

표면 거칠기를 고려한 NURBS 보간기

최인휴* (한국과학기술원 대학원 기계공학과), 양민양 (한국과학기술원 기계공학과),
이강주 (터보테크 기술연구소)

NURBS Interpolator for Controlling the Surface Roughness

I. H. Choi* (Mech. Eng. Dept. KAIST), M. Y. Yang (Mech. Eng. Dept. KAIST),
K. J. Lee (Tech. Res. Center, Turbo Tek Co.)

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.

Key Words : NURBS interpolator (NURBS 보간기), PC-NC (PC 기반 수치제어기), Variable feedrate (변동 이송속도), Extended surface roughness model (확장 표면 거칠기 모델)

1. 서론

종래의 CNC 에서는 곡선 경로를 직선이나 원호 같은 간단한 엔티티로 분리하여 처리하였으나, 최근 들어 해석곡선의 정의로부터 직접 공작기계를 구동하는 직접보간 (direct interpolation)이 도입되었다. 이를 이용하면 CNC 로 전달되는 데이터량을 줄여서 통신부하를 경감시키고, 이송속도의 변동을 최소화하는 등의 장점이 있다. 이러한 시장의 요구를 바탕으로 등장한 NURBS 보간기능은 윤곽오차 (contour error)와 이송속도 오차 (feedrate error)를 줄이면서 가공시간을 단축하는데 연구가 진행되었다.

또한, 가공 공정상의 특성을 보간 과정에서 고려하려는 연구가 진행되었는데, Lo 는 CC (cutter contact) 점에서의 일정 이송속도를 구현하기 위한 공구경로 생성 방법을 제안하였고, Farouki⁽⁹⁾는 특별한 매개변수 곡선인 PH (Pythagorean-hodograph) 곡선에 대한 MRR (material removal rate)을 일정하게 유지하는 변동 이송속도 CNC 보간법을 제안하여 경로의 곡률 효과를 고려하고, 이를 보상하는 지능적인 보간 알고리즘을 제안하였다. 그러나, 최종 정

삭 가공에서는 절삭 깊이가 작아 가공부하인 MRR 보다는 오히려 가공 면의 거칠기 요구조건이 중요하게 된다. 가공 후 표면 거칠기는 후처리 사상작업에 직접적으로 영향을 미치는 인자이므로 정삭 가공으로 원하는 표면 거칠기 수준까지 도달하는 것은 가공 능력을 향상시키는 데 매우 중요하다.

일반 가공 조건에서 볼 앤드밀에 의한 가공면의 거칠기는 경로간격 (path interval)에 의한 커스프 (cusp) 높이가 우세하게 영향을 미치고, 커터마크 (cutter mark) 의 영향은 미미하다. 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.

본 연구는 고속가공 조건에서 볼 앤드밀을 이용한 정삭 공정에 대하여 가공후의 가공면의 거칠기를 제어할 수 있는 특수한 곡선보간 알고리즘을 개발하는데 초점을 맞추었다. 곡선 공구 경로로부터 해석적으로 얻을 수 있는 기하학적인 정보를 이용하여 전 가공표면에서 일정 표면 거칠기를 얻을 수

있는 운동 명령을 생성하는 NURBS 보간 알고리즘을 개발하고, 이를 가공면의 Z-map 모사와 가공 실험을 통하여 확인 한다. 이송속도 제어를 위하여 근사된 표면 거칠기 확장 모델을 제안 NURBS 곡선 경로에 대한 가공실험을 통하여 성능을 확인한다.

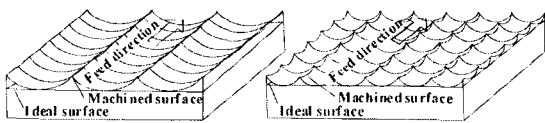
2. 고속가공에서의 표면거칠기

2.1 기존의 표면거칠기 모델

Fig. 1 은 볼 엔드 밀 가공에 의한 표면 형상을 보여준 것이며, (a)는 전통적인 가공 조건에서의 가공면을 나타내고, (b)는 고속 가공 조건에서의 가공면이다. 공구의 강성과 내마모성이 증대되고 기계의 강성이 우수해짐에 따라 가공조건을 경로간격은 줄이고, 이송은 고속화하는 방향으로 선정하게 되었다. 그리하여, (b) 가공면처럼 커터 마크가 가공면에 흔적을 남기게 되는데, 그 높이가 표면 거칠기에 크게 영향을 미치게 된다. 이 가공영역에서의 가공면에 나타나는 표면 형상 (topology)은 커스 뿐만 아니라, 이송방향으로의 커터 마크가 커스 높이 수준으로 높게 나타나게 된다. 따라서, 자유곡면을 볼 엔드 밀로 가공한 면의 이론적인 표면 거칠기는 식 (1)과 같이 커스 높이와 커터 마크 높이의 합으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, f_i 는 날당 이송량, f_p 는 픽피드량, 그리고 r 은 공구 반경을 나타낸다.



(a) Conventional condition (b) High-feed condition

Fig. 1 Surface texture after milling

정삭 후 사상작업을 고려한다면 이 커터 마크가 커스 보다 높지 않게 조정할 필요가 있으며, 일반적으로 상한값은 커스 높이와 같게 되는 날당이송으로 정해진다. 또한, 곡선 경로일지라도 이송은 매 샘플링 시간에서의 직선운동으로 나타나므로 이송 방향의 곡률은 무시할 수 있다.

2.2 확장 표면거칠기 모델

볼 엔드 밀에 의한 가공 표면은 커스면과 커터 마크면의 중첩으로 나타낼 수 있다. 커스 면은 경로간격에 의하여 결정되는 면이고, 커터 마크 면은

날당 이송에 의하여 생성되는 면이다.

인선이 둥근 볼 엔드밀 특성상 형상가공에 주로 쓰이지만, 공구 중심축 부근 인선의 절삭속도가 이송속도보다 작은 영역이 존재하고, 이 영역에서 가공된 면에는 절삭 잔량 (cutting remains)이라는 돌출된 재료가 남아있게 된다. 이것은 기존의 표면 거칠기 모델식인 식 (1)로는 설명할 수 없는 부분이다. 따라서, 공구정점으로 가공된 면의 표면 거칠기까지 표현할 수 있는 확장 표면 거칠기 모델을 구하고자 한다. 두 영역에서의 좀더 정확한 표면 거칠기 모델을 구하기위하여 가공면의 특징 형상을 이용하여 아래에 같이 유도하고, 두 영역의 경계를 정의 한다.

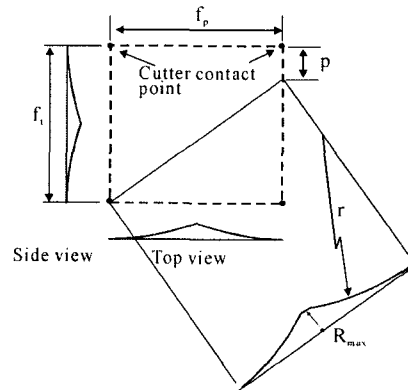


Fig. 2 Feature drawing of machined surface in the non-effect zone of dead center

Fig. 2 는 공구 정점 부근이 가공에 참여하지 않는 (II) 영역의 R_{\max} 를 구하기 위하여 가공면의 특징 형상을 나타냈으며, 이로부터 R_{\max} 는 기존의 표면 거칠기 수식에서 절삭 날이 재료 안으로 진입하는 점과 바깥으로 진출하는 점 사이의 위상차를 추가로 고려하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, $p = f_i f_p / (\pi r \sin \alpha)$ 이며, 0 에서 $f_i/2$ 사이의 범위를 가진다. 최대 거칠기는 공구경로 사이의 가운데 지점에 위치한다.

Fig. 3 은 공구 정점이 가공면 생성에 참여하는 않는 (I) 영역의 R_{\max} 를 구하기 위하여 가공면의 특징 형상을 도시한 것으로서 커스는 동일하지만, 커터 마크에는 절삭잔량에 의한 돌출이 생긴다. 따라서 최대 표면 거칠기 또한 이 돌출부에 의하여 결정된다. 이 돌출부의 위치가 공구 경로의 오른쪽에 $r \sin \alpha$ 만큼 떨어져서 위치하고, 공구는 구면을 가

진다고 계산하면 표면 거칠기 식은 식(3)과 같이 얻을 수 있다.

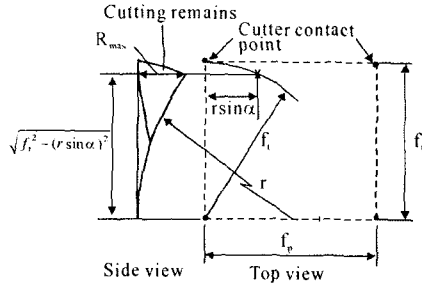
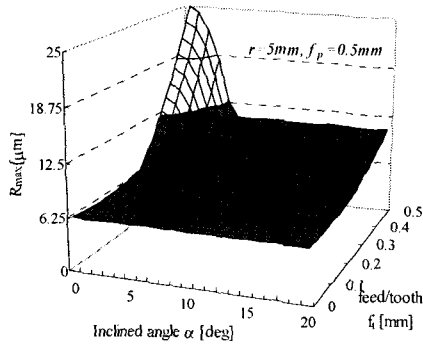
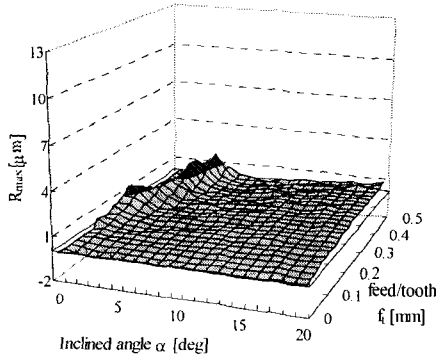


Fig. 3 Feature drawing of machined surface in the effect zone of dead center



(a) Extended surface roughness model



(b) Error map (max. error = 1.8μm)

Fig. 4 Extended surface roughness of the surface machined by ball-end mill

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

식 (3)은 공구반경이 주어졌을 때 날당 이송과 이송 경사각의 함수로 R_{\max} 를 표시하고 있으며, 경사각이 영일 때 최대가 된다. 그리고 임계경사각

이내 일 때 만 적용되고 임계경사각은 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, $A = f_p^2 + (f_i - p)^2$ 이고, $p = f_p/2\pi$ 이다. 따라서, 볼 엔드밀 가공면의 R_{\max} 는 식 (2)와 식(3)으로 표시되는 확장된 표면 거칠기 식으로 전 가공면을 나타낼 수 있다. Fig. 4에서 제안된 확장된 표면 거칠기 모델을 도식화하였고, 표면 거칠기 시뮬레이션 결과와의 오차를 도식하였다. 최대오차는 1.8μm 이고, 매 날당 이송에서 임계 이송 경사각 부근에서 나타난다.

3. 표면조건을 만족하는 NURBS 보간

3.1 표면 거칠기를 제한하는 이송속도 최적화

곡면의 거칠기를 제어할 수 있는 특별한 실시간 곡선 보간 알고리즘을 구현하기 위하여 공구 경로 정보로부터 이송 명령을 생성할 수 있는 간단한 지배방정식이 요구된다. 즉, CAM 시스템으로부터 공구 반경과 피치드 같은 기본적인 공정 변수가 지정되고, 추가로 목표 거칠기가 설정된다면 보간기에서 이송방향의 경사각을 입력받아 이송명령을 출력하게 되는 것이다. 2장에서 제안된 이송 경사각에 따른 2 가지 형태의 표면 거칠기 모델을 적용하면 밀링 가공면의 거칠기를 제어할 수 있는 이송량은 식 (5)와 (6)에 의하여 결정될 수 있다.

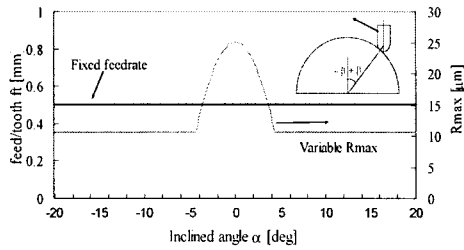
$$f_i = \frac{f_p}{2\pi} + \sqrt{8r \cdot R_{\max} - f_p^2} \quad |\alpha| > \alpha_c \quad (5)$$

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

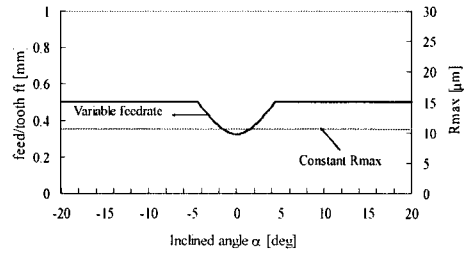
공구경로의 이송경사각이 현재의 날당 이송에서 임계경사각보다 클 때, 경험적으로 모델의 오차가 최소화 되도록 경사각이 $2\alpha_c$ 일 때의 위상 차로 계산하였다. 또한, 목표 거칠기는 이송방향과 이송의 직각방향에서의 거칠기가 같아지는 두 방향 등방면 (isotropic surface)의 최종 표면 거칠기로 추천하였다. 이러한 조건이 가공시간과 사상에 소요되는 시간을 줄이는데 유리하기 때문이다.

Fig. 5는 볼 엔드 밀로 실린더 형상을 상향/하향 밀링 가공할 때 이송경사각에 따른 날당 이송과 표면 거칠기와의 관계를 나타낸 것이다. 고정된 이송

으로 가공하면 표면 거칠기가 공구 정점이 가공에 참여한 부분에서 최고 2 배정도 악화됨을 알 수 있다. 그러나, 본 연구에서 제시한 변동이송을 적용하면 전 가공면에 걸쳐서 동일한 표면 거칠기를 얻을 수 있다. NURBS 곡선 보간에서는 하나의 NURBS 블록에 하나의 이송속도가 추천되므로 매 순간의 이송속도는 상황에 맞게 적절히 조정할 수 있어야 한다.



(a) Fixed federate



(b) Variable federate

Fig. 5 Relationship between the feed per tooth and the roughness

3.2 NURBS 곡선 보간

3 차원 매개변수 곡선은 일반적으로 $P(u) = [x(u) \ y(u) \ z(u)]$ 로 나타낼 수 있으며, 현재의 곡선상의 위치에서 다음 위치를 찾기 위하여 원하는 증분 거리 (Δs_d)를 $FT/60(\mu m)$ 으로 계산한다. 여기서 F 는 파트 프로그램에서 지정된 것이거나 최적화된 이송속도(mm/min) 이고, T 는 보간 주기(msec)이다. 거리 증분량에 해당하는 곡선 파라미터의 증분량 (Δu)을 구하기 위하여 고차항을 제거한 Taylor 시리즈로 근사한 식(7)을 사용하여 보간주기마다 회귀적으로 구할 수 있다.

$$u_{i+1} = u_i + \frac{\Delta s_d}{|\dot{P}(u)|} - \frac{\Delta s_d^2 \left(\dot{P}(u) \cdot \ddot{P}(u) \right)}{2|\dot{P}(u)|^3} \quad (7)$$

여기서, $\dot{P}(u) = dP(u)/du$ 이고, $\ddot{P}(u) = d^2P(u)/du^2$ 이다. 목표 표면 거칠기를 얻기 위한 거리 증분량은 두 날을 가진 볼 엔드 밀의 경우에 $2S_fT/60(\mu m)$

으로 구할 수 있다. 여기서 f_t 는 식 (5) 또는 (6)으로부터 구해진다.

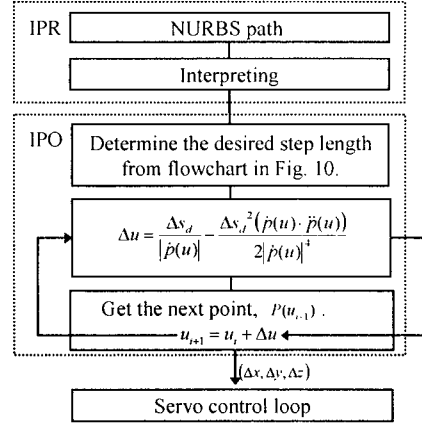


Fig. 6 Layout of the proposed curve interpolator

Fig. 6은 본 연구에서 구현한 특별한 이송속도 명령을 생성할 수 있는 NURBS 보간 알고리즘 흐름도를 나타내었다. 제안된 보간기는 크게 해석기 (IPR)와 보간기(IPO), 두 부분으로 구분된다. 해석기에서는 기본적인 코드 문법해석을 수행하고 보간기에서는 보간 오차 검사, 가감속 조정, 그리고 이송 최적화 기능이 포함된다. 이송 최적화는 목표 표면 거칠기를 달성하기 위하여 Fig. 7의 과정을 거쳐서 수행되었다.

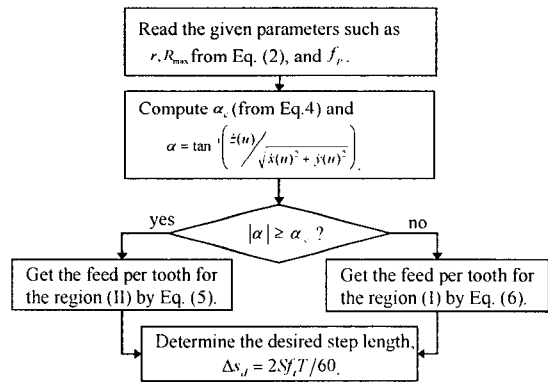


Fig. 7 Flowchart for getting a set of step length based on the target roughness

4 제안된 보간기의 평가

4.1 보간기의 적용

제안된 보간 알고리즘은 PC-NC로 재구성된 밀링 머신에 이식되었고, 윈도우 NT 기반에 실시간 처리를 보장하기 위하여 RTX (VentureCom Co.)를 사

용하였으며, 보간 주기를 4msec 로 설정하고, 실가공을 다음 가공조건에서 수행하였다. 공구반경 5mm, 피치드 0.5mm/tooth, 그리고 피삭재는 AI2024 이다.

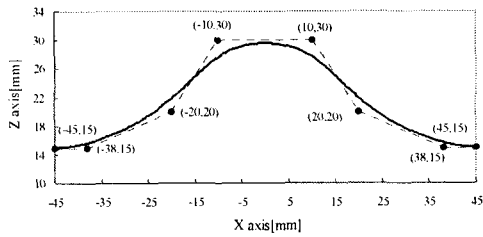


Fig. 8 An example of NURBS tool path designed for upward and downward milling (knot vector [0 0 0 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1 1 1])

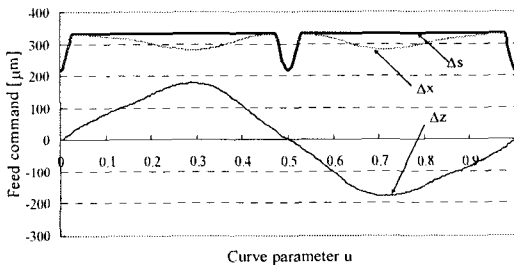


Fig. 9 Feed command controlled by proposed algorithm on a NURBS tool path

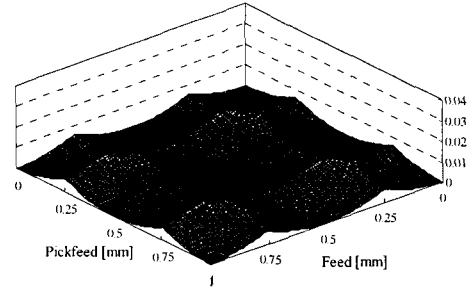
보간기의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 8 에 보이는 3 차의 NURBS 곡선 예제를 선정하였다. 먼저 하나의 NURBS 곡선 경로에 대하여 보간을 한 다음 이송속도 프로파일을 구하여 Fig. 9 에 나타내었다. 곡선 파라미터 0.5 부근에서 감속되는데 이는 공구정점이 가공에 참여하는 구간이어서 거칠기 요구조건을 만족하기 위하여 감속하는 것이고, 임계경사각은 4.3° 이다. 이송명령은 이 범위 내에서 원래의 이송속도의 65%까지 감속됨을 볼 수 있다. 이러한 이송경사각에 의존하는 변동이송이 가공품의 표면을 지정된 표면 거칠기로 유지할 수 있다.

4.2 실험 결과 및 고찰

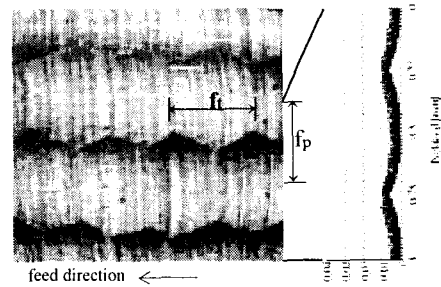
제시된 알고리즘을 적용한 경우의 가공면을 확인하기 위하여 Z-map 가공 시뮬레이션과 실가공면의 사진을 관찰하였다.

먼저, 이송경사각이 10° 일 때 가공면의 형상은 Fig. 10 과 같이 격자모양의 패턴을 나타내고 시뮬레이션 결과와 유사하게 보인다. R_{max} 는 키슝 높이와 커터마크 높이의 합으로 나타낼 수 있으며, Fig. 10(a)의 가공면 Z-map 시뮬레이션의 결과로부터

10.7 μ m 임을 알 수 있고, 이 값은 표면 거칠기 모델인 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 10.7 μ m 이므로 이송속도 조절이 요구되지 않는다.



(a) Simulated surface ($R_{max}=10.7\mu$ m)



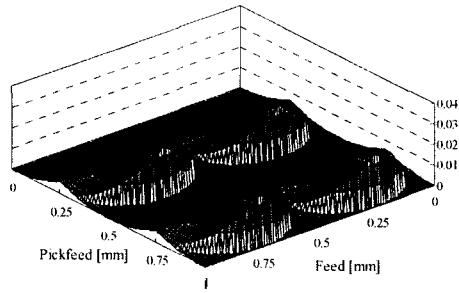
(b) Actual machined surface

Fig. 10 Machined surface when $\alpha=10^\circ$ and $f_t/f_p=1$

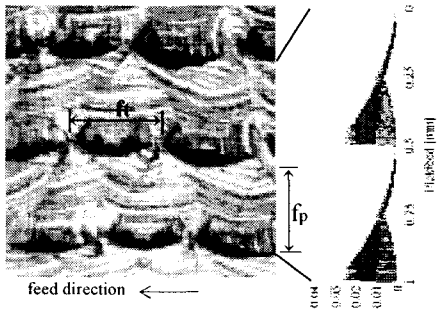
Fig. 11 은 이송 경사각이 0° 일 때 고정된 이송속도로 가공한 면이다. 공구 중심이 지나가는 자리에 돌출된 절삭잔량이 남아 있음을 볼 수 있고, 이 높이가 목표 거칠기의 2 배 이상이다. 실 가공면에서도 이러한 돌출된 부분이 관찰된다. 이 현상은 가공면의 Z-map 시뮬레이션으로부터 알 수 있듯이 공구정점 부근의 인선이 회전속도 보다 이송속도가 크게 되어 인선이 지나가지 않는 공간이 생기는데 이것이 가공물에 그대로 남아서 절삭잔량을 형성하게 된다. 실제 가공에서는 이 영역에서의 절삭속도(공구인선과 공작물의 상대속도)가 거의 0 에 근접하여 절삭현상이 아니라 러빙(rubbing) 같은 소성 변형이 일어난다.

정삭 가공면에서 이러한 중심부의 돌출부 생성을 억제하고 목표 거칠기를 얻기 위하여 식 (6)을 이용하여 경사각에 따라서 날당 이송을 적절히 줄여야 한다. 이를 적용하여 가공한 가공면을 Fig. 12 에 나타내었다. 이송경사각 0° 에서 R_{max} 를 10.2 μ m 로 줄일 수 있었고, 이 때의 날당 이송은 0.33mm

에 해당한다. 따라서 가공시간을 약간 증가시키고, 원하는 가공면을 보장할 수 있게 되었다. 이송경사각에 따라서 매 샘플링 시간 마다 최적의 이송을 자동적으로 계산하는 변동이송 보간 기법은 곡면 가공에서 가공면의 품질과 가공 효율 측면에서 모두 최선의 가공조건이 된다.



(a) Simulated surface ($R_{max}=24.9\mu\text{m}$)

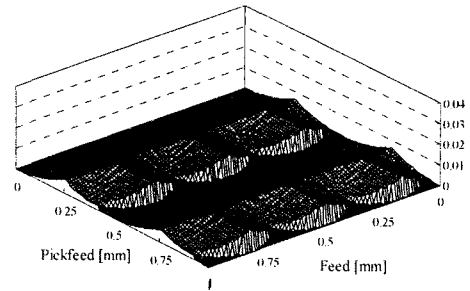


(b) Actual machined surface

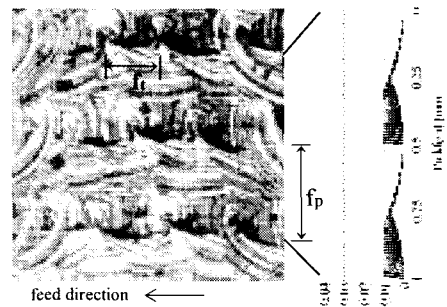
Fig. 11 Surface by the fixed feedrate when $\alpha=0^\circ$ and $f/f_p=1$

4. 결론

본 연구에서는 표면 거칠기 요구조건을 만족하는 변동이송 NURBS 보간 기법을 제안하였다. 특히, 고이송 가공에서 공구 정점부근의 인선이 가공면에 남기는 특이 돌출부를 효과적으로 대처할 수 있음을 보였다. 이를 위하여 확장된 표면 거칠기 모델을 기하학적인 인자로부터 유도하였고, 이를 PC-NC 기반에서 NURBS 곡선 보간 알고리즘에 적용하였다. 제안된 확장된 표면 거칠기 모델은 이송경사각의 정보만으로 표면 거칠기와 이송속도 사이의 관계를 정하므로 실시간 곡선 보간에 응용하는데 적합하였으며, 목표 표면 거칠기를 충분히 달성할 수 있었다.



(a) Simulated surface ($R_{max}=10.2\mu\text{m}$)



(b) Actual machined surface

Fig. 12 Surface controlled by the variable feedrate when $\alpha=0^\circ$ and $f/f_p=0.65$

참고문헌

1. S. S. Yeh and P. L. Hsu, 1999, "The speed-controlled interpolator for machining parametric curves," Computer-Aided Design, Vol. 31, pp. 349-357.
2. C. C. Lo, 1998, "A new approach to CNC tool path generation," Computer-Aided Design, Vol. 30, No.8, pp. 649-655.
3. R. T. Farouki, J. Manjunathaiah, D. Nicholas, G. F. Yuan and S. C. Jee, 1998, "Variable-feedrate CNC interpolators for constant material removal rates along pythagorean-hodograph curves," Computer-Aided Design, Vol. 30, No. 8, pp. 631-640.
4. R. S. Lin and Y. Koren, 1996, "Efficient tool-path planning for machining free-form surface," Journal of Engineering for Industry, Trans. of the ASME, Vol. 118, pp. 20-28.
5. B. H. Kim and C. N. Chu, 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.
6. N. Koreta, T. Egawa, M. Kuroda, K. Watanabe and Y. Li, 1993, "Analysis of surface roughness generation by ball endmill machining," Japan Society for Precision and Engineering, Vol. 59, No. 9, pp. 129-134(in Japan).
7. K. Naito, K. Ogo, T. Konaga, T. Abe, K. Kanda and M. Matsuoka, 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.