

실시간 가변속 NURBS 곡면 인터폴레이터

구태훈*(단국대학교 대학원 기계공학과), 지성철(단국대학교 기계공학과)

Real-Time Variable-Feedrate NURBS Surface Interpolator

T. Koo(Mech. Eng. Dept., Dankook Univ.) and S. Jee(Mech. Eng. Dept., Dankook Univ.)

ABSTRACT

This study presents a new type of real-time CNC interpolator that is capable of generating cutter paths for ball-end milling of NURBS surfaces. The proposed surface interpolator comprises real-time algorithms for cutter-contact (CC) path scheduling and CC path interpolation. Especially, in this study, a new interpolator module to regulate cutting forces is developed. This proposed algorithm utilizes variable-feedrate commands according to the curvature of machined surfaces. The proposed interpolator is evaluated and compared with the conventional method based on constant feedrates through computer simulation.

Key Words : CNC (컴퓨터수치제어), Machine Tool(공작기계), Contour Error (윤곽오차), Interpolator (보간기), Material Removal Rate (비절삭체적), Cutting Force (절삭력), NURBS (비균일 유리 B-스플라인)

1. 서론

컴퓨터 수치제어 공작기계(CNC) 산업분야는 제조업의 경쟁력을 좌우하는 자본재 산업 중 핵심적인 정밀 설비산업으로서, 독일, 일본을 위시한 선진국들도 국가의 기간산업으로 인식하고 첨단화를 통한 국가 경쟁력 제고를 위해 노력하고 있는 중요한 분야이다. 고부가가치의 정밀한 제품을 만들어내기 위해서는 절삭 프로세스를 포함한 공작기계 시스템의 고능률화, 고정밀화가 필수적이며, 이를 위해서는 고속화, 지능화, 초정밀화 등에 관련된 생산기술의 발전이 요구된다. 이에 관련하여 가공 시스템의 정밀도 향상을 위해 CNC 서보 제어기에 대한 지속적인 개발 노력이 기울여져 왔으며, 그 일환으로 정교한 인터폴레이터들이 개발되고 있다.

그러나 일반적으로 CNC 공작기계에서는 원하는 치수 및 형상이 G 코드라는 명령어 형식을 이용하여 표현되며, 이의 대부분은 직선, 원호와 같은 단순 운동에 대한 명령이다. 이를 이용하여 복잡한 가공물의 형상을 얻으려면 막대한 양의 G 코드가 필요하다. 또 그렇게 표현된 G 코드를 작업자가 해석하여 형상을 수정하기란 용이하지 않다. 이를 위해 CAD에서 정의된 곡면을 해석하여 가공경로를

자동으로 생성해주는 모듈, 즉 곡면 인터폴레이터에 대한 연구가 활발히 진행되어져 왔다.⁽¹⁻⁵⁾

본 연구에서는 매끄럽고, 표현의 자유가 강력한 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 곡면을 이용하여 곡면의 형상을 정의하고, CC(cutter-contact) 공구경로(tool-path)에 대한 기존의 인터폴레이터를 발전시켜 곡면의 형상에 따라 이송속도를 변화시키는 새로운 방법을 제시한다. NURBS로 표현된 곡선 및 곡면을 따라서 공구를 이송하는데 있어서, 기존의 off-line 인터폴레이터는 많은 문제점을 내포하고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 실시간 인터폴레이터라는 새로운 방식이 제시되었지만 기존의 실시간 인터폴레이터들은 CC 공구경로를 따라 등속 이송시키는데 초점이 맞춰져 있다. 다시 말해 이 방법은 공구 접촉점들의 간격을 일정하게 유지시키는 것이다. 그러나 가공물의 형상에 관계없이 등속가공을 한다는 것은 결과적으로 절삭력의 불균일로 귀착되어 표면조도에 악영향을 미칠 수 있다. 이를 개선하기 위하여 본 연구에서는 이송속도를 조정함으로써 국부의 비절삭체적(MRR: Material Removal Rate)을 일정하게 유지하여 결과적으로 가공의 마감시 공구에 걸리는 절삭력을 일정하게 하는 새로운 방식의 실시간 인터폴레이터를 제시한다. 이에 기

대되는 효과는 절삭력을 일정하게 구속할 수 있어 보다 매끄러운 가공면을 얻을 수 있다. 제시된 인터폴레이터를 적용하여 볼엔드 커터(ball-end cutter)를 이용한 3축 가공에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였다.

2. 곡면 인터폴레이터

2.1 곡면 가공을 위한 가공경로 생성

곡면 인터폴레이터의 주 기능은 가공면을 공구경로의 집합체로 재구성해내는 공구경로 계획(tool-path planning)이다. 즉, 각 공구경로마다 부분적인 곡면가공을 위한 연속적인 공구위치가 곡면 인터폴레이터에 의해 재구성된다. 그 중에서 CL(cutter-location) 경로는 공구의 볼노우즈(ball-nose)의 중심 부분이 지나는 공구경로를 지칭하고 CC(cutter-contact) 경로는 실제적으로 공구와 공작물이 접촉하는 경로를 나타낸다. 공구경로 방향은 곡선보간 알고리즘을 이용하여 생성해내는, 공구가 곡면을 가공하는 방향이고, 공구경로 간격(tool-path interval) 방향은 공구가 다음의 공구경로로 이동하는 방향을 의미한다.

2.2 NURBS 곡면 모델링

NURBS가 갖는 장점은 어떠한 임의의 곡선이나 곡면을 모델링 함에 있어서 NURBS 보다 자유롭고 강력한 스플라인(spline)은 없다는데 있다. NURBS 곡면은 곡면을 표현하는 곡선의 궤적에 있어 하나의 매개변수를 일정하게 유지하고 다른 하나를 변화시킴으로써 얻어질 수 있다. NURBS 곡면(S) 표현은 아래의 식(1)과 같이 u 와 v 두 변수에 대한 매개변수 식으로 정의된다. 이것은 모든 종류의 곡면 표현을 포용할 수 있는 식이다.⁽⁶⁾

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

2.3 곡면의 곡률

공구경로 및 공구경로 간격 방향에 있어서 곡면의 곡률은 매개변수 u 방향과 v 방향으로의 법선 곡률만을 필요로 한다.⁽⁷⁾ 식(1)의 곡면 함수 $S(u, v)$ 에 대해 공구경로 방향으로의 곡률반경을 식(2)와 같이 구할 수 있다. 결과적으로는 법선 벡터를 포함하고 공구경로 방향에 수직인 평면과 곡면이 만나서 생긴, 매개변수 u 방향에 대한 곡선의 곡률반

경을 이용하는 것이다. 마찬가지로 방법으로 매개변수 v 방향에 대한 곡률반경을 구할 수 있다.

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

3. 제시된 가변속 인터폴레이터

3.1 궤환 인터폴레이터

기존의 실시간 인터폴레이터에서는 곡면을 표현하는 매개변수 식에서 하나의 매개변수를 고정시키고 남은 하나의 매개변수를 운용하여 CNC의 움직임 보간한다. 즉, 곡면을 구성하는 매개변수 중 하나만을 이용하는 곡선 인터폴레이터의 운용이라고 할 수 있다. 식(1)과 같이 표현된 곡면을 구성하는 공구경로의 하나를 곡선 $C(u)$ 로 놓으면, $C(u)$ 의 매개변수 u 는 시간 t 에 대한 함수로 하여, Taylor 확장식으로서 아래와 같이 표현될 수 있다. 여기서, 3차 이하의 항은 매우 작으므로 무시된다.

$$u(t_{k+1}) = u(t_k) + \dot{u}(t_k) \cdot T + \frac{1}{2} \ddot{u}(t_k) \cdot T^2 \quad (3)$$

궤환 인터폴레이터에서⁽⁸⁾에서는 이 식을 간단한 차분식으로 표현하여 Fig. 2와 같은 속도보정 알고리즘을 이용, 현재의 이송속도 V_k 를 계산하고 차분식으로부터 생성된 매개변수를 보완한다.

$$u_{k+1}^{new} = \alpha \cdot u_{k+1}^{old} + (1 - \alpha) u_k \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{V}{V_k} \quad (5)$$

요구되는 기준 이송속도 V 에 비해 인터폴레이터에서 계산되어 나오는 속도 V_k 값이 속도 허용오차 이내에 들지 못한다면 식(4)와 (5)를 이용하여 다음 공구위치에 대한 매개변수 u_{k+1} 의 값을 보상한다. 이러한 구조를 갖는 궤환 인터폴레이터의 장점은 복잡하게 전개되는 식(3)을 간단한 차분식으로써 표현하여 몇번의 궤환 과정을 통해 원하는 값을 얻을 수 있다는 점, 그리고 보간 도중 NURBS와 같이 함수의 식이 바뀌는 시스템에서도 적용이 용이하다는 점이다.

3.2 이송속도 생성기

기존에 제시된 실시간 곡면 인터폴레이터들은 CC 경로에 대한 이송속도를 일정하게 유지시키는

공통점이 있다. 이 방법들은 곡면의 요철부분의 이송에 있어서 곡면의 형태에 따라 MRR이 변화되기 때문에 이에 상응하여 절삭력 역시 불균일하게 된다. Tlustý⁽⁹⁾는 이러한 MRR과 공구에 걸리는 절삭력의 비례관계를 밝힌 바가 있으며, 불규칙한 절삭력은 표면 조도에 대한 악영향으로 귀착된다.

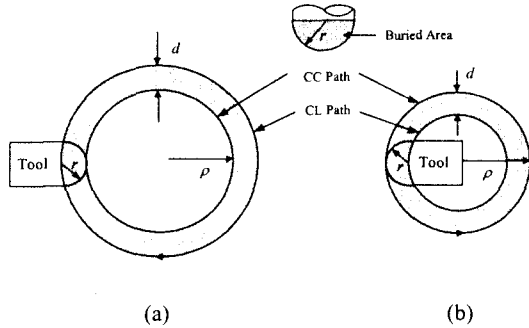


Fig. 1 Circular volume removed (shaded regions) by a tool of radius d on a circular path of same radius ρ

본 연구에서 제시된 가변속 인터폴레이터 중 이송속도 생성기(feedrate generator)에서는 공구의 경로가 요철과 같은 형상을 포함하게 될 때 이것이 가지는 곡률반경을 계산하여 요철부분 가공시의 MRR이 평면 가공의 경우와 같은 값을 가질 수 있도록 속도를 변속한다. Fig. 1과 같이 곡률반경이 ρ 로서 같고 CC 경로를 지나는 이송속도가 각각 일정할 때, 곡면이 오목한 경우의 절삭과 볼록한 경우의 절삭에 있어서 절삭체적이 각각 다르게 된다.⁽¹⁰⁾ 그러므로 각 경우에 대한 MRR이 같도록 구속하기 위해서 평면 절삭의 MRR을 각각 오목한 곡면의 경우와 볼록한 곡면의 경우에 대한 MRR과 등가로 놓고 정리하여 식(6)을 얻는다. 여기서, V_0 는 CC 경로를 지나는 평면 가공에서의 기준 이송속도이다.

$$V_r = \frac{V_0}{1 + \frac{2r-d}{2\rho}} \quad (6)$$

공구의 절삭깊이 d 와 공구반경 r 은 상수이므로 식(6)은 곡면의 곡률반경에 대한 함수가 된다. 여기서 곡률반경 ρ 는 3차원 곡률반경이기 때문에 부호를 갖는다. 즉, 곡면이 볼록한 경우 (+) 기호를, 오목한 경우 (-) 기호를 갖는다.

식(6)과 같이 생성된 이송속도를 만족시킬 공구 위치의 좌표값을 매개변수의 함수식에서 계산해내며, 이는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 즉, 기준 속도

V_0 를 정해 놓고 곡면의 곡률반경 ρ 를 실시간으로 취하면 이를 바탕으로 이송속도 생성기에서 일정한 MRR을 유지시키며 기동할 수 있는 이송속도 V_r 을 생성한다. 그러면, 제한 인터폴레이터는 생성된 이송속도를 만족시킬 매개변수 u 를 계산하여 각 축 방향의 기준위치들을 생성해서 출력한다.

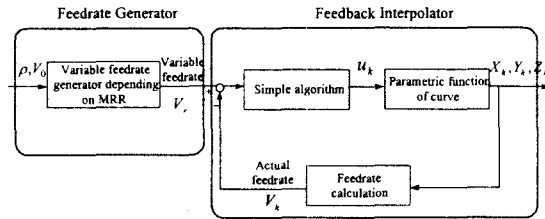


Fig. 2 Proposed variable-feedrate interpolator

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 제시된 인터폴레이터를 검증하기 위하여 Visual C++를 기반으로 한 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 작성하여, 3축 CNC 밀링머신에서의 볼랜드 커터를 이용한 곡면 가공에 대해 기존의 곡면 인터폴레이터와 가변속 인터폴레이터를 비교하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 쓰인 설정들은 실제 시스템과 비견하여 설정되었으며, 또한 시뮬레이션에서의 화면처리 및 애니메이션을 위해 OpenGL 그래픽 라이브러리를 이용하였다.

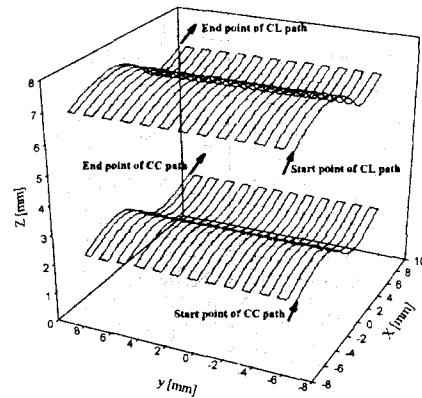


Fig. 3 Planned CC and CL paths of a NURBS surface

Fig. 3은 본 시뮬레이션에 이용된 NURBS 곡면과 이를 지나는 CC 및 CL 경로를 나타낸 것이다. 공구반경은 5 mm로 하였으며 scallop의 높이는 0.01 mm로 제한하였다. 샘플링 주기는 0.01 sec로 설정하였다. 또한 CC 경로를 따라 움직이는 기준 이송속

도를 2 m/min(33.3 mm/sec)으로 설정하였다. Fig. 3의 곡면에 대한 등속 인터폴레이터와 가변속 인터폴레이터의 이송속도 및 절삭력 결과를 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 비교하였다. Fig. 4의 이송속도 출력결과로부터 가변속 인터폴레이터는 곡률 변화에 따라 이송속도를 조절함을 확인할 수 있다. Fig. 5는 볼엔드 커터로 절삭되는 피삭재의 양에 단위 체적당 걸리는 힘을 곱한 절삭력 모델을 이용하여 출력한 값을 나타낸다. 이 결과는 기존의 등속 인터폴레이터에 비해 가변속 인터폴레이터를 적용하면 가공 중의 절삭력이 효과적으로 구속될 수 있음을 보여준다.

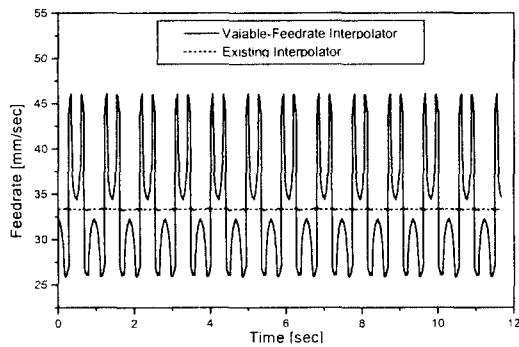


Fig. 4 Comparison of cutter-contacted feedrate of the existing and proposed interpolators

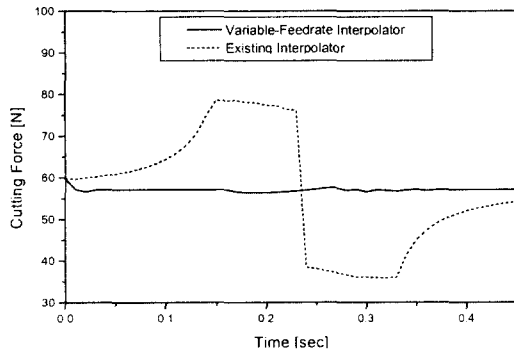


Fig. 5 Comparison of cutting force of the existing and proposed interpolators on the first tool-path

5. 결론

본 논문에서는 3 차원 CNC 가공에 있어 절삭효과를 고려한 보다 정밀하고 지능적인 보간을 위해 기존의 등속 지향적인 방법을 탈피하여 공작물의 곡면 형상에 따라 이송속도를 조정하는 새로운 형태의 실시간 가변속 인터폴레이터를 제시하였다.

평면 절삭의 경우에는 변속하지 않으나, 곡면 절삭의 경우 가변속 인터폴레이터는 절삭면의 곡률이 양의 값을 갖는 볼록한 곡면에 대해서 감속을

하며, 곡률이 음의 값을 갖는 오목한 절삭면에 대해 가속을 한다. 그 결과 가공 마감의 조건에서 국부의 MRR이 일정하게 구속되어 균일한 절삭력 출력을 얻을 수 있으므로, 볼엔드 커터를 이용한 3차원 윤곽의 절삭에서 보다 매끈한 가공면을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서 제시된 가변속 NURBS 곡면 인터폴레이터의 절삭력 제어 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 기존의 곡면 인터폴레이터와 비교 검증하였다.

참고문헌

1. M. Shpitalni, Y. Koren, and C. C. Lo, "Real-Time Curve Interpolators," *Computer-Aided Design*, Vol. 26(11), pp. 832-838, 1994.
2. C. C. Lo, "CNC Machining Tool Surface Interpolator for Ball-End Milling of Free-Form Surfaces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, pp. 307-326, 2000.
3. R. S. Lin, "Real-Time Surface Interpolator for 3D Parametric Surface Machining on 3-Axis Machine Tools," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, pp. 1513-1526, 2000.
4. R. S. Lin, and Y. Koren, "Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 118, pp. 20-28, 1996.
5. J. J. Chou and D. C. H. Yang, "Command Generation for Three-Axis CNC Machining," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 305-310, 1991.
6. L. Piegl, and W. Tiller, *The NURBS Book*, Springer, 1995.
7. I. D. Faux and M. J. Pratt, *Computational Geometry for Design and Manufacture*, Ellis Horwood, 1981.
8. C. C. Lo, "Feedback Interpolators for CNC Machine Tools," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 587-592, 1997.
9. J. Tlustý and S. Smith, "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 111-169, 1991.
10. R. T. Farouki et al., "Variable-feedrate CNC Interpolators for Constant Material Removal Rates Along Pythagorean-hodograph Curves," *Computer-Aided Design*, Vol. 30(8), pp. 631-640, 1998.