

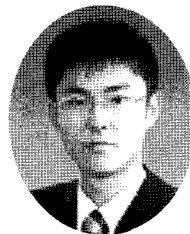
5축 가공을 위한 NC데이터 후처리 생성 기술



정응호

부산대학교
기계공학부

yhj@pusan.ac.kr



윤재득

부산대학교
기계공학부

yjdeuk@pusan.ac.kr

1. 서론

5축 가공은 임펠러, 터빈 블레이드, 인공관절 부품 등의 가공을 위해 사용되고 있으며, 타이어 금형을 포함한 일반 사출금형 분야에도 점차 확산되고 있는 추세이다. 5축 가공은 2개의 회전축을 가지고 있기 때문에 3축 가공으로 가공할 수 없는 복잡한 형상을 가공할 수 있고, 셋업 시간이 단축되며 고품질의 가공면을 얻을 수 있는 것이 특징이다. 일반적으로 금형 가공에 있어서 5축 가공이 3축 가공에 비해 20배 이상 가공 능률이 높은 것으로 알려져 있다.^(1,2) 한편, 5축 가공기는 이송축과 회전축의 기구학적 배치에 따라 다양한 형식이 존재하며 이와 관련된 기구학 방정식도 서로 다르게 된다. 5축 가공기는 대부분 2R-3L(2개의 회전축과 3개의 이송축으로 구성된 기계) 형식의 기계가 사용되지만 가공할 공작물에 따라 적합한 형식의 가공기가 적용된다.

예를 들어 선박용 프로펠러의 경우, 기계의 크기를 줄이기 위해 일반적으로 3R-2L(3개의 회전축과 2개의 이송축으로 구성된 기계) 형식의 5축 가공기가 사용된다.

이러한 5축 가공을 위해서는 CAM 프로그램에서 생성한 공구경로 데이터(CL)를 5축 가공기가 인식할 수 있는 NC 데이터로 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 직선축의 이송만을 고려하기 때문에 단순한 좌표변환만으로 후처리가 가능하다. 그러나 5축 가공의 경우 회전축의 추가로 복잡한 계산 과정을 통해 후처리 과정이 수행되는데, 일반적으로 5축 가공기의 정기구학식을 구한 후에 그것을 토대로 역기구학식을 구하여 기계의 각 축의 이송량 및 회전량을 계산하는 방식을 사용한다. 이와 관련하여 5축 가

공기의 후처리 과정에 대해 많은 연구가 있었는데, Lee와 She⁽³⁾는 대표적인 세 종류의 5축가공기 모델의 역기구학 방정식을 제시하였으며, Jung 등⁽⁴⁾은 모든 회전축이 서로 수직하게 배치된 2R-3L형식의 5축 가공기에 적용할 수 있는 일반적인 역기구학 방정식을 제시하였다. Zaidman⁽⁵⁾은 스피들의 회전축이 수직하지 않은 기계형식에 대한 일반화된 좌표변환을 제시하였으며, Sørby⁽⁶⁾는 테이블의 회전축이 45°로 기울어진 기계에 대한 후처리 과정을 제안하였다. 이러한 선행연구들은 모두 정기구학식을 구한 후 이로부터 역기구학식을 유도하는 방법을 택하고 있다. 그러나 이러한 방법들은 기계의 형식마다 각각의 정기구학과 역기구학 방정식을 풀어야 하며, 회전축이 서로 수직하지 않을 경우에는 역기구학을 구하는 과정이 복잡해진다. 또한 3R-2L형식의 5축 가공기의 경우에도 역기구학식을 이용하는 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⁽⁷⁾, 이러한 수치 해석적인 방법은 계산 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 적용하는 알고리즘에 따라 해를 구하지 못할 수도 있는 신뢰성의 문제가 있다.

본 기사에서는 기존의 방법들과 이와 관련한 문제를 해결할 수 있는 방법들을 소개하기 위해, 먼저 정기구학식과 역기구학식을 이용하는 전형적인 후처리 방법에 대해 간략히 설명하고, 3장에서는 모든 2R-3L 형식의 5축 기계의 후처리를 자동화 할 수 있는 탐색법에 의한 후처리 방법⁽⁸⁾에 대해 소개한다. 이 방법은 회전축이 2개인 모든 형식의 5축 공작기계에 적용할 수 있으며, 후처리의 전 과정을 자동화 할 수 있는 장점이 있다. 4장에서는 일반적인 후처리 방법과는 다르게, 정기구학식과 역기구학식을 구하지 않고 기하학적인 방법을 이용하여 직접 각 축의 이송량을 구할 수 있는 후처리 방법⁽⁹⁾을 소개하고자 한다. 이 방법을 사용하면 수치해석으로 구할 수밖에 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.

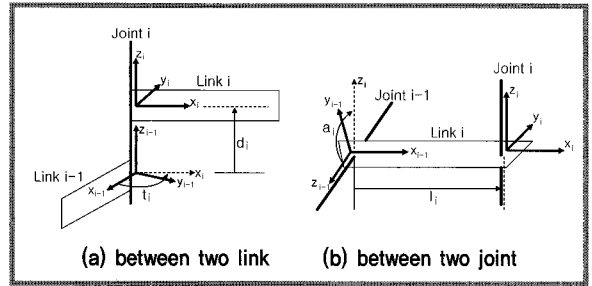


Fig. 1 링크간의 D-H 파라미터

2. 역기구학을 이용한 후처리 방법

5축가공은 3축가공과 달리 CL Data를 G-Code로 변환할 때 회전축의 추가로 인해 운동역학(Kinematics)을 고려해야 하며, 이를 위해서는 공작물 테이블에서 공구까지 각 조인트들의 관계를 정기구학 방정식으로 만들어야 한다. 정기구학 식을 만들기 위해서는 공작물 테이블에서 공구에 이르는 좌표변환을 구해야 하는데, Fig. 1과 같이 한 링크가 다른 링크와 조인트에 의해 구속되어 있는 경우 D-H parameter라 부르는 4개의 Kinematic parameter로 관계를 나타낼 수 있으며, 이들 파라미터를 이용하여 i-1번째에 대한 i번째 링크의 변환 행렬을 식 (1)과 같이 구성할 수 있다.

$$A_i = Rot_z(t_i) Trans_z(d_i) Trans_x(l_i) Rot_x(a_i) \quad (1)$$

식 (1)에 나타난 바와 같이 하나의 조인트에 대한 변환행렬은 4개의 기구 파라미터로 표현되며 동작축에 대한 입력 변수는 4개의 파라미터 중 어느 하나가 되며(회전 조인트인 경우 t_i , 슬라이딩 조인트인 경우 d_i), 나머지 세 개의 파라미터는 기구의 배치 상태를 나타내는 변수가 된다. 또한 변환 행렬의 구성은 제 1열에서 3열까지 회전 변환에 대한 좌표축 벡터와 제 4열의 이동 변환에 대한 벡터로 구성되어 있으며, 공작물에 대한 공구의 전체 변환 행렬은 식 (2)와 같이 공작물에서 시작하여 공구에 이르는 각각의 변환 행렬을 순차적으로 곱하여 구할 수 있다.

$$A_{table}^{tool} = A_{table}^1 \cdot A_1^2 \cdots A_{i-1}^i \cdots A_n \quad (2)$$

한편, 정기구학 방정식은 공작물 좌표계 기준에서의 공구의 위치와 자세를 기계 좌표계의 조인트 변수로 나타내는 것이며, 공구의 위치에 대한 정기구학 방정식은 전체 변환행렬의 제 4열을 취함으로써 구할 수 있다. 공구의 자세에 대한 벡터는 공구의 자세를 나타내는 공작물 좌표계의 z_0 축이 맨 마지막 좌표계의 어느 축과 일치하는 방향인지 판별하여 결정할 수 있다. 맨 마지막 좌표계의 x_n 축과 일치하는 경우 전체 변환 행렬의 제 1열을 공구 자세 벡터로 취하고 y_n 축이나 z_n 축과 일치하는 경우는 각각 제 2열 혹은 제 3열을 공구 자세 벡터로 취함으로써 전체 정기구학 방정식을 구한다.

예를 들어, Fig. 2는 테이블에 2개의 회전축이 장착되어 있는 5축 가공기로 Fig. 3과 같이 각각의 회전축과 이송축에 로컬 좌표계를 설정하고 식(3)과 같이 공작물 좌표계에 해당되는 C축의 로컬 좌표계에서 공구 좌표계까지 전체 좌표 변환 행렬을 구한다. 여기서 X, Y, Z는 이송축의 조인트 변위를 나타내고 A, C는 회전축의 조인트 변위를 나타낸다. D_1 와 D_2 는 테이블의 중심에서 기계좌표계까지의 오프셋을 의미한다. 식(3)의 전체 좌표 변환 행렬에서 공구 자세를 나타내는 열과 공구의 위치를 나타내는 열을 선택하여 식(4)와 같은 정기구학식을 구한다. 여기서 $[x \ y \ z \ i \ j \ k]^T$ 는 공구 끝점이 위치해야 할 CL 데이터를 의미한다.

$$A_{table}^{tool} = A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot A_2^3 \cdot A_3^4 \cdot A_4^5 \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ i \\ j \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \cos C - \sin C \cos A (Y + D_Y) + \sin C \sin A (Z - D_Z) + D_1 \sin C \\ X \sin C + \cos C \cos A (Y + D_Y) - \cos C \sin A (Z - D_Z) - D_1 \cos C \\ \sin A (Y + D_Y) + \cos A (Z - D_Z) + D_2 \\ \sin C \sin A \\ - \cos C \sin A \\ \cos A \end{bmatrix} \quad (4)$$

구해진 정기구학식(4)에서 모든 조인트 변위인 $[X \ Y \ Z \ A \ C]^T$ 를 구하기 위해, 식(4)의 간단한 식으로 되어 있는 회전축의 변위부터 구한 후에 나머지 식에 대입하여 순차적으로 이

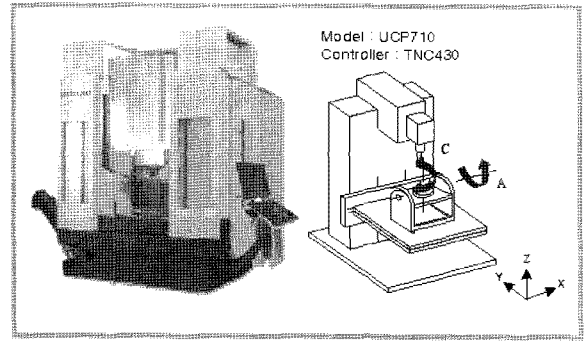


Fig. 2 2R-3L 형식 5축 가공기(MIKRON UCP710)

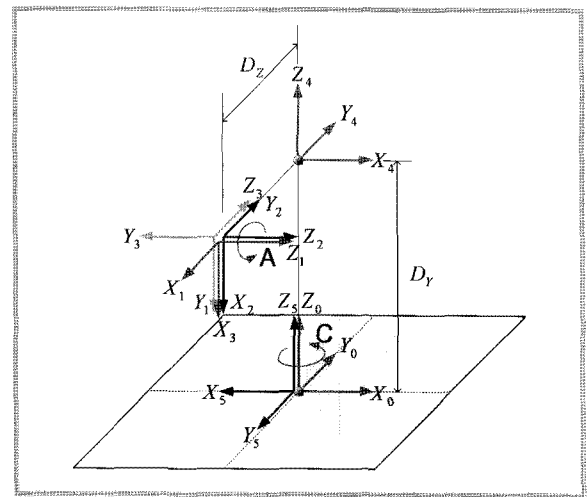


Fig. 3 2R-3L 형식 5축 가공기의 좌표계

송축의 변위까지 구하여 식(5)와 같은 역기구학식을 완성한다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ A \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos(C) + y \sin(C) \\ -l_C + \cos(A)(-x \sin(C) + y \cos(C) + l_C) + \sin(A)(z - d_C) \\ d_C + \sin(A)(x \sin(C) - y \cos(C) - l_C) + \cos(A)(z - d_C) \\ \cos^{-1}(k) \\ \tan^{-1}(i/j) \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. 탐색법을 이용한 후처리 방법

본 장에서는, 5축 가공기의 회전축의 변위에 대한 공구의

자세 변화의 관계를 이용하여 탐색법으로 후처리과정을 수행하는 알고리즘을 소개한다. 이 방법은 2R-3L 형식의 5축 가공기는 회전축과 이송축의 값을 정할 때 다음의 세 가지 특징을 이용한다. 첫째, 기계의 두 개의 회전축 중 한 개의 회전축의 회전각은 공구의 방향벡터 중 한 개의 성분만을 이용해 결정 가능하다. 둘째, 나머지 회전축의 회전각은 2개의 방향벡터 성분을 이용하여 평면운동으로 해석할 수 있다. 셋째, 공구의 방향이 정해지고 나면 직선이송축의 값은 3축 가공과 동일하게 적용할 수 있다. 이러한 특징을 이용하여 정기구학 및 역기구학식을 구하지 않고 조인트 변위를 구하는 방법에 대해 설명한다.

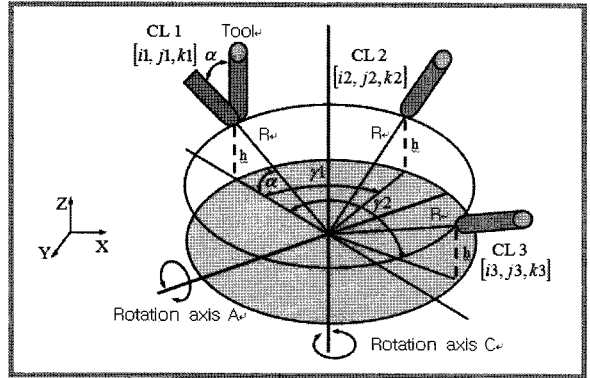


Fig. 4 회전축 C와 k 성분

Step 1 : 한 개의 회전축에만 영향을 받는 방향벡터 성분

공구의 방향벡터 요소 (i, j, k) 중 한 개의 요소는 회전축이 두 개가 있을 때, 한 개의 회전축에만 영향을 받는 특징이 있다. Fig. 4에는 회전축 B에 의해 (k) 값이 정해지고 난 후, 회전축 C의 동작에 의해 공구의 방향벡터 (i, j) 값이 변하는 것을 보여주고 있다. C축의 회전은 공구의 (i, j, k) 값 중 k 요소를 변화시키지 못하며, k 는 회전축 A에만 영향을 받는 요소이다.

Step 2 : 주 회전축 각에 따른 방향벡터 성분의 데이터베이스화

방향벡터 (i, j, k) 중 한 개의 요소에 의해서만 영향을 받는 회전축을 주 회전축이라 하고 주 회전축과 대응되는 방향벡터 요소와의 관계를 데이터베이스로 저장한다.

Fig. 5는 주 회전축을 선택한 후, 주 회전축의 값을 0.001° 씩 증가시키며 그에 대응하는 방향벡터 요소의 값의 변화를 구하는 과정을 나타내고 있다.

주 회전축을 찾아내고 주 회전축의 각에 대응하는 방향벡터의 한 성분의 값을 데이터베이스로 만들어 놓으면 이후에는 주 회전축 각을 찾기 위해 별도의 계산을 할 필요 없이 주어진 각 CL 데이터의 방향벡터 요소에 대응하는 주 회전

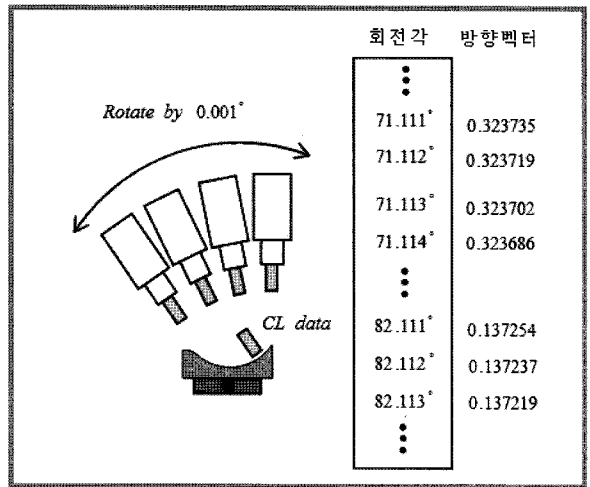


Fig. 5 공구 방향 성분에 따른 주 회전축의 데이터베이스

축 각의 값을 데이터베이스에서 바로 찾아 결정할 수 있다.

Step 3 : 부 회전축 각의 결정

공구의 방향벡터의 성분 중 한 개의 성분에 의해 주 회전축 각이 정해지고 나면 나머지 축(부 회전축)의 각은 나머지 두 개의 성분에 의해 정할 수 있다. 부 회전축 각을 결정하기 위해서는 먼저 주 회전축 각을 정할 때 사용된 공구의 방향벡터의 성분을 확인한다. 사용된 성분이 k 이면 k 에 대응되는 Z축을 제외한 X-Y평면에서 두 개의 (i, j) 성분으로 이루어지는 주 회전축 회전 후의 공구의 각도(이 때 부

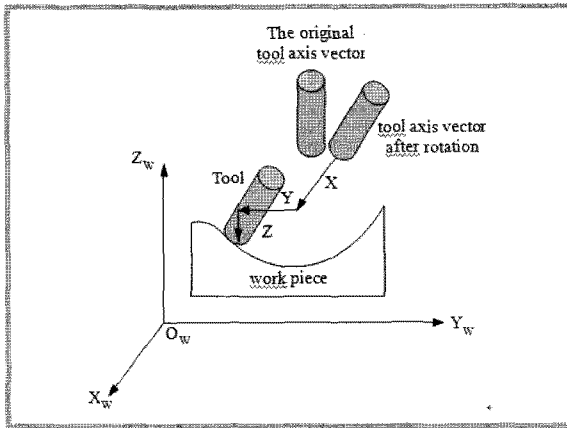


Fig. 6 회전 후의 직선 이송축의 변위 계산

회전축 각은 0° 와 각 CL 데이터의 각도를 구한 후에 이 두 각도의 차이 값을 계산하여 부 회전축 각을 결정한다.

Step 4 : 직선 이송량 결정

회전축이 직선 이송축의 방향에 영향을 주지 않는 기계타입에서는 공구의 방향이 결정되고 나면 5축 가공도 3축 가공에서와 동일하게 직선 이송량을 결정할 수 있다. Fig. 6은 공구의 방향이 결정된 후의 공구의 직선 이송 모습이다. 가공을 위한 위치로 공구를 움직이기 위해서는 3축 가공에서와 마찬가지로 각 직선축 X, Y, Z 방향으로 공구를 이동시킨다. 이동시키는 양은 기계의 회전축 움직임 후 공구의 좌표 (x_t, y_t, z_t) 와 CL 데이터의 (x, y, z) 좌표의 차이 값과 같다.

결과적으로 앞의 두 소절에서 구한 주 회전축 각 및 부 회전축 각과 함께 본 소절에서 구한 직선 이송량 X, Y, Z로써 후처리 과정에서 구하고자 하는 기계 좌표계의 각 축의 값을 모두 결정할 수 있다.

4. 기하학적인 후처리 방법

앞에서 설명한 방법들은 주로 2R-3L형식의 5축 가공기에 비교적 간단히 적용될 수 있는 방법들이다. 그런데

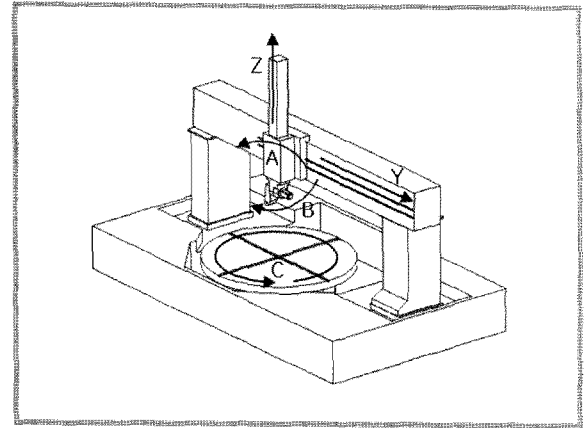


Fig. 7 3R-2L 타입 5축 가공기

3R-2L 형식의 5축 기계는 Fig. 7과 같이 3개의 회전축 (A, B, C) 과 2개의 이송축 (Y, Z) 으로 구성되어있다. 이와 같은 5축 가공기에 대해 기존의 방법으로는 비선형인 정기구학식에서 역기구학식을 직접 유도할 수 없고 수치 해석적인 방법을 사용하였다. 수치해석적인 방법을 사용하는 경우, 계산시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 적용하는 알고리즘에 따라 해를 구하지 못할 수도 있는 신뢰성의 문제가 있다. 본 절에서는 역기구학식을 구하지 않고 정확한 해를 구할 수 있는 기하학적인 후처리 방법에 대해 설명하고자 한다.

본 장에서 설명하는 기하학적인 방법에 의한 후처리 과정은 다음과 같이 3단계로 진행된다. 첫 단계에서는 Fig. 8(a)와 같이 5축 가공기의 각 조인트의 중심에 '조인트 점(joint point)'을 설정한다. 이 단계에서 고정된 조인트 점들 간의 거리가 정해진다. 두 번째 단계에서는 공구 끝점에 해당되는 첫 번째 조인트 점 P_0 의 위치를 CL 데이터의 (x_0, y_0, z_0) 로 위치시킨 후에 두 번째 점 P_1 는 CL 데이터의 방향벡터 (i_0, j_0, k_0) 상에 있는 조건으로 위치를 구한다. 이런 방법으로 Fig. 8(b)와 같이 5축 기계의 기구학적 구속조건을 고려하여 나머지 조인트 점의 위치를 순서대로 구해나간다. 마지막 단계는, Fig. 8(c)와 같이 두 번째 단계에서 구해진 조인트 점들의 위치관계로부터 각 축의 이송량과 회전량을 결정한다. 각 단계에 대해 보다 상세한 설명은 다음과 같다.

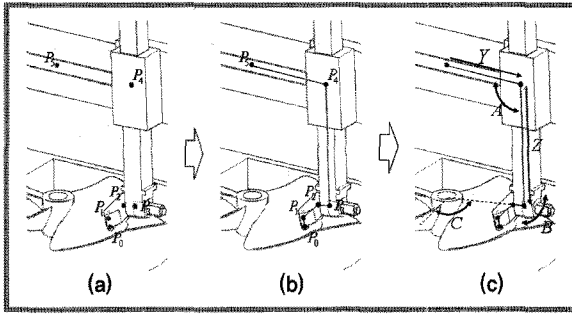


Fig. 8 기하학적 후처리 방법의 과정

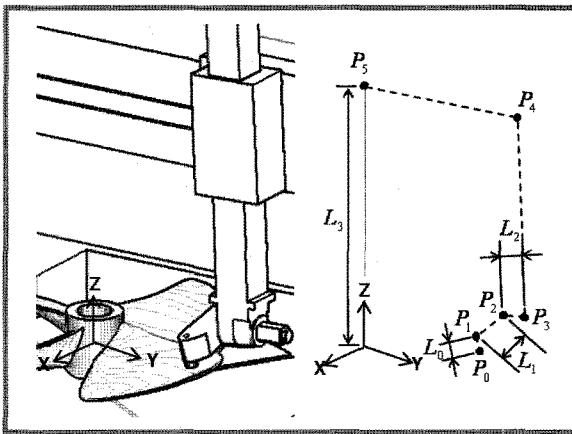


Fig. 9 3R-2L 5축 가공기의 조인트 점 설정

Step 1 : 조인트 점의 설정

기하학적 방법에 의해 후처리를 수행하는 과정의 첫 번째 단계에서는, Fig. 9와 같이 3R-2L형식의 5축 가공기의 기구학적 구속조건을 이용하여 5축 가공기의 각 조인트의 중심에 조인트 점을 설정하고 고정된 조인트 점간의 거리를 결정한다. 즉, 공구 끝을 첫 번째 조인트 점 P_0 로 설정하고 연결된 순서대로 각 조인트의 중심을 조인트 점으로 설정한다.

Step 2 : CL데이터로부터 조인트 점의 위치 계산

두 번째 단계에서는 모든 조인트 점의 위치를 구해야 한다. 첫 번째 조인트 점 P_0 의 위치는 CL 데이터의 위치 좌표

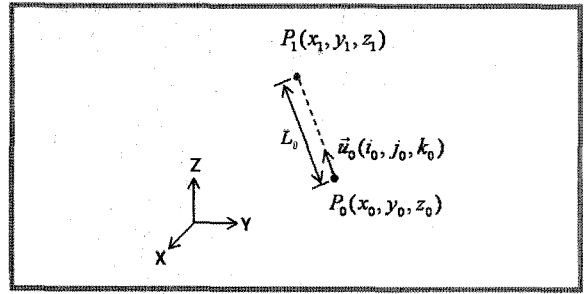


Fig. 10 조인트 점 P_1 의 위치 계산

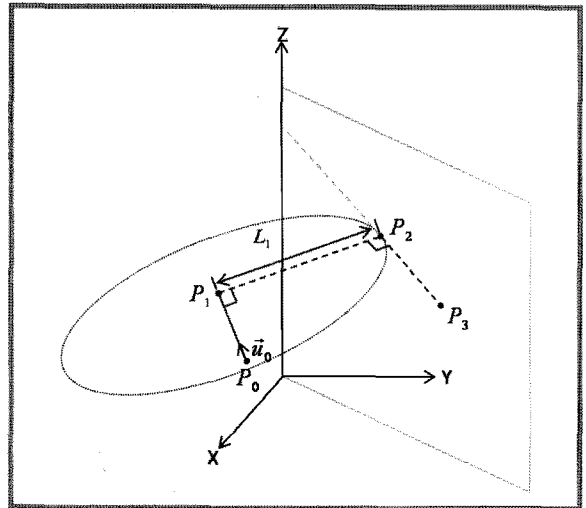


Fig. 11 조인트 점 P_2 의 위치 계산

인 (x_0, y_0, z_0) 가 되고 P_0 에서 P_1 으로 향하는 방향 벡터는 CL 데이터의 (i_0, j_0, k_0) 와 같다. 그러므로 두 번째 조인트 점 P_1 의 위치는 Fig. 10과 같이 P_0 에서 (i_0, j_0, k_0) 방향으로 L_0 만큼 거리가 떨어진 점으로 구할 수가 있다.

세 번째 점 P_2 는 기계의 B 회전축 상에 있는 점이 된다. 그런데 P_1 에서 P_2 까지 거리는 L_1 이고 $\overline{P_0P_1}$ 과 $\overline{P_1P_2}$ 가 서로 수직이다. 따라서 이러한 두 조건을 만족하는 P_2 는 Fig. 11과 같이 P_1 을 중심으로 반지름이 L_1 이고 공구의 방향 벡터에 수직인 원의 궤적상의 한 점이 된다. 한편, 기계의 B축은 Z축을 지나는 평면상에 있도록 설계되어 있으며, P_2 와 P_3 의 위치는 아직 알 수가 없다. 따라서 P_2 가 존재할 수 있는 원의 궤적과 Z축을 포함하는 평면과 만나는 지점이 P_2 의 위

치가 된다.

P_2 의 위치를 구하기 위해, 먼저 Fig. 11의 원의 궤적을 기계좌표계의 X-Y평면에 투영하면 타원이 되고 Z축을 포함하는 평면은 X-Y평면에서 원점을 지나는 직선이 된다. 그러므로 타원과 평면의 교점인 P_2' 를 구하면 P_2 의 위치를 구할 수가 있다.

네 번째 점 P_3 는 Fig. 12와 같이 $\overline{P_0P_1}$ 와 $\overline{P_1P_2}$ 에 수직한 방향으로 L_2 만큼 떨어진 점으로부터 구한다.

Fig. 7의 5축 기계는 A축이 상부에 있는 직선 이송축인 Y축을 따라 움직이는 구조이다. 그러므로 다섯 번째 조인트

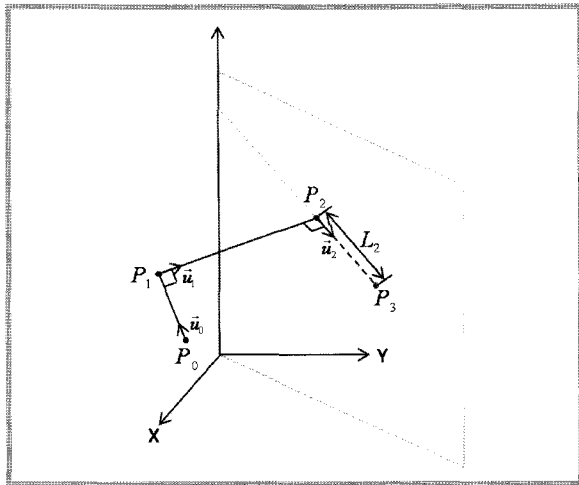


Fig. 12 조인트 점 P_3 의 위치 계산

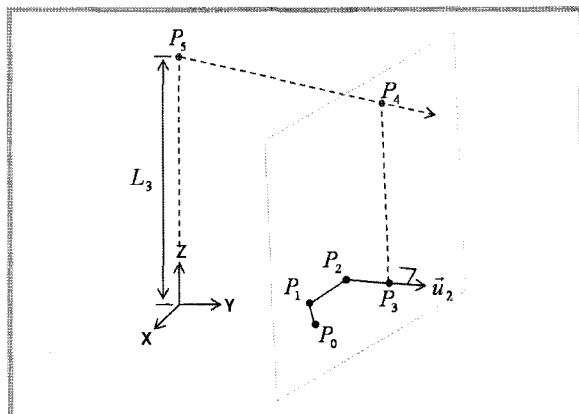


Fig. 13 조인트 점 P_4 와 P_5 의 위치 계산

트 점 P_4 는 Fig. 13에서와 같이 (x_3, y_3, L_3) 와 $(0, 0, L_3)$ 를 지나는 직선과 P_3 를 포함하고 법선 벡터가 (i_2, j_2, k_2) 인 평면의 교점이 된다.

마지막 점 P_5 는 기계 좌표계 원점에서 L_3 만큼 떨어져 있는 점이며, 다섯 번째 점 P_4 를 구할 때 참조로 사용된다.

Step 3 : 조인트 변위 계산

본 연구에서 제안하는 방법의 마지막 단계에서는, 두 번째 단계에서 구한 각 조인트 점들이 이루는 각도 또는 조인트 점들 사이의 거리를 이용하여 각 축의 이송량 및 회전량을 계산한다. 먼저 Y축의 이송량은 P_4 와 P_5 사이의 거리로 구하고, Z축의 이송량은 $L_3 - [P_3P_4]$ 으로 구한다. A축의 회

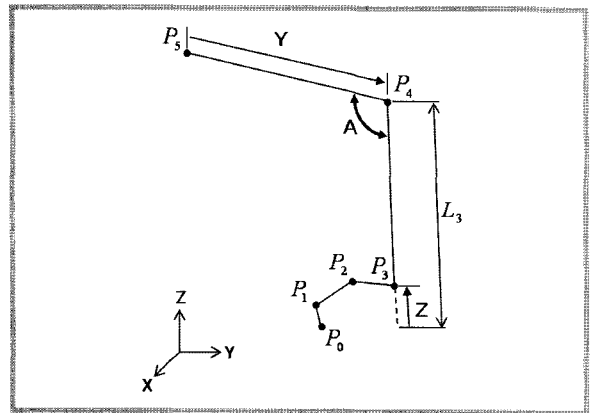


Fig. 14 회전축 A의 변위량 계산

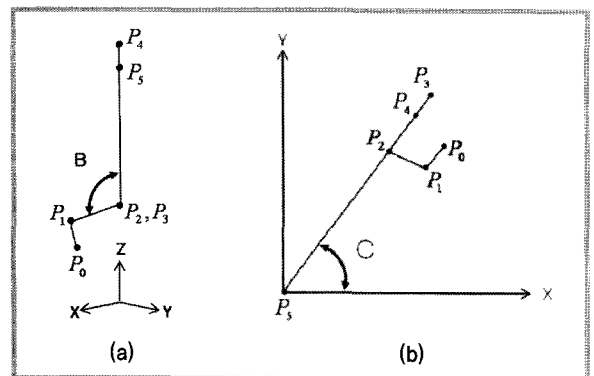


Fig. 15 회전축 B와 C의 변위량 계산

전량은 Fig. 14에서 보는 것과 같이 $\overline{P_3P_4}$ 와 $\overline{P_4P_5}$ 가 이루는 각이다.

B축의 회전량은 Fig. 15(a)와 같이 $\overline{P_3P_2}$ 방향으로 보았을 때 $\overline{P_1P_2}$ 와 $\overline{P_3P_4}$ 가 이루는 각이다. C축의 회전량은 Fig. 15(b)와 같이 기계 좌표계의 X축과 $\overline{P_5P_3}$ 가 이루는 각이다.

5. 맺음말

기존의 5축 가공기의 후처리 방법은 기계 테이블에서 공구까지 각 조인트들의 관계를 정기구학으로 표현한 후 이를 다시 역기구학으로 푸는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이러한 방법은 기계의 형식마다 다른 정기구학식과 역기구학식을 구해야 하며 모든 형식에 적용할 수 있도록 일반화하기가 어렵다. 또한 기계의 회전축이 꺾어져 있는 등 기계의 형상이 복잡해지면 역기구학을 구하는 것이 복잡해지게 된다. 특히, 3R-2L형식의 5축 가공기의 경우, 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 기사에서 소개한 '탐색법을 이용한 후처리 방법'은 각각의 CL 데이터의 방향벡터 성분에 대응하는 기계의 회전각의 크기를 저장 되어진 데이터베이스에서 찾은 후, 나머지 기계축의 값들은 간단한 산술연산으로 구하기 때문에 역기구학을 풀 필요가 없으며 모든 2R-3L 형식의 5축 가공기에 적용이 가능하다. 또한 '기하학적 후처리 방법'은 조인트 점과 기계의 기구학적 구속조건을 사용하기 때문에 정기구학식을 세울 필요가 없으며, 또한 역기구학을 유도할 필요가 없다. 뿐만 아니라 수치해석을 사용하지 않기 때문에 신뢰성 있는 정확한 해를 구할 수 있으며, 계산시간이 단축되는 이점이 있다. 뿐만아니라 이러한 방법들은 2R-3L

형식의 5축 공작기계에도 적용이 가능한 방법이므로 산업체에서 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Gray, P., Bedi, S., Ismail, F., Rao, N., and Morphy, G., "Comparison of 5-axis and 3-axis finish machining of hydroforming die inserts," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 17, pp. 562-569, 2001
- (2) Baptista R., and Antune Simoes J. F., "Three and five axes milling of sculptured surfaces," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 103, pp. 398-403, 2000
- (3) 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
- (4) 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
- (5) Zaidman, E. G., "Development of a five-axis postprocessor system with a nutating head," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187~188, pp. 60-64, 2007
- (6) Sørby, K., "Inverse kinematics of five-axis machines near singular configurations," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, pp. 299-306, 2007
- (7) Choi, B. K., Park, J. W., and Jun, C. S., "Cutter-location data optimization in 5-axis surface machining," Computer-Aided Design, Vol. 25, No. 6, pp. 377-386, 1993
- (8) 박도현, 정웅호, 윤재득, "수치적 방법을 이용한 5축 밀링의 NC데이터 후처리 방법", 2009 한국CAD/CAM학회 학술발표회 논문집
- (9) 윤재득, 정웅호, 박도현, "기하학적인 방법을 이용한 3 Rotary 형식 5축 가공기의 후처리 방법", 한국CAD/CAM학회논문집, 14권, 5호, pp. 291-296, 2009