

Machine Tools 공간오차 분석을 위한 Ball-bar Artifact 연구

이응석[†] · 구상서^{*} · 박달근^{*}

(2003년 11월 14일 접수, 2004년 4월 12일 심사완료)

A Study on the Ball-Bar Artifact for the Volumetric Error Calibration of Machine Tools

Eung-Suk Lee, Sang-Seo Koo and Dal-Gun Park

Key Words: Volumetric Error(공간오차), CMM(3차원좌표측정기), Artifact, Ball-Bar, Machine Tool

Abstract

For volumetric error measurement and calibration for machine tools, manufacturing machine or coordinate measuring machine (CMM), are studied using a Ball-bar artifact. A design of the Ball-bar is suggested manufactured by Invar, which is a low thermal expansion material, and precision steel balls. The uncertainty for the artifact method is discussed. A method of the Ball-bar artifact for obtaining 3-D position errors in CMM is proposed. The method of error vector measurement is shown using the Ball-bar artifact. Finally, the volumetric error is calculated from the error vectors and it can be used for Pitch error compensation in conventional NC machine and 3-D position Error map for calibration of NC machine tools.

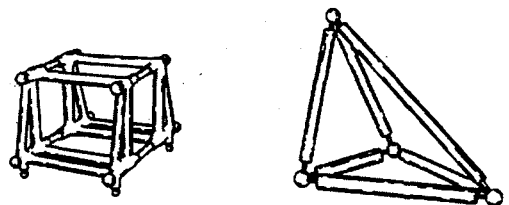
기호설명

- ex, ey, ez : 오차 벡터
- Ex, Ey, Ez : Roll, Pitch, Yaw 오차
- Ep : 볼 좌표에서의 위치 오차
- n : 볼 번호
- $P(x), Q(y), R(z)$: Ball-bar Calibration 좌표
- Xn, Yn, Zn : Machine tool에서의 볼 좌표
- $\theta_x, \theta_y, \theta_z$: 좌표회전 각도

1. 서론

NC공작기계를 이용한 정밀가공을 위해서는 3축 이송오차를 측정, 보상하여야 하는 것이 필수적이다. NC공작기계의 오차를 측정하기 위한플레이트 형태를 지닌 검사 장치인 Artifact (2차측정기)는 Ball/Hole-plate^(1,2,3) 또는 Cone-plate로 제

안되었으며, 본 연구에서는 Ball과 Bar로 구성된 Ball-bar Artifact에 대하여 측정 및 분석 방법을 연구하였다. BSI BS 6808 Part3에서는⁽¹⁾ 3차원 좌표측정기 (CMM, Coordinate Measuring Machine)의 오차를 측정할 때 Fig. 1과 같은 볼의 구조의 Artifact사용을 추천하고 있으며, CMM에서 오차를 측정할 때 같은 Artifact나 같은 종류의 Artifact를 사용해야 한다고 규정하고 있다. E.S.Lee⁽³⁾은 Hole-plate (Fig. 2)를 이용한 CMM의 공간 오차 측정에 대하여 연구하였으며, Plate에서의 볼과 홀의 중심에서 팽창에 의한 굽힘 영향, Hole-plate의 설계 및 설치시 발생하는



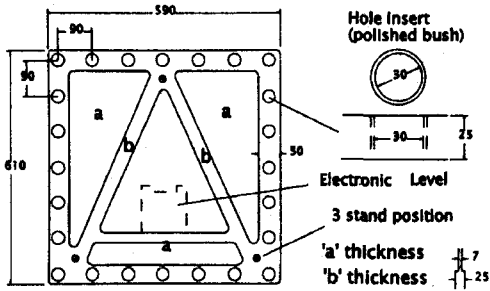
(a) Eight balls space frame (b) Four balls space frame
Fig. 1 Example designs of balls artifact⁽¹⁾

E-mail : eungsuk@cbnu.ac.kr

Tel : (043) 261-2442

[†] 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부

^{*} 충북대학교 대학원 기계공학부

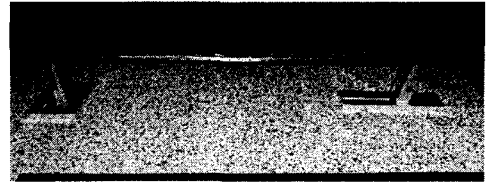
Fig. 2 Hole-plate artifact⁽³⁾

오차, 공간 오차에 대한 분석에 대해 연구하고 있다. 3축 CMM의 공간오차 측정 방법, 온도에 의한 영향, 오차 함수에 대하여서도 연구되었다.⁽⁴⁾ Ball-bar Artifact로 NC공작기계 또는 CMM의 오차를 측정하기 위해서는 먼저 정확한 볼의 3차원 위치 좌표를 알고 있어야 한다. 다음으로 Ball-bar의 Calibration 테이블을 구성한 후 측정대상 Machine tools (NC공작기계 또는 CMM)에서 Ball-bar에 의한 측정을 수행 한 후 Calibration 테이블에 의해 오차 벡터를 구하고 최종적으로 대상 Machine tools에 대한 공간오차 (Volumetric error)를 얻을 수 있다.

2. Ball-bar Artifact 설계 및 Calibration

2.1 Ball-bar 설계 및 제작

Ball-bar는 Fig. 3과 같이 정밀 베어링 볼을 사용하여 제작되었으며, 다수의 정밀 볼을 열팽창이 적은 막대 위에 부착하고 (볼 진원도 $1\mu\text{m}$ 이하), 막대는 열팽창을 최소로 하기 위하여 Invar⁽⁵⁾ (선열팽창계수 : $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)로 제작되었다. Fig. 4는 Ball-bar Artifact의 경사 설치(45°)의 경우 측정기 자중에 의한 변형을 추정하기 위한 FEM 결과이다. 해석 S/W는 Working Model FEA Ver 3.0.1이며, 재료조건은 Invar와 가장 가까운 Steel ANSI 304로 하고 경계조건은 양쪽에 있는 Count-Boring자리에 볼트로 고정하였다. Ball-bar의 steel 볼 자중은 무시하였으며, 계산결과에서 $\phi 38\text{mm}$ Bar인 경우 최대 처짐량은 $2\mu\text{m}$ 가 발생하였다. 일반적인 산업용 NC 제어기의 경우 위치 제어 분해능은 $0.1 \sim 1\mu\text{m}$ 내외이다.



(a) Horizontal set-up



(b) Inclined position set-up for CMM

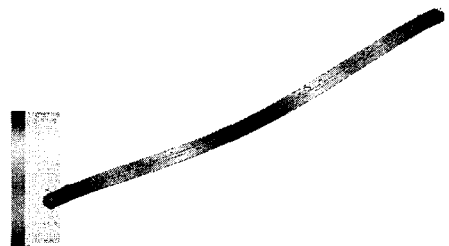
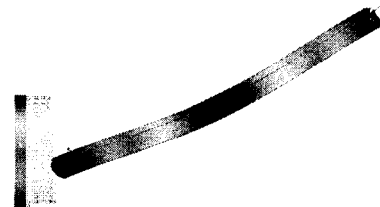
Fig. 3 Manufactured Ball-bar artifact (17 bearing balls, $\phi 19\text{mm}$, Invar base) set-up in CMM table(a) $\phi 19\text{mm}$ Bar (Max deflection $7\mu\text{m}$)(b) $\phi 38\text{mm}$ Bar (Max deflection $2\mu\text{m}$)

Fig. 4 Deflection calculation for inclined Ball-bar artifact using FEM

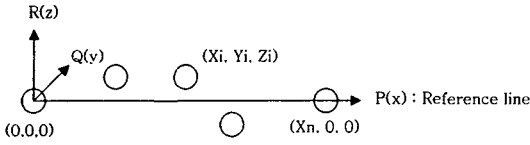


Fig. 5 Ball-bar calibration coordinate for n(17) balls

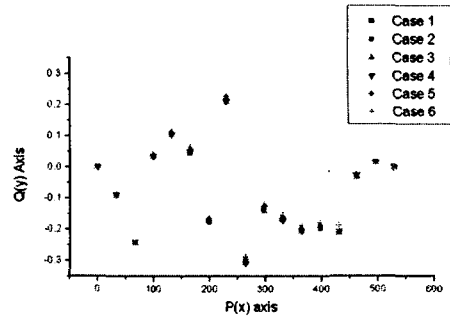
Table 1 Ball-bar calibration table (unit : mm)

Ball No.	P(x)	Q(y)	R(z)
1	0	0	0
2	33.06293	-0.08918	-0.01617
3	66.0843	-0.24208	0.13162
4	99.08047	0.03748	0.1204
5	132.27022	0.1092	0.20215
6	165.38897	0.05373	0.21917
7	198.12677	-0.17068	0.1953
8	230.84455	.231685	0.40368
9	263.74422	-0.30085	0.25192
10	296.89133	-0.13162	0.23563
11	329.8017	-0.16362	0.21105
12	363.16117	-0.2	0.17143
13	395.9437	-0.19065	0.21105
14	429.48497	-0.20325	0.07625
15	461.95275	-0.02878	0.10542
16	495.48877	0.01648	0.06355
17	528.46643	0	0

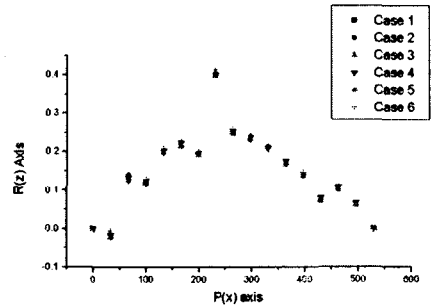
Ball-bar Artifact에 의해 측정된 Machine tools의 3차원 위치오차 벡터는 다음의 목적으로 사용될 것이다. 1차원 길이오차 (주축상에서의 오차)는 기존 NC제어기의 Pitch error compensation 보상 데이터로, 3차원 길이오차의 경우는 Error Map으로 구성하여 NC제어기에 ROM Data로 저장되어, 가공 프로그램의 자동 위치 보상 목적으로 사용 가능하다.

2.2 볼 위치 좌표 Calibration

정밀한 CMM을 사용하여 볼 중심의 3차원 좌표를 Fig. 5의 좌표로 측정하여 Ball-bar Calibration Table 1을 작성한다 (기존 CMM 'A' 사용). Fig. 6은 Ball-bar Calibration 데이터의 6회 반복 측정값의 좌표축 표시이며, CMM의 자체오차를 고려하여도 Case 별 측정값의 편차는 수 μ m 내외로 크지 않음을 보인다. 6회 측정은 임의의 CMM 작업공간에서 측정위치를 선정하였다.



(a) P(x)-Q(y) coordinate



(b) P(x)-R(z) coordinate

Fig. 6 Ball-bar calibration data in the P(x), Q(y) and R(z) coordinates (6 times average, unit : mm)

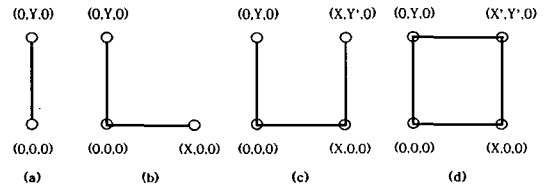


Fig. 7 1-D Ball-bar measuring procedure in XY plane, Case (a) -> (d)

3. Ball-bar 사용 및 오차벡터 측정 순서

1) 1차원 Ball-bar는 Fig. 7과 같이 반시계 방향으로 순서대로 위치시키고 각 볼 중심값을 측정한다. 이때 Fig. 8과 같이 Case (c), (d)에서는 보상이 필요하다. Ball-bar의 수직 설치 측정의 경우는 Fig. 9와 같다.

2) 볼 중심 좌표에서의 오차 벡터는 식 (1)과 같이 구해지고, Fig. 10과 같이 각 볼 중심 측정점에서 Ball Calibration 좌표를 제하여 구한다.

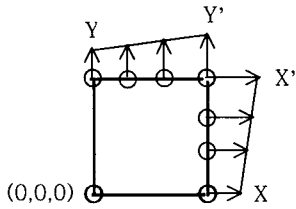


Fig. 8 Compensation of the measured data in Case (c), (d)

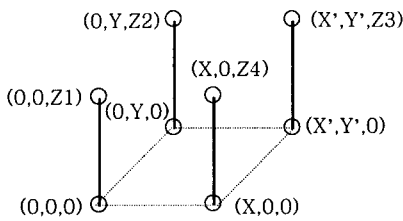


Fig. 9 Vertical set up and measuring procedure of 1-D Ball-bar

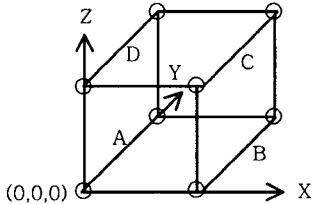


Fig. 10 Four cases data sets in each axis

오차벡터(ex, ey, ez) = 측정된불중심좌표 - Ball Calibration Data (1)

3) NC제어기의 Pitch Error Compensation 값은 Fig. 10과 같이 각 축의 4가지 경우의 평균오차 값을 구하여 보상값으로 사용한다.

4) Ball-bar의 경사 설치의 경우는 Fig. 11과 같이 4가지 방향으로 설치하고 시계방향으로 각각 정밀(표준) CMM을 이용하여 불 중심좌표를 측정한다. 불 중심 좌표에서 오차 벡터는 같은 방법으로 구해지고, Fig. 12에서 Ball-bar(볼 17개)에서 4가지 (Case 1-4)의 경우의 오차 벡터 측정 예를 표시하였다. Ball-bar의 P,Q,R Calibration 좌표로 측정된 오차 벡터는 식 (2)의 좌표회전각도를 사용하여 X,Y,Z좌표로 변환된다.

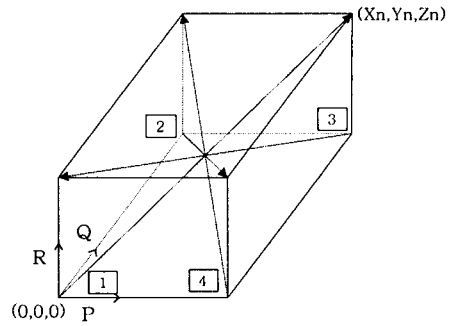


Fig. 11 Measuring procedure and set up for inclined measurement of 1-D Ball-bar artifact

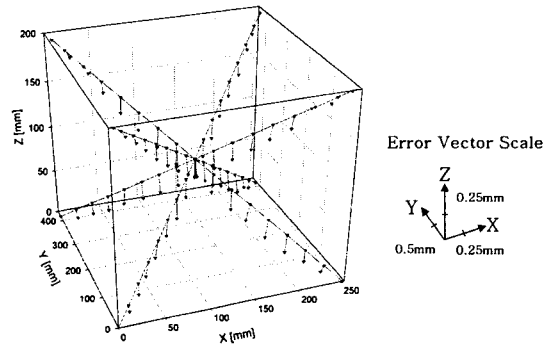


Fig. 12 3-D error vector measurement (17 balls, 4 cases of inclined set-up, CMM 'B')

$$\theta_x = \tan^{-1}\left(\frac{Z_n}{X_n}\right), \quad \theta_y = \tan^{-1}\left(\frac{Z_n}{Y_n}\right) \quad (2)$$

Artifact 측정시 온도변화가 클 경우는 Artifact의 열팽창계수를 사용하여 20°C로 Calibration 값을 보정하고, 실제 측정시의 온도를 측정하여 다시 20°C로 보정하여 비교한다.

직각도의 경우는 전술한 1차원 Artifact로는 측정할 수 없으며, 2차원 Artifact가 필요하다. Machine tools의 직각도 오차는 추측대의 단순한 조립에 의한 오차이외, 가이드의 휨 등으로 인한 2축의 진직도에서 발생하는 직각도 측정을 위해서는 일반적인 직각자 형태로는 충분치 않다. 본 연구에서는 Fig. 13과 같은 2차원 Artifact를 제작하였으며, 직각도의 경우는 2차원 좌표값으로 충분하므로 Hall-plate로 설계하였다.

4. 오차 분석

4.1 각도 오차(Angular error)

각도 오차중에 X축에서의 Pitch오차(Fig. 14)를 예를 들면, Fig. 11에서의 측정순서 중 1, 4 번을 선택을 하여 Pitch를 구하면 Ep41벡터와 Ep11벡터의 차이 때문에 각도가 기울어지게 되고 이것을 계산식으로 나타내면,

$$\sum_{i=1}^{17} Ey(x)_i = \sum_{i=1}^{17} \tan^{-1} \frac{Ep4i - Ep1i}{Z_i} \quad (3)$$

으로 나타낼수 있고, Yaw, Roll오차도 같은 방법으로 구할 수 있다.

4.2 위치 오차(Position error)

위치 오차 중에 X축 위치오차(Fig. 15)의 측정 예를 들면, 위에서 구한 X축 Pitch오차의 각도를 가지고 Ep41, Ep11를 통과하는 직선을 기준X축으로 연장하면 기준 X축과의 교점을 구할 수 있으며 이때 기준 X축과의 교점에서의 X값과 첫 번째 볼의 X값과의 차이를 X축 방향의 위치결정

오차라 한다. 다른 Y, Z축의 위치 결정오차도 같은 방법으로 구할 수 있다.

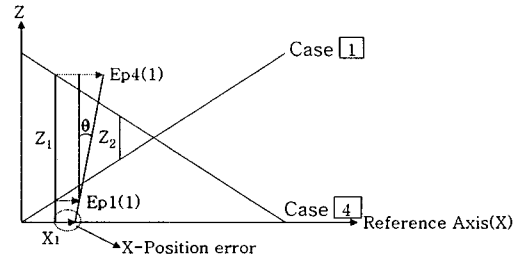


Fig. 15 Position error calculation in the X-axis

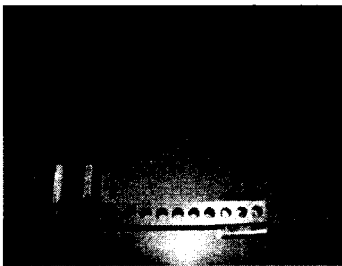


Fig. 13 2-D Hall-plate artifact for squareness measurement (250x200, φ20 hall dia.)

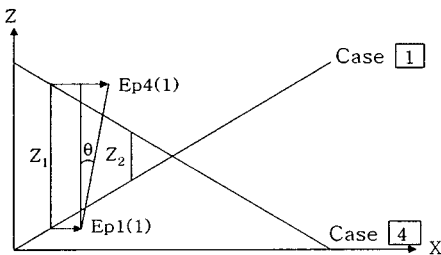
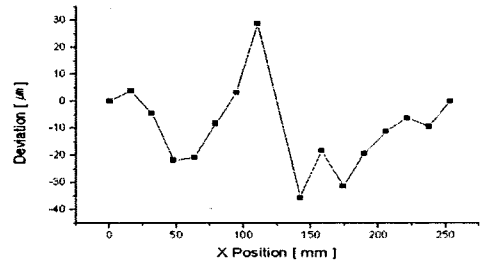
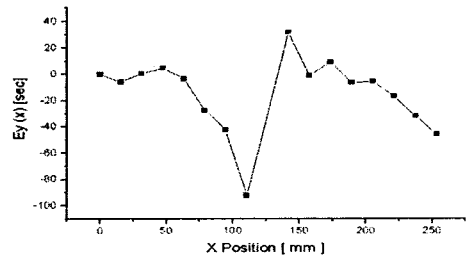


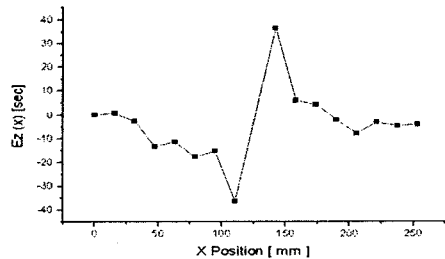
Fig. 14 Pitch error (Ey) calculation in the X-axis



(a) Position error

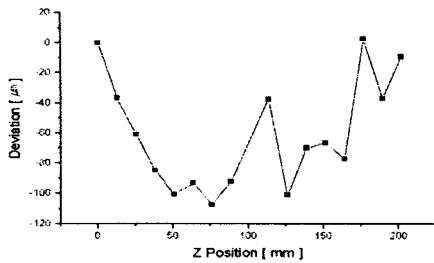


(b) Pitch error

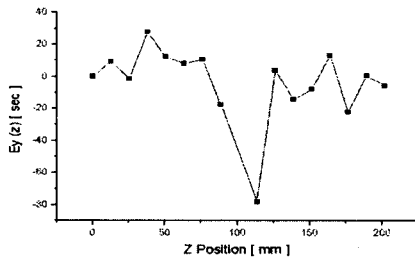


(c) Yaw error

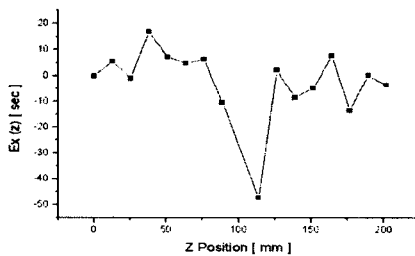
Fig. 16 Position and angular error calculation data in the X axis



(a) Position error



(b) Pitch error



(c) Yaw error

Fig. 17 Position and angular error calculation data in the Z axis

4.3 오차 분석 결과

Fig. 11과 같이 4가지 방향으로 측정 순서와 측정방향으로 볼 막대를 경사로 설치하여 측정하여 오차벡터를 구하고 구한 오차벡터를 사용하여 x, y, z축에서의 위치오차 3개, 각도오차인 Pitch, Yaw 오차를 구하였다. CMM B에서 측정하여 계산된 오차성분 결과를 Fig. 16, 17에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 Ball-bar 설치는 Fig. 11과 같이 대각선 데이터만을 이용하였으므로 Fig. 16의 결과와 같이 데이터의 중심부에서 간격이 좁아지게 되어 즉, 식 (3)의 Z값이 급격하게 줄어들어, 데이터의 신뢰성이 떨어지게 된다. 따라서 각도오차 (Angular error) 측정의 경우에는 Fig. 7(d)과 같이

2개의 Ball-bar를 수평으로 설치하여 보다 신뢰성 있는 데이터를 구할 수 있을 것으로 보인다.

5. 결론

(1) 교정된 Ball-bar Artifact를 이용하여 CMM의 위치오차 및 각도 오차 측정이 가능하며, 직각도 측정을 위해서는 별도의 2차원 Artifact가 필요하다. 2축의 진직도에 의한 직각도 영향 측정을 위해서는 2차원 Artifact (Hole-plate, Fig. 13)의 측정 및 분석 연구가 추가로 요구된다.

(2) Ball-bar Artifact를 사용하여 기존의 레이저 시스템에 비하여 3차원 작업공간 내의 공간오차 측정 및 분석이 가능하며 경제적인 기구이다.

(3) 본 연구에서 사용된 Ball-bar의 공간오차 측정 및 분석방법은 Touch Probe를 이용한 NC 공작기계에도 같은 방법으로 적용가능하다.

(4) 본 연구에서 사용된 대각선 설치 방법은 데이터의 중심부에서 측정값의 신뢰도가 저하되므로 Fig. 7(d)과 같이 Ball-bar의 수평설치 데이터를 이용하는 것이 바람직하다.

참고문헌

- (1) British Standard, 1989, BS 6808 Part 3 : *Coordinate Measuring Machines*.
- (2) E.S.Lee, 1993, *Computer Aided Volumetric Error Calibration of CNC-Machines and Coordinate Measuring Machines by the Artifact Method*, Ph.D thesis, UMIST.
- (3) E.S.Lee and M. Burdekin, 2001, "A Hole Plate Artifact Design for the Volumetric Error Calibration of CMM," *Int. J. Adv. Manuf. Technol. (U.K)*, *Spring-Verlag*, Vol. 17, No. 7, pp. 508~515.
- (4) Zhang, G. 1985, "Error Compensation of Coordinate Measuring Machines," *Annals of the CIRP*, Vol. 34/1.
- (5) Si Tae Won, 2001, "The Effects of the Annealing Heat Treatments on the Mechanical Properties of the Invar Materials," *KSPE*, Vol. 18, No. 1, pp. 129~138.