

NURBS 보간의 적용

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

Implementation of NURBS interpolator

I. H. Choi*, M. Y. Yang(Mech. Eng. Dept., KAIST),
K. J. Lee, C. B. Kim(Turbotek Co., Ltd. Research Center)

ABSTRACT

This paper deals with an implementation of NURBS interpolator and presents the process of its integration into PC-NC. For more accurate feed, NURBS algorithm is improved. Also, Evaluation of real time NURBS interpolator is provided to verify feed accuracy and geometrical accuracy of NURBS curve. NURBS machining of free surface is simulated on the real time NC simulator so that machining time is compared to that of linear path machining.

Key Words : NC(수치제어기), Interpolator(보간기), NURBS(비균일 유리 B-스플라인), Feedrate Accuracy(이송속도 정밀도)

1. 서론

대부분의 CAD 시스템은 부드러운 제품의 형상을 표현하기 위하여 NURBS 곡선을 이용하고 있으나, 이를 가공 단계로 이행하기 위하여 CAM/CNC 시스템에서는 미소 직선으로 분할된 공구경로를 사용함으로써 고속 정밀가공에 한계를 가지게 된다. 따라서, 본 연구는 공구경로 역시 NURBS 곡선을 이용함으로써 고속 정밀가공을 지원할 수 있는 NURBS 보간기를 설계하고, 개방형 제어기에 탑재하는 과정에 대하여 기술한다. 이를 위하여 3축 공작기계에 대한 매개변수 곡선 보간이론을 정립하고, NURBS 곡선으로부터 고속 정밀가공용 서보 명령을 생성하는 보간 알고리즘에 대하여 연구하였으며, 그 결과 CAM과 CNC사이에 NURBS 인터페이스를 사용하도록 하였다.

NURBS 보간기능을 탑재한 개방형 NC는 공작기계 업체에 고속고정도 가공의 기회를 제공할 것이며, 가공 효율과 생산성 향상에 기여하여서 제어기의 경쟁력을 증대할 것이다. NURBS 보간기를 개발하고 제어기와 통합하는 과정에 있어서 요구되는 기술적인 문제는 먼저, 곡선경로 보간 알고리즘, 고속이송 대응 공작기계 운동제어 기술, 그리고 실시간 처리 소프트웨어 프로그래밍 기술 등이 있다. 그리고, 고속 고정도 가공의 대안으로 주목받고 있는 NURBS 가공을 지원하는 NC를 확보함으로써 고속 이송을 위하여 설계된 공작기계의 고정밀 가

공을 실현하는데 기여할 것이다.

가공현장에서 NURBS 가공을 할 수 있으려면 CAM과 CNC 시스템에서 각각 이를 위한 준비가 필요하다. 즉, CAM 시스템에서는 공구 경로를 NURBS 형식의 NC 데이터로 출력할 수 있어야 하고, CNC에서는 이를 처리할 수 있는 NURBS 보간기를 갖추어야 한다. 본 연구의 목표는 NURBS 형식의 NC 데이터를 처리할 수 있는 NURBS 보간기능을 국내 T사의 PC-NC인 HX 제어기에 통합하고 성능을 테스트하는 것이다. NURBS 곡선 보간의 이산시간 처리와 효율적인 실시간 계산 알고리즘을 기존 NC 제어기와 연동되는 구조를 가지도록 통합하여야 한다.

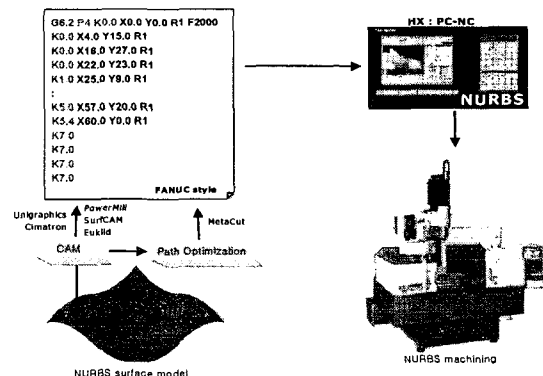


Fig.1 Overall layout for NURBS machining

Fig.1은 NURBS 가공의 전체 흐름을 보여준다. 일반적으로 자유곡면형상을 가진 제품은 NURBS 곡면으로 모델링 된다. 이를 고속 고정도로 가공하기 위하여 NURBS 형식의 공구 경로를 생성하고, 이를 제어기에 탑재된 NURBS 보간기가 가속된 이송 명령을 서보 계로 출력함으로써 NURBS 가공이 이루어진다.

NURBS G code는 황중삭이 아니라 3차원 형상의 정삭에 주로 응용이 되므로, 사용자가 형상을 보고 수동으로 G code를 작성하거나, 수정하는 작업은 거의 불가능하다. NURBS 경로를 표시하는 인자는 4가지 파라미터로 표시되어 되어서, 매 순간의 공구 위치를 XYZ의 좌표 값으로 일일이 기술할 필요 없이 제어점과 절점을 적절하게 설정하는 것만으로 희망하는 공구 궤적을 정의할 수 있다. 따라서, NC 데이터 량을 1/4~1/10가량 줄임과 동시에 가공경로의 궤도 정밀도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 실시간 NURBS 보간기를 PC-NC제어기와 통합하기 위한 방법론과 NURBS 보간기의 성능을 평가하고 그 결과에 기술하고자 한다.

2. NURBS 보간기의 통합

2.1 통합 구조

NC가 NURBS 보간기능을 갖추기 위하여 기존 NC 장치의 S/W 업그레이드 부분은 Fig.2에서 처럼 두 부분이다. NC에서 운동제어를 다루는 부분은 주로 NC 커널 속에 위치해 있는데, 크게 3가지 태스크(Basic, Interpolation, Servo Task)가 독립적으로 실행되고 있다. 「Basic task」에서는 입력된 NC 데이터를 해석하는 해석기를 포함하고 있는데, 여기에 NURBS 블록을 해석할 수 있는 모듈을 추가해야하고, 「Interpolation task」에서는 NURBS 보간 이론을 사용하여 매 순간 다음 위치를 계산하고 x-y-z축으로의 증분량을 지정할 수 있는 NURBS 보간 모듈이 추가되어야 한다.

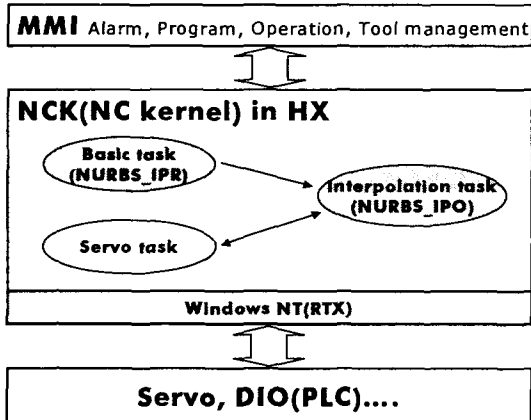


Fig.2 Structure of NURBS interpolating in the NC kernel

Fig.3는 NURBS 블록을 의미있는 단위로 버퍼링하는 방법을 나타내고 있다. 환형버퍼(circular buffer)를

사용하여 「Basic task」에서 해석된 NURBS 한 세그먼트에 대한 정보를 「Nurbsblock」이라는 클래스로 저장한다. 그리고, 저장된 자료는 「Interpolation task」에서 매 샘플링시간마다 다음 점을 계산하는데 사용된다. 이때, 허용 오차검사(Tolerance check)와 곡률 반경을 고려한 증분량을 출력한다. 그 다음 「Servo task」에서 서보 드라이브로 제어명령을 내보낸다. 「Basic task」에서는 버퍼가 가득 차있지 않으면 버퍼링을 수행하고, 가득 찼으면 아이들링 한다. 그리고, 「Interpolation task」에서는 버퍼가 비어있지 않으면 꺼내와서 보간을 수행하고, 비어 있으면 아이들링한다.

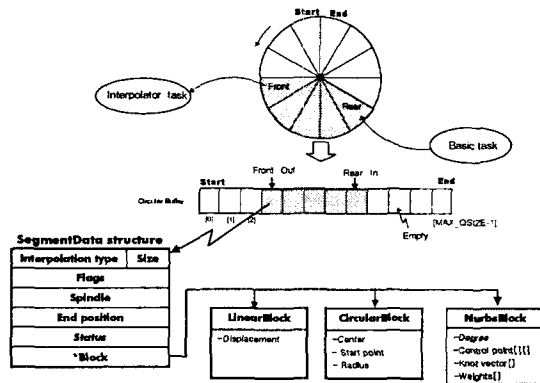


Fig.3 NURBS segment buffering

2.2 NURBS 보간 Library

NURBS 보간 라이브러리와 제어기사이의 인터페이스를 위하여 처리하여야할 작업을 아래에 기술한다. 4개의 주요 Class를 가지며, 이를 총괄하여 Process를 관리하는 전역함수 NurbsTaskFunc()가 있고, OnCycleStart() 함수가 실행되면서 모든 Class가 초기화되고 두개의 독립적인 스레드(Interpret ThreadProc(), InterpolateThreadProc())가 시작된다.

NURBS 보간의 상태 플래그들 각 클래스가 수행되는 동안 해당 루틴의 현 상태를 표시하며, 항상 모니터링 되어야 한다. Fig.4에 「NURBS-NC」의 전체적인 클래스 구조와 각 멤버변수와 멤버함수를 나타내었으며, 상세 내용은 아래에 기술한다.

[해석기]

- InterpretThreadProc()은 NURBS G code를 받아서 버퍼에 채워넣는 작업을 수행한다. 최소 8 라인이 입력되면 한 곡선 세그먼트를 계산할 수 있는 정보를 확보한다. 버퍼의 사이즈가 MAX_BLOCK_BUFFER가 될 때까지 버퍼가 빈 곳이 있는지를 매번 확인해서(nEntries를 검사) 계속 채워 넣는다.

[보간기]

- InterpolateThreadProc()은 버퍼에 있는 CNurbsBlock 한 세그먼트를 받아서 매 샘플링 시간마다 위치 증분량을 계산하는 스레드이며, 5msec 마다 수행한다.

- STAGE_BLOCK_EMPTY : 초기화 상태로서 Extract OneBlock()로 버퍼에 있는 한 세그먼트에 대한 정보를 빼와서 m_pCurrBlock에 링크 한다. 그리고 상태를 STAGE_BLOCK_READY 상태로 만든다.
- STAGE_BLOCK_READY : 보간준비가 된 상태로서 한 세그먼트에 대한 보간하기 위하여 Interpolate OneBlock()를 호출한다.
- STAGE_BLOCK_RUN : 세그먼트 안쪽을 처리중인 상태이며, STAGE_BLOCK_READY 와 같은 작업을 하면 된다.
- 상태가 STAGE_BLOCK_END_OF_RUN 이면서 m_bEndOfBlock가 TRUE면 InterpolateThreadProc()를 종료한다.

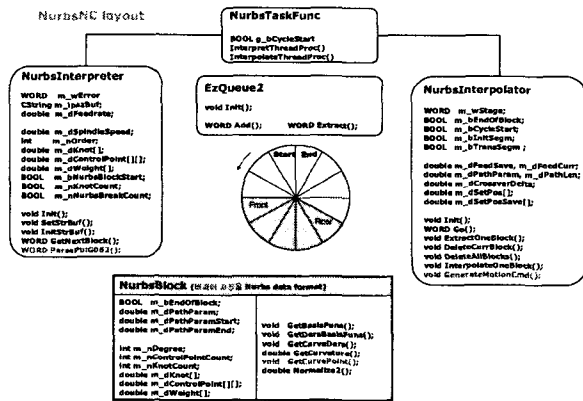


Fig.4 Layout of class in 「NurbsNC」

3. NURBS 보간 성능

3.1 속도 정밀도(Feed accuracy)

공구 경로로서 NURBS 수식을 이용하면 보간점은 정확히 곡선위의 점이 되지만, 이송속도는 NURBS의 비균일 특성 때문에 지령 이송속도와 차이가 있다.

$$u_{i+1} = u_i + \frac{VT}{\left| \frac{dP(u)}{du} \right|} - \frac{(VT)^2 \left(\frac{d^2P(u)}{du^2} \cdot \frac{dP(u)}{du} \right)}{2 \left| \frac{dP(u)}{du} \right|^3} \quad (1)$$

즉, 1차 근사식이나 2차 근사식(1)으로부터 구한 이송속도와 지령속도는 (2)처럼 같지 않다.

$$\frac{P(u_{i+1}) - P(u_i)}{T} \neq V \quad (2)$$

곡선 보간을 구현하는데 있어서 정확한 이송속도를 출력하는 것이 중요하다. Fig.5에서 (a)는 1차 근사에 의한 알고리즘이고 (b)는 2차 근사에 의한 알고리즘에 해당한다. 여기서 지령속도에 의한 기준 이송거리는 ΔS_d 이고 보간후 운동 명령은 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 이다. 결국, 이송속도와 지령속도의 차이를 확인하기 위하여 Fig.6의 (a)와 (b)에서 1차근사와 2차근사에 의한 보간결과인 이송속도를 나타내었다.

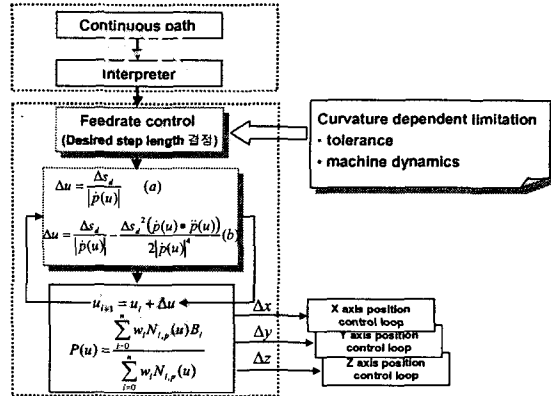
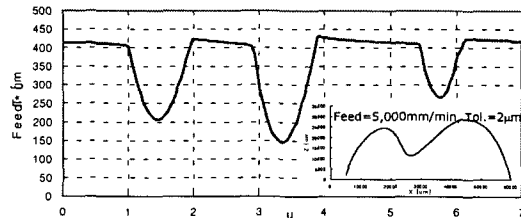
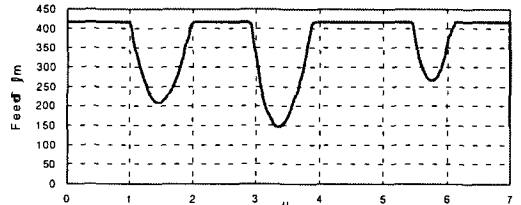


Fig.5 Approximation in the NURBS interpolation



(a) 1st approximation



(b) 2nd approximation

Fig.6 Feedrate profile by NURBS interpolation

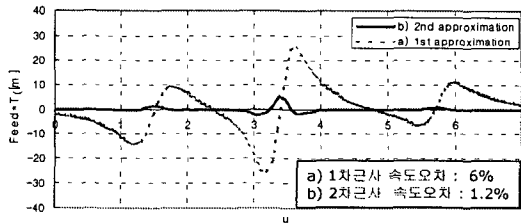


Fig.7 Feedrate accuracy

지령이송이 5000mm/min이고, 이를 지령단위로 환산하면 $\Delta S[\mu m] = \text{Feed} [\text{mm}/\text{min}] \cdot \text{Time}[\text{msec}]/60. = 5000 \cdot 5/60 = 416.667[\mu m]$ 가 되어 이송속도 오차(a)는 최대 $\pm 25\mu m$ 로서 최대 6%의 속도오차를 보인다. 이에 비하여 (b)의 최대속도 오차는 $5\mu m$ 로서 최대 1.2%의 속도 오차를 가진다. Fig.7은 속도 오차를 비교한 것을 보여주며, 2차 근사로 보간하는 것이 속도정밀도가 5배 향상됨을 알 수 있다.

3.3 경로 정밀도(Path accuracy)

NURBS 곡선 보간의 경우에는 선형보간기가 오차를 CAM에서 지정되어 오는 것과 달리 보간기 내에서 최대 보간오차를 지정함으로써 경로의 정밀도를 지정한다. Fig.8에서 보이듯이 NURBS 보간점을 잇는 직선과 실제 NURBS 곡선사이의 보간오차는 식(3)로부터 구할 수 있다.

$$\varepsilon = |\bar{\varepsilon}| = |\bar{M} - (\bar{M} \cdot \bar{p})\bar{p}| \quad (3)$$

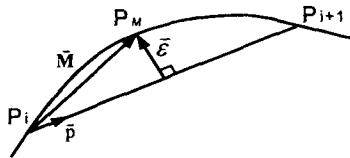


Fig.8 Interpolating error

여기서, \bar{p} 는 선분 $\overline{P_i P_{i+1}}$ 의 단위벡터이며, 점 P_M 은 선분 $\overline{P_i P_{i+1}}$ 이 충분히 작다면 u 가 $(u_i + u_{i+1})/2$ 인 점으로 가정할 수 있다.

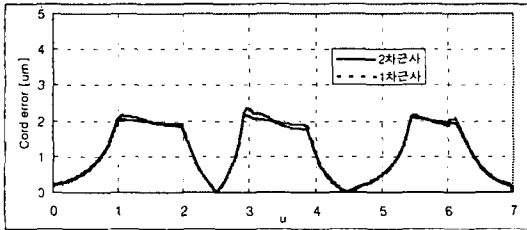


Fig.9 Path accuracy

Fig.9는 보간오차를 식(3)에 의하여 계산한 것으로 2 μ m이하의 보간오차 제한을 잘 따르고 있음을 알 수 있다.

4. 실 가공 검증

NURBS 보간 기능을 터보테크의 PC-NC인 HX 제어기에 통합을 완료하였고, NC와 동일한 성능을 가진 시뮬레이터에서 시험하였다. Fig.10과 같은 NURBS 곡면을 모델링하여 변환 오차 0.01mm로 설정된 NURBS NC 데이터를 생성하였다.

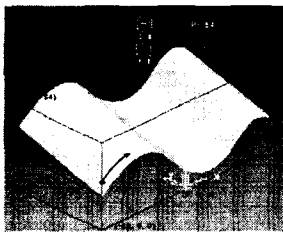


Fig.10 NURBS surface model

NC 작업사양은 이송속도 3000mm/min, $\phi 6$ 볼 엔드밀로 일방향 가공을 하도록 하였다. Table 1은 같은 가공면에 대하여 NURBS 보간과 미소블록 NC 가공에 대하여 비교한 것이다. G01 NC 데이터는 CAM에서 공구경로 생성시에 보간오차를 지정한 것이고, NURBS 데이터는 NC의 제어 파라미터로 지정하여 가

공 단계에서 지정할 수 있다. NURBS 가공이 보간오차를 줄이면서 가공시간을 단축할 수 있음을 보여준다.

Table 1 Comparison of NURBS and linear block

구분	미소블록 G01	Nurbs 블록 G06.2
프로그램이름	Nurbs_G01.nc	Nurbs_G62.nc
NC 블록수	20392 block	5529 block
실제 처리 블록 수	20392 block	64224 block (max_step=0.25mm)
총 가공 길이	29213.137mm	29213.432mm
지령 Feed	3000mm/min	3000mm/min
실 가공시간	7분 38초	5분 19초
Tolerance	10 μ m (by CAM)	5 μ m (by parameter[173])

Main CPU : Pentium 450MHz
 * (보간전 가감속 시정수) = 50msec

5. 결론

NURBS 보간 알고리즘과 실시간 보간 S/W를 PC-NC 제어기에 통합을 완료 하였고, 속도 정밀도 최대 1.2% 오차범위 이내로 지령 이송속도를 생성할 수 있으며, 최대 보간오차는 지정된 파라미터에 의하여 NC에서 조절할 수 있도록 하였다. NURBS 제어기 파라미터인 가감속 시정수와 최대보간오차 등 NURBS 보간 제어 파라미터를 선정하는데 있어서 가공기계의 동특성과 가공 목적에 따라서 안정화 작업이 요구된다.

후기

본 연구는 2002년도 산업자원부의 중기거점과제 일환으로 터보테크(주)의 연구비 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- J.J. Chou and D.C. H. Yang, "Command generation for three axis CNC machining," J. of Eng. for Industry, Vol.113, pp. 305-310, 1991.
- J.J. Chou and D.C. H. Yang, "On the generation of coordinated motion of five-axis CNC/CMM machine," J. of Eng. for Industry, Vol.114, pp. 15-22, 1992.
- J.T. Huang and Daniel C.H. Yang, "A generalized interpolator for command generation of parametric curves in computer-controlled machines," Japan/USA Symposium on Flexible Automation, Vol.1, ASME, pp. 393-399, 1992.
- Y.J.Lin, and T.S. Lee, "An adaptive tool path generation algorithm for precision surface machining," Computer-Aided Design, Vol. 31, pp.237-247, 1999.
- Daniel C.H. Yang and Tom Kong, "Parametric interpolator versus linear interpolator for precision CNC machining," Computer-Aided Design, Vol. 26, No.3, pp.225-234, 1994.
- Chih-Ching Lo, "A new approach to CNC tool path generation," Computer-Aided Design, Vol. 30, No.8, pp.649-655, 1998.
- S.S. Yeh and P.L. Hsu, "The speed-controlled interpolator for machining parametric curves," Computer-Aided Design, Vol 31, pp.349-357, 1999.