

◆특집◆ 정밀 공작기계를 위한 측정/평가기술

회전정밀도의 고정밀 측정기술

Wei Gao*, 박천홍**

High Precision Measurement of Rotational Accuracy

Wei Gao* and Chun Hong Park**

Key Words : Rotational accuracy(회전정밀도), Precision nano measurement(정밀나노계측), Error Separation(오차분리), Multi-step method(멀티스텝법), Multi-probe method(멀티프루브법),

1. 서론

초정밀 공작기계의 기능은 초정밀 운동에 의 해 대부분 지배된다. 이러한 운동을 생성하는 고정밀 베어링의 운동정밀도는 이미 나노미터 레벨에 도달하고 있으며, 이러한 운동정밀도를 나노미터 레벨의 정밀도로 측정하는 것(정밀나노계측¹)이 중요한 과제가 되고 있다. 예를 들어, 초정밀선반 등에 있어서, 공기베어링을 대표로 하는 높은 회전정밀도를 갖는 회전축(주축)이 사용되고 있으며^{2,3}, 따라서 이러한 고정밀 주축의 회전정밀도를 나노미터 레벨의 정밀도로 평가하는 기술은 매우 중요하다. 한편, 현재의 센서기술을 고려할 때, 서브나노미터의 분해능을 갖는 센서는 비교적 간단히 입수할 수 있으며, 교정에 의해 나노미터의 정밀도 보증이 가능하다⁴. 그러나, 회전중의 측정기준이 되는 기준원통/기준구(이하, 기준원통으로 대표하여 표현)의 진원오차(이하, 진원도 형상오차)가 측정대상인 회전오차와 같은 레벨이므로, 전자를 센서의 정밀도 한계까지 분리하여 측정하는 기

술(오차분리법을 기반으로 하는 정밀 나노계측기술)의 응용은 불가피하다. 여기에서는, 오차분리법에 의한 회전정밀도의 정밀나노계측기술에 대해 측정원리 및 기술동향을 정리하고자 하였다.

2. 오차분리법에 의한 회전정밀도의 정밀 나노계측⁵

여기에서는, 회전운동오차의 반경방향 운동오차 측정을 중심으로 언급한다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 반경방향 운동오차는 주축에 기준원통을 부착하고, 변위프루브로 측정하는 것이 일반적이다. 원통의 진원도 형상오차를 $r(\theta)$, 반경방향 운동오차를 $e_r(\theta)$ 이라고 하면, 프루브의 출력은 다음과 같이 나타내어진다.

$$m(\theta) = r(\theta) + e_r(\theta), \quad \theta = 0, \dots, 2\pi \quad (1)$$

현재의 가공기술에 의한 기준원통 제작정밀도의 한계와 기준원통의 변형등을 고려할 때, 나노미터 레벨의 반경방향 및 앵글러 운동오차의 측정을 실현하기 위해서는, 진원도 형상오차와 회전오차의 분리가 절대적으로 필요하다. 그를 위한 방법으로서, 식 (1)과 같은 $r(\theta)$ 와 $e_r(\theta)$ 에 관한 식을 복수개로 만든 후, 연립하여 해를 얻는 방법을 생각할 수 있다.

이러한 연립방정식을 만드는 방법은, 두 가지

* 일본 Tohoku 대학 공학연구과 나노메카닉스전공

** 한국기계연구원 공작기계그룹

Tel. +81-22-217-6951, Fax. +81-22-217-6951

Email gaowei@cc.mech.tohoku.ac.jp

초정밀 측정/평가, 초미세형상의 나노계측 및 프루브 개발, 초정밀 평면모터 개발 등의 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

로 크게 나눌 수 있다⁶. 첫 번째 방법으로는, 하나의 프루브를 이용하여, 복수의 스텝으로 나누어 측정하는 멀티스텝법이 있으며, 반전법과 위상차법이 여기에 속한다. 또 한가지 방법으로는 복수의 프루브를 이용하여 한 번의 측정으로 연립방정식을 만드는 멀티프루브법이 있다.

3. 멀티스텝법 : 반전법/위상차법

반전법은 오래 전부터 진직도 측정에 응용되어오던 방법으로⁷, 고정밀 주축의 정밀도 평가를 배경으로 회전오차 측정에 적용되었다⁸. 그 원리는 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 아주 단순하다. 먼저, 반전하기 전에 식 (1)의 값을 측정한 후, Fig. 2(b)와 같이, 주축을 고정된 채로, 원통과 프루브를 180 도 반전시킨 상태에서 주축을 다시 한번 회전시켜 측정하면 프루브의 출력은 다음과 같이 된다.

$$m'(\theta) = r(\theta) - e_r(\theta) \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)의 두 스텝에 대한 출력으로부

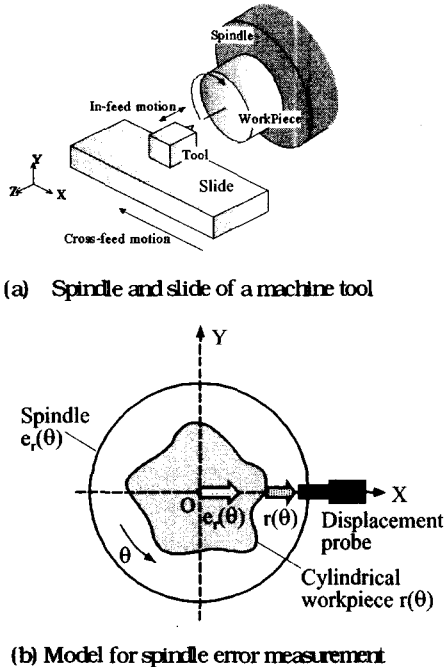


Fig. 1 Measurement model

터, 진원도 오차 $r(\theta)$ 과 반경방향 운동오차 $e_r(\theta)$ 를 다음과 같이 분리해서 구할 수 있다.

$$e_r(\theta) = (m(\theta) - m'(\theta)) / 2 \quad (3)$$

$$r(\theta) = (m(\theta) + m'(\theta)) / 2 \quad (4)$$

한편, 위상차법⁹에서는, Fig. 3 과 같이, 프루브의 반전없이, 주축을 고정시킨 채로 원통의 위치를 원주방향으로 $\Delta\phi(=2\pi/N)$ 씩 N 회 회전시켜가면서 측정을 반복한다. 형상의 위상차가 각각 $\Delta\phi$ 인 N 스텝분의 프루브 출력은 식 (5)와 같다.

$$m_i(\theta) = r(\theta - i\Delta\phi) + e_r(\theta), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

식(5)로부터 회전오차를 다음과 같이 형상오차로부터 분리하여 얻을 수 있다.

$$e_r(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(\theta) \quad (6)$$

Fig. 4 에 위상차법에 의한 진원도 측정기의 회전정밀도 측정 예를 나타내었다¹⁰. 최대 폭이 약 20 nm 인 회전오차가 수 nm 로 반복되고 있는 양상이 측정되고 있다.

멀티프루브법에서는 프루브를 한 개만 사용하

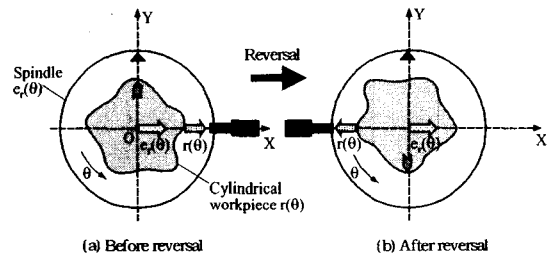


Fig. 2 The reversal method for spindle error measurement

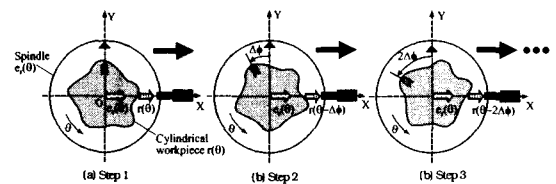


Fig.3 The multi step method

므로 간결한 이점이 있다. 그러나, 식 (1) ~ (3)에서 알 수 있는 바와 같이, 각 스텝에 있어서 회전오차의 재현성이 있는 것을 전제로 하고 있으며, 원통의 위치를 변화시키기위한 각도분할장치가 필요하다. 따라서, 멀티스텝법은 사용환경이 좋고, 운동조건이 안정된 진원도측정기의 회전정밀도 평가에는 이용되고 있으나, 초정밀 공작기계 주축의 정밀도 평가에 이용되는 예는 많지 않다.

한편, 회전운동의 재현성이라는 조건을 해소시키는 방법으로 개량형 반전법이 제안되었다¹¹. 제어형 공기베어링에 관한 연구를 통해 개발된 이 방법의 원리를 Fig. 5 에 나타내었다. 이 방법에서는, 기준원통을 측정하는 변위프루브 A 이외에도, 주축 스피ndl을 측정하는 변위프루브 B 를 추가한다. Fig. 5 에 나타낸 프루브 출력으로부터, 반전 전후의 회전오차를 원통 및 스피ndl의 형상오차로부터 다음과 같이 분리할 수 있다.

$$r(\theta) = ((m_{B2}(\theta) + m_{A2}(\theta)) - (m_{B1}(\theta) - m_{A1}(\theta))) / 2 \quad (7)$$

$$e_r(\theta) = m_A(\theta) - R(\theta) \quad (8)$$

이 방법은 종래의 반전법에 비해, 반전 전후의 운동오차에 재현성이라는 조건을 필요로 하지 않는 이점이 있다. 두 개의 프루브가 측방향으로 다른 위치에 배치되어 있으므로, 앵글러 모션의 영향을 받는 문제가 남지만, 10 nm 레벨의 재현정밀

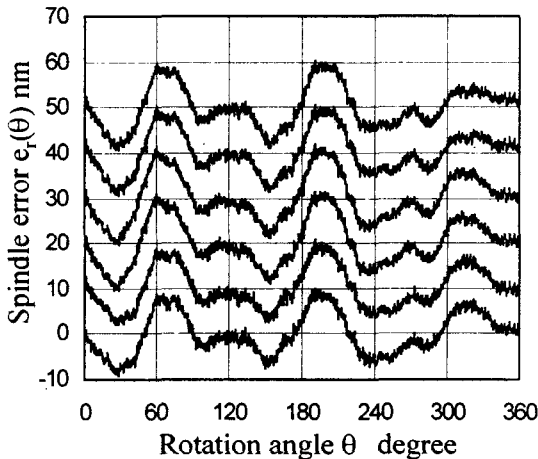


Fig. 4 A measurement result by the multi-step method

도로 측정이 실현되고 있다¹¹.

4. 멀티프루브법

여기에서는 대표적인 3 점법^{12, 13}을 예를 들어 설명한다. Fig. 6 에 나타낸 바와 같이, 원통 주위에 3 개의 변위프루브 (A, B, C) 를 배치하고 그림과 같이 좌표계를 잡으면, 프루브의 출력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_A(\theta) = r(\theta) + e_{rX}(\theta) \quad (9)$$

$$m_B(\theta) = r(\theta - \phi_B) + e_{rX}(\theta) \cos \phi_B + e_{rY}(\theta) \sin \phi_B \quad (10)$$

$$m_C(\theta) = r(\theta - \phi_C) + e_{rX}(\theta) \cos \phi_C + e_{rY}(\theta) \sin \phi_C \quad (11)$$

여기에서, ϕ_S ($S=A, B, C$, $\phi_A=0$) 는 각각의 프루브의 원주상에서의 각도이며, $e_{rX}(\theta)$, $e_{rY}(\theta)$ 는 각각 반경방향 운동오차의 X, Y 방향에서의 값이다. 이

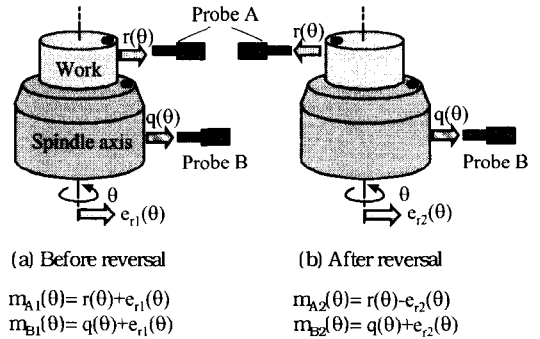


Fig. 5 The improved reversal method

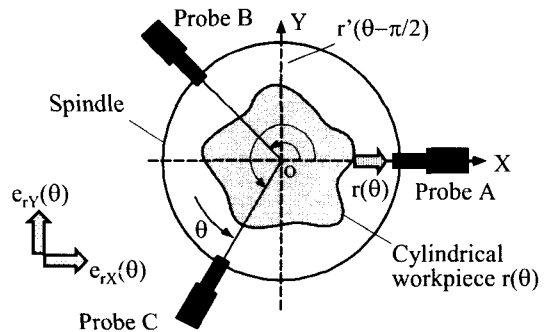


Fig. 6 The three-probe method

3 개의 프루브 출력을 연립시키는 것에 의해, 다음과 같이 반경방향 모션을 제거한 형태로 차동출력을 구할 수 있다.

$$m_{3d}(\theta) = m_A(\theta) + m_B(\theta)r(\theta - \phi_B) + m_C(\theta)r(\theta - \phi_C) \quad (12)$$

$$= r(\theta) + r(\theta - \phi_B)a + r(\theta - \phi_C)b$$

단, $a = \sin\phi_C / \sin(\phi_C - \phi_B)$, $b = \sin\phi_B / \sin(\phi_C - \phi_B)$

$r(\theta)$ 의 푸리에변환을 $R(n)$ 이라고 하면, $m_{3d}(\theta)$ 의 푸리에변환 $M_{3d}(n)$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M_{3d}(n) = \{1 + a(\exp(-jn\phi_B)) + b(\exp(-jn\phi_C))\}R(n) \quad (13)$$

여기서 n 은 공간주파수의 차수를 나타낸다.

또한, $M_{3d}(n)$ 과 $R(n)$ 과의 비를 3 점법의 전달함수 $H_{3d}(n)$ 이라고 정의하면, $H_{3d}(n)$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$H_{3d}(n) = \frac{M_{3d}(n)}{R(n)} \quad (14)$$

$$= 1 + a(\exp(-jn\phi_B)) + b(\exp(-jn\phi_C))$$

이 전달함수는 3 점법의 공간주파수 특성(공간주파수 마다의 감도)을 나타내는 것으로, 프루브의 배치(프루브간에 이루는 각)에 의해 결정된다.

Fig. 7 에 3 점법의 프로세스를 나타내었다. 프루브의 출력으로부터 구한 차동출력 $m_{3d}(\theta)$ 를 푸리에변환하여 $M_{3d}(n)$ 을 얻는다. 다음으로 전달함수를 이용하여 $M_{3d}(n)$ 으로부터 진원도오차의 전달함수 $R(n)$ 을 계산하고, 역푸리에변환에 의해 $r(\theta)$ 를 구한다. 마지막으로, 프루브의 출력으로부터 반경방향 운동오차의 X, Y 방향 성분인 $e_{rx}(\theta)$, $e_{ry}(\theta)$ 를 구한다.

이 방법은 재현성이 없는 회전축의 정밀도 측

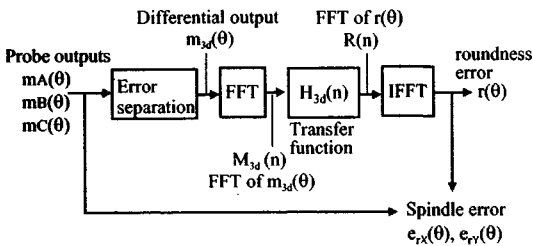


Fig. 7 Data processing of the three-probe method

정에도 적용이 가능하기 때문에, 동작기계의 정밀도 평가에 특히 적합하다¹⁴. 한편, 프루브 특성의 차이가 측정정밀도에 영향을 미치므로, 멀티프루브법은 고정밀 측정용으로는 부적합하다고 생각되어 왔다. 그러나, 최근들어 프루브의 분해능과 안정성등이 대폭 향상되고 프루브의 정밀도를 보증하는 수법도 확립되어가고 있으므로, 고정밀 측정에 있어 멀티프루브법의 역할이 크게 기대된다. Fig. 8 에 3 점법에 의한 동작기계 주축의 회전오차 측정결과 예를 나타내었다¹⁴.

최근에는 동작기계의 고속화에 대응하기 위해, 3 점법을 초고속주축의 운동오차, 열변위 측정등에 응용한 예도 있다¹⁵. 또한, 키폭등의 단차를 갖고 있는 원통을 측정대상으로 하는 경우에도 동일한 측정이 가능한 합성법에 대한 연구¹⁶, 역행렬법에 의한 간편한 해석법에 대한 연구¹⁷, 주축의 능동 제어에 3 점법에 의한 측정결과를 이용하는 연구

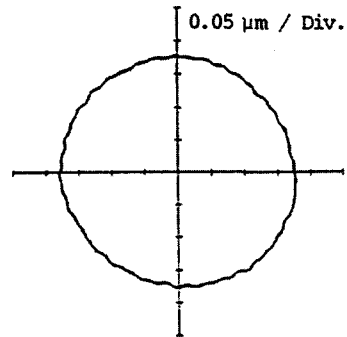


Fig. 8 A measurement result by the three-probe method

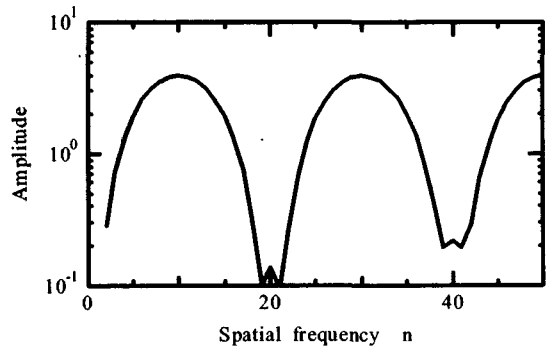


Fig. 9 Transfer function of the three-probe method. ($\phi_B=18.072^\circ$, $\phi_C=35.856^\circ$)

18, 19 등도 발표되고 있다.

종래의, 변위프루브만을 이용한 멀티프루브법에서는, 주파수영역에 있어서 감도특성이 프루브 배치에 의존하여, 일부의 공간주파수성분이 측정되지 못하는 문제가 있다²⁰. Fig. 9 에 3 점법의 전달함수식 (14)참조)의 한 예를 나타내었다. 전달함수에는 일부 감도가 0(진폭이 0)인 주파수성분이 있음을 알 수 있다. 3 점법에서의 프루브 배치를 변화시키거나, 프루브의 수를 증가시켜 측정가능한 공간주파수를 어느 정도 확장시킬 수 있는 방법도 발표되고 있으나²¹, 이 문제를 근본적으로 해결한 것은 다음에 설명되어지는 혼합법이다²².

Fig. 10 에는 원주상에 90도 각도로 배치되는 1개의 변위프루브와 1개의 각도프루브로 구성되는 직교형 혼합법의 원리를 나타내었다. 변위프루브 A와 각도프루브 B의 출력을 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_A(\theta) = r(\theta) + e_r(\theta) \quad (15)$$

$$m_B(\theta) = r'(\theta - \pi/2) + e_r(\theta)/R \quad (16)$$

단, R 은 원통의 평균반경이며, $r'(\theta) = dr(\theta) / (R d\theta)$ 는 측정표면의 경사각이다. 혼합법의 차동출력 및 전달함수는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} m_{0m}(\theta) &= m_A(\theta) - Rm_B(\theta) \\ &= r(\theta) - Rr'(\theta - \pi/2) \end{aligned} \quad (17)$$

$$H_{0m}(n) = 1 - jne^{-jn\pi/2} \quad (18)$$

3 점법과 마찬가지로, 푸리에변환을 이용함으

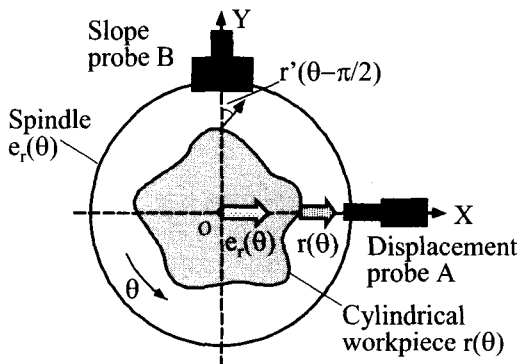


Fig. 10 The mixed method

로써 $r(\theta)$ 와 $e_r(\theta)$ 를 분리하여 구할 수 있다. 이 방법은 두 개의 프루브만으로 형상오차와 운동오차를 분리할 수 있어 가장 심플한 구조의 멀티프루브법을 실현하고 있다. 또한, Fig. 11로부터 알 수 있듯이, 이 방법에 의한 전달함수는 감도가 0이 되는 공간주파수성분이 없으므로, 원리적으로 샘플링주파수에 의해 결정되는 주파수 한계까지 모든 공간주파수성분을 측정할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 12에 직교형 혼합법에 의한 측정 예를 나타내었다. 커플링에 의한 회전진동오차와 정밀 구(ball)의 진원도오차를 나노미터레벨로 분리해낼 수 있음을 보이고 있다²².

변위프루브를 한 개 더 추가하면, 혼합법을 이용하여 반경방향 운동오차의 X, Y 성분을 측정하는 것도 가능하다²³. 또한, 축방향의 면오차(face motion error) 측정에도 적용할 수 있다²⁴.

5. 결론

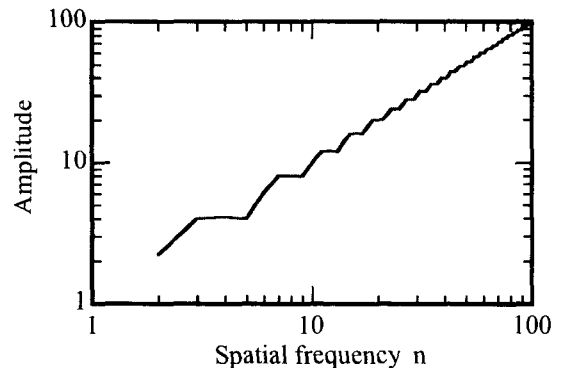


Fig. 11 Transfer function of the mixed method

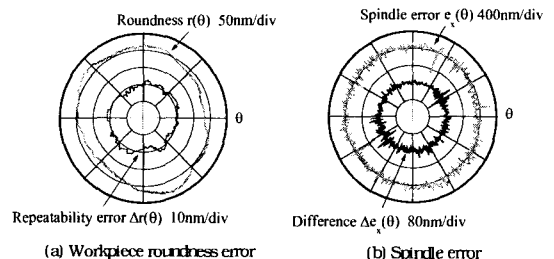


Fig. 12 Measurement results by the mixed method

베어링제조기술의 발전에 의해, 공기베어링주축등의 초정밀 회전축을 이용하여 수십 나노미터 레벨의 회전정밀도를 달성하고 있다. 이러한 초정밀베어링을 연구개발 또는 제조현장에서 사용함에 있어 많은 경우, 그 운동정밀도의 정밀나노계측이 필요하게 된다. 베어링 메이커나 계측기 메이커에 의지하는 것은 한계가 있으므로, 사용자 자신이 궁리하여 각각의 케이스에 적합한 계측법을 선정하고 계측하는 것이 중요하다. 그러한 경우에 있어, 본 원고에서 언급한 정밀나노계측기술이 도움이 되었으면 한다.

참고문헌

- Gao Wei, "Precision Nanometrology and its Applications to Precision Nanosystems," Proc. of NANO2003, Daejeon, pp. 115 - 122, 2003.
- Tanaka, K., "Air Bearing and Ultra Precision Machining," Science of Machine, Vol. 34, No. 12, pp. 1304 - 1310, 1982.
- Ohmori, Y., "Roundness and cylindricity measuring machine RA-H5000," High Tech Information, Chugoku Technology Promotion Center, No. 124, pp. 7 - 22, 2000.
- Kiyono, S., Gao, W. and Ogura, I., "In Situ Self-Calibration of an Individual Displacement Sensor," Jr. of JSPE, Vol. 63, No. 10, pp. 1417 - 1421, 1997.
- Gao Wei, "Error Separation Methods for Spindle Error Measurement with Nanometer Accuracy," Jr. of JSPE, Vol. 67, No. 7, pp. 1067 - 1071, 2001.
- Sawabe, M., "Methods for accuracy measurement of precision spindles and their problems," Jr. of JSPE, Vol. 45, No. 10, pp. 1237 - 1242, 1979.
- Ebihara, K. and Yamamoto, A., "On the measurement of straightness of slide ways of machine beds," Jr. of JSPE, Vol. 7, No. 27, pp. 133 - 137, 1941.
- Donaldson, R. R., "A simple method for separating spindle error from test ball roundness error," Annals of the CIRP, Vol. 21, No. 1, pp. 125 - 126, 1972.
- Estler, W. T., Evans, C. J. and Shao, L. Z., "Uncertainty estimation for multiposition form error metrology," Precision Engineering, Vol. 21, No. 2/3, pp. 72 - 82, 1997.
- Kamigaki, I., Yamakawa, O., Omori, Y., Yamagiwa, T. and Sakai, H., "Roundness measurement and its uncertainty in an international comparison," Proc. of IMEKO 2000, Wien, pp. 139 - 144, 2000.
- Horikawa, O., Sato, K. and Shimokohbe, A., "Roundness and absolute radial motion accuracy measurement by an improved reversal method," Jr. of JSPE, Vol. 57, No. 12, pp. 2231 - 2236, 1991.
- Aoki, Y. and Ozono, S., "On a new method of roundness measurement based on the three-point method," Jr. of JSPE, Vol. 32, No. 12, pp. 831 - 836, 1966.
- Mitsui, K., "Spindle error measurement by the three-point method," Jr. of JSME, Vol. 48, No. 425, pp. 115 - 123, 1982.
- Shinno, H., Mitsui K., Tanaka, N., Omino, T. and Tabata, T., "A new method for evaluating error motion of ultra precision spindle," Annals of CIRP, Vol. 36, No. 1, pp. 381 - 384, 1987.
- Qi, X., Shimizu, S. and Imai, N., "Measuring Method of Thermal Displacement for Machine Tools at High Speed Spindle Rotation," Jr. of JSPE, Vol. 65, No. 3, pp. 396 - 400, 1999.
- Gao, W. and Kiyono, S., "On-machine roundness measurement of cylindrical workpieces by the combined three-point method," Measurement, Vol. 21, No. 4, pp. 147 - 156, 1997.
- Goho, K., Katurada, K. and Mitsui, K., "On an analysis algorithm of the three-point method," Proc. of JSPE Autumn Meeting, pp. 458, 1999.
- Hara, S., "The development of ultra precision rotate spindle," Fujikoshi Engineering Review, Vol. 50, No. 2, pp. 50 - 56, 1994.
- Cui, X., Takenouchi, T., Horiuchi, O., Ikeno, J. and Takasu, S., "Combination of Air Spindle with Permanent Magnetic Bearing for Improved Rotational Accuracy and Stiffness," Jr. of JSPE, Vol. 65, No. 4, pp. 615 - 619, 1999.
- Gao, W., Nomura, T. and Kiyono, S., "Roundness Measurement with Software Datum Method," Jr. of JSPE, Vol. 60, No. 1, pp. 106 - 110, 1994.
- Zhang, G. X. and Wang, R. K., "Four-point method of roundness and spindle error measurements," Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1, pp. 593 - 596, 1993.
- Gao, W., Kiyono, S. and Sugawara, T., "High

- accuracy roundness measurement by a new error separation method,” Precision Engineering, Vol. 21, No. 2/3, pp. 123 - 133, 1997.
23. Gao, W., Kiyono, S. and Nomura, T., “A new multi-probe method of roundness measurements,” Precision Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 37 - 45, 1996
24. Ogura, I., “Rotational error analysis of turning surface by using software datum,” In Process Control and Inspection for Industry, Proc. of SPIE Vol. 4222, pp. 404 - 407, 2000.
25. Sawabe, M. “ Methods for accuracy measurement of precision spindles and their problems,” Journal of JSPE, 45-10, (1979), pp.1237-1242.