

필렛엔드밀을 이용한 다면체 곡면의 NC 가공 경로 생성 NC Tool Path generation for a Polyhedral Model with a Filleted Endmill

윤종윤, 김동수*, 전차수

경상대학교 산업시스템공학부, 항공기부품기술연구소

Abstract

본 연구에서는 필렛엔드밀을 이용하여 복합곡면을 가공하기 위한 새로운 접근방법을 제안한다. 이 방법은 “곡선기반 접근방법”으로 기존의 “점기반 접근방법”에 비하여 몇 가지 특징들을 가지고 있다. 본 연구에서는 다면체로 표현된 곡면을 대상으로 하고 있는데, 볼록한 모서리와 꼭지점에서는 정확히 읍셋시키고 오목한 부위에서는 읍셋 곡면이 겹치는 것을 허용한다. 읍셋된 곡면을 절단 평면으로 자르고, 같은 평면상에 있는 교선 중에서 겹치는 부분의 윗 부분을 택하면 공구 간섭이 제거된 공구 경로를 얻게된다. 즉 계산이 복잡한 오목지역에서의 읍셋 시 발생하는 간섭을 2차원 평면상에서 제거함으로써 계산 과정을 단순화시키고 안정적으로 만든다. 본 연구에서 제안한 방법은 PC에서 VC++로 구현되었으며 몇 가지 적용 예를 보여주고 있다.

1. 서론

본 연구에서는 필렛엔드밀을 이용하여 다면체 곡면을 NC 가공하기 위한 공구경로를 생성하는 새로운 방법을 제안한다. 필렛엔드밀은 볼엔드밀과 평엔드밀의 장점을 모두 가지고있는 가장 일반적인 형상의 공구로 최근에 사용이 늘고 있다.

NC 공구경로를 생성하기 위한 여러 가지 방법 중 카테시안(Cartesian) 공구경로 생성방법은 점기반 접근방법과 곡선기반 접근방법으로 나눌 수 있다. 기존의 방법[1, 6]들은 대부분 점기반 접근방법을 따르고 있으며, 본 연구는 곡선기반 접근방법을 따른다[5].

기존의 방법에서는 공구의 현재 위치(x_1, y_1)에서 공구가 삼각형에 접촉할 때까지 공구를 내려 z_1 을 결정한다(그림 1(a)). 또는 현재의 공구 중심점을 결정하기 위해 공구축 직선 (x_1, y_1)과 inverse tool 곡면과의 교점들을 구하여 z 값이 가장 높은 점을 선택한다(그림 1(b)). 적당히 떨어진 다음 점 (x_2, y_2)에 대해서도 동일한 방법으로 z_2 를 구한다. 공구는 (x_1, y_1, z_1)부터 (x_2, y_2, z_2)까지 선형적으로 변한다. 이런 방법을 “점기반 접근방법”이라 부른다. 이 점기반 접근 방법은 볼록 간섭을 방지하는데 근본적인 한계가 있으며, 오목지역에서 공구가 꼭기는 정확한 위치(그림 1(c)의 sharp turn point)를 찾기 어렵다.

본 연구에서 채택한 “곡선기반 접근방법”에서는 곡면을 공구 중심점으로 읍셋시킨 후 이를 절단 평면으로 자를 때 생기는 교선을 공구경로로 하는 것

이다. 그런데 곡면을 정확히 읍셋시키는 것은 매우 복잡한 문제이다. 본 연구에서는 다면체로 표현된 곡면을 대상으로 하고 있는데, 볼록한 모서리와 꼭지점에서는 정확히 읍셋시키고 오목한 부위에서는 읍셋 곡면이 겹치는 것을 허용한다. 읍셋된 곡면을 절단 평면으로 자르고, 같은 평면상에 있는 교선 중에서 겹치는 부분의 윗 부분을 택하면 공구 간섭이 제거된 공구 경로를 얻게된다. 즉 계산이 복잡한 오목지역에서의 읍셋시 발생하는 간섭을 2차원 평면상에서 제거함으로써 계산 과정을 단순화시키고 안정적으로 만든다.

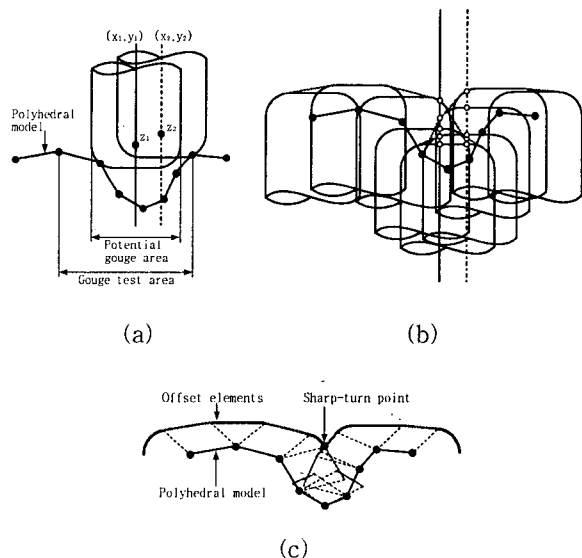


그림 1. 점기반 접근방법과 곡선기반 접근방법

2. 연구내용

2.1 전반적인 절차

본 연구에서는 다면체 모델을 입력 받아, 다면체 모델을 주어진 공구의 형상에 맞게 읍셋시켜 삼각형, ITSS(Inverse Tool Swept Surface), ITOS(Inverse Tool Offset Surface)와 같은 읍셋요소들로 이루어진 다면체 읍셋모델을 생성한다. 이때 각각의 읍셋된 형상은 뒤에서 자세하게 설명한다. 그리고 읍셋된 요소 각각에 대해 일련의 절단 평면들과의 교선을 한꺼번에 구하는데, 이는 하나의 평면에 대해 여러 읍셋 요소들과 교선을 구하는 기존 방법에 비해 훨씬 효율적이다. 슬라이싱 후 생성된 교선들을 각각의 평면에 대해 sorting, trimming, linking 과정을 거침으로써 간섭 없는 공구경로를 생성할 수 있다.

2.2 읍셋된 요소들의 특징과 slicing

2.2.1 삼각형의 읍셋과 slicing

필렛엔드밀(filleted endmill)은 평엔드밀(flat endmill)의 모서리 부분이 필렛된 형상이다. 필렛된 모서리 부분의 반지름을 r 이라 하고 공구 밑부분의 평평한 원판의 반경을 f 로 둔다.

삼각형을 필렛공구의 중심으로 읍셋시켰을 때 삼각형의 normal vector \mathbf{n} 방향으로 r 만큼, \mathbf{n} 을 xy 평면에 투영한 벡터 \mathbf{n}_p 방향으로 f 만큼 이동된다(그림 2).

T_p : 삼각형의 꼭지점

O_p : 읍셋된 삼각형의 꼭지점

\mathbf{n} : 삼각형의 normal vector

\mathbf{u} : 공구 축 벡터

\mathbf{n}_p : \mathbf{n} 을 \mathbf{u} 에 수직인 평면에 투영한 단위 벡터 일때,

$$O_p = T_p + r\mathbf{n} + f\mathbf{n}_p \quad (1)$$

여기서,

$$\mathbf{n}_p = \begin{cases} \mathbf{u} \times \mathbf{n} \times \mathbf{u} / |\mathbf{u} \times \mathbf{n}|, & \mathbf{u} \neq \mathbf{n} \\ 0, & \mathbf{u} = \mathbf{n} \end{cases}$$

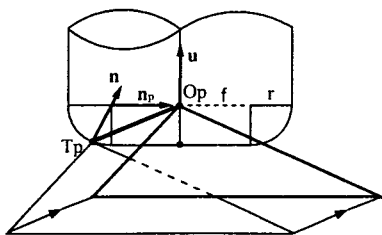


그림 2. 삼각형의 읍셋

읍셋된 삼각형과 평면과의 교선 문제는 쉽게

처리할 수 있으므로 여기서는 언급을 생략한다.

2.2.2 모서리의 읍셋과 slicing

(1) 모서리의 속성

모서리의 속성은 이웃한 두 삼각형의 관계에 따라 ①블록 ②오목 ③편평으로 나눌 수 있다[5]. 모서리가 경계 부분에 위치할 경우는 그림 3와 같이 z 축과 평행한 가상 모서리를 생성하여 하나의 삼각면에 이웃하는 가상 삼각면을 만든 후, 경계 부분의 모서리에 대한 속성을 정의한다.

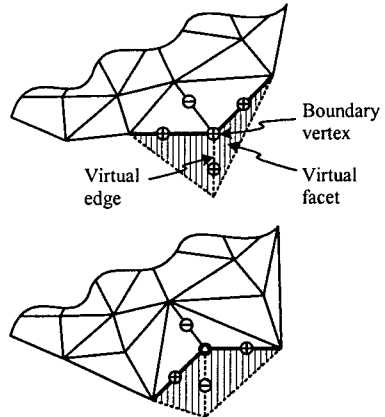


그림 3. 경계 모서리

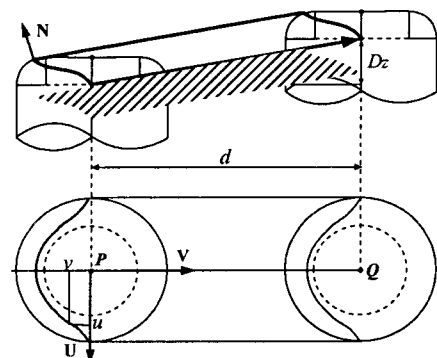


그림 4. 실루엣 곡선

블록한 모서리를 읍셋하면 inverse tool을 이동시킨 곡면, 즉 ITSS(Inverse Tool Swept Surface)가 생성된다(그림 4). ITSS의 경계 곡선인 실루엣 곡선은 공구곡면의 normal 벡터(\mathbf{N})와 공구이동벡터(\mathbf{D})가 수직인 점의 집합으로 공구의 normal vector와 실루엣 곡선은 다음과 같이 정의된다[1, 2, 3, 4]

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2)$$

여기서,

$$\mathbf{N} = \begin{cases} (0, 0, 1) & \dots \text{ for } t < f \\ (u \cdot \frac{t-f}{t}, \sqrt{t^2 - u^2} \cdot \frac{t-f}{t}, \sqrt{r^2 - (t-f)^2}) & \dots \text{ for } f \leq t < r+f \end{cases}$$

$$t = \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\mathbf{D} = (D_x, D_y, D_z) \quad : \text{공구 이동 벡터}$$

$$d = \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \quad : xy \text{ 평면에서 공구 이동 거리}$$

$$s = D_z / d \quad : \text{slope of tool movement}$$

$$\mathbf{V} = (D_x, D_y, 0) / d \quad : xy \text{ 평면에서 단위 이동 벡터}$$

$$\mathbf{U} = (V_y, -V_x, 0) \quad : \mathbf{V} \text{ 에 수직이고 } xy \text{ 평면에 있는 단위 벡터}$$

식(2)는 다음과 같이 4차식으로 정리할 수 있다.

$$t^4 + a_1 t^3 + a_2 t^2 + a_3 t + a_4 = 0 \quad (3)$$

$$\text{where } a_1 = -2f$$

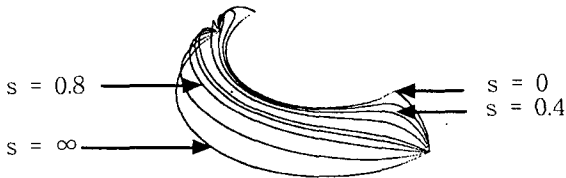
$$a_2 = f^2 - (r^2 s^2 + u^2) / (1 + s^2)$$

$$a_3 = 2f \cdot u^2 / (1 + s^2)$$

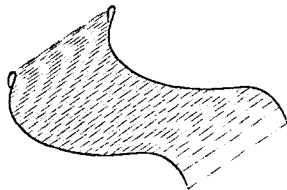
$$a_4 = -f^2 \cdot u^2 / (1 + s^2)$$

$$v = \text{sign}(-s) \sqrt{t^2 + v^2}$$

그림 5의 (a),(b)는 실루엣곡선과 실루엣곡선을 평행이동시켜 만든 ruled 곡면인 ITSS의 예이다.



(a) s에 따른 실루엣 곡선의 예



(b) ITSS의 예(s=0.4)

그림 5. 실루엣 곡선과 ITSS

(2) ITSS의 경계와 slicing

ITSS(Inverse Tool Swept Surface)의 경계는 모서리의 끝점에서 생긴 두 개의 실루엣 곡선과 두 개의 직선으로 구성된다. 그림 6에서의 점 P₁, P₂, P₃, P₄는 모서리의 시작점, 끝점을 모서리를 공유하는 두 삼각형의 normal 방향으로 각각 읍셋시킨 점으로 ITSS의 경계를 표현하는데 사용된다.

ITSS의 경계가 정해지면 ITSS와 평면과의 교선을 구한다. 이것은 SSI(Surface/Surface Intersection)문제이다. 본 연구에서는 그림7과 같이 실루엣 곡선을 주어진 공차를 만족하는 선분으로 근사한 후 곡면을 사각 평면의 다면체로 근사하여 평면과의 교선을 구한다. 그림의 I_{p1}과 I_{p2}와 같은 끝점에서는 반복적 탐색 방법에 의하여 보다 정확한 값을 찾는다.

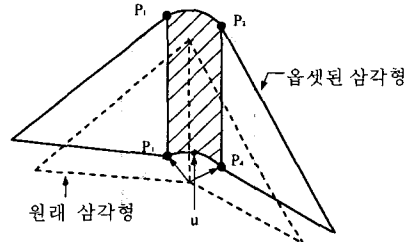


그림 6. ITSS(swept surface)의 경계

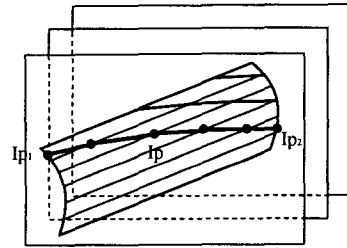


그림 7. ITSS와 drive plane간의 교선

2.2.3 꼭지점의 읍셋과 slicing

블록한 꼭지점의 읍셋요소인 ITOS(Inverse Tool Offset Surface) $Z = Z(x, y)$ 는 토러스와 원판이 결합된 형상으로 만일 꼭지점이 $P(x_0, y_0, z_0)$ 라면 $Z(x, y)$ 는 다음과 같다.

$$Z(x, y) = \begin{cases} z_0 + r, & \text{if } q \leq f \\ z_0 + \sqrt{r^2 - (q-f)^2}, & \text{if } f < q \leq R \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{where } q = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}$$

$$r = \text{fillet radius}$$

$$f = \text{tool의 바닥 원판 radius}$$

$$R = r + f$$

꼭지점의 속성을 정의하면 블록한 꼭지점은 블록한 모서리들로만 구성된다[5]. 따라서 ITOS의 경계는 블록한 모서리의 경계를 이루는 실루엣 곡선들로 구성되는데, 이때 블록한 모서리가 n개면 ITOS의 경계곡선 또한 n개가 된다[5]. ITOS와 평면들간의 교선은 먼저 실루엣 곡선들 및 디스크와의 교점(P₁, P₂, P₃, P₄)을 구한 후, 디스크상에 놓인 구간 (P₂-P₃)에 대해서는 직선으로 연결시키고, 토러스면 상에 놓인 구간 (P₁-P₂)과 (P₃-P₄)에 대해서는 tracing 방법으로 점을 샘플링 한다(그림 8).

2.3 Slicing된 요소들의 Sorting/Trimming/Linking

슬라이싱 작업시 하나의 평면에 대해 교선을 구하지 않고, 각각의 읍셋요소(삼각형, 트림된 ITSS, 트림된 ITOS)에 대해 교선이 발생할 만한 절단 평면을 모두 찾아 한꺼번에 슬라이싱을 한다. 각각의 평면에 대해 임의의 순서로 저장되어있는 교선들을 가공 방향으로 재배열하고, z축 값으로 겹치는 경우는 가장 위에 있는 곡선의 부분을 취하

여 연결하면 간섭 없는 공구경로를 생성할 수 있다.

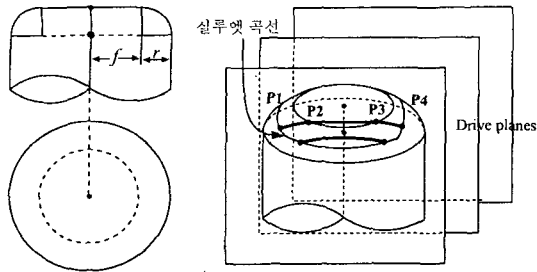


그림 8. 꼭지점과 drive 평면간의 교선

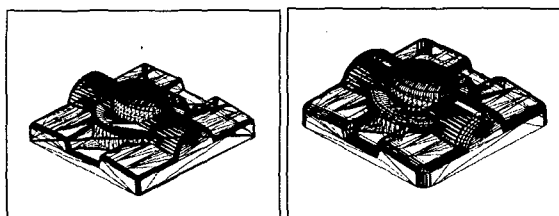
3. 적용 사례 및 결론

그림 9의 (a)는 다면체모델, (b)는 필렛엔드밀에 대한 읍셋모델을 보여주고 있다. 이 그림에서 볼록한 부분은 정확히 읍셋되어 있으나 오목 부위에서는 곡면이 겹쳐져있음을 알 수 있다. 그림(c), (d), (e)는 각각 평엔드밀, 필렛엔드밀, 볼엔드밀의 CL path인데, 이들 그림에서는 겹치는 부분이 완전히 제거되어 있다.

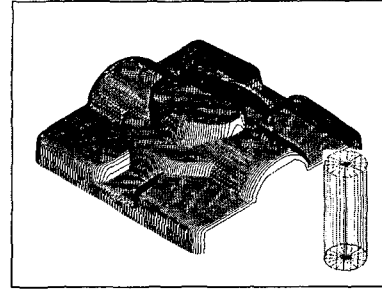
본 연구는 평엔드밀과 볼엔드밀을 포함한 필렛엔드밀을 이용하여 복합곡면을 NC 가공하기 위해 근사 모델인 다면체 모델을 이용하였고, NC 가공 경로를 효율적이고, 강건(robustness)하며, 정확하게 생성하기 위한 알고리즘을 개발하였다.

본 연구에서 제시한 방법의 특징을 정리하면 다음과 같다.

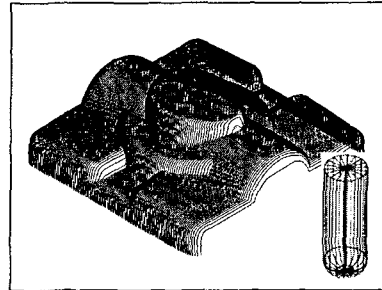
- (1) 곡선기반 접근방법을 이용하여 sharp-turn point를 정확히 구할 수 있다.
- (2) 다면체의 오목/볼록한 속성을 이용하고, 절단 평면과 만나는 모든 읍셋 요소를 찾는 대신, 하나의 주어진 요소를 지나는 모든 cutting plane과 slicing을 한꺼번에 행하므로 매우 효율적이다.
- (3) 본 방법에서 다루는 기하요소는 평면, torus, torus의 실루엣 곡선이며 이는 항상 안정적으로 계산할 수 있어 매우 robust하다.
- (4) 메모리 사용량이 많다.



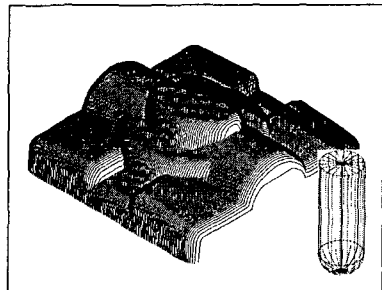
(a) 다면체 모델 (b) 읍셋모델 ($r = 3, f = 2$)



(c) 평엔드밀 ($r = 0, f = 5$)



(d) 필렛엔드밀 ($r = 3, f = 2$)



(e) 볼엔드밀 ($r = 5, f = 0$)

그림 9. 공구별 CL path의 예

4. 참고 문헌

- [1] 전차수, 1989, '자유곡면 NC 가공에서의 공구간섭 방지', KAIST 박사 학위 논문.
- [2] 정연찬, 1991, 'Z-Map 곡면의 읍셋과 블렌드 곡면 형성에 관한 연구', KAIST 석사 학위 논문.
- [3] 정연찬, 1996, '금형가공용 통합 CAM 시스템을 위한 가공데이터의 모의 가공과 검증에 관한 연구', KAIST 박사 학위 논문.
- [4] 정연찬, 최병규, 1996, '모의가공을 위한 공구이동 궤적면의 비매개변수형 모델링', 한국 CAD/CAM 학회 논문집
- [5] Jun, C.S, Kim, D.S. and Park, S.H., 1998, "Exact Polyhedral Machining" SSM98 conference proceeding.
- [6] Hwang, J.S., Chang, T.C., 1998, 'Three-axis machining of compound surface using flat and filleted endmills', Computer-Aided Design, Vol. 30, No. 8, pp. 641-647.