

레이저 트래커를 이용한 소형 공작기계의 서보 불일치 추정

Servo Mismatch Estimation of Miniaturized Machine Tools Using Laser Tracker

이훈희¹, 권성환², 손진관¹, 양승한^{1,✉}

Hoon Hee Lee¹, Sung Hwan Kweon², Jin Gwan Son¹, and Seung Han Yang^{1,✉}

¹ 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University)

² 경북대학교 기계연구소 (Institute of Mechanical Engineering Technology, Kyungpook National University)

✉ Corresponding author: syang@knu.ac.kr, Tel: +82-53-950-6569

Manuscript received: 2016.1.5. / Revised: 2016.5.6. / Accepted: 2016.5.9.

Servo mismatch, which affects positioning accuracy of multi-axis machine tools, is usually estimated via the circular test. However, due to mechanical restrictions in measuring instruments, the circular test using a double ball-bar is difficult to apply in miniaturized or super-large sized machine tools. Laser trackers are widely used to measure the form accuracy of parts and the positioning accuracy of driving systems. In this paper, a technique for the servo mismatch estimation of multi-axis machine tools is proposed via the circular test using a laser tracker. To verify the proposed technique, experiments using a double ball-bar and laser tracker are conducted in a 3-axis machine tool. The difference in the evaluation results is 0.05 msec. The servo mismatch for the miniaturized machine tool is also evaluated using the proposed technique.

KEYWORDS: Laser tracker (레이저 트래커), Miniaturized machine tool (소형 공작기계), Circular test (원호 테스트), Servo mismatch (서보 불일치)

기호설명

SMR = Spherically mounted retro-reflector
LCS = Laser tracker coordinate system
MCS = Machine coordinate system
 R = Radius of the circular path
 ω = Angular velocity of the circular path
 φ_i = Phase delay of circular path driving of i -axis
 $\Delta\varphi$ = Difference of phase delays between two axes
 τ = Difference of time delay between two axes
 x_d, y_d = Design path for the circular test
 x_a, y_a = Actual path during the circular test

1. 서론

소형 기계 부품, 항공기 부품 가공 등 공작기계의 사용 범위가 다양해 지면서, 소형 공작기계 (Miniaturized Machine Tool), 초대형 공작기계 (Super-Large Size Machine Tool)와 같이 다양한 가공 영역을 가진 공작기계의 사용이 증가하고 있다. 이러한 공작기계의 중요한 성능 지표가 되는 위치 정확도 (Positioning Accuracy)는 다양한 오차 원인에 의해 저하되며, 주된 오차 원인으로는 기하학적 오차, 열 변위 오차와 같은 준정적 오차와 백래쉬, 서보 불일치, 기계 진동과 같은 동적 오차가 있다.¹⁻³ 서

보 불일치는 구동 축 간의 불완전한 서보 루프 게인 (Servo Loop Gain) 설정으로 인한 축 간 응답속도 차이로 인해 발생하며 부정확한 경로를 유발한다.⁴ 구동 축 간의 서보 불일치를 측정하기 위해서는 두 축 동시 구동을 통한 측정이 필요하다.

원호 테스트는 공작기계의 성능을 평가하기 위해서 사용되는 방법으로 ISO230-4⁵에서 소개하고 있으며, 두 축 동시 구동을 통해 기하학적 오차뿐만 아니라 동적 오차에 의한 영향을 동시에 확인할 수 있는 대표적 측정 방법이다. Knapp⁶은 원형 마스터 (Master)를 이용하여 3차원 측정기 (Coordinate Measuring Machine, CMM)와 공작기계의 기하학적 오차를 평가하였다. Bryan⁷은 볼바 (Double Ball-Bar, DBB)를 이용한 간단한 원호 테스트 방법을 제안하였고, 볼바를 이용하여 다축 공작기계의 기하학적 오차, 동적 오차를 추정하는 방법에 대한 연구는 최근까지 다양하게 진행되고 있다.⁸⁻¹⁰ Renishaw plc¹¹ 등과 같은 상용 볼바 시스템은 분석 소프트웨어에서 일부 기하학적 오차 및 서보 불일치 등의 동적 오차 분석 결과를 제공하여 산업현장에서 폭넓게 사용되고 있다. 하지만, 볼바는 기구적 제약으로 인해 수십 mm의 이송을 가진 공작기계를 측정하는데 한계가 있어, FANUC,¹² TSUGAMI¹³社에서 출시한 미세 정밀 부품 가공용 밀링/선반과 같은 공작기계에 적용하기 어렵다.

레이저 트래커 (Laser Tracker)는 CMM과 같은 3차원 좌표 측정기 중 하나로, 휴대성 및 설치의 간편함 등의 장점이 있으며, 주로 공작물의 형상 측정 및 산업용 로봇의 위치 교정에 주로 사용되고 있다.^{14,15} 레이저 트래커는 이송계의 다축 동시 구동에 의한 위치를 측정할 수 있고, 측정 범위에 영향을 미치는 기구적 제약이 적다. 따라서, 볼바에 비해 측정 정확도는 낮지만, 소형 공작기계와 같이 작은 구동 영역의 제어 기계에서 원호 테스트를 수행할 수 있다.

본 연구는 레이저 트래커를 이용한 원호 테스트 절차를 소개하고, 측정된 좌표 데이터로부터 공작기계 구동 축 간의 서보 불일치를 추정하는 방법을 제안한다. 실험은 FARO社의 Vantage 모델 레이저 트래커를 이용하여 측정했고, 볼바 측정이 가능한 3축 공작기계에서 제안한 방법과 Renishaw社의 QC-20W 볼바 시스템으로 측정된 서보 불일치 결과를 비교했다. 또한, 소형 공작기계의 서보 불일치 추정 실험은 SURUGA SEIKI社의 직선스테이지로 구성된 공작기계에서 실시했다.

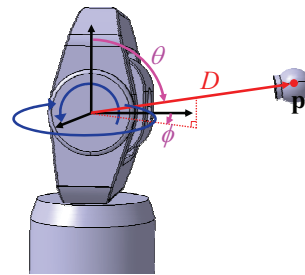


Fig. 1 Measurement of SMR position using laser tracker

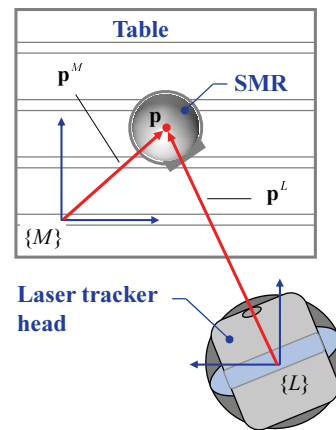


Fig. 2 Coordinate transformation from LCS to MCS

2. 레이저 트래커를 이용한 공작기계 이송계 위치 측정

레이저 트래커는 Fig. 1과 같이 측정기 좌표계 (Laser Tracker Coordinate System, LCS)를 기준으로 한 반사경 SMR (Spherically Mounted Retro-Reflector) 중심점 p 까지의 좌표 p^L 를 측정하는 장비이다. SMR의 좌표는 SMR을 추적하는 레이저 트래커 헤드 내부의 2개의 로터리 인코더로 측정된 방위각 ϕ, θ (Azimuth, Elevation)과 레이저 간섭계 (Laser Interferometer)로 측정된 거리 D 를 이용한 구 좌표계 데이터를 직교 좌표계로 변환하여 계산한다.

$$p^L = [x \ y \ z]^T = [D \cos \phi \sin \theta \ D \sin \phi \sin \theta \ D \cos \theta]^T \quad (1)$$

기계 좌표계 (Machine Coordinate System, MCS)에서 생성된 원호 경로를 통한 원호 테스트 결과로부터 서보 불일치를 추정하기 위해서는 Fig. 2와 같이 LCS에서 측정된 좌표 데이터(위치 벡터) p^L

를 MCS로 변환한 좌표 데이터 \mathbf{p}^M 가 필요하다. MCS로의 좌표변환은 LCS에서 방향 벡터로 설정할 수 있는 점들을 측정하여 계산한 LCS에 대한 MCS의 회전 행렬 R_M^L 과 MCS의 원점 벡터 \mathbf{t}_{MORG}^L 를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\mathbf{p}^M = (R_M^L)^{-1} (\mathbf{p}^L - \mathbf{t}_{MORG}^L) = [x \ y \ z]^T \quad (2)$$

3. 원호 테스트를 이용한 서보 불일치 추정

원호 테스트에서 서보 불일치는 각 구동 축 지령속도에 대한 응답 시간 (Response Time) 차이가 되고, 각 축 원호 구동의 위상 차 (Phase Difference)로 나타난다. 서보 불일치로 인한 불완전한 원호 경로는 Fig. 3과 같이 대각방향이 주축인 타원 형태로 나타나며, 원호 구동 방향에 따라서 음 또는 양의 반경 오차 (Radial Error)가 발생한다.

구체적 서술을 위해 X, Y 축 (Z = 0)을 동시 구동 축으로 한 원호 테스트를 예를 들어 설명하면, 원호의 초기 각 θ 가 0이고, CCW 방향 구동일 때의 설계 원호 경로 x_d, y_d 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_d &= x_c - R \cos(\omega t) \\ y_d &= y_c + R \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{p}_c = (x_c, y_c)$ 는 원호의 중심 위치이며, 원호의 반경, 구동 각속도 및 구동 시간은 각 R, ω 및 t이다. 원호 구동 각속도 ω 는 절삭속도 (Feedrate) f로부터 $\omega = 2\pi R / f$ 와 같이 계산한다. 두 축 지령속도에 도달하기 위한 응답 시간은 원호 구동에서 위상 지연 (Phase Delay) ϕ_x, ϕ_y 으로 나타나며, 이에 따른 원호 경로는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x &= x_c - R \cos(\omega t + \phi_x) \\ y &= y_c + R \sin(\omega t + \phi_y) \end{aligned} \quad (4)$$

두 축의 위상 지연은 동일한 경우 원호 형상에 영향을 주지 않지만, 위상 지연 차 $\Delta\phi$ 가 발생하면 원호 경로는 Fig. 3과 같이 대각 방향을 주축으로 한 타원 형태로 구동한다.

원호 테스트 시, Fig. 4와 같이 기하학적 오차 및 열 변위 오차 등의 준정적 오차로 의해서 평면상의 위치 오차 $\Delta\mathbf{w}_c = (\Delta x_c, \Delta y_c)$ 가 발생하며, 이는 원호 구동 방향에 관계없이 동일하게 나타난다. 하지만, 실제 원호 경로 $\mathbf{p}_a = (x_a, y_a)$ 는 준정적 오차뿐만 아니라 동적 오차 $\Delta\mathbf{w}_d = (\Delta x_d, \Delta y_d)$ 로 인한

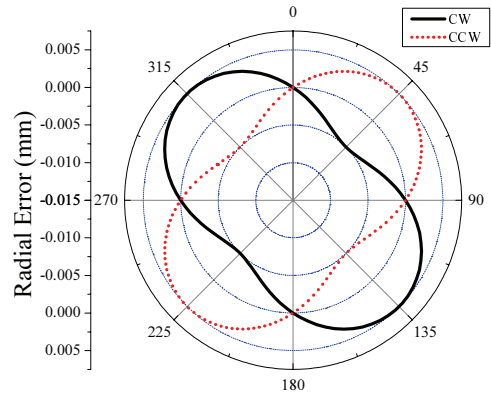


Fig. 3 Radial error due to servo mismatch between two linear axes ($R = 100 \text{ mm}$, $\omega = 0.2\pi/\text{s}$, $\Delta\phi = 0.001 \text{ rad}$)

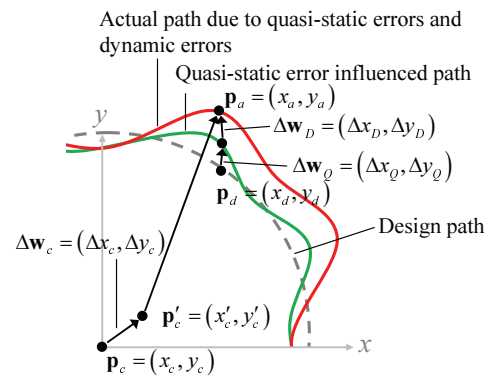


Fig. 4 Actual path due to quasi-static errors and dynamic errors in X-Y plane

위치 오차에 의해 불완전한 원호 경로로 다음과 같이 구동한다.

$$\begin{aligned} x_a &= x'_c + \Delta x_d - m_x \cos(\omega t + \phi_x) \\ y_a &= y'_c + \Delta y_d + m_y \sin(\omega t + \phi_y) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\mathbf{p}'_c = (x'_c, y'_c)$ 는 준정적 오차 $\Delta\mathbf{w}_c = (\Delta x_c, \Delta y_c)$ 로 인한 실제 원호 중심점의 위치이다. $m_x \cos(\omega t + \phi_x)$ 는 동적 오차에 의해 X축이 구동하는 원호 크기 m_x 와 위상 지연 ϕ_x 로 구동하는 경로이며, 동적 오차로 인한 위치 오차에 설계 위치의 합인 $R \cos(\omega t) + \Delta x_d$ 와 같다.

서보 불일치를 정확하게 추정하기 위해서, 준정적 오차에 따른 위치 오차 제거가 선행되어야 한다. 준정적 오차의 영향은 동일한 조건의 양방

향 (CW, CCW) 원호 경로로 구동하여 측정된 데이터 $\Delta x_{a,cw}, \Delta x_{a,ccw}$ 를 활용하여 제거한다. 측정 시간 동안 실험 환경의 온도 변화가 무시할 정도라고 가정하면, 준정적 오차에 의한 위치 오차는 원호의 방향에 관계없이 일정하다. 하지만 서보 불일치에 의한 위치 오차는 원호 방향에 따라 축 대칭으로 발생한다. 따라서, 양방향의 원호 데이터를 서로 상쇄하면 위치 오차 벡터에 준정적 오차에 의한 영향은 무시할 수 있고, 기계 진동, 서보 불일치 등에 의한 동적 오차에 의한 위치 오차 $\Delta x_D, \Delta y_D$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x_D &= (x_{a,ccw} - x_{a,cw})/2 \\ \Delta y_D &= (y_{a,ccw} - y_{a,cw})/2 \end{aligned} \quad (6)$$

동적오차에 영향을 받은 원호 경로는 불완전한 원호 크기 m_x, m_y 와 위상 지연 ϕ_x, ϕ_y 으로 구동하고, 식(6)에서 계산된 동적 오차에 의한 위치 오차로부터 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} m_x (\cos \omega t \cos \phi_x + \sin \omega t \sin \phi_x) &= x_d(t) + \Delta x_D \\ m_y (\sin \omega t \cos \phi_y + \cos \omega t \sin \phi_y) &= y_d(t) + \Delta y_D \end{aligned} \quad (7)$$

각 축 원호 구동의 위상 지연을 추정하기 위한 선형방정식은 식(7)을 통해 다음과 같이 정리한다.

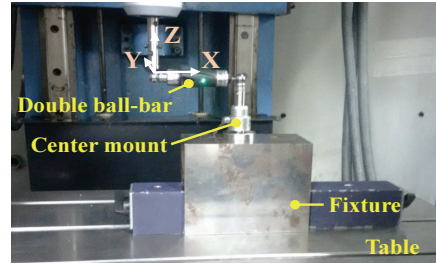
$$A_x \mathbf{x}_x = \mathbf{b}_x, \quad A_y \mathbf{x}_y = \mathbf{b}_y \quad (8)$$

여기서, $\mathbf{x}_x, \mathbf{x}_y$ 는 동적 매개변수 (Dynamic Parameter)인 X, Y축의 구동 원호 크기와 위상 지연이 포함된 미지수 벡터로 각 $[m_x \cos \phi_x, m_x \sin \phi_x]^T, [m_y \cos \phi_y, m_y \sin \phi_y]^T$ 이고, A_x, A_y 는 식(7) 좌변에서 미지수와 곱해지는 계수 행렬이며, $\mathbf{b}_x, \mathbf{b}_y$ 는 식(7)의 우변인 데이터 벡터이다.

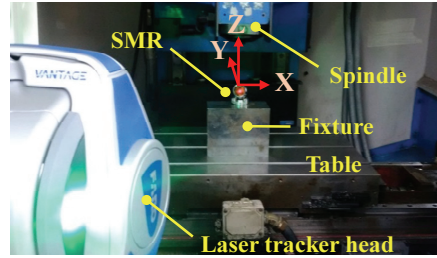
최소자승법을 통해 추정된 미지수 벡터의 첫 번째 항 $\mathbf{x}_x(1), \mathbf{x}_y(1)$ 과 두 번째 항 $\mathbf{x}_x(2), \mathbf{x}_y(2)$ 으로 부터 두 축의 위상 지연은 다음과 같이 계산한다.

$$\phi_x = \text{atan2} \left(\frac{\mathbf{x}_x(2)}{\mathbf{x}_x(1)} \right), \quad \phi_y = \text{atan2} \left(\frac{\mathbf{x}_y(2)}{\mathbf{x}_y(1)} \right) \quad (9)$$

원호 경로가 CCW이고, Y축을 기준으로 두 축의 위상 지연 차 $\Delta \phi$ 를 계산했을 때, 양의 위상차는 Y축이 X축을 선도하여 구동하는 것이고, 음의 위상차는 X축이 Y축을 선도하여 구동한다는 것이



(a) Using the laser tracker



(b) Using the DBB in the 3-axis machine tool

Fig. 5 Experimental setup for the circular test

Table 1 Specification of the 3-axis machine tool

Model: STP-T30 (KOMATEC)		
Travel range	X	500 mm
	Y	300 mm
	Z	300 mm
Resolution	1.0 μm	

다. 서보 불일치는 두 축이 지연되는 시간 차로 표현할 수 있고, 위상 지연 차 $\Delta \phi$ 에 구동 각속도 ω 를 나눠서 계산한다.

4. 실험

본 연구에서 제안한 서보 불일치 추정 방법의 검증을 위해, Table 1의 사양으로 볼바 측정이 가능한 구동 영역을 가진 KOMATEC 사의 STP-T30 3축 공작기계에서 Fig. 5와 같이 레이저 트래커와 볼바를 이용하여 서보 불일치 추정 실험을 실시했다. 실험에서 사용한 볼바는 Renishaw plc. 사의 QC-20W이고, 레이저 트래커는 FARO 사의 Vantage로 각 측정기의 사양은 Table 2와 같다. 측정은 공작기계 X, Y축 간의 서보 불일치를 대상으로 수행했다. 볼바를 이용한 실험은 Fig. 5(a)와 같이 양방향 원호 테스트를 통해 3회 실시했고, 원호의 반경 R 는 100 mm, 구동속도 f 는 1,000 mm / min,

Table 2 Specification of the DBB and the laser tracker

Model: QC-20W (Renishaw Plc)	
Resolution	0.1 μ m
Accuracy	(0.7 + 0.3%L) μ m
Minimum measuring radius	50 mm
Model: Vantage (FARO)	
Resolution (Distance)	0.5 μ m
Accuracy (MPE)	16 μ m + 0.8 μ m/m
Minimum working range	0 mm
Maximum working range	60 m with 1.5" SMR
L = Measuring length	

Table 3 Specification of the miniaturized machine tool

Working range	X	70 mm
	Y	70 mm
	Z	100 mm
Resolution		0.1 μ m
Repeated positioning accuracy (Single Axis)		$\pm 0.3 \mu$ m

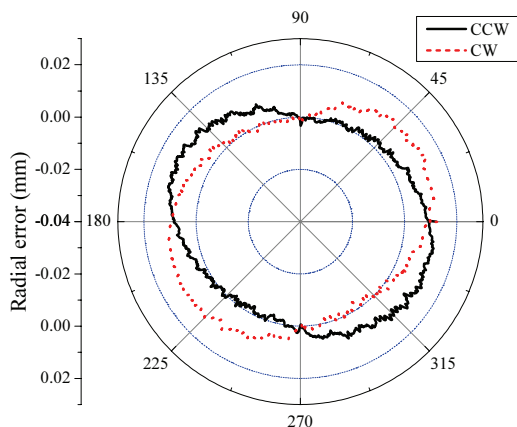


Fig. 6 Radial error measurement in the circular test using the DBB

원호 중심 위치 x_c 및 y_c 는 각 250 mm, 150 mm로 설정했다. 측정된 반경 방향의 오차는 Fig. 6과 같이 나타났다. 서보 불일치 추정 값은 제조사에서 제공한 소프트웨어 분석 결과로 -0.50, -0.50, -0.49 msec와 같고, X축이 Y축을 선도하는 것으로 확인하였다. 레이저 트래커를 이용한 실험은 Fig. 5(b)와 같이 원호 테스트를 실시했고, 반경 방향의 오차는 Fig. 7과 같다. 3회 반복 측정을 통해 추정된 서보 불일치는 각 -0.55, -0.58, -0.52 msec로 볼바 결과

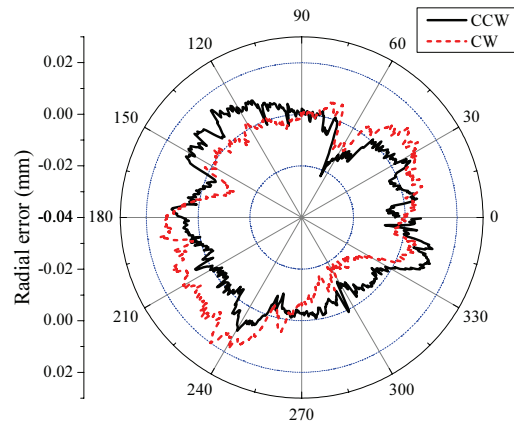


Fig. 7 Radial error measurement in the circular test using the laser tracker

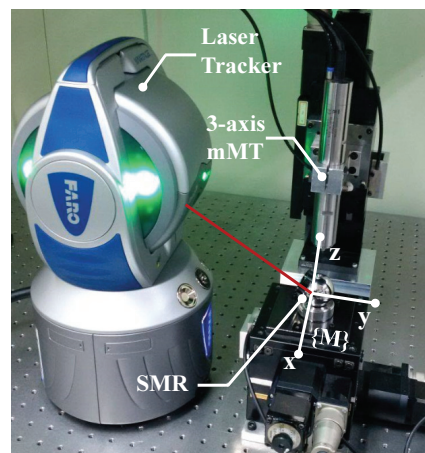


Fig. 8 Experimental setup for the circular test using laser tracker in the miniaturized machine tool

와 약 0.05 msec의 편차가 있었다. 이 차이는 레이저 트래커와 볼바의 측정 정확도 및 기계 진동 등에 의해 발생한다.

제안한 방법을 이용한 소형 공작기계 서보 불일치 측정 실험은 Table 3과 같은 성능의 SURUGA SEIKI 社의 단축 스테이지 KS103-70와 KS302-100으로 구성된 3축 공작기계의 X, Y축을 대상으로 Fig. 8과 같이 실시했다. 원호 테스트 반경 R, 구동 속도 f, 원호 중심 위치 x_c , y_c 는 각 10 mm, 4 mm / sec, 35 mm, 35 mm로 설정했고, 측정된 반경 방향 오차는 Fig. 9와 같다. 제안한 추정 방법을 통해 계산한 서보 불일치는 -0.44 msec로 X축이 Y축을 선도하여 구동하는 것으로 나타났다.

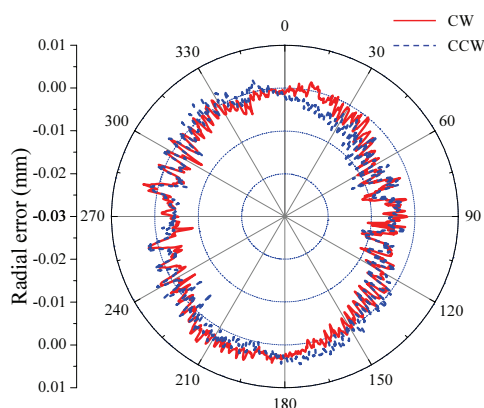


Fig. 9 Radial error measurement for the miniaturized machine tool using the laser tracker

5. 결론

본 연구에서는 볼바 등 기존 방법으로 측정하기 어려운 소형 공작기계의 서보 불일치를 레이저 트래커를 이용하여 추정하는 방법을 제안했으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 레이저 트래커를 이용한 양방향 원호 테스트 데이터로부터 준정적 오차 영향을 제거.
- (2) 최소자승법을 이용한 각 축 원호 구동 위상 지연을 추정 및 서보 불일치 계산 방법을 제안.
- (3) 일반 3축 공작기계에서 상용 볼바와의 비교실험을 통해 제안한 방법의 타당성을 검증.
- (4) 레이저 트래커의 간편한 설치, 유연한 측정 영역으로 볼바로 측정하기 어려운 소형 공작기계 뿐 아니라 중/대형 공작기계 서보 불일치 측정에도 활용 가능.

후 기

이 논문은 2015년도 미래창조과학부와 교육부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업과 대학중점연구소지원사업 (NRF-2013R1A2A2A01067917, NRF-2010-0020089)으로 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Mayr, J., Jedrzejewski, J., Uhlmann, E., Donmez, M. A., Knapp, W., et al., "Thermal Issues in Machine Tools," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 2, pp. 771-791, 2012.

2. Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R., et al., "Geometric Error Measurement and Compensation of Machines-An Update," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 2, pp. 660-675, 2008.

3. Lee, J. H., Liu, Y., and Yang, S. H., "Accuracy Improvement of Miniaturized Machine Tool: Geometric Error Modeling and Compensation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 12, pp. 1508-1516, 2006.

4. Koren Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing System," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 202, No. 4, pp. 265-271, 1980.

5. ISO 230-4, "Test Code for Machine Tools-Part 4: Circular Test for Numerically Controlled Machine Tools," 2005.

6. Knapp, W., "Circular Test for Three-coordinate Measuring Machines and Machine Tools," *Precision Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 115-124, 1983.

7. Bryan, J. B., "A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools Part 1: Principles and Applications," *Precision Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 61-69, 1982.

8. Kakino, Y., Ihara, Y., Nakatsu, Y., and Okamura, K., "The Measurement of Motion Errors of NC Machine Tools and Diagnosis of Their Origins by Using Telescoping Magnetic Ball Bar Method," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 36, No. 1, pp. 377-380, 1987.

9. Hai, N., Yuan, J., and Ni, J., "Reverse Kinematic Analysis of Machine Tool Error using Telescoping Ball Bar," *Proc. of International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 277-286, 1994.

10. Lee, K. I. and Yang, S. H., "Measurement and Verification of Position-Independent Geometric Errors of a Five-Axis Machine Tool Using a Double Ball-Bar," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 70, pp. 45-52, 2013.

11. Renishaw plc, "QC20-W Wireless Ballbar System Description and Specification," <http://www.renishaw.com/media/pdf/en/bc37e3f237284417baa57889d207cf97.pdf> (Accessed 4 January 2016)

12. FANUC, "FANUC Robonano α -0iB," <http://www.fanuc.com>

- fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/robonano/ROBONANO%20a-0iB(E)_v10.pdf (Accessed 4 January 2016)
13. TSUGAMI, “CNC Precision Automatic Lathe,” <http://www.tsugami.co.jp/eng/product/auto-lathe> (Accessed 4 January 2016)
 14. Nubiola, A. and Bonev, I. A., “Absolute Calibration of an ABB IRB 1600 Robot Using a Laser Tracker,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 29, No. 1, pp. 236-245, 2013.
 15. Zhang, Z. and Hu, H., “A General Strategy for Geometric Error Identification of Multi-Axis Machine Tools based on Point Measurement,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 5, pp. 1483-1497, 2013.