ sở đường tiếp xúc (ξ) được sinh ra bởi [12, 13] và cơ sở lý thuyết [14], xét trong trường hợp tổng quát (hình 2) véc tơ xác định điểm định vị dụng cụ CL_i trong hệ tọa độ phôi được cho bởi phương trình :

$$\vec{r}_{CLi} = \vec{r}_{CCi} + \vec{A} + \vec{B} \quad (1)$$

trong đó:

- $\sum T, \sum S$: lần lượt là bề mặt dụng cụ và bề mặt gia công cho dưới dạng phương trình tham số $S(u,v)$.
- $\vec{A} = CC_i K \cdot \vec{n}$: xác định vị trí tâm xoay dụng cụ tại điểm K nằm trên phương pháp tuyến $\vec{n}$ tại điểm tạo hình CC_i thuộc $\sum S$ (K là tâm xoay định hướng trục dụng cụ).
- $\vec{B} = \overrightarrow{KCL_i}$: véc tơ xác định điểm định vị trên dụng cụ, véc tơ này phụ thuộc vào việc chọn điểm định vị trên dụng cụ và phương của trục dụng cụ.

Nếu gọi :

+ (ξ) là quỹ tích điểm tạo hình CC_i trên $\sum S$, khi đó véc tơ tiếp tuyến đơn vị $\vec{\tau}_u$ cho bởi phương trình:

$$\bar{\tau}_{tt} = \frac{\frac{d(\xi)}{dt}}{\left| \frac{d(\xi)}{dt} \right|} \quad (2)$$

+ Véc tơ pháp tuyến $\bar{n}$ của ΣS tại điểm $CC_i \in (\xi)$ cho bởi phương trình:

$$\bar{n} = \frac{\frac{\partial s(u,v)}{\partial u} \wedge \frac{\partial s(u,v)}{\partial v}}{\left| \frac{\partial s(u,v)}{\partial u} \wedge \frac{\partial s(u,v)}{\partial v} \right|} \quad (3)$$

+ Véc tơ trùng pháp tuyến $\bar{\tau}_{tp}$ hợp với $\bar{n}$ và $\bar{\tau}_{tt}$ để tạo thành tam diện động tại điểm tạo hình CC_i được định nghĩa bởi:

$$\bar{\tau}_{tp} = \bar{\tau}_{tt} \wedge \bar{n} \quad (4)$$

• *Xác định điểm định vị dụng cụ*

Đối với dao đầu cầu điểm định vị CL_i được chọn tại tâm cầu, khi đó tâm xoay định hướng $K \in LCL_i$ và

$\vec{A} = R \cdot \bar{n}$; $\vec{B} = 0$ phương trình (1) được viết lại:

$$\vec{r}_{CL_i} = \vec{r}_{CC_i} + R \cdot \bar{n}_i \quad (5)$$

Phương trình (5) được viết lại:

$$\begin{bmatrix} x_{CL_i} & y_{CL_i} & z_{CL_i} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{CC_i} & y_{CC_i} & z_{CC_i} \end{bmatrix}^T + R \cdot \begin{bmatrix} n_{x_i} & n_{y_i} & n_{z_i} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

Với R là bán kính dao đầu cầu.

Phương trình (6) xác định tọa độ điểm định vị dụng cụ CL_i trong hệ tọa độ gốc phôi.

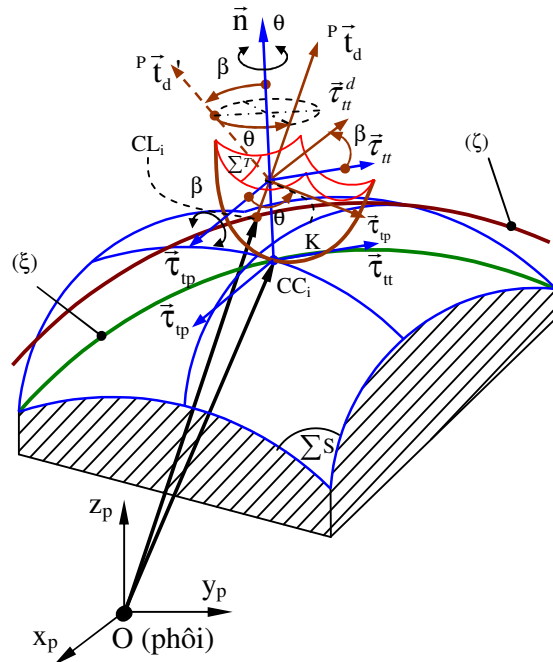
a) *Hướng của trục dụng cụ trong tam diện động*

+ Do K là tâm xoay định hướng trục dụng cụ trong tam diện động, do đó K luôn nằm trên phương pháp tuyến $\bar{n}$.

+ TCL là điểm định vị trên dụng cụ khi đó TCL luôn nằm trên đường tâm của trục dụng cụ và được định hướng bởi $\bar{t}_d$.

Như vậy, véc tơ đơn vị định hướng của trục dụng cụ trong tam diện động được cho bởi phương trình:

$${}^{cc}\underline{t}_{di} = {}^{cc}\underline{M} \cdot {}^T\underline{t}_d = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \sin \beta \\ \sin \theta \cdot \sin \beta \\ \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$



Hình 2. Mối quan hệ giữa dụng cụ và phôi.

trong đó: ${}^{CC}\underline{M} = \underline{R}(n, \theta) \cdot \underline{R}(\tau_p, \beta)$

b) Hướng của trục dụng cụ trong hệ tọa độ phôi

Nếu gọi: ${}^P\vec{t}_d$ là véc tơ đơn vị định hướng của trục dụng cụ trong hệ tọa độ phôi khi đó ta có:

$${}^P\vec{t}_d = {}^P\underline{M}_{CC} \cdot {}^{CC}\vec{t}_d \quad (8)$$

trong đó, ${}^P\underline{M}_{CC}$ là ma trận cosin chỉ phương giữa tam diện động và hệ tọa độ phôi $O_p x_p y_p z_p$, các ma trận $\underline{R}(n, \theta)$, $\underline{R}(\tau_p, \beta)$, ${}^P\underline{M}_{CC}$, ${}^T\vec{t}_d$ được định nghĩa như sau:

$$\underline{R}(n, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \underline{R}(\tau_u, \beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^P\underline{M}_{CC} = \begin{bmatrix} \tau_{ipx} & \tau_{itx} & n_x & 0 \\ \tau_{ipy} & \tau_{ity} & n_y & 0 \\ \tau_{ipz} & \tau_{itz} & n_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^T\vec{t}_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Kết luận: Phương trình (5) và (8) xác định điểm định vị dụng cụ và véc tơ đơn vị chỉ hướng trục dụng cụ trong hệ tọa độ phôi.

3. MÔ TẢ CẤU TRÚC MÁY VÀ THIẾT LẬP PHƯƠNG TRÌNH ĐỘNG HỌC

3.1. Mô tả cấu trúc máy

Máy gồm hai modul cơ khí chính xác là modul RBSS Hexapod và modul CNC 3 trục (hình 3).

trong đó:

+ Modul RBSS: thực hiện điều khiển định vị và định hướng trục dụng cụ khi điểm định vị CL_i (ζ) của hệ tọa độ phôi nằm trong miền với của modul RBSS.

+ Modul CNC 3 trục: thực hiện điều khiển đưa các điểm CL_i trên (ζ) về trong miền giới hạn của modul RBSS.

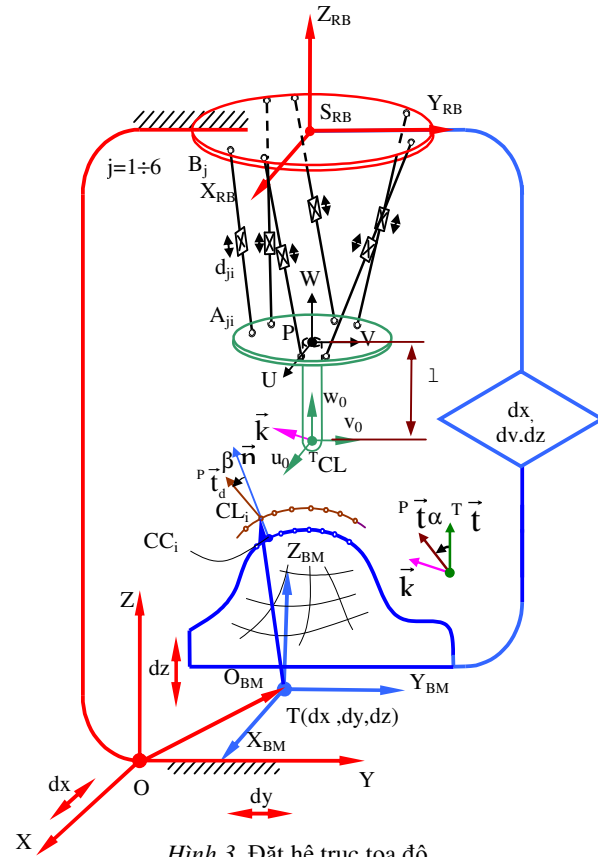
3.2. Thiết lập phương trình động học modul RBSS Hexapod

a) Đặt hệ trục tọa độ

Gọi:

+ H_0 - OXYZ: là hệ tọa độ quy chiếu gốc đặt tại gốc máy.

+ H_B - $S_{RB}X_{RB}Y_{RB}Z_{RB}$: là hệ tọa độ cố định, đặt trên giá cố định của modul RBSS



Hình 3. Đặt hệ trục tọa độ.

Hexapod, sao cho X_{RB}/X , Y_{RB}/Y và Z_{RB}/Z .

+ $H_{BM} - O_{BM}X_{BM}Y_{BM}Z_{BM}$: là hệ tọa độ gắn trên bàn máy của modul CNC 3 trục, sao cho X_{BM}/X , Y_{BM}/Y và Z_{BM}/Z .

+ $H_D - PUVW$: là hệ tọa độ đặt tại tâm của cụm đầu dao trục chính.

+ $H_{D0} - {}^TCL_{u_0v_0w_0}$: là hệ tọa độ đặt tại điểm định vị dụng cụ, tại thời điểm chuẩn '0' ban đầu TCL (với mỗi loại dao phay ngón khác nhau điểm này là khác nhau).

+ $H_{Di} - {}^TCL_{u_i v_i w_i}$: là hệ tọa độ đặt tại điểm định vị dụng cụ, tại thời điểm điều khiển thứ i.

b) Vị trí chọn gốc chuẩn '0' ban đầu

+ Tại thời điểm chuẩn '0'

+ Điểm CL_0 được chọn cố định tại một vị trí xác định, khi đó thông số điều khiển hình động học modul RBSS Hexapod xác định ở vị trí:

$$d_{j0} = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} \quad (\text{với } j = 1 \div 6) \quad (9)$$

trong đó:

+ $d_{\min}, d_{\max}$: lần lượt là giới hạn hành trình trượt nhỏ nhất và lớn nhất mỗi chân của modul RBSS.

Mặt khác, do điểm CL_0 cố định được chọn ở vị trí thời điểm gốc H_{D0} với hai thành phần x, y sao cho $x_{CL_0} \equiv x_{S_{RB}}, y_{CL_0} \equiv y_{S_{RB}}$.

+ Các hệ H_0, H_B, H_{BM}, H_{D0} được chọn sao cho các trục tọa độ song song với nhau.

Như vậy, tọa độ của điểm CL_0 tại thời điểm ban đầu H_{D0} được xác định như sau:

$${}^TCL_0 = \begin{bmatrix} x_{TCL_0} & y_{TCL_0} & z_{TCL_0} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (9b)$$

Với tọa độ ${}^{H_0}Z_{CL_0}$ được cho bởi:

$${}^{H_0}Z_{CL_0} = {}^{H_0}Z_{Ai} - \ell \quad (10)$$

với:

${}^{H_0}Z_{Ai} = {}^{H_0}Z_{Bj} - \sqrt{d_{j0}^2 - ({}^{H_0}x_{Aji} - {}^{H_0}x_{Bj})^2 - ({}^{H_0}y_{Aji} - {}^{H_0}y_{Bj})^2}$ và $x_{Aji}, x_{Bj}, y_{Aji}, y_{Bj}, z_{Bj}$ hoàn toàn xác định tại vị trí chuẩn '0' ban đầu, mà trận chuyển từ hệ động H_D về hệ tọa độ H_{RB} là ma trận đơn vị.

c) Phương trình động học modul RBSS Hexapod

Với cách đặt hệ trục tọa độ như (hình 3) có:

${}^{H_B}\underline{B}_j = \begin{bmatrix} x_{Bj} & y_{Bj} & z_{Bj} & 1 \end{bmatrix}^T$: là tọa độ tâm các khớp cầu B_j trong hệ tọa độ H_B với $j = 1 \div 6$.

Nếu gọi:

${}^{H_0}\vec{r}_{Bj}$: là véc tơ định vị tọa độ tâm các khớp cầu B_j trong hệ tọa độ H_0 khi đó ta có:

$${}^{H_0}\vec{r}_{Bj} = \vec{r}_{OS_{RB}} + \overrightarrow{S_{RB}B_j} \quad (11)$$

trong đó:

+ $\vec{r}_{OS_{RB}}$: véc tơ định vị vị trí của điểm S_{RB} trong hệ tọa độ H_0 .

+ $\vec{S}_{RB} \underline{B}_j$: véc tơ định vị vị trí của tâm khớp cầu B_j trong hệ tọa độ H_B .

Viết phương trình (11) dưới dạng véc tơ đại số:

$${}^{H_0} \underline{B}_j = \begin{bmatrix} x_{RB} & y_{RB} & z_{RB} & 1 \end{bmatrix}^T + {}^{H_B} \underline{B}_j \quad (12)$$

○ ${}^{H_0} \vec{r}_{A_{ji}}$: là véc tơ định vị tọa độ các khớp cầu A_{ji} trong hệ tọa độ H_0 ta có:

$${}^{H_0} \vec{d}_{ji} = {}^{H_0} \vec{r}_{A_{ji}} - {}^{H_0} \vec{r}_{B_j} \quad (13)$$

với ${}^{H_0} \underline{A}_{ji} = \begin{bmatrix} x_{A_{ji}} & y_{A_{ji}} & z_{A_{ji}} & 1 \end{bmatrix}^T$, phương trình (13) được viết lại:

$$d_{ji} = \sqrt{\left[{}^{H_0} \underline{A}_{ji} - {}^{H_0} \underline{B}_j \right]^T \cdot \left[{}^{H_0} \underline{A}_{ji} - {}^{H_0} \underline{B}_j \right]} \quad (14)$$

Phương trình (14) cho phép xác định thông số điều khiển hình động học modul RBSS Hexapod, tuy nhiên trong phương trình (14) chỉ lấy 3 thành phần đầu của véc tơ ${}^{H_0} \underline{B}_j$, ${}^{H_0} \underline{A}_{ji}$.

4. BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC NGƯỢC VÀ GIẢI THUẬT ĐIỀU KHIỂN

4.1. Phương pháp và thuật toán điều khiển

Thông số điều khiển hình động học của máy cho phép điều khiển phối hợp chuyển động tương đối giữa dụng cụ và phôi theo quy luật đường dụng cụ (ζ) (bao gồm: quỹ tích các điểm định vị dụng cụ CL_i và trường véc tơ định hướng trục dụng cụ ${}^P \vec{t}_{di}$) sao cho dụng cụ và phôi luôn tiếp xúc với nhau tại điểm tạo hình CC_i . Các thông số điều khiển động học là kết quả của bài toán động học ngược khi biết vị trí điểm định vị dụng cụ và hướng của trục dụng cụ. Mặt khác, quỹ tích các điểm định vị và trường véc tơ định hướng trục dụng cụ luôn biến đổi dọc theo đường dụng cụ khi dụng cụ quét bao hình lên bề mặt gia công. Như vậy, nếu đưa trực tiếp thông số đường dụng cụ làm cơ sở dữ liệu để tính thông số điều khiển của máy PSK thì xảy ra hiện tượng xoắn giữa các chân của modul RBSS (va chạm giữa các chân). Để khắc phục hiện tượng trên tác giả đưa ra phương pháp và thuật toán điều khiển sau:

+ *Phương pháp*: xoay véc tơ ${}^T \vec{t}_{di}$ trên trục dụng cụ quay một góc quanh véc tơ $\vec{k}_i$ tại điểm điều khiển tạo hình CL_0 sao cho ${}^T \vec{t}_{di} \equiv {}^P \vec{t}_{di}$

$$\text{trong đó: } \begin{cases} \vec{k}_i = \frac{{}^P \vec{t}_{di} \wedge {}^T \vec{t}_{d0}}{|{}^P \vec{t}_{di} \wedge {}^T \vec{t}_{d0}|} & \text{với } \alpha_i = \angle({}^P \vec{t}_{di}, {}^T \vec{t}_{d0}) \text{ (xem hình 3)} \\ \cos \alpha_i = {}^P \vec{t}_{di} \cdot {}^T \vec{t}_{d0} \end{cases} \quad (15)$$

và ${}^T \vec{t}_{d0}$: là véc tơ chỉ phương của trục dụng cụ tại vị trí chuẩn '0' ban đầu, khi đó ${}^T \vec{t}_{d0}$ có phương trùng với phương của trục z_{RB} .

+ Modul RBSS: thực hiện điều khiển định vị và định hướng trục dụng cụ theo nguyên tắc sau: đầu tiên thực hiện điều khiển định hướng trục dụng cụ xoay quanh điểm CL_0 (cố định tại chuẩn '0'), sau đó tịnh tiến từ điểm CL_0 đến trùng với điểm CL_i trên (ζ).

+ *Modul CNC 3 trục*: thực hiện điều khiển tịnh tiến các điểm CL_i trên (ζ) về trong miền giới hạn hình học của modul RBSS, nếu tại điểm tạo hình CC_i vị trí CL_i và ${}^P\vec{t}_{di}$ không nằm trong miền giới hạn hình học của modul RBSS.

4.2.1. Phương pháp điều khiển hướng trục dụng cụ

So sánh véc tơ ${}^P\vec{t}_{di}$ trên (ζ) với véc tơ ${}^T\vec{t}_{d0}$ (tại thời điểm chuẩn ‘0’ ban đầu) khi đó $\alpha_i = \angle({}^P\vec{t}_{di}, {}^T\vec{t}_{d0})$, như vậy, góc $\Delta\alpha_i$ điều khiển thực từ vị trí thứ i đến $i+1$ được cho bởi phương trình:

$$\Delta\alpha_i = \alpha_{i+1} - \alpha_i \quad (16)$$

và được chọn theo nguyên tắc trong bảng 1 dưới đây.

Bảng 1. Tính chọn góc điều khiển hướng trục của modul RBSS Hexapod mang đầu dao trục chính.

$\Delta\alpha_i$	α_{i+1}	α_i	Phương án điều khiển góc
$\Delta\alpha_i > 0$ $\Delta\alpha_i$ thuộc $\sum \lambda$	...	...	Quay quanh véc tơ $\vec{k}_i$ tại điểm định vị CL_0 một góc $\Delta\alpha_i$
$\Delta\alpha_i < 0$ $\Delta\alpha_i$ thuộc $\sum \lambda$	...	...	Quay quanh véc tơ $\vec{k}_i$ tại điểm định vị CL_0 một góc $-\Delta\alpha_i$
$\Delta\alpha_i = 0$	...	...	Không thực hiện điều khiển hướng

Trong đó: ($\sum \lambda$) là miền không gian giới hạn ràng buộc hình học của modul RBSS.

4.2.2. Thuật toán điều khiển máy CNC nhiều trục PSK

Giải thuật điều khiển được thực hiện như sau:

Bước 1: modul RBSS xoay véc tơ định hướng trục dụng cụ ${}^T\vec{t}_{di}$ quanh véc tơ $\vec{k}_i$ một góc $\Delta\alpha_i$ tại điểm điều khiển tạo hình CL_0 (chuẩn ‘0’) về trùng với ${}^P\vec{t}_{di}$.

Bước 2: modul RBSS tịnh tiến trục dụng cụ từ vị trí CL_0 trên trục dụng cụ đến điểm CL_i trên (ζ), nếu điểm CL_i nằm trong miền $\sum \lambda$ của modul RBSS. Nếu điểm CL_i nằm ngoài miền $\sum \lambda$ của modul RBSS chuyển sang bước 3.

Bước 3: modul CNC 3 trục tịnh tiến điểm CL_i trên (ζ) về gần vị trí gốc của hệ tọa độ H_{D0} , đưa điểm CL_i vào trong vùng với tới của modul RBSS bằng cách tăng hoặc giảm gia số Δdx , Δdy , Δdz điều khiển 3 trục tịnh tiến, sau đó quay về bước 2.

Như vậy, trong giải thuật này có hai trường hợp:

+ **Trường hợp 1:** di chuyển giữa các điểm CL_i trên (ζ) là di chuyển bé từ vị trí thứ i đến $i+1$, khi đó việc định vị vị trí và hướng dụng cụ được thực hiện bởi modul RBSS.

+ **Trường hợp 2:** điểm CL_i ngoài miền với của modul RBSS, modul CNC 3 trục thực hiện đưa điểm CL_i vào trong miền với của modul RBSS, sau đó định vị và định hướng trục dụng cụ được

thực hiện bởi modul RBSS như trong trường hợp 1. Việc chọn điều khiển modul RBSS hay modul CNC 3 trục được tính chọn ở bảng 2

Bảng 2. Tính chọn điều khiển giữa hai modul RBSS Hexapod và modul CNC 3 trục.

Trường hợp	$CC_i \in (\xi)$	$CL_i \in (\zeta)$	${}^P \vec{t}_{di}$	${}^T CL_i$	Quyết định điều khiển	
1	...	...	...	${}^T CL_i \equiv CL_i$	Các điều kiện $(\sum \lambda)$ và $(\sum \chi)$ thỏa mãn	Điều khiển modul RBSS thông qua các thông số d_{ji} đưa điểm ${}^T CL_i$ về trùng với CL_i (di chuyển bé)
2	...	...	...	${}^T CL_i \equiv CL_i$	Các điều kiện $(\sum \lambda)$ và $(\sum \chi)$ không thỏa mãn	Điều khiển modul CNC 3 trục thông qua $T(dx,dy,dz)$ đưa điểm ${}^T CL_i$ về gần gốc chuẩn '0' ban đầu.

trong đó: $(\sum \lambda)$ và $(\sum \chi)$: được xác định ở mục 5 của tài liệu này.

4.2. Thiết lập phương trình xác định thông số điều khiển

a) Trường hợp 1: di chuyển giữa các điểm CL_i là di chuyển bé (điểm CL_i nằm trong miền với của modul RBSS)

Trong trường hợp này định vị dụng cụ và định hướng trục dụng cụ được thực hiện bởi modul RBSS.

Xác định thông số điều khiển hướng

Gọi: $+d_{hji}$: là thông số điều khiển khi modul RBSS định hướng trục dụng cụ ở bước 1 của thuật toán tại điểm ${}^T CL_0$ (chuẩn '0').

$+A'_{ji}$: là tọa độ tâm các khớp cầu A_j ($j=1\div 6$) trên giá di động tại vị trí giá di động ở vị trí sau khi đã xoay một góc α_i tại điểm điều khiển hướng trục dụng cụ CL_0 .

Như vậy, véc tơ định vị điểm A'_{ji} trong hệ H_0 :

$${}^{H_0} \vec{r}_{A'_{ji}} = \vec{r}_{CL_0} + \underline{M}(k, \alpha_i) \cdot \vec{\ell}_{dci} + \underline{M}(k, \alpha_i) \cdot {}^{H_D} \vec{r}_{A_j} \quad (17)$$

Viết lại phương trình (17) được viết:

$${}^{H_0} \underline{A}'_{ji} = \begin{bmatrix} x_{\tau_{CL_0}} & y_{\tau_{CL_0}} & z_{\tau_{CL_0}} & 1 \end{bmatrix}^T + \underline{M}(k, \alpha_i) \cdot \underline{\ell}_{dci} + \underline{M}(k, \alpha_i) \cdot {}^{H_D} \underline{A}_j \quad (18)$$

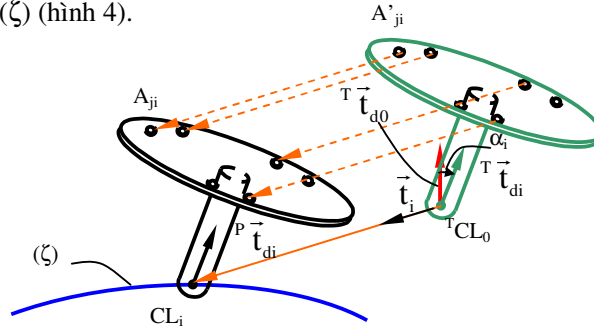
với: $\underline{\ell}_{dci} = \begin{bmatrix} \ell \cdot {}^P t_{dxi} & \ell \cdot {}^P t_{dyi} & \ell \cdot {}^P t_{dzi} & 0 \end{bmatrix}^T$ theo tài liệu [15, trang 94 - 95] ma trận $\underline{M}(k, \alpha)$ định nghĩa như sau:

$$\underline{M}(k, \alpha) = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x & 0 \\ a_y & b_y & c_y & 0 \\ a_z & b_z & c_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{với:} \quad \begin{cases} a_x = k_x k_x (1 - c\alpha) + c\alpha \\ a_y = k_x k_y (1 - c\alpha) + k_z \cdot s\alpha \\ a_z = k_x k_z (1 - c\alpha) - k_y \cdot s\alpha \\ b_x = k_x k_y (1 - c\alpha) - k_z \cdot s\alpha \\ b_y = k_y k_y (1 - c\alpha) + c\alpha \\ b_z = k_y k_z (1 - c\alpha) + k_x \cdot s\alpha \\ c_x = k_z k_x (1 - c\alpha) + k_y \cdot s\alpha \\ c_y = k_z k_y (1 - c\alpha) - k_x \cdot s\alpha \\ c_z = k_z k_z (1 - c\alpha) + c\alpha \end{cases} \quad \text{và} \quad c\alpha = \cos \alpha, s\alpha = \sin \alpha$$

$\underline{M}(k, \alpha)$ là ma trận quay quanh véc tơ $\vec{k}_i$ tại điểm điều khiển hướng trục dụng cụ CL_0 một góc α_i , thay phương trình (18) vào phương trình (14) xác định được thông số điều khiển d_{hji} .

Xác định thông số điều khiển định vị dụng cụ

Trong trường hợp này modul RBSS tịnh tiến dụng cụ từ vị trí CL_0 (chuẩn '0') đến vị trí CL_i trên đường dụng cụ (ζ) (hình 4).



Hình 4. Tịnh tiến giá di động từ vị trí T_{CL_0} đến CL_i .

Gọi d_{vji} là thông số điều khiển các chân đế đưa tọa độ tâm các khớp cầu A_{ji} tịnh tiến theo véc tơ $\vec{t}_i$ một đoạn $a = {}^T CL_0 CL_i$ khi đó có:

$${}^{H_0} \vec{r}_{A_{ji}} = {}^{H_0} \vec{r}_{A'_{ji}} + a \cdot \vec{t}_i \quad (19)$$

trong đó:

$$\vec{t}_i = \frac{{}^T CL_0 CL_i}{|{}^T CL_0 CL_i|}, \quad a = \sqrt{(x_{CL_i} - x_{T_{CL_0}})^2 + (y_{CL_i} - y_{T_{CL_0}})^2 + (z_{CL_i} - z_{T_{CL_0}})^2}$$

Viết lại phương trình (19) ta có:

$${}^{H_0} \underline{A}_{ji} = \begin{bmatrix} x_{A'_{ji}} \\ y_{A'_{ji}} \\ z_{A'_{ji}} \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a \cdot t_{x_i} \\ a \cdot t_{y_i} \\ a \cdot t_{z_i} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Thay phương trình (20) vào phương trình (14) xác định được thông số điều khiển vị trí d_{vji} , vậy thông số điều khiển: $d_{ji} = d_{hji} + d_{vji}$ (21)

b) Trường hợp 2: khi điểm CL_i nằm ngoài miền ($\sum \lambda$), modul CNC 3 trực đưa điểm CL_i trên (ζ) về gần gốc của hệ H_{D0} và các thông số điều khiển dx , dy , dz được tính trong bảng 3.

Bảng 3. Xác định gia số điều khiển 3 trục tịnh tiến của modul CNC 3 trục.

Điều khiển trục	Kiểm tra	Thông số điều khiển
Trục x	$x_{CLi} > x_{SRB}$	$dx_{(i+1)} = dx_i - \Delta dx$
	$x_{CLi} < x_{SRB}$	$dx_{(i+1)} = dx_i + \Delta dx$
Trục y	$y_{CLi} > y_{SRB}$	$dy_{(i+1)} = dy_i - \Delta dy$
	$y_{CLi} < y_{SRB}$	$dy_{(i+1)} = dy_i + \Delta dy$
Trục z	$z_{CLi} > z_{SRB}$	$dz_{(i+1)} = dz_i - \Delta dz$
	$z_{CLi} < z_{SRB}$	$dz_{(i+1)} = dz_i + \Delta dz$

trong đó: Δdx , Δdy , Δdz : lần lượt là gia số điều khiển trên các trục x,y,z của modul CNC 3 trục.

Khi điểm CL_i trên (ζ) được đưa vào miền với của modul RBSS việc tính toán định vị và định hướng trục dụng cụ được thực hiện bởi modul RBSS trong trường hợp 1.

5. XÁC ĐỊNH ĐIỀU KIỆN RÀNG BUỘC HÌNH HỌC CỦA MÁY PSK

Ràng buộc hình học của máy PSK bao gồm các ràng buộc của modul RBSS Hexapod ($\sum \lambda$) và ràng buộc giới hạn hành trình khớp trượt của modul CNC 3 trục ($\sum \chi$).

5.1. Xác định điều kiện ràng buộc hình học của modul RBSS ($\sum \lambda$)

Trong quá trình điều khiển hướng trục dụng cụ ứng với mỗi điểm tức thời CL_i trên đường dụng cụ (ζ) các thông số điều khiển d_{ji} biến đổi theo một quy luật nào đó. Tuy nhiên, phải thỏa mãn các điều kiện ràng buộc hình học của modul RBSS để điều khiển định vị và định hướng trục dụng cụ, đối với modul RBSS Hexapod có 3 ràng buộc hình học cụ thể:

- + Giới hạn hành trình trượt của 6 khớp trượt.
- + Giới hạn góc mở của 6 khớp cầu trên và dưới.
- + Sự va chạm giữa các chân cạnh nhau trong quá trình điều khiển.

a) Điều kiện giới hạn điều khiển hành trình trượt của các chân

Nếu gọi $d_{\min}$, $d_{\max}$ lần lượt là giới hạn hành trình trượt nhỏ nhất và lớn nhất mỗi chân của modul RBSS khi đó d_{ji} với ($j = 1 \div 6$) phải thỏa mãn bất đẳng thức:

$$d_{\min} \leq d_{ji} \leq d_{\max} \quad (22)$$

b) Điều kiện giới hạn hình học về góc mở của khớp cầu liên kết với giá cố định và di động

Do các khớp cầu liên kết với giá cố định và giá di động được giới hạn trong một miền hình nón có góc ở đỉnh $\gamma_{\max}$ (hình 5, hình 6) như vậy, nếu gọi:

+ γ_{DDmax} , γ_{CDmax} : lần lượt là góc giới hạn ở đỉnh hình nón của khớp cầu liên kết với giá di động (hình 6) và khớp cầu liên kết với giá cố định (hình 5)

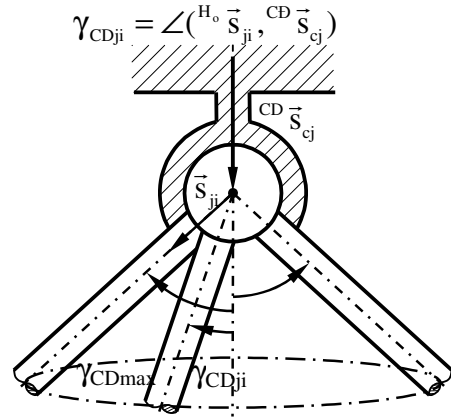
+ γ_{DDji} , γ_{CDji} : lần lượt là góc định hướng của chân trong khớp cầu tại mỗi thời điểm tức thời góc γ_{ji} xác định phải thỏa mãn bất đẳng thức:

$$0 \leq \gamma_{CDji} \leq \gamma_{CDmax} \quad (23)$$

$$0 \leq \gamma_{DDji} \leq \gamma_{DDmax} \quad (24)$$

• *Khớp cầu liên kết với giá cố định*

Gọi γ_{CDji} với ($j = 1 \div 6$) là góc mở khớp cầu liên kết với giá cố định của các khớp j tương ứng tại thời điểm thứ i của hệ thống ta có:

$$\gamma_{CDji} = \angle({}^{H_0}\vec{s}_{ji}, {}^{CD}\vec{s}_{cj}) \quad (25)$$


Hình 5. Hình nón giới hạn khớp cầu liên kết với giá cố định.

Trong đó: ${}^{H_0}\vec{s}_{ji}$, ${}^{CD}\vec{s}_{cj}$ lần lượt là véc tơ đơn vị chỉ hướng của chân thứ i và véc tơ đơn vị chỉ hướng lắp của trục khớp cầu thứ j .

Véc tơ ${}^{H_0}\vec{s}_{ji}$ được xác định trong hệ tọa độ cố định H_0 :

$${}^{H_0}\vec{s}_{ji} = \frac{\vec{A}_{ji}\vec{B}_{ji}}{|\vec{A}_{ji}\vec{B}_{ji}|} \quad (26)$$

Phương trình (26) được viết lại:

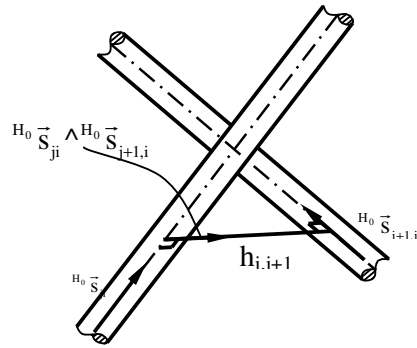
$${}^{H_0}\underline{s}_{ji} = \frac{[{}^{H_0}\underline{A}_{ji} - {}^{H_0}\underline{B}_{ji}]}{\sqrt{[{}^{H_0}\underline{A}_{ji} - {}^{H_0}\underline{B}_{ji}]^T \cdot [{}^{H_0}\underline{A}_{ji} - {}^{H_0}\underline{B}_{ji}]}} \quad (27)$$

Mặt khác, véc tơ ${}^{CD}\vec{s}_{cj}$ trong hệ H_0 :

$${}^{CD}\underline{s}_{cj} = [{}^{CD}s_{cxj} \quad {}^{CD}s_{cyj} \quad {}^{CD}s_{czj} \quad 0]^T$$

Như vậy, phương trình (23) được viết lại khi lấy 3 thành phần đầu của ${}^{CD}\vec{s}_{cj}$ và ${}^{H_0}\vec{s}_{ji}$ như sau:

$$0 \leq \left| \arccos({}^{H_0}s_{xji} \cdot {}^{CD}s_{cxj} + {}^{H_0}s_{yji} \cdot {}^{CD}s_{cyj} + {}^{H_0}s_{zji} \cdot {}^{CD}s_{czj}) \right| \leq \gamma_{CDmax} \quad (28)$$



Hình 7. Khoảng cách và chạm giữa các cặp chân.

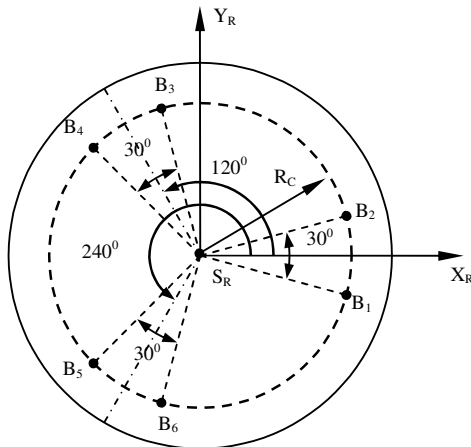
5.2. Điều kiện xác định giới hạn hành trình khớp trượt của modul CNC 3 trục ($\sum \delta$)

Ngoài việc xác định giới hạn hình học của modul RBSS, giới hạn hành trình trượt của 3 trục tịnh tiến của modul CNC 3 trục cũng phải được kiểm tra. Như vậy các thông số dx_i , dy_i , dz_i phải thỏa mãn bất đẳng thức (35):

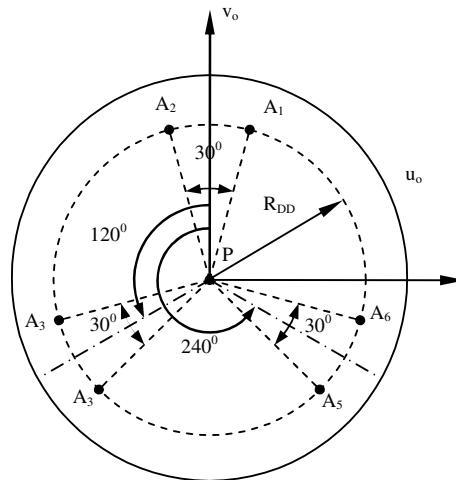
$$\begin{aligned} d_{x \min} < dx_i < d_{x \max} \\ d_{y \min} < dy_i < d_{y \max} \\ d_{z \min} < dz_i < d_{z \max} \end{aligned} \quad (35)$$

6. VÍ DỤ ÁP DỤNG

a) Thông số động học modul Hexapod



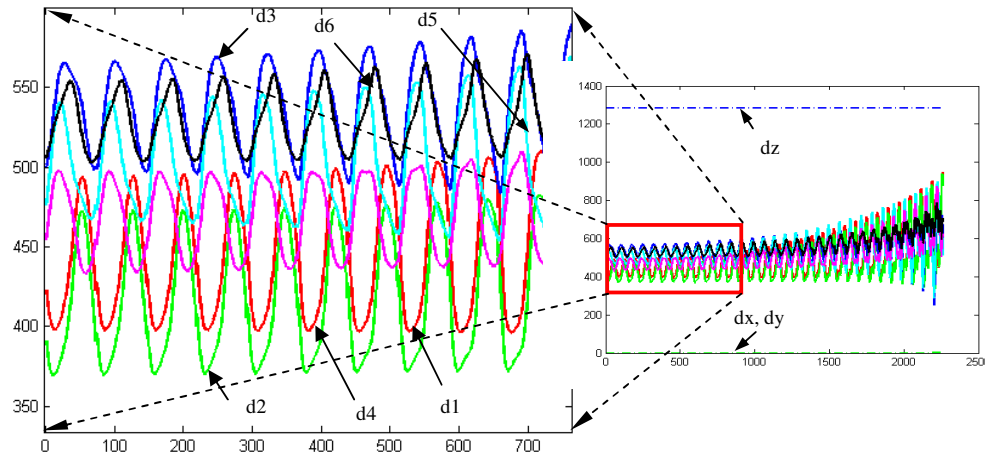
Hình 8. Thông số kích thước giá cố định modul RBSS Hexapod.



Hình 9. Thông số kích thước giá di động modul RBSS Hexapod.

Trên cơ sở thuật toán và các phương trình xác định thông số điều khiển, tiến hành tính toán, lập tính toán thông số điều khiển trong trường hợp modul Hexapod mang đầu dao trục chính gia công bề mặt elipxôit.

c) Đồ thị xác định thông số điều khiển



Hình 11. Đồ thị xác định thông số điều khiển.

7. KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất thuật toán điều khiển máy phay CNC nhiều trục kiểu động học PSK trong đó modul mang đầu dao trục chính là modul Hexapod và bàn máy là modul CNC 3 trục. Kết quả bài báo là giải thuật điều khiển hình động học trong đó đưa ra giải pháp xoay trục dụng cụ tại điểm CL_0 cố định (điểm chuẩn '0'), sau đó tịnh tiến đến điểm định vị tạo hình CL_i trên đường dụng cụ. Với giải pháp trên tránh được hiện tượng va chạm giữa các chân trong quá trình máy làm việc đồng thời cũng khắc phục sai số định hướng do sai số hai trục quay của máy CNC 5 trục và giải pháp này được áp dụng cho hầu hết các máy PSK có sử dụng RBSS làm cơ cấu định hướng. Các kết quả của bài báo còn phục vụ cho các nghiên cứu tiếp theo về kiểu máy này như động lực học và điều khiển, sai số gia công, độ cứng vững để có thể thiết kế chế tạo hoàn chỉnh. Các kết quả động học còn là cơ sở để thiết lập chương trình điều khiển cũng như tính toán mô phỏng quá trình gia công bề mặt phức tạp trên máy phay CNC nhiều trục kiểu PSK.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Guilin Yang, I-Ming Chen, Wei Lin, Jorge Angeles - Singularity Analysis of Tree-Legged Parallel Robots Based on Passive-Joint Velocities, IEEE Transactions Robotics and Automation **17** (4) (2001) 413-422.
2. Damien Chablat, Philippe Wenger, Félix Majou - A 3-Axis Parallel Machine Tool for High-Speed Machining, <http://www.parallelemic.org/Reviews/Review011.html>, April 8, 2002.

3. Lu Yi, Tatu Leinonen - Computer simulation machining a 3D free form surface by using a 3-UPU parallel manipulator and a milling machine, 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), 2007
4. Matteo Zoppi - Meccanismi paralleli per operazioni in elevata dinamica: contributi alle analisi di singolarità e di trasmissione di forza, Ph.D. Thesis, The University of Genoa, 2004.
5. David Daney, Yves Papegay, Arnold Neumaier - Interval Methods for Certification of the Kinematic Calibration of Parallel Robots, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotic & Automation, New Orleans, LA, 2004, pp. 1913-1918.
6. Martin Neumann; Entwicklung und experimentelle Regelung eines servopneumatischen räumlichen Mehrachsenprüfstands, Doktor Ingenieurs, Universität Kassel, 2004.
7. Oscar Altuzarra, YonSanMartín, EnriqueAmezua, AlfonsoHernández- Motion pattern analysis of parallel kinematic machines: A case study, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing **25** (2009) 432-440.
8. Seungkil Son, Taejung Kim, Sanjay E. Sarma, Alexander Slocum, A hybrid 5-axis CNC milling machine, Precision Engineering **33** (2009) 430-446.
9. Sameh Refaat, Jacques M. Hervé, Saeid Nahavandi, Hieu Trinh - High-Precision Five-Axis Machine for High-Speed Material Processing Using Linear Motors and Parallel-Serial Kinematics, Robotica **25** (4) (2006) 461-466.
10. Prasenjit Kayal - Offset error analysis of ball-end mill for cutter-path generation from point-based surfaces, Int. J. Adv. Manuf. Technol. **36** (2008) 1133-1144.
11. Rao N., Ismail F., Bedi S. - Toolpath Planning for Five- axis machining using the principal axis method, Int. J. Mach. Tools Manufact **37** (7) (1997) 1025-1040.
12. Nguyễn Hồng Thái - Thuật toán sinh đường dụng cụ gia công tinh các bề mặt phức tạp bằng dao phay ngón đầu cầu trên máy phay CNC 5 trục, Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc Kỷ niệm 30 năm Viện Cơ học và 30 năm Tạp chí Cơ học, 2009, tr. 91-98.
13. Nguyễn Hồng Thái, Nguyễn Thùy Dương - Thuật toán sinh quỹ đạo điểm cắt trong quá trình gia công tinh các bề mặt phức tạp, Tạp chí Khoa học và Công nghệ các Trường Đại học (75) (2009) 106-111.
14. Nguyễn Hồng Thái - Về giải thuật điều khiển hình động học rôbốt song song trong gia công bề mặt phức tạp, Luận án Tiến sỹ Kỹ thuật, Đại học Bách khoa Hà Nội, 2009.
15. Mohsen Shahinpoor-A Robot Engineering Textbook, Harper&Row, Publishers, New york, 1990.

ABSTRACT

KINEMATICS OF THE MULTI-AXIS CNC MILLING MACHINE TYPE PSK: HEXAPOD 3- AXIS CNC MACHINE

Nguyen Hong Thai

School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology

Email: hongthai-dtm@mail.hut.edu.vn

The CNC machines with parallel kinematic structure have been researched and developed in recent years. Before this time most of the CNC machines were designed with conventional open-chain kinematic structure. In this paper the author presents a solution for control of multi-axis hybrid CNC PSK machines combined 3-axis conventional CNC machine with parallel robot hexapod. The solution helps to get a better maneuverability, larger working space and to minimize not only orientation error but also location error of the tool during complex surfaces machining process by 5-axis CNC machine. Furthermore, the author proposes a method to turn the tool axis around a vector at the fixed point and also an algorithm for determination kinematic control to avoid collision of the limbs while Hexapod module with spindle orientating tool axis in machining complex spatial surface. Matlab program to determine control parameters for machining ellipsoidal surface by the ball-end finger-tool was also presented in this paper.

Keywords: multi-axis CNC milling machine, machining complex spatial surface.