

(論 文)

상용 3차원 측정기의 전체 측정정밀도 교정 및 실시간 보정시스템

박희재* · 김종후**

(1994년 3월 2일 접수)

Development of Calibration and Real-Time Compensation System for Total Measuring Accuracy in a Commercial CMM

Heujae Pahk and Jonghoo Kim

Key Words : CMM(3차원 측정기), Total Measuring Accuracy(전체 측정정밀도), Probe Error
(프로브오차), Geometric Error(기하학적 오차), Error Calibration(오차교정),
Real Time Compensation(실시간 보정)

Abstract

This paper presents techniques for evaluation and compensation of total measuring errors in a commercial CMM. The probe errors as well as the machine geometric errors are assessed from probing of the mechanical artefacts such as sphere, step, and rings. For the error compensation, the integrated volumetric error equations are considered, including the probe error and the machine geometric error. The error compensation is performed on the absolute scale coordinate system, in order to overcome the redundant degree of freedom in the CMM with multi-axis probe. A interface box and corresponding software driver are developed for data intercepting/correction between the machine controller and machine, thus the volumetric errors can be compensated in real time with minimum interference to the operating software and hardware of a commercial CMM. The developed system applied to a practical CMM installed on the shop floor, and demonstrated its performance.

1. 서 론

3차원 측정기(CMMs: coordinate measuring machines)는 오늘날 많은 산업체현장 및 연구분야에서 광범위하게 사용되고 있는데, 이는 범용성과 측정 및 검사의 효율성을 통해서 품질관리공정 등에 있어서 고효율성과 고정밀도 등을 주기 때문이다. 한편, 오늘날 많은 공작기계는 다기능화, 고정

도화의 추세에 따라, 측정프로브를 공작기계 틀 매가진에 장착하고 있는 경우도 있다. 따라서 이러한 측정기 및 공작기계의 오차의 측정과 보정은 기계의 정확성과 성능을 유지하기 위한 중요한 작업으로 분류되어지며, 따라서 측정기 및 공작기계의 오차측정과 보정에 많은 연구가 진행되고 있다.^(1~3)

전체 측정정밀도(total measuring accuracy: 공작물로부터 측정프로브 탐침까지의 측정경로에서 발생하는 모든 오차를 고려한 정밀도, 즉 측정기가 가지는 모든 오차의 총합)의 관점에서 볼때, 사용자가 직접 경험하는 측정정도는 기계시스템의 기하

*정회원, 서울대학교 기계설계학과

**금성산전(주)

학적, 기구학적 정밀도 측정프로브 정도 등을 포함한 것이며, 이는 실제의 측정 및 작업정도를 결정하게 된다. 따라서 측정프로브의 오차교정과 보정이 보다 높은 정밀도를 위해서 요구되어지는데, 아직까지 측정프로브의 오차를 평가 보정하는 만족할 만한 기술은 없는 형편이며, 치수가 알려진 기준구면볼이 부분적으로 사용되어 왔다.^(4,5) 본 연구에서는 기준구를 이용하여 프로브오차를 평가하고 보정하는 기술⁽⁸⁾을 3차원 측정기의 전체 정밀도의 관점에서 통합하였다.

기계의 기하학적 오차를 측정하기 위해서, 기구학적 링크를 이용한 원호보간시험, 레이저 인터페로미터 등을 이용한 길이 측정들이 사용되어 왔다.^(6,7) 위에서 언급한 전체 측정정밀도의 관점에서 볼때, 측정시스템 전체를 고려하여 정도를 평가하는 하는 기술이 바람직한데, 본 연구에서는 링과 스텝게이지같은 교정된 기계계이지를 사용한 컴퓨터이용오차 보정시스템이 개발되었다. 즉, 기계의 기하학적 오차를 전체 측정정확도에 의해서 평가하는 것으로서, 링게이지 측정에서는 선형위치오차와 직각도오차가 평가되며, 스텝게이지로부터는 선형오차가 평가된다.

오차보정에서는, 프로브오차 맵과 기하학적/기구학적 오차맵이 모두 고려되는 통합오차 모델이 제시된다. 오차측정과 보정은, 다축 프로브를 갖는 측정기에서 잉여의 자유도(redundant degree of freedom)를 극복하기 위해 절대좌표계에서 수행되었다. 한편, 오늘날 많은 측정기 및 공작기계의 CNC화가 구현되고 있으므로, 본 연구에서는 폐쇄성을 가지는 CNC 컨트롤러를 장착한 기계에 대해서 측정/평가한 오차의 결과를 실시간에서 보정하는 기술이 개발되었으며, 이는 인터페이스 박스와 전용 소프트웨어 드라이버를 기계 컨트롤러와 기계 사이에서 데이터 가로채기와 보정을 통해서 구현되었다. 따라서 상용 3차원 측정기의 운용 소프트웨어와 하드웨어에 최소한의 간섭을 주면서 실시간에서 보정하는 것이 가능하였다.

2. 기준구를 이용한 프로브오차 평가

프로브의 오차는 기준구(마스터 볼)의 측정으로 얻어진다. 즉, CNC 측정경로에 의해서 측정이 수행되면, 측정된 데이터는 파일에 입력되게 된다. 측정데이터로부터 프로브의 오차를 교정하는 방법

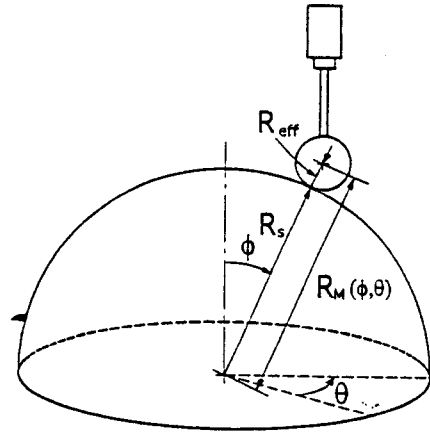


Fig. 1 Probe error calibration

은 다음과 같다.

Fig. 1에서 기준 구의 (ϕ_i, θ_j) 위치에서의 반경을, $R_s(\phi_i, \theta_j)$, 구와 프로브간의 측정된 반경을, $R_m(\phi_i, \theta_j)$, (ϕ_i, θ_j) 방향에서의 프로브오차(안쪽 방향이 양수)를 $Probing(\phi_i, \theta_j)$, R_{eff} 를 프로브팁의 유효 반경이라고 하면, 다음의 관계가 만족된다.

$$R_{eff} \cdot Probing(\phi_i, \theta_j) = R_m(\phi_i, \theta_j) \quad (1)$$

따라서 프로브팁의 유효 반경, R_{eff} 는 식(1)의 좌변의 상수항으로부터, 프로브오차 $Probing$ 은 좌변의 변수항으로부터 구한다.

실제로의 적용을 위해, 1마이크론 이하의 진구도(sphericity)를 갖는 반경 25.006의 기준 볼을 공칭반경 1 mm, 프로브길이 30 mm의 측정기프로브로 측정하였다. 측정해석결과 유효 반경은 0.997 mm로 구해졌고, 최대 프로브오차는 6.6 μ m, 최소 프로브오차는 -9.0 μ m, 제곱평균(root mean square) 프로브오차는 4.0 μ m로 구해졌다. 측정된 프로브오차는 프로브오차 맵을 통해서 교정되며, Fig. 2는 상용의 프로브에 대해서 프로브 운동방향 평면 직교좌표 (ϕ, θ) 상에서 프로브오차가 동심원에서 반경방향으로의 편차로 표시되는 프로브오차 맵을 보이고 있다 즉, 프로브오차 $Probing(\phi_i, \theta_j)$ 은 직교 평면위의 매 (ϕ, θ) 위치에서 반경방향으로의 편차(radial deviation)으로 표시될 수 있다. 이때 작성된 프로브오차 맵은 주어진 프로브 셋업에 대해서 유효하여, 프로브오차의 보정에 사용할 수 있게 된다. 프로브오차가 다른 기하학적 오차와는 달리 위치좌표의 함수가 아니고 프로브방향의 함수이

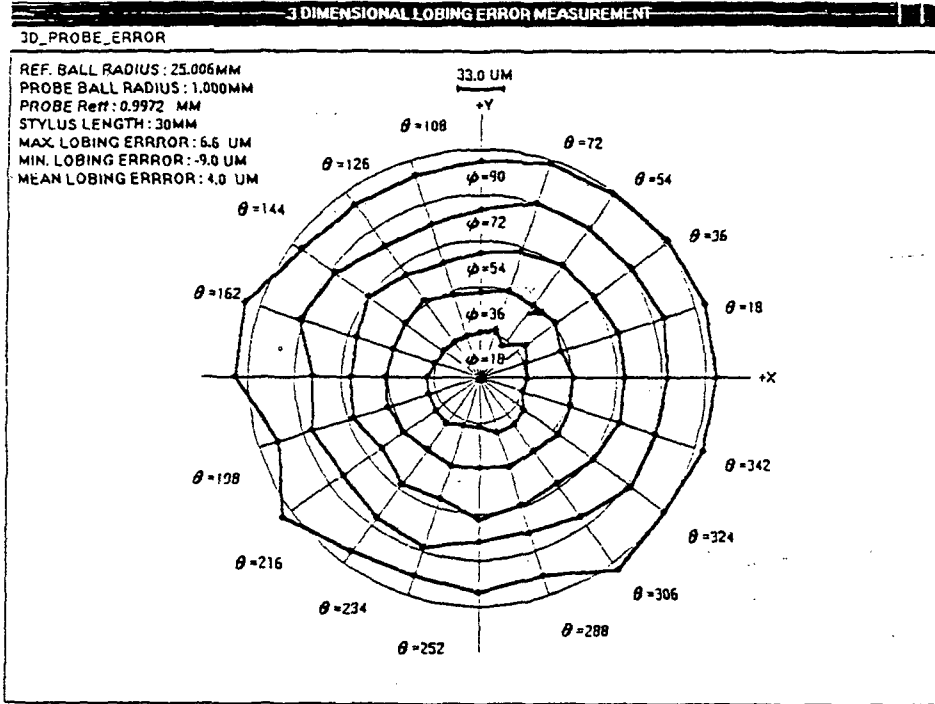


Fig. 2 Probing error map

므로, 따라서 프로브오차 보상은 프로빙방향으로 수행된다. 즉, (M_x, M_y, M_z) 이 기계좌표계에서 프로빙방향을 나타내는 단위벡터라 할때, 프로브오차는 기계좌표계에서 프로빙방향의 반대방향 $(-M_x, -M_y, -M_z)$ 으로 보정되게 된다. 이는 프로브오차만큼의 미소변위를 추가로 이동했기 때문이다. 따라서 보정된 좌표값 (X_c, Y_c, Z_c) 는 보정전 좌표값과 프로빙방향으로의 오차의 차가 된다. 즉,

$$\begin{aligned} [X_c, Y_c, Z_c]^T &= [X, Y, Z]^T - \text{Probing}(\phi, \theta) \\ & \quad [M_x, M_y, M_z]^T \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, (X, Y, Z) 은 기계좌표에서의 보정전 좌표값이고, (ϕ, θ) 각은 프로빙방향으로부터 결정된다.

3. 교정된 게이지를 이용한 기하학적 오차평가

기계게이지(mechanical artefacts)는 보통 성능 테스트의 효율화를 위해 사용되어져 왔다. 그러나 기계적 게이지의 정밀가공 한계로 인한 기하학적 형상의 부정확성은 정밀 오차측정에의 응용을 제한

해 왔다. 링게이지에 의해 스케일오차와 직각도 오차가 교정될 수 있다. 스텝게이지는 선형축의 이송 성능 테스트를 위해 사용되어 왔으며, 스텝게이지가 정확하게 교정되고 보정되어지면 높은 정밀도를 구현할 수 있다.

기계게이지를 사용하여 측정기 및 공작기계의 오차 평가를 수행할 때의 장점은, 공작물로부터 측정 프로브까지의 전체 측정기 메카니즘이 고려되는, 전체 측정정밀도(total measuring accuracy)에 의해 평가될 수 있다는 점이다.

3.1 링게이지 측정

평면에 놓인 내측반경이 R_r 인 링게이지의 안쪽을 CNC 측정경로 계획을 사용하여 원주를 따라서 측정하면, 다음과 같은 몇개의 기하학적 오차성분을 구할 수 있게 된다. $R_m(\theta)$ 를 θ 위치에서 중심과 링의 원주사이의 공칭거리라고 할 때 링반경(R_r)과 측정된 거리($R_m(\theta)$) 사이의 관계는 다음처럼 구성될 수 있다.

$$\begin{aligned} R_r - R_{eff} \\ = R_m(\theta) - \text{Probing error}(\theta) - \Delta R \cdot \theta \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $\Delta R(\theta)$ 는 기계학적 오차들로 인한 반경오차이다. Probing error θ 는 프로브오차 맵으로서 또는 동일한 평면 위에 위치한 작은 링의 측정으로부터 구해진다. A_1, A_2 를 X, Y 방향에서의 선형 위치오차라 하고, C 를 X, Y 축 사이의 직각도 오차라 할때, X, Y 방향으로의 오차 성분 $\Delta X, \Delta Y$ 는 $\Delta X = A_1 X, \Delta Y = A_2 Y - CX$ 가 되며, $(\Delta X, \Delta Y)$ 오차성분으로 인한 반경오차 ΔR 은 아래와 같이 정의된다.

$$\Delta R = (X\Delta X - Y\Delta Y) / R$$

$$= (A_1 X^2 + A_2 Y^2 - CXY) / R \quad (4)$$

여기서, (X, Y) 는 링 중심을 기준으로, 링 원주를 따르는 공칭좌표이므로, 식(4)는 삼각함수로 변환될 수 있다. 즉, $\cos\theta = (X/R), \sin\theta = (Y/R)$ 의 관계와 그리고 식(3)로부터 원형오차 $\Delta R(\theta)$ 를 구하면

$$\Delta R(\theta) = R(A_1 \cos^2\theta - A_2 \sin^2\theta - C \cos\theta \sin\theta)$$

$$= R(A_1 \cos^2\theta - A_2 \sin^2\theta - C \cos\theta \sin\theta) \quad (5)$$

따라서 선형 위치오차 A_1, A_2 와 직각도오차 C 는 최소자승법을 사용해서, 식(5)으로부터 결정될 수

있다.

실제 측정수행을 위해, 진원도가 1마이크론 이내 인 100 mm 반경의 링이 사용되었다. 링계이지 측정결과가 Fig. 3에 있으며, 그림에서 굵은 실선은 계산된 기하학적 오차를 나타낸다. X, Y 방향을 따르는 선형 위치오차들은 각각 $-5.5 \mu\text{m}/100 \text{ mm}, 10.6 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$ 이고, 직각도오차는 $-6.8 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$ 로 구해졌다. 계산된 기하학적 오차들은 국부적으로 정의되어지며, 링계이지의 측정음 중첩(overlap)시키거나 또는 보다 큰 링계이지를 측정함을 통해서 보다 넓은 작업공간으로 확장될 수 있다.

3.2 스텝게이지 측정

선형 변위정밀도, 즉 길이 측정오차는 스텝게이지 측정으로 계산될 수 있다. L_i 를 기준 블록으로부터 i 번째 블록의 교정된 길이라 하고, M_i 를 i 번째 블록과 기준 블록사이의 측정기의 측정거리라 하면 선형 변위정밀도 X_i 는 둘 사이의 차이로 계산되어질 수 있다. 즉,

$$X_i = L_i - M_i \quad (6)$$

실제 측정을 위해 600 mm, 1500 mm의 교정된 스

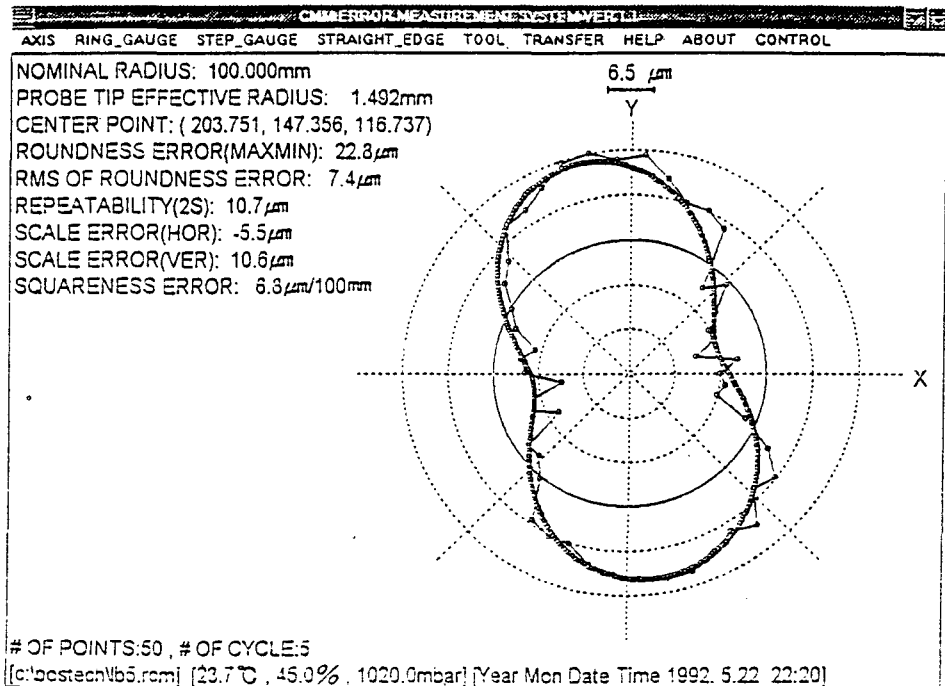


Fig. 3 Error calibration by a ring gauge measurement

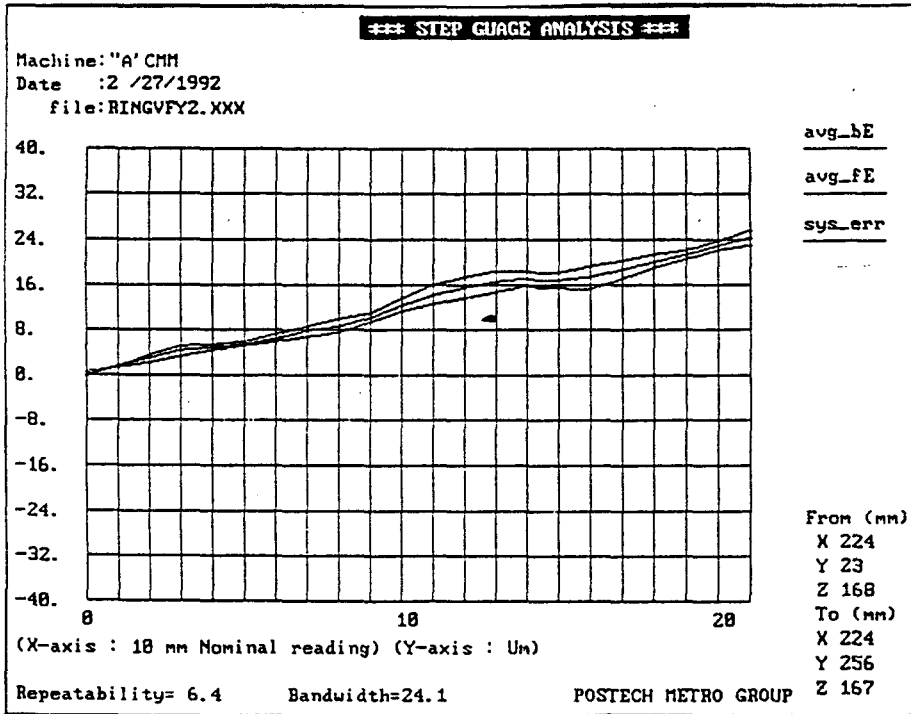


Fig. 4 Error calibration by a step gauge measurement

탭게이지가, 선형 변위정확도를 위해 사용되었다. Fig. 4는 측정기의 Y축을 따라 수행한 스텝게이지 측정결과를 보인다. 링게이지의 측정부분과 일치하는 지점을 따라 200 mm 진행시켰을때 22.9 μm 의 선형 변위오차를 나타냈다. 링게이지 측정결과로부터 21.1 $\mu\text{m}/200\text{ mm}$, 스텝게이지 측정결과로부터는 22.9 $\mu\text{m}/200\text{ mm}$ 로서 매우 비슷한 값을 얻었다. 이로써, 개발된 링게이지 측정시스템은, 유효한 것으로 보이며, 약간의 차이는 측정시간 동안의 온도편차 등과 관련한 것으로 보인다. 스텝게이지 측정시스템의 장점은 기계작업영역에서의 임의의 방향에 대한 선형 변위정확도를 쉽게 알 수 있는데 있다. 피치나 요와 같은 각도오차도 서로 다른 간격을 갖는 두개의 평행한 스텝게이지의 측정데이터로부터 계산할 수 있다.

3.3 게이지 측정에서의 컴퓨터응용

제한된 게이지 측정시스템에는 측정경로계획, CNC 코드생성, 측정기 콘트롤러로의 다운로드, 측정작업, 오차평가 및 출력 등 고도의 컴퓨터원용 특성이 갖추어졌다.

최근의 CNC형 측정기는 목표지점이 CNC 명령

어로 프로그램될 수 있는, 벡터구동성능을 갖추고 있다. 적절한 경로가 링게이지와 스텝게이지에 대하여 생성되면, 각 경로는 CNC 명령어로 변환되고, 측정기 콘트롤러로 다운로드 된다. 이어서 측정작업이 수행되고 측정된 좌표데이터를 받아 기하학적인 오차요소들을 평가한다.

4. 오차보정

4.1 통합 입체오차 방정식

고려된 기계의 작업영역에 대하여 각 방향의 기하학적 오차가 측정되면, 강체운동을 고려한 기구학적 연계⁽¹⁻³⁾를 이용해 입체오차 방정식을 구성할 수 있다. 본 논문에서는 위에서 언급한 프로브오차 맵과 기하학적/기구학적인 오차를 모두 고려하는 통합 입체오차 모델을 제시한다. 작업현장에서 사용되고 있는 이동 수평팔형(moving horizontal arm type) 기계를 대상으로 오차보정을 수행하였으며, Fig. 5는 이동 수평팔형 기계에서 좌표계 정의를 보인다. [X, Y, Z]를 동칭 좌표값이라 할 때, 보정된 좌표값 [X_c, Y_c, Z_c]은 프로브오차 맵과 변환행렬 등을 이용하여 얻어진다.

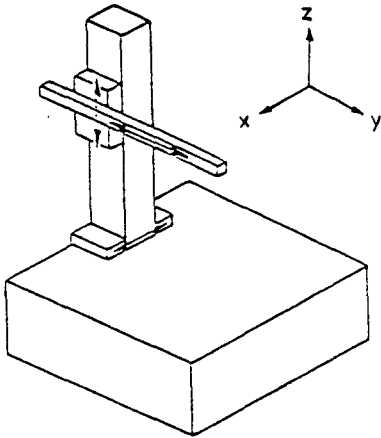


Fig. 5 Coordinate axis configuration in a moving horizontal arm CMM

$$[X_c, Y_c, Z_c] = T(X) T(Z) T(Y) [X_p, Y_p, Z_p, 1]^T \\ = Probing(\phi, \theta) [M_x, M_y, M_z, 0]^T \quad (7)$$

여기서,

$$T(X) = \begin{pmatrix} 1 & -E_x(x) & E_y(x) & X - \delta_x(x) \\ E_x(x) & 1 & -E_x(x) & \delta_y(x) - \alpha X \\ -E_y(x) & E_x(x) & 1 & \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T(Z) = \begin{pmatrix} 1 & -E_z(z) & E_y(z) & \delta_x(z) - \beta_1 Z \\ E_z(z) & 1 & -E_x(z) & \delta_y(z) - \beta_2 Z \\ -E_y(z) & E_x(z) & 1 & z + \delta_z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T(Y) = \begin{pmatrix} 1 & -E_z(y) & E_y(y) & \delta_x(y) \\ E_z(y) & 1 & -E_x(y) & y + \delta_y(y) \\ -E_y(y) & E_y(y) & 1 & \delta_z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

는 4×4 변환행렬이고 [X_p, Y_p, Z_p]는 프로브의 움직임 벡터이다. 또한 Probing(φ, θ)는 프로브오차맵, [M_x, M_y, M_z]는 프로브측정 방향의 단위벡터를 의미한다. δX_i(X_j) (i, j=1, 2, 3)는 X_i축을 따라 이동할 때의 X_j방향의 수평이동 오차이고 EX_i(X_j)는 X_i축을 따라 이동할 때의 X_j방향의 회전오차이다. α, β₁, β₂는 각각 XY, YZ, XZ축의 직각도 오차이다. 그러므로 임체오차 방정식은 프로브오차를 고려한 기계에 대하여 계산되고, 이때의 임체오차 ΔX, ΔY, ΔZ는 다음과 같다.

$$\Delta X = X_c - (X + X_p)$$

$$= \delta_x(x) + \delta_x(y) + \delta_x(z) - y(E_x(z) + E_x(x)) \\ + z(E_y(x) - \beta_1) - Y_p(E_x(x) + E_x(y) \\ + E_x(z)) + Z_p(E_y(x) + E_y(y) + E_y(z)) \\ - M_x \times Probing(\phi, \theta) \quad (8)$$

$$\Delta Y = Y_c - (Y + Y_p) \\ = \delta_y(x) + \delta_y(y) + \delta_y(z) - \alpha x - z(E_x(x) - \beta_2) \\ - X_p(E_x(x) + E_x(y) + E_x(z)) - Z_p E_x(x) \\ - E_x(y) + E_x(z) - M_y \\ \times Probing(\phi, \theta) \quad (9)$$

$$\Delta Z = Z_c - (Z + Z_p) \\ = \delta_z(x) + \delta_z(y) + \delta_z(z) + y(E_x(x) + E_x(z)) \\ - X_p(E_y(x) + E_y(y) + E_y(z)) \\ + Y_p(E_x(x) + E_x(y) + E_x(z)) - M_z \\ \times Probing(\phi, \theta) \quad (10)$$

4.2 절대 스케일좌표계에서의 오차보정

대부분의 측정기는 복잡한 형상측정을 위해 다축 프로브를 갖추고 있어서, 여분의 자유도를 갖는다. 측정기는 대개 적어도 두개의 작업좌표계를 갖고 있는데, 스케일의 좌표입력을 그대로 표시하는 절대좌표계 [X_a, Y_a, Z_a]와 사용자가 정의할 수 있는 상대좌표계 [X_r, Y_r, Z_r]가 그것이다. 측정기 콘트롤러는 절대좌표와 프로브각도 [A, B]를 입력받아 해당하는 상대좌표 [X_r, Y_r, Z_r]를 계산한다. 상대좌표계 [X_r, Y_r, Z_r]는 단순히 프로브 움직임의 변화만으로도 변화될 수 있기 때문에 오차보정은 일반적으로 절대크기 좌표계에서 수행된다. 본 논문에서는 여분의 자유도문제를 해결하기 위해서 오차교정 및 보정에 절대 스케일좌표계를 사용하였다. 그러므로 임체오차방정식을 적용하기에 앞서서, 두 좌표계사이의 관계를 알아야 한다. Fig. 6은 이 두 좌표계와 측정기, 콘트롤러, 데이터출력 사이의 관계를 보이고 있으며, 이축프로브의 경우에 두 좌표계사이의 관계는 다음과 같다.

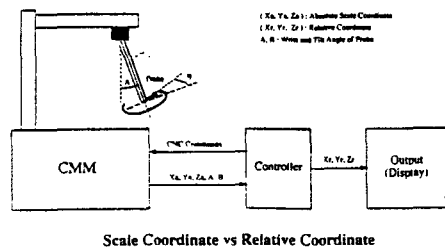


Fig. 6 Scale coordinate VS relative coordinate

$$\begin{aligned}
 & [X_r, Y_r, Z_r] \\
 & = [X_a + X_p + T_x, Y_a + Y_p + T_y, Z_a + Z_p + T_z] \\
 & = [X_a + L\sin A \cos B + T_x, \\
 & \quad Y_a + L\sin A \sin B + T_y, Z_a - L\cos A + T_z]
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

여기서, T_x, T_y, T_z 는 두 좌표계 사이의 옴셋이고 X_p, Y_p, Z_p 는 프로브옴셋, 그리고 L 은 탐침의 길이이다. 따라서 4개의 매개변수 (T_x, T_y, T_z, L)를 알아내기 위해서 4점의 데이터를 초기에 프로빙해야 한다. $M1(X1, Y1, Z1)$ 과 $M2(X2, Y2, Z2)$ 를 오차보정을 고려하고 있는 부분작업영역의 대각선의 꼭지점의 절대좌표계라고 할 때, 입체오차 방정식에서의

공칭좌표 (X, Y, Z)는 $X = X_a - X1, Y = Y_a - Y1, Z = Z_a - Z1$ 이 된다. 입체오차 성분 ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)는 식(8)~(10)에서 계산되고 절대좌표로 보정될 수 있다. 보정된 절대좌표 (X'_a, Y'_a, Z'_a)는

$$[X'_a, Y'_a, Z'_a] = [X_a, Y_a, Z_a] + [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z]
 \tag{12}$$

이다. 보정된 좌표는 이제 보정된 상대좌표를 얻기 위해 변환된다.

4.3 오차보정 모듈의 구현

대부분의 상용 측정기는 자체적인 전용 하드웨어 및 소프트웨어를 운용 시스템으로 가지고 있으며 일반사용자가 접근할 수 없는 블랙박스(black box)로 남아있다. 따라서 실시간 오차보정을 수행

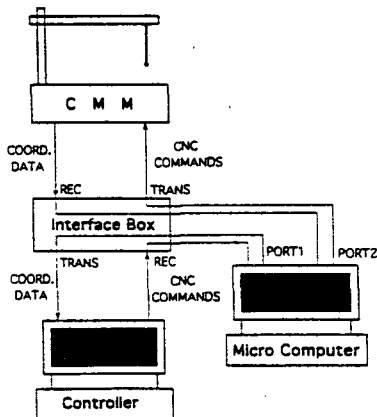


Fig. 7 Real time compensation system using an interface box

하기 위해 인터페이스박스가 설치되어 측정기와 컨트롤러와의 사이에서 데이터를 가로채고 수정하도록 구현되었다. Fig. 7은 인터페이스박스를 중심으로 한 블록선도를 보이고 있다. 데이터통신은 보통 두개의 포트(port), 즉 측정기로 가는 CNC 명령 이송 포트와 컨트롤러로 가는 기계좌표이송 포트를 통해 이루어진다.

컨트롤러와 측정기간의 데이터흐름을 가로채기 위해 PC로 두 포트의 버스(bus)선을 접속되었다. 기계좌표이송 포트가 직렬접속되어 좌표데이터는 인터페이스 박스를 통해 PC로 전송된다. 전송된 좌표데이터는 프로브위치 각도 (A, B)와 절대스케일좌표 (X_a, Y_a, Z_a)로 재조합된다. 오차보정 서브루틴을 불러 통합 이체오차를 계산한다. 보정된 절대 스케일좌표 (X'_a, Y'_a, Z'_a)는 다시 인터페이스 박스를 통해 컨트롤러 포트로 보내진다. 컨트롤러는 데이터가 가로채어져 보정된 것을 인식하지 못하고 보정된 데이터를 받는다. 결국 컨트롤러는 수정된

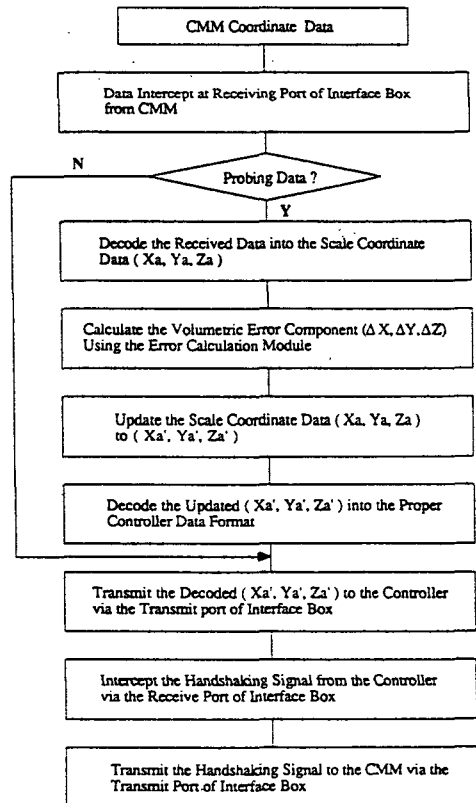
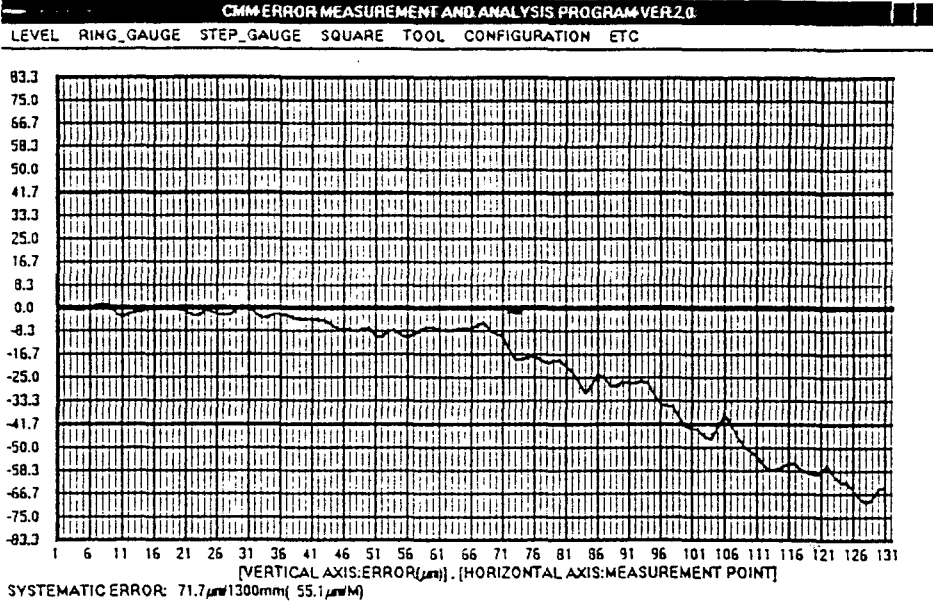
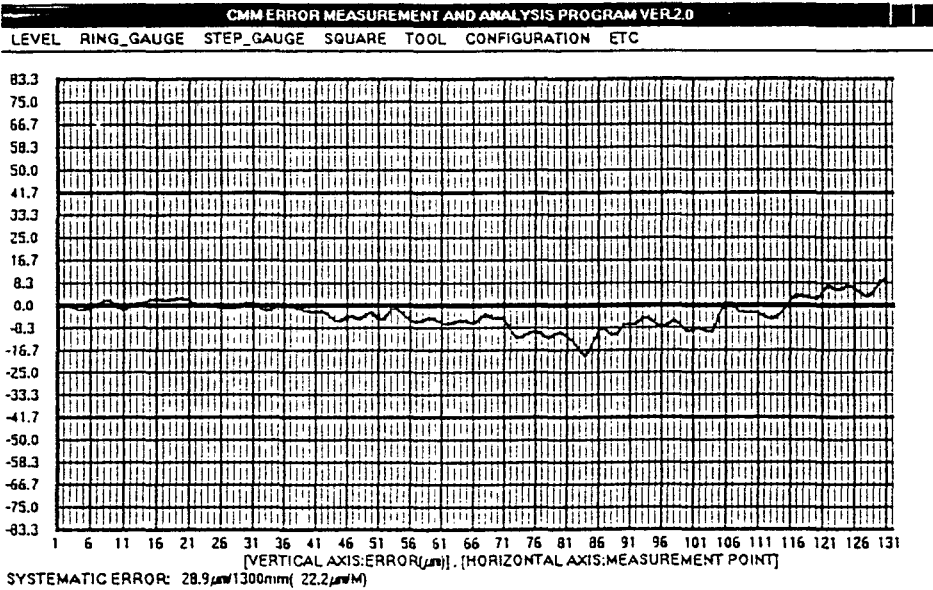


Fig. 8 Flow chart for real time error compensation module



DIRECTION: (-0.805, 0.594, -0.000)
 CENTER OF FIRST BLOCK(2743.038, -448.720, -140.203). CENTER OF LAST BLOCK(1534.455, 443.178, -140.400)
 [d1t1136.stp] [20.0℃, 35.0%, 1020.0mbar] [Year Mon Date Time 1993.12.17 4:50]

Fig. 9 Diagonal measurement before error compensation



DIRECTION: (-0.805, 0.594, -0.000)
 CENTER OF FIRST BLOCK(2743.038, -448.720, -140.203). CENTER OF LAST BLOCK(1534.455, 443.178, -140.400)
 [d1t11217.vol] [20.0℃, 35.0%, 1020.0mbar] [Year Mon Date Time 1993.12.17 4:50]

Fig. 10 Diagonal measurement after error compensation

좌표값을 보여준다.

측정기로 가는 CNC 명령 및 콘트롤러응답 전송 포트 역시 인터페이스 박스를 통해 PC에 직렬접속되어 아무런 수정없이 인터페이스 박스를 통해 측정기 포트에 지연전송된다. 실시간 오차보정의 이점은 상용측정기의 운용체계에 최소 간섭내지는 전혀 간섭을 주지않으면서 실시간에 기하학적 오차뿐만 아니라 프로브오차까지 보정할 수 있다는 것이다. 제작된 인터페이스 박스에는 실시간 오차보정을 선택적으로 할 수 있도록 온/오프스위치(on/off switch)가 장착되었다. 실시간 오차보정이 오프(off)되었을때는 데이터통신은 간섭없이 인터페이스 박스를 거쳐 직접 이송된다. Fig. 8은 실시간 오차 보정모듈의 흐름도를 보이고 있다.

개발된 오차측정 및 보정시스템이 현장에서 사용하고있는 상용 3차원 측정기(작업영역 4500 mm×1500 mm×1200 mm)에 적용되었다. 스텝게이지를 이용하여 위치오차와 각도오차를 측정하고, 링게이지로부터는 직각도 오차를 교정하여 통합 입체오차 방정식을 고려하였다. 계산된 입체오차는 개발된 실시간 오차보정 알고리즘으로 보정되었다. 개발된 시스템의 효율을 검사하기 위해 1500 mm의 스텝게이지를 교정 전후에 측정해 보았다. Figs. 9, 10은 스텝게이지를 한 방향으로 진행하며 측정할 결과이다. 보정전에 대각선 방향에 대해서 71.7 $\mu\text{m}/1500\text{ mm}$ 의 오차가 보정후에는 28.9 $\mu\text{m}/1500\text{ mm}$ 로 감소되었다. 보정후에도 잔류오차가 관찰되는 것은 다음과 같은 원인으로 판단된다. 즉, 실제 위치오차와 각도오차 그리고 직각도오차를 측정하는데 소요되는 시간은 약 3~4시간 정도이고, 3차원측정기는 온도조절이 되지 않는 생산현장에 있었으므로, 측정기간 동안의 온도변화는 오차의 가장 큰 원인으로 사료된다. 또한 시간적 공간적인 제약에 따라서 측정이 어려운 몇개의 각도오차 성분들에 대해서는 교정이 수행되지 않았다. 그럼에도 불구하고 측정기의 정밀도는 작업영역내에서의 스텝게이지의 대각선 방향 측정에 있어서 두배이상 향상되었음을 알 수 있었으며, 이는 위에서 언급한 가능한 온도 조절, 큰 영역에서의 교정, 각도오차의 교정등이 수반되면 더욱 커다란 정밀도 향상을 기대할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 상용 3차원 측정기의 기하학적 형

상과 측정프로브에 의해 생기는 오차, 즉 전체 측정정밀도의 평가및 실시간 보정기술을 제시하였다. 결론은 다음과 같다.

(1) 프로브오차 측정과 보정기술을 실제로 구현하였으며, 프로브측정 방향(ϕ, θ) 평면에서의 프로브오차 맵이 측정프로브의 실제적인 오차측정 및 보정에 유용함을 알았다.

(2) 전체 측정정밀도라는 측면에서 링게이지나 스텝게이지같은 교정된 기계 게이지류가 기하학적 오차교정에 유효함을 알았다.

(3) 프로브오차 및 기계의 기하학적 오차를 고려한 통합 입체오차 방정식을 유도해냈고, 이를 보정에 사용하였다.

(4) 다축프로브를 가진 측정기/공작기계에 대하여 여유자유도 문제를 해결하는 방법으로서, 절대스케일좌표계를 오차보정에 사용하였으며, 매우 유용한 방법임이 입증되었다.

(5) 전용설계된 인터페이스박스와 소프트웨어모듈로 실시간 오차 보정시스템을 개발하여 통합 입체 오차보정을 수행하였다. 개발된 시스템으로 생산현장에 설치된 상용측정기에 대하여 적용한 결과, 오차측정 및 보정을 성공적으로 수행할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Zhang, G., Veale, R., Chorlton, T. and Hocken, R., 1985, "Error Compensation of Coordinate Measuring Machine," *Annals of CIBP*, Vol. 34/1, pp. 445~448.
- (2) Busch, K. Kunzmann, F. and Waldele, F., 1985, "Calibration of Coordinate Measuring Machines," *Precision Engineering*, Vol. 7(3), pp. 139~144.
- (3) Hocken, R., 1977, "Three Dimensional Metrology," *Annals of CIRP*, Vol. 26/1, pp. 403~408.
- (4) Peggs, G., 1990, "Traceability for Coordinate Measurement Technology," *Proc. of the 28th International MATADOR Conference*, UMIST, UK, pp. 463~468.
- (5) Kunzmann, H., Trepel, E. and Waldele, F., 1993, "Concept for the Traceability of Measurements with Coordinate Measuring Machines."

- International Progress in Precision Engineering*, pp. 40~52.
- (6) Knapp, W., 1983, "Test of the Three Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to the Machine Errors," *Annals of CIRP*, Vol. 32/1. pp. 459~464.
- (7) Kakino, Y., Ihara, Y., and Nakatsu, Y., 1987, "The Measurement of Motion Errors of NC Machine Tools and Diagnosis of their Origins by Using Telescoping Magnetic Ball Bar Method," *Annals of CIRP*, Vol. 36/1. pp. 377~380.
- (8) 박희재, 이교일, 1994, "접촉식 프로브의 오차 교정 및 보정기술," 대한기계학회논문집, 제18권, 제8호, pp. 2081~2087.