1888 대한기계학회논문집 A 권, 제 26 권 제 9 호, pp. 1888~1896, 2002

볼엔드 밀링에서의 일정 절삭력을 위한 NURBS 곡면 인터폴레이터

지 성 철† · 구 태 훈*

(2002 년 2 월 1 일 접수, 2002 년 7 월 4 일 심사완료)

NURBS Surface Interpolator for Constant Cutting Forces in Ball-End Milling

Sungchul Jee and Taehoon Koo

Key Words : CNC(컴퓨터 수치제어), Interpolator(인터폴레이터), NURBS(비균일 유리 B-스플라인), Feedrate(이송속도), Material Removal Rate(MRR: 비절삭체적), Cutting Force(절삭력)

Abstract

This study presents a new type of 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 along the CC path according to the curvature of machined surfaces during the interpolation process. Additionally, it proposes an OpenGL graphic library for computer graphics and animation of interpolated tool-position display. The proposed interpolator is evaluated and compared with the existing method based on constant feedrates through computer simulations.

1. 서 론

현대에 들어 기계부품을 설계하고 가공함에 있어서 CAD/CAM 분야는 절대적인 위치를 구축하고 있다. CAD/CAM 분야에서 실제적으로 부품을 가공하는 부분을 담당하는 수치제어 공작기계는 설계자가 원하는 치수 및 형상을 G 코드라는 명령어 형식을 이용하여 표현한다. NC 프로그램에서는 가공품질과 생산성을 고려하는 CAPP(Computer Aided Process Planning) 과정을 통하여 생성된 G 코드로 가공에 필요한 NC 데이터를 구성한다.[1,2] 기존의 G 코드는 절삭경로를 직선 또는 원호의 조각(segment)으로 분해하여 근사적으로 정의한다. 그러나 이러한 방법으로 복잡한 가공물의 곡면 형상을 얻으려면 막대한 양의 G 코드가 필요한 것이 현실이고, 그렇게 표현된 G 코드를 작업자가 해석하여 형상을 수정하기가 매우 어렵다. 이를 위해 CAD에서 정의된 곡면을 곡선 단위로 해석하거나[3~8] 곡면 단위로 해석하여[9~12] 가공경로를 자동으로 생성해주는 모듈(module), 즉 곡선 및 곡면 인터폴레이터에 대한 연구가 활발히 진행되어져 왔다.

본 연구에서는 매끄럽고, 표현이 자유로운 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 곡면을 이용하여 곡면의 형상을 정의하고, 곡면의 형상에 따라 공구접촉 경로(cutter contact path)상의 이송속도를 가변시키는 새로운 방식의 곡면 인터폴레이터를 제시한다. NURBS 가 갖는 장점은 우선 형상의 정의가 간편하고, 조정점(control point)의 이동에 따른 형상의 변화가 조정점 부근에서만 국부적으로 작용한다는 점이다. 그리고 절점 벡터(knot vector), 조정점(control point), 가중치(weight)의 조정으로써 가공면의 형상을 자유롭게 그리고 아주 매끄러운 곡선 및 곡면을 얻을 수 있다는 데 있다. 이러한 NURBS 를 CNC 에서

† 책임저자, 회원, 단국대학교 기계공학과
E-mail : scjee@dku.edu
TEL : (02)709-2911 FAX : (02)709-2569
* 단국대학교 대학원 기계공학과

이용하기 위하여 현재 NURBS 곡선 보간 알고리듬에 대한 연구가 이루어지고 있다.[3,4]

NURBS로 표현된 곡면을 따라 공구를 이송하는데 있어서, 기존의 오프 라인(off-line) 인터폴레이터는 많은 문제점을 내포하고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 실시간(real-time) 인터폴레이터가 새로이 제시되었지만 기존의 실시간 인터폴레이터들은 공구접촉 경로를 따라 등속 이송시키는데 초점이 맞춰져 있다. 다시 말해 이 방법은 공구 접촉점들 사이의 보간 간격을 일정하게 유지시키는 것이다. 그러나 가공면의 굴곡이 있는 경우 공구접촉 경로에 대해 등속 가공을 하면 공구경로(tool path)에 대한 이송속도에 변동이 생기고 절삭력이 불균일하게 되어 표면조도에 악영향을 미칠 수 있다. Farouki 등[8]은 이를 개선하기 위해 2차원 곡선의 보간에 실시간 이송속도 조정 방법을 제안하여 실험적으로 검증한 바 있다. 본 연구에서는 공구접촉 경로상의 이송속도를 가변시켜 공구경로상의 이송속도 및 국부의 비절삭체적(MRR: Material Removal Rate)을 일정하게 유지하여 결과적으로 가공의 마감시 공구에 걸리는 절삭력을 일정하게 하는 새로운 방식의 NURBS 곡면 인터폴레이터를 제시한다.

기존의 일정 절삭력 유지를 위한 방법으로는 가공시 절삭력을 측정 또는 추정하여 이를 반영하는 방법[13]과 NC 프로그램을 이용하여 절삭력을 예측하고 이송속도를 변경하는 방법이 있다.[1,14] 본 논문에서 제시된 방법은 절삭력의 변화가 주로 절삭체적에 기인하는 경우에 효과적이고 기존의 연구들과 비교하여 절삭력 예측모델에 있어 그 정확도가 떨어질 수 있다. 그러나, 하위의 시스템 소프트웨어인 인터폴레이터 수준에서 실시간의 절삭력 조정과 곡면처리 알고리듬을 실행함으로써 기존의 연구에서 쓰인 정교하고 복잡한 절삭력 해석과 막대한 양의 NC 데이터를 지양하고 공구경로의 기하학적 정보에 기초하는 간단한 이송속도 조정식을 이용하여 실시간 보간시에 효율적으로 반영될 수 있도록 한 것에 제시된 방법의 이점이 있다.

제시된 인터폴레이터는 절삭력을 일정하게 구속할 수 있어 보다 매끄러운 가공면의 생성을 기대할 수 있다. 제시된 인터폴레이터는 볼엔드(ball-end) 커터를 이용한 3 축 가공에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제시된 인터폴레이터의 성능을 기존의 방법과 비교 검증하였다.

2. 3 차원 곡면 인터폴레이터

2.1 곡면가공을 위한 공구경로 생성

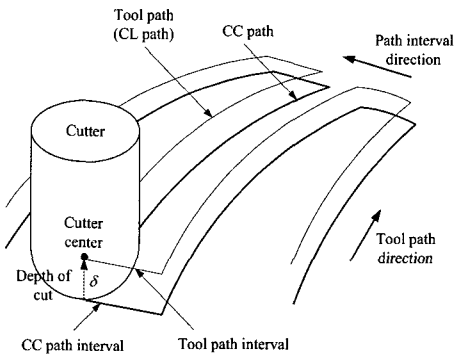

Fig. 1 Tool path planning in surface machining

3 축 곡면 인터폴레이터의 주 기능은 가공면을 공구경로의 집합체로 재구성해 내는 공구경로 계획(tool path planning)이다. 즉, 각각의 공구경로마다 부분적인 곡면가공을 위한 연속적인 공구위치를 곡면 인터폴레이터에 의해 재구성해내야 한다. 이 작업을 Fig. 1 에 도시하였다. CL(cutter location) 경로는 Fig. 1 에서와 같이 공구의 볼노우즈(ball-nose) 부분의 중심이 지나는 공구경로를 지칭하고, CC(cutter contact) 경로는 공구와 공작물이 실제로 접촉하는 공구접촉 경로를 나타낸다. 공구경로 방향(tool path direction)은 여러 가지 곡선보간 알고리듬을 이용하여 생성해 내는, 공구가 곡면을 가공하는 방향이고 공구경로 간격 방향(tool path interval direction)은 공구가 다음의 공구경로로 이동하는 방향을 의미한다.

기존의 3 축 CNC 인터폴레이터에서는 APT(Automatically Programmed Tools)에 근거를 둔 방법, 카테시안 공구경로 계획 방법(Cartesian tool path planning method)과 매개변수적 방법(parametric tool path planning)이 이용되며, 현재 대부분의 3 차원 인터폴레이터들은 매개변수적 방법을 쓰고 있다.

2.2 NURBS 곡면 모델링

NURBS가 갖는 장점은 어떠한 임의의 곡선이나 곡면을 모델링 하는데 있어서 NURBS보다 자유롭고 강력한 스플라인은 없다는 데 있다. NURBS 곡선은 다양한 불규칙 곡선뿐만 아니라 점이나 직선, 꺾인 선, 원, 타원 등 규칙적인 곡선까지도 표시할 수 있기 때문이다.

NURBS 곡면은 곡면을 표현하는 곡선의 궤적에 있어 하나의 매개변수를 일정하게 유지하고 다른 하나를 변화시킴으로써 얻어질 수 있다. NURBS 곡면표현은 아래의 식 (1)과 같이 u 와 v 두 변수

에 대한 매개변수 식으로 정의된다. 이것은 모든 종류의 곡면 표현을 포용할 수 있는 식이다.[9]

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

2.3 곡면의 곡률

공구경로 및 공구경로 간격 방향에 있어서의 곡면의 곡률반경은 매개변수 u 방향과 v 방향으로의 법선 곡률반경만을 필요로 한다.[10] 아래의 식 (2)에서 ρ 는 식 (1)로 표현되는 곡면 $S(u,v)$ 의 곡률반경을 나타낸다.

$$\rho=\frac{\dot{w}^T G\dot{w}}{\dot{w}^T D\dot{w}} \tag{2}$$

여기서 $\dot{w}=[\dot{u}\quad \dot{v}]^T$ 이고

$$G=\begin{bmatrix}\frac{\partial S}{\partial u}\cdot\frac{\partial S}{\partial u} & \frac{\partial S}{\partial u}\cdot\frac{\partial S}{\partial v}\\ \frac{\partial S}{\partial v}\cdot\frac{\partial S}{\partial u} & \frac{\partial S}{\partial v}\cdot\frac{\partial S}{\partial v}\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$D=\begin{bmatrix}n\cdot\frac{\partial^2 S}{\partial u^2} & n\cdot\frac{\partial^2 S}{\partial u\partial v}\\ n\cdot\frac{\partial^2 S}{\partial u\partial v} & n\cdot\frac{\partial^2 S}{\partial v^2}\end{bmatrix} \tag{4}$$

이며, n 은 곡면의 단위 법선벡터이다. 또한 식 (5)의 곡면의 접선벡터와 공구경로 방향 벡터와의 내적은 0 이므로 식 (6)이 성립한다.

$$\dot{S}=\frac{\partial S}{\partial u}\dot{u}+\frac{\partial S}{\partial v}\dot{v} \tag{5}$$

$$\frac{\partial S}{\partial u}\cdot\left(\frac{\partial S}{\partial u}\dot{u}+\frac{\partial S}{\partial v}\dot{v}\right)=0 \tag{6}$$

식 (6)을 정리하면 식 (7)이 얻어지며

$$\frac{\dot{u}}{\dot{v}}=-\frac{\frac{\partial S}{\partial u}\cdot\frac{\partial S}{\partial v}}{\frac{\partial S}{\partial u}\cdot\frac{\partial S}{\partial u}} \tag{7}$$

식 (3)과 식 (4) 그리고 식 (7)을 식 (2)에 대입하면 곡면의 곡률반경 ρ 가 식 (8)과 같이 구해진다.

$$\rho(u)=\frac{\left|\frac{\partial S}{\partial u}\right|^4}{\frac{\partial S}{\partial u}\times\frac{\partial^2 S}{\partial u\partial u}\times\frac{\partial S}{\partial u}} \tag{8}$$

결과적으로는 법선벡터 n 을 포함하고 매개변수 u 방향에 수직인 평면과 곡면이 만나서 생긴, 매개변수 곡선의 곡률반경을 이용하는 것이다. 마찬가지로 방법으로 매개변수 v 방향에 대한 곡률반경을 구할 수 있다.

2.4 공구경로 보간 방식

계획된 공구경로를 보간함에 있어 기존 인터폴레이터들의 방식을 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫번째는 기준 곡면을 분해하는 공구경로를 매개변수 식으로 하여 보간하는 방법이다.[5,7,9,11] 즉, 곡면을 표현하는 매개변수 식에서 하나의 매개변수를 고정시키고 다른 하나의 매개변수를 운용하여 CNC의 움직임을 보간한다. 식 (1)과 같이 표현된 곡면을 구성하는 공구경로의 하나를 곡선 $C(u)$ 로 놓자. 기존의 인터폴레이터는 곡선 $C(u)$ 의 매개변수 u 를 시간 t 에 대한 함수로 하여, u 에 대한 함수의 Taylor 확장식으로서 아래와 같이 표현한다. 3 차 이상의 항은 매우 작으므로 무시된다.

$$u(t_{k+1})=u(t_k)+\dot{u}(t_k)\cdot T+\frac{1}{2}\ddot{u}(t_k)\cdot T^2 \tag{9}$$

여기서 k 는 시간단계, T 는 샘플주기이다.

첫번째 방식이 식 (9)와 같은 복잡한 계산식을 필요로 하는 반면에, 두번째 방식은 이를 단순한 식으로 표현하는 대신 수치적인 방법을 이용하는 것이다.[6,10] 예를 들어 궤환 인터폴레이터[6]에서는 식 (9)를 아래의 간단한 차분식으로 근사시킨다. 여기서 $u_k\equiv u(t_k)$ 이다.

$$u_{k+1}=2.5u_k-2u_{k-1}+0.5u_{k-2} \tag{10}$$

Fig. 2와 같은 속도보정 알고리듬을 이용하여, 현시간단계의 속도 V_k 를 계산하고 식 (10)으로부터 생성된 매개변수를 보완한다. 이는 다음의 식들로 표현된다.

$$u_{k+1}^{new}=\alpha\cdot u_{k+1}^{old}+(1-\alpha)u_k \tag{11}$$

$$\alpha=\frac{V_c}{V_k} \tag{12}$$

기준 이송속도 V_c 과 비교하여 인터폴레이터에서

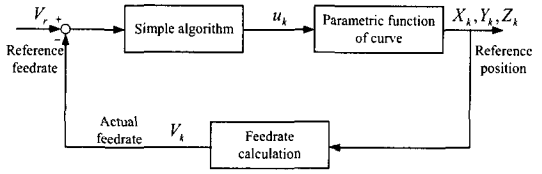

Fig. 2 Feedback interpolator

계산된 공구위치 결과로부터 얻어지는 속도 V_k 값이 속도 허용오차 이내에 들 때까지 몇 번의 궤환 과정을 통해 다음 공구위치에 대한 매개변수 u_{k+1} 값이 식 (11)에 의해 계속적으로 보정된다.

위의 두 방식 모두 기준 곡면에 대한 CC 경로상에서 일정한 이송속도를 얻기 위한 것이나, NURBS, Bézier 등과 같이 보간 도중 매개변수 값에 따라 구성 곡선의 함수식이 달라지는 경우에는 약간의 차이가 있다. 즉, 첫번째 방식은 보간점의 위치에 따라 기준 곡면의 함수식에 대한 편미방을 재계산해 주어야 하지만, 두번째의 방식은 기준 곡면을 구성하는 식이 어떠하든 원하는 이송속도에 해당하는 보간점을 구할 때까지 반복적인 계산을 한다. 두번째 방식은 기준 곡면의 함수 형태에 영향을 덜 받으므로 NURBS와 같이 보간점에 따라 함수식이 바뀌는 시스템에서도 적용이 용이하며, 첫번째 방식에 비해 CC 경로상의 이송속도 오차를 상대적으로 작게 할 수 있다.

3. 제시된 가변속 인터폴레이터

3.1 기존 인터폴레이터와 절삭력

앞서 언급한 바와 같이 기존의 실시간 곡선 또는 곡면 인터폴레이터를 구현하는 방법들은 CC 경로에 대해 일정 속도를 지향한다. 그 이유는 실시간 곡면 인터폴레이터는 CAD/CAM에서 표현된 곡면식과 같은 데이터를 바탕으로 공구경로를 재구성하게 되는데, 그 기준면을 주로 CC 곡면에 두기 때문이다. 이는 CC 경로를 바탕으로, 아래의 식 (13)으로 표현되는 CL 곡면 S_{CL} 상의 CL 경로를 생성하면 공구의 접촉점을 바탕으로 보간점을 생성해내기 때문에 가공면의 형상을 제어하기 용이한 경향이 있다.

$$S_{CL} = S(u,v) + rn(u,v) \tag{13}$$

여기서 r 은 공구반경이며, $n(u,v)$ 는 CC 곡면 $S(u,v)$ 상의 out-normal 벡터이다.

이와 관련하여 가공면의 정도를 평가하는 방법으로서 식 (14)의 CC 경로에 대한 chord 높이오차 (chord height error)(Fig. 3 참조)가 이용된다.

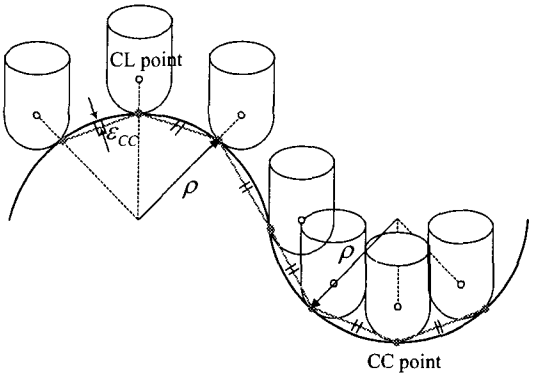

Fig. 3 Interpolation scheme with a constant feedrate along the CC path

$$\varepsilon_{CC} = \frac{(V_r T)^2}{8\rho} \tag{14}$$

여기서, ρ 는 곡면의 순간 곡률반경이다. 이는 곡선을 작은 직선선분으로 쪼개어 나타낼 때 생기는 chord 높이오차를, CNC 인터폴레이터의 윤곽오차로 이용하는 것이다.

기존의 인터폴레이터들은 chord 높이오차의 값을 일정하게 하거나 CC 경로에 대한 이송속도를 일정하게 유지시키는 방법을 취하여 왔다. Fig. 3의 예는 동일한 곡률의 굴곡을 갖는 CC 경로상의 이송속도를 일정하게 구속시킨 경우를 나타낸 것이다. 그림에서 CC 경로에 대한 이송속도가 일정하더라도 CL 경로에 대한 이송속도는 그렇지 않음을 알 수 있다. 따라서 피삭되는 곡면의 형태에 따라 단위 시간당 절삭되는 체적(비절삭체적) 역시 차이가 생길 수 있음을 예상할 수 있다. 비절삭체적의 불균일은 절삭력의 불균일과 직결되는데, Tlusty[17]는 비절삭체적과 평균 절삭력(average rigid force) F_c 사이의 비례관계를 식 (15)와 같이 밝힌 바가 있다. 불균일한 절삭력은 표면 조도에 악영향을 끼치는 요인이 될 수 있다.

$$F_c = P_{sp}(MRR)/V_s \tag{15}$$

여기서 P_{sp} 는 비절삭동력(specific power)이고, V_s 는 주축의 절삭속도를 나타낸다.

3.2 제시된 가변속 인터폴레이터 알고리듬

본 연구에서 제시된 가변속 인터폴레이터는 3축 CNC 가공의 마감시 공구경로가 요철과 같은 형상을 포함하게 될 때 가공면의 곡률에 따라 절삭력이 일정할 수 있도록 CC 경로상의 이송속도

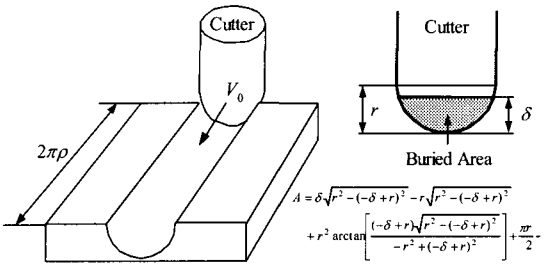

Fig. 4 Cutting length and buried area of a cutter during the finish cut

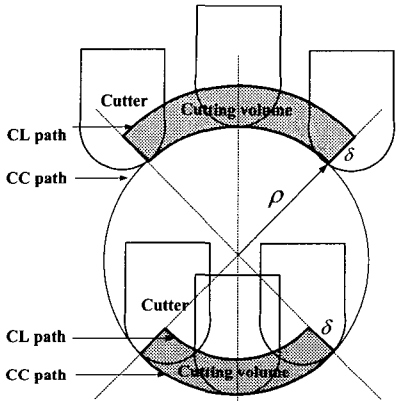

Fig. 5 Cutting volume on an outer and inner surface of a sphere along the great circle path

를 변속한다. Fig. 4 와 같이 평면에 대한 절삭길이를 $2\pi\rho$ 로 놓고 절삭깊이 δ 로 인한 절삭 단면적을 A 라 하면 평면 절삭에 대한 절삭체적은 식 (16)과 같이 쓸 수 있다.

$$Volume_{flat} = 2\pi\rho A \tag{16}$$

반면에 굴곡을 갖는 곡면에 대해서는 Fig. 5 와 같이 동일 곡률반경 위의 동일한 CC 경로 길이를 취하여 이송한다 하더라도 각기 다른 절삭체적을 갖게 된다. 즉, 곡률반경 ρ 를 갖는 구의 대원(great circle)의 외부면과 내부면을 한바퀴 회전하여 가공한다면 절삭체적은 각각 식 (17)과 (18)로 나타낼 수 있다.

$$Volume_{convex} = \pi(2\rho+\delta)A \tag{17}$$

$$Volume_{concave} = \pi(2\rho-\delta)A \tag{18}$$

곡면이 볼록한 경우와 오목한 경우에 대한 비절

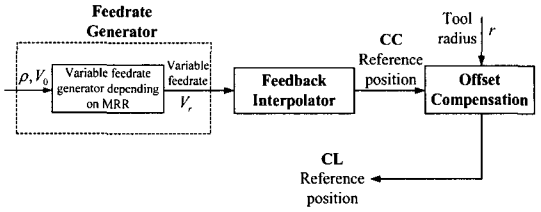

Fig. 6 The proposed interpolator for constant cutting forces

삭체적이 같도록 구속하기 위해, 평면 절삭의 비절삭체적을 위의 두 경우에 대한 비절삭체적과 각각 등가로 놓는다. 위 곡면의 경우 CC 경로상의 이송속도를 V_r 이라 하면 절삭시간은 $2\pi\rho/V_r$ 이고 평면의 경우 절삭시간은 $2\pi\rho/V_0$ 이므로, 각각의 비절삭체적을 같게 놓으면 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$V_r = \frac{V_0}{1+\delta/(2\rho)} \tag{19}$$

이송속도 V_0 와 공구의 절삭깊이 δ 는 상수이므로 식 (19)의 이송속도는 곡면의 곡률반경의 함수이다. 여기서 ρ 는 3차원 곡률반경으로서 곡면이 볼록한 경우 (+)기호를, 오목한 경우 (-)기호를 갖는다. 식 (19)와 같이 이송속도의 조정이 끝났다면 생성된 이송속도를 만족시킬 다음 공구위치를 식 (10)~(12)로부터 계산해 낸다. 본 논문에서 제시된 가변속 인터폴레이터의 구조를 Fig. 6에 도시하였으며, 그 알고리듬을 정리하면 다음과 같다.

(i) 주어진 기준 이송속도 V_0 를 취하고, 곡면의 순간 곡률반경 ρ 를 실시간으로 구한다.

(ii) 곡률반경 ρ 를 바탕으로 이송속도 생성기(feedrate generator)에서 일정한 비절삭체적을 유지시키며 기동할 수 있도록 이송속도 V_r 을 생성한다.

(iii) 궤환 인터폴레이터는 생성된 이송속도 V_r 을 만족시킬 매개변수 u 를 계산하여 CC 경로상의 각 축 방향의 기준위치를 생성한다.

(iv) CC 경로의 기준위치 값을 바탕으로, 공구반경 r 과 곡면의 순간 법선벡터를 이용하여 CL 경로상의 공구중심에 대한 기준위치를 계산하여 출력한다.

끝으로 공구의 절삭 단면적은 매 샘플주기마다 변화하므로 본 논문의 인터폴레이터를 사용하기 위해서는 등 스캘럽(iso-scallop) 방식의 공구경로

간격 방향 조정이 필요하다. 공구경로 간격의 스캘럽을 일정하게 유지하기 위해 여러 가지 방법이 제시되었다. 본 연구에서는 일정한 스캘럽의 형성을 위해 각 공구경로의 끝부분에서 스캘럽 높이의 제한 조건을 만족하는 최대 공구경로 간격을 계산하고 이 간격을 각 공구경로에 대해 일정하게 유지하는 방법[18]을 적용하였다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 제시된 인터폴레이터를 검증하기 위하여 Visual C++를 기반으로 한 컴퓨터 시뮬레이터를 구축하여, 3축 CNC 밀링머신에서의 볼엔드 커터를 이용한 곡면 가공에 대해 기존의 등속 인터폴레이터와 재시된 가변속 인터폴레이터를 비교하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에서 쓰인 파라미터들은 실제 시스템과 비견하여 설정되었으며, 시뮬레이션에서의 화면처리 및 애니메이션을 위해 OpenGL 그래픽 라이브러리를 이용하였다.

본 논문에서 곡면 가공은 황삭가공을 거쳐 절삭깊이 4 mm만을 남긴 상태에서의 정삭가공을 가정한다. 첫번째의 공구경로는 Fig. 4 와 같은 슬롯 절삭을 이루고 그 이후로는 스캘럽 높이를 제한하여 절삭 단면적의 일부분이 바로 전의 공구경로와 겹치는 윤곽가공이 이루어진다. 따라서 이러한 절삭 단면적의 변화를 계산하여 시뮬레이션 결과에 반영하였다. 시뮬레이션에서 공구중심의 반지름은 5 mm로 하였으며, 절삭깊이는 4 mm로 일정하다고 가정하였다. 스캘럽의 높이는 0.01 mm로 제한하였고, 기준 이송속도는 2 m/min로 설정하였다. 시스템의 BLU(basic-length unit)는 0.3 μm로 하였으며, 제어 루프의 샘플주기는 10 ms로 설정하였다. 식 (15)의 비절삭동력은 10000 N/mm^{2}으로 고정시켰다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 3차의 6×6 조정점들로 형성된 NURBS 평면과 곡면상의 CC 및 CL 경로를 개략적으로 나타낸 것이다. 실제 곡면 인터폴레이터의 운용에서는 스캘럽의 크기를 일정하게 유지시키는 알고리듬을 포함하기 때문에 공구경로 간격들이 매우 촘촘하여 공구경로를 분간하기 어려운 관계로 그들 중 일부의 경로만을 표시하였다.

Fig. 8의 평면에 대한 이송속도 출력을 Fig. 10 에 나타내었는데, 기존의 매개변수 곡선(parametric curve) 인터폴레이터와 궤환 인터폴레이터 그리고 제시된 인터폴레이터의 이송속도 값을 비교하였다. 평면의 경우 CC 및 CL 경로상의 이송속도는 일치한다. 2.4절에서 언급한 바와 같이 매개변수 곡선 인터폴레이터가 보다 큰 CC 경로상의 이송속도 오차를 수반함을 알 수 있다. 나머지 두 방법은 동일하게 궤환 인터폴레이터를 사용하므로 이

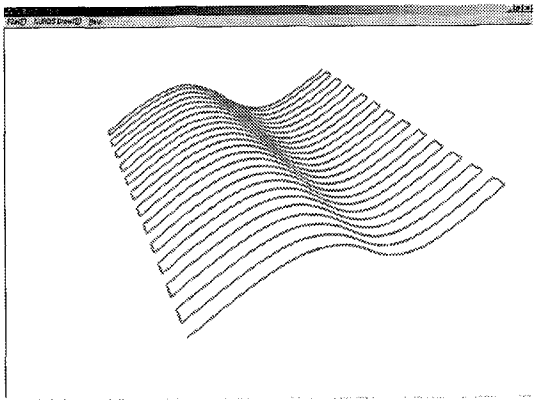

Fig. 7 The OpenGL simulator

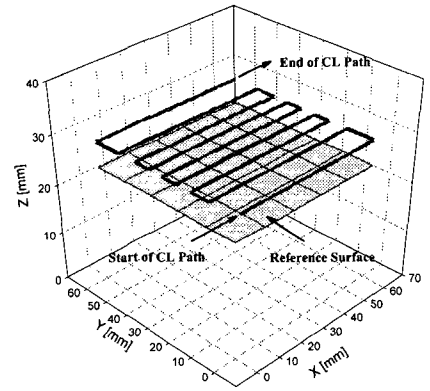

Fig. 8 Planned tool-path of a 3D NURBS plain surface

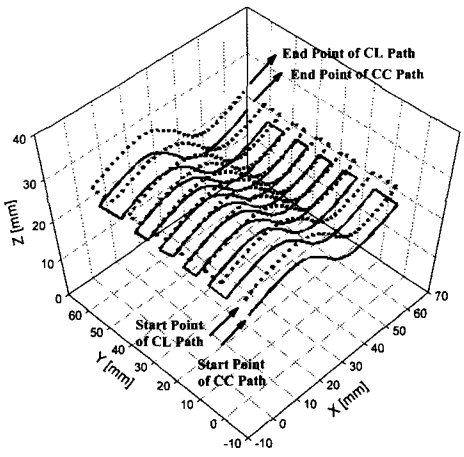

Fig. 9 Planned tool-path of a 3D NURBS curved surface

송속도 값이 거의 일정한 상태로 정확히 일치한다 이 경우는 이송속도 허용오차($1-\alpha$)를 ±0.5%로 제한한 것이다.

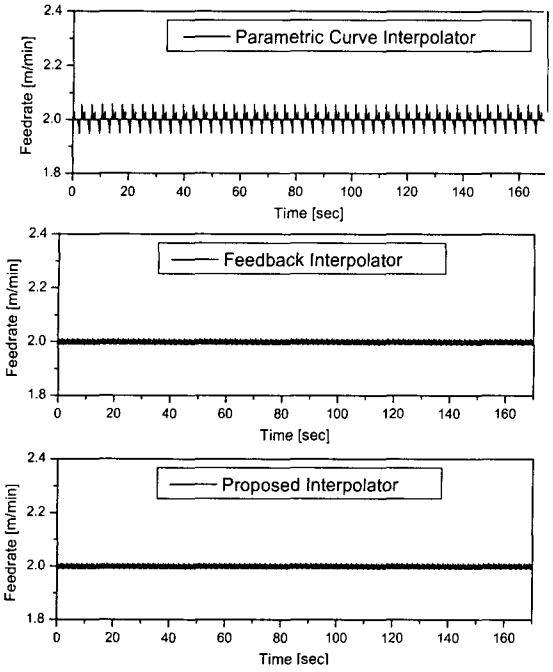

Fig. 10 Comparison of feedrates for the plain surface

Fig. 9 의 곡면에 대한 이송속도와 윤곽오차를 Fig. 11~13에 비교하였다. 이하의 결과에서, 제시된 인터폴레이터와의 비교 대상으로 언급한 '기존 인터폴레이터(existing interpolator)'는 이송속도 계산이 보다 정확한 수치적 방법의 궤환 인터폴레이터를 지칭한다. Fig. 11 의 결과로부터 제시된 인터폴레이터의 CC 경로에 대한 이송속도가 곡면의 곡률에 따라 변속됨을 확인할 수 있다. Fig. 12는 CL 경로상의 이송속도 출력을 비교한 것이다. 제시된 방법이 기존의 방법에 비해 이송속도 변동이 현저하게 작음을 알 수 있다. 일반적으로 이송속도(feedrate)로 정의되는 CL 이송속도는 공구의 접촉점이 아닌 이송 테이블의 관점에서의 속도를 나타낸다. 그러므로 실제의 가공조건에서는, 불확실한 공구 접촉점의 속도보다는 제어가 가능한 공구중심의 CL 이송속도가 더 의미 있다고 볼 수 있다. Fig. 13 에 보인 윤곽오차는 식 (15)를 근거로 계산된 값으로 두 경우 큰 차이가 없음을 볼 수 있다. 샘플주기를 감소시키면 윤곽오차는 시스템의 BLU 이하로 줄어들게 된다.

끝으로 Fig. 14는 제시된 인터폴레이터를 이용한 가공이 처음 시작될 때 최초의 단일 공구경로에 대한(즉, 슬롯 절삭이 일어날 때의) 절삭력 계산 결과를 비교한 것이다. 본 곡면과 같은 예에서는 곡면의 형태상 각 공구경로의 결과값이 첫번째 공구경로에 대한 결과와 비교해 크기에는 차이가 있

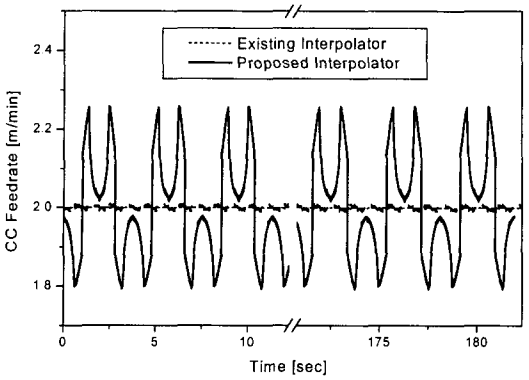

Fig. 11 Comparison of CC-feedrates for the curved surface

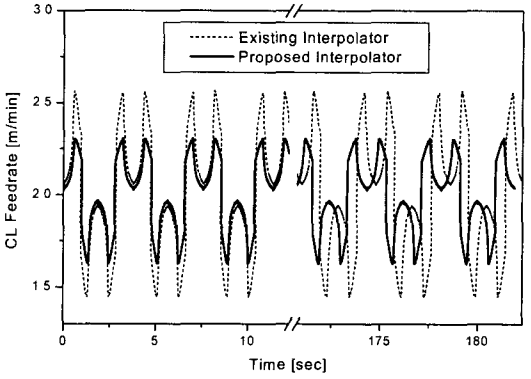

Fig. 12 Comparison of CL-feedrates for the curved surface

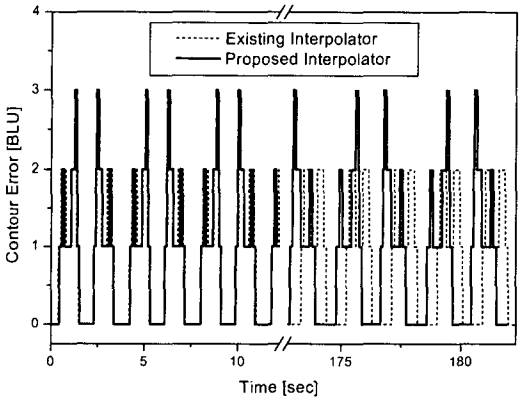

Fig. 13 Comparison of contour errors for the curved surface

으나 동일한 경향을 보인다. Fig. 14의 결과는 곡면의 곡률에 따라 CC 경로의 이송속도를 변속하는 제시된 인터폴레이터가 기존의 인터폴레이터 적용시에 발생하는 가공 중의 절삭력 변동을 효과적으

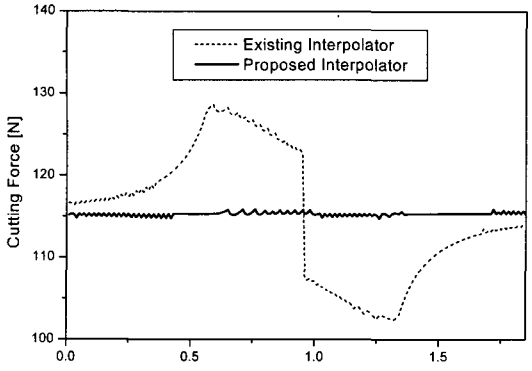

Fig. 14 Comparison of cutting forces on the first tool-path for the curved surface

로 구속할 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 보다 정밀하고 지능적인 인터폴레이터를 위하여 기존의 공구접촉(CC) 경로에 대한 등속 지향적인 방법을 탈피하여 공작물의 곡면 형상에 따라 공구접촉 경로의 이송속도를 실시간으로 조정해주는 새로운 형태의 인터폴레이터를 제시하였다.

제시된 인터폴레이터는 직선 경로로 가공할 때는 변속하지 않으므로 평면가공의 경우에는 기존의 곡면 인터폴레이터와 동일한 방법으로 운용된다. 그러나, 굴곡이 있는 곡면의 경우 기존의 인터폴레이터는 CC 경로를 등간격으로 보간하여 절삭력이 불균일하게 되는 반면, 제시된 가변속 인터폴레이터는 절삭력을 일정하게 구속하기 위해 CC 경로의 이송속도를 조절한다. 즉, 곡률이 양의 값을 갖는 볼록한 곡면에 대해서 CC 경로의 이송속도를 감소시키며, 곡률이 음의 값을 갖는 오목한 곡면에 대해서 가속을 한다. 그 결과, 공구경로(CL 경로)상의 이송속도와 국부의 비절삭체적을 일정하게 구속함으로써 가공 마감의 조건에서 균일한 절삭력을 유지할 수 있다. 제시된 가변속 인터폴레이터의 성능을 확인하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 굴곡이 있는 곡면의 가공시 기존의 방법에 비해 절삭력을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 제시된 인터폴레이터는 볼엔드 커터를 이용한 3차원 곡면의 가공 마감시에 보다 매끈한 곡면을 얻는데 적합할 것으로 예상되며, 이를 실제의 가공 실험을 통해 검증할 계획이다.

참고문헌

(1) Park, S., Jun, Y.-T., Lee, C.-W., and Yang, M.-Y., 1993, "Determining the Cutting Conditions for Sculptured Surface Machining," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 8, pp. 61~70.

(2) Park, C. K. and Maeng, H. Y., 1991, "Ball End Milling of Sculptured Surface Models By Considering Machinability," *Transactions of the KSME*, Vol. 15, No 6, pp. 2048~2061.

(3) Hong, W. P. and Yang, M. Y., 2000, "NURBS Interpolation Algorithm for CNC Machines," *Journal of the KSPE*, Vol. 17, No. 12, pp. 115~120.

(4) Song, J. I., Kim, M. J. and Kwon, D. S., 2000, "NURBS Interpolation Algorithm for CNC Machining with High Speed and High Precision," *Journal of the KSPE*, Vol. 17, No. 1, pp. 192~197.

(5) Shpitalni, M., Koren, Y., and Lo, C. C., 1994, "Real-Time Curve Interpolators," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, pp. 832~838.

(6) Lo, C. C., 1997, "Feedback Interpolators for CNC Machine Tools," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 587~592.

(7) Yang, D. C. H. and Kong, T., 1994, "Parametric Interpolator versus Linear Interpolator for Precision CNC Machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, pp. 225~234.

(8) Farouki, R. T., Manjunathaiah, J., Nicholas, D., Yuan, G.-F. and Jee, S., 1998, "Variable-Feedrate CNC Interpolators for Constant Material Removal Rates Along Pythagorean-hodograph Curves," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, pp. 631~640.

(9) Lin, R. S., 2000, "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.

(10) Lo, C. C., 2000, "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.

(11) Lo, C. C., 1998, "A New Approach to CNC Tool Path Generation," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, pp. 649~655.

(12) Vickers, G. W. and Bradley, C., 1992, "Curved Surface Machining through Circular Arc Interpolation," *Computers in Industry*, Vol. 19, pp. 329~337.

(13) Lee, Y. S., Lee, S. J. and Ko, J. H., 2001, "Cutting Force Regulation in Milling Process Using Sliding Mode Control," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 8, pp. 1173~1182.

(14) Park, H. D. and Yang, M. Y., 1989, "A Study on the Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling Process," *Transactions of the KSME*, Vol. 13, No. 3, pp.

433~442.
(15) Piegl, L. and Tiller, W., 1995, *The NURBS Book*, 2nd Edition, Springer.
(16) Faux, I. D. and Pratt, M. J., 1981, *Computational Geometry for Design and Manufacture*, Ellis Horwood
(17) Smith, S. and Tlusty, J., 1991, "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 169~175.
(18) Lin, R. S. and Koren, Y., 1996, "Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 118, pp. 20~28.