

반구상의 나선형 볼바측정을 통한 수직형 머시닝 센터의 오차 해석 및 보정

양승한*, 김기훈**, 박용국***

Error Analysis and Compensation for the Volumetric Errors of a Vertical Machining Center Using Hemispherical Helix Ball Bar Test

Seung-Han Yang*, Ki-Hoon Kim**, YongKuk Park***

ABSTRACT

Machining accuracy is affected by quasi-static errors of machining center. Since machine errors have a direct influence upon both the surface finish and geometric shape of the finished workpiece, it is very important to measure the machine errors and to compensate these errors. The laser measurement method for identifying geometric errors of machine tool has the disadvantages such as high cost, long calibration time and usage of volumetric error synthesis model. Accordingly, this paper deals with analysis of the geometric errors of a machine tool using ball bar test without using complicated error synthesis model. Statistical analysis method was adopted in this paper for deriving geometric errors using hemispherical helix ball bar test. As a result of experiment, geometric errors of the vertical machining center are compensated by 88%.

Key Words : Volumetric error synthesis model(체적오차 합성모델), Error compensation(오차 보정), Hemispherical helix ball bar test(반구상의 나선형 볼바측정)

1. 서론

제품의 형상과 기능적 요구가 복잡하고 다양해짐에 따라 제품생산 공정의 효율성과 기계 정밀도의 중요성이 점차 높아져가고 있다. 정밀도는 공작 기계의 성능을 평가할 때 가장 중요한 요소이다. 따라서 CNC공작기계의 성능 향상을 위해서는 오차 보정 기술이 매우 효과적인 방법이다. 이를 위해서는 정밀하고 경제적인 오차 측정방법의 개발이 아주 중요하다.

공작기계의 가공 정밀도에 영향을 주는 요소로 기계의 준 정적오차가 공작기계 자체 오차의 40~70%⁽¹⁾를 차지한다. 준 정적오차는 공작기계의 공구와 공작물간의 상대적인 위치오차로 정의된다. 이러한 준 정적오차는 공작기계 자체의 구조와 관련되어 발생하는 오차로서, 공작기계의 기하학적 오차, 열변형 오차 등이 이에 속한다. 공작기계의 기하학적 오차는 공작기계의 기구학적으로 연결된 요소가 가지는 형상오차와 더불어 요소들간의 부정렬에 의해서 기인하며 최종적으로 공구 끝단에서

☞ 2001년 3월 23일 접수

* 경북대학교 기계공학부

** 경북대학교 기계공학부 대학원

*** 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

공구와 공작물과의 불일치로 체적오차의 형태로 나타난다.

이러한 공작기계의 기하학적 오차는 레이저 시스템을 사용하여 측정한다. 레이저 시스템을 사용하여 오차를 측정하면 정확한 오차를 구할 수 있는 반면에 측정 장비가 비싸고, 측정장치 설치 및 사용이 어려우며, 측정시간도 많이 소요되어 상당한 불편함이 따른다. 게다가 이러한 측정을 수행하기에는 숙련된 기술자가 절대적으로 필요하다는 것도 단점으로 지적된다. 이와 같은 문제의 대안으로 1982년에 Bryan⁽²⁾⁻⁽⁴⁾은 망원경식 기구볼바를 제안하여 공작기계의 정밀도 평가에 이용하였고 그 이후로도 많은 연구에서 볼바시스템이 사용되었다.⁽⁵⁾⁻⁽¹³⁾ 그리고 실제 산업현장에서도 공작기계의 오차를 정기적으로, 자주 확인을 해야 하는 실정에 맞추어 볼바시스템을 널리 사용하고 있다.

3축 공작기계의 체적오차를 벡터로 표현하는 수학적 방법과 21가지 기하학적 오차를 사용한 모델식 유도 및 레이저 간섭계를 사용하여 21가지 오차성분을 측정하고 모델을 이용하여 보정하는 방법은 여러 사람들에 의해서 제시되었고, 그 효능이 입증되었다.⁽⁹⁾⁻⁽¹⁰⁾ 그러나, 공작기계의 오차평가를 위해서 제시된 지금까지의 방법은 각 운동 축의 오차성분을 측정하고 오차합성모델을 통해 기계의 체적오차를 추정하고 보정하는 방법이었다. 따라서 측정된 값을 직접 보정 값으로 사용할 수 없었고 복잡한 오차합성모델을 유도한 후 체적오차를 보정할 수 있었다. 그리고 지금까지의 볼바를 사용한 오차 평가 방법은 측정 데이터를 이용하여 각각의 오차성분 파악에 초점을 맞추고 있었다.⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁴⁾

Barakat⁽¹⁷⁾는 축약된 오차모델을 이용하여 3차원 측정기의 오차를 보정하였다. 양승한 등은⁽¹⁸⁾ 21가지 오차성분 중 선형변위 오차와 직각도 오차가 체적오차에 주된 영향을 끼침을 통계적 검증 방법으로 분석했다. 그 뿐만 아니라, 기존 볼바의 평면 측정방법을 3차원으로 확장하여 측정 시간 및 set-up 오차를 줄이는 방법을 제시했다. 본 논문에서는 반구상의 나선형 경로를 따라가는 볼바측정 방법을 통해 수직형 머시닝센터의 기하학적 오차를 실제 현장에서도 쉽게 사용할 수 있도록 체적오차를 간편하게 예측하는 방법을 제시하였다. 이를 위해서 다중회귀분석이라는 통계적인 방법을 적용하였으며 위치보정기법에 따라 각 점에서 발생하는 오차를 보정하였다. 그 결과 88% 정도의 보정효과를 얻

었다.

2. 수직형 머시닝센터의 체적오차 합성모델

2.1 체적오차 합성모델의 유도

공작기계 자체 오차의 원인 중 주 원인은 준 정적오차(기하학적 오차와 열변형 오차)에 기인한다. 공작기계의 기하학적 오차는 기계 자체의 불완전한 제조, 기계요소들의 부정렬, 정적변형 또는 기계 마모로 인해서 생긴다. 열변형 오차는 모터, 베어링, 유압 시스템, 주위 온도로 인한 기계요소들의 열적 뒤틀림으로부터 온다. 이 원인은 단독으로 혹은 복합적으로 공작기계의 최종오차에 영향을 미친다.

이론적으로 3축 공작기계에는 21개의 기하학적 오차가 있다. 각 축에 대하여 3개의 병진오차와 3개의 회전오차, 그리고 두 축사이의 직각도오차가 21개의 기하학적 오차를 구성하고 있다. 기하학적 오차를 해석하기 위해 수직형 공작기계의 모든 오차요소를 합성한 체적오차 합성모델(Volumetric Error Synthesis Model)은 다음과 같이 유도되며 기존의 논문⁽¹⁹⁾에서 상세히 기술하였다.

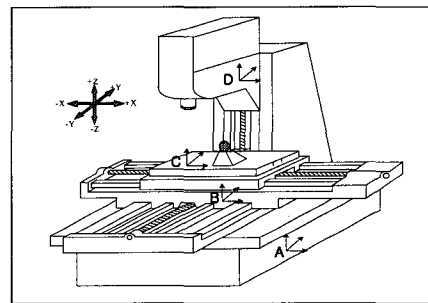


Fig. 1 Machine coordinate system

$$\begin{aligned} \Delta x = & -\delta_{xx} - \delta_{yy} + \delta_{xz} + \varepsilon_{zz} T_y + \varepsilon_{yy} (L - Oyz_z - T_z - z) \\ & + \varepsilon_{zx} (Oyz_y - Oyx_y + T_y - y) + \varepsilon_{zy} (Oyz_y + T_y - y) \\ & + \varepsilon_{yx} (Oyx_x - Oyz_z - T_z + L - z) + \varepsilon_{yz} (T_z - L) - S_{zx} z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta y = & -\delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} + S_{yx} x - S_{yz} z + \varepsilon_{zz} T_x + \varepsilon_{zx} (L - T_z) \\ & + \varepsilon_{zy} (-Oyz_x - T_x) + \varepsilon_{xx} (Oyz_z - Oyx_x + T_z - L + z) \\ & + \varepsilon_{xx} (Oyx_x - Oyz_x - T_x + x) + \varepsilon_{yy} (Oyz_z + T_z - L + z) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta z = & -\delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} - \varepsilon_{yz} T_x + \varepsilon_{xz} T_y + \varepsilon_{yy} (Oyz_x + T_x) \\ & + \varepsilon_{yx} (Oyz_x - Oyx_x + T_x - x) + \varepsilon_{xy} (-Oyz_y - T_y + y) \\ & + \varepsilon_{xx} (Oyx_y - Oyz_y - T_y + y) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$: X축 슬라이드 시스템 C에서 공작물의 체적오차

T_x, T_y, T_z : 스핀들 캐리어 좌표계 D에서 표준 공구끝의 좌표

L : 공구 교환시 공구 오프셋 길이

x, y, z : X, Y, Z축 좌표계에서 각 슬라이더의 이동거리

$\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz}$: X, Y, Z축 방향의 선형변위오차

$\delta_{yx}, \delta_{zx}, \delta_{xy}, \delta_{zy}, \delta_{xz}, \delta_{yz}$: 진직도오차

Oyx_x, Oyx_y, Oyx_z : Y축 원점 O_y 에 대한 X축 원점 O_x 의 세 방향거리

Oyz_x, Oyz_y, Oyz_z : Y축 원점 O_y 에 대한 Z축 원점 O_z 의 세 방향거리

$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$: X, Y, Z축 방향의 틀

$\varepsilon_{yx}, \varepsilon_{zx}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{zy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$: 각도오차

S_{xy}, S_{yz}, S_{zx} : 두 축사이의 직각도오차

2.2 3차원 볼바식 유도

지금까지의 평면 볼바측정과 달리 X, Y, Z 축을 한꺼번에 움직이면서 측정할 수 있는 3차원상의 나선형 볼바측정을 실시하였다. 이를 위하여 3차원상의 볼바가 가지는 위치를 고려하여 그림 2와 같이 각 점의 기하학적 오차를 포함한 볼바식을 만들었다. 원점을 (x_0, y_0, z_0) 이고 반지름이 R 인 볼바시스템이 가지는 위치는 (x, y, z) 이지만, 기하학적 오차가 포함되어 실제로는 (x_0', y_0', z_0') 를 원점으로 하고 (x', y', z') 점에 위치한다.

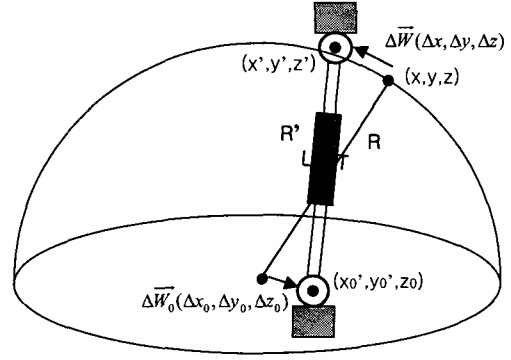


Fig. 2 A schematic diagram for ball bar test

실제 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)에서 측정되는 값, 반경오차 ΔR 은

$$\begin{aligned} \Delta R = & \frac{R' - R}{\sqrt{(x' - x_0')^2 + (y' - y_0')^2 + (z' - z_0')^2} - R} \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)와 같이 표현되며

$$R + \Delta R = \frac{\sqrt{(x - x_0 + \Delta x - \Delta x_0)^2 + (y - y_0 + \Delta y - \Delta y_0)^2 + (z - z_0 + \Delta z - \Delta z_0)^2}}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \quad (3)$$

식(3)의 양변을 제곱하여 2차 이상의 미소항을 소거하면 최종 볼바식은 식(4)와 같다.

$$R\Delta R = \frac{(x - x_0)(\Delta x - \Delta x_0) + (y - y_0)(\Delta y - \Delta y_0) + (z - z_0)(\Delta z - \Delta z_0)}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \quad (4)$$

2.3 통계적 분석 방법

체적오차는 각 축 슬라이드의 위치만의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 통계적인 분석방법 중의 하나인 다중회귀분석(multiple regression analysis)방법을 사용하여 식(1)의 형태와 유사하게 아래 식과 같은 회귀모델로 표현하였다.

$$\begin{aligned} \Delta x = & a_1 X + a_2 Z + a_3 \\ \Delta y = & b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4 \\ \Delta z = & c_1 Z + c_2 \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하고 행렬로 나타내면 아래와 같은 선형연립방정식의 형태로 표현된다.

$$b = Ax \tag{6}$$

여기서,

$$b^T = [R \ \Delta R_i]$$

$$A^T = \begin{bmatrix} (x_i - x_0)^2 \\ (x_i - x_0)(z_i - z_0) \\ (y_i - y_0)(x_i - x_0) \\ (y_i - y_0)^2 \\ (y_i - y_0)(z_i - z_0) \\ (z_i - z_0)^2 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ c_1 \end{bmatrix}$$

- b : 볼바의 측정값을 나타내는 n 차원 반경오차 벡터
- A : 측정 점의 위치를 나타내는 $n \times 6$ 행렬,
- x : 모델의 계수 벡터,
- i : 1, 2, ..., n 까지의 측정 점의 위치

최소자승법을 사용하면 모델 계수 벡터 x 를 아래의 식에서 추정할 수 있다.

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b \tag{7}$$

식(7)에서 회귀모델의 상수항(a_3, b_4, c_2)을 구할 수 없다. 이것은 볼바가 상대적 위치오차의 조합으로 나타남으로 서로 제거되기 때문이다. 그러나 기계원점에서 오차는 없는 것으로 간주할 수 있기 때문에 보편성을 잃는 것은 아니다.

3. 실험 및 보정

3.1 실험 방법

볼바측정은 다음의 과정을 따른다.

- 1) 베드위의 $X=300$ mm, $Y=300$ mm 인 점 ①(그림 3)을 볼바측정의 원점으로 잡는다.
- 2) 반지름을 250 mm로 하여 그림 4과 같이 반구상의 나선형 볼바측정을 갖는다.
- 3) 반구상의 나선형 형태의 공구경로를 따라 32개의 점에서 오차 값을 측정한다.
- 4) 그림 3에서 나타낸 대로 원점을 ②, ③으로 바꾸어서 1)~3)의 과정을 반복한다. 여기서, 점 ①, ②는 오차 예측을 위한 측정이고, 점 ③은 ①, ②에서 예측된 값을 바탕으로 실험결과를 확인하고 보정을 위한 비교 측정이다.
- 5) 측정점의 ΔR 을 가지고, 식 (7)의 x 의 값을 계산한다.

수직형 머시닝센터(KIA KV60)를 실험대상으로 하여 기하학적 오차만을 측정하기 위해 열변형이 발생하지 않도록 냉조건하에서 실험이 이루어졌다.

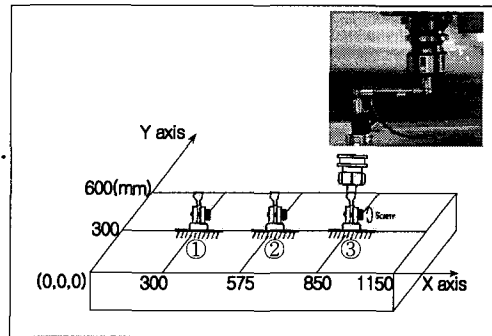


Fig. 3 Sep up of origin point in the ball bar test

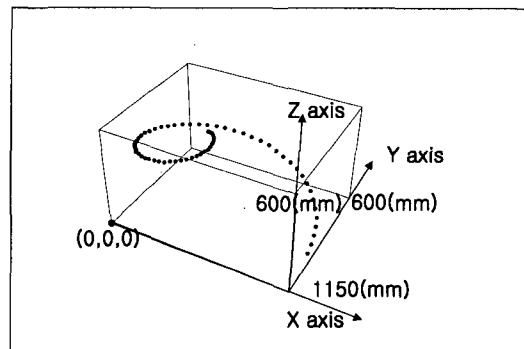


Fig. 4 Measurement point along the hemispherical helix

3.2 실험결과

각각의 볼바측정으로 얻어진 ΔR 을 가지고, 식 (7)을 계산하였다. 그 결과 최종적으로 회귀모델의 계수값 $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, c_1$ 을 얻을 수 있었다. 이 중에서 원점이 ①과 ②인 실험에서 얻어진 값을 평균하였고, 그 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Results of geometric errors analysis

	The value of model parameter
a_1	-1.3844E-05
a_2	-3.98543E-04
b_1	-2.17282E-05
b_2	1.81592E-04
b_3	2.73096E-04
c_1	-7.60534E-05

Table 1의 결과가 얼마나 타당한지는 레이저 측정장비로 기하학적 오차를 직접 측정하여서 비교하거나 다른 볼바측정 시 얻어질 임의의 오차를 예측하고 실제의 볼바측정값과 비교함으로써 그 타당성을 입증할 수 있다. 그래서 (850, 300)을 원점으로 하는 볼바측정시 나타날 체적오차값을 Table 1의 결과와 회귀모델을 이용하여 예측하였다. 또, 실제의 볼바측정값과 비교하였고 그 결과가 그림 5와 Table 2에 나타나있다. Table 2에서처럼 평균 10 μm 이하로 예측할 수 있었고, 이것은 축약모델로 얻어진 값이 상당히 타당성을 가진다는 것을 말한다.

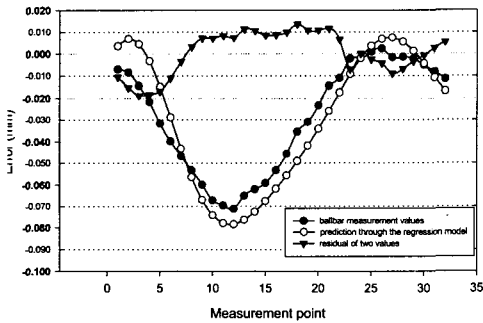


Fig. 5 Prediction through the regression model

3.3 보정 및 고찰

Table 1에서 얻어진 계수 값을 식(5)를 통해 체적오차를 예측하였다. 이를 통해 측정원점에서

Table 2 Summary about the prediction results

	Absolute residual of two values
Maximum error(mm)	0.0187
Mean error(mm)	0.0085

$\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0$ 와 반구상의 나선형 볼바측정 점에서의 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 를 예측하고 각 점에서 이 오차량만큼 제거하는 방법을 통해 새로운 위치보정 점을 찾아냈다. 위치보정으로 새롭게 얻어진 원점은 table 3과 같다.

Table 3 New origin point after compensation

	Origin point before compensation	New origin point after compensation
X position (mm)	850.000	849.983
Y position (mm)	300.000	300.039
Z position (mm)	12.748	12.749

또, 그림 6에서처럼 각 측정점에서의 X, Y, Z의 보정값을 계산하여 새로운 측정점을 얻었다. 그래서 보정 후의 새로운 측정점(③지점)에 대한 볼바측정을 다시 하였고, 그림 7은 보정결과이다.

보정 후의 볼바측정은 보정 전과 비교해서 그 값이 현격하게 줄어들음을 알 수 있다. 보정 전의 최대 78.5 μm , 평균 32.2 μm 의 오차를 최대 8.4 μm , 평균 4 μm 까지 보정하였다. 이 보정으로 약 88 %의 보정효과를 얻었다(Table 4).

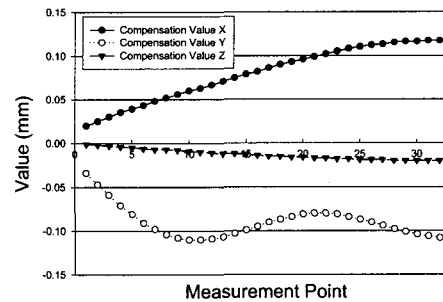


Fig. 6 Compensation values of each axes

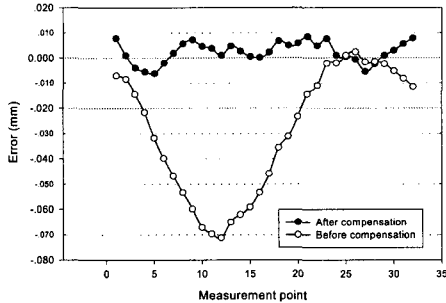


Fig.7 Result using position compensation method

Table 4 Summary about compensation result

	Without compensation	With compensation
Maximum error (mm)	0.0785	0.0084 (89.3%)
-absolute values		
Mean error(mm)	0.0322	0.0039 (87.9%)
-absolute values		

지금까지의 결과를 종합하면, 공작기계의 기하학적 오차를 볼바를 이용하여 예측하고 평가하였다. 기존의 평면측정에서 벗어나 반구상의 나선형 볼바측정과 회귀모델을 통해서 기하학적 오차를 예측하였다. 또한 이를 가지고 공작기계의 오차를 충분히 보정하였다.

4. 결론

반구상의 나선형 볼바 측정과 회귀모델을 이용하여 수직형 머시닝센터의 오차를 해석하고자 한 본 연구를 통해서 지금까지의 내용을 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 3축 수직형 공작기계의 체적오차 합성모델을 등변환행렬을 이용하여 유도하였고 이를 축약한 회귀모델을 제시하였다.
- 2) 고가의 레이저 측정 시스템 대신, 간편한 볼바측정 시스템을 사용하여 공작기계의 기하학적 오차를 쉽게 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.
- 3) 공작기계의 기하학적 오차를 보정하기 위해서 체적오차합성 모델을 대신한 회귀모델을 반구상

의 나선형 볼바측정에 적용한 결과 수직형 머시닝 센터의 체적성능을 88 % 향상시킬 수 있었다.

- 4) 복잡한 체적오차 합성 모델을 사용하지 않고 간단한 회귀식을 사용하여 볼바측정값을 그대로 보정값으로 사용할 수 있는 장점이 있다.

참고문헌

1. J. B. Bryan, "International Status of Thermal Error Research," Annals of CIRP, pp. 645-656, 1990.
2. J. B. Bryan, "A simple method for testing measuring machine tools," Precision Engineering, 4(2), pp. 61-69, 1982.
3. J. B. Bryan, "Method for testing measuring machines and machine tools part 1: Principles and Applications," Precision Engineering, V4, pp. 61-69, 1982.
4. J. B. Bryan, "Method for testing measuring machines and machine tools part 2: Construction Details," Precision Engineering, V4, pp. 125-138, 1982.
5. Knapp, W., "Circular Test for Three-Coordinate Measuring Machines and Machine Tools," Precision Engineering, V17, pp. 115-124, 1983.
6. Knapp, W., "Test of the Three-dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and Its Relation to the Machine Errors," Annals of CIRP, V32(1), pp. 459-464, 1983.
7. Kunzmann, H., and Waldele, F., "On Testing Coordinate Measuring Machines(CMM) with Kinematic Reference Standards(KSR)," Annals of CIRP, V32(1), pp. 465-468, 1983.
8. Kakino, Y., "The Measurement of Motion Error of NC Machine Tools and Diagnosis of their Origins by Using Telescoping Magnetic Ball Bar Method," Annals of the CIRP, 36(1), pp. 377-380, 1987.
9. Donmez, M.A., Liu, C.R, and Rarash, M.M., "A generalized Mathematical Model for Machine Tool Errors," ASME, pp. 231-244, 1987.
10. Chen, J. S., Yuan, J. X, Ni, Jun, and Wu, S. M., "Real time Compensation of Time-variant Volumetric Error on a Machining Center," Sensor, Control, and Quality Issues in Manufacturing,

- ASME, pp. 241-253, 1991.
11. H. J. Pahk, Y. S. Kim, "A New Technique for Volumetric Error Assessment for CNC Machine Tools Incorporating Ball Bar Measurement and 3D Volumetric Error Model," *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, 37(11), pp. 1583-1596, 1997.
 12. H. D. Kwon and M. Burdekin, "Measurement and diagnostics of machine tool errors during circular contouring motions," *Proc Instn Mech Engrs*, Vol. 212 Part B, 1998.
 13. Hai, N., Yuan, J., and Ni, J. "Reverse Kinematic Analysis of Machine Tool Error Using Telescoping Ball Bar," *ASME, PED-Vol. 68-1*, pp. 277-286, 1994.
 14. S. Yang, J. Yuan, J. Ni, "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation," *Journals of Manufacturing Systems*, Vol. 15, No 2, pp. 113-118, 1996.
 15. S. Yang, J. Yuan, J. Ni, "The Improvement Thermal Error Modeling and Compensation on Machine Tools by CMAC Neural Network," *Int. J. Mach. Tools Manufact.* v36, No. 4, pp. 527-537, 1996.
 16. Jun. Ni "CNC Machine Accuracy Enhancement Through Real Time Error Compensation," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 717-724, 1997.
 17. N.A. Barakat et al., "Kinematic and geometric error compensation of a coordinate measuring machine," *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, 40, pp. 833-850, 2000.
 18. 김기훈, 양승한 "A Reverse Kinematic Approach for Error Analysis of a Machine tool Using Hemispherical Helix Ball bar test," *한국정밀공학회* Vol. 18, No. 3, pp. 143-151, 2001
 19. 김기훈, 양승한 "반구상의 볼바측정을 통한 스피들 열변형 오차측정," *대한기계학회* Vol. 29, No. 9, pp. 1359-1367, 2001
 20. *Random Data, Analysis and Measurement Procedures*, Bendat John & Piersol, Wiley, 1991.
 21. *Renishaw Ballbar Diagnostic Manual*, Renishaw Co., 1992.