

〈논문〉

표면거칠기를 고려한 NURBS 곡선보간기

최인휴* · 이동윤† · 정태성** · 양민양***

(2004년 10월 11일 접수, 2005년 3월 7일 심사완료)

NURBS Curve Interpolator for Controlling the Surface Roughness

Inhugh Choi, Dongyoon Lee, Taesung Jung and Minyang Yang

Key Words : NURBS Curve Interpolator(NURBS 곡선보간기), PC-NC(PC 기반 수치제어기), Variable Feedrate(변동이송속도), Extended Surface Roughness Model(확장표면거칠기 모델)

Abstract

Finish machining of a curved surface is often carried out by an NC system with curve interpolation in the field. This NURBS interpolation adopts a feedrate optimizing strategy based on both the geometrical information and dynamic properties. In case of a finish cut using a ball-end mill, the curve interpolator needs to take the machining process into account for more improved surface, while reducing the polishing time. In this study, the effect of low machinability at the bottom of a tool on surface roughness is also considered. A particular curve interpolation algorithm is proposed for generating feedrate commands which are able to control the roughness of a curved surface. The simulation of the machined surface by the proposed algorithm was carried out, and experimental results are presented.

기호설명

- F : 이송속도
- S : 스피들 스피드
- n : 엔드밀 날수
- R_{max} : 최대표면거칠기
- f_t : 날 당 이송 $\left(= \frac{F}{n \cdot S} \right)$
- f_p : 경로간격
- r : 공구반경
- ρ_f : 이송방향의 곡률반경
- ρ_p : 픽피드 방향의 곡률반경
- α : 이송경사각
- α_c : 임계이송경사각
- T : 보간주기(msec)

1. 서론

자유곡면 형상가공에서 CNC 가공은 필수적이며, 이를 위하여 먼저 가공조건을 선정하고, 공구경로를 계획한 다음, 파트프로그램 형태로 출력된 경로를 실시간으로 보간하여 최종적으로 서보제어를 수행하여야 한다. 공구경로의 보간은 제어기 내부에서 실시간으로 수행되며, 공구경로계획 단계에서 얻어진 기하학적인 정보로부터 기준위치(또는 속도)를 매 샘플링 시간마다 생성하는 작업이다. 생성된 기준위치는 서보제어시스템을 구동하는 입력이 된다.

종래의 CNC에서는 곡선경로를 직선이나 원호와 같은 간단한 성분으로 분리하여 처리하였으나, 최근들어 해석곡선의 정의로부터 직접 공작기계를 구동하는 직접보간(direct interpolation)이 도입되었다. 대표적인 것이 NURBS 보간이며, 이를 이용하면 CNC로 전달되는 데이터량을 줄여서 통신부하를 경감시키고, 이송속도의 변동을 최소화하는 등의 장점이 있다. 매개변수 곡선보간의 정확한 이송속도를 구현하기 위하여 Lo⁽¹⁾는 피드백 보간기

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과
E-mail : daniel.lee@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3264 FAX : (042)869-3210

* ㈜터보테크 기술연구소

** 회원, ㈜재영솔루텍 프라스틱응용기술연구소

*** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

를 제안하였고, Yeh 와 Hsu^(2,3)는 이송속도를 보상하고, 윤곽오차를 제한할 수 있는 보간 방법을 제안하였다. 이들 연구는 주로 공작기계 이송계의 지령에 대한 추종성을 향상시키기 위한 방법론에 대한 것이었다. 또한, 가공공정상의 특성을 보간과정에서 고려하려는 연구가 진행되었는데, Lo⁽⁴⁾는 CC(cutter contact) 점에서의 일정한 절삭속도를 구현하기 위한 공구경로 생성방법을 제안하였고, Chu 등⁽⁵⁾은 볼엔드밀 가공에서 국부가공형상(local shape)에 따른 이송속도 최적화를 실험적으로 수행하였다. 특히, Farouki 등⁽⁶⁾은 특별한 매개변수 곡선인 PH (Pythagorean-hodograph) 곡선에 대한 MRR(material removal rate)을 일정하게 유지하는 변동이송속도 CNC 보간법을 제안하여 경로의 곡률효과를 고려하고, 이를 보상하는 지능적인 보간알고리즘을 제안하였다. MRR은 가공 중의 절삭력을 대표하는 값으로 이를 일정하게 유지하는 것이 가공의 정밀도와 공구수명을 개선하는데 유리하다. 그러나, 정삭가공에서는 절삭깊이가 작아 가공부하인 MRR 보다는 오히려 가공면의 표면거칠기 요구조건이 중요하게 된다. 가공 후 표면거칠기는 후처리 사상작업에 직접적으로 영향을 미치는 인자이므로 정삭가공으로 원하는 표면거칠기 수준까지 도달하는 것은 가공능률을 향상시키는데 매우 중요하다.

볼엔드밀링에서 가공면의 기하학적인 표면 거칠기는 공구반경, 이송속도, 경로간격(path interval) 그리고 피삭면의 곡률반경에 의하여 결정된다.⁽⁷⁾ 일반적인 가공조건에서 볼엔드밀에 의한 가공면의 표면거칠기는 경로간격에 의한 커스높이(cusp height)가 우세하게 영향을 미치고, 커터마크(cutter mark)의 영향은 적다. 그러나, 고속가공의 경우에 미소한 가공량으로 급속히 빠른 이송을 하므로 경로간격을 작게 유지하고, 이송을 고속화한다. 이 경우에 표면의 거칠기는 이송방향의 커터마크에 의해 만들어진 높이를 무시할 수 없게 된다.⁽⁸⁻¹¹⁾

본 연구는 정삭가공 후의 가공면의 최대표면거칠기(R_{max})를 제어할 수 있는 특수한 곡선보간 알고리즘을 개발하는데 초점을 맞추었다. 자유곡선의 형태로 주어진 공구경로로부터 해석적으로 얻을 수 있는 기하학적 정보를 이용하여 전 가공표면에서 일정한 R_{max} 를 얻을 수 있는 운동명령을 생성하는 NURBS 보간 알고리즘을 개발하고, 이를 가공면의 Z-map 모사와 가공실험을 통하여 확인하였다. 실시간 이송속도제어를 위하여 근사된 표면거칠기 확장모델을 제안하였으며, NURBS 곡선 경로에 대한 가공실험을 통하여 제안된 NURBS 곡선보간기의 최대표면거칠기 조절성능을 확인하

였다.

2. 고속가공에서 표면 거칠기

2.1 기존의 표면 거칠기 모델

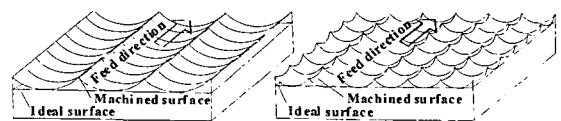
Fig. 1은 볼엔드밀가공에 의한 표면형상을 보여준 것이며, (a)는 전통적인 가공조건에서의 가공면을 나타내고, (b)는 고속가공조건에서의 가공면이다. 공구의 강성과 내마모성이 증대되고 기계의 강성이 우수해짐에 따라 가공조건을 경로간격을 줄이고, 이송은 고속화하는 방향으로 선정하게 되었다. 이에 따라, (b) 가공면처럼 커터마크가 가공면에 흔적을 남기게 되는데, 그 높이가 표면거칠기에 크게 영향을 미치게 된다. 이 가공영역에서의 가공면에 나타나는 표면형상(surface topology)은 커스 뿐만 아니라, 이송방향으로의 커터마크가 커스높이 수준으로 높게 나타나게 된다. 따라서, 자유곡면을 볼엔드밀로 가공한 면의 이론적인 최대 표면거칠기는 식 (1)과 같이 커스높이와 커터마크 높이의 합으로 나타낼 수 있다.^(10,11)

$$R_{max} = \frac{f_c^2}{8r} \left(1 - \frac{r}{\rho_f + r} \right) + \frac{f_p^2}{8r} \left(1 - \frac{r}{\rho_p + r} \right) \quad (1)$$

정삭 후 사상작업을 고려한다면 이 커터마크가 커스보다 높지 않게 조정할 필요가 있으며, 일반적으로 상한값은 커스높이와 같게 되는 날당이송으로 정해진다. 또한, 곡선경로일지라도 이송은 매 샘플링 시간에서의 직선운동으로 나타나므로 이송방향의 곡률은 무시할 수 있다.

2.2 확장표면거칠기모델

볼엔드밀에 의한 가공표면은 Fig. 2처럼 커스면과 커터마크면의 중첩으로 나타낼 수 있다. 커스면은 경로간격에 의하여 결정되는 면이고, 커터마크면은 날당이송에 의하여 생성되는 면이다. 인선이 둥근 볼엔드밀 특성상 형상가공에 주로 쓰이지만, 공구중심축 부근 인선의 절삭속도가 이송속도보다 작은 영역이 존재하고, 이 영역에서 가공된 면에는 절삭잔량(cutting remains)이라는 돌출된 재료가 남아있게 된다.⁽¹⁰⁾ 이것은 기존의 표면거칠기 모델식인 식 (1)로는 설명할 수 없는 부분이다. 따라서, 공구정점으로 가공된 면의 표면거칠기가



(a) Conventional condition (b) High-feed condition
Fig. 1 Surface texture after milling

지 표현할 수 있는 확장표면거칠기모델을 구하고자 한다. 이를 위하여 먼저 공구인선방정식에 의한 가공면을 Z-map 형태로 얻고, 각각의 조건에서 R_{max} 를 구하여, R_{max} -map을 얻는다.

Fig. 3은 공구반경 5mm, 픽피드 0.5mm/tooth 인 경우에 이송경사각과 날당이송을 달리하면서 반원호(semicircular arc) 모양의 공구인선으로 볼랜드밀 가공을 Z-map으로 모사했을 때의 R_{max} 를 나타내고 있다. Fig. 3(a)의 R_{max} -map으로부터 이송경사각이 작아서 거의 수평으로 이송하는 부분에서의 R_{max} 는 급격하게 증가함을 알 수 있다. (I) 영역은 공구정점부근의 인선이 참여하여 과도한 절삭잔량을 남겨서 R_{max} 가 최고 2 배가 커지는 영역이고, (II) 영역은 기존의 표면거칠기 식으로 예측 가능한 영역이다. 실제적으로 너무 작은 날당이송 조건은 가공시간의 증가를 유발하므로 피하여야 한다. 표면거칠기와 가공능을 관점에서 이송경사각에 따른 최적의 가공조건은 두 영역의 경계선 및 날당이송이 픽피드와 같은 조건을 나타내는 선이

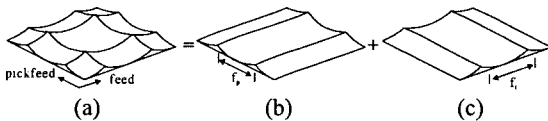
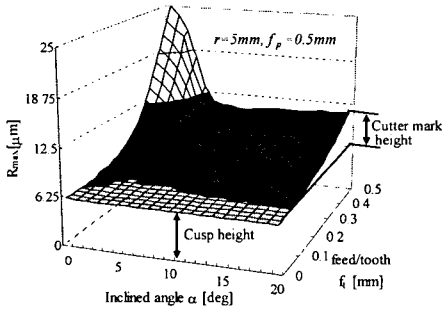
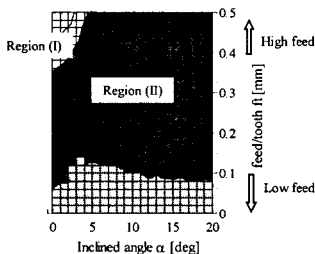


Fig. 2 Surface topology by the superposition of the component surfaces in the two directions (a) surface topology (b) cusp surface (c) cutter mark surface



(a) Map of R_{max}



(b) Contour map of R_{max}

Fig. 3 Resultant surface roughness from the simulation

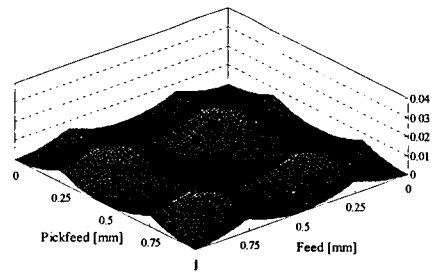
된다. 두 영역에서의 좀더 정확한 표면 거칠기 모델을 구하기 위하여 가공면의 특징형상을 이용하여 아래에 같이 유도하고, 두 영역의 경계를 정의한다.

Fig. 4(a)는 이송경사각이 10° 인 경우로서 Fig. 3(b)의 영역 (II)에 포함되는 부분, 즉 공구정점 부근이 가공에 참여하지 않는 영역에서의 가공면 Z-map 시뮬레이션의 결과이며, Fig. 4(b)는 이 영역의 R_{max} 를 구하기 위하여 가공면의 특징형상을 나타내고 있다. 이로부터 R_{max} 는 기존의 표면거칠기 식 (1)에서 곡률에 따른 영향을 무시하고 ($\rho_f = \rho_p \approx \infty$), 절삭날이 재료 안으로 진입하는 점과 바깥으로 진출하는 점 사이의 위상차를 추가로 고려하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

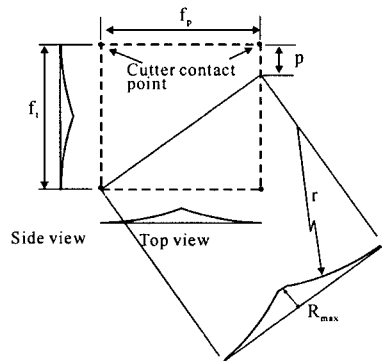
$$R_{max}(f_i, |\alpha| > \alpha_c) = \frac{f_p^2}{8r} \cdot \left[1 + \left(\frac{f_i - p}{f_p} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$p = \frac{f_i}{\pi} \cdot \frac{f_p}{r \sin \alpha}$$

절삭날이 재료 안으로 진입한 후 바깥으로 진출할 때 까지 공구가 이송방향으로 이동한 거리이며, 0에서 $f_i/2$ 사이의 범위를 가진다. 최대 거칠기는 공구경로 사이의 가운데 지점에 위치한다.

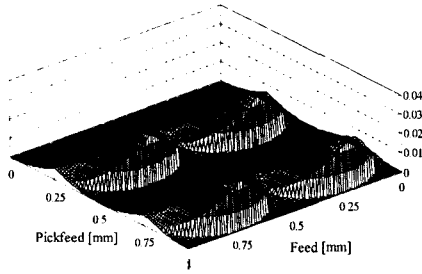


(a) Simulated surface ($f/f_p=1, R_{max}=10.7\mu\text{m}$)

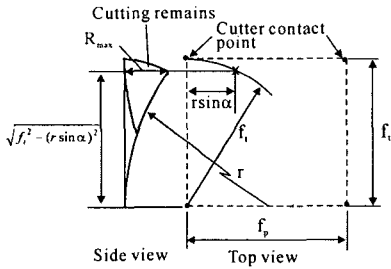


(b) Feature drawing of machined surface

Fig. 4 Calculation of R_{max} of machined surface in the non-effect zone of dead center



(a) Simulated surface ($f/f_p = 1$, $R_{max} = 24.9 \mu m$)



(b) Feature drawing of machined surface

Fig. 5 Calculation of R_{max} of of machined surface in the effect zone of dead center

Fig. 5(a)는 이송경사각이 0° 일 때, 즉 공구정점이 가공면 생성에 참여하는 Fig. 3(b)의 (I) 영역에서의 가공면을 Z-map 을 이용하여 시뮬레이션한 결과이다. Fig. 5(b)는 이 영역에서 R_{max} 를 구하기 위하여 가공면의 특징형상을 도시한 것으로서 커스는 동일하지만, 커터마크에는 절삭잔량에 의한 돌출이 생기며, 이 돌출부에 의해서 R_{max} 가 결정된다. Fig. 5(b)에서와 같이 돌출부는 공구경로의 오른쪽 $r \sin \alpha$ 위치에 존재하며, 공구는 구면을 가진다고 계산하면 R_{max} 식은 기하학적으로 다음과 같이 얻을 수 있다.

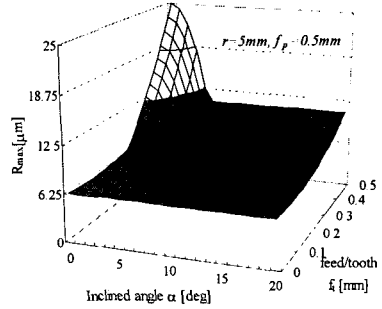
$$R_{max}(f_i, |\alpha| \leq \alpha_c) = r \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{f_i}{r}\right)^2 + \sin^2 \alpha} \right] \quad (3)$$

식 (3)은 공구반경이 주어졌을 때 날당이송과 이송경사각의 함수로 R_{max} 를 표시하고 있으며, 경사각이 0 일 때 최대가 된다. 그리고, 임계이송경사각 이내일 때만 적용되고 임계이송경사각은 경계조건으로부터 계산될 수 있다. 두 영역의 경계가 되는 임계이송경사각 α_c 는 위 두 식의 경계조건으로부터 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

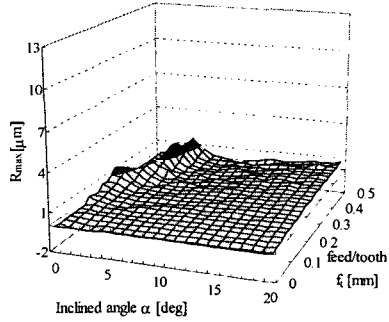
$$\alpha_c = \sin^{-1} \left(\frac{1}{r} \sqrt{\left(\frac{A}{8r}\right)^2 - \frac{A}{4} + f_i^2} \right) \quad (4)$$

여기서, $A = f_p^2 + \left(f_i - \frac{f_p}{2\pi}\right)^2$ 이다.

따라서, 볼엔드밀 가공면의 R_{max} 는 식 (2)와 식



(a) Extended surface roughness model



(b) Error map from simulated surface (max. error = $1.8 \mu m$)

Fig. 6 Extended surface roughness of the surface machined by ball-end mill

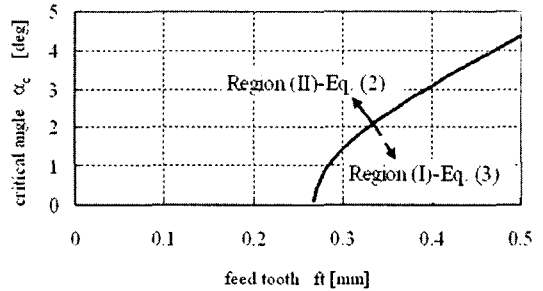


Fig. 7 Critical inclination angle according to feed per tooth

(3)으로 표시되는 확장표면거칠기 식으로 전 가공면을 나타낼 수 있다. Fig. 6(a)는 제안된 확장표면거칠기모델을 도시화한 결과이며, Z-map 을 이용한 표면거칠기 시뮬레이션 결과인 Fig. 3 과의 오차를 Fig. 6(b)에 도시하였다. 오차는 매 날당이송에서 임계이송경사각 부근에서 크게 나타나고, 최대오차는 $1.8 \mu m$ 이다.

Fig. 7은 각 날 당 이송에 대한 임계이송경사각을 나타낸 것으로서, 임계이송경사각을 기준으로 R_{max} 계산식이 구분되며, 날 당 이송 f_i 는 $0.53 f_p$ 부터 f_p 까지의 값에서 의미를 가진다. 경로간격이 $0.5mm$ 인 본 논문에서의 조건에서 날 당 이송은 $0.27mm/tooth$ 과 $0.5mm/tooth$ 사이가 된다.

3. 표면조건을 만족하는 NURBS 보간

3.1 표면거칠기를 제한하는 이송속도 최적화

곡면의 표면거칠기를 제어할 수 있는 특별한 실시간 곡선보간 알고리즘을 구현하기 위하여 공구 경로정보로부터 이송명령을 생성할 수 있는 간단한 지배방정식이 요구된다. 즉, CAM 시스템으로부터 공구반경과 피크드 같은 기본적인 공정변수가 지정되고, 추가로 목표거칠기가 설정된다면 보간기에서 이송방향의 경사각을 입력받아 이송명령을 출력하게 되는 것이다. 2 장에서 제안된 이송경사각에 따른 2 가지 형태의 표면거칠기모델을 적용하면 밀링가공면의 거칠기를 제어할 수 있는 이송량은 식 (5)와 (6)에 의하여 결정될 수 있다.

$$f_i = \frac{f_p}{2\pi} + \sqrt{8r \cdot R_{max} - f_p^2} \quad |\alpha| > \alpha_c \quad (5)$$

$$f_i = \sqrt{(r \sin \alpha)^2 + 2r \cdot R_{max} - R_{max}^2} \quad |\alpha| \leq \alpha_c \quad (6)$$

공구경로의 이송경사각이 현재의 날당이송에서 임계경사각보다 클 때, 경험적으로 모델의 오차가 최소화 되도록 경사각이 $2\alpha_c$ 일 때의 위상 차로 계산하였다. 또한, 목표거칠기는 이송방향과 이송의 직각방향에서의 거칠기가 같아지는 두방향 등방면(isotropic surface)의 R_{max} 로 추천하였다. 이러한 조건이 가공시간과 사상에 소요되는 시간을 줄이는데 유리하기 때문이다.

Fig. 8 은 볼랜드밀로 실린더 형상을 상향/하향 밀링가공할 때 이송경사각에 따른 날당이송과 R_{max} 와의 관계를 나타낸 것이다. 고정된 이송으로

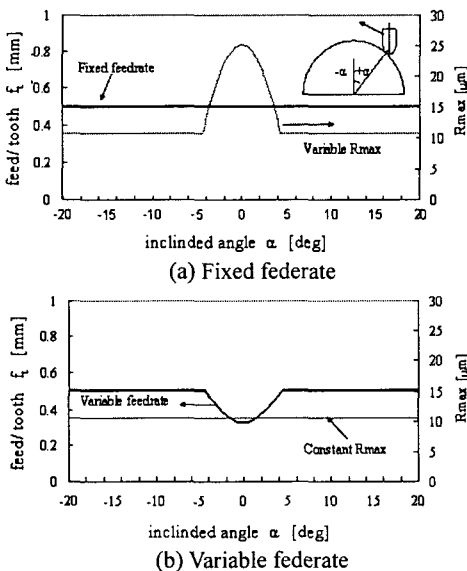


Fig. 8 Relationship between the feed per tooth and the roughness

가공하면 표면거칠기가 공구정점이 가공에 참여한 부분에서 최고 2 배정도 악화됨을 알 수 있다. 그러나, 본 연구에서 제시한 변동이송을 적용하면 전 가공면에 걸쳐서 동일한 표면거칠기를 얻을 수 있다. 날당이송을 감소시키는 방법에는 주축회전수를 증가시키거나, 이송속도를 감소시키는 방법이 있지만, 주축회전수는 일단 가공을 시작하면 바꾸는 것이 용이하지 않고 가공시스템의 동특성을 변경시키므로 고정하고, 이송속도를 적절히 조절하는 것이 바람직하다. 따라서, 곡면을 곡선보간을 이용하여 가공할 때 균일한 표면거칠기를 얻기 위하여 보간단계에서 최적이송명령을 생성할 필요가 있다. 또한, NURBS 곡선보간에서는 하나의 NURBS 블록에 하나의 이송속도가 추천되므로 매 순간의 이송속도는 상황에 맞게 적절히 조절할 수 있어야 한다.

3.2 NURBS 곡선 보간

3 차원 매개변수 곡선은 일반적으로 $P(u) = [x(u) \ y(u) \ z(u)]$ 으로 나타낼 수 있으며, 현재의 곡선상의 위치에서 다음 위치를 찾기 위하여 원하는 증분거리(Δs_d)를 $FT/60(\mu m)$ 으로 계산한다. 거리증분량에 해당하는 곡선 파라미터의 증분량 (Δu)을 구하기 위하여 고차항을 제거한 Taylor 시리즈로 근사한 식 (7)을 사용하여 보간주기 마다 회귀적으로 구할 수 있다. (4-6)

$$u_{i+1} = u_i + \frac{\Delta s_d}{|\dot{P}(u)|} - \frac{\Delta s_d^2 \left(\ddot{P}(u) \cdot \dot{P}(u) \right)}{2|\dot{P}(u)|^4} \quad (7)$$

여기서, $\dot{P}(u) = \frac{dP(u)}{du}$ 이고, $\ddot{P}(u) = \frac{d^2P(u)}{du^2}$ 이다.

목표표면거칠기를 얻기 위한 거리증분량은 두 날을 가진 볼랜드밀의 경우에 $2Sf_iT/60(\mu m)$ 으로 구할 수 있다. 여기서 f_i 는 식 (5) 또는 (6)으로부터 구해진다.

Fig. 9는 본 연구에서 구현한 특별한 이송속도 명령을 생성할 수 있는 NURBS 곡선보간 알고리즘의 순서도이다. 제안된 보간기는 크게 해석기(IPR: interpreter)와 보간기(IPO: interpolator), 두 부분으로 구분된다. 해석기에서는 기본적인 코드문법해석을 수행하고 보간기에서는 보간오차검사, 가감속 조정, 그리고 이송최적화기능이 포함된다. 이송최적화는 목표표면거칠기를 달성하기 위하여 Fig. 10의 과정을 거쳐서 수행되며 요약하면 다음과 같다.

(1) 먼저, 파트프로그램으로부터 공구반경, 피크드, 그리고 목표표면거칠기 같은 고정 인자를 읽어 들인다.

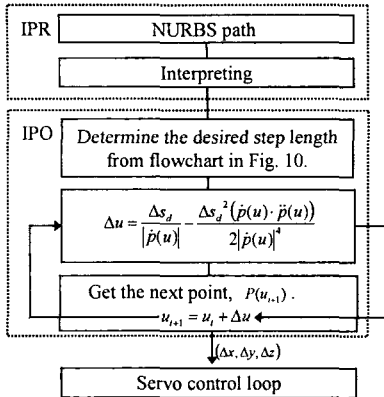


Fig. 9 Layout of the proposed curve interpolator

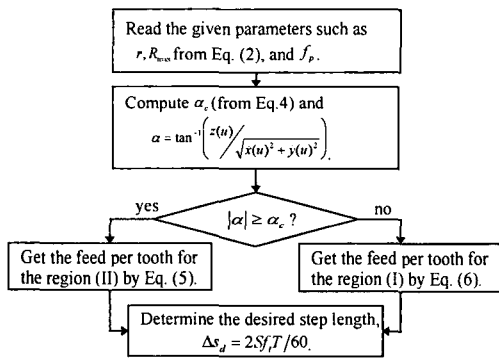


Fig. 10 Flowchart for getting a set of step length based on the target roughness

- (2) 공구경로정보로부터 현재의 위치에서의 이송경사각과 임계경사각을 계산한다.
- (3) 식 (5) 또는 (6)을 적용하여 목표표면거칠기를 만족하는 거리증분량을 얻는다.
- (4) 식 (7)과 NURBS 곡선방정식으로부터 다음 보간점을 계산한다.
- (5) 마지막으로, 서보제어루틴으로 전달될 이송 명령을 생성한다.

4. 제안된 보간기의 평가

4.1 보간기의 적용

제안된 보간 알고리즘은 PC-NC 로 재구성된 밀링머신에 이식되었고, 윈도우 NT 기반에 실시간 처리를 보장하기 위하여 RTX (VentureCom Co.) 를 사용하였으며, 보간 주기를 4msec 로 설정하고, 실가공을 다음 가공조건에서 수행하였다. 공구반경 5mm, 픽피드 0.5mm/tooth, 그리고 피삭재는 Al2024 이다. 보간기의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 11 에 보이는 3 차의 NURBS 곡선 예제를 선정하여 Y 축 방향으로 평행하게 늘린 곡면을 가공

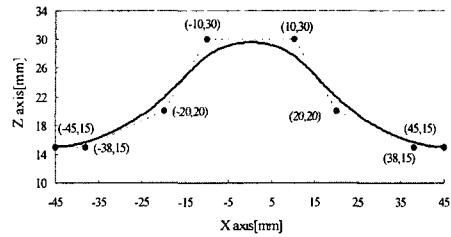


Fig. 11 An example of NURBS tool path designed for upward and downward milling (knot vector [0 0 0 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1 1 1])

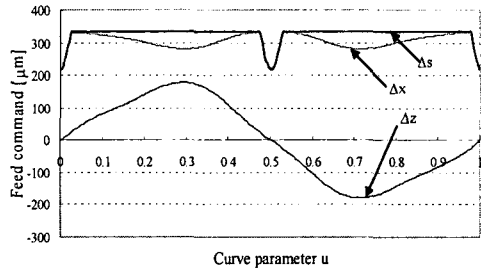


Fig. 12 Feed command controlled by proposed algorithm on a NURBS tool path

하였다. 먼저 하나의 NURBS 곡선경로에 대하여 보간을 한 다음 이송속도 프로파일을 구하여 Fig. 12 에 나타내었다. 곡선 파라미터 0.5 부근에서 감속되는데 이는 공구정점이 가공에 참여하는 구간이어서 표면거칠기 요구조건을 만족하기 위하여 감속하는 것이고, 임계경사각은 4.3° 이다. 이송명령은 이 범위 내에서 원래의 이송속도의 65%까지 감속됨을 볼 수 있다. 이러한 이송경사각에 의존하는 변동이송을 통하여 가공품의 표면을 지정된 표면거칠기로 유지할 수 있다.

4.2 실험 결과 및 고찰

제시된 알고리즘을 적용한 경우의 가공면을 확인하기 위하여 2 장에서 주어진 가공조건을 적용하여 Z-map 가공 시뮬레이션과 실가공면의 사진을 관찰하였다. 이송경사각이 10° 일 때 가공면의 형상은 Fig. 13(a)와 같이 격자모양의 패턴을 나타내고 Fig. 4(a)의 시뮬레이션 결과와 유사하게 보인다. R_{max} 는 커슴높이와 커터마크높이의 합으로 나타낼 수 있으며, Fig. 4(a)의 가공면 Z-map 시뮬레이션의 결과로부터 10.7µm 임을 알 수 있고, 이 값은 표면거칠기모델인 식 (2)의 결과와 거의 일치한다. 식 (2)는 공구가 회전운동과 병진운동을 동시에 수행하면서 공구인선과의 상대운동으로 재료를 제거하는 메커니즘을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 여기서, 목표 표면 거칠기는 10.7µm 이므로 이송속도 조절이 요구되지 않는다. Fig. 13(b)

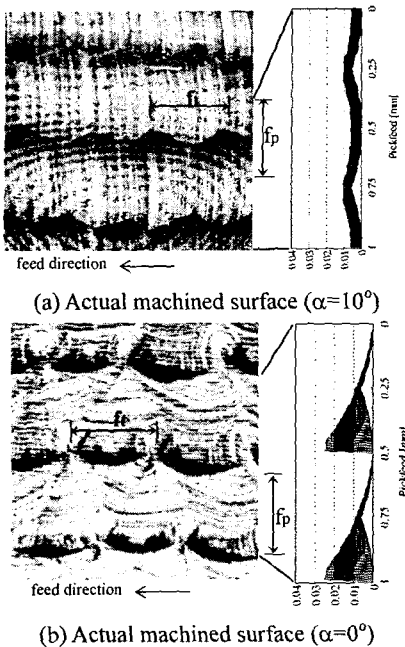


Fig. 13 Machined surface when $f/f_p = 1$

는 이송 경사각이 0° 일 때 고정된 이송속도로 가공했을 때의 실제 가공면이다. 공구중심이 지나가는 자리에 돌출된 절삭잔량이 남아 있음을 볼 수 있고, 이 높이가 목표거칠기의 2 배 이상이다. Fig. 5 (a)의 시뮬레이션 결과에서도 이러한 돌출된 부분이 관찰되며 이 현상은 공구정점 부근의 인선이 회전하는 속도보다 공구의 이송속도가 크게 되어 인선이 지나가지않는 공간이 생기는데 이것이 가공물에 그대로 남아서 절삭잔량을 형성하게 된다. 실제 가공에서는 이 영역에서의 절삭속도(공구인선과 공작물의 상대속도)가 거의 0 에 근접하여 절삭현상이 아니라 러빙(rubbing) 같은 소성변형이 일어난다.

정삭가공면에서 이러한 중심부의 돌출부 생성을 억제 하고 목표거칠기를 얻기 위하여 식 (6)을 이용하여 이송경사각에 따라서 날당이송을 적절히 줄여야 한다. 이를 적용하여 가공한 가공면을 Fig. 14 에 나타내었다. 이송경사각 0° 에서 R_{max} 를 $10.2\mu\text{m}$ 로 줄일 수 있었고, 이때의 날당이송은 0.33mm 에 해당한다. 따라서 가공시간을 약간 증가시키고, 원하는 가공면을 보장할 수 있게 되었다. 이송경사각에 따라서 매 샘플링 시간 마다 최적의 이송을 자동적으로 계산하는 변동이송보간 기법은 곡면가공에서 가공면의 품위와 가공효율 측면에서 모두 최선의 가공조건이 된다.

Fig. 15 는 가공 표면형상을 형상측정기(Marsurf, Mahr 사)로 측정하여 보여준 것이다. 측정된 R_{max} 는 시뮬레이션에 의해 계산된 R_{max} 보다 작은값으로 나타났다. 고정속도이송일 때와 변동속도이송

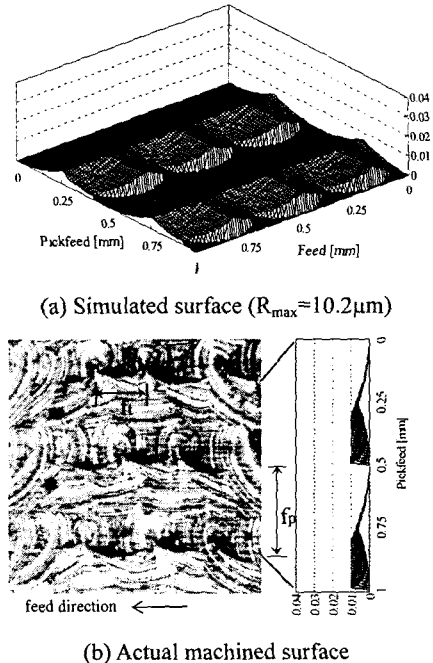


Fig. 14 Surface controlled by the variable feedrate when $\alpha=0^\circ$ and $f/f_p=0.65$

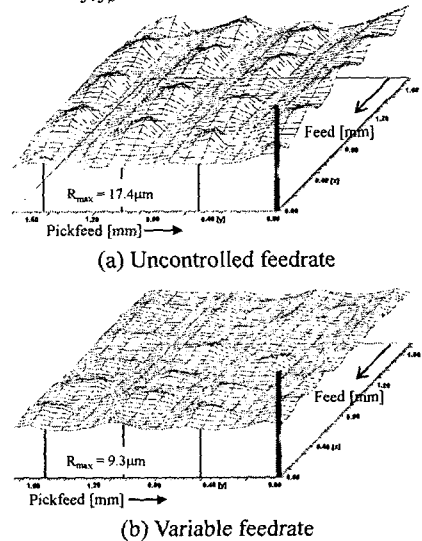


Fig. 15 Surface topology measured when $\alpha=0^\circ$

일 때 각각 $17.4\mu\text{m}$ 와 $9.3\mu\text{m}$ 이다. 이것은 측정타입의 측정기의 측정오차와 돌출부의 날카로운 에지(edge) 부분이 러빙에 의하여 무더진 것으로 사료된다. 결국, 제안된 보간기법으로 전체 표면의 목표거칠기를 약 $2\mu\text{m}$ 의 오차범위 이내로 달성할 수 있었다.

4.3 실가공에의 적용

제안된 변동이송속도 알고리즘이 적용된 NURBS

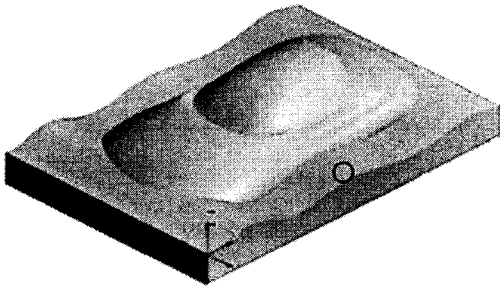
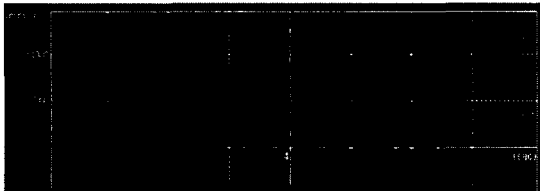


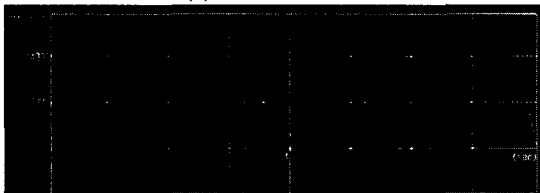
Fig. 16 An example model

Table 1 Comparison of measured data

	(a)	(b)
Machining time	37m23s	38m10s
Roughness (x-axis, μm)	R_a : 1.16 R_{max} : 5.4	R_a : 0.86 R_{max} : 4.1



(a) Fixed feedrate



(b) Variable feedrate

Fig. 17 Feedrate graph of NURBS curve interpolation

곡선보간기의 성능실험을 위해서 Fig. 16 에 보이는 곡면으로 이루어진 모델을 NURBS 곡선 공구 경로를 이용하여 다음과 같은 조건으로 가공하였다. 공구반경 3mm 인 초경 볼엔드밀을 이용하였으며, 주축회전속도는 12500rpm, 이송속도 7000mm/min, 공구경로간격은 0.2mm 로 설정하였다. 주어진 조건에서 공구경로간격에 의해서 표면에 생성되는 R_{max} 는 3.3 μm 이며 표면거칠기를 조절하는 기능을 적용할 경우, 이 값이 이송속도를 조절하기 위해 보간기에 설정되는 목표표면거칠기이다.

Table 1 은 각각의 경우에 대한 실험 결과를 보여주고 있다. R_{max} 는 목표표면거칠기를 달성하기 위해서 이송속도를 조절하는 부위, 즉 공구가 이송하는 방향으로의 경사각이 임계경사각보다 작은 부분에서 측정하였으며, Fig. 16 에서 원으로 표시된 부분을 X 축 방향으로 측정하였다. (a)의 경우가 고정이송속도로 가공한 경우이고, (b)의 경우가

변동이송속도로 가공한 경우이다. 변동이송속도로 가공한 (b)의 경우가 가공시간은 (a)에 비해서 다소 오래걸렸으나, R_{max} 는 5.4 μm 에서 4.1 μm 로 감소하였다. Fig. 17 은 각각의 경우에 대해서 NURBS 곡선보간을 할 때의 실시간 이송속도를 서보모터를 구동하는 드라이브로부터 구한 결과를 보여주고 있다. (a)는 고정속도 이송일 경우이며, 가공이 이루어지는 부분에서 7000mm/min 의 일정한 이송속도로 공구가 이송한다는 것을 알 수 있다. (b)는 변동속도 이송의 경우 표면거칠기를 조절하기위하여 이송속도가 톱니형으로 감소하는 것을 발견할 수 있다. 그래프에서 Y 축 방향으로의 한눈금은 7000mm/min 이며, 실제 가공이 일어나지 않는 공구의 급속이송 부분에서 이송속도가 높게 나타나고 있다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 표면거칠기 요구조건을 만족하는 변동이송 NURBS 곡선보간기법을 제안하였으며, 특히 고속이송가공에서 공구정점부근의 인선이 가공면에 남기는 특이돌출부를 효과적으로 대처할 수 있음을 보였다. 이를 위하여 확장된 표면거칠기모델을 기하학적인 인자로부터 유도하였고, 이를 PC-NC 기반에서 NURBS 곡선보간 알고리즘에 적용하였다. 그러나, 본 논문은 가공대상곡면이 공구이송방향으로 굴곡이 있는 경우에 대해서만 고려하였다. 공구이송방향의 직각방향으로 굴곡이 있는 경우의 표면거칠기를 고려하기 위해서는 보간단계에서보다는 공구경로를 생성하는 단계에서 경로간격을 변동시키는 등의 방법을 통해서 고려되어야 한다고 사료된다. 실시간으로 많은 계산을 해야하는 보간단계에서는 경로간격간의 정보를 얻을 수 없고, 단지 공구가 진행할 방향에 대한 정보만이 주어지게 된다. 공구경로가 생성된 후 가공을 수행하는 단계에서 공구경로를 새로 계산하는 것은 불가능하다고 여겨지므로, 본 논문에서 제안된 확장표면거칠기모델은 이송경사각의 정보만으로 최대표면거칠기와 이송속도 사이의 관계를 정하였으며, 실시간 곡선보간에 응용하여 목표표면거칠기를 달성할 수 있었다. 이러한 이송경사각에 따른 변동이송 곡선보간기법은 미리 지정된 목표거칠기를 균일하게 유지하므로 정삭가공에 유효하며, 곡면을 가진 부품의 표면거칠기를 제어할 수 있을 것이다.

참고문헌

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

- (2) Yeh, S. S. and Hsu, P. L., 1999, "The Speed-controlled Interpolator for Machining Parametric Curves," *Computer-Aided Design*, Vol. 31, pp. 349~357.
- (3) Yeh, S. S. and Hsu, P. L., 2002, "Adaptive-Feedrate Interpolation for Parametric Curves with a Confined Chord Error," *Computer-Aided Design*, Vol. 34, pp. 229~237.
- (4) Lo, C. C., 1998, "A New Approach to CNC Tool Path Generation," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 8, pp. 649~655.
- (5) Chu, C. N., Kim, S. Y., Kim, S. Y. and Lee, J. M., 1997, "Feedrate optimization of ball end milling considering local shape features," *Annals of CIRP*, Vol. 46, pp. 433~436.
- (6) Farouki, R. T., Manjunathaiah, R. T., Nicholas, D., Yuan, D. and Jee, D., 1998, "Variable-Feedrate CNC Interpolators for Constant Material Removal Rates Along Pythagorean-Hodograph Curves," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 8, pp. 631~640.
- (7) Baptista, R. and Antune, J. F., 2000, "Three and Five Axes Milling of Sculptured Surface," *Journal of Materials Processing Technology*, 103, pp. 398~403.
- (8) Lin, R. S. and Koren, Y., 1996, "Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surface," *Journal of Engineering for Industry, Trans. of the ASME*, Vol. 118, pp. 20~28.
- (9) Kim, B. H. and Chu, C. N., 1994, "Effect of Cutter Mark on Surface Roughness and Scallop Height in Sculptured Surface Machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 179~188.
- (10) Koreta, N., Egawa, T., Kuroda, M., Watanabe, K. and Li, Y., 1993, "Analysis of Surface Roughness Generation by Ball Endmill Machining," *Japan Society for Precision and Engineering*, Vol. 59, No. 9, pp. 129~134(in Japanese).
- (11) Naito, K., Ogo, K., Konaga, T., Abe, T., Kanda, K. and Matsuoka, M., 1994, "Development of Ball End Milling for Fine High-Efficiency Finishing," *International Journal of Japan Society for Precision and Engineering*, Vol. 28, No. 2, pp. 105~110.