

온라인 방식의 지능형 NURBS 곡면 보간기

구태훈* (단국대 대학원 기계공학과), 지성철 (단국대 기계공학과)

Intelligent NURBS Surface Interpolator with Online Tool-Path Planning

T. Koo(Graduate School, Dankook Univ.) and S. Jee(Mechanical. Eng. Dept., Dankook Univ.)

ABSTRACT

In this paper, a NURBS surface interpolator is proposed which can deal with shapes defined from CAD/CAM programs on a surface basis and can improve contour accuracy. The proposed interpolator is based on newly defined G-codes and includes online tool-path planning suitable for NURBS surface machining. The real-time interpolation algorithm, considering an effective machining method for each machining process and minimum machining time, is executed in an online manner. The proposed interpolator is implemented on a PC-based 3-axis CNC milling system and evaluated through actual machining in terms of machining time and regulation of feedrate and cutting force in comparison with the existing method.

Key Words : CNC (컴퓨터수치제어), Surface machining (곡면가공), NURBS (비균일 유리 B 스플라인), Surface interpolator, 곡면 보간기(Surface interpolator), 온라인 공구경로 계획 (Online tool-path planning), G 코드 (G code), 이송속도 (feedrate), 절삭력(cutting force)

1. 서론

3 차원 윤곽가공에서는 CAD/CAM 프로그램에서 정의된 기준곡면에 대하여 황삭(rough cut), 정삭(finish cut) 혹은 황삭, 중삭(intermediate cut), 정삭의 일련의 절삭과정을 거치는데, 주로 곡선의 연속으로 가공면을 표현하고 이와 같이 표현된 곡선을 다시 무수한 직선, 원호 이송의 G 코드로 분할 표현하여 가공하는 방법이 일반적이다. 따라서 기준곡면에 대한 근사 정밀도를 높이려면 곡면을 표현하는 NC 데이터의 양을 늘리거나 곡면을 분해한 단위 곡선을 해석할 수 있는 곡선 보간기를 이용해야 한다. 전자는 보간기 내부의 증감속 효과로 인한 가공정밀도 저하와 별도의 메모리 공간, DNC 등이 요구되는 단점이 있으며, 후자는 CAM 프로그램에서 곡면을 곡선 G 코드로 근사할 수 있는 특별한 후처리기(post-processor)를 개발해야 하나 CNC 제조업체마다 지원하는 곡선 보간기의 형식과 종류가 각기 다르기 때문에 일반화하여 개발하기 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 직선과 곡선 보간기를 이용하던 기존의 윤곽가공 방식에서 탈피하여, CAD/CAM 프

로그램에서 정의된 형상을 곡면단위로 처리하며 윤곽정밀도를 높일 수 있는 지능형 NURBS 곡면 보간기를 제시한다. 이 방법은 CAD/CAM 에서 정의된 기준곡면을 곡면단위로 통째로 해석하여 가공하기 때문에 곡선을 직선으로 근사화할 필요가 없고 후처리가 매우 간결해질 수 있으며, 단위곡면 전체가 소량의 NC 데이터만으로도 표현이 가능하다. 무엇보다도 곡면 전체가 온라인(online) 방식으로 처리되기 때문에 기존 방법에 비해 보다 매끄러운 3 차원 윤곽가공면을 기대할 수 있다는 장점이 있다.¹

제시된 NURBS 곡면 보간기는 기존의 방식과 뚜렷이 차별화되어, 각 절삭과정에 대한 새로운 형식의 G 코드에 기반하고, 효율적인 메모리 관리 기법과 등스칼롭(iso-scallop) 방식에 기초하여 NURBS 곡면가공에 적합한 온라인 공구경로 계획 모듈을 포함한다. 각 절삭과정은 본 연구에서 새롭게 정의된 NURBS 곡면 G 코드와 대응되어 전체 곡면가공이 소수의 G 코드로 처리될 수 있도록 하였다. 가공될 소재의 형상과 최종 절삭면에 따라 요구되는 피삭량과 절삭조건이 다른데, 가공정밀도를 위해서는 이러한 절삭조건이 조정이 모두 CNC 보간기 내

부에서 이루어져야 하므로, 온라인 상에서 실시간으로 실행되어야 한다. 본 연구에서는 정삭과정에 적합한 절삭방법과 최소 가공시간을 고려하는 보간 알고리즘을 온라인 상에서 실시간으로 구현하였다. 또한, 제시된 NURBS 곡면 G 코드를 바탕으로 곡면단위의 해석이 가능하고 실제 가공이 가능한 3축의 PC 기반 개방형 CNC 밀링 시스템을 구축하여, 실시간 공구경로 생성능력, 요구 이송속도 추종능력, 단위 곡면당 가공시간, 절삭력의 균일 정도 등의 측면에서 기존의 곡면 보간방법과 비교하여 제시된 방법의 유용성을 평가하였다.

2. 제시된 NURBS 곡면 보간기

2.1 공구경로 생성 방법

곡면 보간기의 곡면처리 알고리즘은 CNC 내부에 적재되어 기존의 직선, 원호의 처리 방식과 같이 G 코드 입력방식을 이용하여 온라인으로 처리된다. 기존의 연구들은 곡선 보간 알고리즘을 응용한 등매개변수(iso-parameter) 방법과 매개변수 다항식의 계수를 직접 G 코드 데이터로 구성하는 방법을 이용하였다.² 그러나 등매개변수 방법은 알고리즘이 단순한 반면 가공시간이 오래 걸리는 단점이 있고, 매개변수 다항식을 직접 입력하는 방법은 NURBS 를 이용하는 CAD/CAM 의 기준곡면에 대응 시키기에 무리가 있다. 본 연구에서는 식 (1)의 NURBS 곡면식을 이용한다.³

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m W_{ij} N_{ik}(v) N_{jl}(u) V_{ij}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m W_{ij} N_{ik}(v) N_{jl}(u)} \quad (1)$$

그리고 등스켈립 공구경로 생성을 위해 곡면의 보간시에 각 보간점 마다 공구경로 간격 방향으로 규정 스킵 높이을 만족하는 거리만큼의 매개변수값을 스택(stack)에 저장하여 다음 공구경로 생성에 이용하는 방법을 사용하였다. 이 때 각 보간점마다 계산되어 메모리에 저장된 값들은 다음 공구경로 생성시 일정량을 꺼내어 국부적인 보간식을 구성하고, 생성된 보간식 내에서 수치해석적 반복 알고리즘을 통하여 공구의 이송 보간점들 계산한다.⁴

2.2 지능형 이송속도 생성 알고리즘

굴곡이 존재하는 곡면의 가공시 엔드밀을 균일한 속도로 이송시킨다 하더라도 곡면의 곡률에 따라 비절삭체적(MRR)이 달라진다. 고속가공을 지향하고 있는 현대의 가공추세에 따라 절삭깊이는 줄고 전체적인 평균 절삭력은 감소되었다. 그러나 갈

수록 굴곡이 많으며 미세하고 복잡한 형상이 금형 등의 제품에 요구되고 있어 가공 중에 절삭력의 변동이 커질 수 있다. 절삭력의 불균일 현상에 대한 가공면의 영향은 이미 잘 알려져 있는 바이다. 특히 곡면이 오목한 경우 절삭력이 급격히 증가하여 공구손상과 진동의 원인이 될 수 있다.

곡면 보간기는 가공면의 곡면구성을 위한 입력 정보로 CAD/CAM 에서 생성된 기준 곡면의 입력 정보를 이용한다. 따라서 공구접촉(CC) 경로를 기준으로 보간이 이루어진다. 그러나 이 방법은 무조건 CC 경로에 대하여 등간 보간하고 각 점에서 곡면에 수직한 법선벡터 방향의 공구 읍셋만을 고려하여 공구위치(CL) 보간점을 계산하는 방식이기 때문에 굴곡이 큰 기준곡면에 대해서는 CL 이송속도의 차가 크게 나타난다.⁵ 그 결과 정삭가공에서는 소재의 잔여 두께가 일정하다 하더라도 곡면의 굴곡에 따라 비절삭체적의 차이가 크게 발생하여 절삭력의 변동이 커질 수 있다. 본 연구에서는 이를 구속하여 굴곡이 있는 곡면의 가공시 균일한 절삭력을 얻을 수 있도록 공구의 이송속도를 지능적으로 조절하는 방법을 제시한다. 이것은 기준곡면을 보간하는 보간점들을 이용하여 등스켈립 방법에 적합한 새로운 곡률반경 계산 방법에 기초한다.

공구경로 방향의 표면 곡률반경을 계산하는 일반적인 식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\rho(u) = \frac{\left| \frac{\partial S}{\partial u} \right|^4}{\frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial^2 S}{\partial u^2} \times \frac{\partial S}{\partial u}} \quad (2)$$

이 식은 등매개변수 방법에는 적합하나 등스켈립 방법에는 그렇지 못하다. 그 이유는 식 (2)가 공구경로 방향에 대한 접선벡터 $T(u)$ (Fig. 1 참조)와 곡면상의 수직 법선벡터를 이용하기 때문에 등매개변수 방법과는 공구경로의 접선방향이 부합되나, 등스켈립 방법에서는 Fig. 1 과 같이 공구경로 방향으로의 접선방향이 두 개의 매개변수에 대한 식 $T^*(u, v)$ 로써 표현되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 식 (2)를 이용하는 기존의 방법 대신 Fig. 1 과 같이 CC 경로를 따라 실제 보간된 세 점들로 구성된 3 차원의 원을 이용하는 방법을 제시한다.

먼저 보간기를 거쳐 계산된 각 3 개의 보간점들이 일직선상에 있지 않다고 가정하면, 공간상에서 이 세 점을 지나는 평면의 방정식은 식 (3)과 같다.

$$px + qy + rz + s = 0 \quad (3)$$

Fig. 1 에서 $R_k(x_k, y_k, z_k)$ 는 기준 궤적상의 현재 보

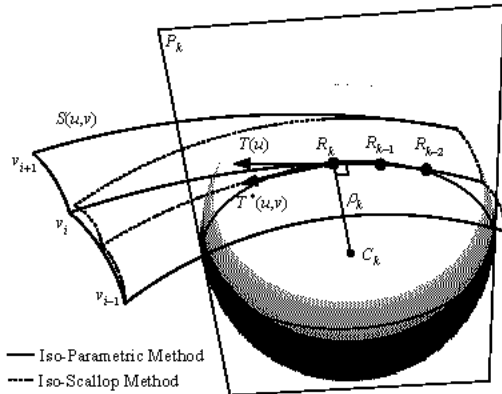


Fig. 1 Real-time calculation of surface curvature in tool-path direction

간점이고 이전 시간단계의 보간점을 R_{k-1} 와 R_{k-2} 라 하면, 세 기준점의 좌표를 이용하여 식 (3)의 계수를 구할 수 있다. 그리고 세 기준점을 포함하는 임의의 구면에 대한 아래 식 (4)와

$$Q = (x - C_x)^2 + (y - C_y)^2 + (z - C_z)^2 - \rho^2 = 0 \quad (4)$$

식 (3)을 연립하여 원의 중심좌표 $C(C_x, C_y, C_z)$ 와 반경 ρ 를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & q & r & 0 \\ -2x_k & -2y_k & -2z_k & 1 \\ -2x_{k-1} & -2y_{k-1} & -2z_{k-1} & 1 \\ -2x_{k-2} & -2y_{k-2} & -2z_{k-2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} -s \\ -x_k^2 - y_k^2 - z_k^2 \\ -x_{k-1}^2 - y_{k-1}^2 - z_{k-1}^2 \\ -x_{k-2}^2 - y_{k-2}^2 - z_{k-2}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이 방법의 장점은 무엇보다도 공구경로 방향의 곡률반경을 계산하기 위해 보간기에서 계산된 3개 점의 좌표 외에는 곡면에 대한 부가적인 정보가 필요 없으며 NURBS 곡면이 아닌 여타의 곡면과 곡선에 대해서 모두 적용이 가능하다는 점이다.

곡면이 볼록한 경우와 오목한 경우에 대한 비절삭체적이 같도록 구속하기 위해, 평면 절삭의 비절삭체적을 두 경우에 대한 비절삭체적과 각각 등가로 놓고 CC 경로상의 이송속도 V_r 에 대해 정리하면 다음과 같다.¹

$$V_r = \frac{V_0}{1 + \delta / (2\rho)} \quad (6)$$

여기서, 이송속도 V_0 는 사용자가 지정한 CC 경로에

대한 기준 이송속도이고 ρ 는 3차원 곡률반경으로서 곡면이 볼록한 경우 (+)기호를, 오목한 경우 (-)기호를 갖는다. 절삭깊이 δ 는 정삭에 앞서 증삭 가공에서 잔여두께가 균일하게 가공되어 기준곡면에 대해 일정한 높이를 이루고 있다고 가정한다. 마지막으로, CC 경로에 대한 가변 이송속도 V_r 은 가공을 고려해 설정된 상한값 내에서 동작한다.

3. 실험 결과

제시된 보간기의 성능 평가를 위해 3축 개방형 CNC 밀링시스템을 이용한 가공실험을 수행하였다. 실험 시스템의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Parameters of the experimental system

Parameters	X and Y-axis	Z-axis
Open-loop gain	120 s ⁻¹	74 s ⁻¹
Time constant	30 ms	7 ms
BLU	0.5 μm	
Sampling time	1 ms	
Control I/O	16 bit DAC; 32 bit Counter	
A/D converter	16 bit ADC	
Tool dynamometer	Strain gage type (Kyowa)	
Control PC	Pentium IV 1.7MHz	

가공의 기준곡면은 6×6의 조정점을 갖고 굴곡이 심한 NURBS 곡면을 대상으로 하였으며, 가공소재는 60×100×50 mm 크기의 6061 알루미늄을, 공구는 직경이 5 mm인 초경재질의 두날 플렌드밀을 사용하였다. 소재는 정삭가공을 위하여 약 2.5 mm의 절삭깊이가 남겨지도록 황삭과 증삭을 거쳐 선가공되었다. 주축의 회전속도 2700 rpm, CC 경로에 대한 이송속도 $V_0 = 580$ mm/min으로 하여 정삭된 가공물의 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

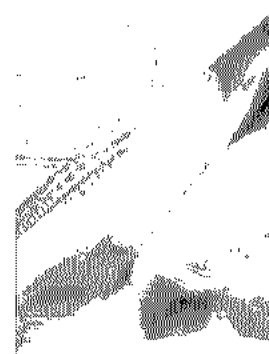


Fig. 2 Machined NURBS surface

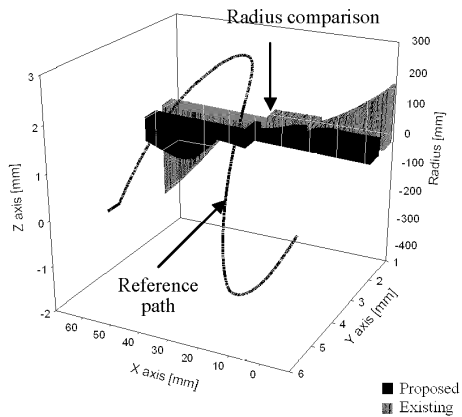


Fig. 3 Comparison of calculated surface radii of curvature for a tool path

먼저, Fig. 2 곡면의 공구경로에 대해, 제시된 곡률반경 계산 알고리즘의 결과를 식 (2)를 이용하는 기존의 방법과 비교하였다. 곡면의 굴곡이 완만한 부분에 대해서는 두 방법에 큰 차이가 없었으나, 굴곡이 공구경로 간격 방향으로 존재하는 경우에는 해당 매개변수(v)의 변동이 생기므로 Fig. 3 과 같은 공구경로에 대해 기존 방법의 계산 결과는 제시된 방법과 많은 차이가 있음을 볼 수 있다.

동일한 공구경로에 대해, 제시된 곡률반경 계산 알고리즘에 기초한 이송속도 조절을 실행하는 경우와 CC 경로를 따라 일정 이송속도로 가공하는 경우의 절삭력을 비교하였다. 절삭력은 스트레인 게이지 방식의 공구동력계를 이용하여 측정하였으며, 평균 절삭력의 추이를 살펴보기 위해 500 개의 데이터(0.5 s)를 누적 평균한 이동평균(moving average)을 취하였다. Fig. 4 에서와 같이 곡면의 굴곡에 따른 비절삭체적 변화의 고려 없이 CC 경로에 대해 등간 보간방식을 행하는 기존 보간기에 비하여 제시된 보간방식이 보다 균일한 평균 절삭력을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

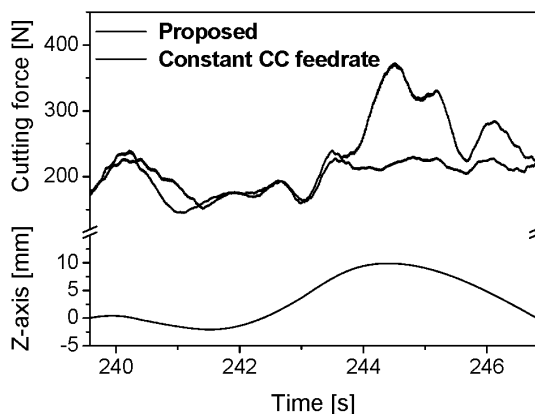


Fig. 4 Comparison of averaged cutting force

끝으로, 기존의 등매개변수 방법을 적용할 경우와 제시된 등스캘럼 방식의 곡면 보간기를 적용한 경우의 가공 소요시간을 Table 2 에 비교하였다. Fig. 2 의 곡면에 대해 규정 스캘럼 높이를 0.01 mm 로 설정한 결과이며, 가공시간이 기존 방법에 비해 25% 가량 단축되었다. 가공시간의 감소효과는 스캘럼 높이를 작게 할수록 더욱 커지게 된다.

Table 2 Comparison of machining time (s)

Method	Machining time
Iso-parametric	1312.858
Proposed	986.193

4. 결론

본 연구에서는 3 차원 윤곽가공시 직선과 원호 보간의 G 코드를 이용하는 기존의 가공방식에 탈피하여 새로운 형식의 G 코드에 기반한 NURBS 곡면 보간기를 제시하였다. 이 보간기는 등스캘럼 방식의 지능적인 온라인 공구경로 계획을 포함한다. 제시된 NURBS 곡면 보간기를 PC 기반 개방형 CNC 시스템에 구현한 결과, 곡면가공을 위한 NC 데이터의 비약적 축소와 균일 조도를 유지하면서도 가공시간의 단축이 가능하였다. 또한 정상가공에서 굴곡이 존재하는 곡면에 대하여, 공구경로 방향으로의 새로운 곡률 계산 알고리즘에 의한 실시간 이송속도 조절으로 평균 절삭력을 보다 균일하게 유지시킬 수 있음을 가공실험을 통해 입증하였다.

참고문헌

- Jee, S. and Koo, T., "NURBS Surface Interpolator for Constant Cutting Forces in Ball-End Milling," Transactions of the KSME, A, Vol. 26, No. 9, pp. 1888-1896, 2002.
- Lin, R. S., "Real-Time Surface Interpolator for 3-D Parametric Surface Machining on 3-Axis Machine Tools," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, pp. 1513-1526, 2000.
- Piegl, L. and Tiller, W., The NURBS Book, 2nd Edition, Springer, 1995.
- Koo, T. and Jee, S., "Real-Time Tool-Path Generation for 3-Axis CNC Machining of NURBS Surfaces," Transactions of the KSME, A, Vol. 27, No. 8, pp. 1418-1425, 2003.
- Lo, C. C., "CNC Machine Tool Surface Interpolator for Ball-End Milling of Free-Form Surfaces," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, pp. 307-326, 2000.