

기하학적인 방법을 이용한 3 Rotary 형식 5축 가공기의 후처리 방법

윤재득*, 정용호**, 박도현***

A Post-processing Method for 3 Rotary Type 5-axis Machines using Geometric Method

Jaedeuk Yun*, Yoongho Jung** and Dohyun Park***

ABSTRACT

This paper presents a post-processing algorithm for 5-axis machines with three rotary axes (3R-2L type). 5-axis machining needs the postprocessor for converting cutter location (CL) data to machine control (NC) data. The existing methods for post-processing use inverse kinematics equations from forward kinematics. However in case of 5-axis machines with three rotary axes, the inverse kinematics equations are not induced directly since the forward kinematics equations are non-linear. In order to get the joint values from the forward kinematics equations, previous algorithms use numerical method for the post-processing, which needs searching algorithms with computation time and may result in fail. This paper proposes a geometric method for the post-processing of 3 rotary type 5-axis machines. Our algorithm has three advantages: first, it does not need establishing forward kinematics equations. Second, it is reliable method that eliminates any numerical methods for the inverse kinematics, resulting in the exact solution. Finally, the proposed algorithm can also be applied to 2R-3L type of 5-axis machines.

Key words : 5-axis machining, inverse kinematics, Reliable, 3 Rotary, NC data

1. 서 론

5축 가공은 인펠러, 터빈 블레이드, 인공관절 부품 등의 가공을 위해 사용되고 있으며, 타이어 금형을 포함한 일반 사출금형 분야에도 점차 확산되고 있는 추세이다. 3축 가공기에 비해 5축 가공기는 2개 이상의 회전축을 가지고 있기 때문에 공작물에 대한 공구의 자세를 변화시킬 수 있어서 자유곡면과 같은 복잡한 형상을 가공할 수 있고, 또한 공구의 측면으로 가공하는 경우 가공시간을 단축할 수 있는 이점이 있다.

5축 가공기는 가공할 공작물에 적합한 형식의 가공기가 적용된다. 예를 들어 선박용 프로펠러의 경우, 2R-3L(2개의 회전축과 3개의 직선 이송축으로 구성된 기계) 형식의 5축 가공기가 사용되면 기계의 크기가

매우 커진다. 따라서 이러한 부품의 가공을 위해서는 기계의 크기를 줄이기 위해 일반적으로 3R-2L(3개의 회전축과 2개의 직선 이송축으로 구성된 기계) 형식의 5축 가공기가 사용된다.

한편, 5축 가공을 위해서는 CAM 프로그램에서 생성한 공구경로 데이터가 저장되어 있는 CL파일을 5축 가공기가 인식할 수 있는 NC파일 변환해주는 후처리(post-processing)과정이 반드시 필요하다. 이 과정에서 공작물 좌표계에서 정의된 공구 끝 점의 위치와 공구의 자세 데이터를 기계 좌표계의 기계 이송량으로 변화해주는 기능을 수행한다. 3축 가공의 경우 직선 축의 이송만을 고려하기 때문에 단순한 좌표면 변환으로 후처리가 가능하다. 그러나 5축 가공의 경우 회전축으로 인해 복잡한 계산 과정을 통해 이러한 후처리 과정이 수행되는데, 일반적으로 5축 가공기의 정기구학식을 구한 후에 그것을 토대로 역기구학식을 구하여 기계의 각축의 이송량 및 회전량을 계산하는 방식을 사용한다.

이러한 후처리 과정에 대해 많은 연구가 있었는데,

*학생회원, 부산대학교 기계공학부
**교신저자, 종신회원, 부산대학교 기계공학부
***비회원, I.G 전자
- 논문투고일: 2009. 04. 15
- 심사완료일: 2009. 07. 13

Tutunea-Fatan과 Feng^[1]은 두 개의 회전축으로 구성된 5축 가공기에 대해 일반화된 좌표변환 관계를 제시하였다. Lee와 She^[2]는 대표적인 세 종류의 5축가공기 모델의 역기구학 방정식을 제시하였으며, She 등^[3,4]은 테이블에서 공구에 이르는 좌표변환과정에서 네 개의 회전변환을 적용하여 일반적인 5축 가공기에 적용할 수 있는 역기구학 좌표변환을 제시하였다. Jung 등^[5]은 모든 회전축이 서로 수직하게 배치된 2R-3L형식의 5축 가공기에 적용할 수 있는 일반적인 역기구학 방정식을 제시하였다. Zaidman^[6]은 회전축이 수직하지 않은 기계형식에 대한 일반화된 좌표변환을 제시하였으며, Sørbø^[7]는 회전축이 45°로 기울어진 기계에 대한 후처리 과정을 제안하였다. 위의 과정들은 모두 2R-3L 형식의 5축 기계의 후처리방법에 관한 연구였으며, 위의 선행연구들은 모두 정기구학식을 구한 후 이로부터 역기구학식을 유도하는 방법을 택하고 있다. 특히 본 연구에서 적용한 3R-2L형식의 5축 가공기의 경우에도 이와 같은 전형적인 방법을 적용하여 후처리를 수행한 연구가 있었다. 그러나 3R-2L 형식의 경우, 정기구학식이 비선형이기 때문에 이로부터 직접 역기구학식을 구할 수 없다. 따라서 이를 해결하기 위해 수치 해석적인 방법을 이용하여 해를 구할 수 있는데^[8], 이러한 수치 해석적인 방법은 계산시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 적용하는 알고리즘에 따라 해를 구하지 못할 수도 있는 신뢰성의 문제가 있다.

본 연구에서는 일반적인 후처리 방법과는 다르게, 정기구학식과 역기구학식을 구하지 않고 기하학적인 방법을 이용하여 직접 각 축의 이송량을 구할 수 있는 후처리 방법을 제안한다. 제안된 방법을 사용하면 수치해석으로 구할 수 밖에 없었던 3R-2L 형식의 5축 기계에 대해 정확한 해를 구할 수 있으며 계산 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 2R-3L형식의 5축 가공기의 후처리에도 적용할 수 있다.

2. 3R-2L 형식 5축 가공기의 후처리 방법

본 연구에서 적용한 3R-2L 형식의 5축 기계는 Fig. 1과 같이 3개의 회전축(A, B, C)과 2개의 선형축(Y, Z)으로 구성되어 있다. 이러한 형식은 공작물에서 공구까지 C→Y→A→Z→B축의 순서(R1RTR형식)로 구성되어 있기 때문에 회전축과 선형축이 교대로 배치되어 있는 구조이다.

이와 같은 5축 가공기에 대해 기존의 방법으로 후처리를 수행하기 위해서는 먼저 정기구학식을 구해야

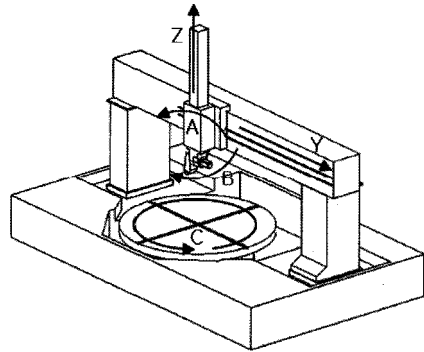


Fig. 1. 3R-2L type 5-axis machine.

한다. 그런데 이러한 5축 가공기의 경우 Fig. 1과 같이 회전축이 세 개이고 회전축과 선형축이 교대로 배치되어 있기 때문에 정기구학식이 매우 복잡해진다. 뿐만 아니라, 식 (1)은 정기구학식에서 공구의 방향 성분을 나타낸 것인데, 이는 비선형이기 때문에 이로부터 회전 이송축 A, B, C의 값을 구하기 위한 역기구학식을 직접 유도할 수 없다. 따라서 이를 해결하기 위해 기존의 방법에서는 수치 해석적인 방법을 사용하였다^[8]. 수치 해석적인 방법을 사용하는 경우, 전술한 바와 같이 계산 시간이 많이 소요되며, 탐색법을 사용하는 수치 해석법의 특성상 해를 구하지 못할 수도 있으며, 구한 값은 엄밀한 의미에서 정확 해(exact solution)가 아니다.

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos C \sin A \sin B - \cos B \sin C \\ \cos B \cos C + \sin A \sin B \sin C \\ -\cos A \sin B \end{bmatrix} \quad (1)$$

3. 기하학적인 후처리 방법

본 연구에서 제안하는 기하학적인 방법에 의한 후처리 과정은 다음과 같이 두 단계로 진행된다. 첫번째 단계에서는 5축 가공기의 각 조인트(joint)들에 해당하는 ‘조인트 점(joint point)’들의 위치를 구한다. 즉, Fig. 2와 같이 각 조인트의 중심을 조인트 점으로 두고, 공구의 끝점에 해당하는 P_0 점을 공작물 좌표계에 대해 정의된 CL 데이터 값으로 설정한 후, 각 조인트 점들을 잇는 벡터의 기하학적인 상관관계를 고려하여 연결된 조인트 점들을 순서대로 구해나간다. 두 번째 단계는, 첫 번째 단계에서 구해진 조인트 점들의 위치 관계로부터 각 축의 이송량과 회전량을 결정한다. 즉 모든 조인트 점의 위치가 구해지면, 이송축 값은 그 축이 위치하는 현재의 조인트 점의 위치와 초기 조인트

트 점의 위치와의 거리를 이송량으로, 회전축의 경우는 그 축에서 만나는 두 벡터가 이루는 각으로 회전량을 결정한다. 다음의 소절에서 각 단계에 대해 보다 상세히 소개한다.

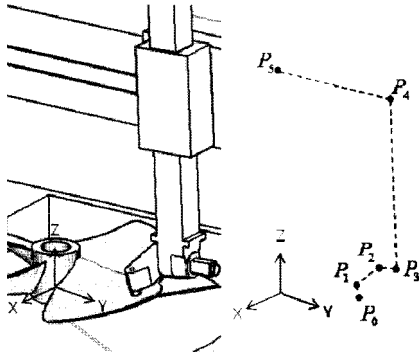


Fig. 2. Joint points of 3R-2L type 5-axis machine.

3.1 조인트 점의 위치 결정

본 연구에서 제안하는 기하학적 방법에 의해 후처리된 수해하는 과정의 첫 번째 단계에서는, 3R-2L형식의 5축 가공기의 구조적인 특징을 이용하여 5축 가공기의 각 조인트의 중심에 해당하는 조인트 점들의 위치를 구한다. 5축 가공기는 Fig. 2와 같이 공구의 끝점에 해당하는 P_0 를 제외하면 P_1 부터 P_3 까지 총 다섯 개의 조인트 점들로 구성되며, 이에 따라 다섯 개의 조인트 점의 위치를 구한 후 구해진 각 조인트 점으로 선분을 이어 각 조인트가 이동해야 할 기계 좌표 값을 구한다.

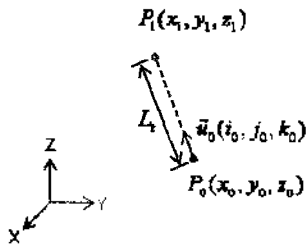


Fig. 3. The first and second joint points.

이를 위해 제일 먼저, 공구 끝의 위치를 P_0 로 두면, 이 점은 CL data의 x, y, z 좌표값에 대응되기 때문에 이를 x_0, y_0, z_0 로 설정한다. 다음으로 P_0 를 지나고 공구의 축방향의 선분과 B회전축과 수직이면서 공구와 B축을 연결하는 링크의 축방향선분과의 교점이 P_1 이 되고, P_1 은 Fig. 3과 같이 P_0 에서 CL data의 i, j, k 값인 i_0, j_0, k_0 방향으로 길이가 L_1 만큼 떨어진 지점

이며, 식 (2)로 구할 수 있다.

$$P_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 L_1 + x_0 \\ j_0 L_1 + y_0 \\ k_0 L_1 + z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

두 번째 점 P_2 는 B 회전축 상에 있는 점이 된다. 그런데 P_1 에서 P_2 까지 거리는 L_2 이고 $\vec{P_0P_1}$ 과 $\vec{P_1P_2}$ 는 서로 수직이다. 따라서 이러한 두 조건을 만족하는 P_2 는 Fig. 4와 같이 P_1 을 중심으로 반지름이 L_2 이고 공구의 방향 벡터인 \vec{u}_0 방향에 수직인 원의 궤적상의 한 점이 된다. 한편, Fig. 2와 같은 3R-2L형식의 5축 가공기에서 $\vec{P_2P_3}$ 는 Z축을 지나는 평면상에 있어야 한다. 따라서 P_2 가 존재할 수 있는 원의 궤적과 Z축을 포함하는 평면과 만나는 지점이 P_2 의 위치가 된다.

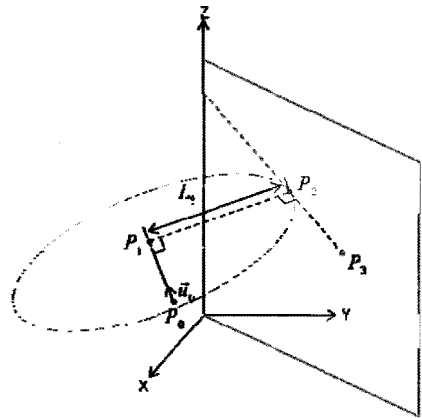


Fig. 4. The second joint point.

P_2 의 위치를 구하기 위해, Fig. 4의 원의 궤적을 X-Y평면에 투영하면 Fig. 5와 같이 타원이 되고 Z축을 포함하는 평면은 X-Y평면에서 원점을 지나는 직선이 된다. 그러므로 Fig. 5와 같이 원점을 지나는 직선과 타원의 접점이 P_2 의 위치가 된다. X-Y평면에 투영된 타원의 방정식을 구하기 위해서는 먼저 3차원 공간상의 원의 중심축이 Z축에 대해 기울어진 각(θ_{x-y})을 구한 후, 투영된 타원이 Z축에 대해 회전된 각(θ_z)을 구해야 한다. 이는 다음의 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\theta_{x-y} = \arctan 2(\sqrt{i_0^2 + j_0^2}, k_0) \quad (3)$$

$$\theta_z = \arctan 2(j_0, i_0)$$

타원과 원점을 지나는 접선을 구하기 위해서는 타

원의 방정식을 세우면 쉽게 구할 수가 있다. 타원의 방정식을 세우기 위해서는 타원의 축과 좌표축이 평행하게 되어야 하므로 Fig. 5(a)에서와 같이 투영된 타원을 $-\theta_2$ 만큼 회전시켜 Fig. 5(b)와 같이 구한다. 이때 새로운 타원의 중심 (x'_1, y'_1) 은 식 (4)와 같이 구하며, 타원의 상축과 단축은 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta_2) & -\sin(-\theta_2) \\ \sin(-\theta_2) & \cos(-\theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$r_1 = L_b, \quad r_2 = L_b \cos \theta_{X-Y} \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)로 구해진 타원의 중심과 장단축 길이를 이용하여 식 (6)과 같이 타원의 방정식을 세우고, 원점을 지나는 접선의 방정식을 식 (7)과 같이 세운 후, 이를 연립하여 풀면 Fig. 5(b)와 같이 두 개의 접점이 구해진다. 기계 구조상 타원의 중심이 접선의 우측에 위치하는 점을 최종적으로 P'_2 로 정한다.

$$\frac{(x-x'_1)^2}{r_1^2} + \frac{(y-y'_1)^2}{r_2^2} = 1 \quad (6)$$

$$y = ax \quad (7)$$

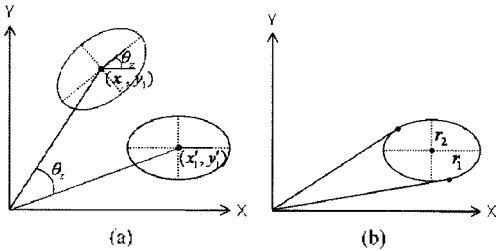


Fig. 5. Ellipse on X-Y plane and tangent line to the ellipse.

P'_2 를 θ_2 만큼 다시 회전시켜서 P_2 의 x, y 성분을 구한다. 또한 P_2 의 z 성분은 $\overrightarrow{P_0P_1} \cdot \overrightarrow{P_1P_2} = 0$ 인 조건을 이용하여 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$z_2 = z_1 - \frac{(x_1-x_0)(x_2-x_1) + (y_1-y_0)(y_2-y_1)}{z_1-z_0} \quad (8)$$

세 번째 점 P_3 는 Fig. 6과 같이 $\overrightarrow{P_0P_1}$ 와 $\overrightarrow{P_1P_2}$ 에 수직인 방향으로 D_b 만큼 떨어진 점으로 식 (9)와 같이 벡터외적으로 방향을 구하고 식 (10)으로 P_3 의 위치를 구한다.

$$\vec{u}_2 = \begin{bmatrix} i_2 \\ j_2 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_0 j_1 - j_0 k_1 \\ i_0 k_1 - k_0 i_1 \\ j_0 i_1 - i_0 j_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_2 D_b + x_2 \\ j_2 D_b + y_2 \\ k_2 D_b + z_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

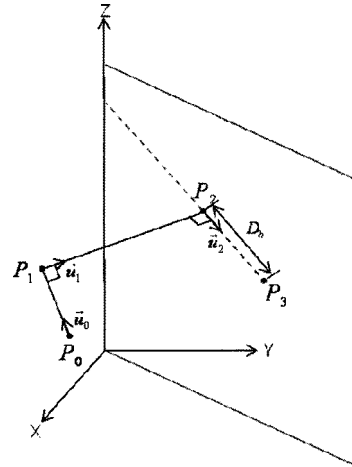


Fig. 6. Third joint point.

네 번째 조인트 점 P_4 는 Fig. 7에서와 같이 P_3 을 포함하고 법선 벡터가 (i_2, j_2, k_2) 인 평면과, (x_3, y_3, D_c) 와 $(0, 0, D_c)$ 를 지나는 직선의 교점이다. 평면의 방정식은 식 (11)과 같고 직선의 방정식은 식 (12)와 같으며 두 식을 이용하여 교점을 구한다.

$$i_2(x-x_3) + j_2(y-y_3) + k_2(z-z_3) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{x}{x_3} = \frac{y}{y_3}, \quad z = D_c \quad (12)$$

다섯 번째 점 P_5 는 기계 좌표계 원점에서 D_c 만큼 떨어진 지점으로 정한다.

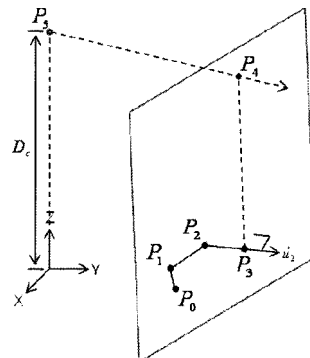


Fig. 7. The fourth and fifth joint points.

3.2 조인트의 변위량 계산

본 연구에서 제안하는 방법의 두 번째 단계에서는, 첫 번째 단계에서 구한 각 조인트 점들이 이루는 각도 또는 조인트 점들 사이의 거리를 이용하여 각 축의 이송량 및 회전량을 계산한다. 먼저 A축의 회전량은 Fig. 8에서 보는 것과 같이 조인트 점 P₃에서 P₄로 향하는 벡터와 조인트 점 P₄에서 P₅로 향하는 벡터가 이루는 각이므로 이를 식 (13)을 이용하여 구한다.

$$A = \cos^{-1} \left(\frac{P_3P_4 \cdot P_4P_5}{|P_3P_4| |P_4P_5|} \right) \quad (13)$$

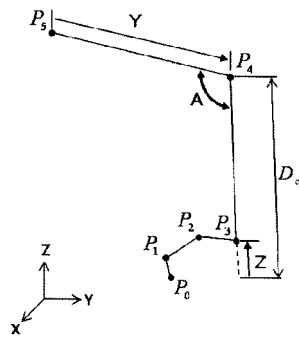


Fig. 8. Determination of joint angle A.

Y축의 이송량은 P₄와 P₅ 사이의 거리이기 때문에 $|P_4P_5|$ 로부터 간단하게 구할 수 있으며, Z축의 이송량은 Z축의 초기 위치값인 D에 P₃와 P₄ 사이의 거리를 뺀 값으로 구할 수 있다.

B축의 회전량은 Fig. 9(a)와 같이 P₃에서 P₂ 방향으로 보았을 때 P_1P_2 와 P_3P_4 가 이루는 각이므로 아래의 식 (14)와 같이 구한다.

$$A = \cos^{-1} \left(\frac{P_1P_2 \cdot P_3P_4}{|P_1P_2| |P_3P_4|} \right) \quad (14)$$

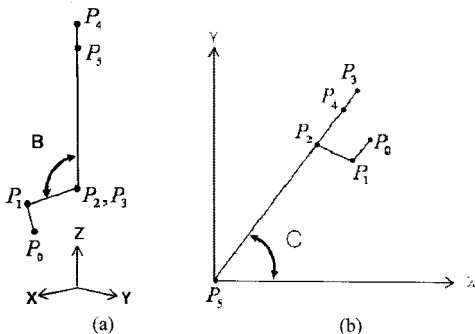


Fig. 9. Determination of joint angle B and joint angle C.

C축의 회전량은 Fig. 9(b)와 같이 Z축과 평행한 방향으로 보았을 때, 기계 좌표계의 X축과 원점에서 P₃를 향하는 벡터가 이루는 각이므로 식 (15)와 같이 구한다.

$$C = \tan^{-1} \left(\frac{y_3}{x_3} \right) \quad (15)$$

4. 적용 및 결과

본 연구에서 제안한 기하학적 방법으로 후처리를 수행하는 방법을 프로그램화 하였으며, 제안된 알고리즘을 검증하기 위해 Fig. 10과 같은 3R-2L형식의 5축 가공기를 이용하여 프로펠러의 정상 가공을 후처리한 후, 이를 가공시뮬레이션 프로그램인 Vericut을 사용하여 그 결과를 검증하였다. Fig. 11은 후처리된 NC 파일로 프로펠러를 가공하는 것을 보이고 있는데, CL 파일의 공구 경로와 본 연구에서 제안한 알고리즘으로 후처리한 NC 파일의 공구 궤적이 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

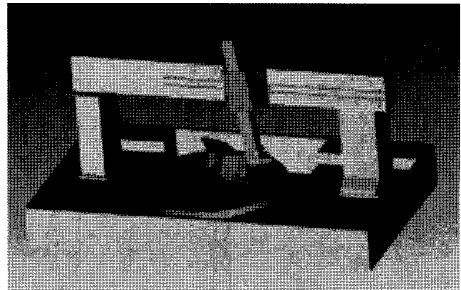


Fig. 10. Machining simulation with 3R-2L type machine.

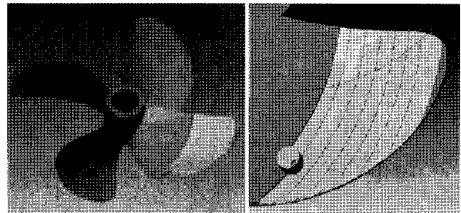


Fig. 11. Propeller machining simulation.

6. 결 론

기존의 5축 가공기의 후처리 방법은 기계 테이블에서 공구까지 각 조인트들의 관계를 정기구학으로 표현한 후 이를 다시 역기구학으로 푸는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이러한 방법은 3R-2L형식의 5축 가공기의 경우 정기구학식이 복잡해질 뿐만 아니라,

비선형인 정기구학식으로부터 역기구학식을 유도할 수 없기 때문에 수치해석적인 방법을 사용하여 구한다. 수치적인 방법을 사용하여 각 조인트 값을 구할 경우 계산시간이 오래 걸리고 또한 정확한 해를 구할 수가 없다.

본 연구는 공구 끝의 위치에서 시작하여 각 축이 위치하는 조인트 점을 기하학적으로 구한 후 각 조인트 점을 연결하는 벡터가 이루는 각으로 회전축의 회전량을 구하고 각 지점의 떨어진 거리로 이송축의 이송량을 구하기 때문에 정기구학식을 세울 필요가 없으며, 또한 역기구학을 유도할 필요가 없다. 뿐만 아니라 수치해석을 사용하지 않기 때문에 신뢰성 있게 정확한 해를 구할 수 있으며, 계산시간이 단축되는 잇점이 있다. 본 연구에서 제안한 방법은 2R-3L형식의 5축 공작기계에도 적용이 가능하다.

감사의 글

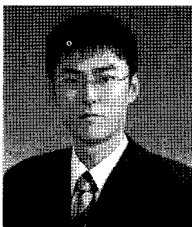
본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신 인력양성사업과, 교육과학기술부/한국과학재단의 국가 핵심연구센터 사업(No.R15-2006-022-03002-0)으로 수행된 연구 결과임.

참고문헌

1. Remus Tutunca-Fatan, O. and Feng, H. S., "Con-

figuration Analysis of Five-axis Machine Tools using a Generic Kinematic Model", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 1235-1243, 2004.

2. Lee, R. S. and She, C. H., "Developing a Postprocessor for Three Types of Five-Axis Machine Tools", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 13, pp. 658-665, 1997.
3. She, C. H. and Lee, R. S., "A Postprocessor Based on the Kinematics Model for General Five-Axis Machine Tools", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 2, No. 2, pp. 131-141, 2000.
4. She, C. H. and Chang, C. C., "Design of a Generic Five-axis Postprocessor based on generalized kinematics model of Machine Tool", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 537-545, 2007.
5. Jung, Y. H., Lee, D. W., Kim, J. S. and Mok, H. S., "NC Post-processor for 5-axis Milling Machine of Table-rotating/tilting Type", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, pp. 641-646, 2002.
6. E. G. Zaidman, "Development of a Five-axis Post-processor System with a Nutating Head", *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 187-188, pp. 60-64, 2007.
7. Knut Sørby, "Inverse Kinematics of Five-axis Machines Near Singular Configurations", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 299-306, 2007.
8. 박정환, "자유곡면 5축 NC 가공에 있어서의 최적 CL data 산출", 한국과학기술원 석사학위논문, 1991.



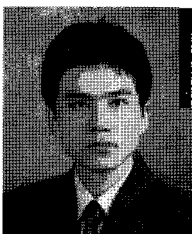
윤재득

2007년 부산대학교 기계공학부 학사
2009년 부산대학교 기계공학부 석사
2009년~현재 부산대학교 기계공학부
박사과정
관심분야: 5-axis high-speed machining,
Computational Geometry



정용호

1983년 부산대학교 기계공학과 학사
1990년 서울대학교 기계설계학과 석사
1993년 서울대학교 기계설계학과 박사
1993년~1996년 삼성항공(주) 수석연구원
1996년~현재 부산대학교 기계공학부 교수
관심분야: Geometric Modeling, 5-axis
High-speed Machining, Assembly
Modeling, Mesh generation



박도현

2007년 부산대학교 기계공학부 학사
2009년 부산대학교 기계공학부 석사
2009년~현재 LG전자 연구원
관심분야: 5-axis high-speed machining,
CAD/CAM