

NURBS 곡면의 3축 CNC 가공을 위한 실시간 공구경로 생성

구 태 훈* · 지 성 철†

(2003년 3월 31일 접수, 2003년 6월 13일 심사완료)

Real-Time Tool-Path Generation for 3-Axis CNC Machining of NURBS Surfaces

Taehoon Koo and Sungchul Jee

Key Words : Tool-Path Planning(공구경로 계획), Iso-Scallop Method(등스칼롭 방법), CNC(컴퓨터 수치제어), Surface Machining(곡면가공), NURBS(비균일 유리 B 스플라인), Interpolator(보간기)

Abstract

In CAD systems, a surface to be machined is expressed by a series of curves, such as B-spline, Bézier and NURBS curves, which compose the surface and then in CAM systems the curves are divided into a large number of line or arc segments. These divided movement commands, however, cause many problems including their excessive size of NC data that makes almost impossible local adjustment or modification of the surface. To cope with those problems, the necessity of real-time curve or surface interpolators was embossed. This paper presents an efficient real-time tool-path generation method for interpolation of NURBS surfaces in CNC machining. The proposed tool-path generation method is based on an improved iso-scallop strategy and can provide better precision than the existing methods. The proposed method is designed such that tool-path planning is easily managed in real-time. It proposed a new algorithm, for regulation of a scallop height, which can efficiently generate tool-paths and can save machining time compared with the existing method. Through computer simulations, the performance of the proposed method is analyzed and compared with the existing method in terms of feedrate, total machining time and a degree of constraint on the scallop height.

1. 서 론

컴퓨터 수치제어(CNC)는 공작기계에 적용된 이래 기계가공의 자동화에 크게 기여해왔고 많은 보급을 이룬 현재, 금형가공을 비롯한 여러 분야에서 쓰이고 있다. 그 중 보편적으로 쓰이고 있는 3축 머시닝센터를 이용한 윤곽가공에 있어서는 과거 간단하고 단순한 형태의 가공에서부터 출발하

여 현재 복잡하고 굴곡이 많은 곡면가공을 요구하게 되었다. 일반적인 CAD 시스템에서는 복잡한 곡면의 표현에 직선 및 원호 보간만을 지원하기 때문에 많은 양의 NC 데이터가 요구되었고, 이것을 저장할 별도의 저장장치와 전송장치(DNC)를 필요로 하게 되었다. 그러나 이 NC 데이터는 무엇보다 곡면의 형상 관측과 수정이 거의 불가능한 단점이 있으며, 이러한 현상은 홀 가공이나 평면 가공보다도 볼록면이나 오목면을 포함하는 자유곡면의 표현에 있어서 보다 심각한 문제가 된다. 따라서, 이를 개선하고자 곡선 혹은 곡면 단위로 해석하는 곡선 또는 곡면 보간기들이 등장하게 되었다.⁽¹⁻⁸⁾

특히 곡면 보간기의 도입으로 기존 방법에 비해

* 단국대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 단국대학교 기계공학과

E-mail : scjee@dku.edu

TEL : (02)709-2911 FAX : (02)709-2569

가공에 필요한 NC 데이터들이 대폭 축소되었으며 정의된 단위 곡면에 대하여 균일한 이송속도를 만족시키는 보간점의 계산이 가능하게 되었다. 그러므로 최소한의 곡면 표현 데이터를 바탕으로 매끈하고 부드러운 곡면 처리가 가능하다. 그러나 기존 곡면 보간기에서는 매개변수 다항식을 이용했기 때문에 곡면의 형상이 간단하고 제한적이었다. 또한 사용자가 매개변수 식의 계수를 직접 입력해주는 방식이었기 때문에 곡면의 정의가 용이하지 않다.

본 논문에서는 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)로 정의되는 곡면의 CNC 가공을 위한 효율적인 실시간 공구경로 생성 방법을 제시한다. NURBS는 곡면을 구성하는데 필요한 조정점(control point), 노트(knot), 가중치(weight)들을 이용하여 다양한 형상의 곡면을 자유롭게 표현할 수 있음은 물론, 조정점 사이의 국부 조정 능력을 갖고 있기 때문에 곡면의 형상을 쉽게 수정할 수 있다.^(9,10) CNC 곡면가공을 위한 공구경로 계획(tool-path planning)에서 곡면은 연속된 공구경로의 군으로 구성된다. 공구경로 계획법에는 크게 등평면(iso-planar),⁽¹¹⁾ 등매개변수(iso-parametric),^(3,12) 등스칼럽(iso-scallop)⁽²⁾ 방법들이 있다. 이 중에서 등스칼럽 방법은 다른 두 가지 방법에 비하여 가공시간이 짧고, 가공면의 스칼럽 높이를 일정하게 구속시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 기존 등스칼럽 방식의 공구경로 계획법은 불규칙하거나 복잡한 곡면에 효과적으로 대처할 수 없고, 더욱이 NURBS 곡면에 대해서는 기존의 보간 알고리즘이 정확하지 못한 문제점을 안고 있다.

이러한 점을 인지하여 본 논문에서는 기존의 방법을 개선한 새로운 공구경로 계획법을 제시한다. 기존의 등스칼럽 방식의 공구경로 계획법은 배열(array)과 같은 메모리 저장방식을 이용하여 곡면을 가르는 공구경로에 대해 선형(1차) 혹은 스플라인 보간을 행하는 방식이었다.⁽²⁾ 제시하는 공구경로 계획법은 보다 향상된 메모리 관리 기법을 이용하며, 공구경로에서의 국부적인 보간 방식을 시도하여, 복잡하고 굴곡이 심한 곡면에 대해서도 스칼럽 높이를 일정하게 유지시키면서 보다 유연하고 정밀하게 대처할 수 있다.

본 논문에서 제시하는 방법의 유용성을 검증하기 위해 C++ 언어로 프로그램을 작성하여 세 가지 NURBS 곡면에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 첫번째는 단순하고 일반적인 자유곡면, 두번째는 노트를 이용하여 불연속점을 갖는 뾰족한 곡면, 세번째는 다수의 조정점을 갖고 복잡한 굴곡이 있는 곡면을 정의하였다. 이들 곡면에 대

해 제시된 방법의 성능을, 이송속도, 총 가공시간, 스칼럽 높이 제어 정도의 관점에서 기존의 방법과 비교 분석하였다.

2. 곡면가공을 위한 공구경로 계획

3차원 곡면가공에서 공구경로 계획은 정의된 곡면을 가공하기 위하여 연속적인 공구경로들을 생성하고 나열해내는 것을 의미한다. 효율적인 공구경로 계획은 공구의 추적 경로가 중복되지 않으면서 최소한의 가공시간 동안 요구되는 표면조도를 만족시키면서 가공할 수 있도록 이루어져야 한다. CAD 혹은 CAM에서 곡면을 표현하는 일반적인 방법은 아래의 식 (1)과 같이 두 개의 매개변수 다항식을 이용하는 것이다.

$$S = S(u, v) \tag{1}$$

공구경로 계획은 매개변수 식으로 구성된 곡면의 매개변수 값을 변화시켜 공구의 위치를 조정하는 방식을 취한다. 공구경로 계획법에는 대표적으로 등평면(iso-planar), 등매개변수(iso-parametric), 등스칼럽(iso-scallop) 방법이 있다.

등평면 방법은 기준축에 수직인 일련의 평행한 평면들과 가공 곡면을 교차시켜 얻어지는 곡선을 이용하는 방법이다.⁽¹¹⁾ 이 방법은 교차 평면들의 간격을 조절하여 공구경로 간격방향을 조절할 수 있으나, 공구와 곡면의 형상에 따른 스칼럽 높이가 변화를 직접 제어할 수 없는 단점이 있다.

등매개변수 방법은 공구경로 간격 방향의 매개변수(v)를 고정시키고, 나머지 하나의 매개변수(u)를 공구경로를 따라 변화시키는 방법이다.^(3,12) 이 방법은 Fig. 1 과 같이 현재의 공구경로를 따라 매보간 때마다 규정 스칼럽 높이를 만족시키는 공구경로 간격방향의 매개변수 증분량(Δv)을 구하여 저장하면서 공구경로의 끝까지 이동한다. 그리고 다음 공구경로 간격 방향으로의 이동시에 저장된

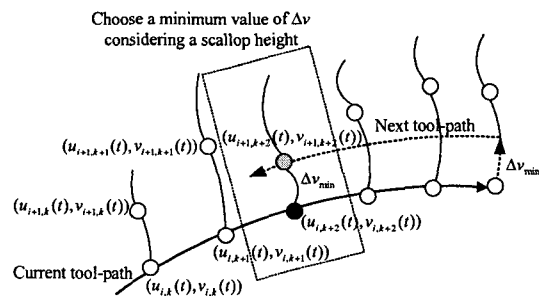


Fig. 1 Iso-parametric method

Δv 값 중 최소값을 이용하는 방법이다. 이 방법은 공구경로 계획법 중 알고리즘이 가장 간단하나 가공시간이 길어지는 단점이 있다.

끝으로 등스캘럽 방법⁽²⁾은 현재의 공구경로에서 매 보간 때마다 규정 스캘럽 높이를 만족시키는 공구경로 간격방향의 매개변수 증분량을 구한다는 점에서는 등매개변수법과 동일하다. 그러나 모든 보간점에서 대해 구해진 증분량을 바탕으로 다음 공구경로를 생성할 때, 추가로 제 3의 매개변수를 도입하여 매개변수쌍 (u, v) 점들에 대한 보간식 혹은 근사화된 식을 만들어 이용한다는 점이 다르다. 이 방법은 공구경로 간격방향을 보다 능동적이고 효율적으로 운영할 수 있는 장점이 있으나 (u, v) 에 대한 보간 또는 근사화된 식이 정확하지 못할 경우 스캘럽이 균일하게 조정되지 못할 수 있다. 즉, 기존의 등스캘럽 방법은 제 3의 매개변수 도메인에서 다음 공구경로 전체를 단일 직선 또는 스플라인으로 보간하므로, 특히 가공 곡면이 복잡하고 불규칙한 경우에 정확도가 저하될 수 있다.

3. NURBS 곡면 보간기

기존의 곡면 보간기들은 3 축에 대한 공구경로를 매개변수 다항식으로 표현하여 이용해 왔기 때문에 작업자가 곡면의 형상을 파악하거나 정의하기 어려운 단점이 있으며, 단순한 형상의 곡면만을 고려하고 있다. 본 논문에서는 작업자가 쉽게 곡면의 형상을 정의할 수 있고 조정점과 노트, 가중치들을 이용하여 곡면의 형상을 조정할 수 있는 NURBS 곡면식을 이용한다. NURBS는 일반적으로 직선 보간만을 이용하여 가공하는 기존의 방법에 비해 NC 데이터의 크기를 줄일 수 있고 보다 부드러운 곡면의 정의가 가능하여 가공면의 조도 향상을 기대할 수 있다는 장점이 있다.^(1,4) 직선 보간기를 이용하여 NURBS와 비슷한 효과를 내기 위해서는 보다 빠른 마이크로프로세서와, 용량이 더 큰 데이터 서버, 그리고 더 빠른 데이터 통신을 위한 네트워크 카드 등이 필수적이어서 하드웨어 의존성이 높아진다. 이에 비해 NURBS 보간기는 고속의 마이크로프로세서만으로 구현 가능하고 상대적으로 하드웨어 의존성이 작다.

NURBS는 기본적으로 B 스플라인 함수에서 출발하여, 노트의 비균일한 성질과 각 조정점에 가중치를 적용한 함수로 정의되며, NURBS 곡면은 식 (2)로 나타낼 수 있다.^(9,10) 여기서, N 은 블렌딩(blending) 함수를, W 는 가중치를, V 는 조정점을 각각 나타낸다.

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m W_{ij} N_{i,k}(v) N_{j,l}(u) V_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m W_{ij} N_{i,k}(v) N_{j,l}(u)} \quad (2)$$

매개변수 식을 이용하는 곡선 혹은 곡면의 보간 알고리즘에서는 공구의 현재 위치에서 한 샘플주기 동안 이송해야 할 거리를 만족시키는 정확한 매개변수값을 계산한다. CNC 보간기는 온라인상에서 실시간 연산을 거듭하기 때문에, 이에 필요한 연산량을 낮추면서 정확한 이송속도를 생성할 수 있어야 한다. 기존의 방법 중 가장 대표적인 보간 방법은 매개변수 u 에 대한 Taylor 확장식인 식 (3)을 이용하는 것이다.^(3,5)

$$u_{k+1} = u_k + \dot{u}_k \cdot T + \frac{1}{2} \ddot{u}_k \cdot T^2 \quad (3)$$

여기서 k 는 시간단계, T 는 샘플주기를 나타낸다. 이 방법은 가장 널리 알려지고 일반적으로 쓰이는 방법이지만 곡면을 구성하는 두 개의 매개변수 중 하나의 매개변수만이 조정 가능하다. 따라서 이 방법은 공구경로 계획 방법 중 등매개변수 방법에 이용된다. 그러나 NURBS 보간에서는 기본적으로 매개변수값에 따라 곡면을 구성하는 함수의 식이 달라지기 때문에, 공구경로 방향으로의 매개변수 u 에 대한 접선 벡터의 크기(norm)가 균일하지 못할 수 있다. NURBS 보간에서 이 접선 벡터의 크기가 식 (3)에 지배적인 영향을 미치므로 불균일한 크기는 이송속도 오차를 유발할 수 있다.

또 다른 방법은 아래 식에서와 같이 새롭게 정의되는 매개변수에 대한 수치적인 반복식을 이용하는 방법이다.^(1,2,6)

$$t_{k+1}^* = 2.5t_k - 2t_{k-1} + 0.5t_{k-2} \quad (4)$$

여기서, 매개변수 u 와 v 는 식 (4)의 새로운 매개변수 t 에 대해 정의된다. 우선 식 (4)의 간단한 차분식을 이용하여 다음 보간점에 대한 대략의 매개변수 값(t_{k+1}^*)을 계산하고, 이송량 $|S(t_{k+1}^*) - S(t_k)|$ 을 구한다. 식 (4)에서 얻은 t_{k+1}^* 을 아래 식 (5)의 초기값으로 이용하여 t_{k+1} 을 찾는데, 이 때 t_{k+1} 은 식 (6)과 같은 계산된 이송속도에 대한 요구된 이송속도의 비가 허용범위 안에 들 때까지 식 (5)에 의해 반복하여 계산된다.

$$t_{k+1} = \phi t_{k+1}^* + (1 - \phi) t_k \quad (5)$$

$$\phi = \frac{VT}{|S(t_{k+1}^*) - S(t_k)|} \quad (6)$$

그러나, 식 (5)는 t_{k+1} 에 대한 1 차 비례식을 정리한 것이기 때문에 매개변수의 증분에 대한 이송거리의 비가 선형적인 관계가 아닌 이상, 식 (5)를 반복 계산하게 되어 무한 루프에 빠지기 쉽다. 따라서 본 논문에서는 이 식을 개선한 보간 알고리즘을 제시한다.

4. 제시된 공구경로 생성 알고리즘

4.1 제시된 등스칼럼 공구경로 계획 방법

앞서 언급한 바와 같이 NURBS는 특별하고 복잡하게 굽은 곡면을 쉽게 표현할 수 있다. 이에 따라 공구경로의 형태 만큼이나 매개변수 영역에서의 움직임 역시 복잡하다. 기존의 등스칼럼 방법⁽²⁾에서는 현재 공구경로상에서 매 샘플주기마다 다음 공구경로의 매개변수 값 (u, v) 을 계산하여 이를 모두 메모리에 저장하거나 몇 개의 값만을 저장하여 다음 공구경로를 생성하는데 이용한다. 이때 공구경로 간격방향의 매개변수 증분은 다음 식으로 계산된다.

$$\Delta v_x = \frac{\Delta d}{(\mathbf{n} \times \mathbf{t}) \cdot \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v}} \quad (7)$$

여기서 \mathbf{n} 은 곡면의 법선 벡터, \mathbf{t} 는 공구경로 방향의 접선 벡터를 나타내며, Δd 는 규정 스칼럼 h 를 만족하는 다음 공구경로 간격으로 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta d = \begin{cases} \sqrt{\frac{8\rho rh}{\rho \pm r}} & \text{for convex and concave case} \\ \sqrt{8rh} & \text{for plain case} \end{cases} \quad (8)$$

식 (8)에서 ρ 는 공구경로 간격방향의 곡면의 곡률반경이고, r 은 공구반경으로 (\pm) 부호는 각각 곡면이 볼록한 경우와 오목한 경우에 해당한다. 제시된 방법에서 공구경로 간격방향의 매개변수 계산에 위의 식들이 사용되었으며, 공구경로 방향의 매개변수에 대해서는 다음 공구경로상의 값을 현재 공구경로상의 값과 동일하게 놓았다. 즉, 아래의 관계를 적용하였다.

$$u_{i+1,k} = u_{i,k} \quad (9)$$

여기서, i 는 공구경로 수를 나타낸다. 이 방법은 u 와 v 를 동시에 조정하는 방법과 비교해 큰 차이가 없음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

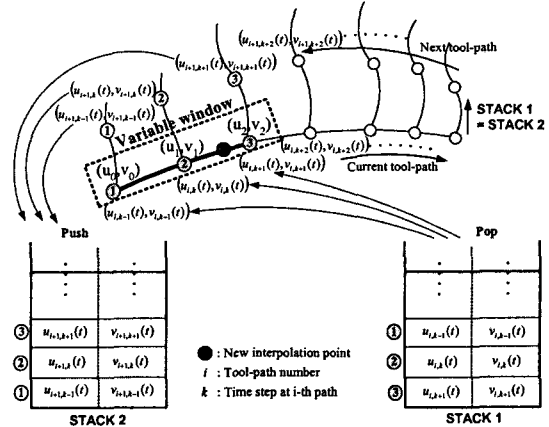


Fig. 2 Proposed iso-scallop method

기존의 등스칼럼 방법은 저장된 매개변수 값들을 바탕으로 다음 공구경로 전체를 새로운 매개변수 t 에 대한 하나의 보간식 혹은 근사식으로써 형성한다. 따라서 곡면의 형상이 복잡할 경우 보간 혹은 근사 오차가 발생할 수 있어 공구경로 계획이 정확히 이루어지지 못함을 예상할 수 있다. 이와 같은 이유에서, 본 논문에서는 개선된 등스칼럼 방식에 기초하는, NURBS 곡면에 실행될 수 있는 새로운 공구경로 생성 알고리즘을 제시하며 그 원리를 Fig. 2에 도시하였다. 제시된 알고리즘은 저장된 매개변수 값을 한꺼번에 모두 이용하여 다음 공구경로에 대한 하나의 보간식을 형성하지 않고, 필요할 때마다 저장된 매개변수 값들 중 몇 개씩만 꺼내 ‘국부적인 보간’을 행한다. 즉, 식 (7)과 (9)에 의해 이전 공구경로로부터 구해진 세 쌍의 매개변수 값 (u_0, v_0) , (u_1, v_1) , (u_2, v_2) 에 대해 2차 라그랑지(Lagrange) 보간을 적용한다. 그 결과 u 와 v 는 새 매개변수 t 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} u = t \\ v = \frac{(t-u_1)(t-u_2)v_0 + (t-u_0)(t-u_2)v_1}{(u_0-u_1)(u_0-u_2) + (u_1-u_0)(u_1-u_2)} + \frac{(t-u_0)(t-u_1)v_2}{(u_2-u_0)(u_2-u_1)} \end{cases} \quad (10)$$

위의 세 쌍의 매개변수로 이루어진 영역을 ‘가변 윈도우(variable window)’라 칭한다. 여기서 2차의 라그랑지 보간이 이용된 이유는 비교적 식이 복잡하지 않아 연산량에 대한 부담이 작고, 저장된 데이터를 바로 보간식에 넣어 이용할 수 있기 때문이다. 이송속도를 만족시키는 다음 보간점은 반드시 가변 윈도우 내에 존재해야만 하며 가변 윈도우

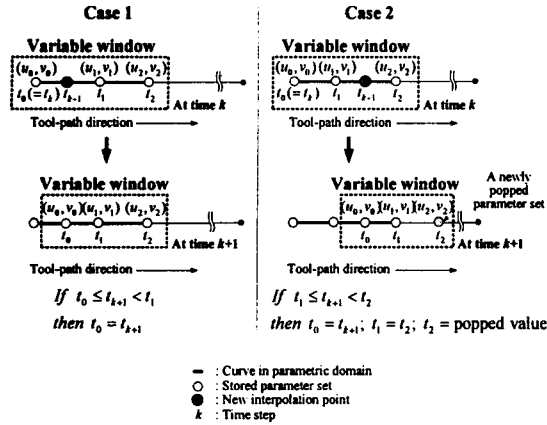


Fig. 3 Rule of taking a variable window

우는 Fig. 3 과 같은 규칙으로 매 샘플주기마다 갱신된다.

다음 공구경로는 현재 공구경로 방향의 역방향으로 되돌아오므로, 다음 공구경로에 대해 저장된 데이터를 역으로 꺼내어 쓰게 된다(LIFO: Last Input First Out). 이러한 메모리 구조에 적합한 알고리즘이 스택(stack) 기법이며, 포인터(pointer)를 이용한 리스트 구조(list structure)의 스택이 알고리즘의 실제적인 구현에 적절하다. 제시된 알고리즘에서는 (i) 이전 공구경로에서 계산되고 현재 공구경로에서 이용되고 있는 매개변수 값들에 대한 한 개의 스택(Fig. 2의 stack 1)과 (ii) 현재 공구경로에서 계산되어 다음 공구경로에서 이용될 매개변수 값들을 위한 또 하나의 스택(Fig. 2의 stack 2)이 요구된다. 이렇게 얻어진 스택들은 현재 공구경로에서 이용되는 스택이 비워질 때까지 사용되고, 현재 공구경로의 끝에서 비워진 스택(stack 1)은 다음 공구경로에 사용될 스택(stack 2)과 교환된다.

정리하면, 제시된 방법은 현재의 공구경로를 나타내기 위해서 곡부의 가변 윈도우를 구성하고 이를 근사화하는 곡선식(Lagrange interpolation)을 실시간으로 구성함과 동시에 구성된 곡선상에서 요구된 이송속도를 만족하는 보간점을 계산한다. 그리고 다음 공구경로에서 이용될 규정 스캐럽을 만족하는 공구경로 간격방향의 매개변수를 구하여 스택에 저장하고 다음 공구경로에서 이를 재이용하는 것이다. 마지막으로, 제시된 방법에서는 등스캐럽 방법으로 공구경로를 계획하게 될 경우에 요구되는 매개변수 영역의 끝부분(즉, $v=1$ 인 부근)에 대한 처리에서, 정의된 곡면의 끝부분에 공구경로가 닿을 때 중복되는 공구경로를 배제시켜 불필요한 가공시간을 없애도록 하였다.

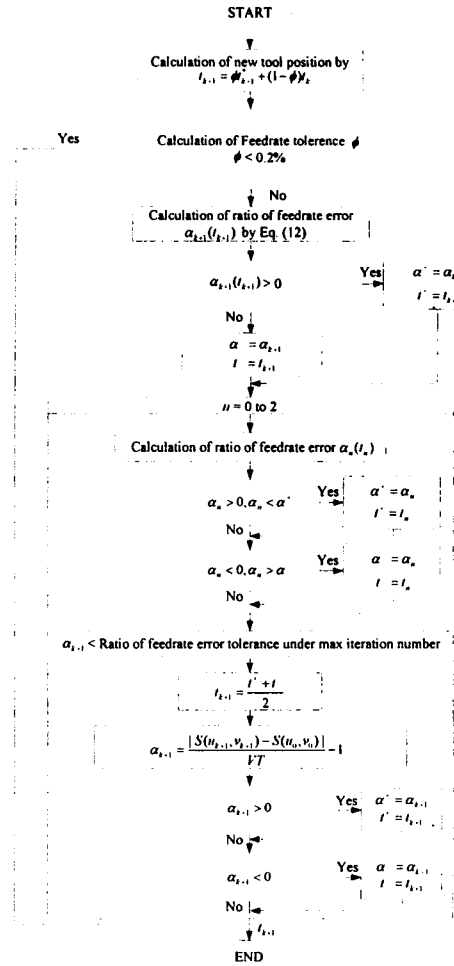


Fig. 4 Flowchart of the proposed interpolation algorithm

4.2 제시된 보간 알고리즘

NURBS는 조정점과 노트를 이용하여 복잡하고 자유로운 곡면의 정의가 가능하나 매개변수 영역과 실제로 공구가 움직이는 가공 영역과의 관계가 매우 복잡하다. 따라서 기존의 등스캐럽 방법은 적용이 불가능하거나 최소한 상당한 보안을 요한다.

본 논문에서 제시하는 보간 알고리즘을 Fig. 4에 나타내었다. 제시된 알고리즘은 식 (4)~(6)을 반복없이 단 한번만 이용하여 3장에서 언급된 매개변수 t_{k+1} 을 얻고, 이에 따른 u 와 v 를 계산한다. 그 결과가 허용되는 이송속도 오차율 이상을 수반한다면, Fig. 4에서와 같은 이분법을 이용해 매개변수 t_{k+1} 의 값을 수정한다. 이 과정에서 가변 윈도우 내 세 쌍의 매개변수 $(u_0, v_0), (u_1, v_1), (u_2, v_2)$ 와

추가적으로 t_{k+1} 에 대한 매개변수쌍 (u_{k+1}, v_{k+1}) 이 초기값으로 이용된다. 편의상 이 매개변수쌍들을 다음과 같이 정의한다.

$$(u_n, v_n) \equiv (u(t_n), v(t_n)) \text{ for } n=0, 1, 2 \text{ and } k+1 \quad (11)$$

각 (u_n, v_n) 에 대해 이송속도 오차율을 다음과 같이 계산하고

$$\alpha_n \equiv \alpha(t_n) = \frac{|S(u_n, v_n) - S(u_0, v_0)|}{VT} - 1 \quad (12)$$

매개변수 t_n 중에서 요구되는 이송속도에 가장 근접한 값에 해당하는 두 값을 취한다. 즉, 규정 이송속도를 약간 초과한 오차율 α^+ 에서의 매개변수 t^+ 와 규정 이송속도에 약간 미치지 못한 오차율 α^- 에서의 매개변수 t^- 값을 구한다(α^+ 와 α^- 는 프로그램에서 ± 1 로 각각 초기화 됨). 이 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha^+ = \alpha(t^+) = \min_{\alpha_n > 0} |\alpha_n| \quad (13)$$

$$\alpha^- = \alpha(t^-) = \min_{\alpha_n < 0} |\alpha_n| \quad (14)$$

그 다음 아래와 같이 t^+ 와 t^- 의 중간값을 t_{k+1} 로 재정의한다.

$$t_{k+1} = (t^+ + t^-) / 2 \quad (15)$$

여기서, 만약 t_{k+1} 에 대한 α_{k+1} 값이 허용 오차율 범위 내에 들지 못하는 경우에는, α_{k+1} 값이 허용 범위 이내에 들 때까지 t^+ 와 t^- 를 아래와 같이 반복적으로 갱신한다.

$$\text{If } \alpha_{k+1} > 0, t^+ = t_{k+1} \text{ and } \alpha^+ = \alpha_{k+1} \quad (16)$$

$$\text{If } \alpha_{k+1} < 0, t^- = t_{k+1} \text{ and } \alpha^- = \alpha_{k+1} \quad (17)$$

5. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제시하는 개선된 보간 알고리즘을 포함하는 등스캘럽 방식의 공구경로 계획 방법의 성능을 검증하기 위해 다음과 같은 세 가지 NURBS 곡면 생성에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 첫째는 형상이 단순한 자유곡면, 둘째는 경계에 첨점이 존재하고 가운데 부분이 오목한 형상의 곡면, 셋째로 굴곡이 있는 복잡한 곡면을 선정하였다. 이 곡면들에 대해 제시된 방법의 이송속도, 가공시간, 스캘럽 높이를 기존의 등스캘럽

및 등매개변수 방법과 비교하였다. 시뮬레이션에서 가공조건으로 곡면 모두에 대해 공구지름은 10 mm, 공구접촉(cutter contact) 경로상의 이송속도는 4 m/min, 샘플주기는 0.01 s, 규정 스캘럽 높이는 0.01 mm, 0.005 mm와 0.001 mm로 각각 설정하였다. 제시된 방법에 의해 생성된 공구경로들의 일부

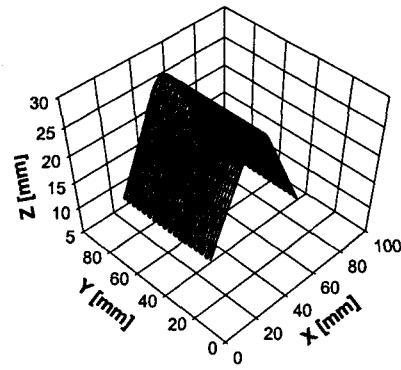


Fig. 5 Simple NURBS surface

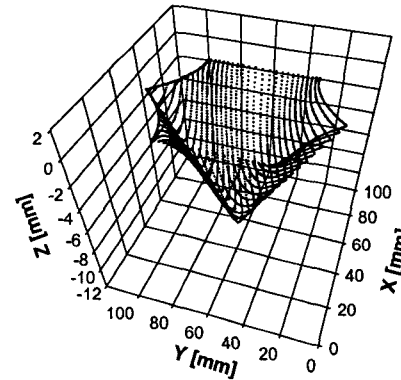


Fig. 6 Peaked NURBS surface

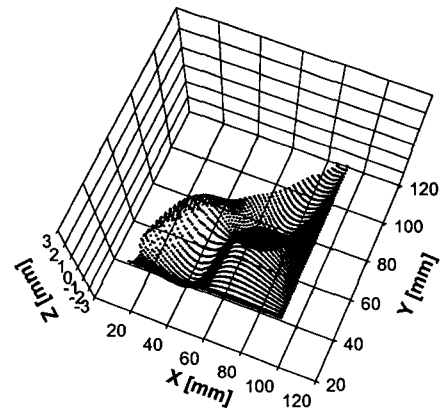


Fig. 7 Complex NURBS surface

Table 1 Number of iterations in the proposed interpolation routine

Iteration No.	Surface	Simple NURBS	Peaked NURBS	Complex NURBS
Maximum		2	9	10
Average		0.0	0.27	0.34

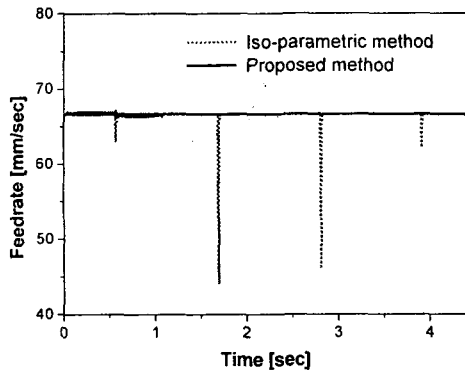


Fig. 8 Comparison of feedrates for the peaked surface

Table 2 Comparison of machining time (s)
(a) scallop height = 0.01 mm

Method	Surface	Simple NURBS	Peaked NURBS	Complex NURBS
Existing Iso-scallop		103.61	n/a	n/a
Iso-parametric		102.82	134.93	138.82
Proposed		100.81	113.92	74.11

(b) scallop height = 0.005 mm

Method	Surface	Simple NURBS	Peaked NURBS	Complex NURBS
Existing Iso-scallop		146.18	n/a	n/a
Iso-parametric		145.21	190.92	193.58
Proposed		142.81	160.80	104.23

(c) scallop height = 0.001 mm

Method	Surface	Simple NURBS	Peaked NURBS	Complex NURBS
Existing Iso-scallop		323.71	n/a	n/a
Iso-parametric		321.17	424.54	427.88
Proposed		317.11	358.26	229.71

를 Fig. 5~7 에 나타내었다. 실제의 공구경로는 그림에 나타낸 공구경로보다 수가 더 많고 촘촘하다. 제시된 보간 과정에서 허용 이송속도 오차율은 0.2%(즉, $|\alpha_{k+1}| < 0.002$)로 설정하였다. Table 1 은 각 곡면에 대해 전체 공구경로를 생성하는 동안에 각 샘플주기 내의 보간 과정에 쓰인 반복계산수를 나타낸다. 이 결과로부터 제시된 알고리즘이 계산시간의 관점에서 효율적임을 알 수 있다.

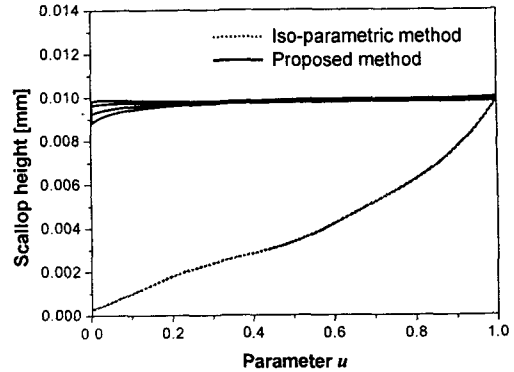


Fig. 9 Comparison of scallop heights created by the first five tool-paths for the complex surface

Fig. 5 의 곡면은 정의된 곡면의 단순한 형상에 의해 공구경로상에서 하나의 매개변수만 변화되므로, 기존의 등스칼럽 및 등매개변수 방법이 모두 적용될 수 있었다. 그러나 Fig. 6 과 7 의 곡면에 대해서는 기존 등스칼럽 방법은 적용이 불가능하였으므로 비교대상에 들지 못하였다. Fig. 6 의 곡면에서 최초 네 개의 공구경로에 대해, 기존의 등매개변수 방법과 제시된 방법의 이송속도를 Fig. 8 에 비교하였다. 결과에서 제시된 방법은 곡면의 점점 주위에서 생기는 이송속도의 변동을 없앨 수 있음을 볼 수 있다. Table 2 에는 규정 스칼럽 높이 별로 세 곡면 각각에 대한 총 가공시간을 비교하였는데, 이 결과는 제시된 등스칼럽 방법이 기존 등매개변수 방법에 비해 곡면의 형상이 복잡한 경우에 가공시간을 상당히 줄일 수 있음을 보여준다. 끝으로, 시뮬레이션에 쓰인 곡면 중 형상이 가장 복잡한 Fig. 7 의 곡면에 대해서, 최초 다섯 개의 공구경로에 의해 생기는 스칼럽 높이를 Fig. 9 에 비교하였다. 그림의 결과는 식 (8)과 이웃하는 두 공구경로상의 실제 보간점 사이의 거리 ($|S(u_{i,k}, v_{i,k}) - S(u_{i-1,k}, v_{i-1,k})|$)를 이용하여 다음과 같이 구한 것이다.

$$h_k = \frac{|S(u_{i,k}, v_{i,k}) - S(u_{i-1,k}, v_{i-1,k})|^2 (\rho \pm r)}{8\rho r} \quad (18)$$

이 계산에서는 공구경로 방향의 매개변수 증분량을 충분히 작은 값($\Delta u = 0.0008$)으로 일정하게 하여 보간 효과를 주었다. 결과로부터, 기존 등매개변수 방법은 규정치(0.01 mm) 이하의 스칼럽 높이를 제공하기는 하나, 매개변수 영역에서 매개변수의 움직임이 균일하지 않은 곡면에 대해 스칼럽 높이를 효과적으로 제어할 수 없음을 알 수 있다. 반면에 제시된 방법은 제곱평균평방근(RMS) 값이

0.0098 mm인 정도로 거의 일정하게 스켈럽 높이를 구속할 수 있음을 확인할 수 있다.

끝으로, 펜티엄(Pentium) 750 MHz의 PC에서 실시간 공구경로 생성 및 보간 알고리즘을 모두 수행하는데 걸리는 연산시간은 한 스텝(step)당 평균 40.251 μ s였다. 측정 방법은 C 프로그래밍 언어에서 일반적으로 이용하고 있는 clock 함수를 이용하였다. 단, 보간 및 공구경로 계획에 요구되는 연산시간이 매우 짧기 때문에 수백 스텝의 연산시간을 합하고 평균하여 단위 스텝당 처리시간을 계산하였다. 이 결과로부터 제시된 알고리즘은 주어진 샘플주기뿐만 아니라 그 이하의 샘플주기를 갖는 시스템에도 적용 가능하다고 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 NURBS 곡면의 CNC 가공을 위한 효율적인 실시간 공구경로 생성 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 스택 메모리 기법을 이용한 개선된 등스켈럽 방식의 공구경로 계획법에 기초한다. 즉, 스켈럽 높이를 제어하기 위한 새로운 알고리즘을 제시하였으며, 제시된 방법은 효율적으로 공구경로들을 생성해 낼 수 있어 기존 방법에 비해 가공시간을 단축시킬 수 있다. 또한, 본 논문에서는 NURBS 곡면의 보간에 적합한 국부적 보간 방식의 보간 알고리즘도 제시하였다.

제시된 공구경로 생성 방법의 유용성을 검증하기 위하여 C++ 언어를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 작성하였다. 시뮬레이션에서는 각기 다른 세 가지 형상의 NURBS 곡면에 대해 공구경로들을 생성하였다. 이들에 대해 제시된 방법의 성능을, 이송속도, 총 가공시간, 스켈럽 높이 제어 정도의 관점에서 기존의 방법과 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과로부터 제시된 방법은 점점 주위에서도 규정 이송속도를 만족시킬 수 있음을 알 수 있고, 복잡한 형상의 곡면에 대해 가공시간을 상당히 줄일 수 있으며 가공면의 스켈럽 높이를 거의 일정하게 유지시킬 수 있음을 확인하였다. 더욱이, 제시된 방법은 기존의 등스켈럽 방법이 적용될 수 없는 복잡한 NURBS 곡면에 대해서도 적용이 가능하였다.

앞으로 본 논문에서 제시된 공구경로 생성 방법을 3축 CNC 공작기계 시스템에 실제로 구현하여 가공실험을 통해 알고리즘의 실용성 및 가공면의 거칠기 개선 정도를 검증할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2001 학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참고문헌

- (1) Jee, S. and Koo, T., 2002, "NURBS Surface Interpolator for Constant Cutting Forces in Ball-End Milling," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 9, pp. 1888~1896.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (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) 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.
- (8) 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.
- (9) Piegl, L., 1991, "On NURBS: A Survey," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 11, pp. 55~71.
- (10) Piegl, L. and Tiller, W., 1995, *The NURBS Book*, 2nd Edition, Springer.
- (11) Ding, S., Mannan, M. A., Poo, A. N., Yang, D. C. H. and Han, Z., 2003, "Adaptive Iso-Planar Tool Path Generation for Machining of Free-Form Surfaces," *Computer-Aided Design*, Vol. 35, pp. 141~153.
- (12) 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.