

CẤU TRÚC VÀ PHƯƠNG ÁN THIẾT KẾ MÁY PHAY CNC 4 BẬC TỰ DO ĐỂ GIA CÔNG CÁNH TUỐC BIN

Nguyễn Đăng Hoà (Trường Đại học KTCN- DH Thái Nguyên)

Nguyễn Trương Chuyên - Bùi Thế Đức (Trường Cao đẳng Cơ khí – Luyện kim)

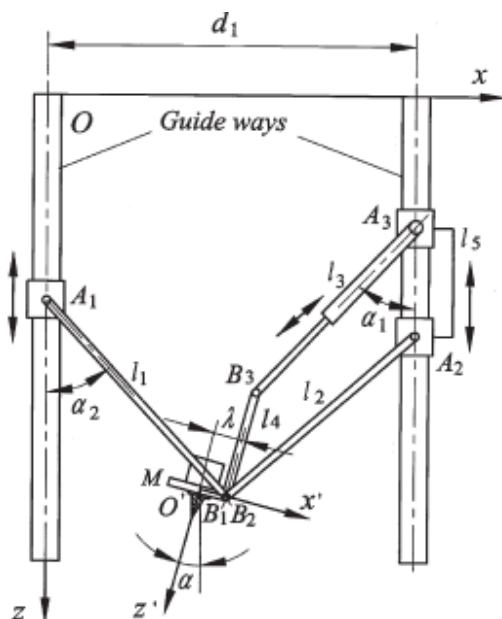
1. Tổng quan

Gia công các bề mặt hình học phức tạp nói chung, các dạng bề mặt cánh tuốc bin nói riêng luôn là những bài toán khó cho quá trình sản xuất từ khâu thiết kế hình dáng bề mặt, chọn máy gia công cho tới những đặc trưng công nghệ của quá trình tạo hình chế tạo chi tiết.

Thích hợp nhất để gia công các dạng bề mặt này là sử dụng các trung tâm gia công phay 5 trục. Ở Việt Nam đã có một số doanh nghiệp trang bị các trung tâm gia công 5 trục kích cỡ trung bình để chế tạo các quả cầu của kết cấu nhà vòm không gian và một vài dạng chi tiết đặc thù khác. Tuy nhiên gia công các loại cánh tuốc bin bằng cắt gọt chưa có cơ sở nào thực hiện vì nhiều lý do, trong đó lý do chính là chưa có các trung tâm gia công CNC 4 trục và 5 trục cấu hình phù hợp.

Trong bài báo này, chúng tôi đưa ra một hướng giải quyết mới không sử dụng các trung tâm gia công 5 trục đắt tiền và phức tạp có sẵn của các nhà sản xuất nước ngoài như Deckel Maho hay Volvo,... Phương án lựa chọn là tạo ra một trung tâm phay CNC 4 trục, trong đó rô bốt song song 3 bậc tự do sẽ thực hiện dịch chuyển theo trục X, Z và chuyển động quay B xung quanh trục Y; bàn máy mang phôi thực hiện một chuyển động theo phương Y. Bàn dao sẽ được gá trên khớp nối các cánh tay rô bốt, trên bàn dao lắp cơ cấu tạo ra chuyển động cắt chính gồm động cơ điện, truyền dẫn cơ khí và trục chính mang dao phay. Các tính toán sẽ được thực hiện để đảm bảo điều chỉnh được góc quay α của giá dao, phạm vi gia công và quỹ đạo đường dịch dao (tool path) cho các bài toán cụ thể.

2. Mô tả rô bốt song song 3 bậc tự do



Cơ cấu thiết kế được mô tả ở hình 1. Các con trượt A1 và A2 liên kết quay với các thanh A1B1 và A2B2 tương ứng, các con trượt này được trượt trên các trụ trượt thẳng đứng theo phương Z. Khâu A3B3 được thiết kế kiểu ống lồng với một đầu liên kết quay với con trượt A3, đầu còn lại được nối với giá dao tại khớp B3. Với kết cấu này dao phay lắp trên giá dao sẽ có 3 bậc tự do sau đây:

- Dịch chuyển thẳng đứng theo phương Z
- Dịch chuyển nằm ngang theo phương X
- Quay xung quanh trục Y

Hình 1: Rô bốt song song 3 bậc tự do

Cơ cấu tạo ra xích chuyển động cắt được lắp trên giá dao MB1B3, khoảng cách tâm từ trục dao phay tới điểm nối B1 ký hiệu là λ , các kích thước kết cấu sau được chọn trước và cố định: 11, 12, 14, 15, λ ; các kích thước d1, 13 điều chỉnh được; để dễ dàng trong các tính toán thiết kế, cơ cấu được lựa chọn với $l_4 = 15$.

3. Phân tích động học

3.1. Quan hệ động học ngược

Bài toán quan hệ động học ngược nhằm tìm tọa độ của điểm B1(x, z) và góc quay α của giá dao xung quanh trục Y.

Theo hình 1, hệ tọa độ OXZ gắn cố định với thân máy, hệ tọa độ O'x'z' gắn cố định với giá dao, ở đây O' là vị trí tâm dao cách khớp nối B1 khoảng cách tâm λ . Góc nghiêng α giữa các trục Z và Z' chính là góc nghiêng trục dao. Tọa độ O' của hệ tọa độ trục dao so với thân máy được xác định theo công thức:

$$[C] = [x, z]^T$$

Vị trí các con trượt A1 được tính theo các công thức:

$$[A_1] = [0, z_1]^T; [A_2] = [d_1, z_2]^T; [A_3] = [d_1, z_2 - l_4]^T$$

các giá trị z1 và z2 trong các công thức trên là biến đầu vào

Vec tơ tọa độ B1 trong hệ tọa độ cố định được tính theo biểu thức

$$[B_i] = [x'_i, z'_i] = R[B_i] + [c], \quad i = 1, 2, 3.$$

ở đây

$$[B_1] = [B_2] = [\lambda, 0]^T, [B_3] = [\lambda, -l_4]^T$$

R là ma trận hướng

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

Các đại lượng cần tìm của bài toán động học ngược sẽ là nghiệm của các phương trình sau:

$$[A_i] - [B_i] = l_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Từ hệ phương trình trên chúng ta tìm được các giá trị sau đây:

$$\begin{aligned} z_1 &= z'_1 - \sqrt{l_1^2 - x_1'^2} \\ z_2 &= z'_1 - \sqrt{l_2^2 - (d_1 - x'_1)^2} \\ l_3 &= \sqrt{(x'_3 - d_1)^2 + (z'_3 - z_2 + l_4)^2} \end{aligned}$$

ở đây

$$\begin{aligned} x'_1 &= x + \lambda \cdot \cos \alpha, \\ z'_1 &= z - \lambda \sin \alpha, \\ x'_3 &= x + \lambda \cos \alpha - l_4 \sin \alpha, \\ z'_3 &= z - \lambda \sin \alpha - l_4 \cos \alpha \end{aligned}$$

3.2. Quan hệ động học thuận

Đồng thời với việc giải hệ phương trình (1), chúng ta sẽ có các nghiệm sau đây của bài

toán quan hệ động học thuận:

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos \alpha_2 - \lambda \cos \alpha \\ z &= z_1 + l_1 \sin \alpha_2 + \lambda \sin \alpha \\ \alpha &= \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{(d_1 - l_3 \sin \alpha_1 - l_1 \sin \alpha_2)}{(z_2 - l_4 + l_3 \cos \alpha_1 - z_1 - l_1 \cos \alpha_2)} \right) \end{aligned}$$

ở đây các góc α_1 và α_2 có thể dễ dàng tính được theo các quan hệ hình học.

4. Phương trình vận tốc, tính kỳ dị và miền gia công

4.1. Phương trình vận tốc

Lấy đạo hàm theo thời gian hệ phương trình (1) chúng ta sẽ nhận được các phương trình vận tốc.

$$J \dot{q} = J \dot{p} \quad (2)$$

ở đây \dot{q} là véc tơ vận tốc

$$\dot{q} = [z_1, z_2, l_3]^T$$

và \dot{p} là véc tơ vận tốc

$$\dot{p} = [x, z, \alpha]^T$$

Các ma trận bậc 3 J_q và J được tính theo các công thức sau:

$$\begin{aligned} J_q &= \begin{bmatrix} z_1 - z_1' & 0 & 0 \\ 0 & z_2 - z_1' & 0 \\ 0 & z_3 - z_3' & l_3 \end{bmatrix} \\ J &= \begin{bmatrix} -x_1' & z_1 - z_1' & k_2 x_1' + k_1 (z_1 - z_1') \\ d_1 - x_1' & z_2 - z_1' & -k_2 (d_1 - x_1') + k_1 (z_2 - z_1') \\ x_3' - d_1 & z_3 - z + l_4 & k_3 (x_3' - d_1) - k_4 (z_3 - z + l_4) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

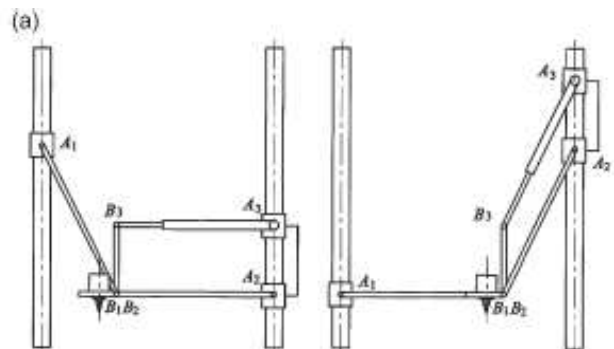
ở đây

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\lambda \\ \lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_4 & -\lambda \\ \lambda & -l_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{bmatrix}$$

4.2. Các trạng thái kỳ dị

Các trạng thái kỳ dị sẽ làm mất khả năng điều khiển và giảm đáng kể hệ số cứng vững của cơ cấu, do vậy phải thiết kế vùng làm việc của cơ cấu luôn luôn nằm ngoài các điểm kỳ dị này. Từ việc khảo sát các ma trận Jacob thuận và nghịch, chúng ta sẽ tìm được 3 trạng thái kỳ dị sau đây:

+ Trạng thái kỳ dị thứ nhất xuất hiện khi thoả mãn phương trình sau: $\det(J_q) = 0$



Hình 2: Trạng thái kỳ dị thứ nhất

Trạng thái kỳ dị này tương ứng với giới hạn vùng làm việc của hệ thống. Khi này phương trình sau phải được thoả mãn:

$$(z_1 - z_1')(z_2 - z_1')l_3 = 0$$

Phương trình trên chỉ xảy ra khi $(z_1 - z_1') = 0$ hoặc $(z_2 - z_1') = 0$.

Các sơ đồ trên các hình 2 cho chúng ta thấy các trạng thái kỳ dị xảy ra khi hoặc là thanh A_1B_1 hoặc thanh A_2B_2 có phương nằm ngang

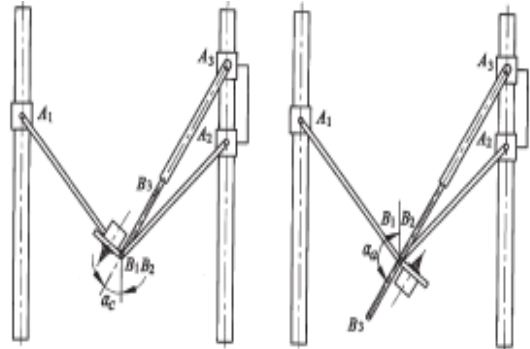
+ Trạng thái kỳ dị thứ hai xảy ra khi:

$$\det(J) = 0$$

Điểm kỳ dị này nằm trong vùng gia công của cơ cấu. Từ phương trình (2) chúng ta có:

$$[(x_3 - x_3')(z_1 - z_3') - (x_1 - x_3')(z_3 - z_3')]K = 0$$

ở đây K là tham số kết cấu, nếu $(z_1 - z_1') \neq 0$ và $(z_2 - z_1') \neq 0$ thì hệ số $K \neq 0$



Hình 3: Trạng thái kỳ dị thứ hai

Khi phương trình này thoả mãn với $K \neq 0$ chúng ta sẽ nhận được

$$(x_3 - x_3')/(z_3 - z_3') = (x_1 - x_3')/(z_1 - z_3')$$

Cấu hình với điểm kỳ dị này xảy ra khi các thanh A_2B_2 và B_2B_3 song song với đường tâm của dao phay. Theo hình 3 góc quay của trục dao theo phương Y khi đó sẽ là α_a và α_c và được tính theo công thức

$$\alpha_a = \frac{\pi}{2} - \text{tg}^{-1} \left(\frac{\sqrt{l_2^2 - (d_1 - x)^2} - l_4}{d_1 - x} \right)$$

$$\alpha_c = \alpha_a - \pi$$

+ Trạng thái kỳ dị thứ 3 xảy ra khi đồng thời J_q và J đều bằng không. Trạng thái kỳ dị này xảy ra ngoài vùng gia công, do đó chúng ta không đề cập tới.

4.3. Miền gia công

Theo các tài liệu [1] và [2] chúng ta sẽ tìm miền gia công trên cơ sở phân tích các ma trận J_q và J Gọi δ_i ($i=1, \dots, 3$) là các hằng số kỳ dị của các ma trận J_q và J thì miền gia công sẽ là :

$$w_1 = \delta_1 / \delta_3$$

Trong trường hợp cơ cấu khảo sát, chúng ta chỉ xét ma trận J là ma trận liên quan tới các kích thước công nghệ, khi này phương trình đặc trưng sẽ có dạng

$$\det(\lambda E_3 - J^T J) = 0 \tag{3}$$

Hằng số kỳ dị khi này sẽ là:

$$\delta = \sqrt{\lambda_i (J^T J)}; (i = 1 \dots 3)$$

Từ các quan hệ trên sẽ rút ra kết luận hệ số w_1 càng nhỏ thì miền gia công của cơ cấu thiết kế càng được mở rộng.

5. Không gian tương tác thực

5.1. Trong mặt phẳng

Với cơ cấu đang nghiên cứu, bậc tự do trong chuyển động quay chính là góc quay tương đối giữa giá dao với các trục tọa độ x hay z . Góc quay này không ảnh hưởng gì tới vùng dịch chuyển của các thanh A_1B_1 và A_2B_2 , do đó chúng ta sẽ sử dụng điểm B để xác định vùng làm việc của robot.

Từ phương trình (3) chúng ta có

$$\begin{aligned} (x_1' - 0)^2 + (z_1' - z_1)^2 &= l_1^2 \\ (x_1' - d_1)^2 + (z_1' - z_2)^2 &= l_2^2 \end{aligned}$$

Với z_1 và z_2 là cố định thì các quan hệ trên chính là phương trình đường tròn. Với thanh A_1B_1 thì đường tròn đó có tâm tại điểm $(0, z_1)$, bán kính là l_1 . Thanh A_2B_2 sẽ dịch chuyển theo vòng tròn tâm (d_1, z_2) , bán kính l_2 . Bỏ qua các kích thước thực của cơ cấu, đồng thời giả thiết khoảng dịch chuyển của con trượt theo phương z

$$z_1, z_2 \in [z_{\min}, z_{\max}]$$

thì miền xác định của từng thanh chính là hình bao của các vòng tròn liên tiếp, miền xác định của điểm B sẽ là giao của 2 hình bao nói trên. Hình 4 là kết quả cho trường hợp $l_1 = l_2 = d_1 = 1$; $z_1, z_2 \in [0, 1.5]$

Theo hình 4 hệ số khuếch đại kích thước ν sẽ đạt cực đại tại giá trị x_{\max}

$$\nu = x_{\max} / d_1$$

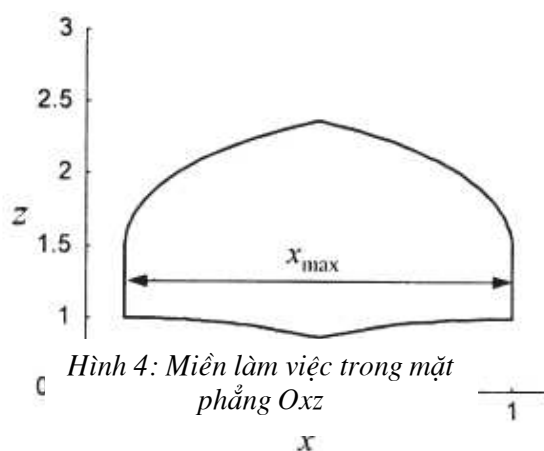
ở đây d_1 là khoảng cách theo phương x giữa hai giá trượt

$$x_{\max} = \begin{cases} d_1; (l_1 \geq d_1, l_2 \geq d_1) \\ l_1 + l_2 - d_1; (l_1 \leq d_1, l_2 \leq d_1) \\ l_1; (l_1 \leq d_1, l_2 \geq d_1) \\ l_2; (l_1 \geq d_1, l_2 \leq d_1) \end{cases}$$

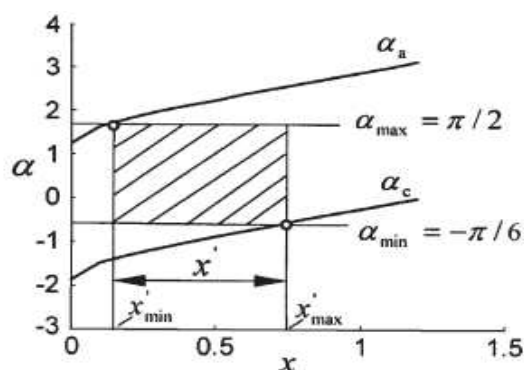
5.2. Góc quay của giá dao

Góc quay của giá dao được điều khiển bởi một truyền dẫn servo và đây chính là trục điều khiển thứ 3 của robot, chính tọa độ góc này quyết định trạng thái kỹ dị thứ hai như vừa được khảo sát ở các mục trước.

Hình 5 là quan hệ giữa α với x cho trường hợp $l_1 = l_2 = d_1 = 1, 2$; $l_4 = 0, 3$ và $\lambda = 0$.



Hình 4: Miền làm việc trong mặt phẳng Oxz



Hình 5: Giới hạn góc quay giá dao

Để tránh các trạng thái kỳ dị, giá trị của α sẽ phải biến thiên trong khoảng từ α_{\min} tới α_{\max} . Miền gạch trong hình vẽ bên là miền biến thiên của α khi $\alpha_{\min} = \pi/2$ và $\alpha_{\max} = -\pi/6$.

6. Hệ số góc của hàm tham số

Gọi w là hàm tham số

$$w = f(\mu_1, \mu_2 \dots \mu_n); i = 1 \dots n$$

Đạo hàm riêng phương trình trên

theo biến μ chúng ta có

$$w' = \frac{df}{d\mu_i} = \left[\frac{f(\mu_i + \Delta\mu_i) - f(\mu_i)}{\Delta\mu_i} \right]_{\Delta\mu_i \rightarrow 0}$$

w' chính là hệ số góc theo tham số khảo sát μ

Hình 6 biểu diễn quan hệ w_1 theo α ứng với các giá trị cụ thể của μ là 0,1; 1; 1,5 và ≥ 2.0

7. Lựa chọn thiết kế cấu trúc tối ưu

Từ tất cả các quan hệ giải tích trên, chúng ta có thể thấy rằng các phương án thiết kế phải được tối ưu hoá theo các hàm mục tiêu sau:

- Kích thước cơ cấu nhỏ nhất
- Miền làm việc của cơ cấu lớn nhất
- Góc quay giá dao lớn nhất

Góc quay giá dao phải bảo đảm sử dụng được 70% khoảng dịch chuyển của d_1 , tức là phải có $w' \geq 0,7$. Khi này các góc quay cực trị sẽ là $\alpha_{\min} \geq -0,2$ và $\alpha_{\max} \leq -\pi/2$.

Lựa chọn các tham số kết cấu như sau: $\mu_1 = \mu_2 = 1; \mu_3 = 0,25; \mu_4 = -0,2$. Các khoảng dịch chuyển theo các trục toạ độ (x, y, z) tương ứng là (850mm, 1000mm, 630 mm).

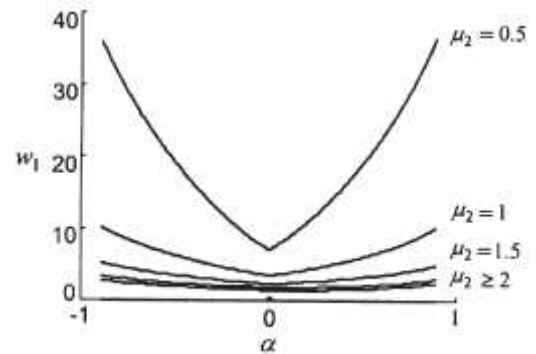
8. Kết luận

Cơ cấu đề xuất trên cơ sở tích hợp robot song song 3 bậc tự do với một bàn máy 1 bậc tự do tạo ra cấu trúc máy CNC 4 bậc tự do, có các đặc trưng động học, động lực học thoả mãn các yêu cầu thiết kế.

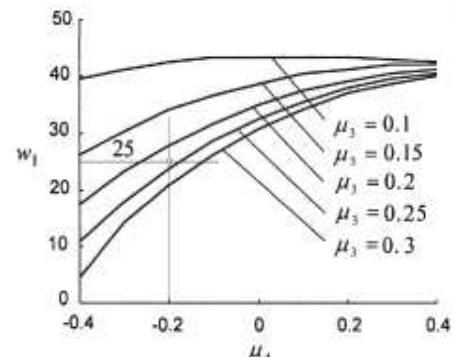
Các kết luận để tối ưu hoá các thông số kết cấu nhằm tìm ra miền làm việc lớn nhất của robot trong cả chuyển động tịnh tiến trong mặt phẳng theo phương x và phương z, cũng như trong chuyển động quay xung quanh trục Y của giá dao.

Với các quan hệ của cơ cấu đã xác lập, bước đầu có thể thiết kế tổng quan sau đó thiết kế chi tiết các cụm máy và cơ cấu máy nhằm giải quyết bài toán gia công các chi tiết phức tạp mà điển hình là các mặt làm việc của các cánh tuốc bin công nghiệp.

Trên cơ sở nghiên cứu khả thi này, nếu có các dự án lớn với kinh phí phù hợp thì hoàn toàn có thể chế tạo thử nghiệm máy phay CNC 4 bậc tự do để gia công cánh tuốc bin.



Hình 6: Biểu diễn một hàm tham số



Hình 7: Tối ưu hoá theo tham số μ_4

Các hướng nghiên cứu tiếp theo của bài báo này sẽ được nhóm tác giả tiếp tục thực hiện trong các đề tài nghiên cứu tiếp theo cũng như trong đào tạo thạc sĩ và nghiên cứu sinh ngành cơ khí chế tạo máy.

Tóm tắt

Bài báo này đưa ra một thiết kế mới cho phương án máy phay CNC 4 bậc tự do dựa trên cơ sở một cơ cấu ro bốt song song 3 bậc tự do. Các tính toán được trình bày cho cả bài toán thuận và bài toán nghịch của cơ cấu lựa chọn. Mô hình được thiết kế sẽ đảm bảo quá trình định hướng dao và thoả mãn không gian gia công lớn nhất cho từng bài toán cụ thể khi chế tạo cánh tuốc bin.

Summary

ANALYSIS AND STRUCTURAL DESIGN OF 4- DOF CNC MILLING MACHINE FOR CUTTING THE TURBINE BLADES

This paper presents a four degree of freedom hybrid machine tool based on a novel planar 3-DOFs parallel manipulator and a long movement of the worktable. Closed – form solutions are developed for both the inverse and direct kinematics of the designed manipulator. Three kinds of singularities are presented with the demensional design satisfying the requirements of motion platform realizing cutter orientation capability, dexterity and workspace of proposed models for milling the turbine blades.

Tài liệu tham khảo

- [1]. K. Cleary and T. Brooks (1993), *Kinematics analysis of a novel 6-DOFs parallel manipulator*, *IEEE conference on robotics and automation*, P 708.
- [2]. C. Reboulet, R. Pigeyre (2004), *Hybrid control of a 6-DOF in parallel micro manipulator mounted on a scara robot*. *Int. J. of Robotics and Automation*.
- [3]. Nguyễn Đăng Hoè (2005). *Tổ hợp bộ hậu vi xử lý thuận và nghịch cho trung tâm gia công nhiều trục*. Tạp chí KHCVN các trường ĐH Kỹ thuật, số 52/2005.