

<技術論文>

3차원 좌표측정기(CMM)의 오차방정식 유도에 관한 연구

이 응 석*

(1994년 12월 8일 접수)

A Study on the Volumetric Error Equation of Coordinate Measuring Machines and their Application

Eung Suk Lee

Key Words : Volumetric Error Equation(3차원 오차방정식), Coordinate Measuring Machine(3차원 좌표측정기), Systematic Error(계통오차), Geometric Error(기하학적 오차)

Abstract

For general geometry of Coordinate Measuring Machine (CMM), volumetric error equation including 21 systematic error components was showed using vector expression. Different types of CMM listed on an international standard (BS 6808) were classified according to their geometry, and the general volumetric error equation was used for the CMMs. Application of volumetric error equation was also introduced, such as position error compensation, error equation of CNC-machine and parametric error analysis, etc.

기 호 설명

$\delta x(X), \delta y(Y), \delta z(X) : X, Y, Z$ -축방향의 위치오차
 $\delta y(X), \delta z(X) : X$ -축의 Y, Z 방향의 진직도오차
 $\delta x(Y), \delta z(Y) : Y$ -축의 X, Z 방향의 진직도오차
 $\delta x(Z), \delta y(Z) : Z$ -축의 X, Y 방향의 진직도오차
 $Ey(X), Ez(X), Ex(X) : X, Y, Z$ -축의 롤오차
 $Ex(Y), Ez(Y), Ey(Y) : X, Y, Z$ -축의 피치오차
 $Ey(Z), Ex(Z), Ez(Z) : X, Y, Z$ -축의 요오차
 $Sxy, Sxz, Syz : X \cdot Y, X \cdot Z, Y \cdot Z$ 축의 직각도오차

3차원 좌표측정기(coordinate measuring machines, 이하 CMM 또는 CMMs)는 국내에서도 항공기 및 자동차 부품업체 등을 중심으로 그 사용이 크게 증가되었으며, 국내 CMM의 생산도 수년 전부터 경쟁적으로 본격화되고 있다. CMM은 물체의 3차원 좌표측정을 위하여 편리하게 사용되며, 현재 그 사용목적에 따라 적합한 또는 측정 정밀도를 높이기 위한 여러가지 모델이 시판되고 있다. CMM은 인지되는 이와같이 그 측정 정밀도가 생명이며, 국제 규격에서 주로 사용되는 CMM의 정밀도는 불확실도, U(uncertainty)로 표시하여 다음과 같이 정의한다.

1. 서 론

CNC-공작기계의 보편화와 함께 가공물의 정밀도 검사를 위하여 곡면 등 복잡한 3차원 형상측정이 요구되고, 따라서 기존 사용되던 간단한 측정기 구로는 어렵게 되었다. 이와 같은 요구로 개발된 3

$$U = A + L/A \tag{1}$$

여기서, A, K 는 상수이고 L 은 3차원 작업공간에서의 측정거리이다. 일반 산업용에서 사용되는 CMM은 전체 작업영역에서 보통 4-10 μm 의 U 값으로 생산되고 있다. CMM의 측정 정밀도를 유지하기 위해서는 작업자의 숙련도 이외에 CMM 자체

*정회원, 산업과학기술연구소

의 오차가 중요할 것이며, 따라서 주기적으로 CMM의 오차를 검사하여야 한다. 운송기계에서 발생하는 자체오차는 식(1)과 같이 복합적인 것으로 표시할 수 있지만 이것은 측정환경 및 시간에 따라 오차값이 변화되는 임의오차(random error)와 환경 및 시간의 요인에 영향을 받지않는 계통오차(systematic error)를 모두 포함한다. 임의오차는 환경·시간조건 이외에 작업자 개인의 특성에 기인하는 요인도 있어, 그 교정이 어렵지만 계통오차는 동일한 조건하에서는 항상 같은 값으로 발생하기 때문에 교정이 가능하다. CMM의 계통오차는 직교좌표축이 이동하면서 발생하는 오차와 프로브의 기능상오차 및 백-레쉬오차 등이 포함된다. 계통오차는 일반적으로 축이동에 의한 오차가 상대적으로 우세하고 또한 먼저 교정되어야 한다. 축이동에 의한 오차는 주로 CMM의 설계 구조상 강제로 될 수 없기때문에 발생하는 요인과 좌표축의 스케일오차 등을 포함하며, 본 연구에서는 구조적오차(geometric error or parametric error)로 부른다. 구조적오차는 21개의 계통오차성분으로 구분하며, X, Y, Z-축에서의 위치오차 3개, 축방향에 수직인 진직도오차 각축에 2개, 각도오차(angular error)인 피치(pitch), 요(yaw) 및 롤(roll) 오차 각축에 3개, 그리고 X-Y, X-Z 및 Y-Z축의 직각도오차 3개이다.

작업공간에서 측정된 길이오차는 이들 계통오차성분을 모두 포함할 것이며, 따라서 구조적 오차벡터는 21개의 오차성분을 인수로하는 방정식의 형태로 표시할 수 있다. 이러한 요구로 행렬식에 의한 CMM의 오차방정식을 유도하여, 제한된 종류의 CMM에 대하여 발표되었으며⁽¹⁾ 여러가지 복잡한 구조의 CMM에 대하여 적용되는 일반적인 방법은 알려지지 않았다. 본 연구는 벡터방식을 사용하여 일반적인 CMM의 3차원 오차방정식을 정의하고, 국제규격(BS 6808)⁽²⁾에 명시된 CMMs의 종류를 구조적으로 분류하여 일반화된 오차방정식에 모두 적용시켰다. 또한, 유도된 오차방정식의 활용으로 가능한 프로브위치 오차보상방법, CNC-공작기에 활용 및 구조적 계통오차분석 방법 등을 소개하였다.

2. CMMs의 3차원 오차방정식

일반적인 CMM 프로브의 3차원 위치오차는 Fig.

1과 같이 기준점에서 작업공간 내부의 측정점 P까지의 오차벡터 $E_p(ex, ey, ez)$ 로 표시한다. 오차벡터 E_p 는 오차방정식으로 표시하여 선형오형(linear error) 및 각도오차의 합으로 다음과같이 정리된다.⁽³⁾

$$E_p = Lx + Ly + Lz + Ax \times AP + Ay \times BP + Az \times CP \tag{2}$$

여기서, 선형(L) 및 각도오차(A) 성분들은 앞서 설명된 구조적인 21개의 계통오차 성분을 모두포함하며 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Lx &= [\delta x(X), \delta y(X), \delta z(X)] \\ Ly &= [\delta x(Y) - Sxy \cdot Y, \delta y(Y), \delta z(Y)] \\ Lz &= [\delta x(Z) - Sxz \cdot Z, \delta y(Z) - Syz \cdot Z, \delta z(Z)] \\ Ax &= [Ex(X), Ey(X), Ez(X)] \\ Ay &= [Es(Y), Ey(Y), Ez(Y)] \\ Az &= [Ex(Z), Ey(Z), Ez(Z)] \end{aligned} \tag{3}$$

위식의 선형오차성분중 3개의 직각도오차(Sxy, Syz, Sxz)는 일반적으로 그 절대치가 적기때문에 $\tan(Sxy) \approx Sxy, \tan(Syz) \approx Syz$ 및 $\tan(Sxz) \approx Sxz$ 의 가정에 의한 것이며, 직각도의 부호는 90°보다 큰경우를 양(+)으로 하였다. 또한 각도오차(Ax, Ay, Az)에서도 그 절대치가 적을경우를 가정한 것이다. 식(2)에서 X, Y, Z-축 이동시 각도오차의 팔길이 AP, BP 및 CP는 아베오차(abbe error⁽²⁾)

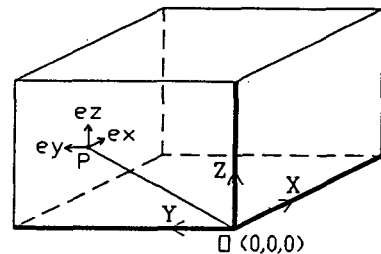


Fig. 1 3-dimensional error vector in the measuring volume of CMM and reference axes

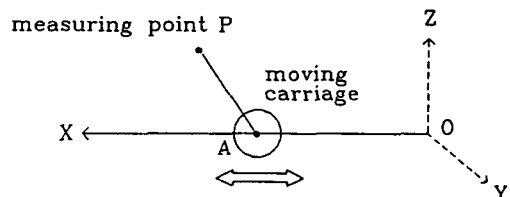


Fig. 2 One-dimensional movement of carriage with Abbe offset AP to the measuring point P

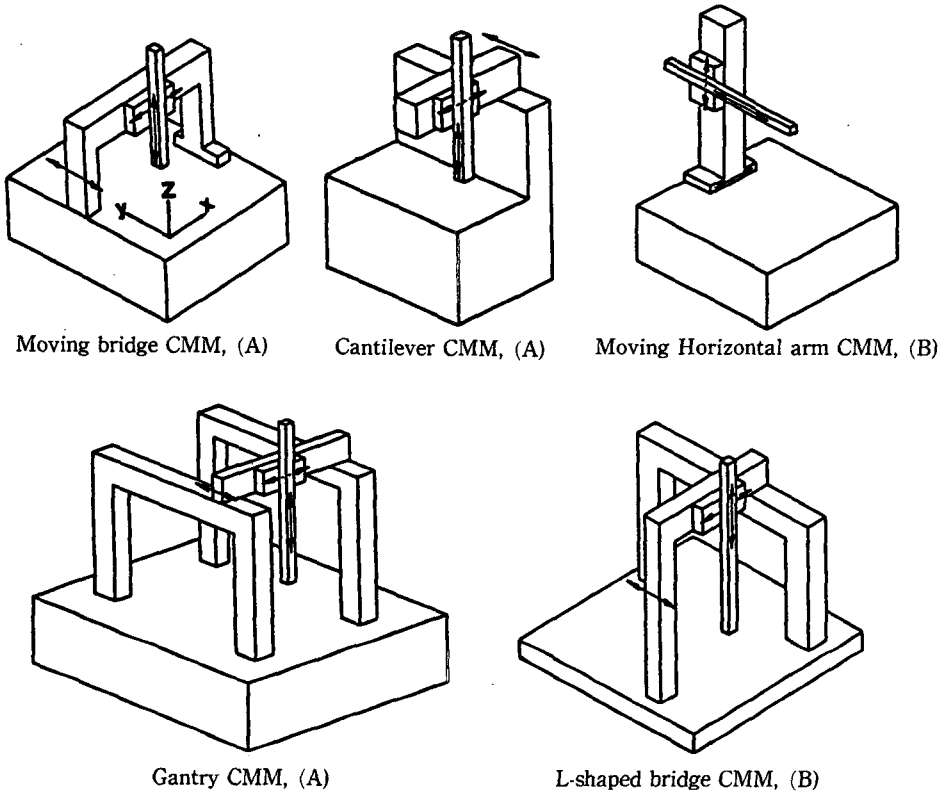


Fig. 3 Fixed table type CMMs from the list of BS 6808 part-2

Fig. 2과 같이 이송축과 측정점이 다르기 때문에, 이송축에서 발생하는 각도오차의 영향)에 근거를 둔 것이므로 본 연구에서는 아베상수로 부른다. 따라서 식(2)의 아베상수들은 이송축에서 측정점까지 수직인 방향성분들의 합으로 다음과같이 된다.

$$\begin{aligned} AP &= Y + Z + K_{yz}, \quad BP = X + Z + K_{xz} \\ CP &= X + Y + K_{xy} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 벡터 K_{yz}, K_{xz}, K_{xy} 는 CMM의 종류에 달라지는 기하학적 상수이며, 벡터 X, Y, Z 는 CMM 프로브가 표시하는 좌표값이다.

2.1 테이블고정 CMM

현재 상품화된 CMM은 대부분 BS 6808에 명시된 것 중의 하나이며, 이들 가운데서 Fig. 3은 모두 테이블고정 형태이다. 이들은 다시 프로브의 이동시 X, Y, Z 축이 연계된 방향에 따라 시계방향($X \rightarrow Y \rightarrow Z$, Type A) 및 반시계방향($Z \rightarrow Y \rightarrow X$, Type B)으로 구분된다. Fig. 4는 Type A, B에 따라

Fig. 3의 CMMs를 구조적인 링크모양 운동시스템으로 표시한 것이다. 여기서 식(4)의 CMM의 기하학적 상수 K 는 Type A, B에 따라 다음과 같이 대치할 수 있다.

Type A	Type B
$K_{yz} = [AB_0 + BC_0 + CP]_{y2}$	$[AC_0 + CB_0 + BP]_{y2}$
$K_{xz} = [BC_0 + CA_0 + AP]_{xz}$	$[BA_0 + AC_0 + CP]_{xz}$
$K_{xy} = [CA_0 + AB_0 + BP]_{xy}$	$[CB_0 + BA_0 + AP]_{xy}$

(5)

식(5)에서 하첨자(xy, xz, yz)는 벡터의 방향성분을 표시하며, 포함된 각각의 상수는 링크구조로 가정 한경우 기준축의 좌표점에서 아베오차를 발생시키는 팔길이를 나타낸다. 예로서 AB_0 는 기준축의 좌표점 A에서 연결된 다음축의 시작점 B_0 까지의 거리이다.

Moving bridge type CMM은 대표적인 테이블고정 CMM(Type A)이며, 가장 정밀한 형태로 제작될 수 있어 그 사용범위가 넓다. Fig. 5와 같은

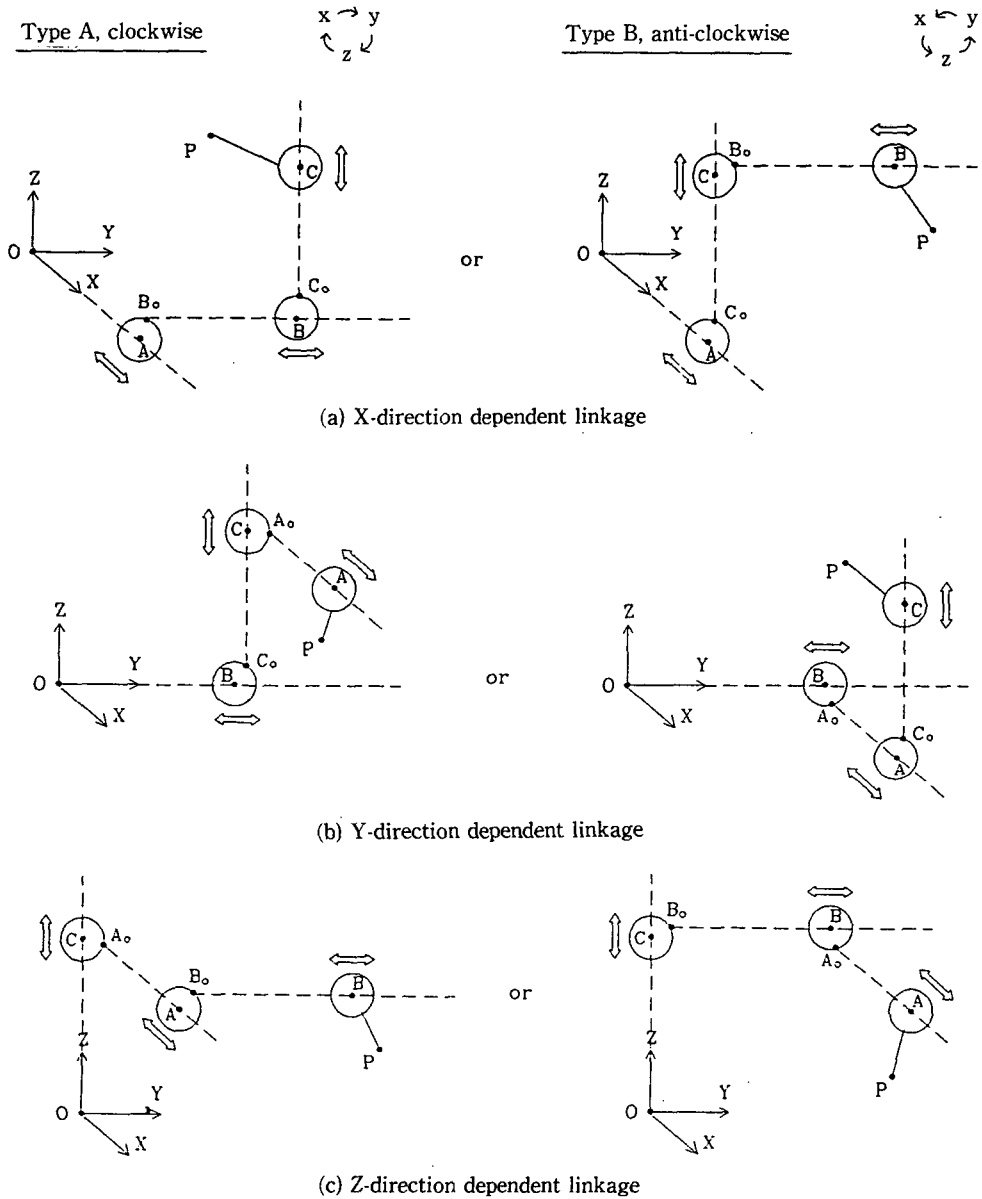


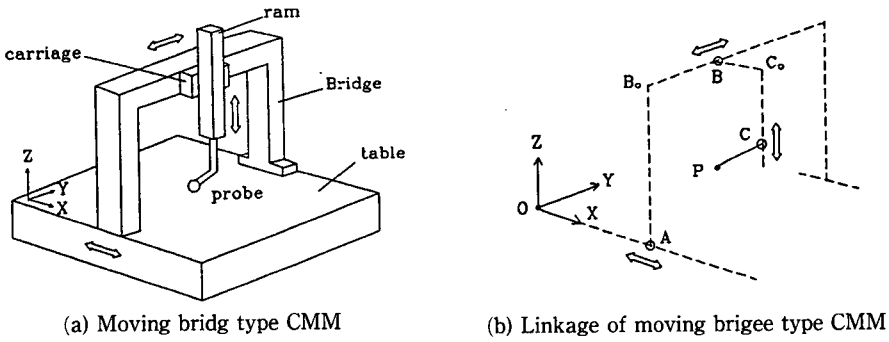
Fig. 4 Two types of linkage systems of fixed table CMMs

moving bridge type CMM의 링크시스템에서 상수 K 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

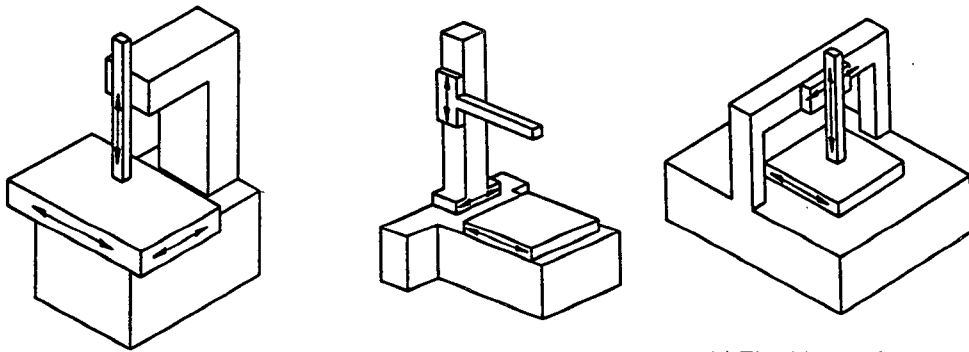
$$\begin{aligned}
 K_{yz} &= [AB_0 + BC_0 + CP]_{yz} \\
 &= (0, CP_y, AB_0 + CP_z) \\
 K_{xz} &= [BC_0 + CA_0 + AP]_{xz} \\
 &= (BC_0 + CP_x, 0, AB_0 + CP_z) \\
 K_{xy} &= [CA_0 + AB_0 + BP]_{xy} \\
 &= (BC_0 + CP_x, CP_y, 0)
 \end{aligned} \tag{6}$$

따라서 식(6)을 아베상수 식(4)에 대입하고 식(2)을 식(3)과 함께 정리하여, 오차벡터의 방향성분(ex, ey, ez)으로 표시하면,

$$\begin{aligned}
 ex &= \delta x(X) + \delta x(Y) + \delta x(Z) - S_{xy} \cdot Y - X_{xz} \cdot Z \\
 &\quad + [E_y(X) + E_y(Y)] \cdot (Z + CP_z + AB_0) \\
 &\quad - [E_z(X) + E_z(Z)] \cdot (Y + CP_y) \\
 ey &= \delta y(X) + \delta y(Y) + \delta y(Z) - S_{yz} \cdot Z \\
 &\quad + [E_x(X) + E_x(Y)] \cdot (Z + CP_z + AB_0)
 \end{aligned}$$



(a) Moving bridge type CMM (b) Linkage of moving bridge type CMM
 Fig. 5 Linkage system of moving bridge type CMM and its geometric constants



(a) Column coordinate CMM (b) Fixed horizontal CMM (c) Fixed bridge CMM
 Fig. 6 Moving table type CMMs from the list of BS 6808 Part-2

$$\begin{aligned}
 & -[Ez(Y) + Ez(Z)] \cdot (X + CPx + BC_0) \\
 ez = & \delta z(X) + \delta z(Y) + \delta z(Z) \\
 & + [Ex(X) + Ex(Y)] \cdot (Z + CPz) \\
 & - [Ey(Y) + Ey(Z)] \cdot (X + BC_0 + CPx) \quad (7)
 \end{aligned}$$

윗 식에서 포함되는 21개의 계통오차성분은 측정점 (X, Y, Z)의 위치함수가 되고, 따라서 오차성분 (ex, ey, ez) 역시 각 측정점에서의 고유한 값으로 될 것이다.

2.2 테이블이동 CMM

BS 6808에 명시된 CMM중 테이블이동 형태는 Fig. 6과 같이 3종류가 있다. 이들의 오차방정식도 식(2), (3)과 같은 모양이며, 다만 식(4)의 아베상수의 형태가 약간씩 변화된다.

2.2.1 Column Coordinate CMM

Fig. 7은 column coordinate CMM의 링크시스템이다. 이 시스템에서는 Z-축이 X, Y-offset이 없이 테이블에 수직으로 운동하기때문에 Z-축의 이

동에대한 각도오차, $Az \times (X + Y)$ 의 영향은 없어진다. 또한 Type-A의 경우 CMM 프로브는 X축의 이동시 Y-offset이 없기때문에 X축에 대한 각도오차 $Ax \times (Y)$ 의 영향은 없어진다. 따라서 아베상수는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 AP = & Z + Kyz, \quad BP = X + Z + Kxz \\
 CP = & Kxy \quad (8)
 \end{aligned}$$

또한, Fig. 7에서 CMM의 기하학적 상수 K는 다음과같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 Kyz = & [AB_0 + CP]_{yz}, \quad Kxz = [CA_0 + CP]_{xz}, \\
 Kxy = & [AB_0 + CP]_{xy} \quad (9)
 \end{aligned}$$

따라서, 오차방정식은 식(2)에서 벡터방정식으로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 Ep = & Lx + Ly + Lz + Ax \times [Y + Z + (AB_0 \\
 & + CP)_{yz}] + Ay \times [X + Z + (AB_0 \\
 & + CP)_{xz}] + Az \times [AB_0 + CP]_{xy} \quad (10)
 \end{aligned}$$

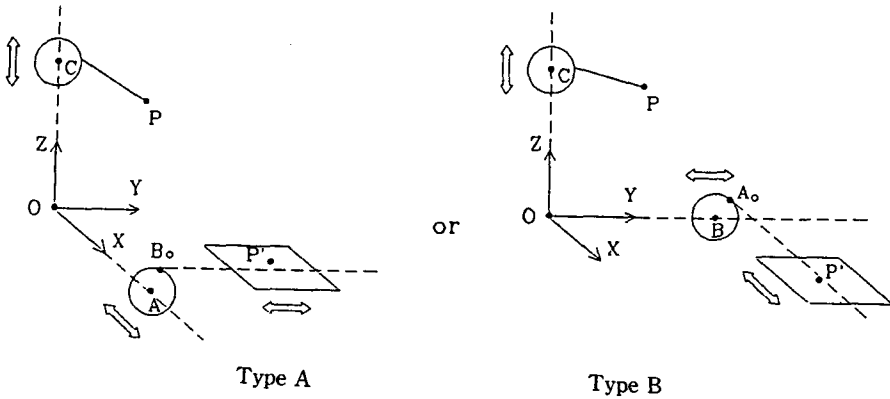


Fig. 7 Linkage system of column coordinate CMM

같은 이유로 Type-B에서도 Y축의 이동시 X-offset이 없기 때문에 Y축에 대한 각도오차 $Ay \times (X)$ 의 영향은 없어지고, 오차방정식은 식(2)에서부터 다음과 같이 된다.

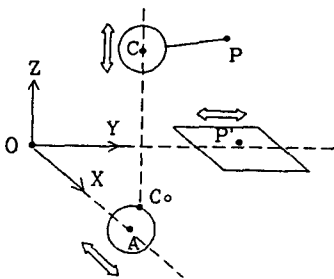
$$E_p = L_x + L_y + L_z + A_x \times [Y + Z + (BAO + CP)_{yz}] + A_y \times [Z + (BAO + CP)_{xz}] + A_z \times [BAO + CP]_{xy} \quad (11)$$

2.2.2 Fixed Horizontal CMM

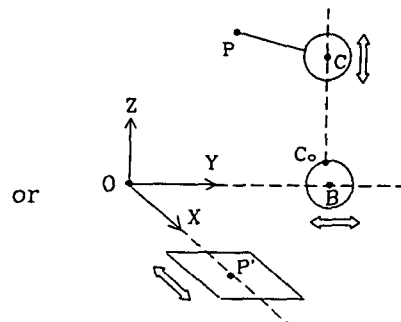
Fixed horizontal CMM에서는 Fig. 8과 같이 X, Y축은 서로 독립적으로 운동한다. 따라서 Type-A에서는 X축의 각도오차는 Y좌표의 영향, $A_x \times (Y)$ 을 받지 않으며, 따라서 상수 K는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} K_{yz} &= [ACO + CP]_{yz} \\ K_{xz} &= [ACO + CP]_{xz} \\ K_{xy} &= [ACO + CP]_{xy} \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 오차방정식은 식(2)에서 다음과 같이 된다.



Type A



Type B

Fig. 8 Linkage system of fixed Horizontal CMM

$$E_p = L_x + L_y + L_z + A_x \times [Z + (ACO + CP)_{yz}] + A_y \times [X \times Z + (ACO + CP)_{xz}] + A_z \times [ACO + CP]_{xy} \quad (13)$$

같은 이유로 Type-B에서도 Y축 각도오차의 X좌표 영향, $A_y \times (X)$ 는 없어지고, 상수 K는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} K_{yz} &= [BCO + CP]_{yz} \\ K_{xz} &= [BCO + CP]_{xz} \\ K_{xy} &= [BCO + CP]_{xy} \end{aligned} \quad (14)$$

따라서, 오차방정식은 식(2)에서 다음과 같이 된다.

$$E_p = L_x + L_y + L_z + A_x \times [Y + Z + (BCO + CP)_{yz}] + A_y \times [Z + (BCO + CP)_{xz}] + A_z \times [BCO + CP]_{xy} \quad (15)$$

2.2.3 Fixed Bridge CMM

Fixed Horizontal CMM의 링크시스템은 Fig. 9와 같이 기하학적인 구조인 OAO 또는 OBO 만 추가

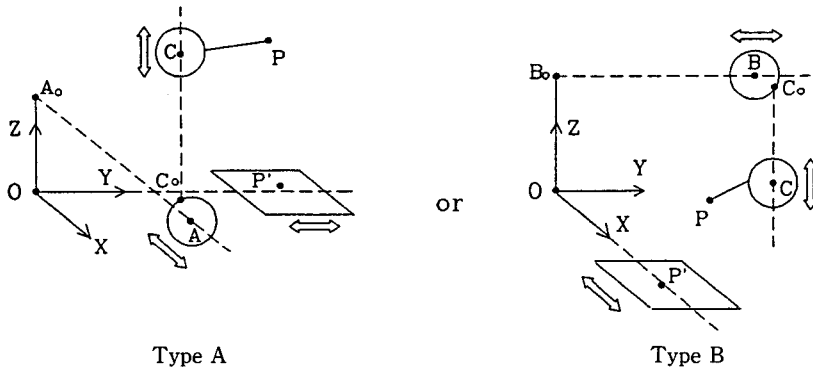


Fig. 9 Linkage system of fixed bridge CMM

되고 fixed Horizontal CMM과 같다. 따라서 Type-A의 경우 상수 K 는 다음과 같이 표시되고,

$$\begin{aligned} K_{yz} &= [OA_0 + AC_0 + CP]_{yz} \\ K_{xz} &= [OA_0 + AC_0 + CP]_{xz} \\ K_{xy} &= [OA_0 + AC_0 + CP]_{xy} \end{aligned} \quad (16)$$

오차방정식은 식(2)에서 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Ep &= Lx + Ly + Lz + Ax \times [Z + (OA_0 + AC_0 + CP)_{yz}] \\ &\quad + Ay \times [X + Z + (OA_0 + AC_0 + CP)_{xz}] \\ &\quad + Az \times [OA_0 + AC_0 + CP]_{xy} \end{aligned} \quad (17)$$

Type-B에서는 상수 K 는 다음과 같이 표시되고,

$$\begin{aligned} K_{yz} &= [OB_0 + BC_0 + CP]_{yz} \\ K_{xz} &= [OB_0 + BC_0 + CP]_{xz} \\ K_{xy} &= [OB_0 + BC_0 + CP]_{xy} \end{aligned} \quad (18)$$

오차방정식은 식(1)에서 다음과 같이 된다.

$$Ep = Lx + Ly + Lz + Ax \times [Y + Z$$

$$\begin{aligned} &+ (OB_0 + BC_0 + CP)_{yz}] \\ &+ Ay \times [Z + (OB_0 + BC_0 + CP)_{xz}] \\ &+ Az \times [OB_0 + BC_0 + CP]_{xy} \end{aligned} \quad (19)$$

3. 오차방정식의 활용

3.1 CMM의 프로브위치 오차보정

CMM의 구조적 요인으로 발생하는 21개의 계통 오차성분은 레이저 인터페로미터(laser interferometer) 등으로 측정가능하고, 이들을 3차원 오차방정식의 인수로 사용된다. 즉, Fig. 1에서와 같이 기준점 O 에서 측정점 P 까지의 오차방정식에 의한 오차벡터(ex, ey, ez)가 구해지면, Fig. 10과같이 CMM 프로브로부터 측정된 실제값(X, Y, Z)으로부터 측정점에서의 오차값을 제한값($X \cdot ex, Y \cdot ey, Z \cdot ez$)을 나타낸다. 이때 오차방정식(오차벡터의 ex, ey, ez)에 필요한 21개의 오차성분 측정데이터를 미리 오차보상 프로그램에 입력시켜 저장하여야

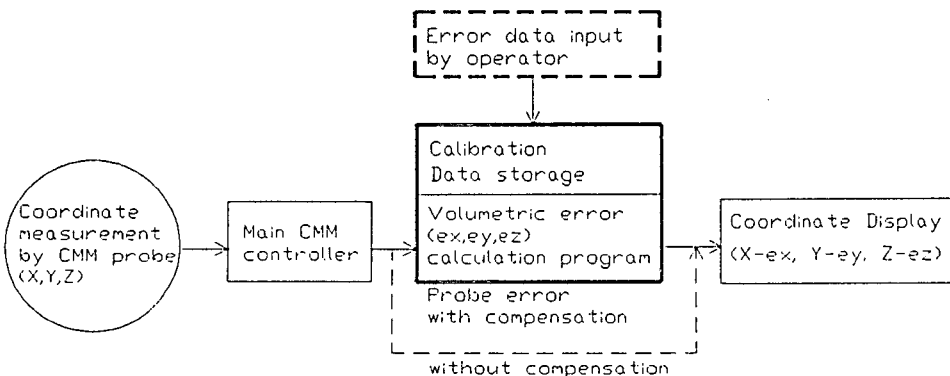


Fig. 10 Block diagram of CMM probe position error compensation using the volumetric error equation

한다. CMM의 사용에 따라 이송장치의 마모 등으로 21개의 오차성분들이 변화하기 때문에 주기적으로 이들 오차성분들을 재측정하여 입력하여야 하지만, 일반적으로 6~12개월 간격으로 가능할 것이다. 이때 측정되는 21개의 오차성분은 Fig. 1과 같은 직육면체의 측정공간에서 기준축(X, Y, Z)에 대하여 일정간격으로 측정하는 것으로 충분하다. 기준축에서의 측정점간격은 사용자가 정하면 되지만, 측정점사이의 오차보상값은 양쪽값의 비례에 의한 보간법으로 계산하기때문에 보다정밀한 오차보정 값을 얻기 위해서는 측정점간격을 미세하게 하여야 할 것이다. 이와 같은 프로브오차 보정방법은 소프트웨어 방법으로도 가능하기 때문에 기존의 CMM 콘트롤러 하드웨어를 수정하지 않고도 가능하여 경제적인 방법이 될 것이다.

3.2 CNC-공작기계에 응용

현재 생산되는 CNC-공작기계의 구조는 3축제어인 경우 대부분 위에서 분류된 CMM의 구조와 비슷하다. Fig. 11은 산업체에서 많이 사용되는 수직 CNC-밀링머신(vertical spindle type CNC-milling machine)의 구조이며, 이것은 테이블이동 방식의 column coordinate CMM (Type B)와 CMM 프로브의 X, Y 방향의 와셋을 제외하고는 같은 구조

이다. 따라서, column coordinate CMM (Type B)의 오차방정식 (11)으로부터, 각도오차에 영향을 주는 프로브 와셋 CP를 제거하면 다음식과같이 된다.

$$EP = Lx + Ly + Lz + Ax \times [Y + Z + (BAo)] + Ay \times [Z + (BAo)_{xz}] + Az \times [BAo]_{xy} \quad (20)$$

3.1절과 같은 방법으로 CNC-공작기계의 스핀들 위치오차 보상을 위하여 위의 식을 사용할 수 있을 것이다.

3.3 계통오차성분의 분석

본 연구에서 구해진 오차방정식은 CMM 및 CNC-공작기계의 구조적 원인에 의한 계통오차의 분석에도 이용될 수 있다. 일반적으로 21개의 계통오차성분을 모두 측정하기 위하여 사용하는 레이저 인터페로미터는 장비의 고가 이외에도 측정시간이 많이 소요된다. 따라서, 간단하게 작업공간에서 두점간의 길이오차를 측정할 수 있는 기구가 최근 여러가지 형태로 개발되었으며,⁽⁴⁾ 여기서는 볼-바(ball bar)로 부른다. 볼-바는 열팽창이 적은 한개의 막대 양끝에 두개의 정밀한 볼이 부착된 형태이며, 볼과 볼 중심사이를 먼저 정밀하게 교정하여 이 것

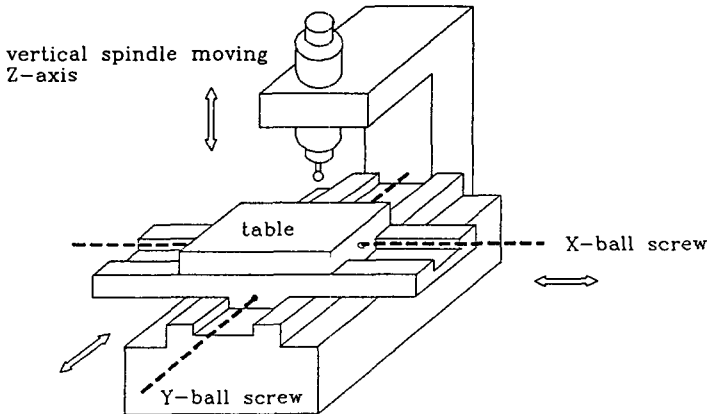


Fig. 11 Moving system of vertical spindle type CNC-milling machine

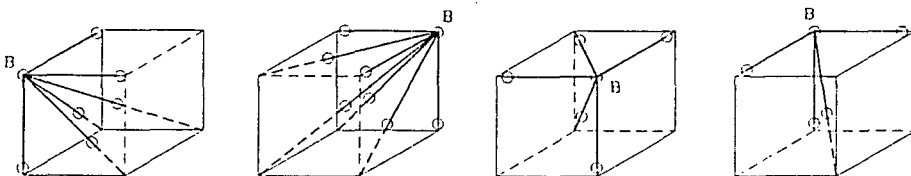


Fig. 12 3-dimensional length measurement using a ball-bar (B : base ball position)⁽⁵⁾

으로 길이측정용 2차 기준기로 사용된다. CMM에서는 먼저 볼-바를 공간에 고정하고, CMM 프로브로 볼-바의 두개 볼의 외부를 접촉하여 볼과 볼중심간의 거리를 CMM의 좌표로 계산하고, 볼-바의 교정길이와 비교하여 CMM의 공간길이오차를 측정하는 방법이다. Fig. 12는 국제규격(ANSI/ASME)에서 추천하는 볼-바를 이용하여 공간에서 여러가지의 방향에서의 CMM의 3차원 길이오차 측정 모드이다.⁽⁵⁾

이와 같은 방법으로 구해진 공간에서의 길이오차는 측정길이(볼-바)방향에서의 오차벡터가 될 것이며, 즉 이것은 오차방정식 (2)의 왼쪽항 Ep 로 될 것이다. 오차방정식은 전술한 바와 같이 21개의 인수로 구성되고, 따라서 다음과 같이 표시될 것이다.

$$Ep = \text{function of } (E_1, E_2, E_3, \dots, E_{21}) \quad (21)$$

여기서, $E_1, E_2, E_3, \dots, E_{21}$ 는 CMM의 21개 계통오차성분이며, 각 측정점에서 달라지는 값이다. 만약, 계통오차의 성분이 측정점 (X, Y, Z) 의 함수와 a, b, c, \dots 를 상수로 하는 다음과 같은 임의의 방정식,

$$E_{1 \dots 21} = \text{function of } (X, Y, Z, a, b, c, \dots) \quad (22)$$

으로 표시될 수 있다면, 위의 식을 식(21)에 대입하고 측정된 오차벡터의 값과 측정점의 좌표(X, Y, Z)를 대입하면, 상수 a, b, c, \dots 에 대한 연립방정식을 들을 구할 수 있을 것이다. 따라서 상수 a, b, c, \dots 의 개수만큼의 충분한 오차벡터의 측정치가 있으면 이 연립방정식을 계산하고 상수 a, b, c, \dots 를 구하여, 결국 식(22)와 같은 계통오차성분을 구할 수 있다.⁽⁶⁾

4. 결 론

본 연구에서 시도된 일반화된 CMM의 오차방정

식은 간단한 기하적인 이해와 함께 여러가지 구조의 CMM에 대하여 적용가능하였다. 정리된 CMM의 오차방정식은 같은 구조의 CNC-공작기계에도 프로브와셋의 보정과 함께 같은 모양으로 사용할 수 있다. 구해진 오차방정식은 CMM 프로브위치보정 또는 CNC-공작기계 스핀들위치오차보정에 사용될 수 있으며, 이 것은 소프트웨어에 의한 방법으로 할 수 있으므로 경제적이다. 또한 오차방정식은, 볼-바 등을 이용하여 오차벡터를 직접 측정하여 오차방정식에 의한 계통오차성분의 분석에도 활용될 수 있음을 보였다.

참고문헌

- (1) Zhang, G., 1985, "Error Compensation of Coordinate Measuring Machines," *Annals of CIRP* Vol. 34 No. 1
- (2) British Standard, 1989, BS 6808 Part-1, 2 : *Coordinate Measuring Machines*,
- (3) Lee, S. E. 1993, "Computer Aided Volumetric Error Calibration of CNC-Machines and Coordinate Measuring Machines by the Artifact Method," Ph. D thesis, UMIST.
- (4) Burdekin M. and Jywe, W., 1991, "Application of CONTISURE for the Verification of the Contouring Performance of Precision Machines," *6th International Precision Engineering Conference*, Germany.
- (5) An American National Standard, 1985, "Method for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines," *ANSI/ASME B89.1. 12M*.
- (6) Burdekin, M. and Lee, E. S., 1994, "Analysis of the Volumetric Accuracy of CNC-machines and CMMs using a Linear Regression Technique," *To be Published by J. of ASPE*.