

개방형 수치제어 장치를 위한 범용 NURBS 보간기

An Universal NURBS Interpolator for an Open Architected CNC controller

*강성균

현대정공 기술연구소 공작기계 연구부(Tel:0331-284-3111; Fax:0331-284-0341)

Abstracts An universal NURBS interpolation for an open architected CNC controller is proposed in order to unify internal data structure and algorithm of different interpolations such as linear, circular and spline, and to intelligently interface CAD database of the various workpiece contour. Furthermore, NURBS interpolation may result in better surface roughness and high speed machining due to the continuous generation of cutter movement. The mathematical manipulation of NURBS is presented and the practical implementation on the CNC controller of a lathe is discussed for real machining. The comparison between a computer design and workpieces machined on a lathe shows the feasibility of the NURBS interpolation format as an universal interpolation scheme.

Keywords CNC controller, NURBS(Non-Uniform Rational B Spline), NCK(Numerical Control Kernel), Rough Interpolation, Fine Interpolation.

1. 서론

최근 수치제어 장치의 경향은 고속, 고정도 가공을 위한 기능을 요구할 뿐 아니라, 다양하고 복잡한 윤곽을 편리하게 가공을 할 수 있는 고기능도 요구하고 있다. 이러한 요구 사항은 기존의 선형 또는 원호 보간법을 응용한 프로그램 처리 방법의 한계성 때문에 근본적인 해결 방법이 필요하게 되었으며, 이를 위하여 스플라인(spline), 인볼루트(involute), 헬리컬(helical)등의 다양한 보간 기법이 개발되고 있다[6]. 하지만 이러한 보간법들은 수치제어 장치 내부에 폐쇄적으로 적용되어 있으며, 각각 다른 구조 및 알고리즘을 사용하기 때문에 개방성 및 모듈성이 보장되지 않는다. 따라서 개방형의 수치제어 장치를 위해서는, 보편적으로 널리 사용되며 단일 구조로서 직선, 원호, 자유 곡선등 모든 형태의 곡선을 표현할 수 있는 방법이 요구된다. 또한 종래의 수치제어 장치에서는 자유 곡선을 직선 및 원호로만 구성된 짧은 공구의 운동으로만 정의함으로써 단속적인 공구의 움직임이 형성되어 가공면의 조도가 양호하지 않는 현상이 발생하며, 이러한 프로그램은 많은 G code 블록을 포함하고 있어, 가공 프로그램의 길이를 증가시킨다. 따라서 1개의 블록으로 다양한 종류의 직선 및 곡선을 표현하고, 또한 정의된 1개의 블록을 각각 한번씩의 가속과 감속으로 연속적으로 이동할 수 있는 방식이 필요하다.

이와 같은 범용의 형상 정의 방식과 고속 및 고정도 가공을 가능하게 하기 위해서, 본 논문에서는 일반적인 곡선 정의 방식인 NURBS(Non-Uniform Rational B Spline)을 사용한 보간법을 제안한다. 이미 많은 CAD 시스템에서는 형상을 정의하기 위해 NURBS를 사용하고 있기 때문에[5], NURBS 보간법의 또 다른 장점으로, 이미 NURBS로 작성된 CAD 데이터를 직접 입력하면, 수치제어 장치는 내부적으로 NURBS 보간을 시행하여, 최종 형상을 위한 공구 이동 궤적을 생성할 수 있다는 것이다. 결론적으로, 다수의 수치제어 장치가 개방형의 구조를 가지고, 또한 동일한 포맷의 범용 NURBS 보간 기능을 채택하게 되면, 각

기 다른 폐쇄형 수치제어 장치에 기인한, 후처리(postprocess) 과정을 제거할 수 있다는 점에서, 개방형의 수치제어 장치를 지향하는 기본적인 개발 방향이라 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 개방형 수치제어 장치를 위한 범용 NURBS 보간기의 알고리즘을 제시하였으며, 2축 선반용 수치제어 장치에 NURBS 보간 기능을 이식하였으며 실제 가공 실험을 통하여 NURBS 보간기의 유용성을 검증하였다.

2. 수치제어 장치의 구조 및 주요 기능

수치제어 장치의 기본 구성요소는 보간 및 위치 제어를 담당하는 NCK(Numerical Control Kernel)모듈과 가공을 위한 공구의 이송을 정의하는 파트 프로그램(Part Program) 작성 및 기계 사용자를 위한 인터페이스를 제공하는 MMC (Man Machine Communication)모듈 그리고 서보 제어를 제외한 기계적 감시 및 제어를 담당하는 PLC(Programmable Logic Control)모듈의 3가지로 대분할 수 있다. 본 연구의 주 대상인 NCK모듈의 구조 및 기능이 그림1에 보이고 있다.

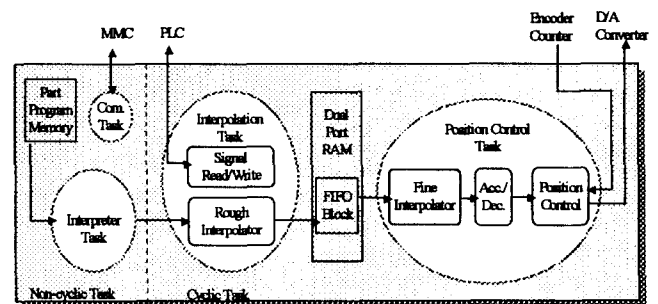


그림 1. NCK S/W의 구조 및 기능
Fig. 1. The structure and functionality of NCK S/W

즉 파트 프로그램을 한 Block씩 읽어 해석기(interpreter)에서 블록의 명령 구조를 분석하여 내부 데이터 블록에 기록하며, 이 해석된 내용은 2개 이상의 축이 동시에 지정된 속도로, 지정된 위치로 이동하도록 명령을 배분 및 조정하는 근사적 보간기(Rough Interpolation)를 거쳐, FIFO Buffer에 저장된 직선 정보를 각 축이 이동하여야 할 거리 데이터로 변환하는 상세 보간(Fine Interpolation) 및 기계적 특성을 고려한 가감속 제어를 경유하여, 최종적으로 각축이 원하는 위치를 따라가도록 지속적인 피드백 제어를 수행하는 위치 제어부동의 구조로 구성되어 있다.

이상의 NCK 기능들은 일정하게 정의된 샘플링 시간에 의해서 실행되는 sampled data방식으로서, 크게 실시간 운영체제(real time operating system)의 가로채기(interrupt)에 의해 일정한 시간 간격으로 실행되는 cyclic 기능과 cyclic 기능이 우선적으로 실행되고 남은 여분의 시간에 실행되는 non-cyclic 기능으로 구분할 수 있으며, 보간기능은 cyclic 기능으로서 수치제어 장치에 따라 다르지만 4- 10 ms 정도의 시간내에 처리되어야 하는 기능이다.

3. NURBS 곡선 및 보간기 설계

NURBS곡선의 수학적 표현과 다양한 곡선을 표현할 수 있는 범용성을 간략히 살펴보고, 이를 바탕으로 NURBS 보간기의 적용 알고리즘을 설계한다.

3.1 NURBS곡선의 정의

일반적으로 곡선이나 곡면을 나타내기 위해 여러 가지 수학적 정의들 즉, Cubic-spline, Coons, Bezier, B-spline등이 존재하며, 이들은 각기 다른 특징들을 가지고 있다. 그 중에서 B-spline의 경우에는 형상의 정의가 간편하며, 조정점(control point)의 이동에 따른 형상의 변화가 전체 곡선이 아닌 조정점 근처에 국부적(local)으로 작용하는 점과, 곡면이 2차 미분가능하여 매끄럽다는 장점들을 가지고 있다.

이러한 B-spline을 일반적인 형태로 정의하면

$$P(u) = \sum_{i=1}^{N+1} B_i \cdot N_{i,k}(u) \quad u_{\min} \leq u < u_{\min} + 1, \quad 2 \leq k \leq n+1 \quad (1)$$

이며, 여기서 P(u)는 스플라인 위치 벡터, B_i는 조정점 벡터이며, N_{i,k}(u)는 B-spline의 basis 함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1, & x_i \leq u < x_{i+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

and

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u-x_i)N_{i,k-1}(u)}{x_{i+k-1}-x_i} + \frac{(x_{i+k}-u)N_{i+1,k-1}(u)}{x_{i+k}-x_{i+1}} \quad (3)$$

또한 B-spline을 정의하기 위한 segment별 노트(knot)벡터는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} x_i &= 0 & 1 \leq i \leq k \\ x_{i+k} &= \left(\frac{\left(\frac{i}{n-k+2} \right) c_{i+1} + \sum_{j=1}^i c_j}{\sum_{i=1}^n c_i} \right) (n-k+2) & 1 \leq i \leq n-k+1 \quad (4) \\ x_i &= n-k+2 & n+1 \leq i \leq n+k \end{aligned}$$

여기서 C_i = |B_{i+1} - B_i|, 즉 조정점간의 chord 길이를 의미한다.

이상과 같이 정의된 일반적인 B-spline에 해당 조정점으로 곡선을 끌어 당기는 factor인 h_i와 다양한 곡선을 표현하기 위해 유리함수(rational function)로 표현한 일반적인 NURBS는 다음과 같이 표시된다.

$$P(u) = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} B_i \cdot h_i \cdot N_{i,k}(u)}{\sum_{i=1}^{n+1} h_i \cdot N_{i,k}(u)} = \sum B_i \cdot R_{i,k}(u) \quad (5)$$

$$\text{where } R_{i,k}(u) = \frac{h_i \cdot N_{i,k}(u)}{\sum_{i=1}^{n+1} h_i \cdot N_{i,k}(u)}, \quad h_i \geq 0$$

이때 두 조정점간의 가중치를 조정함으로써 기존의 수치제어 장치에 적용되고 있는 직선 및 원호를 정의할 수 있다. 즉 h_i = 0의 경우에는 직선을 형성하고, 0 < h_i < 1일 경우에는 타원을 형성한다. 특히 h_i = 1/√2 일때 원호가 정의된다. NURBS의 자세한 설명은 참고문헌 [1][2][4]을 참조하십시오.

이상에서 논의된 NURBS의 수학적 모델을 이용하여 곡선의 차수가 3인(k=3) 일반 곡선 및 직선, 원호를 생성한 예가 그림 2, 그림 3, 그리고 그림 4에 각각 보여지고 있다.

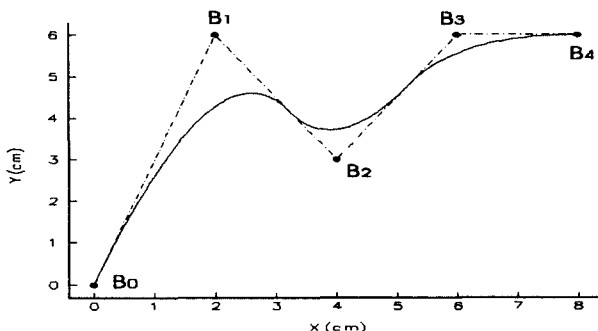


그림 2. 조정점과 spline 곡선

Fig. 2. Control points and spline curve

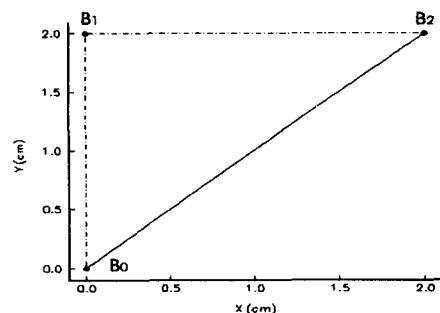


그림 3. NURBS를 이용한 직선의 실현

Fig. 3. Line drawing using NURBS

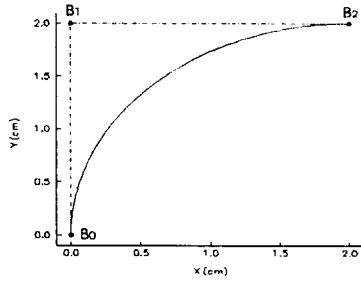


그림 4. NURBS 를 이용한 원호의 실현
Fig. 4 Arc drawing using NURBS

3.2 NURBS 보간 알고리즘

식(5)를 통하여 정의된 NURBS를 수치제어 장치에 실현하기 위해 근사적 보간(rough interpolation)과 상세 보간(fine interpolation)의 2단계로 나누어서 보간기능이 구현된다.

3.2.1 근사적 보간

수치제어 장치의 보간 방법에는 크게 Sampled Data방식과 Reference Pulse방식으로 나눌 수 있는데[3], 본 논문은 일정한 주기의 Cyclic방식을 근간으로 한, Sampled Data 방식을 적용하였다. 따라서 보간의 Sampling 시간, T_s 를 고려하여 단위 Feedrate를 계산하면

$$F_{unit} = \frac{F[\text{mm/rev}] \cdot \text{RPM}[\text{rev/min}] \cdot T_s[\text{ms/sampling}]}{60000[\text{ms/min}]} \quad (6)$$

와 같으며, 이는 단위 Sampling Time에 대한 이송 거리로서 표현되어 진다

정의된 곡선을 서보의 이동으로 변환하기 위해서는 절삭 가공에 필요한 공구의 이송 속도(Feedrate)를 고려한 방식이 요구되며, 제안된 알고리즘이 그림 5에 보이며, 적용 순서는 다음과 같이 설명되어진다

```

Procedure NURBS_IPO(·)
begin
  RPM = Velocity / (π * Diameter);
  Funit = Feed * RPM * Ts / 60000;
  While(Ui ≤ xmax) {
    ΔU = Funit * feed override;
    Ui = Ui-1 * ΔU;
    call NURBS(Ui, Xe, Ye);
    call NURBS(Ui, Xc, Yc);
    call ERROR(Xe, Ye, Xc, Yc, Δε);
    if (Δε ≤ δ)
      call FIFO(Xe, Ye);
    else
      call FIFO(Xc, Yc);
      call FIFO(Xe, Ye);
    endif
    Xs = Xe; Ys = Ye;
  }
end;

```

그림 5. NURBS보간 알고리즘
Fig. 5. The algorithm of NURBS interpolation

곡선상의 이동 벡터를 단위 feedrate, feed override를 고려하여 산출하고

$$U_i = U_{i-1} + \Delta U \quad (7)$$

$$\Delta U = F_{unit} * \text{feed override}$$

NURBS 정의 식(7)과 식(5)를 이용하여 현 segment의 좌표 (X_e, Y_e) 를 계산한다. 또한 현 Segment의 현과 Curve의 중간 점과의 거리 $\Delta \epsilon$ 는 그림6을 이용하여 정의하며, 중간점 (X_c, Y_c) 는 $U_t = U_{i-1} + \Delta U / 2$ 일때의 좌표 값이다.

$$\Delta \epsilon = \Delta y \cos \theta$$

$$\Delta y = Y_c - Y_s - y'(X_c - X_s)$$

$$\theta = \tan^{-1}[y'] \quad (8)$$

$$y' = (Y_c - Y_s) / (X_c - X_s)$$

3)상기에서 계산된 $\Delta \epsilon$ 가 허용 Error, δ 범위 이내인지를 확인하고, 허용 Error범위 이내면 현 좌표를 모터 이동용 좌표로 하고, 허용 범위 보다 크면 Segment를 이등분하여, 1차로 (X_c, Y_c) 를, 2차로 현 좌표를 FIFO block로 저장한다.

4)Segment 중점 좌표를 다음 Segment의 시점으로 치환한다.

5)이와 같이 Sequence를 1)번에서 4)번까지를 U_i 가 x_{max} 에 도달할때까지 반복 처리한다.

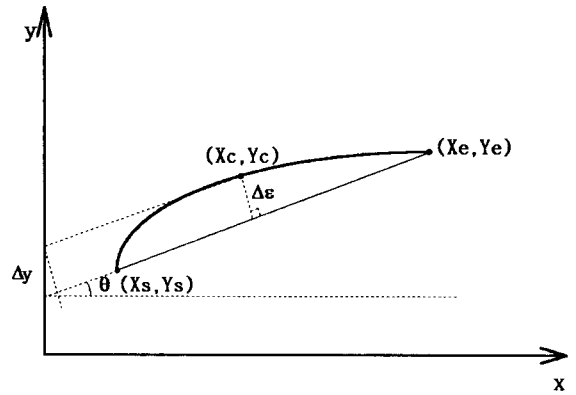


그림 6. 한 Segment내의 Error량
Fig. 6. The error in one segment

3.2.2 상세 보간

상기의 3.2.1절에서 서술한 보간 과정은 곡선을 근사적으로 보간하여 허용오차를 만족하는 직선화된 데이터를 얻는 과정이었기에, 상세 보간법은 직선화된 데이터들을 이용하여 직선 보간을 시행하는 단계로서, 근사 보간된 이동거리를 위치제어 loop의 단위 Sampling Time에 해당되는 직선으로서 나누어서 각 축으로 분배한다.

이와같은 근사적 보간 및 상세 보간을 거친 데이터는 축 이송을 위한 가감속 모듈에 전달되고, 계속해서 위치 제어 모듈에 전달이 된다. 가감속은 보간전 및 보간후에 시행할 수 있는데 일반적으로 보간후 가감속을 계산상의 이득때문에 선호하여 사용하고 있다.

4. 적용

유도된 NURBS 보간의 알고리즘을 그림 7의 구조로 개발된 2축 선반용 수치제어 장치에 적용하였다. 근사적 보간 알고리즘은 i80960 CPU상에서 실행되고, 상세 보간은 ADSP2105 CPU상에서 실행되도록 구현하였으며, 두 CPU간의 데이터 수송은 공통 RAM(dual port RAM)을 통하여 이루어지며, 근사적 보간의 sampling time은 5ms로 설정되었다.

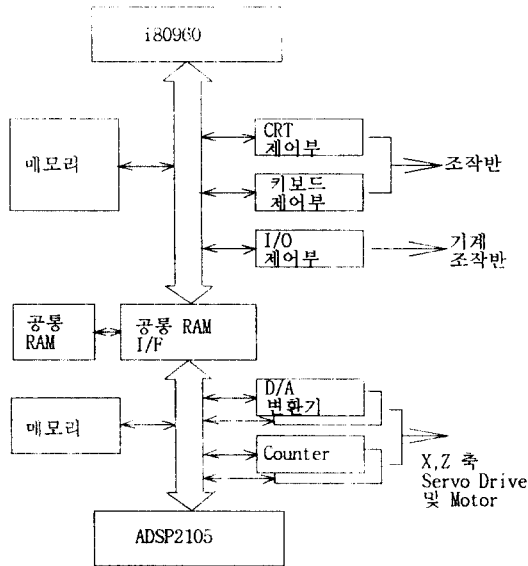


그림 7. 2축 수치제어 장치의 H/W 구조

Fig. 7. H/W structure of 2 axes CNC controller

5. 수치제어 선반에서의 가공 예

NURBS 보간을 적용한 수치제어 장치를 현대정공의 HiT-6G Gang Type 선반에 장착하여 실제 가공을 통하여 그 유용성을 검증하였다. 그림 8은 임의의 곡선 형상을 가진 가공 대상을 design한 것이며, 그림 9는 선반에서 feed rate 0.3 mm/rev와 선 속도 260 m/min, 그리고 feed override를 계속적으로 100%만을 적용하여 가공한 최종 형상을 보이고 있다. 그림 10은 가공중에 수치제어 장치에서 근사적 보간이 수행된 후의 값을 수집한 데이터로서 가공물의 상단 profile을 나타내고 있으며, 수집된 보간 데이터 및 최종 가공물의 형상은 design된 형상과 동일함을 보여주고 있다.

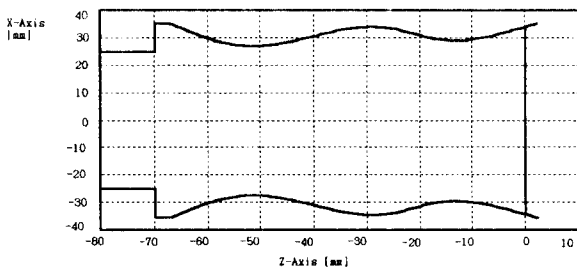


그림 8. 임의의 곡선을 가진 가공 대상

Fig. 8. Workpiece shape with arbitrary curve

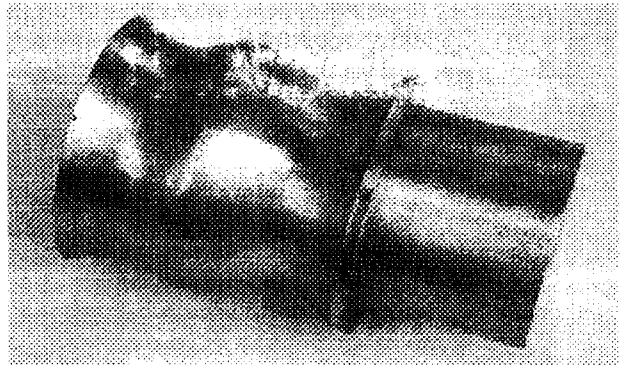


그림 9. NURBS보간이 적용된 가공품

Fig. 9. Workpiece generated by NURBS interpolation

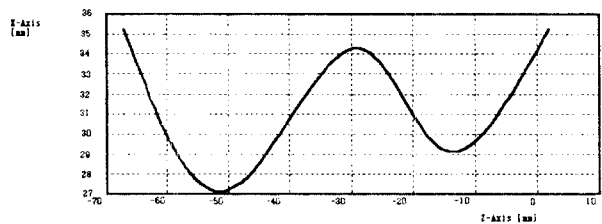


그림 10. 근사적 보간 수행후 수집된 데이터

Fig. 10. The acquired data after rough interpolation

6. 결론

수치제어 장치에서 복잡한 윤곽 가공을 위한 곡선 보간법으로서, 직선, 원호를 포함하는 자유 곡선을 단일 포맷으로 적용할 수 있는 범용 NURBS 보간 방식이 제시되었으며, 2축 수치제어 장치에 제안된 보간 기능을 구현하였다. 가공 실험을 통하여 NURBS 보간의 적용성을 실현함으로써, 개방형 수치제어 장치에 개방형 또는 범용의 보간기로 NURBS 방식이 유효함을 검증하였다.

참고문헌

- [1]Anand, V. B., "Computer Graphics and Geometric Modeling for Engineers", Wiley, 1993.
- [2]Foley, J., "Computer Graphics -Principles and Practice", ADDISON WESLEY, 1990
- [3]Koren, Y., "Reference-Word Circular Interpolators for CNC systems", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, Nov. 1982, pp. 400-405
- [4]Piegl, L., "On NURBS: A Survey", IEEE Computer Graphics & Applications, pp.55-71, January 1991.
- [5]Rogers, D. F. and Adams, J. A. "Mathematical Elements for Computer Graphics" 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc., 1990.
- [6]SINUMERIC 840C software Version 1 --- Programming Guide, 1993.