

5 축 동시 구동을 통한 볼바 측정용 원추형 경로 생성 방법<sup>§</sup>

이동목\* · 이재창\*\* · 양승한\*\*\*†

\* 경북대학교 기계연구소, \*\* 경북대학교 기계공학부

## Conical Path Generation Technique for Ball Bar Measurement Using Simultaneous 5-Axis Motion Control

Dong-Mok Lee\*, Jae-Chang Lee\*\* and Seung-Han Yang\*\*\*†

\*Institute of Mechanical Engineering Technology, Kyungpook Nat'l Univ.,

\*\*School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received June 26, 2012 ; Revised September 11, 2012 ; Accepted September 12, 2012)

**Key Words:** Conical Path(원추형 경로), Ball Bar(볼바), NAS 979, 5-Axis Machine Tool(5 축 공작기계), Simultaneous Motion(동시 구동)

**초록:** 본 연구는 원추대 가공과 등가인 동시 5 축 구동을 통한 볼바 측정용 경로 생성 기법을 소개하며 시스템 구조 형태(Structural configuration)에 관계없이 모든 5 축 공작기계에 대해 적용 가능한 일반화된 방법을 제시한다. 5 축 공작기계 시스템 정보와 원추형 정보, 그리고 볼바 측정 정보 등을 입력 받아 NC 코드 생성, 다양한 오차 평가 시뮬레이션 및 측정 시험을 쉽게 수행할 수 있도록 원호 경로 생성에 필요한 수학적 기계 입력 모델을 제시한다. 또한 제시된 원추형 경로 모델을 토대로 5 축 동시 구동 시 회전축의 이송 범위를 수학적으로 검토하며 반쪽지각 및 기울기각의 크기 차이, 볼바 틸팅 허용각 및 워크피스 볼의 오프셋 위치 등 여러 가지 조건이 이송 범위에 미치는 영향에 대해 분석한다.

**Abstract:** This study proposes a path generation technique for simultaneous five-axis driving for ball bar measurement, which is equivalent to cone frustum machining as mentioned in the NAS979 standard. The technique is generalized for a 3D circular path, and it is applicable to all machine tools regardless of their structural configurations. A mathematical machine input model that consists of a five-axis machine tool, ball-bar measurement and conical path information as inputs is presented for easy NC code generation, simulation for various test conditions, and a measurement test. The movement range of rotary axes, which depends on various conditions, is mathematically analyzed based on the proposed conical path model. Moreover, the effect of the movement range on various conditions (apex angle and inclination angle, ball bar tilting acceptance angle, offset position of workpiece ball, etc.) is analyzed.

## 1. 서 론

최근 다양한 5 축 공작기계가 초정밀 부품 생산에 많이 사용되고 있고 정확도 개선을 위한 이송계 성능 검증이 더욱 엄격해졌다. 볼바 시스템은 동시 측정을 통해 구동축들간의 성능 비교와 평가에 적합한 측정 시스템으로 1982 년에 개발<sup>(1,2)</sup>되어 ISO<sup>(3)</sup>에 규정되었으며 최근에는 5 축 공작기계의 회전테이블 오차 평가에 널리 활용되고 있다.<sup>(4-6)</sup> 5 축 제어

공작기계의 가공 정확도를 평가하기 위한 방법으로는 5 축을 동시에 구동하여 원추대(Cone frustum)를 가공하고 가공된 원추대의 진원도 측정하여 평가하는 NAS 979 가 있다<sup>(7)</sup>. NAS 979 는 미항공우주규격(National Aerospace Standard)에서 1969 년에 제정한 시험 표준으로서 더블 피벗 헤드를 가진 5 축 공작기계에 대한 시험 방법을 규정하고 있다. 하지만 시험을 수행하기 위해 시편을 고정을 위한 지그와 CMM 과 같은 진원도 측정용 장비가 추가로 필요하며 장시간이 요구된다. 또한 가공 시 발생하는 가공 오차들로 인해 정확한 검증이 어렵다. 따라서 실가공 대신 원추대 형상에 등가한 볼바 경로를 활용하여 측정하는 비가공 평가 방법이 소개되었으며 특히 Manato 등<sup>(8)</sup>은 테이블에 부착되는

§이 논문은 2012 년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2012. 6. 26-27., 대전컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, syang@knu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

워크피스 볼(Workpiece ball)의 오프셋(Offset)에 따른 구동 범위를 검토하였다. 또한 볼바 측정 시 볼바 축과 센터 마운트 소켓의 간섭에 대한 해결책 중 한가지로 원추면에 수직한 볼바 경로를 제안하였다. Ihara<sup>(9)</sup>는 원추형 볼바 경로에 대해 회전축이 가지는 세 방향(축, 반경, 접선 방향)에 대한 볼바 민감도를 정의함으로써 워크피스 볼의 오프셋이 C 회전축에 미치는 영향을 보였으며 Hong 등<sup>(10)</sup>은 원추형 경로에 대한 기하학적 오차의 영향을 분석하였다.

본 연구는 NAS979 표준에 나타난 원추대 가공과 등가인 동시 5 축 구동을 통한 볼바

측정용 경로 생성 기법을 소개한다. CAM 소프트웨어를 활용하지 않고도 시스템 구조 형태(Structural configuration)에 관계없이 모든 5 축 공작기계에 대해 적용 가능한 3 차원 원호 경로 생성 기법을 보여준다. 다양한 시험 조건에서의 볼바 측정을 위해 각 시험 조건을 입력 받아 즉시 원호 경로를 생성할 수 있으며, 다양한 오차에 따른 모의 실험을 수행할 수 있도록 수학적 기계 입력 모델을 제시한다. 이를 위해 5 축 공작기계의 시스템 구성 형태, 툴 길이와 같은 공작기계 정보와 원추대의 반꼭지각(Half apex angle), 기울기각(Inclination angle) 및 원호 반경 등 원추형 정보, 그리고 볼바의 워크피스 볼의 설치 위치 및 볼바의 측정 간섭을 고려한 틸팅각(Tilt angle) 등 볼바 측정 정보 등의 입력을 사용하여 기계 입력 모델 생성을 위한 일반적 방법을 보인다. 또한 제시된 원추형 경로 모델을 토대로 5 축 동시 구동 시 수학적 분석을 통해 다양한 입력 조건에 따른 회전축의 이송 범위를 검토하며 반꼭지각 및 기울기각의 크기 차이, 볼바 틸팅 허용각 및 워크피스 볼의 오프셋 위치 등 여러 가지 조건이 이송 범위에 미치는 영향에 대해 분석한다.

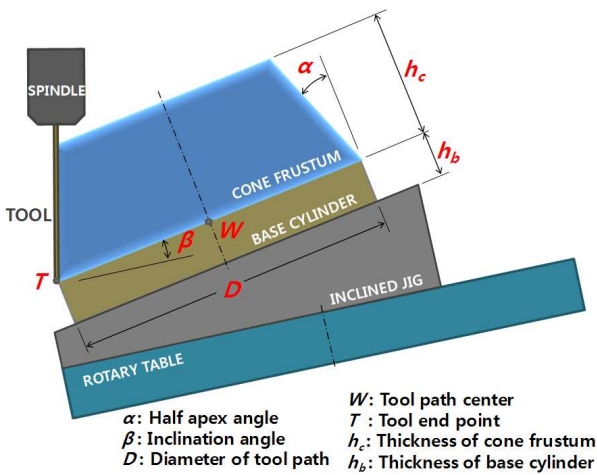


Fig. 1 Setup for cone frustum machining

## 2. 원추형 경로의 생성

Fig. 1 은 원추대 가공 시의 셋업 형상 정보를

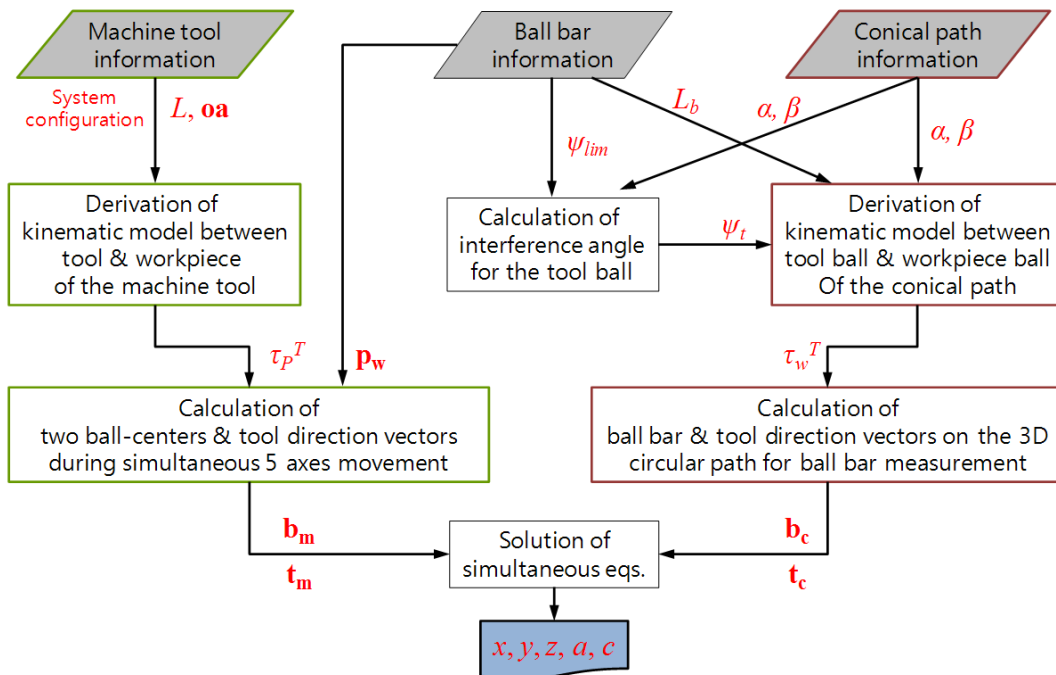


Fig. 2 Flow chart for the conical path generation

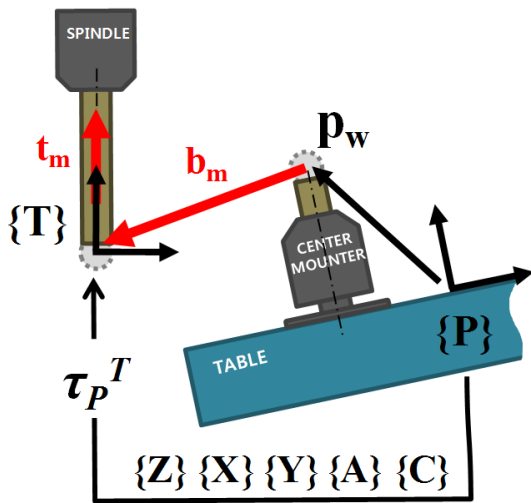


Fig. 3 Ball bar vector and tool directional vector during simultaneous five axes movement

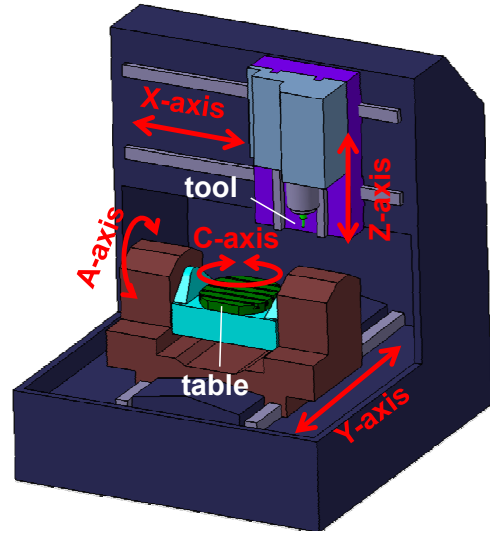


Fig. 5 System configuration of 5-axis machine tool used in the present work

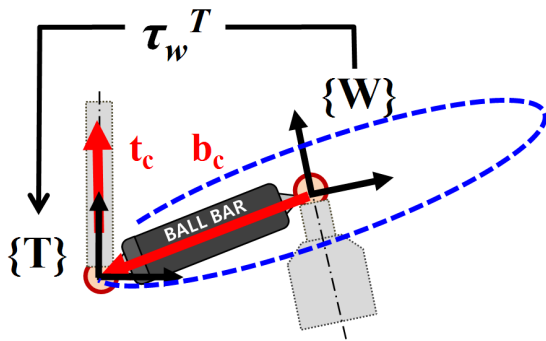


Fig. 4 Ball bar vector and tool direction vector on 3D circular path for ball bar measurement

나타낸다.  $\alpha$  및  $\beta$  는 원추 형상의 반꼭지각 및 원추대 자세의 기울기각을 나타내며  $T$  는 툴의 끝,  $W$  는 공구 원형 경로의 중심점,  $D$ ,  $h_c$  및  $h_b$  는 각각 원추대의 직경, 원추대의 두께 및 베이스 실린더의 두께를 나타낸다. 원추대 가공을 위해서는 동시 5 축 제어가 필요하며  $T$  와  $W$  위치에 볼바 시스템의 툴 볼(Tool ball)과 워크피스 볼을 배치함으로써 원추대 가공과 등가인 볼바 측정을 할 수 있게 된다.

볼바 측정에 필요한 원호 경로는 3 차원 원추형 경로로서, 5 축 공작기계 시스템의 구조 정보, 볼바 시스템의 측정 정보 및 원추 형상 정보 등에 의해 결정되며 경로 생성 방법은 Fig. 2 에 나타내었다. 우선 공작기계의 시스템 구조 형태와 툴 길이(Tool length), 회전테이블의 오프셋 등의 정보로부터 공작물에 대한 툴의 상대적 방향과 위치를 나타내는 기구학 모델을 수립한다.<sup>(11)</sup> 5 축

공작기계의 기구학 모델과 워크피스 볼의 셋업 위치를 이용해 Fig. 3 에 나타나듯 5 축 동시 구동 시 볼바의 두 볼 중심을 잇는 벡터와 그 때의 툴의 방향 벡터를 계산한다. 또한 Fig. 4 와 같이 측정하고자 하는 원추형 경로에 대한 기구학 모델로부터 볼바 벡터와 툴의 방향 벡터를 계산한다. 이 때 측정 동안 발생할 수 있는 물리적 간섭을 반드시 고려해야 한다. 볼이 볼소켓에 접촉할 때 볼바 축과 볼소켓 중심축 사이의 각도를 변수로 설정하고 5 축 동시 구동 시, 이 볼바 틸팅각이 물리적 충돌을 발생시키지 않는 조건을 만족하도록 해야 한다. 앞서 구해진 두 경우의 볼바 벡터와 툴의 방향 벡터들이 각각 일치하도록 기계 입력값에 대한 연립 방정식의 해를 구하면 최종적으로 원추형 경로를 생성하게 된다.

### 3. 수학적 분석

#### 3.1 시스템의 구성 및 5 축 동시 구동

5 축 공작기계의 시스템 구조 형태는 무수히 많지만 기본적으로 직선 3 축에 추가된 2 개의 수직관계의 회전축으로 툴의 가공 자세를 결정한다. 본 논문에서는 Fig. 5 와 같이 “PCAYFXZT”로 표현되는 틸팅 로타리 테이블을 가진 5 축 공작기계를 대상으로 하며 본 시스템 구성의 공작물에 대한 툴의 상대적 방향과 위치를 나타내는 기구학 모델은 동차변환행렬(HTM)을 이용하여 연속된 구동축으로 이루어진 기구학 체인(Kinematic chain)으로부터 얻어지며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \tau_P^T &= (\tau_F^Y \tau_Y^A \tau_A^C \tau_C^P)^{-1} \tau_F^X \tau_X^Z \tau_Z^T \\ &= \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

5 축 동시 구동을 통한 원추형 경로상의 볼바 벡터는 Fig. 3 에 나타나듯 공작물에 대한 툴의 상대적 방향( $\mathbf{R}$ )과 위치( $\mathbf{T}$ )를 나타내는 식 (1)의 기구학 모델로부터 구할 수 있다. 테이블에 설치된 볼바의 워크피스 볼 중심위치를  $\mathbf{p}_w = \{x_w, y_w, z_w\}^T$  라고 했을 때 5 축 동시 구동 수행 시의 툴 볼과 워크피스 볼 벡터의 구동 공간은 식 (2)와 같고 이때의 툴 방향은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{b}_m = \mathbf{T} - \mathbf{p}_w \quad (2)$$

$$\mathbf{t}_m = \mathbf{R}^{(3)} \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{R}^{(i)}$  는  $\mathbf{R}$  의  $i$  번째 열벡터를 의미한다.

### 3.2 볼바 틸팅 허용 각도

Fig. 6 과 같이 반쪽지각이 큰 원호 경로가 원추대의 바닥면(Bottom surface)과 평행한 평면에 위치할 경우 반쪽지각과 기울기각의 크기에 따라 툴볼 소켓과 볼바, 또는 워크피스 볼 소켓과 볼바가 물리적 충돌을 일으킬 수 있다. 이에 Manato<sup>(8)</sup> 등은 볼 소켓의 재설계 또는 원추면에 항상 수직한 볼바 경로 설정 등의 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 사용자가 원추면에 임의의 볼바 자세를 설정하도록 하기 위해 Fig. 6 과 같이 툴 볼 소켓 및 워크피스 볼 소켓의 축이 볼바 축과 이루는 틸팅각에서 직각을 뺀 각도를 각각  $\psi_b, \psi_w$  로 정의한다. 툴 볼 축 틸팅각  $\psi_t$  는 볼바 측정동안 항상 일정한 각도를 유지하는 반면 워크피스 볼 축 틸팅각  $\psi_w$  는 원호의 위상각에 따라 변하게 된다. 만약 볼바 시스템에서 간섭이 발생하는 각도를  $\psi_{lim}$  라고 할 경우,  $\alpha > \beta$  의 경우엔  $\psi_t$  가,  $\alpha < \beta$  의 경우에는  $\psi_{w,min}$  이 각각 충돌에 대한 임계각으로 사용될 수 있다.

$$\begin{cases} \psi_{w,min} > \psi_t \geq \psi_{lim}, & \text{for } \alpha > \beta \\ \psi_t > \psi_{w,min} \geq \psi_{lim}, & \text{for } \alpha < \beta \end{cases}$$

$\alpha < \beta$  경우  $\psi_{w,min}$  이 간섭 체크에 필요한 변수가 되므로 이 때의  $\psi_t$  는  $\alpha, \beta$  및  $\psi_{w,min}$  와의 관계식 (4)으로부터 구할 수 있다.

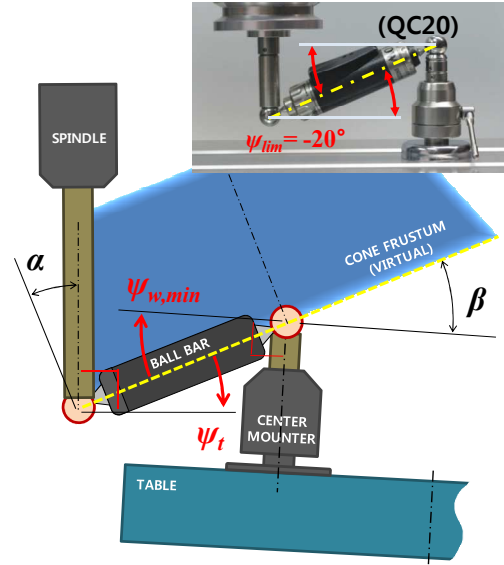


Fig. 6 Interference angle and tilt angle of each ball during ball bar measurement

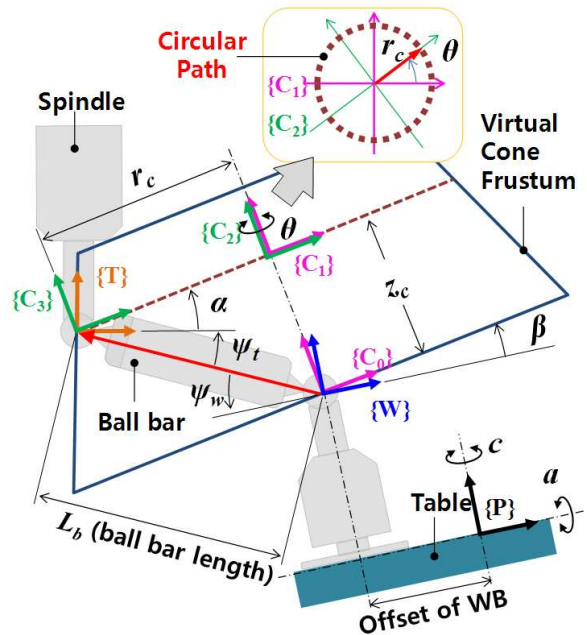


Fig. 7 Schematic of 3D conical path for ball bar measurement

$$\psi_t = \psi_{w,min} + \beta - \alpha \quad (4)$$

### 3.3 원추 형상에 위치한 3 차원 원호 경로

3.2 절에서 정의한 볼바의 틸팅각을 이용해 가상의 원추 형상에 위치한 3 차원 원호에 대한 구성은 Fig. 7 에 나타내었다. 볼바의 워크피스 볼에 대한 툴 볼 및 툴 볼 소켓의 위치 및 방향은 Fig. 7 에서 정의한 각 로컬 좌표계들의 관계로부터 식 (5)와 같이 구할

수 있다. 식 (5)를 바탕으로 볼바의 벡터와 툴의 방향벡터는 결국 식 (6), (7)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \tau_w^T &= Rot(x, \beta) Trans(z, z_c) Rot(z, \theta) \\ &\quad Trans(y, -r_c) Rot(x, -\alpha) \\ &= \left[ \begin{array}{ccc|c} \mathbf{R}_c & & & \mathbf{T}_c \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_c &= \{b_x \quad b_y \quad b_z\}^T = \mathbf{T}_c \\ &= \left\{ \begin{array}{l} r_c \sin \theta \\ -r_c \cos \beta \cos \theta - z_c \sin \beta \\ -r_c \sin \beta \cos \theta + z_c \cos \beta \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_c &= \{t_x \quad t_y \quad t_z\}^T = \mathbf{R}_c^{(3)} \\ &= \left\{ \begin{array}{l} -\sin \alpha \sin \theta \\ \sin \alpha \cos \beta \cos \theta - \cos \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \theta + \cos \alpha \cos \beta \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$r_c = L_b \cos(\alpha + \psi_t), z_c = L_b \sin(\alpha + \psi_t) \text{이다.}$$

#### 4. 원추형 경로 모델 수립 및 이송 범위

##### 4.1 최종 원추형 경로 모델

5 축 동시 구동을 통해 원추형 경로점에 위치하기 위해서는 볼바 벡터에 관한 식 (2)와 식 (6)이 일치하고 툴의 방향에 대한 식 (3)과 식 (7)이 일치해야 하므로 총 6 개의 연립 방정식을 구성된다. 따라서 동시 구동하는 5 개 축의 기계 입력에 대한 최종 결과식은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} a &= \cos^{-1}(t_z) \\ c &= \tan^{-1}(t_x / t_y) = \text{atan2}(t_y, t_x) \\ x &= o_{xa} + (b_x + x_w) \cos c - (b_y + y_w) \sin c \\ y &= -o_{ya} - (b_x + x_w) \cos a \sin c \\ &\quad - (b_y + y_w) \cos a \cos c + (b_z + z_w) \sin a \\ z &= o_{za} + L + (b_x + x_w) \sin a \sin c \\ &\quad + (b_y + y_w) \cos c \sin a + (b_z + z_w) \cos a \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)은 틸팅 로타리 테이블을 가진 5 축 공작기계에서 5 축 동시 구동을 통해 측정하고자 하는 볼바 변수 정보 및 원추대의 변수 정보를 입력으로 하여 원추형 경로 생성하기 위해 필요한 기계 입력 모델을 나타낸다. 직선 3 축의 로컬 좌표계 원점을 기계 원점(Home position)에서 정의하였으므로 절대 이송 지령(G01)으로 쉽게 구동이 가능하다. 따라서 NC 코드 생성, 오차 평가 시뮬레이션 및 측정 시험에 유용하게 사용될 수 있다.

##### 4.2 구동축의 이송 범위

원추형 경로 상에서 위상각  $\theta$  에 따라 동시 구동할 때 식 (8)에서의 회전축  $A, C$  의 이송 범위에 대해 분석하였다.  $\theta$  가  $360^\circ$  회전하였을 경우 식 (7)의 요소값은 아래 식들을 만족하게 된다.

$$-\sin \alpha \leq t_x \leq \sin \alpha \quad (9)$$

$$-\sin(\alpha + \beta) \leq t_y \leq \sin(\alpha - \beta) \quad (10)$$

$$\cos(\alpha + \beta) \leq t_z \leq \cos(\alpha - \beta) \quad (11)$$

식 (11)로부터  $A$  축의 이송 범위가 결정되며 식 (9)와 (10)으로부터  $C$  축의 이송 범위가 결정된다. 다음은 3 가지 경우에 대해  $A$  축과  $C$  축의 이송 범위를 분석하였다.

##### 1) $\alpha > \beta$ 일 경우

$$\begin{aligned} \alpha - \beta \leq a \leq \alpha + \beta \\ -\infty < c < \infty \end{aligned}$$

##### 2) $\alpha < \beta$ 일 경우

$$\begin{aligned} -(\alpha - \beta) \leq a \leq \alpha + \beta \\ \cos^{-1}\left(\frac{-\sin \alpha}{\sin(\alpha - \beta)}\right) \leq c \leq \cos^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \beta)}\right) \end{aligned}$$

##### 2) $\alpha = \beta$ 일 경우

$$0 \leq a \leq 2\alpha (= 2\beta)$$

$$\frac{t_x}{t_y} = \frac{\sin \theta}{\cos \alpha (1 - \cos \theta)}$$

$$\begin{aligned} \lim_{\theta \rightarrow -0} \tan^{-1}(t_x / t_y) \leq c \leq \lim_{\theta \rightarrow +0} \tan^{-1}(t_x / t_y) \\ -90^\circ \leq c \leq 90^\circ \end{aligned}$$

**Table 1** Travel range results for different test conditions

		(1) $\alpha=30^\circ, \beta=15^\circ$					(4) $\alpha=15^\circ, \beta=30^\circ$				
$\psi_i$	$\mathbf{p}_w^T$	-30°	0°	-30°	-30°	-30°	-30°	0°	-30°	-30°	-30°
		{0,0,100}	{0,0,100}	{150,0,100}	{0,150,100}	{0,0,200}	{0,0,100}	{0,0,100}	{150,0,100}	{0,150,100}	{0,0,200}
x	min	-494.83	-501.76	-606.56	-555.17	-494.83	-550	-546.59	-678.34	-472.35	-550
	Max	-405.17	-398.24	-293.45	-344.83	-405.17	-350	-353.41	-478.34	-427.65	-350
	R	89.66	103.53	313.11	210.34	89.66	200	193.19	200	44.71	200
y	min	360.65	372.90	229.42	217.60	388.37	175.88	179.29	153.64	320.77	201.76
	Max	407.31	420.71	503.04	513.38	478.02	420.71	417.30	432.88	526.78	491.42
	R	46.66	47.81	273.62	295.78	89.66	244.83	238.01	279.24	206.01	289.66
z	min	-329.29	-279.29	-392.46	-435.36	-258.58	-279.29	-253.41	-307.27	-385.36	-208.58
	Max	-303.41	-253.41	-240.24	-264.59	-206.82	-253.41	-227.53	-225.43	-292.23	-156.82
	R	25.88	25.88	152.22	170.77	51.76	25.88	25.88	81.85	93.13	51.76
a	min	15°	15°	15°	15°	15°	15°	15°	15°	15°	15°
	Max	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
	R	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°
c	min	-360°	-360°	-360°	-360°	-360°	148.83°	148.83°	148.83°	148.83°	148.83°
	Max	0°	0°	0°	0°	0°	211.17°	211.17°	211.17°	211.17°	211.17°
	R	-360°	-360°	-360°	-360°	-360°	62.35°	62.35°	62.35°	62.35°	62.35°
		(2) $\alpha=45^\circ, \beta=15^\circ$					(5) $\alpha=15^\circ, \beta=45^\circ$				
x	min	-475.88	-486.60	-602.22	-574.12	-475.88	-546.59	-536.60	-686.18	-491.69	-546.59
	Max	-424.12	-413.40	-297.78	-325.88	-424.12	-353.41	-363.40	-493.00	-408.31	-353.41
	R	51.76	73.21	304.43	248.24	51.76	193.19	173.21	193.19	83.38	193.19
y	min	370.71	400	266.65	240.81	420.71	203.41	213.40	193.94	333.31	253.41
	Max	407.31	436.60	494	482.31	493.92	433.20	423.21	436.60	508.20	519.80
	R	36.60	36.60	227.34	241.51	73.21	229.79	209.81	242.67	174.88	266.39
z	min	-370.71	-300	-460.04	-500.61	-320.71	-274.12	-250	-298.74	-404.02	-224.12
	Max	-334.11	-263.40	-244.78	-259.11	-247.51	-237.52	-213.40	-212.90	-312.52	-150.91
	R	36.60	36.60	215.27	241.51	73.21	36.60	36.60	85.84	91.51	73.21
a	min	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°
	Max	60°	60°	60°	60°	60°	60°	60°	60°	60°	60°
	R	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°
c	min	-360°	-360°	-360°	-360°	-360°	158.53°	158.53°	158.53°	158.53°	158.53°
	Max	0°	0°	0°	0°	0°	201.47°	201.47°	201.47°	201.47°	201.47°
	R	-360°	-360°	-360°	-360°	-360°	42.94°	42.94°	42.94°	42.94°	42.94°
		(3) $\alpha=45^\circ, \beta=30^\circ$					(6) $\alpha=30^\circ, \beta=45^\circ$				
x	min	-500	-520.71	-608.11	-550	-500	-546.59	-546.59	-652.88	-459.47	-546.59
	Max	-400	-379.29	-291.89	-350	-400	-353.41	-353.41	-459.47	-440.53	-353.41
	R	100	141.42	316.23	200	100	193.19	193.19	193.41	18.95	193.19
y	min	343.13	366.88	218.92	201.70	372.47	179.29	179.29	141.71	324.18	205.17
	Max	417.30	446.59	480.24	456.24	513.90	443.19	443.19	447.08	482.01	539.78
	R	74.17	79.71	261.32	254.54	141.42	263.90	263.90	305.37	157.83	334.61
z	min	-394.83	-324.12	-471.28	-539.72	-368.95	-350.00	-298.24	-397.56	-494.89	-324.12
	Max	-324.12	-253.41	-247.67	-285.30	-227.53	-279.29	-227.53	-231.73	-318.11	-182.70
	R	70.71	70.71	223.61	254.42	141.42	70.71	70.71	165.83	176.78	141.42
a	min	15°	15°	15°	15°	15°	15°	15°	15°	15°	15°
	Max	75°	75°	75°	75°	75°	75°	75°	75°	75°	75°
	R	60°	60°	60°	60°	60°	60°	60°	60°	60°	60°
c	min	-360°	-360°	-360°	-360°	-360°	135°	135°	135°	135°	135°
	Max	0°	0°	0°	0°	0°	225°	225°	225°	225°	225°
	R	-360°	-360°	-360°	-360°	-360°	90°	90°	90°	90°	90°

All linear dimensions are in mm.

이와 같은 결과는 A 축과 C 축의 이송 범위가  $\alpha$  와  $\beta$  의 차이에 따라 다른 이송 범위를 가지게 됨을 알 수 있다. 위 결과에서 특이할 점은  $\alpha < \beta$  의 경우 C 축이  $360^\circ$  회전하지 못하게 되며  $\alpha = \beta$  의 경우  $\theta=0^\circ, 360^\circ$  점에서 특이점(Singular point)이 발생하여 C 축의 이송 범위는 정확히  $180^\circ$ 가 된다.

#### 4.3 사례 연구

식 (8)을 토대로 다양한 경우의 조건에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. Table 1 에서 조건 (1), (2), (3)은  $\alpha > \beta$  의 경우에 해당하며 (4), (5), (6)은  $\alpha < \beta$  경우에 대한 조건이다. 또한 이들 각 조건에서 볼바의 틸팅각 및 워크피스 볼의  $x, y, z$  방향 오프셋 위치 등 5 개의 세부 조건을 변화시켰다. Table 1 의 각 조건에 대한 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- (1)  $\alpha > \beta$  경우, 워크피스 볼의 오프셋은 직선축의 이송 범위를 확대시킨다.
- (2)  $\alpha$  가 증가할 경우, Z 축의 이송 범위는 확대되는 반면 X, Y 축의 이송 범위는 축소한다.
- (3)  $\beta$  가 증가할 경우, A 축의 이송범위가 확대( $2\beta$ )되고 직선축의 이송 범위 또한 확대된다.
- (4)  $\alpha < \beta$  경우, C 축은  $360^\circ$  회전하지 못하며 yw 오프셋은 X, Y 축의 이송 범위를 축소시킨다.
- (5)  $\beta$  가 증가할 경우, Z 축의 이송 범위는 확대되는 반면 X, Y, C 축의 이송 범위는 축소한다.
- (6)  $\alpha$  가 증가할 경우, A 축의 이송범위가 확대( $2\alpha$ )되고 Y, Z 축의 이송범위가 확대된다.

## 5. 결 론

본 논문은 원추대 가공과 등가이고 동시 5 축 구동을 통한 볼바 측정용 원추형 경로 생성 기법을 소개하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 시스템 구조 형태에 관계없이 임의의 구조의 5 축 공작기계에 대해 적용 가능한 일반화된 원호 경로 생성 방법을 제시하였다.
- (2) NC 코드 생성, 다양한 오차 평가 시뮬레이션 및 측정 시험을 쉽게 수행할 수 있는 원호 경로 생성에 필요한 기계 입력 모델을 제시하였다.
- (3) 제시된 원추형 경로 모델을 토대로 5 축 동시 구동 시 회전축의 이송 범위를 수학적 검토 및 사례 연구를 통해 분석하였다.

## 후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재

원으로 한국연구재단의 대학중점연구소지원사업으로 수행된 연구임(2012-0005856).

## 참고문헌

- (1) Bryan, B., 1982, "A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools (part 1: Principles and Applications)," *Precision Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 61~69.
- (2) Bryan, B., 1982, "A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools (part 2: Constructions and Details)," *Precision Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 125~138.
- (3) ISO 230-4, 1994, *Test Code for Machine Tools – Part 4: Circular Tests for Numerically Controlled Machine Tools*.
- (4) Lee, K. L., Lee, D. M., Kweon, S. H. and Yang, S. H., 2010, "Geometric Errors Estimation of a Rotary Table Using Double Ball-Bar," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 11, pp. 98~105.
- (5) Lee, D. M., Zhu, Z., Lee, K. L. and Yang, S. H., 2011, "Identification and Measurement of Geometric Errors for a Five-axis Machine Tool with a Tilting Head Using a Double Ball-Bar," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 2, pp. 337~343.
- (6) Lee, K. I., Lee, D. M. and Yang, S. H., 2012, "Parametric Modeling and Estimation of Geometric Errors for a Rotary Axis Using Double Ball-Bar," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI 10.1007/s00170-011-3834-0.
- (7) NAS 979, 1969, *Uniform Cutting Tests – NAS Series. Metal Cutting Equipment Specifications*, Aerospace Industries Association of America, pp. 34~37.
- (8) Matano, K. and Ihara, Y., 2007, "Ball Bar Measurement of Five-axis Conical Movement," *Laser Metrology and Machine Performance*, Vol. VIII, pp. 34~43.
- (9) Ihara, Y., 2011, "Ball Bar Measurement on Machine Tools with Rotary Axes," *Int. J. of Automation Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 180~187.
- (10) Hong, C., Ibaraki, S. and Matsubara, A., 2011, "Influence of Position-independent Geometric Errors of Rotary Axes on a Machining Test of Cone Frustum by Five-axis Machine Tools," *Precision Engineering*, Vol. 35, No 1, pp. 1~11.
- (11) Lee, D. M. and Yang, S. H., 2008, "Mathematical Analysis for Geometric Error Synthesis Modeling of Machine Tools," *Proceedings of Korean Society of Precision Engineering Conference*, pp. 71~72.
- (12) Renishaw, 2010, *QC20-W Wireless Ballbar System Description and Specifications*.