

복합곡면의 5축 NC 가공을 위한 공구자세 최적화

전차수*, 차경덕**

Optimal Tool Positions in 5-axis NC Machining of Sculptured Surface

Jun, C. S.* and Cha, K. D.**

ABSTRACT

Recently 5-axis NC machines are widely used in Korea. Since 5-axis machines have two more degrees of freedom than 3-axis machines, it is very important to find desirable tool positions(locations and orientations) in order to make an efficient use of expensive 5-axis NC machines. In this research an algorithm to determine "optimal" tool positions for 5-axis machining of sculptured surfaces is developed. For given CC(Cutter Contact) points, this algorithm determines the cutter axis vectors which minimize cusp heights and satisfy constraints. To solve the optimal problem, we deal with following major issues: (1) an approximation method of a cusp height as a measure of optimality (2) Identifying some properties of the optimal problem (3) a search method for the optimal points using the properties. By using a polyhedral model as a machining surface, this algorithm applies to sculptured surfaces covering overhanged surface.

Key words : 5-axis NC machining, optimal tool position, cusp height, edge detection algorithm, polyhedral model, sculptured surface.

1. 서 론

5축 기계는 항공기 부품, 터빈 블레이드, 임펠러, 3차원 캠 등의 특수한 부품 가공에 널리 사용되고 있으며, 최근에는 가공시간과 후처리 시간을 줄이기 위하여 일반적인 복합곡면 형상을 가진 프레스 금형과 플라스틱 사출금형의 가공에도 5축 NC 기계의 도입이 검토되고 있다.

일반적으로 5축 NC 기계는 서로 직교하는 3개의 평행이동 축으로 구성된 3축 기계에 비하여 2개의 회전축을 더 갖고 있다. 3축 기계에서는 곡면상의 공구접촉점이 주어지면 공구의 위치가 유일하게 결정되는 반면 5축 기계에서는 공구가 여러 가지 자세를 취할 수 있으므로 3축 기계로 접근 불가능한 곡면 가공뿐만 아니라 평 엔드밀, 필렛 엔드밀, 포물면

(Paraboloid) 엔드밀^[1] 등의 공구를 이용하여 가공시간 단축 및 가공정밀도를 향상하는 효율적인 공구자세를 취할 수 있다.

Fig. 1에서 곡면모델로부터 5축 NC 데이터를 구하는 전반적인 절차^[2]를 보여주고 있다. 먼저 공구경로계획에 의해 CC(Cutter Contact: 공구접촉점과 곡면의 법선벡터)경로를 구하는데 이 단계는 3축 NC 가공의 경우와 동일하며 Choi 등^[3]에서 자세히 소개되어 있다. 두번째 단계는 CC 경로상의 CC 데이터를 CL(Cutter Location: 공구의 위치와 공구축 벡터) 데이터로 변환하고 이를 공작기계축의 이동량인 축값으로 바꾸어준다. 이 단계에서는 공작기계의 기구학적 모델링, 공작기계축의 작동범위 검사, CC 경로의 궤적 계획, 공구간섭 및 충돌의 방지, 공구자세의 최적화 등의 문제가 고려되어야 하는데 공구자세 최적화 문제를 제외한 나머지 문제들은 기존 연구^[2-13,22]에서 잘 다루어지고 있다. 마지막 단계에서는 특정 NC controller의 입력 형식에 맞도록 후처리하여 NC 데이터를 생성한다.

*중신회원, 경상대학교 산업시스템공학부, 생산기술연구소
**미국 조지아공대 산업공학과
- 논문투고일: 2000. 8. 11
- 심사완료일: 2000. 10. 17

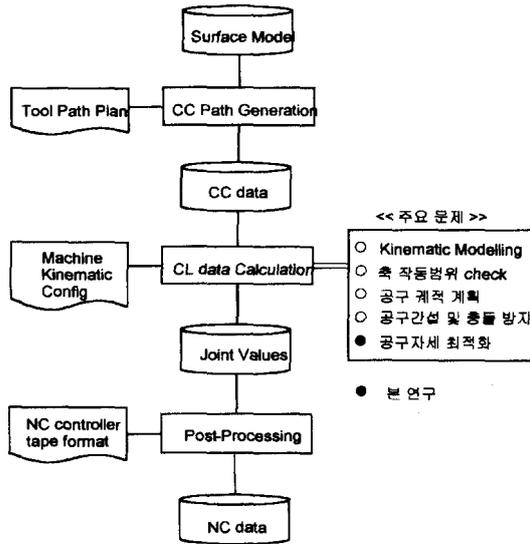


Fig. 1. Procedure for 5-axis NC data generation.

많은 기존 연구^[15-18]에서는 효율적인 공구자세를 구하기 위해 미분기하학적인 개념인 곡률을 적용하고 있다. 그들은 공구접촉점에서 공구실루엣의 곡률을 곡면의 곡률과 일치시키는 방법(curvature matched machining)을 이용하였다. 그러나 이 방법은 공구의 자세를 결정하는 2개의 각도 중 yaw 각은 0으로 두고, tilt 각만을 조정함으로써 곡률일치를 시키고 있으므로 5축 가공의 이점을 충분히 살리고 있다고 할 수 없다. 따라서 이들의 연구는 공구자세의 '최적화'라는 말을 하지 않고 있다. 또한 tilt 각도의 조정만으로 공구 충돌을 피할 수 없는 경우 어떤 자세로 바꾸어야 하는지에 대한 일관성 있는 대안을 제시하지 못한다.

Lee^[9]는 임의의 공구접촉점에서 허용오차를 만족하는 가공영역(machining strip)을 추정하고 이 영역의 폭을 최대화시키는 다음 경로 상의 공구접촉점을 탐색하는 방법을 제안하고 있다.

공구자세 최적화 문제는 주어진 제약조건 내에서 커스프(Cusp) 높이를 최소화하거나 유효가공면적을 최대화하는 공구자세를 찾는 문제이다. 이때 구해진 공구자세는 공구간섭 및 충돌을 일으키지 않아야 하고, 역기구해에 의해 계산된 축값이 각 축의 작동범위 내에 있어야 한다.

Choi 등^[14]은 공구자세 최적화 문제를 공구자세를 결정하는 2개의 변수 (tilt 각, yaw 각)의 최적화문제로 정식화하였다. 목적함수는 커스프 높이로 하였는데,

정확한 커스프 높이의 계산은 거의 불가능하므로 근사적인 커스프 높이를 계산하는 식을 제안하였으며, 박용 프로펠러 가공의 특수성을 고려하여 근사적 최적해를 찾는 방법을 소개하였다.

본 연구에서는 Choi^[14]의 연구에서와 같이 공구자세 최적화 문제를 2 변수 최적화 문제로 정식화한다. 그러면서, 목적함수로서 cusp 높이를 근사하는 보다 현실적인 새로운 방법을 제시하고 있으며, 5축가공의 특성을 고려한 문제의 특성(property)을 찾아보고, 이를 이용한 보다 효율적인 탐색 방법을 제안한다.

2. CC 경로 생성

복합곡면의 NC 가공을 위한 공구경로 생성시 공구 간섭 및 충돌을 방지하기 위하여 매개변수 곡면을 Z-map, 점군 모델, 다면체 모델 등으로 근사하여 이용하는 것이 일반적이다. 이는 공구와 매개변수 곡면간의 교차 여부를 판단하는데 많은 계산 시간이 소요될 뿐아니라 계산의 안정성을 보장할 수 없기 때문이다.

본 연구에서는 역구배 곡면을 잘 표현할 수 있고 솔리드의 위상정보를 갖는 삼각형면으로 구성된 다면체 모델을 사용하여 CC-Cartesian 방식에 의해 CC(공구접촉점 및 곡면의 법선벡터) 경로를 생성한다(Fig. 2). 즉, 다면체 모델의 삼각형면과 X-Y 평면에 수직인 평

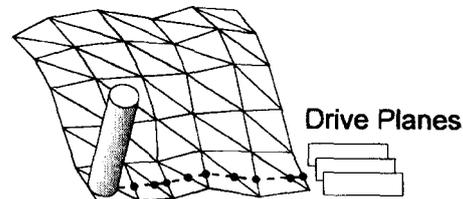


Fig. 2. CC path generation.

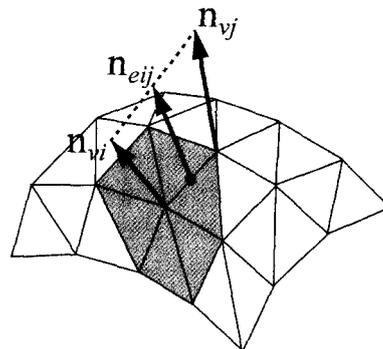


Fig. 3. normal vectors on the surface

면인 drive plane 간의 교점을 공구접촉점으로 하고 각 공구접촉점에서 곡면의 법선벡터를 구한다.

삼각형면의 꼭지점에서의 법선벡터는 꼭지점을 공유하는 삼각형면의 법선벡터를 평균하여 식 (1)과 같이 구한다(Fig. 3참조).

$$n_{vi} = \text{normalize} \left(\sum_i n_i / N \right) \quad (1)$$

여기서, N = 꼭지점을 공유한 삼각형의 개수
 n_i = 삼각형면의 법선벡터 ($i = 1, \dots, N$)

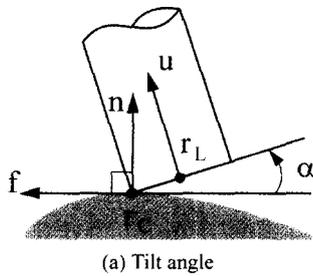
모서리에서의 법선벡터는 모서리의 양 꼭지점에서 구한 법선벡터를 식 (2)와 같이 선형보간하여 구한다(Fig. 3).

$$n_{ei} = \text{linear interpolation} (n_{vi}, n_{vj}) \quad (2)$$

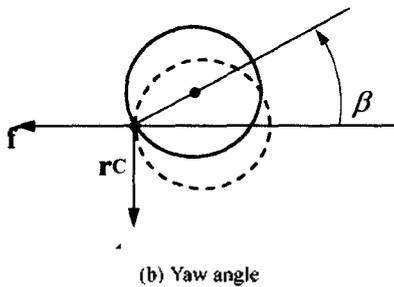
3. 공구자세의 정의

5축 가공의 이점을 최대한 살리기 위해서는 공구축 벡터 u 를 효과적으로 결정해야 한다. Fig. 4와 같이 u 를 곡면의 법선벡터와 공구진행방향 벡터로 이루어진 좌표계상에서 2개의 각도로 나타내면 기하학적 의미를 보다 명확하게 알 수 있다.

공구가 곡면 위의 CC 경로를 따라 이동할 때 공구축 벡터 u 가 곡면의 법선벡터 n 과 이루는 각을 tilt angle α 라 하고, 공구접촉점 r_c 에서 공구가 n 을 중심으로 회전한 각도를 yaw angle β 라 한다((α, β)



(a) Tilt angle



(b) Yaw angle

Fig. 4. Tilt angle and yaw angle.

를 공구자세라 한다). Fig. 4는 곡면 위에 접촉한 임의의 공구자세에 대한 tilt angle α 와 yaw angle β 를 보여주고 있는데 f 는 공구진행방향 벡터이고 $t = n \times f$ 이다.

Tilt angle α 와 yaw angle β 의 범위는 사용되는 공구로부터 다음과 같이 제한된다. Tilt angle α 는 공구의 flute가 원통인 경우에 $[0^\circ, 90^\circ]$ 의 범위를 갖고 yaw angle β 는 center cut이 없는 공구는 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 의 범위를, center cut이 있으면 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 의 범위를 갖는다.

정의된 tilt angle α 와 yaw angle β 로부터 공구축 벡터 u 는 식(3)과 같이 표현된다.

$$u = n \cos \alpha + (f \cos \beta + t \sin \beta) \sin \alpha \quad (3)$$

공구축 벡터 u 가 결정되면 평엔드밀의 공구중심점 r_L 은 다음과 같이 계산된다.

$$r_L = \begin{cases} r_C + r \frac{u \times n \times u}{|u \times n|} & : |u \times n| > 0 \\ r_C - r f & : |u \times n| = 0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서, r = 공구반경

Fig. 5와 같이 공구진행방향 f 에서 보면 tilt angle α 와 yaw angle β 가 피삭재 절삭에 미치는 효과를 알 수 있다. 즉 임의의 공구접촉점에서 평엔드밀에 의해 가공된 피삭재 형상은 공구진행방향 f 에서 바라본 공구실루엣과 일치하게 된다.

공구실루엣은 공구몸통에 의해 생성된 형상과 평엔드밀 바닥 모서리(이를 절삭원이라 한다)에 의한 형상으로 구분할 수 있다. 절삭원에 의한 공구 실루엣은 장반경의 길이가 공구반경인 타원(이를 절삭타

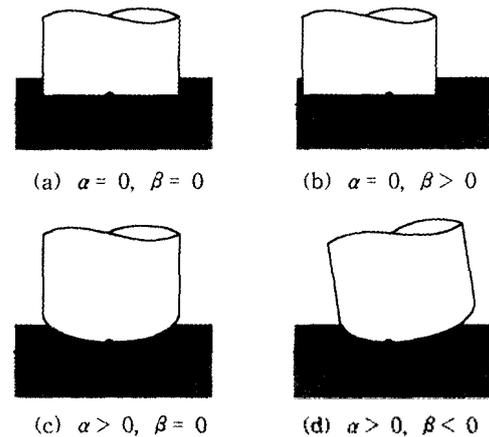


Fig. 5. Cutter silhouette.

원이라 한다)이 되는데 이 절삭타원의 단반경 α 와 경사각 θ 는 아래와 같이 구할 수 있다^[14].

$$\alpha = |r \sin \alpha \cos \beta| \tag{5}$$

$$\theta = \text{atan}(-\tan \alpha \sin \beta)$$

Fig. 6과 같이 X_L 축이 공구진행방향, Z_L 축이 곡면의 법선벡터의 방향, Y_L 축이 $(Z_L \times X_L)$ 으로 정의된 좌표계의 Y_L - Z_L 평면상에서 절삭타원을 이차식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\frac{(C_y + S_z - A)^2}{r^2} + \frac{(-S_y + C_z + B)^2}{a^2} - 1 = 0 \tag{6}$$

여기서, $A = Cp_y + Sp_z$, $B = Sp_y + Cp_z$
 $C = \cos \theta$, $S = \sin \theta$
 r : 공구반경,
 (p_y, p_z) : 타원의 중심점

Fig. 7은 yaw angle β 가 0°인 경우 tilt angle의 변화에 따른 절삭타원의 변화를 보이고 있는데 tilt angle α 가 증가할수록 공구접촉점에서의 절삭타원의 곡률이 커지고 있음을 알 수 있다.

Yaw angle β 는 곡면의 좌우대칭성에 관계된 변수인데 Fig. 8과 같이 곡률이 변화되는 경우 β 를 조정함으로써 절삭타원을 가공곡면에 최대한 밀착시켜 커스 높이를 최소화할 수 있다.

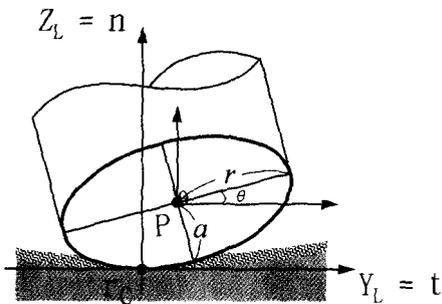


Fig. 6. Cutting ellipse for a flat-endmill.

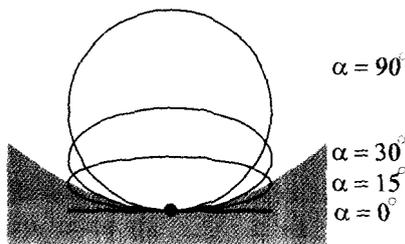


Fig. 7. Effect of the tilt angle.

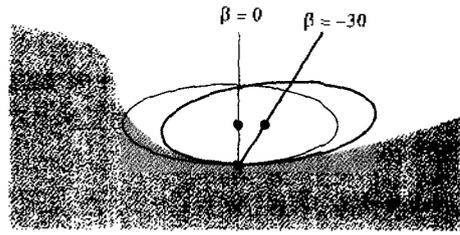


Fig. 8. Effect of the yaw angle.

Curvature matched machining^[19]과 같은 기존의 연구에서는 $\beta = 0$ 으로 두고 α 값을 조정하고 있으나 본 연구에서는 α 와 β 를 동시에 고려하고 있다. 즉, 기존의 연구에서는 간섭이나 충돌이 없으면서 곡률을 최대한 일치시키는 α 를 구하는 반면 제안하는 방법에서는 고려하는 변수가 (α, β) 이며 목적함수는 cusp height의 최소화이다.

4. 커스 높이 계산

커스 높이는 Fig. 9와 같이 이웃하는 공구경로에 있는 공구실루엣의 이동곡면에 의해서 결정된다. 그런데 최적화 과정에서 이 값을 정확히 계산하는 것은 모든 공구접촉점에서의 tilt angle과 yaw angle을 동시에 고려해야 하므로 현실적으로 거의 불가능한 일이다. 기존 연구^[14]에서는 곡면이 평활하다는 것을 전제로 동일한 공구자세의 공구를 경로간격만큼 이동시킨 후 두 공구 사이의 교점으로 커스 높이를 구하고 있다. 그러나 이는 공구자세가 크게 변하는 일반적인 5축 가공에서는 적합하지 못한 경우가 많다.

본 연구에서는 이웃 경로에서의 공구 자세와는 독립적이면서도 실제적인 커스 높이를 잘 추정할 수

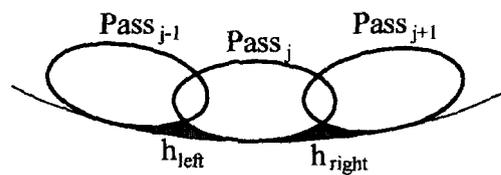


Fig. 9. Exact cusp height.

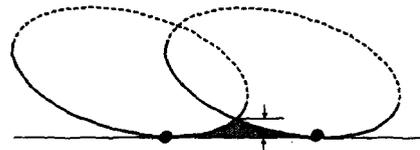


Fig. 10. Previous cusp height approximation [14].

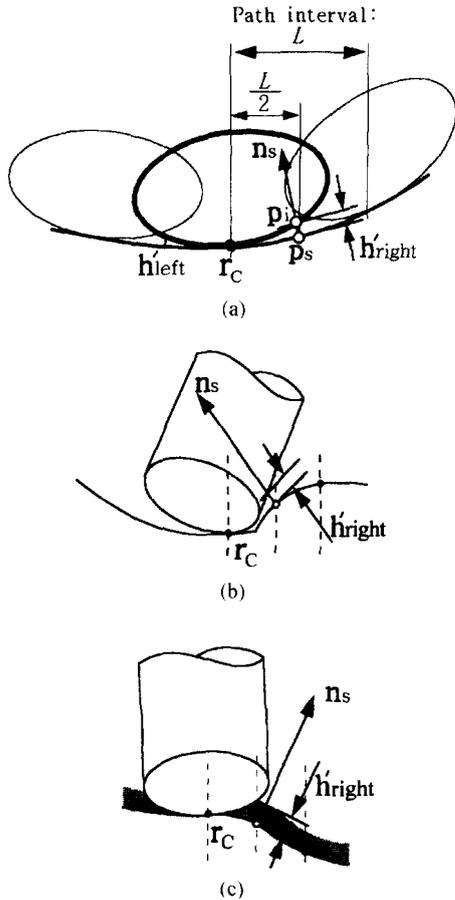


Fig. 11. Proposed cusp height approximation.

있는 근사적인 계산 방법을 개발하였다. Fig. 11과 같이 공구진행 방향을 기준으로 우측과 좌측의 커스 높이를 각각 구한다.

우측 커스 높이의 계산 절차는 다음과 같다.

① 공구진행방향에 수직인 평면상(Y_c-Z_c 평면)에서 공구접촉점 r_c 로부터 오른쪽으로 경로간격 L 의 $1/2$ 거리($L/2$)에 있는 곡면상의 점을 p_s 구한다. 이때 $L/2$ 이 내에 곡면의 경계가 있을 경우는 경계점을 p_s 로 한다.

② 점 p_s 에서 법선벡터 n_s 를 구한다.

③ 공구실루엣과 법선벡터 n_s 간의 교점 p_i 를 구하고 교점 p_i 와 점 p_s 간의 거리를 우측 커스 높이로 한다. p_i 는 그림 (b)와 같이 공구 몸통면에 있을 수도 있으며, 그림 (c)와 같이 교점 p_i 가 없는 경우는 절삭 두께에 해당하는 미리 정해진 값을 커스 높이로 간주한다.

좌측 커스 높이도 우측 커스 높이와 동일한 방법

으로 구한다.

5. 공구자세의 최적화

5.1 최적화 문제의 형성

본 연구에서는 '커스 높이의 최소화' 측면에서 공구자세의 최적화 문제를 고려하고 있다. 공구자세는 tilt angle α 와 yaw angle β 에 의해 결정되므로 본 최적화 문제는 주어진 공구접촉점에서 커스 높이를 최소화하는 최적의 α 와 β 를 찾는 문제로서 다음과 같이 정식화된다.

목적 함수 : minimize maximum

{cusp height_{left}, cusp height_{right}}

결정 변수 : tilt angle(α), yaw angle(β)

제약 조건 :

- 1) α, β 가 주어진 범위내에 있어야 한다.
- 2) 공구간섭 및 충돌을 일으키지 않아야 한다.
- 3) 역기구해에 의해 계산된 축값이 각 축의 작동 범위 내에 있어야 한다.

본 최적화 문제는 bivariate non-differentiable 함수의 constrained nonlinear optimization 문제이다. 통상적으로 이러한 문제는 feasible-direction 방법을 사용할 수 있으나 주어진 공구자세에 대한 목적함수의 계산 및 제약조건의 충족여부를 검사하는데 많은 시간을 요하므로 본 연구에서는 5축 NC 가공의 특성을 고려하여 최적 공구자세를 효과적으로 구하는 탐색 기법을 개발하였다.

5.2 최적화 문제의 특성

5축 NC 가공의 특수성에 기인한 본 최적화 문제의 특성은 다음과 같다.

Property 1: 목적함수의 lower bound는 '0'이다.

주어진 공구자세의 커스 높이가 음수일 경우에는 공구간섭이 발생함을 의미하므로 공구간섭이 없는 공구자세에서의 커스 높이는 '0' 이상이 된다.

Property 2: $\alpha = 0, \beta = 0$ 일때 제약조건을 만족하면 이 공구자세는 최적 공구자세이다.

Fig. 12은 여러 가지 α, β 값을 가지는 공구자세에 대한 절삭타원과 접평면과의 관계를 보여주고 있는데 $\alpha(\geq 0), \beta$ 가 어떠한 값을 가지더라도 절삭타원이 공구접촉점의 접평면보다 아래로 내려가지 않음을 알 수 있다. 따라서 절삭타원이 접평면과 동일직선 상에 있게 되는 공구자세인 $\alpha=0, \beta=0$ 에서 제약조건을 만족하면 이 공구자세는 커스 높이를 최소화한다.

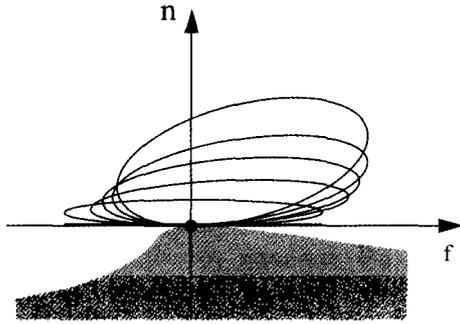


Fig. 12. Cutting ellipses for various tool orientations.

Property 3: 최적 공구자세는 feasible 영역의 경계에 존재한다.

2장에서 살펴보았듯이 커스 높이를 최소화하기 위해서는 feasible 영역 내에서 tilt angle α 는 최대한 0°에 가깝도록 해야하고 yaw angle β 는 좌측 커스 높이와 우측 커스 높이간의 차이를 최소화하도록 조정함으로써 절삭타원을 가공곡면과 최대한 밀착시켜야 한다. 이러한 최적 공구자세 α, β 는 feasible 영역의 경계에 있게 된다. 이를 좀 더 자세히 설명하면 다음과 같다.

Fig. 13은 가공곡면에 따른 최적 공구자세와 feasible 영역의 변화를 보여준다. 공구접촉점 근처의

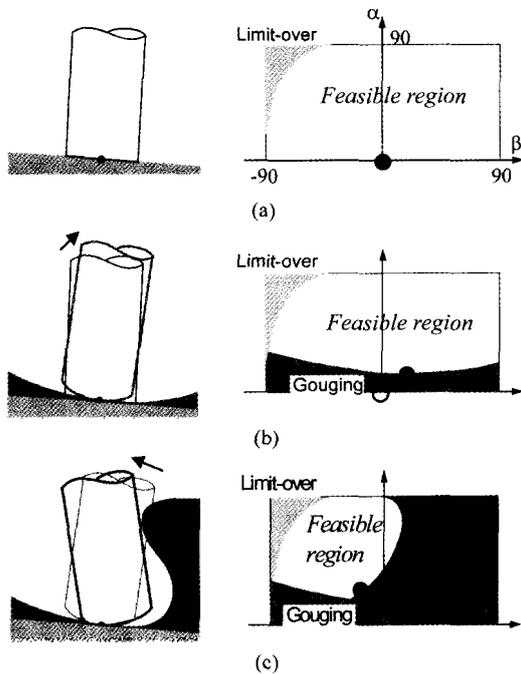


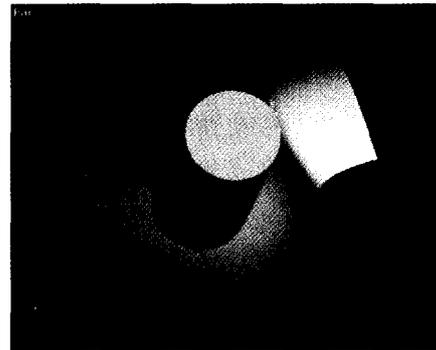
Fig. 13. Feasible regions according to the surface shapes.

곡면이 평면(또는 볼록)이고 공구충돌이 없는 경우 공구자세(0, 0)은 동작기계의 작동범위에 들면 최적 공구자세가 된다(Fig. 13(a)). 그런데 공구접촉점 근방의 곡면이 오목하게 되면(Fig. 13(b)) 최적 공구자세는 공구간섭에 의해 변경된 feasible 영역의 경계로 이동한다. Fig. 13(c)과 같이 곡면이 돌출되는 경우 현재의 자세로는 공구충돌이 생기게 되고 이에 따라 최적 공구자세가 다시 바뀌게 되는데 이때에도 최적 공구자세는 feasible 영역의 경계에 존재하게됨을 보여주고 있다.

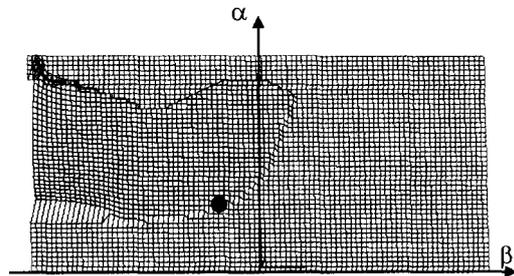
Fig. 14(a)는 역구배가 있는 곡면 상의 한 공구접촉점에서 최적의 자세를 취한 공구를 보여주고 있는데 공구의 몸통이 곡면과 접하고 있다. Fig. 14(b)는 공구자세(α, β)로 이루어진 2차원 영역 전체를 일정 간격의 격자 (grid)로 분할하여 각 격자 점에서의 커스 높이를 나타내는데 infeasible 영역에서의 커스 높이는 '-1'로 처리하고 최적 공구자세는 검은 점으로 표시하였다. Property 3과 같이 최적 공구자세가 feasible 영역의 경계에 존재함을 보여주고 있다.

5.3 최적 공구자세의 결정

주어진 공구접촉점에서의 최적 공구자세는 feasible 영역의 경계에 있으므로 경계탐색을 위하여 머신 비



(a) Optimal tool orientation



(b) graph of cusp heights at a CC point

Fig. 14. Example of an optimal tool orientation.

전 시스템에서 이용하는 경계탐색(edge detection) 알고리즘¹²⁾을 적용하였다. 경계탐색 알고리즘이란 이진논리를 이용하여 먼저 이미지 영역의 경계와 교차하는 한 픽셀을 찾고 이후의 각 픽셀들이 영역의 경계와 교차하는 상태에 놓이도록 이웃한 픽셀로 진행하여 이미지 영역의 완전한 경계를 찾는 과정이다.

공구자세(α, β)로 이루어지는 2차원 영역 전체를 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 간격의 격자로 분할하여 각 격자점(i, j)에 해당하는 공구회전각도(α, β)에 대해 제약조건을 만족하는지를 검사함으로써 경계탐색 알고리즘을 적용할 수 있다. Fig. 15는 경계탐색 알고리즘을 이용하여 feasible 영역의 경계를 탐색하는 예를 보여주고 있다.

최적화 문제의 특성과 edge detection 알고리즘을 이용하여 주어진 공구접촉점에서의 최적 공구자세를 효율적으로 결정하는 절차는 Fig. 16에 보여주고 있다.

먼저 경계탐색의 출발점으로 tilt angle과 yaw angle을 각각 0 ($\alpha=0, \beta=0$)으로 초기화한다.

다음으로 feasible 영역의 경계에 있는 격자점을 구한다. 이를 위하여 yaw angle β 는 고정하고 tilt angle α 를 $\Delta\alpha$ 만큼 증가하는 방향으로 진행하면서 제약조건을 만족하는 최초의 격자점 G 를 찾는다. 만약 구해진 격자점이 출발점($\alpha=0, \beta=0$)이라면 property 2에 의해 이를 최적 공구자세로 결정한다.

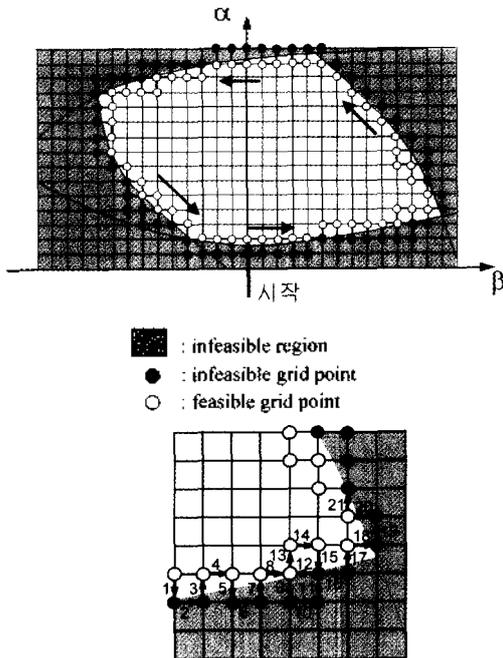


Fig. 15. Feasible region boundary search using an edge detection algorithm.

이후에는 현재의 격자점이 제약조건을 만족하면 진행방향의 오른쪽으로 있는 격자점을 선택하고, 제약조건을 만족하지 않을 경우는 진행방향의 왼쪽에 있는 격자점을 선택하는 일련의 과정을 수행함으로써 feasible 영역의 경계를 찾는다. 이때 각 feasible 격자점에 대해서는 커쥘 높이를 계산하고 이 높이가 기계정밀도를 고려한 허용오차보다 작을 경우는 property 1에 의해 이를 최적 공구자세로 결정한다. 경계탐색 과정에서 선택된 격자점이 최초의 feasible 격자점 G 일 경우에는 feasible 영역의 완전한 경계를 구했음을 의미하므로 커쥘 높이가 최소인 격자점을 최적 공구자세로 결정한다.

위의 과정을 모든 공구접촉점에 수행하여 각 공구접촉점에 대한 최적 공구자세가 결정되면 공구자세 최적화 과정을 종료한다.

Fig. 17은 Fig. 14의 경우에 대해 최적 공구자세 결정 절차를 이용하여 구한 feasible 영역의 경계 및 최적 공구자세의 예를 보이고 있다. Property 3에 의하여 2차원 최적화 문제를 1차원 경계탐색문제로 바꾸므로써 Fig. 17의 경우 해의 탐색 영역이 약 3000

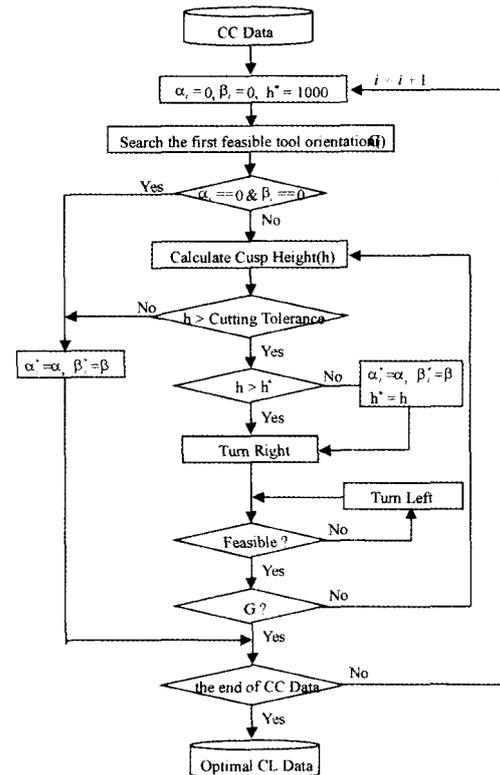


Fig. 16. procedure for determining an optimal tool orientation.

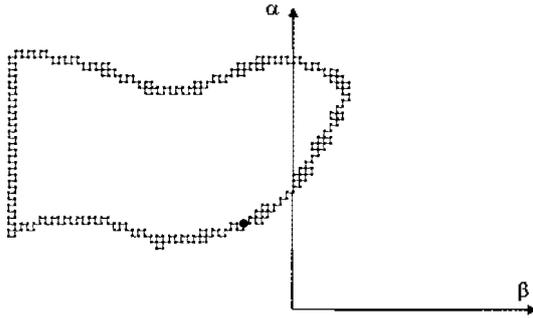


Fig. 17. An example of boundary search.

개의 격자점에서 약 300개로 줄어들었다.

본 연구에서 도입한 경계탐색 방법은 feasible region의 경계곡선이 하나의 루프로 이루어진 것으로 가정하고 있다. 그러나 가공 곡면의 형상이 복잡하거나 공작기계의 구조가 복잡한 경우는 feasible region이 여러 개로 나누어지거나 feasible region 내에 구멍이 있을 수도 있으며 이런 경우 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

5.4 적용 사례

본 연구에서 개발한 공구자세 최적화 알고리즘은 Windows NT 환경에서 C++ 언어로 구현되었다. 곡면 모델은 SolidWorks에서 모델링하여 STL file로 출력한 다면체 모델을 이용하고 있으며 데이터 구조는 Kim^[21]이 제안한 구조를 적용하였다.

다양한 적용사례들로부터 본 연구에서 제안된 알고리즘이 좋은 결과를 보이고 있다. Fig. 18은 터빈 블레이드를 가공하기 위하여 한 공구경로 상에서 구한 최적 공구자세들을 보여준다. Fig. 19는 단일곡면을 가공하는 예이고 Fig. 20은 새들(saddle) 형상의

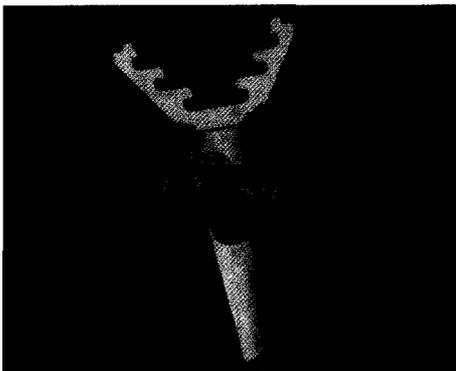


Fig. 18. Turbine blade machining example.

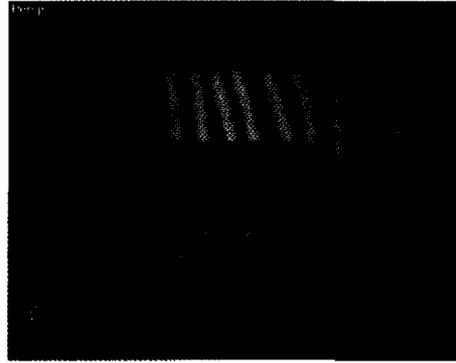


Fig. 19. A single-patch machining example.



Fig. 20. Compound surface machining example(1).

곡면에 두 개의 곡면이 좌우 대칭적으로 붙어있는 복합곡면의 가공 예이다. Fig. 18-20의 적용 예에서는 공구간섭에 의해 생성된 feasible 영역의 경계에서 최적 공구자세를 구할 수 있었다.

Fig. 21은 4개의 불룩한 곡면으로 이루어진 복합곡면의 가공 예로서 다양한 공구경로에 대해 최적 공구자세의 변화를 보여주고 있다. Fig. 21에서는 많은 최적 공구자세들이 공구충돌에 의해 생성된 feasible 영역의 경계에서 구해졌다. 그림 (b)에서는 공구가 옆면을 가공하다가 바닥면을 가공하면서 자세가 급격하게 변하고 있다. 본 연구에서는 하나의 공구접촉점에서 최적의 자세를 독립적 구하고 있다. 따라서 Fig. 21과 같이 공구자세가 급격히 변화될 수도 있다. 이 경우는 경로를 따라 공구 자세를 smoothing하는 별도의 후처리를 하거나 공구자세의 변화량을 고려한 최적화가 필요한 것으로 사료된다.

6. 결론 및 토의

본 연구에서는 복합곡면의 5축 NC 가공을 위하여

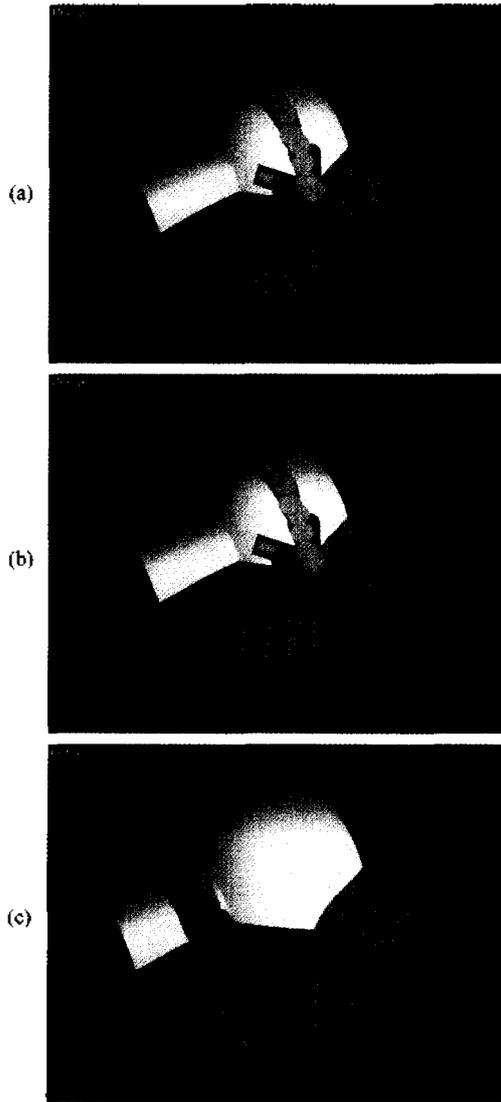


Fig. 21. Compound surface machining example (2).

공구자세 최적화 문제를 해결하는 알고리즘을 개발하였다.

공구자세 최적화 문제는 tilt angle α 와 yaw angle β 로 정의된 2차원 영역에서 제약조건을 만족하고 커스 높이를 최소화하는 공구자세(α^* , β^*)를 구하는 문제로서 다음과 같은 특성을 가진다.

- ① 목적함수의 lower bound는 '0'이다.
- ② $\alpha = 0$, $\beta = 0$ 일때 제약조건을 만족하면 이 공구자세는 최적 공구자세이다.
- ③ 최적 공구자세는 feasible 영역의 경계에 존재한다.

본 연구에서 제안한 공구자세 최적화 알고리즘은 최적화 문제 특성 ③을 이용하여 경계탐색 방법을 적용하여 feasible 영역의 경계를 구함으로서 2차원 최적화 문제를 1차원 탐색 문제로 단순화하고 있다. 또한 경계탐색 과정에서 커스 높이가 가공오차 보다 적을 경우는 특성을 이용하여 이 점에서 탐색을 중단하고 이를 최적 공구자세로 한다. 그리고 특성을 이용하여 최적화 알고리즘의 출발점을 (0, 0)으로 하고, 이 점이 feasible하면 더 이상 탐색과정을 거치지 않고 이점을 최적자세로 결정할 수 있게 한다.

최적화 문제의 목적 함수인 커스 높이는 모든 공구 접촉점에서 공구자세가 결정된 후 공구 경로를 따라 가공 시뮬레이션을 하지 않고는 정확히 계산한다는 것이 불가능하므로 본 연구에서는 공구경로 간격의 1/2 지점에서 공구실루엣과 곡면간의 거리를 커스 높이로 한다. 이러한 근사적인 계산방법은 실제 가공 상황을 잘 반영하면서도 인접한 공구경로 간에 독립성을 보장한다.

본 연구에서 제안한 최적화 알고리즘을 연구배를 포함하는 다양한 복합곡면에 대하여 최적 공구자세를 효과적으로 결정할 수 있었다.

본 최적화 알고리즘은 평엔드밀 공구만을 다루고 있는데 이를 filleted-endmill의 경우로 확장하기 위해서는 filleted-endmill의 공구실루엣 계산 및 공구 간섭 충돌 방지 알고리즘이 요구된다. 또한 공구자세가 급격히 변하는 경우의 선형제적 계획이나 경로를 따른 공구자세 smoothing도 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구지원사업(과제번호: 981-1015-085-1)의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. Morishige, K., Nasu, T. and Takeuchi, Y., "Five-axis control sculptured surface machining using conicoid end mill", *Machining Impossible Shapes*(G.J. Olling et al.), Kluwer Academic Pub., pp. 366-375, 1999.
2. 전차수, 박세형, 전용태, "자유곡면의 5축 NC 가공을 위한 CAM 시스템 개발", 한국정밀공학회지, 제10권, 제1호, pp.52-61, 1993.
3. Choi, B. K. and Jerard, R. B., *Sculptured Surface Machining*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
4. 조현덕, 전용태, 양만양, "5-축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공에 관한 연구(I)", 대한기계학회논문집 제17

- 권, 제8호, pp.2001-2022, 1993.
5. Hwang, J. S., *Five-axis NC machining of compound sculptured surfaces*, Ph. D. Thesis, Purdue Univ., 1997.
 6. 박정환, 금형의 5축 NC 가공을 위한 CAM 시스템 개발에 관한 연구, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1995.
 7. 차경덕, 김동수, 전차수, 조규갑, 이민철, "5축 연마기를 위한 전용 CAM 시스템", 대한기계학 회 생산 및 설계공학부 학술행연회 강연집, pp.27-31, 1998.
 8. Morishige, K., Kase, K. and Takeuchi, Y., "Collision-Free Tool Path Generation Using 2-Dimensional C-Space for 5-Axis Control Machining", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.13, No.6, pp.393-400, 1997.
 9. 차경덕, 5축 NC 가공에서의 공구자세 최적화, 석사학위논문, 경상대학교, 1999.
 10. Li, S. X. and Jerard, R., "5-axis machining of sculptured surfaces with a flat-end cutter", *Computer-Aided Design*, Vol.26, No.3, pp.165-178, 1994.
 11. Lee, Y. S. and Chang, T. C., "2-Phase approach to global tool interference avoidance in 5-axis machining", *Computer-Aided Design*, Vol.27, No.10, pp.715-729, 1995.
 12. Takeuchi, Y. and Watanabe, T., "Generation of 5-Axis Control Collision-Free Tool Path and Postprocessing for NC Data", *Annals of the CIRP*, Vol.41, pp.539-542, 1992.
 13. Takeuchi, Y. and Idemura, T., "5-Axis Control Machining and Grinding Based on Solid Model", *Annals of the CIRP*, Vol.40, pp.455-458, 1991
 14. 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.
 15. Jensen, C. G. and Anderson, D. C., "Accurate tool placement and orientation for finish surface machining", *Journal of Design and Manufacturing*, Vol. 3, pp.251-261, 1993.
 16. 조인행, 이진우, "포텐셜 에너지를 이용한 5축 NC 밀링의 공구방향 결정", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 1995.
 17. Lee, Y. S. and Ji, H., "Surface interrogation and machining strip evaluation for 5-axis CNC die and mold machining", *INT. J. PROD. RES.*, Vol.35, No.1, pp.225-252, 1997.
 18. Lee, Y. S., "Non-isoparametric tool path planning by machining strip evaluation for 5-axis sculptured surface machining", *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 7, pp.559-570, 1998.
 19. White, K. A., Hill, J. K. and Jensen, C. G., "Curvature Matched Machining Methods Versus Commercial CAD Methods", *Machining Impossible Shapes*(G.J. Olling et al.), Kluwer Academic Pub., pp. 361-365, 1999.
 20. Asfahl, C. R., *Robots and manufacturing automation*, John wiley & Sons, 1992.
 21. 김동수, 위상정보를 이용한 다면체 모델의 NC 가공 경로 생성, 석사학위논문, 경상대학교, 1998.2.
 22. 이철수, 박광렬, "Heel angle 조정에 의한 터빈 블레이드의 5축 NC가공 데이터 생성", 한국CAD/CAM 학회 논문집, 제4권2호, pp.110-120, 1999.



전 차 수

1983년 부산대학교 기계공학과 학사
 1985년 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1989년 한국과학기술원 산업공학과 박사
 1989년~현재 경상대학교 산업시스템공학부 교수
 관심분야: CAD/CAM, Geometric modeling, 다축 NC 가공



차 경 덕

1997년 경상대학교 산업공학과 학사
 1999년 경상대학교 산업공학과 석사
 2000년~현재 미국 조지아공대 산업공학과 박사과정
 관심분야: CAD/CAM, Geometric modeling, 다축 NC 가공