

자유 곡면의 CNC 가공을 위한 가공경로의 생성

성완*, 최종호*, 송오석*

A Toolpath Generation for CNC Machining of Free-form Surfaces

Wan Seong*, Chong-Ho Choi*, Osok Song*

ABSTRACT

A parametric curve interpolator has been proposed for machining curves instead of a linear interpolator in which curves are approximated by a set of line segments^[1,2]. The parametric curve interpolator is superior to linear interpolator in machining time and contour error and generate exact position commands directly from curve equations. In this paper, a new toolpath generation method is proposed based on the parametric curve interpolator. This method retains all the benefits of parametric curve interpolator and can bound the scallop height within a specified value. By interpolating curves and surfaces directly from the mathematical equations, the amount of data from CAD/CAM system to CNC controller can be significantly reduced. The proposed method was implemented on a CNC controller and was confirmed to give a better result than the other existing method.

Key Words : CNC, free-form surface(자유 곡면), toolpath generation(가공경로 생성), parametric curve interpolator (곡선 보간기), scallop, CAD/CAM

1. 서론

현재의 NC에는 G 코드(G code)라고 하는 표준 NC 전용 언어를 사용하고 있으며 이를 통해 직선 및 원호와 같이 비교적 간단한 모델을 표현한다. 즉, 가공하고자 하는 모델은 모두 직선과 원호의 조합으로 이루어져 있어야만 한다. 자유곡선 및 곡면은 주로 매개변수(parameter)를 사용한 수식으로 표현되며 이것을 가공하기 위해서는 적절한 방법을 사용하여 직선 및 원호만으로 이루어진 G코드로 변환시켜야 한다. G 코드를 사용하는 이런 방법은 평균 이송속도가 저하되고, 가공면의 조도가 나빠지며, 직선근사로 인해 곡선이나 곡면을 정확하게

나타내지 못하고, 프로그램의 길이가 길어지는 등의 문제점을 가지고 있다.^[1,2,3]

CAD 시스템에서는 복잡한 형상의 곡면을 나타내기 위해서 곡면을 매개 변수에 의한 방정식으로 표현한다. 이러한 곡면은 일반적으로 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)로 표현된다. CAD 시스템에서 사용된 NURBS 곡면을 직접 NC에서 가공을 하는데 사용할 수 있도록 하는 연구도 계속 수행되고 있다. 실제로 FANUC 등의 일부 NC회사의 제품에서 NURBS곡선 보간 기능을 가진 NC를 개발하기도 하였다^[4].

이 논문에서는 자유곡면 가공 시의 여러 문제점을 해결할 수 있는 곡선 및 곡면 보간 방법을 제안

* 서울대학교 전기공학부 제어계측신기술연구센터

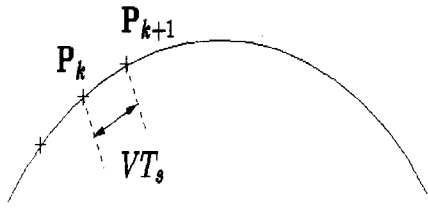


Fig. 1 Curve interpolation

한다. 곡선을 표현하는 수식으로부터 직접 보간하는 곡선 보간기를 이용하면 가공 시간 및 윤곽오차가 기존의 방법보다 감소할 뿐만 아니라, 가공을 하는 동안 일정한 이송속도를 유지함으로써 조도 감소를 피할 수 있음을 보이고, 이를 이용하여 곡면을 가공할 수 있는 방법을 제안한다. 제안하는 방법을 사용하면, 곡면의 곡률을 고려한 scallop의 높이를 일정한 값 이하로 제한하는 가공경로를 매개 곡선식의 형태로 생성하여 곡선 보간기를 활용할 수 있고, 고속 가공시 기존의 방법에 비해 전체 가공 시간이 감소하며, 근사화 과정없이 NURBS과 같은 곡면을 표현하는 수식으로부터 직접 곡면을 보간할 수 있게 되어 설계 단계의 CAD/CAM과 생산 단계에 있는 CNC 사이의 정보 소통을 용이하게 할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2절에서는 기존의 곡선 보간 및 곡면 가공 방법에 대하여 소개 하였다. 그리고 제 3절에서는 이를 이용하여 앞에서 언급한 문제점들을 해결하고 scallop의 크기를 고려한 곡면 가공 방법을 제시하였다. 제 4절에서는 실험을 통하여 그 유효성을 보였다. 그리고 제 5절에서는 결론을 맺었다.

2. 곡선 보간 및 곡면 가공

2.1 곡선 보간

자유 곡선을 수식으로부터 직접 보간하기 위해서는, 위치 제어기의 샘플링 시간 T_s 동안에 가야할 거리로 곡선을 나누어야 한다. 가공시의 이송속도 V_k 에 대해 Fig. 1에서 두 연속적인 위치 지령, 점 P_k 와 점 P_{k+1} 사이의 거리는 $V_k T_s$ 이어야 한다.

매개변수 u 로 나타내어진 곡선 $C(u)$ 에 대해 $t=kT_s$ 에서의 매개변수 값 $u(k)$ 는 다음 식으로부터

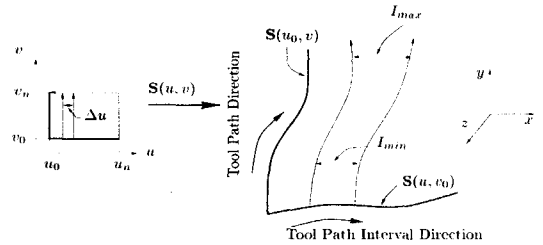


Fig. 2 The tool path direction and the tool path interval direction

얻을 수 있다^[1,2].

$$u(k+1) \approx u(k) + \frac{V_k T_s}{\left| \frac{dC(u)}{du} \right|_{u=kT_s}} \quad (1)$$

즉, 초기 u 값, $u(0)$ 가 주어지면 위치가 $V_k T_s$ 만큼 이동하기 위한 다음 매개변수 값을 구할 수 있다. NC에서 가공을 하기 위해서는 각 곡선의 시작과 끝에서 가속과 감속이 필요하다. 가감속을 하는 방법은 크게 보간 전 가감속과 보간 후 가감속으로 나누어진다. 보간 전 가감속은 처음 부터 가감속을 고려한 위치지령을 만들어 내는 방법을 가리키고, 보간 후 가감속은 보간 단계를 근사 보간과 상세 보간으로 나누어 근사 보간에서는 가감속을 고려하지 않는 등속도의 보간을 행하고 상세 보간에서 가감속을 하는 것을 말한다. 본 논문에서는 V_k 를 변화시키는 방법을 통하여 보간 전 가감속을 사용한다.

여기서 보인 곡선 보간기는 곡면을 여러개의 곡선으로 나누었을 때 각 곡선의 보간에 사용할 수 있다. 곡선 보간기는 기존의 직선 분할 방식 보다 많은 장점을 보이는데 이를 실험을 통해 다음 장에서 보인다. 즉, 곡면 가공에 있어서 각 등경 곡선 보간시, 곡선 보간기의 장점을 유지하게 된다.

2.2 공구 경로 간격

공구가 곡면을 가공하는 방향을 공구 경로 방향 (tool path direction), 그리고 공구가 다음의 공구 경로에 해당하는 경로로 이동하는 방향을 공구 경로 간격 방향(tool path interval direction)이라고 한다. 등경 곡선 방식인 경우의 공구 경로 방향(v)과 공구 경로 간격 방향(u)을 Fig. 2에 나타내었다.

본 논문에서는 볼엔드 커터(ball-end cutter)로 곡면을 가공했을 때 생기는 scallop 높이를 일정한 한계치 이하가 되도록하는 등경 곡선 경로를 찾는

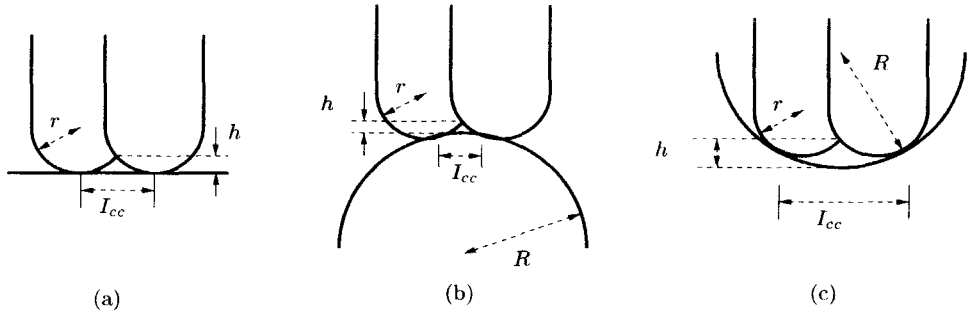


Fig. 3 Relationship between the scallop height and the tool path interval

다. Scallop 높이는 두 인접한 공구 경로의 간격이 일정하다라도 곡면의 곡률에 따라 변하므로 다음 공구 경로에 해당하는 등경 곡선으로 이동하기 위한 Δu 를 계산하는데 곡면의 곡률을 고려해야한다. 따라서 한 곡면에 대해 Fig. 3과 같이 볼록한 영역(convex region), 오목한 영역 (concave region), 그리고 평면인 영역 (flat region)으로 나누어 각각의 경우 공구의 끝이 둥근 볼엔드 커터(ball-end cutter)로 곡면을 가공했을 때 생기는 scallop 높이와 곡률, 그리고 공구 간격 사이의 관계는 다음과 같다 [5,6].

평면의 경우 :

$$I_{cc} = 2\sqrt{r^2 - (r-h)^2} \approx 2\sqrt{2hr}, \quad h \ll r. \quad (2)$$

볼록한 면의 경우 :

$$I_{cc} \approx \sqrt{\frac{8hrR}{R+r}}. \quad (3)$$

오목한 면의 경우 :

$$I_{cc} \approx \sqrt{\frac{8hrR}{R-r}}. \quad (4)$$

2.3 곡면의 분류

곡면은 일반적으로 볼록한 영역(convex region), 오목한 영역(concave region), 하이퍼보릭 영역(hyperbolic region), 그리고 패라보릭 영역(parabolic region)으로 나눌 수 있는데 이는 곡면 위의 한 점에서, 곡면에 대한 가우시안 곡률(Gaussian Curvature)과 법선 곡률(normal curvature)을 구함으로써 알 수 있다 [17,8]. 이와 같이 곡면의 영역을 나

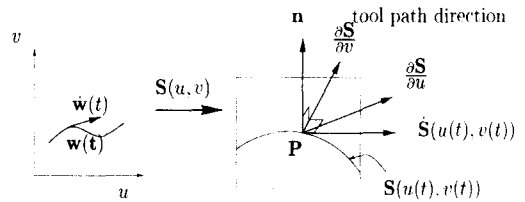


Fig. 4 The normal curvature

누는 것은 모든 방향의 곡률을 고려했을 때의 구분이며 여기서는 공구 경로 간격 방향으로의 곡면 모양이 중요하므로, 이 방향으로의 법선 곡률을 구하는 것만으로 충분하다. 이 경우 하이퍼보릭 영역과 패라보릭 영역은 나타나지 않으며, 대신 평면 영역이 추가된다.

법선 곡률은 곡면에 대한 제1기본행렬(the first fundamental matrix) \mathbf{G} 와, 제2기본행렬(the second fundamental matrix) \mathbf{D} 로 나타낼 수 있는데 이 두 행렬은 다음과 같이 정의된다 [18,9].

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u} \cdot \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u} & \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u} \cdot \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v} \\ \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v} \cdot \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u} & \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v} \cdot \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial u^2} & \mathbf{n} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial u \partial v} \\ \mathbf{n} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial u \partial v} & \mathbf{n} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial v^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $g_{12} = g_{21}$ 이고 $d_{12} = d_{21}$ 이다.

위 두 행렬을 이용하여 법선 곡률 k_n 을 나타내면 다음과 같다.

$$k_n = \frac{\dot{\mathbf{w}}^T \mathbf{D} \dot{\mathbf{w}}}{\dot{\mathbf{w}}^T \mathbf{G} \dot{\mathbf{w}}} \quad (7)$$

여기서 $\dot{\mathbf{w}}$ 는 매개변수 영역상의 곡선의 접선 벡터이다. 즉,

$$\dot{\mathbf{w}} = \left[\frac{du}{dt} \quad \frac{dv}{dt} \right]^T \quad (8)$$

Fig. 4에 점 P에서의 법선 벡터 \mathbf{n} 을 포함하고 공구 경로 방향에 수직인 평면을 나타내었다. 이 평면과 곡면이 만나서 생긴 곡선의 곡률 반경이 (3)과 (4)의 곡률 반경 R 이 된다. 그림에서 곡선의 접선 벡터 $\dot{\mathbf{S}}$ 와 공구 경로 방향 벡터 $\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v}$ 는 서로 수직이므로 두 벡터의 내적은 0이다. 그리고

$$\dot{\mathbf{S}} = \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u} \dot{u} + \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v} \dot{v} \quad (9)$$

이므로

$$\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u} \dot{u} + \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v} \dot{v} \right) = 0 \quad (10)$$

위 식을 이용하여 λ 를 다음과 같이 정의하면

$$\lambda = \frac{\dot{v}}{\dot{u}} = - \frac{\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u} \cdot \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v}}{\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v} \cdot \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v}} = - \frac{g_{12}}{g_{22}} \quad (11)$$

이고, $\dot{\mathbf{w}}$ 는 다음과 같이 된다.

$$\dot{\mathbf{w}} = \dot{u} [1 \quad \lambda]^T \quad (12)$$

위 식을 (7)에 대입하면 법선 벡터 \mathbf{n} 을 포함하고 공구 경로 방향에 수직인 평면과 곡면이 만나서 생긴 곡선의 곡률 k_m 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_m = \frac{d_{22}\lambda^2 + 2d_{12}\lambda + d_{11}}{g_{22}\lambda^2 + 2g_{12}\lambda + g_{11}} \quad (13)$$

공구 경로 간격 방향으로의 곡면 모양은 법선 곡률 k_m 의 부호(sign)를 이용해 다음과 같이 나눌 수 있다.

- $k_m < 0$ 인 경우 : 볼록한 영역(convex region)
- $k_m > 0$ 인 경우 : 오목한 영역(concave region)
- $k_m = 0$ 인 경우 : 평면 영역(flat region)

3. 제안하는 공구 경로 생성 방법

3.1 기존의 공구 경로 생성 방법

곡면 가공을 위한 공구 경로를 계산하는 방법에

는 직교 좌표계 영역에서 직접 산출해 내는 비등경 경로(nonisparametric path) 방식과 매개변수 영역에서 매개변수 (u,v)를 변화시키며 계산하는 등경 경로(isparametric path)의 두 가지 방식이 있다.

첫째 방법은, 직교 좌표계에서 직접 공구 경로를 계산해 내는 방식이다. 이런 방법에는, 곡면이 한 축(예를 들어 X축)에 수직인 평면과 만나는 점을 구하여 공구 경로로 하는 방법^[10]과 사각형 또는 삼각형의 매쉬(mesh)로 곡면을 근사시킨 뒤, 이 위에서 공구 경로를 계산해 내는 방법 등이 있다^[11].

이러한 방법으로 NURBS와 같은 자유 곡면을 가공하면, 생성되는 가공 경로 사이의 폭이 일정하지 않게 된다. 즉, 곡면과 절단 평면이 이루는 각이 작은 경우에는 절단 평면이 일정한 간격으로 이동하더라도 곡면위에서의 가공 경로들 간의 폭이 커지게 되어 scallop의 크기를 일정하게 해 줄 수가 없다. 그리고, 평면과 곡면의 교점을 구하기가 힘이 들고, 각 교점을 직선으로 근사하여 보간하기 때문에 가공 시간이 길어지고 윤곽 오차 또한 커지게 되어 앞에서 제시한 곡선보간기의 장점을 살릴 수 없다.

Lin et al.^[6]은 scallop의 크기를 일정하게 제한해주는 직선 경로를 생성하여 가공시간을 단축하는 방법을 제안하였다. 이들은 각 곡면의 곡률을 고려하여 주어진 scallop 크기에 따라 공구 간격 방향의 증가량을 결정하는 방법으로 곡면을 근사화하는 직선들로 이루어진 가공 경로를 생성하는 방법을 제시하였다. 이 방법으로 거리상으로 최단인 가공 경로를 생성하는 것은 가능하지만, 곡면을 직선으로 근사화하였기 때문에 앞에서 언급한 곡선 보간기의 장점을 살릴 수 없고, 각 직선의 시작과 끝에서 가감속이 일어나기 때문에 고속 가공을 할 경우 가공 시간을 단축시킬 수가 없다.

둘째로, 등경 경로는 곡면 $\mathbf{S}(u,v)$ 에서 매개변수 u 와 v 중 한 변수를 고정시킴으로써 생긴 등경 곡선, 예를 들어 u 를 u_0 에 고정시킨 경우 $\mathbf{S}(u_0,v)$ 를 공구 경로로 선택한다. 다음의 경로는 u 를 임의의 상수 Δu 만큼 이동시킴으로써 $\mathbf{S}(u_0+\Delta u,v)$ 와 같이 얻을 수 있다^[5]. 일반적으로 Δu 는 한 곡면을 가공하는 동안 변하지 않는 작은 상수로 하는 방식이 쓰인다.

Elber et al.^[12]는 등경 경로를 사용하는 가공 경로 생성 방법을 제안하였다. 이들은 가공 경로를 이루는 곡선들이 중복되지 않도록 하면서 간격을

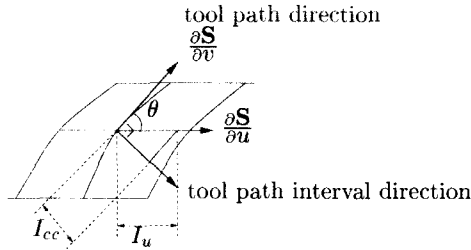


Fig. 5 I_{cc} and I_u

일정하게 되도록 조정하여 최단거리의 가공경로를 생성하였다. 그러나 곡면의 곡률을 고려하지 않았기 때문에 scallop의 높이에 대해서는 곡면이 평탄한 경우에 대한 상한값만을 보장해 줄 수 있었다.

3.2 공구 경로 생성 알고리즘

본 논문에서는 자유곡면의 가공 경로를 효과적으로 생성하기 위해 등경 경로로 이루어진 가공 경로를 생성하여 곡선보간기를 이용하여 보간함으로써 곡선 보간기의 장점을 살리고, 또한 scallop이 일정하도록 하기 위하여 가공 경로를 이루는 곡선들을 구할 때, 곡면의 곡률을 고려하여 곡선들 사이의 간격을 결정하는 방법을 제안한다.

이를 위해서 우선 곡면의 한쪽 모서리를 처음 가공 경로로 선택하고, 첫 가공 경로를 이루는 곡선을 따라 일정간격으로 곡면의 곡률을 계산하여 곡률을 고려한 scallop을 일정하게 하는 공구 경로 간격들을 산출한 후 그 가운데 최소 간격을 가지는 등경 곡선을 다음 가공 경로로 선택한다. 아래에 제안하는 방법을 상세히 설명하였다.

1. 곡면 $S(u,v)$ 에 대해 첫번째 공구 경로로 경계 곡선(boundary curve) 중 하나를 선택한다. 예로 $S(u_0,v)$ 를 택한다. 여기서 u_0 는 매개변수 u 의 최소값 u_{min} 이다.

2. 등경 곡선을 따라 매 샘플링 시간마다 매개변수 v 를 일정한 간격으로 움직이거나 또는 v 방향으로 공구가 실제 움직이는 거리를 일정하게 하도록 v 를 증가시켜 나갈 때, 이에 해당하는 곡면 위의 각 점에서의 곡면 모양을 결정한다. 이때 매 샘플링 시간마다 사용한 v 값들은 v_n ($n = 0,1,\dots$) 이다.

3. 곡률 k_{nv} 를 (13)을 사용하여 결정하고, (2),(3),(4)을 사용하여 곡면의 모양에 따른 CC 간격,

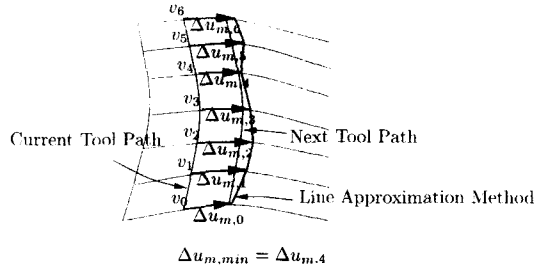


Fig. 6 Generation of the next tool path

I_{cc} 를 구한다. 이때 (3),(4)에 사용할 곡률 반경 R 은

$$R = \frac{1}{|k_{nv}|} \quad (14)$$

이다.

4. I_{cc} 에 해당하는 매개변수 u 방향으로의 간격 I_u 를 구한다. 공구 경로 간격 방향이 반드시 매개변수 u 방향과 일치하지는 않으므로, Fig. 5에서 처럼 곡면 $S(u,v)$ 의 편미분 벡터 $\frac{\partial S}{\partial u}$ 와 $\frac{\partial S}{\partial v}$ 가 이루는 각을 θ 라고 했을 때 I_u 는 다음과 같다.

$$I_u = \frac{I_{cc}}{\sin \theta} \quad (15)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\frac{\partial S}{\partial u} \cdot \frac{\partial S}{\partial v}}{\left\| \frac{\partial S}{\partial u} \right\| \left\| \frac{\partial S}{\partial v} \right\|} \quad (16)$$

5. 과정 4에서 구한 I_u 만큼 이동하기 위한 매개변수 u_m ($m = 0,1,\dots$)의 증가량을 구한다. 매개변수 (u_m, v_n) 에서 구한 u_m 의 증가량을 $\Delta u_{m,n}$ 이라고 하자. 직교 좌표계 상의 임의의 간격으로부터 매개변수의 변화량을 구하는 것은 곡선 보간에서 일정한 거리를 움직이기 위해 필요한 매개변수의 변화량을 구하는 것과 같다. 곡면 위의 u 방향 등경 곡선에 (1)을 적용하면 $\Delta u_{m,n}$ 은 다음과 같다.

$$\Delta u_{m,n} = \frac{I_u}{\left| \frac{\partial S(u_m, v_n)}{\partial u} \right|} \quad (17)$$

(Fig. 6에 각 점에서 구한 $\Delta u_{m,n}$ 을 나타내었다.)

6. 다음 공구 경로는 다음과 같이 표현된다.

$$S(u_m + \Delta u_{m,min}, v) \quad (18)$$

여기서 $\Delta u_{m,min}$ 은

$$\Delta u_{m,min} = \min_n \{ \Delta u_{m,n} \} \quad (19)$$

이다.

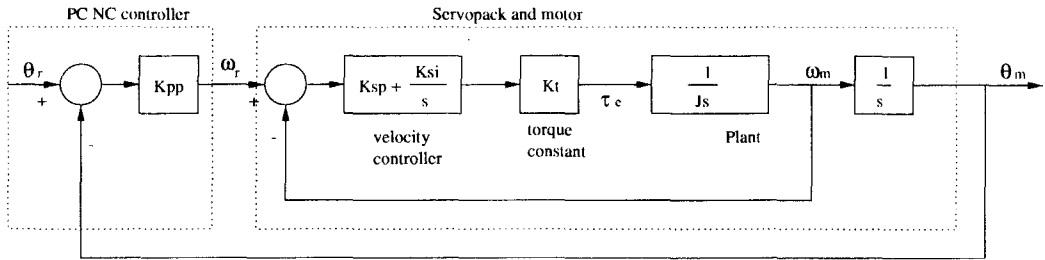


Fig. 7 Block diagram of CNC servo system

7. 다음 공구 경로를 찾기위해 u_{m+1} 을 $u_m + \Delta u_{m,min}$ 으로 한다.

8. 매개변수 u_{m+1} 이 매개변수의 최대값 u_{max} 가 될 때까지 위의 과정을 반복한다.

3.3 CL path의 계산

경로(Cutter Location path: CL 경로)로 나뉜다. 일반적으로 공 공구 경로(tool path)는 공구 접촉점 경로(Cutter Contact path: CC 경로)와 공구 중심점 구 위치라고 할 때는 공구 중심점을 의미한다. 이때 CL 점에 해당하는 $S_{cl}(u,v)$ 와 CC 점에 해당하는 $S_{cc}(u,v)$ 사이의 관계를 (21)에 나타내었다.

$$S_{cl}(u, v) = S_{cc}(u, v) + r(\mathbf{n} - \mathbf{u}) \quad (20)$$

$$\mathbf{n} = \frac{\frac{\partial S_{cl}(u, v)}{\partial u} \times \frac{\partial S_{cl}(u, v)}{\partial v}}{\left| \frac{\partial S_{cl}(u, v)}{\partial u} \times \frac{\partial S_{cl}(u, v)}{\partial v} \right|} \quad (21)$$

여기서 '×'는 벡터 외적(vector cross product)을, r 은 공구 반경, \mathbf{n} 은 단위 법선 벡터(normal vector), \mathbf{u} 는 공구 회전축 방향의 단위 벡터를 나타낸다. 즉, 크기가 공구 반경과 같고, 방향은 곡면에 수직인 법선 벡터를 CC 점에 더하고 공구반경 만큼 아래로 내림으로써 CL 점을 구할 수 있다.

4. 실험 및 결과 분석

이 절에서는 NURBS로 표현된 곡선 및 곡면에 여기서 제안하는 방법을 사용하여 실험한 결과를 보인다. 먼저 곡선 보간기를 이용한 곡선 실험을 통해 한 곡면을 등경 곡선으로 나누고 각 등경 곡선을 곡선 보간기로 보간했을 때 나타나는 장점에 대해 보인다.

4.1 실험에 사용된 시스템 및 실험 환경

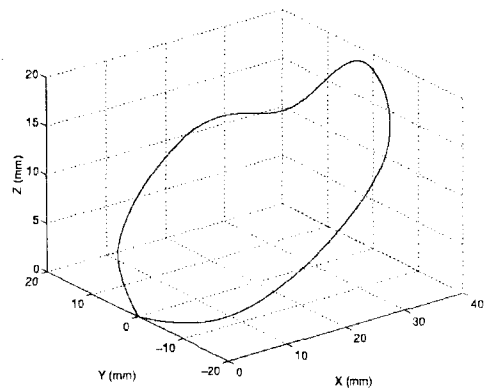


Fig. 8 The NURBS curve used in the experiment

실험을 위해서 3축 수직형 머시닝센터에 NC제어기를 구현하여 부착하였다. 실험에 사용된 제어시스템의 블록 다이어그램은 Fig. 7과 같다. 속도 제어기로는 비례득과 적분득이 각각 Ksp와 Ksi인 PI 제어기를, 위치 제어기로는 이득이 Kpp인 P 제어기를 사용하였다. 각 제어기의 이득은 시스템이 발산하지 않는 범위내에서 최대가 되도록 조정하여 추종오차가 최소가 되도록 하였다.

위치 제어기를 포함하는 CNC 제어기는 실시간 OS를 탑재한 Pentium PC를 이용하여 구현하였다. 이와 같이 PC를 이용하여 NC 시스템을 구현함으로써, NURBS 곡선의 실시간 보간기등을 비롯한 여러가지 NC의 기능을 손쉽게 확장하는 것이 가능하였다.

4.2 곡선 가공 실험

실험에 사용한 제어점이 14개인 NURBS 곡선을 Fig. 8에 나타내었다.

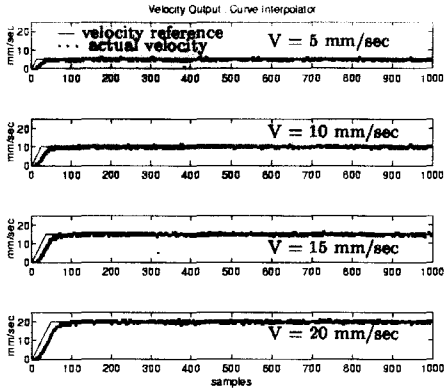


Fig. 9 Velocity profiles of the curve interpolator and the actual velocities

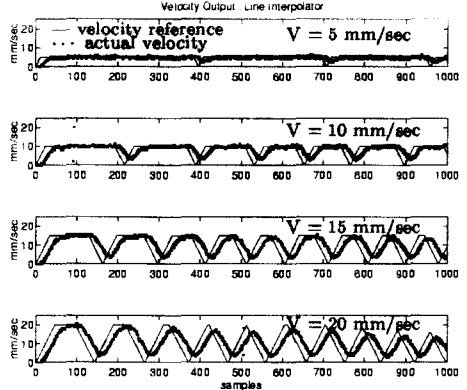


Fig. 10 Velocity profile of the linear interpolator and the actual velocities

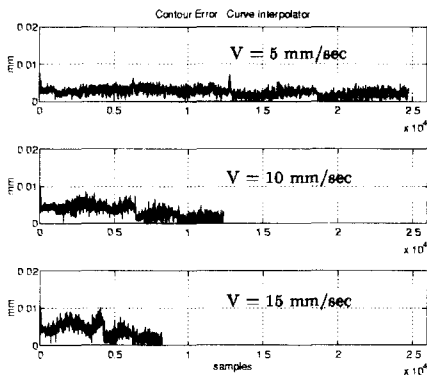


Fig. 11 The contour error for the the curve interpolator

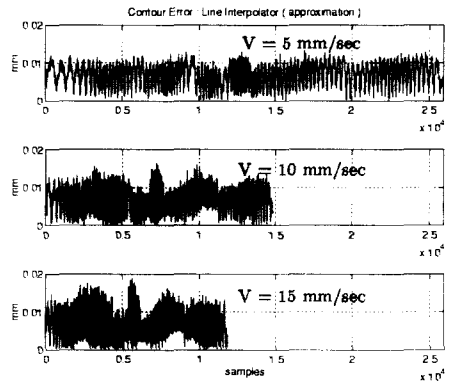


Fig. 12 The contour error for the linear interpolator

Table. 1 Maximum contour error and average contour error (average/maximum : μm)

이송속도 (mm/sec)	5	10	15
직선분할 방식	6.9/13.2	7.1/16.4	7.5/19.0
곡선보간기 방식	2.5/7.7	3.2/9.9	3.9/10.6

곡선 보간식 (1)을 이용한 뒤, 모터의 가속속 패턴을 고려하여 만든 위치 지령으로부터 계산된 속도와 이 지령에 의한 실제 모터의 움직임을 Fig. 9에 나타내었다.

이에 반하여 곡선을 직선으로 근사시킨 후 선형 보간기를 통과시켰을 때 선형 보간기 출력의 속도와 이에 따른 실제 모터의 속도 출력을 Fig. 10에

Table 2 Time spent for the curve interpolation (sec)

이송속도 (mm/sec)	10	30	50
직선분할 방식	14.8	10.8	10.8
곡선보간기 방식	12.3	4.1	2.6

나타내었다. 사용한 오차 허용 한계는 $10\mu\text{m}$ 이다.

Fig. 9에서 볼 수 있는 것과 같이 곡선 보간기를 사용했을 때는 가속 구간 이후 이송속도 V 를 만족하지만 Fig. 10의 선형 보간기를 이용한 경우에는 각 직선 세그먼트들의 길이가 짧아서, 프로그램된 이송속도가 어떤 한계를 넘어서면 등속 구간을 갖

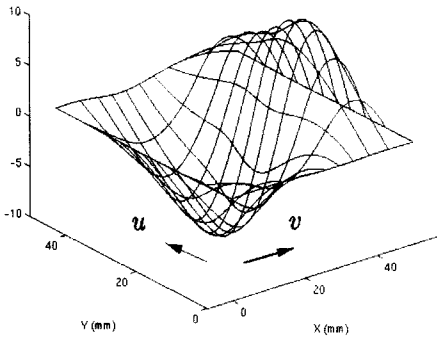


Fig. 13 The NURBS surface used in the experiment

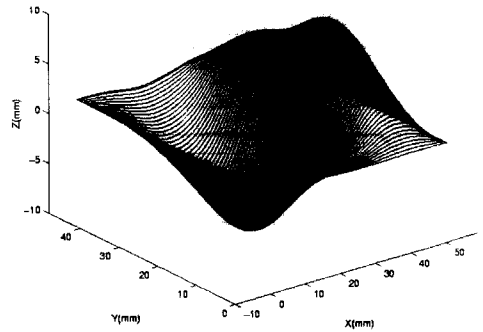


Fig. 14 Generated isoparametric tool paths for the NURBS surface

Table 3 Time spent for the surface machining (sec)

이송속도 (mm/sec)	10	30	50
기존의 방법	673	634	634
제안하는 방법	631	217	145

지 못하고 다시 감속함을 볼 수 있다. 또한 선형 보간기의 경우 속도 지령이 자주 변하므로 곡선 보간기에서보다 모터가 속도 지령을 잘 추종하지 못함을 볼 수 있다. 또, 가공면에 대해 일정 속도를 유지하지 못함으로써 조도가 나빠진다.

Fig. 11에 Fig. 9의 곡선을 추종하는 윤곽오차를 나타내었다. Fig. 12 직선으로 근사화시켰을 때의 윤곽오차이다. Fig. 11에 비해 Fig. 12에서 더 큰 오차를 보인다.

Table 1에 두 방식에 대한 평균 윤곽오차와 최대 윤곽오차를 나타내었다. 곡선 보간기를 사용한 경우가 더 작은 윤곽오차를 나타냄을 볼 수 있다.

Table 2에 이송속도를 변화시켰을 때 주어진 곡선을 가공하는데 걸리는 시간을 비교하였다. 곡선 보간기는 최초의 가속 구간 이후에는 이송속도를 일정하게 유지하므로 설정된 이송속도에 비례하여 가공 시간이 짧아짐을 보이지만, 직선 분할 방식에서는 한계 속도(Table 2에서 20 mm/sec 부근) 이상에 대해서는 가공 시간이 더 이상 감소하지 않는다. 즉, 한계 속도 이상에서는 등속 구간을 갖지 못하므로 곡선 보간기를 사용한 경우가 가공 시간이 짧음을 알 수 있다.

4.3 곡면 가공을 위한 경로 생성 및 보간 실험

Fig. 13은 실험에 사용한 제어점이 36개인 NURBS 곡면이다. X축, Y 방향으로의 크기가 약 50mm 정도이다. 실험 조건으로는 scallop의 높이를 10 μ m, 공구 반경을 5mm, 가공할 때의 이송 속도를 10~50 mm/sec 사이의 여러 속도로 하였다. 알고리즘을 완료했을 때 Fig. 14와 같이 90개의 등경 경로가 생성되었다.

만약 같은 조건에서, 공구 간격 방향으로의 너비가 50 mm인 평면을 가공하는 경우를 생각해보면 CC 간격은 (2)으로부터 0.6321 mm이고, 너비가 50 mm이므로 생성될 경로의 수는 80개이다. 따라서 곡률의 변화로 인해 공구 경로의 수가 증가하였음을 알 수 있다.

Table 3에 scallop 높이가 일정하게 되도록 하는 직선 세그먼트 경로를 생성하는 기존의 방법과 제안하는 곡면 가공 알고리즘을 사용했을 때 걸리는 시간을 비교하였다. 이 시간은 단순히 공구 경로의 길이를 이송속도로 나눈 값이 아니라 생성된 이송 경로를 실제 NC의 모터에 전달한다고 가정하고 가감속을 가했을 때 걸리는 시간을 측정된 것이다.

Table 3에서 알 수 있듯이 기존의 방법은 20 mm/sec 이상의 속도에 대해서는 가공 시간이 변하지 않는다. 즉, 주어진 이송속도에 도달하지 못한 채 가감속만을 반복함으로써 전체 가공 시간은 일정하다. 하지만 제안하는 방법에서는 가공면을 따라 주어진 이송속도를 유지함으로써 고속 가공 시 가공 시간이 단축된다.

5. 결론

본 논문에서는 곡선 보간기를 이용한 등경 경로 방식으로, 한 곡면을 여러 개의 등경 곡선으로 나누고 각 등경 곡선 경로에 대해 곡선 보간기를 이용해 가공하는 알고리즘을 제시하였다.

이 알고리즘에서 각 등경 곡선은 곡면 가공 후, 마무리 작업에서 제거해야하는 scallop의 높이를 가공자의 설정값 이하가 되도록 설정된다. 이 알고리즘을 사용하면, 매개변수 식으로 표현된 곡면 수식을 직접 이용하여 실시간에 가공할 수 있다. 각 등경 곡선에 대해서 곡선 보간기를 이용하므로 기존의 근사적 가공 방법에 비해 가공 시간이 단축되고, 가공 시 원래의 모델과의 오차인 윤곽오차가 감소하며, 가공면을 따라 일정한 이송속도를 유지하게 하는 위치 제어기 입력을 생성함으로써 기존의 방법보다 조도를 향상시킬 수 있었다. 또한 CAD/CAM 시스템에서 사용된 NURBS곡면을 NC에서 직접 사용함으로써 G code로 변환하는 불필요한 작업을 없앨 수 있었고, CNC로 전달되는 정보량도 훨씬 줄일 수 있었다.

그리고 여기서 제시한 방법을 NC 제어기에 구현하였으며 그 유효성을 실험을 통하여 확인하였다.

참고문헌

1. M. Shpitalni, Y. Koren, and C. C. Lo, "Realtime curve Interpolators," Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 11, pp. 832-836, Nov. 1994.
2. D. C. H. Yang and Tom Kong, "Parametric interpolator versus linear interpolator for precision CNC machining," Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 3, pp. 225-234, Mar. 1994.
3. G. W. Vickers and C. Bradley, "Curved surface machining through circular arc interpolation," Computer In Industry, Vol. 19, pp. 329-337, June 1992.
4. Charles A. Bates, "Some well-defined curves," American Machinist, pp. 51-54, Nov. 1997.
5. Gregory C. Loney and Tulga M. Ozsoy, "NC machining of free form surfaces," Computer-Aided Design, Vol. 19, No. 2, pp. 85-90, Mar. 1987.
6. Rong-Shine Lin and Y. Koren, "Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 118, pp. 20-28, Feb. 1996.
7. Gershon Elber, "Freeform surface region optimization for 3-axis and 5-axis milling," Computer-Aided Design, Vol. 27, No. 6, pp. 465-470, Jun. 1995.
8. Robert C. Beach, An Introduction to the Curves and Surfaces of Computer-Aided Design, VNR, 1st edition, 1991.
9. Fujio Yamaguchi, Curves and Surfaces in Computer Aided Geometry Design, Springer-Verlag, 1st edition, 1988.
10. B. K. Choi, J. S. Hwang C. S. Lee, and C. S. Jun, "Compound surface modelling and machining," Computer-Aided Design, Vol. 20, No. 3, pp. 127-136, Apr. 1988.
11. Susan X. Li and Robert B. Jerard, "5-axis machining of sculptured surfaces with a flat-end cutter," Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 3, pp. 165-178, Mar. 1994.
12. Gershon Elber and Elaine Cohen, "Toolpath generation for freeform surface models," Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 6, pp. 490-496, June 1994.