

선택적 3축 제어를 이용한 5축 가공연구 5-axis machining with selective three-axis controlled CNC machine

김 성구(포항공대), 서 석환(포항공대), 이 정재(포항공대)

Sung-Gu Kim(POSTECH), Suk-Hwan Suh(POSTECH), Jung-Jae Lee(POSTECH)

Abstract

5축 가공기는 가공중의 공구자세 변화를 요구하는 복잡한 산업형상의 가공, 혹은 경사 가공을 통한 표면조도 향상등의 목적으로 채용되는 첨예의 공작기계로서 이를 지원하는 CAM 연구가 활발히 이루어 지고 있다. 그러나, 산업현장에서 흔히 5축 가공기로 일컬어 지는 상당수의 5축 가공기는 기구축은 5축을 가지나, 동기제어 축수는 3축인 “선택적 3/5축 가공기”의 형태로서 진정한 의미의 5축가공기와는 근본적으로 다르다. 5축 동기제어를 지원하는 CAM 연구는 부분적으로 연구 개발된 상태이나, 선택적 3/5축을 지원하는 CAM 이론은 연구된 바 없으며, 이에 따라 현장에서는 공작물의 셋업을 변경시키는 소위 자동 인덱싱 방식으로 활용하고 있는 실정이다. 본 연구팀에서는 선택적 3/5축 가공기에서 5축 가공을 실현할 수 있는 공구경로 산출 및 제어알고리즘을 개발하고 있으며, 본 논문에서는 (5축 가공 대비) 선택적 3/5축 가공문제의 이론적 특성과 경사가공을 수행하기 위한 알고리즘을 소개하고 시뮬레이션을 통하여 유효성을 보인다.

Key Words: 선택적 3/5축 가공기, 5축 가공기, 경사가공

1. 서론

5축 곡면 가공은 1) 일회 셋업자세에서 2) 다양한 공구자세를 제공하여, 3) 고정도의 가공면 및 4)가공효율성을 향상시키는 장점이 있다[1-5]. 그러나, 5축 CNC 공작기계는 매우 고가이어서 산업현장에서 널리 보급되어 있지 않다. 또한 산업현장에 보급되어 있는 5축 공작기계들중에는 장착된 제어기가 선택적 3/5축형이 많이 존재하고 있다. 선택적 3/5축 제어기관 5축을 모두 제어할 수 있으나, 동기제어는 5축중 선택적으로 3축만이 가능한 제어를 의미한다. 3/5축 제어를 장착한 5축 공작기계(이하 3/5축 제어기)는 일반적으로 다면면삭 및 다면드릴링과 같은 인덱싱 방식의 단순가공에 이용되고 있으며, 곡면가공에 있어서는 지원 알고리즘의 부재로 3축 공작기계와 같은 형태로 이용되고 있다. 여기서 주기를 것은 현재 상용

CAM 시스템들에서 지원하는 곡면가공용 공구경로 산출 알고리즘은 동기제어 축수만을 고려하여 개발되어서, 동시 3, 4, 5축의 경로 산출알고리즘은 지원하나, 선택적 3/5축 제어기의 능력을 충분히 활용하여 5축 가공을 할 수 있는 공구경로를 산출할 수 없다는 점이다. 기존 3축 머신에 인덱싱 테이블을 추가하여 5축 가공을 하려는 노력이 있었지만 이는 여러번의 셋업자세를 변경해야한다는 단점이 있었다.[8] 따라서 선택적 3/5축을 이용하여 5축 가공을 실현할 수 있는 공구경로산출 알고리즘이 제공되면, 산업현장에서는 1) 새로운 고가의 장비의 구입없이, 2) 기존의 공작기계를 이용하여 3) 경제적으로 5축 가공을 이용할 수 있는 획기적인 계기가 될 것이다. 본 연구에서는 선택적 3/5축 공작기계에서 5축 가공을 실현할 수 있는 공구경로 산출 알고리즘을 개발한다. 구체적으로 5축 경사가공을 3/5축 공작기계상에서 실현하

는 알고리즘을 제시한다.

2. 문제정의 및 접근방식

그림 1은 전형적인 5축 가공경로의 한 구간경로를 보여준다. 구간경로의 양끝점은 서로 다른 자세를 가지고 있다. 따라서 동시 5축 제어기에서는 공구가 경로를 따라 움직이면서 연속적으로 공구의 자세가 변경된다.

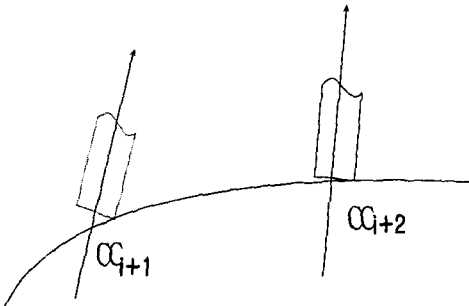


그림 1. 5축 가공경로의 예.

그러나, 선택적 3/5축 제어기에서는 동시 3축만을 움직일 수 있으므로, 그림 1의 경로를 모사하기 위해서는 주어진 오차범위내에서 선택적 동시 3축의 운동으로 주어진 경로를 따라갈 수 있도록 경로를 세분화하여 여러개의 서브 경로를 산출하여야 한다. 또한 세분화 단계에서 과절삭 및 미절삭도 고려되어야 한다. 5축중 3축을 선택하는 경우의 수는 10이므로, 매번 서브 경로의 결정시 10가지의 대안을 검토하여야 한다. 따라서, 서브 경로의 수가 증가함에 따라 계산시간은 기하급수적으로 증가하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 고정도의 가공정도를 유지하면서, 효율적으로 가공경로를 산출하는 방안을 모색하였다. 그림 2는 본 연구에서 제안하는 방법의 기본 개념을 보여주고 있다.

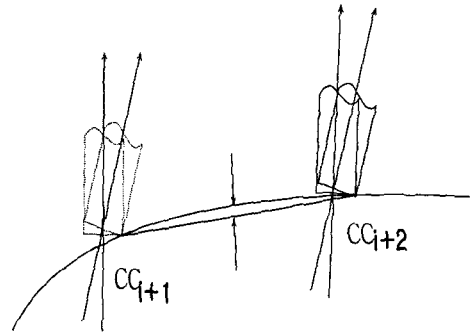


그림 2. 제안된 3/5축 공구경로 산출방법

제안된 기본개념은 1) 가공구간에서는 공구자세를 변경하지 않고, 2) 구간의 변경점에서 공구자세를 변경한다는 것이다. 이 방법은 가공구간에 공구자세가 변화하지 않으므로 쉽게 정량적으로 절삭량(과절삭, 미절삭)을 분석할 수 있으며, 동시 5축경로 산출시 주요문제중의 하나인 선형화(linearization) 문제를 고려하지 않아도 된다는 장점을 가지고 있다. 반면, 구간 변경점에서 자세변경시 반드시 한번에 3축만이 동시에 움직일 수 있다는 제약내에서 공구가 곡면과의 충돌이 없도록 공구경로를 산출하여 주는 알고리즘이 필요하다.

3/5축 제어기를 위한 CL-data 생성을 위해서, 먼저 곡면정보를 입력받고 공구간섭검사시 이용될 삼각망을 형성한다. 다음으로 최적공구자세를 설정하고, 설정된 공구자세를 사용할 CL-data 구간을 정한다. 한 경로에 대해서 CL-data를 구한 후, 각 경로간 거리를 계산하여 전체곡면에 대한 가공경로를 생성한다. 다음으로 구간변경점에서의 자세변경시 동시에 3축이내만 움직이도록 하고 시뮬레이션을 통해 검증한다. 그림 3에 전체 시스템의 흐름도를 나타내었다.

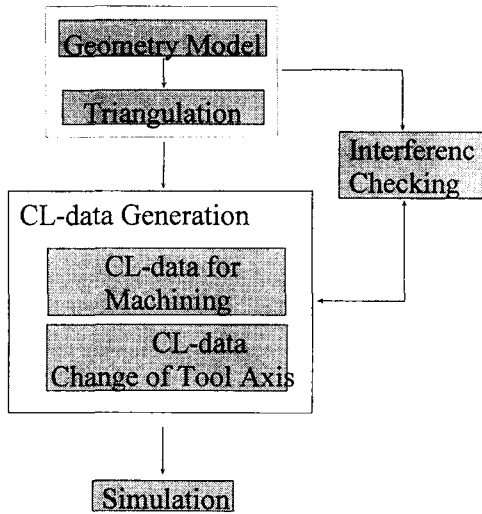


그림 3 전체 시스템

CL-data 생성을 위한 전체적인 흐름은 기존의 알고리즘과 유사하다.[1-3] 논문의 완결성을 위해 다음절에서 시스템 요소별로 간략히 설명하고 본 논문의 핵심이 되는 부분에 대해서는 상술한다.

3. 알고리즘의 이론 및 개발

3.1 CL-data generator

시스템에서 받아들인 곡면정보를 이용해 삼각형망을 형성한 후, 경로생성을 위해서 먼저 cusp-height와 가공허용공차를 입력으로 받는다. 입력된 가공허용공차를 이용해 진행방향의 경로를 설정하고, Cusp-height를 이용하여 경로간 간격(step-over distance)을 결정한다. 본 시스템에서의 경로생성방식은 CL-data의 이동구간에서는 자세를 일정하게 유지하는 방식이다. 이동구간에서의 공구축의 자세를 결정하는 방식에 따라 전체적인 가공효율이 영향을 받을수 있다.

진행방향의 경로설정은 다음과 같은 과정을 따른다. 먼저 하나의 CC-point를 결정하고 결정된 CC-point에서 공구간섭검사를 통해 공구자세를 결정한다. 여기서 결정

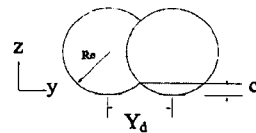
된 공구자세는 다음 CC-point까지의 공구자세로 설정된다. 정해진 공구자세로 허용공차범위내에 들면서 진행할 수 있는 가장 먼 점을 다음 CC-point로 결정한다. 새로운 CC-point에서 다음구간에서 사용될 공구자세를 설정하고 앞의 과정을 반복한다. 공구간섭확인을 위해 입력으로 받은 곡면형상은 삼각망으로 근사하고, 공구축방향, 공구진행방향, 두 벡터의 cross product 벡터를 축으로하는 새로운 좌표계를 설정한다. 삼각망을 새로운 좌표계에 투영한 데이터를 이용해 공구간섭을 검사한다.[2,6] 공구경로간거리는 공구의 effective radius와 cusp-height를 이용해 구한다. 공구경로간 거리는 그림 4의 수식에 의해 구할 수 있다.[2]

$$r_e = \frac{(1 + \sin^2 \beta)}{2 \sin \beta} r$$

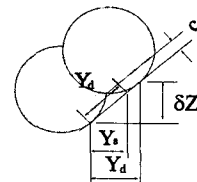
$$\beta: \text{tilting angle}$$

$$d = 2(r_e^2 - (r_e - c)^2)^{1/2} = 2(2r_e c - c^2)^{1/2}$$

$$s = \frac{Y_d^2}{(Y_d^2 + \Delta Z^2)^{1/2}}$$



(a) Flat Surface



(b) Sloping Surface

그림 4. 공구경로간거리 계산

3.2 공구자세설정

5축 제어기에서 공구자세는 현재 공구 위치에서의 최적공구자세를 설정하는 문제이고, 3/5축 제어기에서 공구자세는 한 점이 아닌 한 구간에서의 최적공구자세를 설정하는 문제이다.

일반적으로 5축 제어기를 위한 가공경로를 생성할때, 공구축방향은 간섭검사를 통해 과절삭이 일어나지 않으면서, 공구를 진행방향에 대해 투영했을때 공구의 윤곽이 가공면의 윤곽에 가장 근사하도록 정한다.[6,7] 3/5축 제어기에는 일정구간을 고정된 자세로 가공한다는 특성때문에, 공구축방향을 공구의 윤곽이 모든 가공면의 윤곽에 가장 근사하게 정할수는 없다. 이런 이유로 5축 제어기에 비해 가공효율이 떨어질수 있다. 한 CL-data 구간에 최적인 공구자세를 설정하기위한 방법은 크게 두가지로 분류할 수 있다. 첫째, 현재 공구위치에서의 최적자세를 구간의 공구자세로 설정한다. 둘째, 현재 공구위치와 다음 공구위치에서의 최적자세를 모두 고려해 구간의 공구자세를 설정할 수 있다. 첫번째 방법은 공구자세를 먼저 설정한 후, 다음 공구위치를 정하는 방식이고, 두번째 방법은 다음 공구위치를 먼저 정한후, 공구자세를 설정하는 방식이다. 두번째 방식은 구간을 일정하게 정한 후 공구간섭검사와 과절삭, 미절삭량을 확인후 공구자세를 설정하게 된다. 두 번째 방법은 추후에 연구하기로하고, 본 연구에서는 첫 번째 방식을 택하였다. 이 방식에 근거해 현재 공구위치에서의 최적공구자세를 구간의 공구자세로 설정한다. 현재 공구위치에서의 최적공구자세는 공구간섭이 일어나지 않으면서 공구의 윤곽이 가공면의 윤곽에 가장 근사하도록 한다.[6,7]

3.3 Step-forward distance 결정

기존 5축 제어기와 관련한 연구에서는 step-forward distance를 일정간격으로 정하거나, 곡면을 삼각형망으로 근사한 후, 공구축과 공구진행방향을 포함하는 평면으로 정의된 절삭평면과 삼각형의 모서리와의 교차점을 구한다음, 교차점간의 거리를 step-forward distance로 사용하였다[2]. 5축 제어기와 3/5축 제어기의 근본적인 차이에 근거하여, 본 연구에서는 기존 연구에서 사용한 방법대신에 자유곡면의 곡률에 따라 step-forward distance를 정하는 방법을

사용하였다. 다음 CC-point를 결정하기위해서, 현재 공구위치에서 진행방향으로 일정거리만큼 떨어진 거리를 다음 CC-point 후보로 잡고, 설정된 공구자세로 그 점에서의 공구간섭을 검사한다. 간섭이 일어나지않는 경우에 공구궤적상의 곡면과 공구궤적과의 최대거리를 구해 그 거리가 허용오차내에 드는 가장 먼 거리를 구한다. 그 과정을 그림 5에 나타내었다.

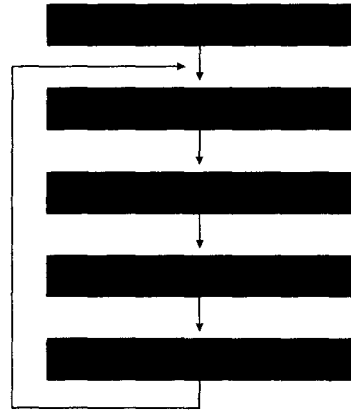


그림 5 다음 CC-point의 결정

공구궤적상의 곡면과 공구궤적과의 최대거리는 두 CC-point를 ZX 평면에 투영하고 두 점을 지나는 벡터와 두 점을 잇는 선분에 수직인 벡터를 포함하는 평면상에서의 거리를 계산함으로써 구할 수 있다. 알고리즘을 정리하면 아래와 같고, 관련 내용은 그림 6에 나타내었다.

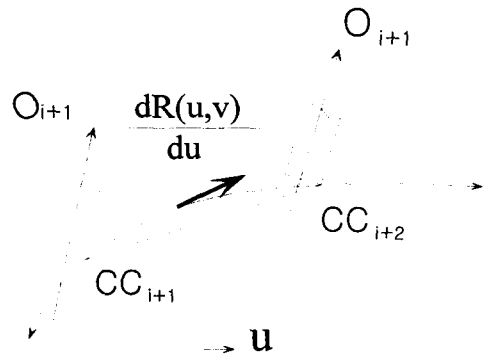


그림 6. 곡면과 공구궤적간 거리계산

Procedure 곡면과 공구궤적간의 거리계산

Input : CC point ($CC_{i+1} = f(u_1, v)$, $CC_{i+2} = f(u_2, v)$), tolerance(τ), 공구자세벡터(V), 곡면 모델 $s(u, v)$, $u [u^{\min}, u^{\max}]$

Output : distance(d)

1. 새로운 좌표계를 생성한다.
 - 두 CC-point 를 잇는 선분의 방향 벡터를 구하고 평면에 투영한다.(X')
 - 평면에서 X' 에 수직인 벡터를 구한다.(Z')
 - Y' 을 구한다. ($Y' = Z' \times X'$)
 - CC_{i+1} 을 원점으로하고, X' , Y' , Z' 를 축으로하는 좌표계(C_1)를 형성한다.
2. 중간 지점($u=(u_1+u_2)/2$)에서 tangential vector(T)를 구해 $Z'X'$ 평면에 투영한다.

$$T = \frac{dR(u, v)}{du}$$
3. if(점 T 의 $Z' = 0$) {
 - 현재의 파라메타값(u)에서 곡면상의 점을 구하고, 그 점을 좌표계 C_1 좌표로 변환한 후, $Z'X'$ 평면에 투영한다.(P_1)
 - 투영한 점 P_1 의 Z' 값이 공구궤적상의 곡면과 공구궤적과의 최대거리이다.
4. } else {
 - $u = u + \delta u$
 - 현재의 파라메타값(u)에서 곡면상의 점을 구하고, 그 점을 좌표계 C_1 좌표로 변환한 후, $Z'X'$ 평면에 투영한다.(P_2)
 - if(P_2 의 $Z' < P_1$ 의 Z')
 - 곡면이 볼록형이다.
 - if(P_1 의 $Z' > 0$)
 - $u_1 = u_1 + \delta u$
 - else
 - $u_2 = u_2 - \delta u$
 - else
 - 곡면이 오목형이다.

if(P_1 의 $Z' > 0$)

$$u_2 = u_2 - \delta u$$

else

$$u_1 = u_1 + \delta u$$

■ goto 2

}

3.4 자세변환 알고리즘

구간경로에서 연속적으로 자세가 변하는 5축 제어기와는 달리, 3/5축 제어기에서는 구간의 변경점에서만 자세가 변한다. 경로생성 알고리즘을 통해 구한, 구간변경점에서 자세변경을 실제 3/5축 제어기에 적용할때 자세와 관련된 두 축만 관련되는 것이 아니다. 3/5축 제어기의 자세와 관련된 두 축을 회전시킬때, 공구의 위치도 변하는 현상이 생긴다. 그 과정을 그림 7에 나타내었다.

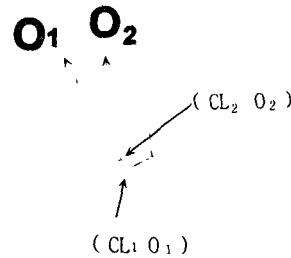


그림 7. 구간변경점에서의 두자세

이와같은 문제는 경로생성시 공구가 움직이는것으로 가정하고 경로를 생성했기 때문이다. 공구가 움직이는 것으로 가정하고 생성한 경로를 공작물이 움직이는 구조에 적용하는 과정에서 자세변경이 위치변경을 포함하는 결과를 가져오게 된다. 이것은 자세변경시 5축이 참여하는 결과를 초래하므로 3/5축 제어기에 맞도록 하기위해 다음과 같은 처리가 필요하다. 우선, 회전 두 축을 제어하여 자세를 바꾸었을때의 공구간섭, 과절삭, 미절삭량을 확인한다. 구한 값이 허용범위를 벗어나면 선형 3축을 먼저 움직인다. 그렇지 않으면 회전 2축을 먼저 움직이도록 한다. 즉, 회전(또는 선형)축을 움직인 후, 선형(또는

위치)축을 움직이고 이 과정을 순차적으로 반복하여 자세변경을 완료한다. 알고리즘을 정리하면 다음과 같고, 관련 내용은 그림 8에 나타내었다.

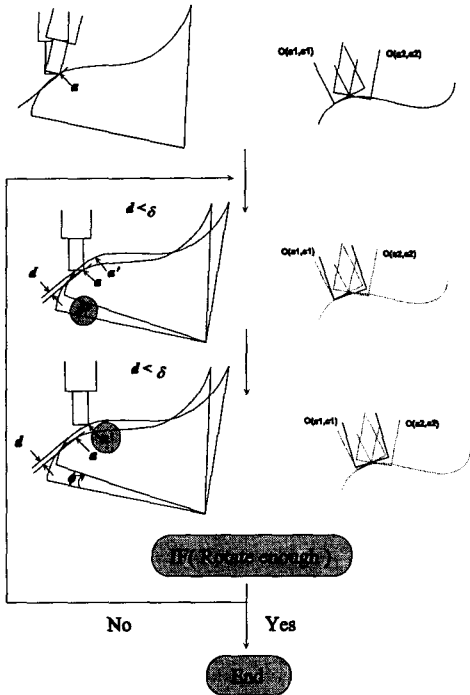


그림 8. 자세변환

Procedure 자세변환

Input : CC-point(CC_i),공구의 자세벡터 (V_1, V_2), 곡면정보, 로터리 테이블에서 A,C 축 각각의 중심좌표
Output : 각축 이송량

- 벡터 V_1 에서 벡터 V_2 로 변경하기위 선형축과 회전축의 두 값의 차이 계산 ($\Delta\theta, \Delta p$)

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$$

$$\Delta p = p_2 - p_1$$
- 공구간섭, 과절삭, 미절삭이 일어나지 않는 범위의 $\delta\theta, \delta p$ 를 구한다.
- 간섭이 일어나지 않도록 회전축과 선형축을 $\delta\theta, \delta p$ 만큼씩의 이동을 순차적으로 한다.

- 공구자세가 V_2 가 되지 않았으면 위의 과정을 반복한다.

4. 결과

자유곡면의 기본단위라 할 수 있는 볼록형상, 오목형상과 두 형상이 포함된 곡면을 파라메트릭 방식으로 정의하였다. 곡면은 control point 가 최대 가로 60mm, 세로 60mm, 높이 40mm 의 값을 가지도록 설정하였다. 정의된 곡면에 대해 위에서 제시한 알고리즘을 적용하여 직경 5mm 의 플랫폼 엔드밀 사용시의 경로를 생성하였다. 아래그림 9, 10 은 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림에서 곡면은 삼각망으로 근사하여 나타내었고 공구축방향은 선분으로 나타내었다. 그림 11 은 그림 10 의 일부분을 확대한 그림인데, 공구자세, step-forward distance, step-over distance 의 변화를 보여준다. 한 자세를 유지하며 가공할 수 있는 구간의 길이는 곡면의 곡률반경에 비례하고, 구간 변경점에서 자세변화를 할 때, 자세변화량은 곡면의 곡률에 반비례함을 볼 수 있었다. Step-over distance 는 곡면의 경사가 심한경우에 그 값이 작아짐을 볼 수 있었다.

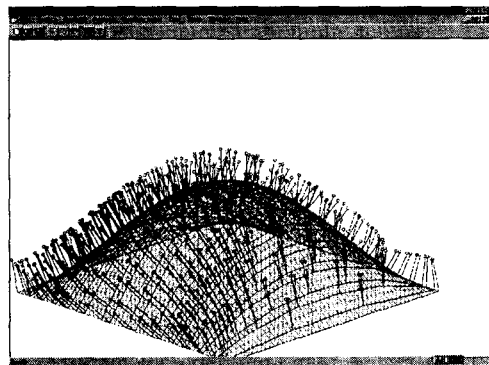


그림 9. Simple Surface

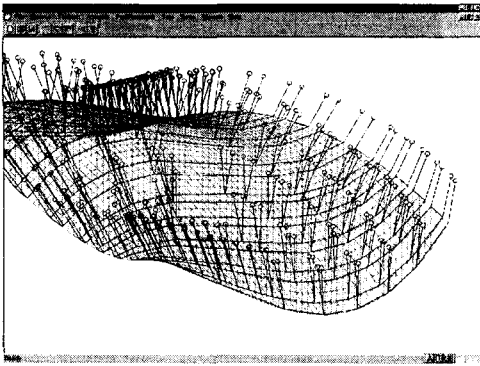


그림 10. Complex Surface

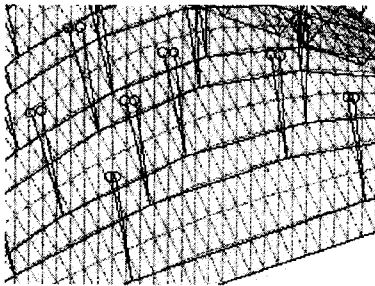


그림 11. Magnified View

5. 결론 및 추후연구

3/5축 제어기는 산업현장에 많이 사용되고있지만 효율적으로 3/5축 제어기를 지원하는 CAM 시스템의 부재로 주로 다면면삭 및 다면드릴링과 같은 인렉싱 방식의 단순가공에 이용되었고 곡면가공시에는 단순 3축 가공기처럼 이용되었다. 본 연구에서는 3/5축 제어기의 특성에 맞는 제어 알고리즘을 개발하여 5축 가공 경로를 생성함으로써, 상대적으로 저가인 3/5축 제어기를 고가인 동시 5축 제어기 대용으로 사용할 수 있게해주는 한 알고리즘을 제시하였다. 제시된 알고리즘을 통하여 생성된 CL-data를 그래픽 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 추후에는 이 결과를 근거로 실제 G-code를 산출하여 실제 가공실험을 할 예정이다. 더 나아가, 다양하고 복잡한 형상에 대해 경로생성을 하는 견고한 알고리즘을 연구할 계획이다.

1. Jean-Piere Kruth, and Paul Klewais "Optimization and dynamic adaptation of the cutter inclination during five-axis milling of sculptured surfaces" *CIRP*, 43, pp443-448(1994)
2. Susan X Li, and Robert B Jerald, "5-axis machining of sculptured surfaces with a flat-end cutter", *CAD*, 26, 3, pp165-178(1994)
3. Yoshimi Takeuchi, and Takahiro Watanabe, "Generation of 5-axis control collision-free tool path and postprocessing for NC data", pp539-542(1992)
5. G. W. Vickers, and K. W. Quan, "Ball-mills versus end-mills for curved surface machining", *Trans. of the ASME*, 111, feb. pp22-26(1989)
6. Y.-S. Lee and T.-C. Chang, "Machined surface error analysis for 5-axis machining", *Int. J. Prod. Res.*, 1996, Vol. 34, No. 1, pp111-135
7. Jean-Pierre Kruth, Paul Klewais, "Optimization and dynamic adaptation of the cutter inclination during five-axis milling of sculptured surfaces", *Annals of the CIRP*, Vol. 43/1/1994
8. S. H. Suh, and J. J. Lee, "Five-axis machining with three-axis CNC machine and indexing table," to appear on *ASME Trans. Journal of Manufacturing Science and Engineering*.