CNC 3차원 측정기의 실시간 오차 보정 기술

박 희 재*

1. 서 론

삼차원 측정기(CMMs: Coordinate Measuring Machines)는 오늘날 많은 산업체현장 및 연구분야에서 광범위하게 사용되고 있는데, 이는 범용성과 측정 및 검사의 효율성을 통해서 품질관리공정등에 있어서 고 효율성과 고 정밀도등을 주기 때문이다. 한편, 오늘날 많은 공작기계는 다기능화, 고정도화의 추세에 따라, 측정 프로브를 공작기계 틀 내가진에 장착하고 있는 경우도 있다. 따라서 이러한 측정기 및 공작기계의 오차의 측정과 보정은 기계의 정확성과 성능을 유지 하기 위한 중요한 작업으로 분류되어지며, 따라서 측정기 및 공작기계의 오차측정과 보정에 많은 연구가 진행되고 있다.([1],[2],[3])

전체 측정 정밀도(Total Measuring Accuracy: 공작물로부터 측정프로브 탐침까지의 측정 경로에서 발생하는 모든 오차를 고려한 정밀도, 즉, 측정기가 가지는 모든 오차의 총합)의 관점에서 볼때, 사용자가 직접 경험하는 측정정도는 기계시스템의 기하학적, 기구학적 정밀도와, 측정 프로브정도, 그리고, 전자장치의 시스템 정도등을 포함한 것이며, 이는 실제의 측정 및 작업 정도를 결정하게 된다. 따라서 측정 프로브의 오차교정과 보정이 보다 높은 정밀도를 위해서 요구되어지는데, 아직까지 측정 프로브의 오차를 평가/보정하는 만족할 만한 기술은 없는 형편이며, 칫수가 알려진 기준 구면볼이 부분적으로 사용되어 왔다.([4],[5]) 본 글에서는, 기준볼의 반구면 위에 등간격으로 프로브하는 방법을 사용하여, 프로브 좌표계의 정의, 기준반구의 자동 측정, 오차평가 및 오차맵의 작성, 오차보정등에 대하여 언급한다. 한편, 오늘날 많은 측정기 및 공작기계의 CNC화가 구현되고 있으므로, 본 연구에서는 폐쇄성을 가지는 CNC 콘트롤러를 장착한 기계에 대해서 측정/평가한 오차의 결과를 실시간에서 보정하는 기술에 대해서 설명한다.

기계의 기하학적 오차를 측정하기 위해서, 기구학적 링크를 이용한 원호보간 시험, 레이저 인터페로미터등을 이용한 길이 측정등이 사용되어 왔다.([6],[7])

위에서 언급한 전체 측정 정밀도의 관점에서 볼때, 측정시스템 전체를 고려하여 정도를 평가하는 하는 기술이 바람직한데, 본 논문에서는 링과 스텝게이지같은 교정된 기계게이지를 사용한 컴퓨터 이용 오차보정 시스템이 보여진다. 즉 기계의 기하학적 오차를 전체 측정 정확도에 의해서 평가하는 것으로서, 링게이지 측정에서는 선형위치오차와 직각도오차가 평가되며, 스텝게이지로부터는 선형오차가 평가된다.

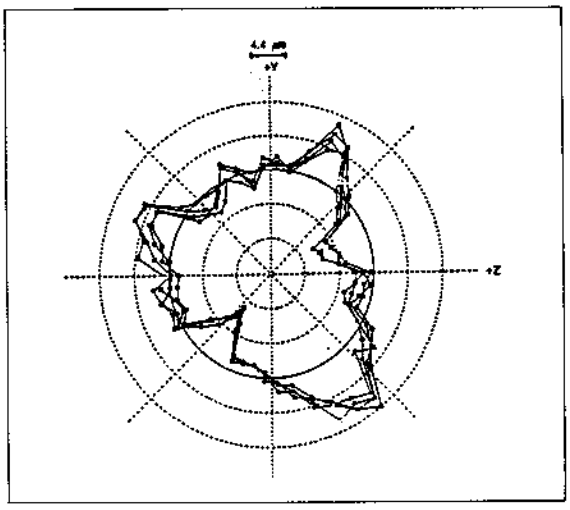
오차보정에서는, 프로브오차맵과 기하학적/기구학적 오차맵이 모두 고려되는 통합 오차 모델이 제시된다. 오차측정과 보정은, 다축 프로브를 갖는 측정기에서 잉여의 자유도(Redundant degree of freedom)를 극복하기위해 절대좌표계에서 수행된다. 인터페이스 박스와 소프트웨어 드라이버는 기계 콘트롤러와 기계사이에 데이터 가로채기와 보정을 위해 개발되었다. 이와같이 오차들이 상용 CMM의 운용 소프트웨어와 하드웨어에 최소한의 간섭을 주면서 실시간에서 보정된다.

* 서울대학교 기계설계학과 조교수

2. 프로브 오차의 교정과 보정

접촉 트리거 방식의 측정 프로브는 크게 세부분으로 구성된다. 바늘 팁(stylus tip), 프로브 바늘(stylus), 그리고 프로브 몸체부분이다. 프로브가 접촉하는 측정력은, 매우 작을 것으로 기대되지만, 프로브 몸체의 굽힘 효과로인해 프로브 바늘의 탄성변형을 야기한다. 따라서, 프로브바늘의 탄성변형을 조절하기 위해서 바늘 팁의 공칭반경보다는 유효반경이 사용된다.

대부분의 상용의 접촉 프로브들은 트리거링 회로를 가지는데, 트리거링을 야기하는 미소변위는 프로빙(probing)방향에 의존해서 약간씩 변하게 된다. 이때, 방향에 의존하는 오차는 프로브오차 (Probe Lobing Error, Pretravel variation)라고 불린다. 〈그림 1〉은 측정기 프로브의 전형적인 프로브오차패턴을 나타낸다.



〈그림 1〉 프로브 오차패턴

2.1 프로브 좌표계

프로브오차를 효과적으로 평가하고 정밀하게 나타내기위해, 프로브 좌표계(x′,y′,z′)를 고려한다. 〈그림 2〉는 상용의 2축 프로브의 개략을 보인다. B, A는 각각 롤(roll), 틸트(tilt)각이다. z′축은 프로브 바늘의 방향이고 x′축은 z′축의 수직평면에 있고, y′축은 x′축에 직교한다. 두 좌표계가 공통 원점을 가질때, 프로브 좌표계(x′,y′,z′)와 기계좌표계(x,y,z)사이에는 다음과같은 관계가 성립한다. 즉, $e_{x'}$,$e_{y'}$,$e_{z'}$를 각각 x′,y′,z′ 방향의 단위벡터라고 하면,

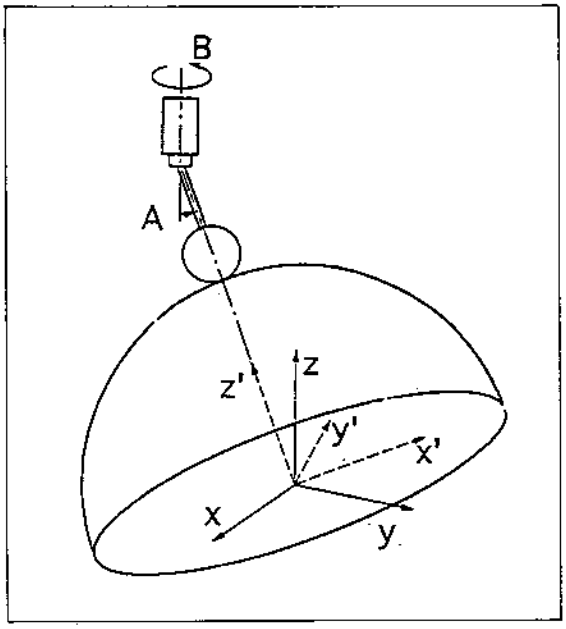
$$
\begin{aligned}
e_{z'} &= (-\sin A\cos B,\ -\sin A\sin B,\ \cos A)\\
e_{y'} &= e_{z'} \times e_z / |e_{z'} \times e_z| = (-\sin B,\ \cos B,\ 0)\\
e_{x'} &= e_{y'} \times e_{z'} / |e_{y'} \times e_{z'}|\\
&= (\cos A\cos B,\ \cos A\sin B,\ \sin A) \qquad (1)
\end{aligned}
$$

이처럼 두 좌표계사이의 관계는 3x3 변환행렬 Tp로 나타내어진다.

$$[x',y',z']^T = Tp\ [x,y,z]^T \qquad (2)$$

$$Tp = \begin{pmatrix} \cos A\cos B & \cos A\sin B & \sin A \\ -\sin B & \cos B & 0 \\ -\sin A\cos B & -\sin A\sin B & \cos A \end{pmatrix}$$

여기서, B,A는 각각 프로브의 롤(roll), 틸트(tilt)각이며, 관계식 (2)는 기준구의 측정, 프로브오차 교정, 그리고 보정에 유용하게 사용한다.



〈그림 2〉 프로브 좌표계

2.2 기준구의 측정경로

프로브오차는, 크기가 상대적으로 작은 기준구의 반구부를 등간격으로 측정함으로써 평가된다. 프로브오차는 프로빙(probing) 방향을 따라서 평가되기때문에 실제 프로빙 방향은 공칭 프로빙 방향으로부터 작은 공차안에 있도록 한다. 오늘날의 많은 측정기는 CNC (Computer Numerical Control) 기능을 내부에 갖추고 있으므로, 수동 측정경로보다는 자동 CNC 측정경로를 사용하는 것이 측정의 정밀도를 기할수 있다. CNC 기능에 대한 상세한 설명은 뒤에서 언급하기로 한다. 측정경로를 생성하기에 앞서, 적어도 4점이 구 위에 수동작업으로 측정하며, 이는 자동 CNC 측정경로 생성을 위한 구의 반경 (R) 과 그 중심좌표 (a,b,c)를 구하려는 것이다. 한번 중심좌표 (a,b,c)와 반경R이 결정되면, 프로브 목표점들이 구 위에서 구해진다.

프로브오차를 효율적으로 정의하기위해서 (R,ϕ,θ) 좌표계를 고려하며, 이때 R은 구의 반경, ϕ는 Z'축으로부터의 각, 그리고 θ는 X'축으로부터의 각이다. (ϕ_i, θ_j)가 (i,j)번째의 프로빙 방향이면, 프로브 좌표계에서 목표점의 좌표값 (Xt',Yt',Zt')는

$$(Xt',Yt',Zt') = (R\sin\phi_i\cos\theta_j,\ R\sin\phi_i\sin\theta_j,\ R\cos\phi_i)$$

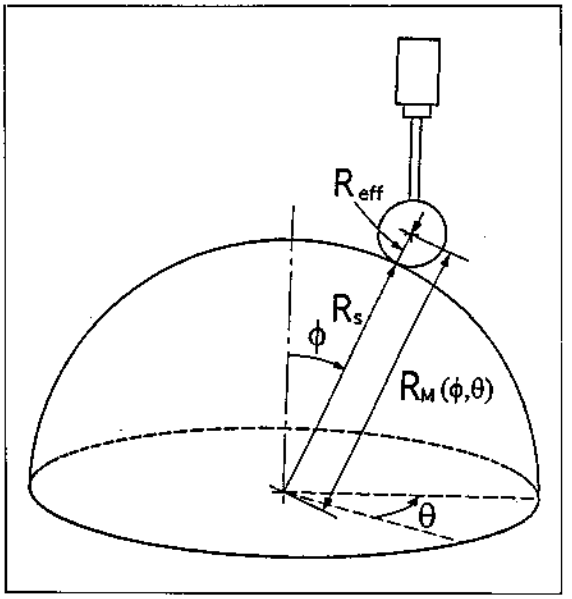
여기서 기계좌표계의 값 (Xt, Yt, Zt)로 변환하면,

$$[Xt,Yt,Zt]^T = Tp^{-1}[Xt',Yt',Zt']^T + [a,b,c]^T \qquad (3)$$

이때 Tp는 식(1)의 변환행렬이고, $[a,b,c]^T$는 초기 수동측정시의 중심좌표값(기계좌표계)이다. 계산된 [Xt,Yt,Zt] 값들로부터, 대응되는 CNC코드가 프로그램되고, 측정기에 심어져서, 구 측정을 수행한다.

2.3 프로브오차 교정

프로브의 오차는 기준구(마스터 볼)의 측정으로 얻어진다. 즉, CNC측정경로에 의해서 측정이 수행되면, 측정된 데이터는 파일에 입력되게 된다. 측정데이터로부터 프로브의 오차를 교정하는 방법은 다음과 같다.



〈그림 3〉 프로브 오차

〈그림 3〉에서 기준 구의 (ϕ_i,θ_j)위치에서의 반경을, Rs(ϕ_i,θ_j), 구와 프로브간의 측정된 반경을, Rm(ϕ_i,θ_j), (ϕ_i,θ_j) 방향에서의 프로브오차(안쪽방향이 양수)를 Probing(ϕ_i,θ_j), Reff를 프로브 팁의 유효반경이라고 하면, 다음의 관계가 만족된다.

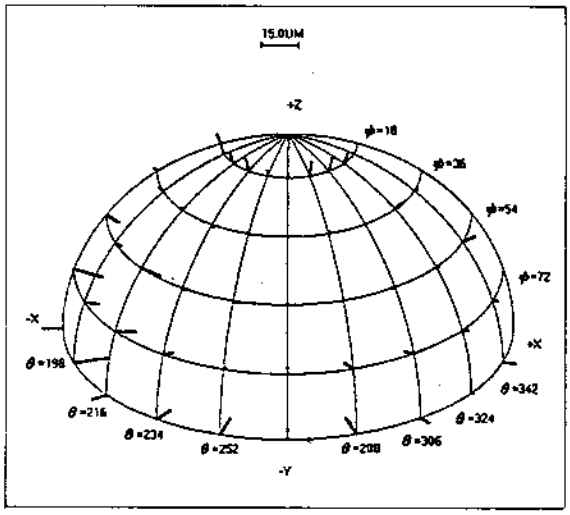
$$\text{Reff} - \text{Probing}(\phi_i,\theta_j) = \text{Rm}(\phi_i,\theta_j) - \text{Rs}(\phi_i,\theta_j) \qquad (4)$$

따라서 프로브팁의 유효반경, Reff는 (4)식의 좌변의 상수항으로부터, 프로브오차 Probing은 좌변의 변수항으로부터 구한다.

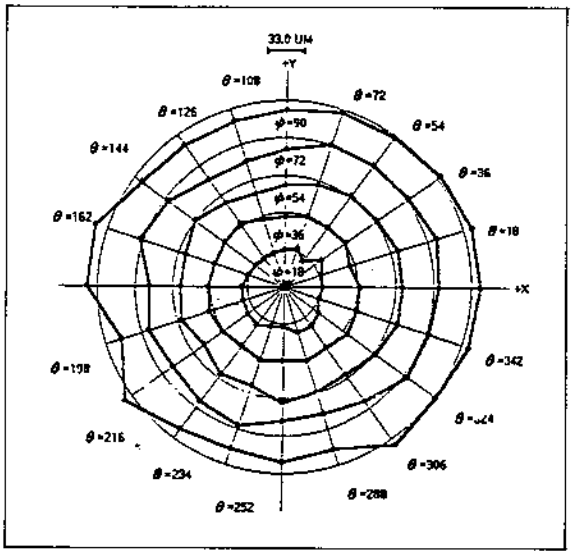
실제로의 적용을 위해, 1 마이크론 이하의 진구도(sphericity)를 갖는 반경 25.006mm의 기준 볼을 공칭반경 1mm, 프로브길이 30mm의 측정기 프로브로 측정하였다. 측정방향을 정밀하게 하기 위하여 측정경로는 PC를 사용해서 (ϕ,θ)방향을 따라서 매 18도 간격으로 생성하고, 생성된 경로는 측정기에 심은 후 측정작업을 수행하여, 모두 101점(5개의 원을 따라 100점과 정상의 1점)을 측정하였다. 측정된 기준구의 데이터는 식(4)에 의해서 분석되었다.

측정해석결과 유효반경은 0.997mm로 구해졌고, 최대 프로브오차는 6.6um, 최소프로브오차는 -9.0um, 제

곱평균(root mean square)프로브오차는 4.0um로 구해졌다. 측정된 프로브오차를 저장하여 오차보정을 위한 자료로서 사용하기 위해서 프로브 오차맵의 작성이 필요하다. 본 연구에서는 측정된 프로브오차가 (1)기준반구상에서 프로브오차를 3차원벡터로 표시하는 방법과 (2) 프로브 운동방향 평면직교좌표(ϕ,θ)상에서 프로브오차가 동심원에서 반경방향으로의 편차로 표시하는 방법이 구현되었다. 〈그림 4〉는 반구위에 프로브오차가 3차원 벡터형상으로 나타낸것을 보인다. 그림에서 프로브오차들은 각각(ϕ,θ)위치에서 법선방향을 따라서 화살로 그려지며, 그 크기는 프로브오차, 즉, Probing(ϕ,θ)에 비례한다. 기준반구상의 3차원 벡터도시는 그러나 반구의 뒷면에 있는 프로브오차를 나타내지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 또하나의 새로운 방법이 제안되었다. 즉 (ϕ,θ)의 직교 평면위에 3차원 반구 대신에 동심원들이 고려된다. 즉, 〈그림 5〉에서 보이는 것처럼, 프로브오차 Probing (ϕ,θ)은 직교 평면위의 매 (ϕ,θ)위치에서 반경방향으로의 편차(radial deviation)으로 표시될 수 있다. 즉 프로브오차는 동심원 위의 반경편차로 나타내어진다. 이렇게 작성된 프로브오차맵은 주어진 프로브 셋업에 대해서 유효하여, 프로브오차의 보정에 사용할수 있게 된다.



〈그림 4〉 반구상의 프로브 오차



〈그림 5〉 동심원상의 프로브 오차

2.4 프로브오차보정

프로브오차가 다른 기하학적 오차와는 달리 위치좌표의 함수가 아니고 프로빙 방향의 함수이므로, 따라서 프로브오차보상은 프로빙 방향으로 수행되어져야 한다. 즉, (Mx,My,Mz)이 기계좌표계에서 프로빙 방향을 나타내는 단위벡터라 할때, 기계좌표계에서 프로빙 방향은, 프로브 좌표계로 변환되어야 한다. 이는 프로브오차맵이 프로브 좌표계에 대해서 교정되었기 때문이다. 따라서, 프로브 좌표계에서의 프로빙 방향(Mx′, My′,Mz′)은 다음과 같다.

$$[Mx',My',Mz']^T = Tp^{-1}[Mx,My,Mz]^T \qquad (4)$$

여기서 Tp는 두 좌표계사이의 변환행렬이며, 프로브오차를 보정하기 위해 각 (ϕ,θ)는 다음과 같이 계산된다.

$$\phi = \arccos(Mz'/\sqrt{Mx'^2+My'^2+Mz'^2}) = \arccos(Mz') \qquad (5)$$

$$\theta = \arctan(My'/Mx') \qquad (6)$$

프로빙 방향의 각(ϕ,θ)을 알고 있을때, 프로브오차는 〈그림 4〉, 〈그림 5〉의 프로브오차 맵으로부터 구해질 수 있다. (ϕ,θ)각이 프로브오차지도의 (ϕ_i,θ_j)값들과 일치하지 않을때는 , 적절한 선형 보간을 수행한다.

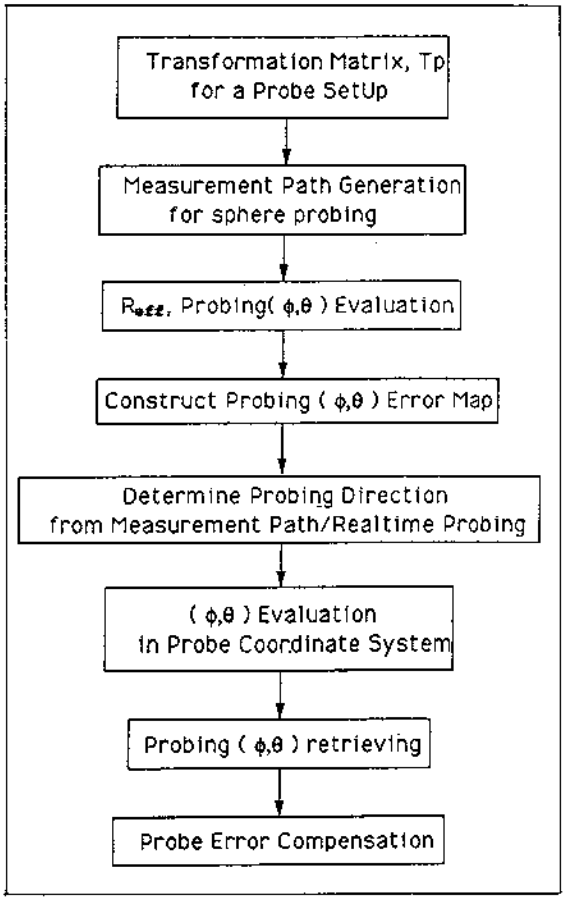
이제 프로브오차는 기계좌표계에서 프로빙 방향의 반대방향(-Mx,-My,-Mz)으로 보정되게 된다. 이는 프로브 오차만큼의 미소변위를 추가로 이동했기 때문이다. 따라서 보정된 좌표값(Xc,Yc,Zc)는 보정전 좌표값과 프로빙방향으로의 오차의 차가 된다. 즉,

$$[Xc,Yc,Zc]^T = [X,Y,Z]^T - Probing(\phi,\theta) \times [Mx,My,Mz]^T \quad (7)$$

여기서 (X,Y,Z)은 기계좌표계에서의 보정전 좌표값이고, (ϕ,θ)각은 프로브 좌표계에서 프로빙 방향(Mx',My',Mz')으로부터 결정된다.

본 연구에서는 프로브 오차 보정을 위한 두가지 실제적인 방법으로서 (1)실시간 온라인 보정 (2)측정프로빙경로를 고려한 오프라인 보정이 구현되었다. 실시간 보정을 위해서, 인터페이스 박스가 기계와 콘트롤러 사이에 대화를 위해 설계되었다. 프로빙 방향(Mx, My,Mz)은 프로빙하는 순간의 정보로부터 계산된다. Off-line 보정은 단지 프로빙 경로를 알고 있을때만 사용할 수 있다. 이때 보정전 좌표값들은 저장되고 측정작업의 수행후에 보정되어진다.

본 연구에서 개발된 프로브오차 평가와 보정 알고리즘은 성공적으로 구현되었으며, 그 과정들은 〈그림 6〉에 요약되어져 있다. 온라인 및 오프라인의 오차 보정은 뒤에서 언급하는 기계의 기하학적, 기구학적 오차가 모두 고려되는 통합 입체 오차 보정 모듈에서 상세히 설명된다.



〈그림 6〉 프로브 평가 및 보정 알고리즘

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 제한해 왔다. 링게이지는 측정기/공작기계의 원호운동 오차 테스트에 매우 유용한 도구로서, 링게이지에의해 스케일 오차와 직각도 오차가 교정 될 수 있다. 스탭 게이지는 선형축의 이송성능 테스트를 위해 사용되어 왔으며, 높은 정확도는 스텝게이지가 정확하게 교정 되고 보정되어지면 높은 정밀도를 구현할수 있다.

기계게이지류를 사용하여 측정기 및 공작기계의 오차 평가를 수행할때의 장점은, 공작물로부터 측정 프로브까지의 전체 측정기 매카니즘이 고려되는, 전체 측정 정밀도(Total Measuring Accuracy)에 의해 평가될 수 있다는 점이다.

3.1 링게이지 측정

평면에 놓인 내측 반경이 Rr인 링게이지의 안쪽을 CNC 측정 경로 계획을 사용하여 원주를 따라서 측정하면, 다음과 같은 몇개의 기하학적 오차 성분을 구할수 있게 된다. Rm(θ)를 θ위치에서 중심과 링의 원주사이의 공칭거리라고 할때 링 반경(Rr)과 측정된 거리(Rm(θ)) 사이의 관계는 다음처럼 구성될 수 있다.

$$Rr\text{-}Reff = Rm(\theta) - \text{Probing error}(\theta) + \Delta R(\theta) \quad (8)$$

여기서 $\Delta R(\theta)$는 기계 기하학적 오차들로 인한 반경 오차이다. Probing error(θ)는 프로브에러맵 또는 동일한 평면 위에 위치한 작은 링의 측정으로부터 구해진다. A_1,A_2를 X,Y방향에서의 선형 위치 오차라 하고, C를 X,Y축 사이의 직각도 오차라 할때, X,Y 방향으로의 오차 성분(ΔX,ΔY)는 $\Delta X = A_1 X$, $\Delta Y = A_2 Y - CX$, 가 되며, (ΔX,ΔY)오차 성분으로 인한 반경 오차(ΔR)은 아래와 같이 정의된다.

$$\Delta R = (X\Delta X + Y\Delta Y)/R = (A_1X^2 + A_2Y^2 - CXY)/R \quad (9)$$

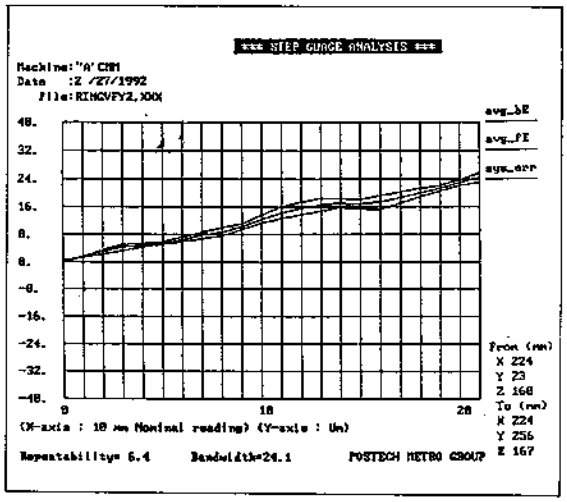
여기서 (X,Y)는 링 중심을 기준으로, 링 원주를 따르는 공칭좌표이다.

여기서 식(9)는 삼각함수로 변환될 수 있다. 즉, $\cos\theta = (X/R)$, $\sin\theta = (Y/R)$의 관계와 그리고 식(8)로부터 원형 오차 $\Delta R(\theta)$은

$$\begin{aligned}\Delta R(\theta) &= Rs\text{-}Reff - Rm(\theta) + \text{Probing error}(\theta) \\ &= R(A_1\cos^2\theta + A_2\sin^2\theta - C\cos\theta\sin\theta) \quad (10)\end{aligned}$$

이처럼 선형위치오차 A_1,A_2와 직각도오차 C는 최소자승법을 사용해서, 식(10)으로부터 결정될 수 있다.

실제측정수행을 위해, 진원도가 1마이크론 이내인 100mm반경의 링이 사용되었다. 링게이지 측정결과가 〈그림 7〉에 있으며, 그림에서 굵은 실선은 계산된 기하학적 오차를 나타낸다. X,Y방향을 따르는 선형위치오차들은 각각 -5.5um/100mm, 10.6um/100mm이고, 직각도 오차는 -6.8um/100mm로 구해졌다. 계산된 기하학적 오차들은 국부적으로 정의되어지며, 링게이지의 측정을 중첩(overlap)시키거나 또는 보다 큰 링게이지를 측정함을 통해서 보다 넓은 작업공간으로 확장될 수 있다.



〈그림 7〉 링게이지 측정결과

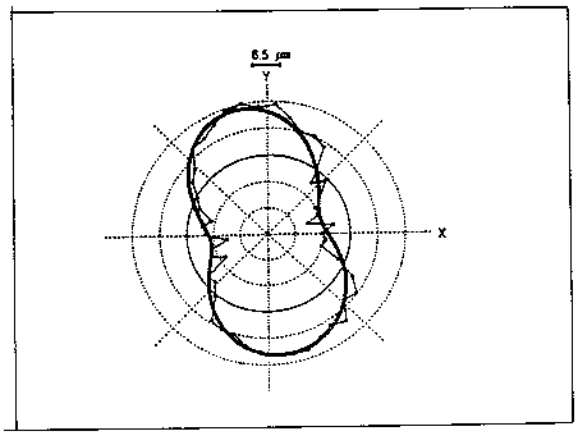
3.2 스텝게이지 측정

선형변위 정밀도,즉, 길이 측정오차는 스텝게이지 측정으로 계산될 수 있다.

Li를 기준 블록으로부터 i번째 블록의 교정된 길이라 하고, Mi를 i번째 블록과 기준 블록 사이의 측정기의 측정 거리라 하면 선형변위 정밀도 Xi는 둘 사이의 차이로 계산되어질 수 있다.

$$\text{즉,} \quad Xi = Li - Mi \quad (11)$$

실제 측정을 위해 600mm, 1500mm의 교정된 스텝게이지가, 선형변위정확도를 위해 사용되었다. 〈그림 8〉은 측정기의 Y 축을 따라 수행한 스텝게이지 측정결과를 보인다. 링게이지의 측정부분과 일치하는 지점을 따라 200mm 진행시켰을때 22.9um 의 선형변위오차를 나타내었다. 링게이지 측정결과로부터 21.1um/200mm,



〈그림 8〉 스텝게이지 측정결과

스텝게이지측정결과로부터는 22.9um/200mm 로서 매우 비슷한 값을 얻었다. 이로써, 개발된 링게이지 측정시스템은, 유효한 것으로 보이며, 약간의 차이는 측정시간동안의 온도 편차등과 관련한것으로 보인다.

스텝게이지 측정시스템의 장점은 기계작업영역에서의 임의의 방향에대한 선형변위정확도를 쉽게 알수 있는데 있다. 피치나 요와 같은 각도오차도 서로 다른 간격을 갖는 두개의 평행한 스텝게이지 의 측정데이타로부터 계산할 수 있다.

3.3 게이지 측정에서의 컴퓨터응용

제안된 게이지 측정시스템에는 측정경로계획, CNC 코드생성, 측정기 콘트롤러로의 다운로딩, 측정작업, 오차평가및 출력등 고도의 컴퓨터원용특성이 갖추어 졌다.

최근의 CNC형 측정기는 목표지점이 CNC 명령어로 프로그램 될 수 있는, 벡터구동성능을 갖추고있다. 적절한 경로가 링게이지와 스텝게이지에 대하여 생성되면, 각 경로는 CNC 명령어로 변환되고, 측정기 콘트롤러로 다운로딩된다. 이어서 측정작업이 수행되고 측정된 좌표데이타를 받아 기하학적인 오차요소들을 평가한다.

4. 오차보정

4.1 통합 입체 오차 방정식

고려된 기계의 작업영역에 대하여 각방향의 기하학적 오차가 측정되면, 강체운동을 고려한 기구학적 연계[1,2,3]를 이용해 입체오차방정식을 구성할 수 있다. 본 논문에서는 위에서 언급한 프로브오차맵과 기하학적/기구학적인 오차를 모두 고려하는 통합 입체오차 모델을 제시한다. 작업 현장에서 사용되고 있는 이동 수평 팔형(Moving Horizontal Arm Type) 기계를 대상으로 오차 보정을 수행하였다.

[X,Y,Z] 를 공칭 좌표값이라 할 때, 보정된 좌표값 [Xc,Yc,Zc]은 프로브 오차맵과 변환행렬등을 이용하여 얻어진다.

$$[\ Xc,Yc,Zc\ ] = T(X)T(Z)T(Y)[\ Xp,Yp,Zp,1\ ]^T - Probing(\phi,\theta)[\ Mx,My,Mz,0\ ]T$$

여기서,

$$T(x) = \begin{pmatrix} 1 & -Ez(x) & Ey(x) & X+\delta x(x) \\ Ez(x) & 1 & -Ex(x) & \delta y(x)-\alpha x \\ -Ey(x) & & Ex(x) & \delta z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T(z) = \begin{pmatrix} 1 & -Ez(z) & Ey(z) & \delta x(z)-\beta 1z \\ Ez(z) & 1 & -Ex(z) & \delta y(z)-\beta 2z \\ -Ey(z) & & Ex(z) & z+\delta z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T(y) = \begin{pmatrix} 1 & -Ez(y) & Ey(y) & \delta x(y) \\ Ez(y) & 1 & -Ex(y) & y+\delta y(y) \\ -Ey(y) & & Ex(y) & \delta z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

는 4*4 변환행렬이고 [Xp,Yp,Zp]는 프로브의 옵셋 벡터이다; $\delta Xi(Xj)(i,j = 1,2,3)$ 는 Xj 축을 따라 이동할때의 Xi 방향의 수평이동오차이다; $EXi(Xj)(i,j = 1,2,3)$ 는 Xj 축을 따라 이동할때의 Xi 방향의 회전오차이다. $\alpha,\beta 1,\beta 2$ 는 각각 XY,YZ,XZ 축의 직각도오차이다. 그러므로 입체오차방정식은 프로브오차를 고려한 기계에 대하여 계산되고, 이때의 입체오차

[ΔX,ΔY,ΔZ] 는 다음과 같다.

$$\Delta X = Xc-(X+Xp) = \delta x(x)+\delta x(y)+\delta x(z)-y(Ez(z)+Ez(x))+z(Ey(x)-\beta 1)-Yp(Ez(x)+Ez(y)+Ez(z))+Zp(Ey(x)+Ey(y)+Ey(z))-Mx*Probing(\phi,\theta)$$

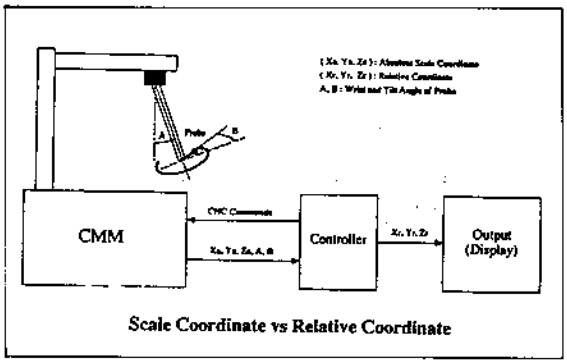
$$\Delta Y = Yc-(Y+Yp) = \delta y(x)+\delta y(y)+\delta y(z)-\alpha x-z(Ex(x)+\beta 2)+Xp(Ez(x)+Ez(y)+Ez(z))-Zp(Ex(x)+Ex(y)+Ex(z))-My*Probing(\phi,\theta)$$

$$\Delta Z = Zc-(Z+Zp) = \delta z(x)+\delta z(y)+\delta z(z)+y(Ex(x)+Ex(z))-Xp(Ey(x)+Ey(y)+Ey(z))+Yp(Ex(x)+Ex(y)+Ex(z))-Mz*Probing(\phi,\theta)$$

여기서 [Mx,My,Mz]는 프로브 측정방향의 단위벡터이다.

4.2 절대스케일좌표계에서의 입체오차맵

대부분의 측정기는 복잡한 형상측정을 위해 다축 프로브를 갖추고 있어서, 여분의 자유도를 갖는다. 측정기는 대개 적어도 두개의 작업좌표계를 갖고있는데, 스케일의 좌표입력을 그대로 표시하는 절대좌표계 [Xa,Ya,Za]와 사용자가 정의 할수 있는 상대좌표계 [Xr,Yr,Zr]가 그것이다. 측정기 콘트롤러는 절대좌표와 프로브 각도 (A,B)을 입력받아 해당하는 상대좌표[Xr,Yr, Zr]를 계산한다. 상대좌표계 [Xr,Yr, Zr]



〈그림 9〉 두좌표계 관계

는 단순히 프로브 옵셋의 변화만으로도 변화될 수 있기 때문에 오차보정은 일반적으로 절대크기좌표계에서 수행된다. 본 논문에서는 여분의 자유도문제를 해결하기 위해서 오차교정및 보정에 절대스케일좌표계를 사용하였다. 그러므로 입체오차방정식을 적용하기에 앞서서, 두 좌표계사이의 관계를 알아야 한다. 〈그림 9〉는 이 두 좌표계와 측정기, 콘트롤러, 데이터 출력 사이의 관계를 보이고 있으며, 이축 프로브의 경우에 두 좌표계사이의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&[\ Xr,\ Yr,\ Zr\ ]\\ &=[\ Xa+Xp+Tx,\ \ Ya+Yp+Ty,\ Za+Zp+Tz\ ]\\ &=[\ Xa+LsinAcosB+Tx, Ya+LsinAsinB+Ty,\\ &\quad Za-LcosA+Tz\ ]\end{aligned} \tag{14}$$

여기서 Tx,Ty,Tz 는 두 좌표계사이의 옵셋이고 Xp, Yp,Zp 는 프로브옵셋, 그리고 L은 탐침의 길이이다. 따라서 4개의 매개변수(Tx,Ty,Tz,L)를 알아내기 위해서 4점의 데이타를 초기에 프로빙해야 한다. M1 (X1,Y1,Z1)과 M2(X2,Y2,Z2)를 오차보정을 고려하고 있는 부분작업영역의 대각선의 꼭지점의 절대좌표계라고 할때, 입체오차방정식에서의 공칭좌표[X, Y,Z]는 X = Xa-X1, Y = Ya-Y1, Z = Za-Z1 이 된다. 입체오차성분 [ΔX,ΔY,ΔZ]는 식(13)에서 계산되고 절대좌표로 보정될 수 있다. 보정된 절대좌표 [Xa',Ya',Za']는

$$[Xa',Ya',Za'] = [Xa,Ya,Za]+[\Delta X,\Delta Y,\Delta Z] \tag{15}$$

이다. 보정된 좌표는 이제 보정된 상대좌표를 얻기위해 변환된다.

4.3 오차보정모듈의 구현

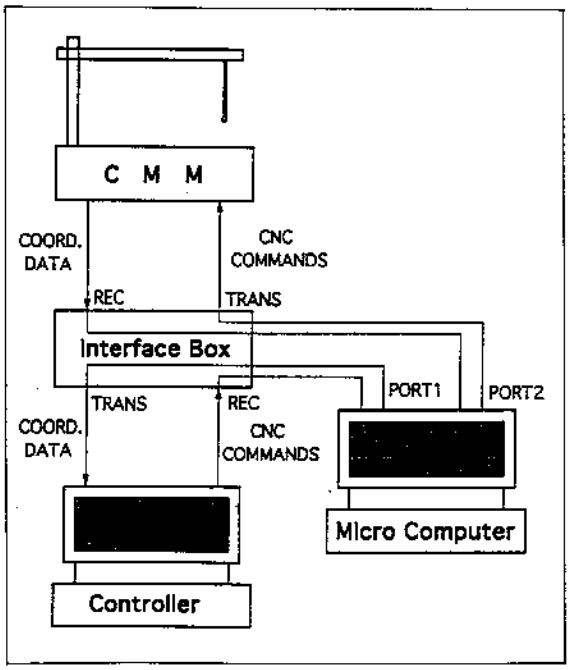
위에서 제안된 통합 오차 방정식은 본 연구에서 다음 두가지 방식으로 구현되었다.

1) 전용설계된 인터페이스박스(Interface box) 와 소프트웨어(Software)를 이용한 실시간 오차보정

2) 측정후 단계에서의 오프라인(off-line) 보정안

대부분의 상용 측정기는 자체적인 전용 하드웨어및 소프트웨어를 운용 시스템으로 가지고 있으며 일반사용자가 접근할수 없는 블랙 박스(black box)로 남아 있다. 그러므로 인터페이스박스는 측정기와 콘트롤러와의 사이에서 데이타를 가로채 수정하도록 설계되었다. 〈그림 10〉은 인터페이스박스를 중심으로 한 블록 선도를 보이고 있다. 데이타통신은 보통 두개의 포트(port) 즉, 측정기로 가는 CNC명령이송포트와 콘트롤러로 가는 기계좌표이송포트를 통해 이루어진다.

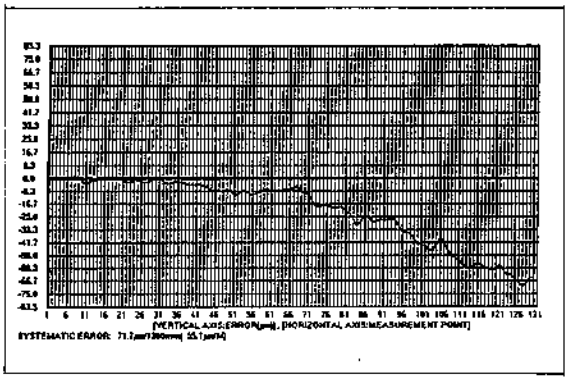
콘트롤러와 측정기간의 데이타흐름을 가로채기 위해 PC로 두 포트의 버스(bus)선을 접속하였으며, 기계좌표이송 포트가 직렬접속되어 좌표데이타는 인터페이스 박스를 통해 PC로 전송된다. 전송된 좌표데이타는 프로브위치 각도 (A,B)과 절대스케일좌표[Xa, Ya,Za]로 재조합된 오차보정 서브루틴을 불러 통합입체오차를 계산한다. 보정된 절대스케일좌표[Xa',Ya',Za']는 다시 인터페이스 박스를 통해 콘트롤러 포트로 보내지면, 콘트롤러는 데이타가 가로채어져 보정된 것을 인식하지 못하고 보정된 데이타를 받는다. 따라서 콘트롤러는 수정된 좌표값을 보여준다.



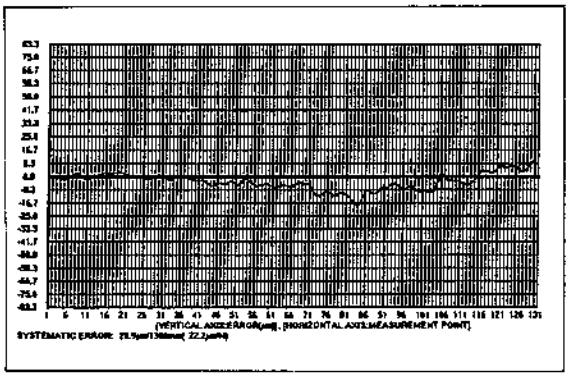
〈그림 10〉 구현 스킴

측정기로가는 CNC명령및 콘트롤러응답 전송 포트 역시 인터페이스 박스를 통해 PC에 직렬접속되어 아무런 수정없이 인터페이스 박스를 통해 측정기 포트로 지연전송된다. 실시간 오차보정의 이점은 상용측정기의 운용체계에 최소 간섭 내지는 전혀 간섭을 주지 않으면서 실시간에 기하학적 오차뿐만 아니라 프로브 오차까지 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 데이타통신은 간섭없이 인터페이스 박스를 거쳐 직접 이송된다. 현재 개발된 인터페이스 박스에 의한 실시간 오차 보정 시스템은 상용측정기에 장착되어 사용되고있으며, 매우 효율적인 시스템임을 보이고 있다.

오프라인(0ff-line) 보정안은 인터페이스 박스가 적절하지 못한 상황에서 적용해 보았다. 측정좌표데이타가 콘트롤러에 저장되고 측정이후 단계에서 회수된다. 절대좌표[Xa,Ya,Za]가 식(14)로 계산되고 공칭좌표[X,Y,Z]도 계산되면, 입체오차방정식이 적용된다. 보정된 절대좌표[Xa',Ya',Za']는 입체오차맵으로부터 계산된다. 개발된 오차 측정 및 보정 시스템의 실제적인 적용은 현장에서 사용하고 있는 기계로서 4500mm * 1500mm * 1200mm 의 작업영역을 가지며 폐쇄형 콘트롤러를 가지는 측정기에서 구현되었다. 게이지류를 이용하여 측정을 수행하여 위치오차, 직각도 오차, 몇개의 각도오차가 교정되었고, 통합 입체오차 방정식이 고려 되었다. 계산된 입체오차는 개발된 실시간 오차보정 알고리즘으로 보정되었다. 개발된 시스템의 효율을 검사하기 위해 1500mm의 스텝게이지를 교정 전후에 측정해 보았다. 〈그림 11〉, 〈그림 12〉은 스텝게이지를 한 방향 진행측정한 결과이다. 보정전에 대각선 방향에 대해서 71.7um/1500mm의 오차가 보정후에는 28.9um/1500mm로 감소되었다. 온도가 제어되는 상태가 아니었기 때문에 일부분의 기하학적 오차 성분만이 측정/보정되었으므로 보정후에도 잔류오차가 관찰되고 있다. 그럼에도 불구하고 측정기의 정밀도는, 작업영역내에서의 스텝게이지의 대각선 방향 측정에 있어서, 약 두배가량 향상되었음을 알수 있었다.



〈그림 11〉 측정결과 1



〈그림 12〉 측정결과2

5. 결론

본 논문은 상용 3차원 측정기의 기하학적 형상과 측정 프로브에 의해 생기는 오차의 평가및 보정기술을 제시하였다. 결론은 다음과 같다.

1) 프로브 오차측정과 보정기술을 실제로 구현하였으며, 프로브측정방향(ϕ,θ) 평면에서의 프로브오차맵이 측정프로브의 실제적인 오차측정및 보정에 유용함을 알았다.

2) 전체 측정 정밀도라는 측면에서 링게이지나 스텝게이지같은 교정된 기계게이지류가 기하학적 오차 교정에 유효함을 알았다.

3) 프로브 오차및 기계의 기하학적 오차를 고려한 통합입체오차방정식을 유도해냈고, 이를 보정에 사용하였다.

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

5) 전용설계된 인터페이스박스와 소프트웨어모듈로 실시간 오차보정 시스템을 개발하여 통합 입체 오차보정을 수행하였다. 개발된 시스템으로 생산현장에 설치된 상용측정기에 대하여 오차측정 및 보정을 성공적으로 수행하였다.

참고문헌

1. Zhang,G., Veale,R., Chorlton,T., and Hochen,R., Error Compensation of Coordinate Measuring Machine, Annals of CIRP, Vol 34/1/1985
2. Busch,K.Kunzmann,F., and Waldele,F., Calibration of Coordinate Measuring Machines, Precision Engineering, Vol 7(3) 139-144,1985
3. Hocken,R., Three Dimensional Metrology, Annals of CIRP Vol 26/1/1977.
4. Peggs,G., Traceability for Coordinate Measurement Technology, 463-468, Proc. of the 28th International MATADOR Conference, UMIST, UK, 1990
5. Kunzmann,H., Trepet,E., Waldele,F., Concept for the Traceability of Measurements with Coordinate Measuring Machines, 40-52, International Progress in Precision Engineering,1993
6. Knapp,W., Test of the Three Dimensional Uncertianty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to the Machine Errors, Annals of CIRP Vol 32/1/1983
7. Kakino,Y., Ihara,Y., Nakatsu,Y., 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 36/1/1987

8. 박희재, CNC 3차원측정기의 실시간 오차 보정, 제 3회 CNC 콘트롤러 워크숍, 서울대학교 제어계측 신기술 연구센터/자동화시스템 공동 연구소,1994

박희재
서울대 기계설계학과(학사, 석사)
영국 UMIST 대학교 기계공학과(박사)
현재 서울대학교 기계설계학과 조교수