

# CNC 공작기계의 3차원 직선 및 원호 보간 알고리즘에 관한 연구

양민양\*, 홍원표\*\*

## 3D Linear and Circular Interpolation Algorithm for CNC Machines

Min-Yang Yang\*, Won-Pyo Hong\*\*

### ABSTRACT

3D linear and circular interpolations are a basic part for the machining of complex shapes. Until now, because of the absence of appropriate algorithms for the generation of 3D lines and circles, a full accomplishment for available machine tool resolution is difficult. This paper presents new algorithms for 3D linear and circular interpolation in the reference pulse technique. In 3D space, the line or circle is not expressed as an implicit function, it is only defined as the intersection of two surfaces. A 3D line is defined as the intersection of two planes, and a 3D circle is defined as the intersection of a plane and the surface of a sphere. Based on these concepts, interpolation algorithms are designed to follow intersection curves in 3D space, and a real-time 3D linear and circular interpolator was developed in software using a PC. The algorithm implemented in a PC showed promising results in interpolation error and speed performance. It is expected that it can be applied to the next generation computerized numerical control systems for the machining of 3D lines, circles and some other complex shapes.

**Key Words** : Linear Interpolation(직선 보간), Circular Interpolation(원호 보간), Interpolator(보간기), Reference-Pulse(기준 펄스), Reference-Word(기준 워드), BLU(Basic Length Unit)

### 1. 서론

산업혁명 시대부터 개발되기 시작한 공작기계의 등장으로 미약적인 발전이 있었다. 이는 NC 공작기계가 동시에 다수의 축을 제어하여 복잡한 곡선이나 곡면을 높은 정도로 신속히 가공함을 추구하였기 때문이었다. 이때 NC 파트 프로그램(part program)에 의한 가공 공구 경로(tool path)는 CNC 공작기계 축의 매우 작은 단계별 이동으로 실현된

다. 이러한 단계별 이동의 크기는 일반적으로 수  $\mu\text{m}$ 이며, 이 수치는 정밀한 정도를 나타내는 기계의 분해능(resolution)을 뜻한다. 공작기계의 CNC 시스템은 입력된 이동 지령으로부터 공작기계를 구동하는데 요구되는 단계별 이동을 계산한다. CNC 시스템 내에서 이러한 단계별 이동을 계산하는 부분을 보간기라 한다.

보간기의 개발에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다. Koren<sup>(1)</sup>은 크게 기준 펄스 보간기와 기준 워드 보간기로 구분하였다. 기준 펄스 보간기는

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

인터럽트 클럭(interrupt clock)에 의해 연속적으로 펄스 일을 발생시켜 공작기계의 BLU 단위로 축을 구동한다. 기존 워드 보간기는 가공하고자 하는 곡선을 작은 직선연로 근사하여 직선들의 연속적인 이동으로 원하는 형상을 얻는다. 기존 펄스 보간기는 구현이 용이하지만 계산시간에 의해 최대 이송속도에 제한이 있고, 기존 워드 보간기는 이송속도 제한은 없지만 구현이 복잡하고 상대적으로 큰 오차를 발생한다. 최근 컴퓨터의 눈부신 성능 향상은 CNC 공작기계를 이용한 복잡한 형상의 가공에 기존 펄스 보간기의 적용을 충분히 가능하게 하였다.

일반적으로 CNC 공작기계는 직선과 원호 형상에 대한 보간 기능만을 지원하고 있다.<sup>(2-8)</sup> 그러나 직선과 원호 이외의 복잡한 형상에 대한 정밀한 가공이 요구되고 있고, 이를 위해 직선연로 근사한 후 CNC 장치에 입력함으로써 가공하여 왔다.<sup>(9-11)</sup> 이러한 기존의 CNC 장치는 결국 곡선 자체의 이동이 아니라 근사화 된 직선들의 이동만을 발생할 수 있을 뿐이었다. 따라서 부정확한 가공이 이루어질 수 밖에 없었다. 근래에는 3차원 파라메트릭(parametric) 곡선 보간기에 대한 연구들도 진행되고 있다.<sup>(12-14)</sup>

3차원 직선과 원호는 이동이 단순하고 다른 복잡한 형상의 기본이 되기 때문에 그 사용 범위가 매우 넓다. 그러나, 2차원 직선 및 원호와 달리 기존 펄스 보간기의 구현에 대한 연구가 미비한 상태이다. 근래의 3차원 파라메트릭 곡선 보간기들도 계산 시간 및 형상 정의에 있어서 3차원 직선 및 원호를 생성하는데 효과적이지 못하다. 또한 현재 CNC 공작기계에서는 3차원 원호 이동에 대한 기본 코드도 설정되어 있지 않다. 즉, 기존의 3축 CNC 머시닝센터(CNC machining center)의 경우 기계의 구조 자체는 3차원 이동이 가능하도록 제작되어 있지만, 실제로는 2축의 동시 이동과 나머지 한 축의 이동으로 구성되어 있기 때문에 명확한 의미에서는 3축이 아니라 2.5축이라고 한다. 이에 CNC 공작기계의 성능을 충분히 발휘할 수 있는 고정밀 가공을 위한 3차원 직선 및 원호에 대한 보간기의 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 기존 펄스 보간법에서 3차원 직선 및 원호 보간 알고리즘을 개발하였다. 이때 3차원 공간상에서 직선과 원호를 정의하는데 요구되는 2가지 제한 사항을 활용하였다. 그리고,

이를 PC를 이용한 보간기의 구현에 적용하였다. PC에서의 식물대입법을 통해 실시간으로 고속, 고정도로 3차원 직선 및 원호 보간에 적용할 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해 기존의 CNC 공작기계보다 용이하게 3차원 직선 및 원호 형상의 가공을 수행할 수 있게 되었다. 특히 기존의 기계에서는 일련의 직선들로 가공해야 했던 3차원 원호는 기존의 2차원 원호와 같이 기본 코드 하나로 처리가 가능해졌다. 이와 더불어 직선 분할 가공시 발생하였던 불연속성, 이송 속도의 변화, 메모리 부족 등의 문제점들도 해결하였다.

## 2.3 차원 보간 알고리즘

기존의 2차원 직선 및 원호 보간 알고리즘에서의 공통적인 특징은  $f(x,y)=0$ 으로 표현되는 하나의 식을 이용하여 보간을 수행하였다는 점이다. 그러나, 3차원 공간상에서 직선과 원호는 2개의 면(surface)의 교차에 의해서만 정의된다. 본 연구에서는 2개의 면을 동시에 만족시키도록 보간 알고리즘을 설계하였다.

### 2.1.3 차원 직선 보간 알고리즘

3차원 공간상에서 직선은 2개의 평면(plane)이 교차함에 의해 정의된다. 이때 하나의 직선을 표현하는 평면의 쌍은 무한히 많이 존재한다. 본 연구에서는  $f(x,y)=0$ ,  $f(x,z)=0$  또는  $f(y,z)=0$ 으로 표현 가능한 평면들 중에서 2개의 평면을 선택하였다. 이때 두 평면은 각 축의 이동변위로부터 선택하였다. 즉, X축으로의 이동이 가장 많은 경우에는  $f1(x,y)=0$ 과  $f2(x,z)=0$ , Y축으로의 이동이 가장 많은 경우에는  $f1(y,x)=0$ 과  $f2(y,z)=0$ , Z축으로의 이동이 가장 많은 경우에는  $f1(z,x)=0$ 과  $f2(z,y)=0$ 이라는 평면을 이용하여 보간하였다.

이때의 가장 큰 장점은 2차원 직선 보간 알고리즘을 그대로 이용할 수 있다는 것이다. 이는 선택한 각 평면의 식이 2차원 직선의 식과 동일하게 표현되기 때문이다. 단지 3차원 직선 보간시에는 이러한 형태의 식을 2개 이용한다는 차이점뿐이다. 결국 3차원 공간에서의 직선 보간을 2차원에서의 직선 보간 2개의 실행으로 확장하여 수행하였다. (Fig.1) 그리고, 2차원 직선 보간법은 기존의 여러 방법들 중 향상된 성능을 지닌 M\_DSM (Modified Direct Search Method)을 사용하였다.<sup>(14)</sup>

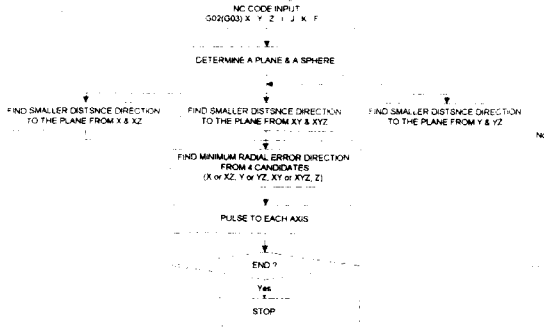


Fig. 3 Flowchart of the 3D circular interpolation algorithm

2 차원 XY 평면 상에서 보간시 가능한 이동은 X, Y, XY 의 3 가지가 있다. 3 차원 공간상에서는 XZ, YZ, XYZ, Z 의 이동이 추가된다. 본 알고리즘에서는 이 7 가지 이동 중 평면의 근접 정도로부터 4 가지로 압축하고, 이 4 가지 중에서는 원호 반경 R 에 가장 근접한 경우를 선택하도록 하였다.

Table 2 Equations in the 3D circular interpolation

Equation	$DR_{i,j,k} = X_i^2 + Y_j^2 + Z_k^2 - R^2$	$DZ_{i,j,k} = ZX \times X_i + ZY \times Y_j - Z_k$
$\Delta X$	$DR_{i+1,j,k} = DR_{i,j,k} + \Delta RX_i$	$DZ_{i+1,j,k} = DZ_{i,j,k} + \Delta ZX_i$
$\Delta Y$	$DR_{i,j+1,k} = DR_{i,j,k} + \Delta RY_j$	$DZ_{i,j+1,k} = DZ_{i,j,k} + \Delta ZY_j$
$\Delta Z$	$DR_{i,j,k+1} = DR_{i,j,k} + \Delta RZ_k$	$DZ_{i,j,k+1} = DZ_{i,j,k} + \Delta ZZ_k$
$\Delta X \ \& \ \Delta Y$	$DR_{i+1,j+1,k} = DR_{i,j,k} + \Delta RX_i + \Delta RY_j$	$DZ_{i+1,j+1,k} = DZ_{i,j,k} + \Delta ZX_i + \Delta ZY_j$
$\Delta Y \ \& \ \Delta Z$	$DR_{i,j+1,k+1} = DR_{i,j,k} + \Delta RY_j + \Delta RZ_k$	$DZ_{i,j+1,k+1} = DZ_{i,j,k} + \Delta ZY_j + \Delta ZZ_k$
$\Delta X \ \& \ \Delta Z$	$DR_{i+1,j,k+1} = DR_{i,j,k} + \Delta RX_i + \Delta RZ_k$	$DZ_{i+1,j,k+1} = DZ_{i,j,k} + \Delta ZX_i + \Delta ZZ_k$
$\Delta X, \ \Delta Y \ \& \ \Delta Z$	$DR_{i+1,j+1,k+1} = DR_{i,j,k} + \Delta RX_i + \Delta RY_j + \Delta RZ_k$	$DZ_{i+1,j+1,k+1} = DZ_{i,j,k} + \Delta ZX_i + \Delta ZY_j + \Delta ZZ_k$
Where	$\Delta RX_i = 2X_i + 1$ $\Delta RY_j = 2Y_j + 1$ $\Delta RZ_k = 2Z_k + 1$	$\Delta ZX_i = ZX$ $\Delta ZY_j = ZY$ $\Delta ZZ_k = -1$

Table 2 는 3 차원 원호 보간시 사용하는 식들이다. 초기값이 0 인 DR 과 DZ 2 개의 판별값을 사용하였으며, 각각  $X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2$ ,  $ZX \cdot X + ZY \cdot Y - Z = 0$  이라는 구와 평면의 식을 변형하였다. DR 은 반경 방향으로의 오차에, DZ 는 평면과의 거리에 비례하

는 값이다. R 은 원호의 반경을 나타내고, ZX 와 ZY 는 평면식의 상수를 나타낸다. X 축으로 한 단계 이동시 DR 과 DZ 는 식(3)과 같이 되고, 한 단계 더 이동하면 DR 은 식(4)와 같이 된다.

$$DR_{i+1,j,k} = (X_i + 1)^2 + Y_j^2 + Z_k^2 - R^2 \tag{3}$$

$$= DR_{i,j,k} + 2X_i + 1 = DR_{i,j,k} + \Delta RX_i$$

$$DZ_{i+1,j,k} = ZX(X_i + 1) + ZY \cdot Y_j - Z_k$$

$$= DZ_{i,j,k} + ZX = DZ_{i,j,k} + \Delta ZX_i$$

$$DR_{i+2,j,k} = DR_{i+1,j,k} + \Delta RX_{i+1}$$

$$= DR_{i+1,j,k} + \Delta RX_i + 2 \tag{4}$$

그리고 Y 축 및 Z 축으로의 이동시에는 식(4), (5)와 같이 된다.

$$DR_{i,j+1,k} = DR_{i,j,k} + 2Y_j + 1 = DR_{i,j,k} + \Delta RY_j \tag{5}$$

$$DZ_{i,j+1,k} = DZ_{i,j,k} + ZY = DZ_{i,j,k} + \Delta ZY_j$$

$$\Delta RY_{j+1} = \Delta RY_j + 2$$

$$DR_{i,j,k+1} = DR_{i,j,k} + 2Z_k + 1 = DR_{i,j,k} + \Delta RZ_k \tag{6}$$

$$DZ_{i,j,k+1} = DZ_{i,j,k} - 1 = DZ_{i,j,k} + \Delta ZZ_k$$

$$\Delta RZ_{k+1} = \Delta RZ_k + 2$$

DR 과 DZ 는 단계이동에 따라 이전의 값 및 증분값( $\Delta RX_i$ ,  $\Delta RY_j$ ,  $\Delta RZ_k$ ,  $\Delta ZX_i$ ,  $\Delta ZY_j$ ,  $\Delta ZZ_k$ )에 의해 변경된다.

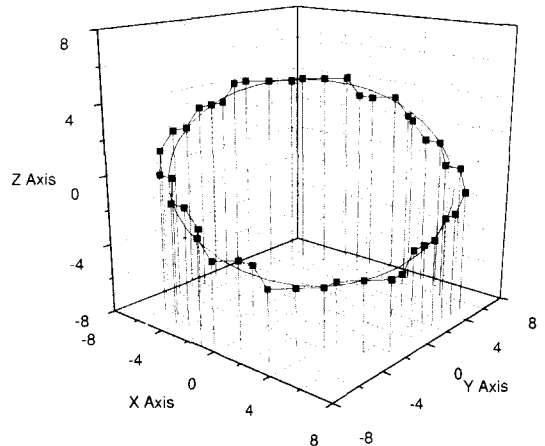


Fig. 4 Example of the 3D circular interpolation

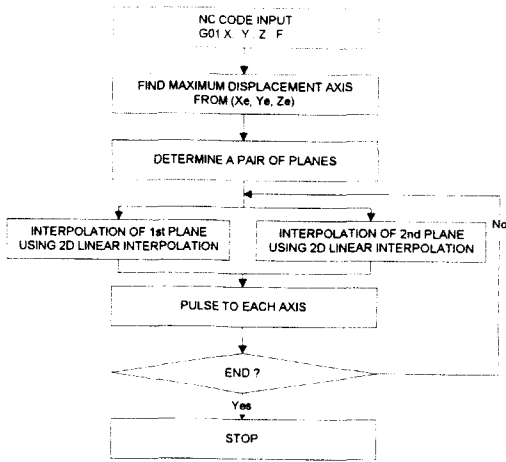


Fig. 1 Flowchart of the 3D linear interpolation algorithm

Table 1 Equations in the 3D linear interpolation (when the X is the longest axis)

Equation	$D1_{i,j} = Y_c X_i - X_c Y_j$	$D2_{i,k} = Z_c X_i - X_c Z_k$
$\Delta X$	$D1_{i+1,j} = D1_{i,j} + \Delta X1_i$	$D2_{i+1,k} = D2_{i,k} + \Delta X2_i$
$\Delta Y$	$D1_{i,j+1} = D1_{i,j} + \Delta Y_j$	---
$\Delta Z$	---	$D2_{i,k+1} = D2_{i,k} + \Delta Z_k$
$\Delta X \ \& \ \Delta Y$	$D1_{i+1,j+1} = D1_{i,j} + \Delta X1_i + \Delta Y_j$	---
$\Delta Y \ \& \ \Delta Z$	---	---
$\Delta X \ \& \ \Delta Z$	---	$D2_{i+1,k+1} = D2_{i,k} + \Delta X2_i + \Delta Z_k$
$\Delta X, \Delta Y \ \& \ \Delta Z$	$D1_{i+1,j+1} = D1_{i,j} + \Delta X1_i + \Delta Y_j$	$D2_{i+1,k+1} = D2_{i,k} + \Delta X2_i + \Delta Z_k$
Where	$\Delta X1_i = Y_c$ $\Delta Y_j = -X_c$	$\Delta X2_i = Z_c$ $\Delta Z_k = -X_c$

Table 1 은 3 차원 직선 보간 중 X 축의 이동 변위가 가장 큰 경우에 사용하는 식들이다. 각 평면에서의 근접 여부를 판별하고자 초기값이 0 인 D1 과 D2, 2 개의 판별값을 사용하였다. D1 과 D2 는 각각  $Y_c \cdot X - X_c \cdot Y = 0$ ,  $Z_c \cdot X - X_c \cdot Z = 0$  이라는 평면의 식을 변형함으로써 얻을 수 있는데, 이 값은 각 평면과의 거리에 비례하는 값이다. i, j 및 k 는 각각 X, Y 및 Z 축으로의 단계별 이동을 나타내고,  $X_c$ ,  $Y_c$  및  $Z_c$  는 각 축으로의 이동변위를 나타낸다. X 축으로 한 단계 이동시 D1 과 D2 는 식(1)과 같이 된다.

$$D1_{i+1,j} = Y_c (X_i + 1) - X_c Y_j = D1_{i,j} + Y_c = D1_{i,j} + \Delta X1_i \quad (1)$$

$$D2_{i+1,k} = Z_c (X_i + 1) - X_c Z_k = D2_{i,k} + Z_c = D2_{i,k} + \Delta X2_i$$

그리고, Y 축 및 Z 축으로 한 단계 이동시에는 식(2)와 같이 된다.

$$D1_{i,j+1} = D1_{i,j} - X_c = D1_{i,j} + \Delta Y_j \quad (2)$$

$$D2_{i,k+1} = D2_{i,k} - X_c = D2_{i,k} + \Delta Z_k$$

단계 이동에 따라 D1 과 D2 는 이전의 값 및 증분값( $\Delta X1_i, \Delta Y_j, \Delta X2_i, \Delta Z_k$ )에 의해 변경된다. Y 또는 Z 축의 이동 변위가 가장 큰 경우에 사용하는 식들은 Table 1 에서 D1 과 D2 모두에 이동 변위가 가장 큰 축의 값이 이용되도록 수정함으로써 쉽게 얻을 수 있다.

Fig. 2 는 3 차원 직선 보간의 결과이다. 보간의 결과를 쉽게 확인할 수 있도록 단위 이동량을 크게 하였다. 3 축의 변위 중 가장 큰 이동 변위인 축(X)은 계속적으로 단계별 이동이 생성되고, 나머지 두 축(Y, Z)은 이에 동기되어 단계별 이동이 생성됨을 볼 수 있다.

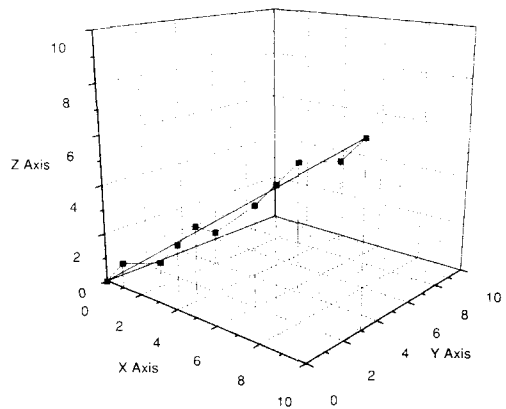


Fig. 2 Example of the 3D linear interpolation

### 2.2.3 3 차원 원호 보간 알고리즘

3 차원 공간상에서의 원호는 반경 R 인 구 (sphere)와 구의 중심점을 지나고 임의의 평면이 만나는 단면의 외곽 형상으로 정의되며, 오직 한 쌍의 구와 평면이 존재한다. 본 연구에서는 구의 표면과 평면을 동시에 만족시키도록 보간 알고리즘을 설계하였다.

Fig. 4는 반경 8BLU인 3차원 원호 보간의 결과이다. 보간 결과를 쉽게 확인할 수 있도록 단위 이동량을 크게 하였으며, XY 평면으로의 투영선을 같이 도시하였다.

### 3. 3차원 보간기의 구현

지금까지 기술한 3차원 직선 및 원호 보간 알고리즘을 실제로 공작기계에서 활용하기 위해서는 보간기의 구현이 필연적으로 요구된다. 이에 펜티엄 PC를 사용하여 C언어로 소프트웨어 기반 보간기를 구현하였다.

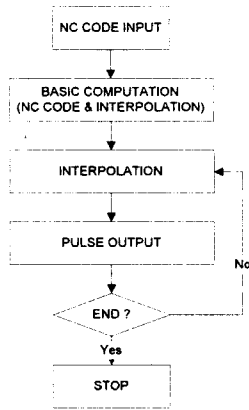


Fig. 5 Flowchart of the software interpolator

구현한 보간기의 흐름도는 Fig. 5와 같다. 이동의 입력에 대해 입력 지령의 해석 및 보간을 위해 요구되는 기본 계산을 미리 하고, 이를 이용해 보간을 수행한 후 보간의 결과물인 각 축으로의 펄스 열이 발생되도록 하였다. 구현한 보간기의 지령은 NC 코드(G01, G02, G03)로 하였고, 그 형식은 Fig. 1 및 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

### 4. 3차원 보간기의 성능 평가

구현한 소프트웨어 보간기의 성능을 보간 정밀도(interpolation accuracy)와 보간 속도(interpolation speed)로 나누어 평가하였다.

#### 4.1 보간 정밀도 평가

보간기의 가장 기본적인 요구 조건은 입력 형상을 어느 정도 정확하게 추종하는가 하는 보간

정밀도라고 할 수 있다. 구현한 3차원 보간기의 보간 정밀도에 대한 평가는 보간 오차(interpolation error)의 평가로 하였다. 보간 오차란, 원하는 이동 경로와 보간에 의한 실제 이동 경로 사이의 차이를 의미한다. 일반적으로 최대 보간 오차는 공작 기계의 기본 이동 단위인 1BLU이다. 즉, 1BLU라는 허용 오차 이내에서 원하는 이동 경로의 보간이 이루어져야 한다.

3차원 직선 보간시 보간 오차는 보간점과 직선 위의 최단 거리인 점 사이의 차이로 정의할 수 있다. 즉, Fig. 6에서 보간시 택해지는 점 (X,Y,Z)와 직선 위의 점 (X<sub>min</sub>,Y<sub>min</sub>,Z<sub>min</sub>)의 차이가 직선 보간시 오차이다.

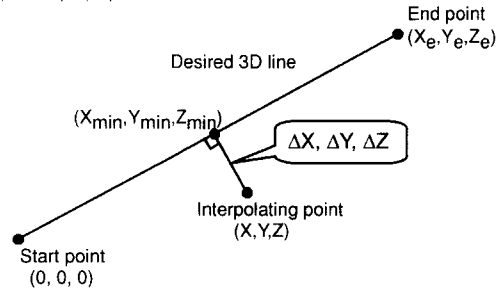


Fig. 6 Interpolation error in the linear interpolation

여기에서 직선 보간 오차  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta X = X - X_{\min} = X - X_e t_{\min} \quad (7)$$

$$\Delta Y = Y - Y_{\min} = Y - Y_e t_{\min}$$

$$\Delta Z = Z - Z_{\min} = Z - Z_e t_{\min}$$

$$\text{where } t_{\min} = \frac{X_e X + Y_e Y + Z_e Z}{X_e^2 + Y_e^2 + Z_e^2}$$

본 연구에서는 3차원 직선 보간을 2차원 직선 보간 2개의 결합으로 수행하였기 때문에 2차원 직선 보간시의 오차로부터 최종의 3차원 직선 보간 오차가 결정된다. 본 연구에서 사용한 2차원 직선 보간 알고리즘의 최대 보간 오차는 0.5BLU이다.<sup>(14)</sup> 따라서 이를 이용한 3차원 직선 보간시 발생할 수 있는 최대 오차는 0.707BLU가 된다. Table 3은 가장 큰 이동 변위인 X축의 변위가 10BLU이고, 나머지 Y와 Z의 변위는 0부터 10BLU일 때 실제로 보간시 발생하는 보간 오차의 결과이다. 앞의 예측값과 일치함을 알 수 있다.

Table 3 The evaluation of the linear interpolation error

X <sub>i</sub>	Y <sub>i</sub>	Z <sub>i</sub>	Maximum Error
10	0	From 1 to 10	0.497519
	1		<b>0.700140</b>
	2		0.622573
	3		0.680908
	4		0.635811
	5		0.654654
	6		0.640264
	7		0.627163
	8		0.638285
	9		0.602194
10	0.498755		

3 차원 원호 보간시 보간 오차는 Fig. 7 에서와 같이 보간시 택해지는 점 (X,Y,Z)와 원호 위의 점 (X<sub>min</sub>,Y<sub>min</sub>,Z<sub>min</sub>)사이의 차이로 정의할 수 있다. 이때 (X<sub>min</sub>,Y<sub>min</sub>,Z<sub>min</sub>)은 보간점과 원호를 포함하는 평면 위의 최단 거리인 점(X',Y',Z')을 구한 후, 다시 이 점과 원호와의 최단 거리인 점이라는 것으로부터 구할 수 있다.

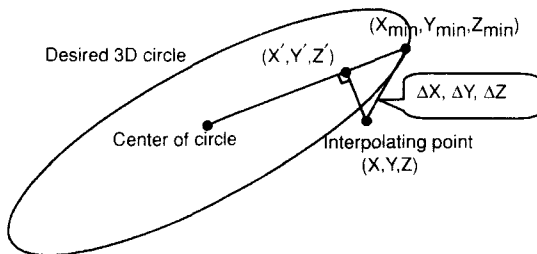


Fig. 7 Interpolation error in the circular interpolation

여기에서 원호 보간 오차 ΔX, ΔY, ΔZ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta X = X - X_{min} = X - X' t_{min} \quad (8)$$

$$\Delta Y = Y - Y_{min} = Y - Y' t_{min}$$

$$\Delta Z = Z - Z_{min} = Z - Z' t_{min}$$

$$\text{where } X' = -ZX \frac{ZX \cdot X + ZY \cdot Y - Z}{ZX^2 + ZY^2 + 1}$$

$$Y' = -ZY \frac{ZX \cdot X + ZY \cdot Y - Z}{ZX^2 + ZY^2 + 1}$$

$$Z' = \frac{ZX \cdot X + ZY \cdot Y - Z}{ZX^2 + ZY^2 + 1}$$

$$t_{min} = \sqrt{\frac{R^2}{X'^2 + Y'^2 + Z'^2}}$$

Table 4 는 반경이 80BLU 인 여러 위의 보간시 실제로 발생하는 보간 오차의 길과이다. 3 차원 원호 보간 오차는 반경 방향으로의 오차와 평면과의 거리로 나누어 동시에 평가하였다. 모두 1BLU 이하임을 확인할 수 있었다.

Table 4 The evaluation of the circular interpolation error

Direction Cosines of the Plane (which contains 3D circle)			Maximum Radial Error	Maximum Distance to the Plane
-0.612	-0.612	0.500	-0.917764	0.994897
0.000	-0.866	0.500	0.864083	<b>1.000000</b>
0.224	-0.837	0.500	-0.867200	0.996272
0.433	-0.750	0.500	<b>-0.993671</b>	0.996479
0.612	-0.612	0.500	-0.917764	0.994897
0.750	-0.433	0.500	0.901174	0.998711
0.791	-0.352	0.500	<b>0.996779</b>	0.990791
0.866	0.000	0.500	0.864083	<b>1.000000</b>
0.612	0.612	0.500	-0.917764	0.994897
0.000	0.000	1.000	-0.488994	0.000000
0.354	-0.354	0.866	0.647381	0.996445
0.500	-0.500	0.707	-0.822983	0.991378

공작기계에서의 실제 이동시에는 기계 구동부의 영향으로 이러한 보간기로부터 발생하는 오차는 더 작게 나타날 것이다.<sup>(1)</sup>

### 4.2 보간 속도 평가

기준 펄스 보간기는 보간 계산 시간에 의해 최대 보간 속도에 제한이 있다. 이에 구현한 보간기의 보간 속도를 평가하였다. 보간 속도의 평가는 2 차원 직선 및 원호 보간을 수행할 경우와 최대 보간 속도를 비교함으로써 평가하였다. 비교를 위해 동일한 PC 환경하에서 보간 프로그램을 작성하였고, 2 차원 보간은 기존의 방법들 중 향상된 성능을 지닌 M\_DSM 방법을 사용하였다.<sup>(14)</sup>

Table 5 The evaluation of the interpolation speed

Linear interpolation		Circular interpolation	
2D	3D	2D	3D
461 step/msec	439 step/msec	459 step/msec	336 step/msec
(2.17 μsec/step)	(2.28 μsec/step)	(2.18 μsec/step)	(2.98 μsec/step)

이의 결과는 Table 5 와 같다. 3 차원 직선 및 원호 보간 알고리즘의 구성은 복잡해 보이지만 실제 계산은 정수 덧셈만을 수행하기 때문에 2 차원 직선 및 원호 보간에 비해 그리 현저한 속도 저하는

발생하지 않았다. 본래의 일반적인 경우로 공작기계의 BLU가  $1\mu\text{m}$  일때, 보간 속도가  $2.98\mu\text{sec/step}$  이라면 이는 공작기계 상에서  $20\text{m/min}$  이라는 가공 속도를 의미하므로 충분히 적용 가능하다고 하겠다.

## 5. 결론

본 연구에서는 공간상에서 직선 및 원호가 2개의 변의 교차에 의해서 정의된다는 점에 기초하여 3차원 직선 및 원호 보간 알고리즘을 개발하였다. 또한 개발한 보간 알고리즘을 PC를 이용하여 소프트웨어적으로 구현함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 3차원 직선 및 원호 형상을 위한 새로운 보간 알고리즘을 개발하였다. 이를 통해 기존의 CNC 장치에서 불가능했던 3차원 직선 및 원호 형상의 생성을 가능하게 하였다.

(2) 개발한 보간 알고리즘의 PC를 이용한 보간기의 구현으로 실시간으로 3차원 직선 및 원호 형상의 가공을 가능하게 하였다.

(3) 구현한 보간기의 평가를 통해 개발한 3차원 직선 및 원호 보간 알고리즘의 향상된 성능을 검증하였다.

본 연구를 통해 3차원 직선 및 원호의 가공이 가능한 새로운 CNC 장치의 개발 및 이의 복잡한 형상에의 적용이 기대된다.

## 참고문헌

1. Koren, Y., "Computer Control of Manufacturing Systems," McGraw-Hill, 1983.
2. Bresenham, J. E., "Algorithms for Computer Control of a Digital Plotter," IBM Syst. J., Vol.4, No.1, pp.25-30, 1965.
3. Bresenham, J. E., "A Linear Algorithm for Incremental Digital Display of Circular Arcs," Commun. ACM, Vol.20, No.2, pp.100-106, 1977.
4. Danielsson, P. E., "Incremental Curve Generation," IEEE Transactions on Computers, Vol.C-19, No.9, pp.783-793, 1970.
5. Jordan, B. W., Lenon W. J., and Holm, B. D., "An Improved Algorithm for Generation of Nonparametric Curves," IEEE Transactions on Computers, Vol.C-22, No.12, pp.1052-1060, 1973.
6. Suenaga, Y., Kamae, T., and Kobayashi, T., "A High-Speed Algorithm for the Generation of Straight Lines and Circular Arcs," IEEE Transactions on Computers, Vol.C-28, No.10, pp.728-736, 1979.
7. Koren, Y., and Masory, O., "Reference-Pulse Circular Interpolators for CNC Systems," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.103, February, pp.131-136, 1981.
8. Yuan, C., "The Optimal Method of Interpolation Operation in NC-Feeding According to the Closet Distance," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.27, No.2, pp.155-165, 1987.
9. Shpitalni, M., Koren, Y., and Lo, C. C., "Realtime Curve Interpolators," Computer-Aided Design, Vol.26, No.11, pp.832-838, 1994.
10. Yang, D. C. H., and Kong, T., "Parametric Interpolator versus Linear Interpolator for Precision CNC Machining," Computer-Aided Design, Vol.26, No.3, pp.225-233, 1994.
11. Huang, J. T., and Yang, D. C. H., "A Generalized Interpolator for Cammand Generation of Parametric Curves in Computer Controlled Machines," Proc. 92 Japan USA Symposium on Flexible Automation Publ. by ASME, New York, NY, Vol.1, pp.393-399, 1992.
12. Kiritsis, D., "High Precision Interpolation Algorithm for 3D Parametric Curve Generation," Computer-Aided Design, Vol.26, No.11, pp.850-856, 1994.
13. Gan, J. G., and Woo, T. C., "Error Free Interpolation of Parametric Surfaces," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.114, pp.271-276, 1992.
14. Yang, M. Y., Hong, W. P., and Choi, J. Y., "New Interpolation Algorithm for Retrofitted NC," 3rd International Conference on Manufacturing Technology, Hong Kong, pp.362-367, 1995.