

Machining Center의 2차원 원호보간정밀도 진단 System의 개발

김 정 순*, 남궁 석**, 堤 正 臣***

A Development of Accuracy Diagnostic System 2-Dimensional Circular Interpolation of Machining centers

Jeong-Soon Kim*, Suk-Nangung**, Masacmi-Tsutusmi***

ABSTRACT

The paper describes and alternative method based on a new idea to measure the circular movement of machining centers. ISO has employed three testing methods for the acceptance tests of machine tools; the first is a rotating one-dimensional probe method, the second is a two-dimensional probe and a master circular ring, and the third is a kinematic ball bar. The last two methods were proposed and introduced by W. Knapp and J. B. Bryan, respectively. The newly developed method is superior to above two methods; the rotating angle can be detected and the rotating radius is variable. Circular movement errors of machining centers were investigated by the analysis of data measured by R- θ method. Following observations are obtained 1) The errors which depend on positions, i. e., periodical errors by the pitch of ball screws, errors by compensation of backlash and errors by perpendicularity of X and Y-axis, were analyzed. 2) The errors which depend on NC control system, i. e., errors by the unbalance of position-loop-gains, errors by velocity-loop-gains and errors by feed speeds, were quantitatively analyzed. 3) The method of extracting error information, which uses moving technique of averaging angle and fourier's analysis data measured by the R- θ method, was proposed.

Key Words : Circular movement, machining center, one-dimensional probe, two-dimensional probe, R- θ method, rotating angle, ball screws, backlash, perpendicularity, position-loop-gain, velocity-loop-gain, technique of averaging angle

1. 서 론

최근 기계가공에 있어서 가장크게 요구되고 있는 것은 FA화와 함께 고정밀도 가공의 실현이다. Machining Center의 고정밀도화를 위해 기계의 기하학

적 운동정밀도의 향상이나 NC장치의 각종 Parameter의 적절한 설정이 중요한 과제로 되어있다.

지금까지 공작기계의 성능은 주로 기하학적 운동정밀도, 위치결정정밀도, 공작정밀도등의 시험 및 검사에 의해 평가되어왔다. 그러나 공작기계의 수치제어

* 충남대학교 대학원

** 충남대학교 기계공학과(정회원)

*** 동경농공대학 기계시스템공학과

System을 포함한 기계 System으로서의 평가는 충분히 행해지고 있지 않았다.

한국공업표준협회(KS B 4408)와 일본공업규격(JIS B 6333)에서는 원호보간에 의한 공작기계의 운동정밀도 시험으로서 End Mill을 이용한 원형외형절삭에 의해 형상정밀도를 검사하는 Direct Test⁽¹⁾법이 정해져 있지만, 이 방법은 공작물을 직접절삭하기 때문에 공구나 공작물의 영향을 받아서 공작기계의 운동정밀도만을 검사하는 것은 곤란하다. 또한 오늘날과 같이 조립, 검사 등에 요하는 인원과 시간을 줄이고 싶다는 욕망이 높아 가고 있는 중에 Direct test에서는 가공, 측정이라는 2단계의 과정을 거치기때문에 수고와 시간이 걸리는 등의 문제가 있다.

그래서 이 Direct test법 대신에 직접 절삭하지 않고 원호보간에 의한 공작기계의 운동정밀도를 평가할 수 있는 방법으로서 W. Knapp 이 제안한 Circular test 법⁽²⁾⁽³⁾과 kakino가 제안한 Double Ball Bar법⁽⁴⁾⁽⁵⁾이 개발되어 사용되고 있고, 또한 Ball Bar법으로 Quick Check(RENISHOW, LTD)⁽⁶⁾, M. Burdekin이 제안한 Contisure⁽⁹⁾가 있다. 이들의 측정기로 Machining Center의 원호보간정밀도를 측정하여 오차를 진단하는 방법⁽²⁾⁻⁽⁷⁾ 제안되어 국제표준화기구(ISO, TC39/SC2)에서도 공작기계의 원운동 시험방법으로서 채용하는 것이 결정되었다⁽¹⁰⁾. 이 원호보간정밀도 시험은 NC 공작기계의 기하학적인 운동만이 아니라 지금까지 불명확해왔던 제어System이나 이송속도에 의존하는 오차원인까지 절삭하지 않고 평가할 수 있는 새로운 측정방법이다. 그러나 Circular Test법은 회전각의 검출을 할 수 없고, Master ring과 Probe를 접촉시켜서 측정하기 때문에 마찰이 작용해 고속이송시에는 측정지연이 일어나기 쉽다는 결점이 있다. 또한 DBB법에서도 회전각의 검출은 되지않고 구조상 작은 반경의 측정을 할 수 없을뿐 아니라, 검출부인 Moire scale과 plunger 기구의 응답성이 낮기 때문에 고주파성분을 포함한 진동의 측정에 불합리하다는 결점이 있다.

그래서 본 연구소에서는 상술한 2가지 방법의 대체 방법으로 간단하고 값싸게 제작할 수 있는 새로운 원호보간정밀도 측정장치와 측정 System을 개발하여 이 측정기로 측정된 원호형상과 Machining Center의 운동오차 요인과의 관계를 정량적으로 고찰하였다.

2. 새로 개발한 측정기와 측정 System의 개략과 특징

새로 개발한 측정장치(이하 R- θ 법이라 부른다)를 Fig.1에 나타낸다. 이 측정장치의 특징은 회전각을 측정하기 위해 Rotary encoder(MEH-30-2500, MICROTTECH LABORATORY INC., Table 1)를 사용하고 있는 것이다. 이미 보고한 장치⁽¹¹⁾와의 다른점은 (1) 주축측의 target를 회전할 수 있도록 했다. (2) 측정범위가 넓고 취급이 편리한 와전류형 변위계(AEC 5505, 電子應用, Table 2)를 사용한 점이다.

Table 1. Specification of rotary encoder

Power	DC 5v
Detection method	incremental
Output pulse	2500 (pulse/rotation)
Output phase	A, B, Z
Output signal form	short wave
Phase difference	90°±45°

Table 2. Specification of eddy current type gap sensor.

Measurement range	0-2000 μ m
Output	+5v (5mv/ μ m) 250 Ω
Resolution	0.5 μ m
Frequency range character	DC 20KHz-2dB
Power	DC ±12v, ±40mA

측정방법은 우선 Housing의 회전축에 \square 형의 홈을 가지고 있는 Arm을 고정하고, 주축에 부착시킨 Target를 Arm의 홈에 삽입한다. 이 Arm에 의해서 Target는 Radial방향으로만 이동가능하다. 그리고 Arm에 고정된 변위계에 의해서 Radial방향의 변위를 측정한다.

변위계로부터의 신호는 Amplifier에 의해서 증폭되어 Rotary encoder로부터 출력된 Pulse와 동시에 12Bit A/D converter(ADM-5198 BPC, MICRO SCIENCE, Table 3)를 통해서 C-computer에 입력된다. Computer에 입력된 Data는 연산된후 Laser printer에 극좌표로 나타낸다.

R- θ 법의 최대 특징은 0~150mm의 반경을 임의로

선택할 수 있고, 변위계는 비접촉형이기 때문에 고주파 성분을 포함한 진동측정도 가능하다. 또한 DBB법이나 CT법에서는 기계의 기동 Button과 측정개시 Button을 동시에 수동으로 누르는 것에 의해 측정이 개시되는 것에 비해 R- θ 법에서는 Rotary encoder를 사용하기 때문에 기계의 기동 Button을 누르는 것과 동시에 자동적으로 측정이 개시되고 측정개시후에도 일정한 각도로 Data를 Sampling할 수 있어 고속 이송시에도 각도를 정확히 측정할수가 있다는 것이다.

Table 3. Specification of A/D converter

Analog input	input impedance 100M Ω above 2-channel standard input range $\pm 5v$
Digital code	Maximum sampling speed 285KHz 12 bit binary
Buffer memory	Each channel 64K, static RAM
Clock speed	4MHz
Power	+5v, 0.9A
Trigger	TTL (capacity of free trigger)

2.1 R- θ 법 측정기의 정밀도

Fig. 1에 나타난 것처럼 일체로 제작한 Test-bar는 Spindle chuck에 파악되는 부분, 변위계의 측정면으로 되는 부분 및 Arm의 홈에 삽입되는 부분으로 구성되어 있다. 이들의 각 부분이 어떻게 영향을 미치는 가를 조사했다.

(1) 측정면의 영향

R- θ 법 측정장치에서는 측정면을 원통연삭였는데, 진원도를 측정한 결과 0.9 μm 이었다. 변위계는 이 측정면과 축수의 회전중심과의 상대적인 변위를 검출하고, 이 진원도는 그대로 원호보간정밀도에 포함되기 때문에 보다 고정밀도한 측정을 행하기 위해서는 측정면의 진원도는 충분히 작게 하지 않으면 안된다. 진원도를 비교해 보면 Test-bar의 진원도 (0.9 μm)는 DBB법의 구의 진원도에 기인하는 측정정밀도 (0.5 μm) 보다 좋다고는 말할 수 없지만, 주축측에도 Angular ball

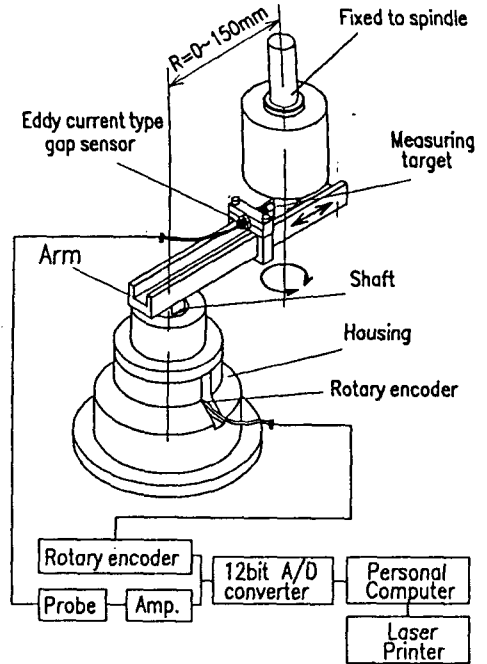


Fig. 1 Schematic diagram of measuring instrument of R- θ method

bearing을 사용해 측정면을 변위계에 대해서 항상 일정하게 유지하도록 했기 때문에 측정면의 형상에 의한 측정오차가 없게 되었다.

(2) Test-bar와 Arm 홈 사이의 간격의 영향

Test-bar의 Arm 삽입부와 Arm의 홈과의 사이에 간격이 존재하더라도 원호보간정밀도 측정시 원리상으로는 Test-bar는 홈의 편측을 접촉해서 Arm을 회전시키기 때문에 그 영향을 무시할 수가 있다. 그러나 실제에는 CW, CCW의 양방향 측정을 행하기 때문에 이와 같은 경우는, 이 간격만큼 측정개시위치의 오차가 생기고, 측정 중에도 기계의 진동의 영향에 의해 Test-bar가 Arm으로부터 떨어질 가능성을 생각 할 수 있는데, 이 간격과 그들에 의한 변위계의 측정오차 관계는 Fig. 2에 나타난 것처럼 변위계의 측정자 형상 및 Test-bar의 기하학적인 형상으로부터 구할 수가 있다. 단, 와전류형 변위계의 경우는 이론적인 값을 계산하는 것은 곤란하기 때문에, 여기서는 전기 Micrometer를 사용한 경우에 대해서 고찰한다.

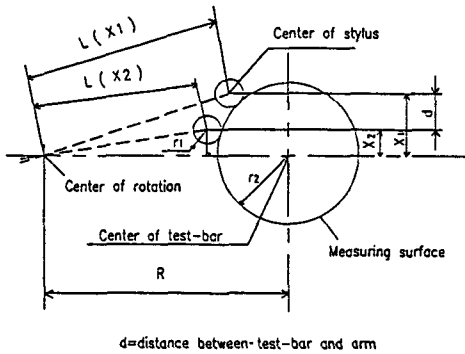


Fig. 2 Error of measurement of distance between test-bar and arm

Fig. 2에서 각부의 측정결과는 Arm 흡과 Test-bar와의 간격 $d=0.08\text{mm}$, 전기 Micromet의 측정자 반경 $r_1=1.5\text{mm}$, Test-bar의 반경 $r_2=19.225\text{mm}$ 이다. 여기서 회전반경 $R=22\text{mm}$ 로 하면 Arm의 회전중심으로부터 측정자 중심까지의 거리 $L(x)$ 는

$$L(x) = (x^2 + [R - \{(r_1 + r_2)^2 - x^2\}^{1/2}]^2)^{1/2} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (1)에 의해서 간격에 의한 변위계의 측정오차 D 는

$$D = L(x_1) - L(x_2) \quad (x_1 > x_2) \quad (2)$$

로 나타내진다. x_1 및 x_2 에 적당한 값을 대입하는 것에 의해 오차의 크기를 알 수가 있다.

변위계의 설치위치를 Target의 축 중심에 정확히 설치했다고 생각하면 식 (1) (2)로부터 본 측정장치의 오차는

$$D_{\min} = L(0.04) - L(0) \approx 0.7 \mu\text{m} \quad (3)$$

으로 된다. 그러나 와전류형 변위계를 사용했을 경우 실제로 손으로 Arm을 움직였을 때 그 반경 방향의 오차는 $0.5 \mu\text{m}$ 이었다.

(3) Arm의 회전정밀도

Arm의 회전정밀도는 Arm을 고정 shaft의 회전정밀도에 의존한다. 그래서 shaft 및 Test-bar의 회전정밀도를 향상시키기 위해 Angular ball bearing (Table 4)을 삽입하여 각각의 회전 정밀도를 향상시켰다 (Fig. 3). 각각의 회전 정밀도는 다음의 방법으로 조사

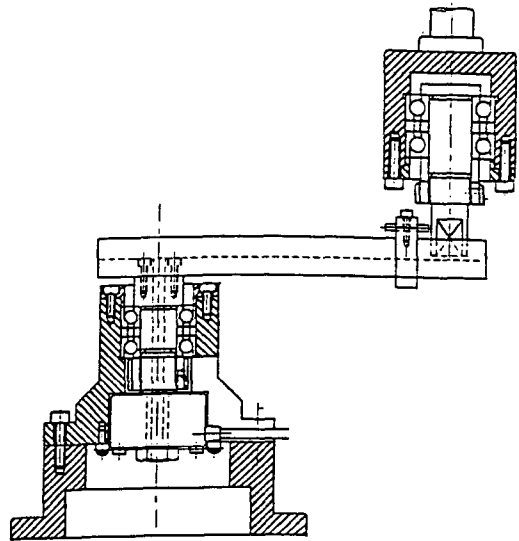


Fig. 3. Section of measuring instrument of R- θ method

했다. Housing 및 Test-bar를 진원도 측정기의 Table 위에 올려놓고 shaft앞에 진원도 측정기의 probe를 접촉시켜 Housing 및 Test-bar를 회전시켜 shaft의 진동을 측정했다. 그 결과를 Housing 및 주축축의 각각의 회전오차는 $0.5 \mu\text{m}$, $1.2 \mu\text{m}$ 이었다. 따라서 본 측정기의 shaft의 진동에 의한 誤差는 최대로 $1.7 \mu\text{m}$ 이다.

따라서, 이 R- θ 법 측정기의 정밀도 P는

$$P = (\text{측정면의 진원도}) + (\text{Test-bar와 Arm사이의 간격}) + (\text{Shaft의 회전정밀도})$$

$$= 0.9 + 0.5 + 1.7 = 3.1 \mu\text{m}$$

이다. 이 값은 DBB법의 측정정밀도에 비해서 열세이지만, 가장 조건이 나쁜 상태를 생각했을 때 오차의 총합

Table 4. Specification of angular ball bearing (#7002)

Inner dia. (mm)	Outer dia. (mm)	Height (mm)	Dynamic load (KN)	Static load (KN)
15	32	9	5.80	3.15

이기 때문에 실제 측정을 하였을 경우에는 이 값보다 좋은 측정정밀도를 얻을 수 있다.

2.2 측정 Data처리 방법은 다음과 같다.

- (1) Computer에 입력된 Data의 수 N을 선택한다. 단, N의 최대값은 Rotary encoder의 분해능에 의해 결정된다.
- (2) 미리 구해놓은 교정치를 기본으로 Data를 실제의 변위량으로 변환한다.
- (3) N개의 Data와 그 평균치와의 차를 새로운 Data로 한다.
- (4) N개의 Data로 부터 Fourier계수를 산출해 편심보정을 한다.
- (5) 측정 결과를 극좌표로 나타낸다. 이때 n번째의 data ΔR 에 표시하기위한 기준반경 R을 더해서 $(R + \Delta R, \theta_n)$ 으로 표시한다. 또한 θ_n 은 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_n = \frac{360^\circ}{N} * n \quad (n=1, 2, 3, \dots, N) \quad (4)$$

3. 원호보간운동 오차의 정의

R- θ 법에 의해서 얻어진 운동계적으로부터 오차요인을 진단하기 위해서는, 먼저 진원으로부터의 운동오차를 ΔR 로 한다. R- θ 법에서 원호보간 측정을 하였을 경우 실제로 Work table회전중심과 측정기 중심과를 맞추었지만 엄밀히는 그것들을 일치시키는 것은 불가능하다. 그래서 Computer에 입력된 data로부터 1차의 Fourier 계수를 산출해, 원래의 data에서 빼는 방법으로 편심을 보정한다. 아래에 그 이론적 방법을 서술한다.

변위계로부터 측정된 변위를 $r(\theta)$ 라고 하면 $r(\theta)$ 는 Fourier급수에 의해

$$r(\theta) = A_0 + A_1 \sin \theta + A_2 \sin 2\theta + \dots + A_n \sin n\theta + B_1 \cos \theta + B_2 \cos 2\theta + \dots + B_n \cos n\theta \quad (5)$$

(단, θ 는 임의의 점을 원점으로한 원주상의 각도로 한다.)

여기서,

$$\begin{aligned} A_0 &= (1/2\pi) \int_0^{2\pi} r(\theta) d\theta \\ A_1 &= (1/\pi) \int_0^{2\pi} r(\theta) \sin \theta d\theta \\ B_1 &= (1/\pi) \int_0^{2\pi} r(\theta) \cos \theta d\theta \\ A_2 &= (1/\pi) \int_0^{2\pi} r(\theta) \sin 2\theta d\theta \\ B_2 &= (1/\pi) \int_0^{2\pi} r(\theta) \cos 2\theta d\theta \\ A_n &= (1/\pi) \int_0^{2\pi} r(\theta) \sin n\theta d\theta \\ B_n &= (1/\pi) \int_0^{2\pi} r(\theta) \cos n\theta d\theta \end{aligned}$$

로 나타낼 수 있다. Computer에 입력되는 data는 연속성이 아니고 n개의 이산형 data로 적분으로 이들을 다음과 같이 급수로 나타낼수 있다.

$$\begin{aligned} A_0 &= (1/2\pi)(2\pi/n)(r_1+r_2+\dots+r_n) \\ &= (1/n) \sum_{k=1}^n r_k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_1 &= (1/\pi)(r_1 \sin \theta_1 + r_2 \sin \theta_2 + \dots + r_n \sin n\theta)(2\pi/n) \\ &= (2/n) \sum_{k=1}^n r_k \sin \theta_k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_1 &= (1/\pi)(r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2 + \dots + r_n \cos \theta_n)(2\pi/n) \\ &= (2/n) \sum_{k=1}^n r_k \cos \theta_k \end{aligned}$$

$$A_2 = (2/n) \sum_{k=1}^n r_k \sin 2\theta_k$$

$$B_2 = (2/n) \sum_{k=1}^n r_k \cos 2\theta_k$$

$$A_n = (2/n) \sum_{k=1}^n r_k \sin n\theta_k$$

$$B_n = (2/n) \sum_{k=1}^n r_k \cos n\theta_k$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 A_0 는 data의 가산평균값이고, A_1, B_1 은 편심 성분, A_2, B_2 는 2산 성분, 그리고 A_n, B_n 은 n산 성분을 나타낸다. 따라서 편심보정을 행한 data를 ρ_m 이라 하면

$$\rho_m = r_m - A_1 \sin \theta_m - B_1 \cos \theta \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. 반경의 평균값 및 편심보정을 행한 data를 ϵ_m 이라 하면

$$\epsilon_m = r_m - A_0 - A_1 \sin \theta_m - B_1 \cos \theta_m \quad (7)$$

으로 나타낼 수 있다.

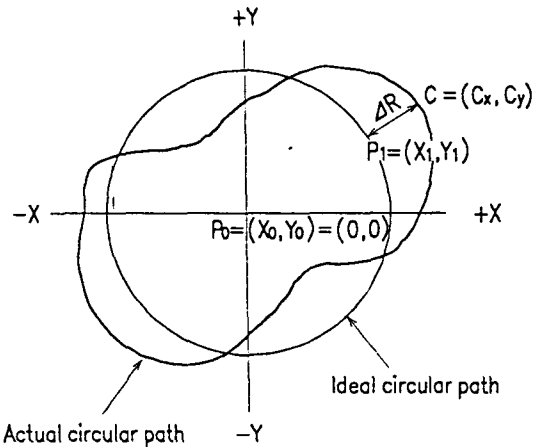


Fig.4 Coordinate system and error vector in measurement of R-θ method

Fig.4에서 Work table의 회전중심과 측정기 중심 P0는 일치하고, 2차원 가공일 경우

$$P_0 (X_0, Y_0) = (0, 0)$$

으로 된다. 따라서 NC의 지령치를 P1(x1, Y1), 측정 반경을 R로하면 Pitagoras정리에 의해서 다음과 같이 된다.

$$R^2 = X_1^2 + Y_1^2 \quad (8)$$

그러나 실제에는 측정반경 R은 일정하지 않고 오차 ΔR이 포함된다. 그래서 실제에 Work table이 있는 점 P1 으로부터의 Error Vector C (Cx, Cy)로 하면 Pitagoras 정리에 의해

$$(R + \Delta R)^2 = (X_1 + C_x)^2 + (Y_1 + C_y)^2 \quad (9)$$

된다. 식(8)를 식(9)에 대입하여 양변을 전개하고, 오차의 2승은 미소하므로 생략하면

$$\Delta R = \frac{1}{R} (C_x X_1 + C_y Y_1) \quad (10)$$

이 된다. 식(10)가 오차의 기본식으로 된다.

4. Machining Center 의 오차요인의 해석

4.1 위치에 의존하는 오차

4.1.1 Ball Screw 의 Pitch 에 의한 주기적 오차

Y축의 Ball Screw의 예압을 낮추게 되면 Fig.5(a)처럼 주기적 오차가 나타난다. 이 주기적 오차의 이론식은 다음과 같다. 지금 Y축에 Ball screw의 pitch p(mm)에 의해 결정되는 진폭 a(μm)의 주기적인 오차

$$a \cos \left(\frac{2\pi Y}{p} + \Phi_x \right) \text{가 있다고 하면}$$

(Φx는 위상차)

오차 vector는

$$C = \left\{ 0, a \cos \left(\frac{2\pi Y}{p} - \Phi_x \right), 0 \right\}$$

로 된다. 이것을 식(10)에 대입하면

$$\Delta R = a \sin \theta \cos \left(\frac{2\pi Y}{p} - \Phi_x \right) \quad (11)$$

로 된다. 여기서 Φx=0로 하면

$$\frac{2\pi Y}{p} = 2\pi, 4\pi \text{ 일때 } \Delta R \text{은 최대치가 되고}$$

$$\frac{2\pi Y}{p} = \pi, 3\pi \text{ 일때 } \Delta R \text{은 최소치가 된다.}$$

즉, Y=R sinθ=P, 2P일 때 운동궤적은 산을 나타내고

Y=R sinθ=P/2, 3P/2 일때 운동궤적은 곡을 나타낸다. 따라서 산(곡)이 생기는 위치의 Y좌표의 간격은 P인 것을 알 수 있다.

이 주기적인 오차의 주기를 명확히 하기 위해 Fig.5(b)와 같이 이동평균처리법을 사용했다. 이 이동평균처리법이라고 하는 것은 측정된 data열 a0, a1...ai...an에 대해서 주목하는 data ai을 이동시켜가면서 그 전후의 data를 포함해 평균 data b1을 새로운 data로 하는 것이다. 예를들면 5개의 data의 평균을 구하는 경우는 식(12)처럼 나타낼 수 있다.

$$b_1 = (a_{i-2} + a_{i-1} + a_i + a_{i+1} + a_{i+2}) / 5 \quad (12)$$

Fig. 5(b)에서 산과 기준원의 중심과를 직선으로 연결하고 기준원의 교점으로부터 Y축에 수선을 그리면 그 간격이 등간격으로 된다. 측정반경이 150mm이기 때문에 그 간격은 약 10mm로 되어 Ball screw의 pitch와 일치한다. 이것은 Ball Screw 가 chattering 을 일으켜 그 chattering 에 의해서 Ball Screw 의 Pitch에 영향을 미쳐 이와같은 오차가 생긴다고 생각할 수 있다. 주기적 오차의 진폭 및 주기는 이송속도가 증가하여도 변화하지 않는다는것을 알았다.

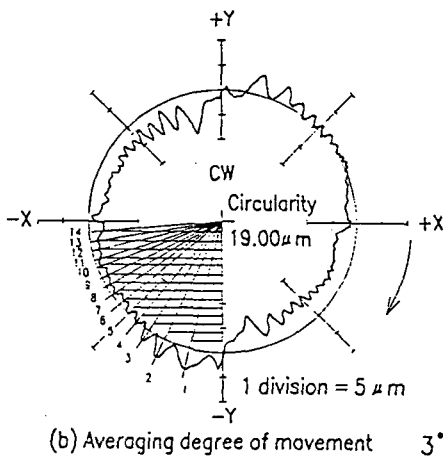
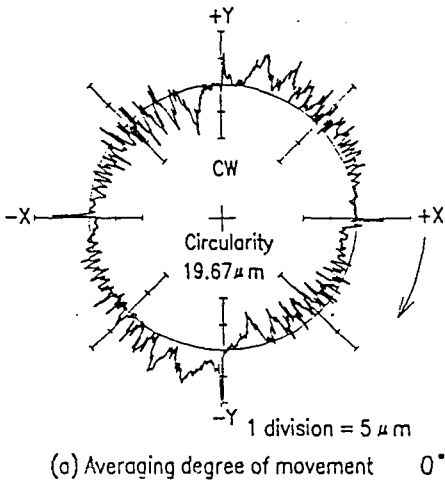
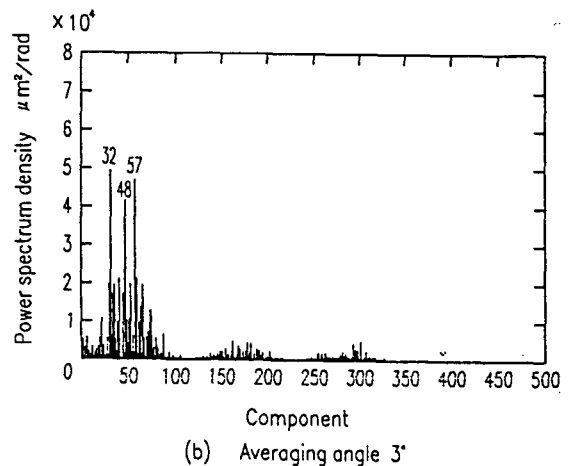
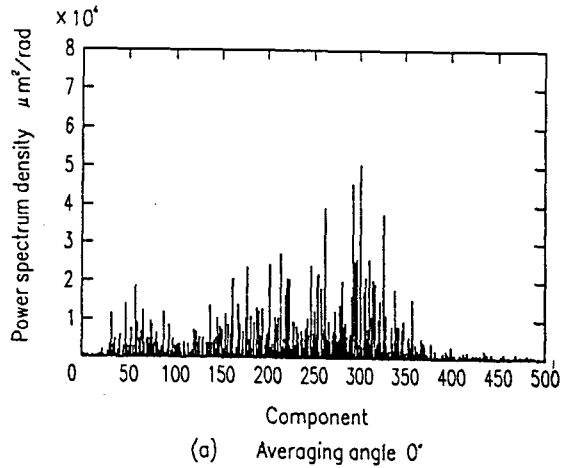
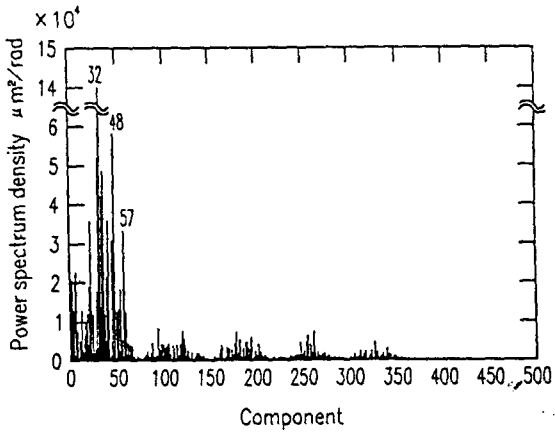


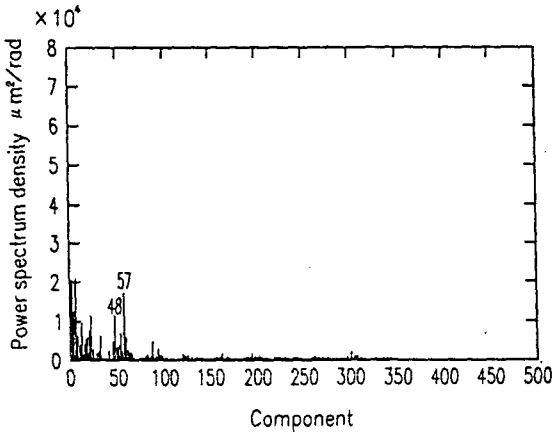
Fig.5 Effect of chattering of mechanical coupling of Y axis
(R=150mm, F=1000mm/min)

또한 Fig.5의 결과를 Fourier해석을 하여 이동평균처리⁽¹²⁾한 후의 산 성분을 조사하였다. 그 결과를 Fig.6에 나타내었다. Fig.6(b)처럼 이동평균처리 각도가 약 3°에서 고주파성분은 거의 없어지고 32, 48, 57산 성분이 현저하게 나타나 있는 것을 알 수 있다. 57산 성분은 원호보간 일주의 산의 수(14*4=56)와 거의 일치하고 있다. 이동평균처리각도가 약 5°가 되면 32산 성분이 다른 성분과 비교해서 현저하게 돌출되어 있다. 처리각도가 약 10°가 되면 고주파 성분은 거의 소멸되고 2산, 4산등의 저주파 성분이 크게되고 또한 57산 성분도 다른 산성분과 비교해서 돌출되어 있다. 이상과 같이 이동평균처리를 하였을 때 어느 처리각도에서도 57산 성분은 돌출되어 있다. 따라서 주기적인 오차를 고찰할 때 이동평균처리법 및 Fourier해석은 적합하다고 말할 수 있다.





(c) Averaging angle 5°



(d) Averaging angle 10°

Fig. 6 Results of Fourier's analysis

4. 1. 2 Backlash 와 Backlash 보정

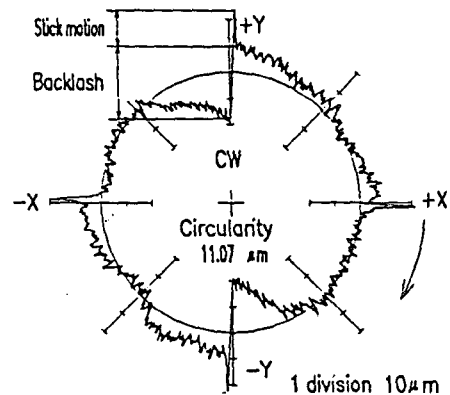
Y축에 Backlash가 a μm 존재하는 경우를 생각하면 Y축에 대해 정방향으로 이송을 한 경우에는 a/2만큼 위치결정 오차가 생기고 부방향으로 이송하였을 경우에는 -a/2만큼 위치결정 오차가 생긴다. 따라서 오차 vector C = (0, ±a/2)로 된다. 이것을 식(7)에 대입하면

$$\Delta R = \pm a/2 \cos \theta \quad (13)$$

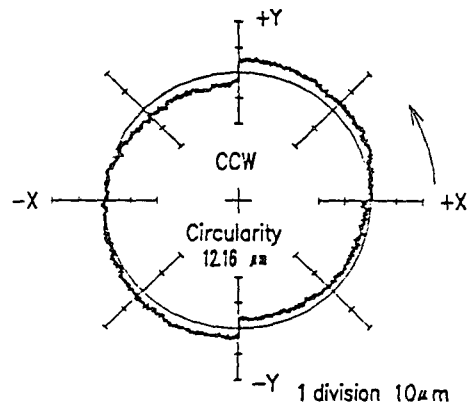
로 된다. 단, 부호는 정방향 일때는 (-), 부방향 일때는 (+)이다.

Y축에 Backlash 오차가 있는 측정결과를 Fig. 7에 나타냈다. Backlash 량은 그림과 같이 읽는다. Backlash 오차의 원호형상은 Y축의 상한절환시 회전오

차에 대해서 바깥쪽으로 단차가 생긴다. 축에 대해서 반원이 상하로 어긋나 CW, CCW 회전중심에 대해서 점대칭인 형상이 된다. 이것은 Ball Screw와 Servo motor간의 치차나 Coupling등의 간격에 의해서 생긴다. Backlash가 생겼을때 제어 System에 의해 보정하는 Backlash 보정기구가 있다. Backlash 보정의 원호형상은 Backlash와는 역으로 상한절환시에 안쪽으로 단차가 생긴 형상으로 된다. Fig. 7에 실험용 Machining Center에서 Backlash 보정을 하였을 경우의 측정결과를 나타내었다. 그림에서처럼 지령치와 거의 일치하고 있다. 이것도 역시 이송속도에 의존하지 않는다는 것을 알았다. 그러나 Backlash량은 stick motion량과의 구별이 어렵고, computer에 의해 그 량을 측정하는 것은 곤란하다. 그래서 측정된 결과를 Fig. 7(a)처럼 구분하여 scale로 backlash량을 구했다.



(a) Identification of stick motion and backlash



(b) Backlash compensation 10 μm

Fig. 7 Effect of backlash compensation (R=150mm, F=1000mm/min)

4.1.3 X-Y 2축간의 직각도오차

직각도 오차의 이론식은 Fig. 8에 나타난 것 처럼 Y 축이 X축에 대해서 CCW 방향으로 미소한 각 $c(\mu\text{m}/\text{mm})$ 만큼 경사져 있다고 생각할 수 있다. 이때 Y축 이송에 따라서 생기는 X방향의 오차 C_x 는

$$C_x = Y \cdot \tan(c) \cong c \cdot Y \quad (\because c \ll 0) \quad (14)$$

이 된다. $C_y=0$ 이기 때문에 오차 Vector는 $c(c_x, 0)$ 로 된다. 이것을 오차의 기본식 (10)에 대입하면

$$\Delta R = \frac{1}{R} (c Y \cdot X) \quad (15)$$

식(12)에 $X=R \cos\theta$, $Y=R \sin\theta$ 을 대입하면

$$\begin{aligned} \Delta R &= c R \sin\theta \cos\theta \\ &= \frac{c R}{2} \sin 2\theta \end{aligned} \quad (\text{단, } \theta \text{는 CW방향이 양수}) \quad (16)$$

로 직각도 오차가 주어진다. 식(16)으로부터 알 수 있듯이 직각도 오차는 이송속도에 의존하지 않고, Fig. 8 처럼 장축과 단축의 차는 $2cR$ 이다. 따라서 장축과 단축의 차를 구하면, 즉 $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 일때의 오차 Data만 알면 간단히 직각도오차를 구할 수 있다.

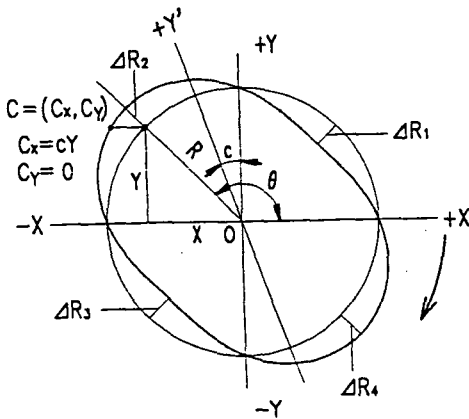


Fig. 8 Coordinate system for evaluation perpendicularity

Fig. 9은 실제로 직각도 오차를 각각 $20\mu\text{m}/150\text{mm}$ 와 $40\mu\text{m}/150\text{mm}$ 를 주었을 경우의 측정 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 직각도 오차가 클수록 장축과 단축의 차가 커지는 것을 알 수 있다.

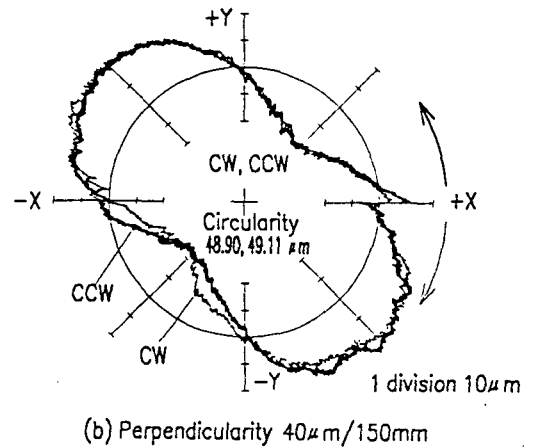
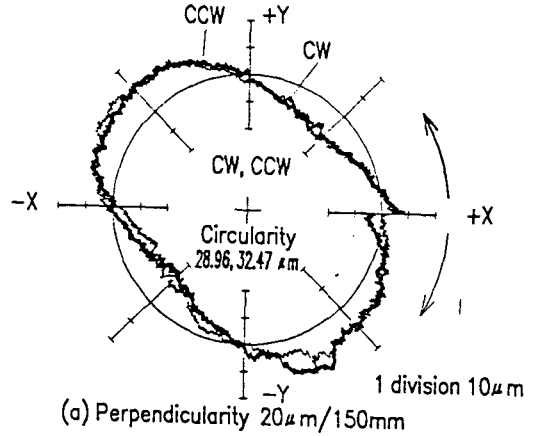


Fig. 9 Effect of perpendicularity to actual circular path
($R=150\text{mm}$, $F=500\text{mm}/\text{min}$)

4.2 제어 System에 의존하는 오차

4.2.1 Position loop-gain의 불일치에 의존하는 오차

X축과 Y축 각각의 위치 loop-gain을 K_{sx} , K_{sy} 로 했을 경우를 생각하면, 이때 지령치와의 오차인 위치편차 D_x , D_y 는 다음과 같다.

$$D_x = \frac{V_x}{K_{sx}}, \quad D_y = \frac{V_y}{K_{sy}} \quad (17)$$

따라서, 오차 Vector는

$$\vec{C} = \left(-\frac{V_x}{K_{sx}}, -\frac{V_y}{K_{sy}} \right) \quad (18)$$

로 주어진다. 단, V_x, V_y 는 각각 이송속도 F 의 X, Y축 성분인 F' (mm/sec) = F (mm/min) / 60으로 원호보 간 이송할때

$$V_x = - (\pm F' \sin \theta) \quad (19)$$

$$V_y = \pm F' \cos \theta \quad (20)$$

으로 된다. 단 위쪽이 CCW 방향, 아래가 CW 방향으로 움직였을 경우이다. 식(18), (19), (20)을 기본식(10)에 대입하면

$$\begin{aligned} \Delta R &= \frac{-(\pm F \sin \theta)}{K_{sx}} \cos \theta - \frac{\pm F \cos \theta}{K_{sy}} \sin \theta \\ &= \pm \epsilon \times \frac{F'}{2} \sin 2\theta \\ (\text{단, } \epsilon &= \frac{K_{sy} - K_{sx}}{K_{sx} * K_{sy}} : \end{aligned} \quad (21)$$

위치 loop-gain의 불일치 程度

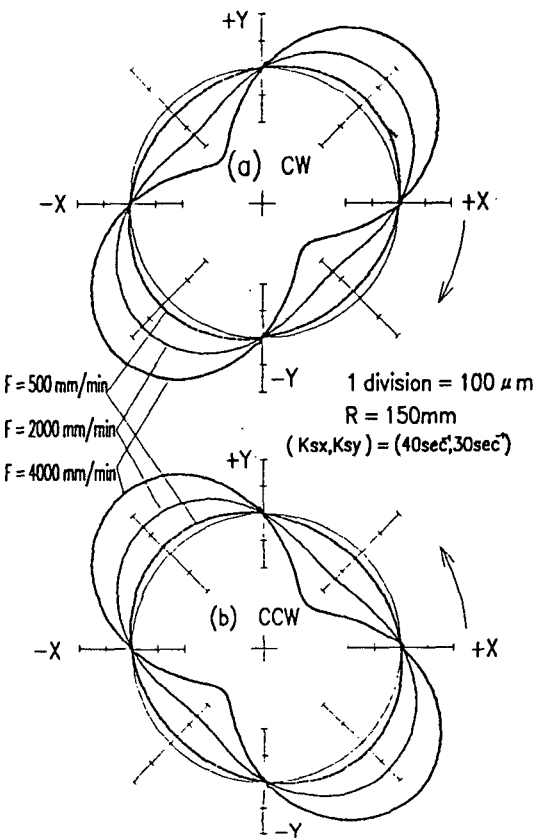


Fig.10 Effect of feed speeds

이 된다. Fig.10처럼 45° 방향으로 장축을 가진 타원이 된다. 회전방향이 바뀌면 장축과 단축이 바뀐다. Fig.11은 위치 loop-gain 불일치와 이송속도와의 관계를 나타낸다. 진원도가 이송속도에 비례해서 증가하고 있는 것을 알 수 있다. Fig.11에서 알 수 있는 것은 $K_{sx} < K_{sy}$ 즉 $\epsilon > 0$ 일때 CW는 Y축에 대해서 좌측으로 경사져 있고, $K_{sx} < K_{sy}$ 즉 $\epsilon > 0$ 일때 CW는 Y축에 대해서 우측으로 경사져 있다. 45° 방향으로 오차는 $|\epsilon|$ 의 값이 클수록 크다는 것을 알 수 있다.

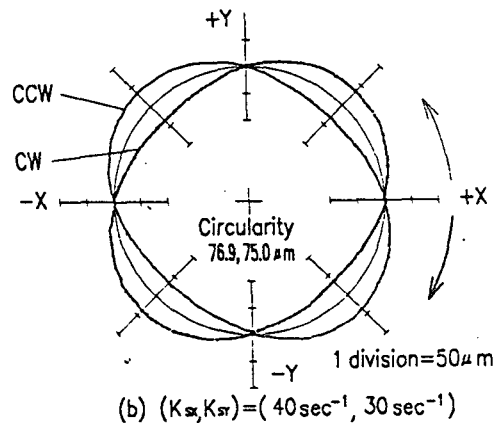
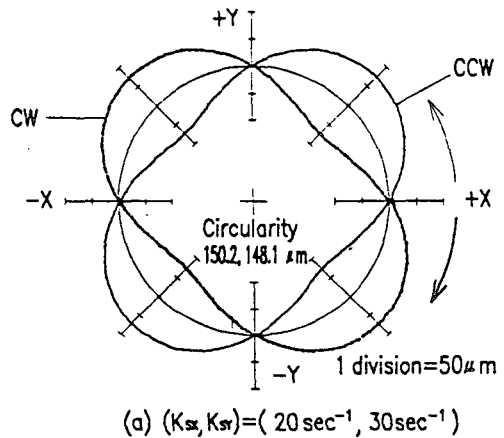


Fig.11 Effect of position-loop-gain
($R = 150\text{mm}$, $F = 500\text{mm/min}$)

4.2.2 Servo 응답지연에 의한 반경감소

Machining Center 는 이송속도를 증가시키면 servo

응답 지연에 의해서 반경감소가 일어나는데 이 반경감소는 Machining Center의 운동성을 평가하는데 매우 중요한 운동오차중 하나이다. 반경감소 ΔR_{dec} 를 구하는 이론식은 다음과 같다⁽⁵⁾.

$$\Delta R_{dec} = \frac{1}{2R} \left(\frac{F'}{K_s} \right)^2 \quad (22)$$

(단, R : 측정반경, F' : 이송속도(mm/sec), Ks : 위치loop-gain)

식(22)로부터 반경감소 값은 이송속도의 2승에 비례하고, 위치loop-gain의 2승에 반비례한다. Fig. 12은 이송속도와 반경감소와의 관계를 나타낸다. Fig. 13은 위치 loop-gain과 반경감소와의 관계를 나타낸다.

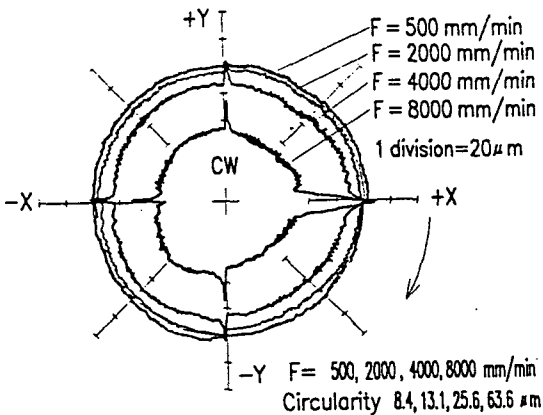


Fig. 12 Effect of feed speeds (R = 150mm)

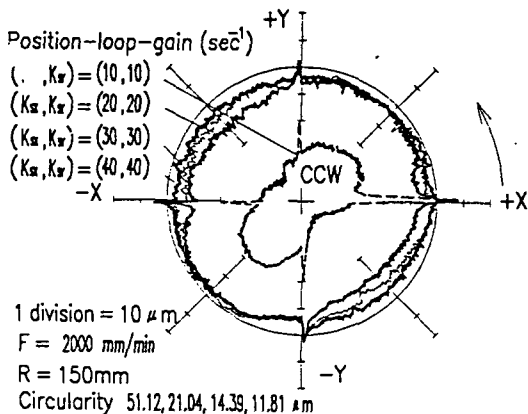


Fig. 13 Effect of position-loop-gain

4.2.3 Velocity loop-gain에 의한 오차

Position loop-gain이 위치를 제어하는 것에 대해서 Velocity loop-gain은 속도를 제어한다. 따라서 Velocity loop-gain은 상한절환시에 생기는 Stick motion 등의 Servo motor의 응답성에 영향을 미친다. Fig. 14에서 Velocity loop-gain을 높이면 stick motion이 작아져 servo motor의 응답성이 좋아지는 것을 알았다. 또한 반경방향의 진동도 작아졌다.

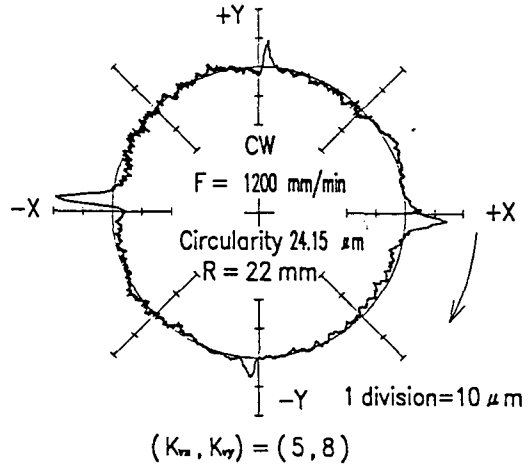


Fig. 14 Effect of unbalance of velocity-loop-gain

5. 결 론

본연구에서는 Machining Center에서 비절삭 방법으로 원호보간경밀도에 의한 공작기계의 운동정밀도를 측정하기 위해 R- θ 법이라는 새로운 측정장치를 개발하여 그 유효성을 확인하였고, 이 R- θ 법에 의해서 얻어진 측정 Data를 해석하여 Machining Center의 오차요인을 고찰하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 새로 개발한 측정장치는 Rotary encoder를 사용하기 때문에 회전각을 정확히 측정할 수 있다.
- (2) R- θ 법에 의해서 얻어진 측정 Data를 이동평균처리하는 방법을 이용하여 오차의 정보를 추출하는 방법을 제안하였다.
- (3) 위치에 의존하는 오차들 중 Ball Screw의 Pitch에 의한 주기적인 오차, Backlash보정에 의한 오차, 2축간의 직각도 오차에 의한 오차를 해석하였다.
- (4) 제어계에 의한 오차들 중에 위치loop-gain의 불일치에 대한 오차, 속도loop-gain에 의한 오차, 이송속도에 의한 오차를 정량적으로 해석했다.

참고문헌

1. JIS B 6333, 工作機械-マシソケゼソ(橫形)の試験及び検査方法, 日本規格協會
2. Knapp, W.; Test of the Three Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to the Machine Errors, Annals of the CIRP, 32, 1(1983), 459
3. Knapp, W. and Hrovat, S.; The circular Test for Testing NC-Machine Tools, S. Hrovat, (1987), Zurich
4. 壇野義昭, 井原之敏, 龜井明敏, 伊勢徹; NC 工作機械の運動精度に関する研究 (第1報) DBB 法にする運動誤差の測定と評價, 精密工學會誌, 52-7 (1988), 1193
5. 壇野義昭, 井原之敏, 原章翁; DBB 法にする NC 工作機械の精度評價方法, リアライズ社 (1990)
6. 中澤 弘, 堂田赤司; 工作機械用 高速 テーブル送り機構の研究, 精密工學會誌, 57-3(1991), 538
7. Bryan, J. B.; A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools (Part 1: Principle and Applications), Precision Engineering, 4-2(1982), 61
8. "Renishaw Quick Check", Catalogue, Renishaw Ltd., England, 1991
9. M. BURDEKIN and J. PARK, "Contisure-A Computer Aided System for Accessing the contouring accuracy of Machine Tools", Proceedings of the twenty-seventh International Matador Conference, Edited by B. J. Davies, p.197-230
10. 堤正臣; ISO 検査規格の概要とJIS化, マシソグセソタのISO 精度検査と今後の對應, 日本機械學會 講演會, No. 910-15(1991), 1
11. 堤正臣, 酒井浩, 金貞淳; NC 工作機械の圓運動の新しい測定方法, 日本機械學會論文集 C 編, 58-545(1992) 271
12. 岩尾三; コンピュータ計測のノウハウ(波形データ處理とそのアルゴリズム), Software Design, p.134~143, 1991, 9月