

3자유도 병렬기구의 위치오차 보정기술에 관한 연구

신욱진*, 조남규⁺

(논문접수일 2004. 3. 4, 심사완료일 2004. 4. 28)

A Study on the Error Compensation of Three-DOF Translational Parallel Manipulator

Wook Jin Shin*, Nahm Gyoo Cho⁺

Abstract

This paper proposed a error compensation methodology for three-DOF translational parallel manipulator. The proposed method uses CMM (coordinate measuring machine) as metrology equipment to measure the position of end-effector. To identify the transform relationships between the coordinate system of the parallel manipulator and the CMM coordinate system, a new coordinate referencing (or coordinate system identification) technique is presented. By using this technique, accurate coordinate transformation relationships are efficiently established. According to these coordinate transformation relationships, an equation to calculate the compensating error components at any arbitrary position of the end-effector is derived. In this paper, Monte Carlo simulation method is applied to simulate the compensation process. Through the simulation results, the proposed error compensation method proves its effectiveness and feasibility.

Key Words : Parallel Manipulator(병렬형 매니플레이터), Error Compensation(오차 보정), Coordinate Measuring Machine(CMM, 3차원 좌표 측정기), Geometric Error(기하학적 오차)

1. 서론

급속도로 발전하고 있는 현대 산업기술과 더불어, 기계 및 전자분야를 필두로 제품의 고기능화 및 고성능화를 달성하기 위한 고 정밀 부품의 생산에 대한 요구가 그 어느 때 보다도 절실한 상태이다. 이를 위해 직렬기구에 비해

상대적으로 높은 정밀도와 정적 특성을 가지는 병렬기구에 대한 많은 연구가 수행되고 있으나, 이러한 병렬기구 역시 오차를 수반하게 되고 정밀한 위치제어를 위한 보정 작업이 필요시 된다.

기구의 보정은 기구 자체의 오차량을 추정하여, 공작기계의 정밀도를 향상시키는 것을 목적으로 한다. 기구의 오차

* 한양대학교 정밀기계공학과 대학원
+ 교신저자, 한양대학교 기계정보경영학부 (ngcho@hanyang.ac.kr)
주소: 426-791 안산시 상록구 사1동

는 크게 계통오차 요인과 우연오차 요인으로 나눌 수 있다. 계통오차는 제작 시 발생하는 크기오차나 각 파트별로 조립 시 발생하는 조립오차와 같은 기구학적으로 모델링이 가능한 오차를 말하며 우연오차는 작업 시 발생하는 외란이나 기구의 변형이나 구동시 발생하는 백래시 같은 기구학적으로 모델링할 수 없는 오차를 말한다. 우연오차는 보정이 어려운 반면 계통오차는 기구학적인 모델링이 가능하고 실제 오차를 줄이는데 있어서도 실용적이고 경제적이다.

기구의 보정은 직렬기구와 병렬기구의 보정으로 나눌 수 있다. 직렬기구의 보정은 가공오차를 예측/규명하고 그 영향을 보상하는 오차규명 및 보상제어에 의한 방법^{1,2)}과 자가규명법^{3,4)}(self-calibration method)이 있다. 오차규명 및 보상제어법은 레이저 간섭계나 기구볼바를 이용한 방법으로 설치 및 방법이 매우 번거롭고 많은 소요시간을 필요로 한다. 또, 자가규명법은 부가적인 측정장비 대신 공작기계 상에 장착되는 프로브와 기준물(reference artifact)을 이용하는 방법이며 설치 등의 번잡한 과정이 없다는 장점을 가지고 있다.

병렬기구 보정법은 크게 전체 구동부 측정/분석에 의한 방법^{5,6)}과 엔드이펙터(end-effector)를 직접 측정하는 방법⁷⁾ 두가지로 나눌 수 있다. 첫번째로, 전체 구동부 측정/분석에 의한 방법은 기구내부에 센서를 부착하여 각 파라미터별 에러를 측정하는 방식으로 실시간 보정과 각 파라미터의 민감도 분석이 가능하지만, 기구 내 다수의 센서장착으로 인해 구동범위에 제한을 가지게 되며 정확한 위치추정이 어렵다. 두 번째로, 엔드이펙터를 직접 측정하는 방법으로 레이저트래킹(laser tracking)을 이용하는 방법이 있으나 고가의 장비이며 정렬이 어렵고 측정기와 기구사이의 좌표계 설정오차가 발생한다는 단점이 있다.

본 논문에서는 병렬기구에서 발생하는 계통오차의 제어를 목적으로 직렬기구 보정법인 자가규명법의 개념을 기초로 하여 병렬기구의 작업 공간상에서 가상의 기준물을 설정하여 측정기와 병렬기구의 좌표계를 동정하는 알고리즘의 제안 및 보정량 산출기술을 제안하고, 그 적용성을 검토하였다.

2. 병렬기구의 위치결정오차 보정법

본 연구에서 제안한 병렬기구 위치결정오차 규명을 위한 시스템의 좌표관계와 기준점들의 개략적인 형태를 Fig.1에 보인다. Fig.1에 보이는 바와 같이, 보정 작업을 위한 병렬기구의 기준 좌표계를 이루는 기준점들의 형상은 설계된 기

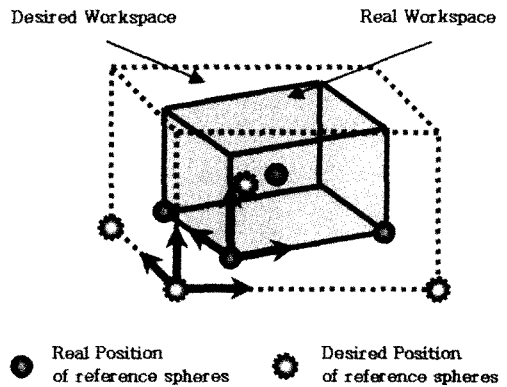


Fig. 1 Geometric relation of desired reference coordinates and real reference coordinates

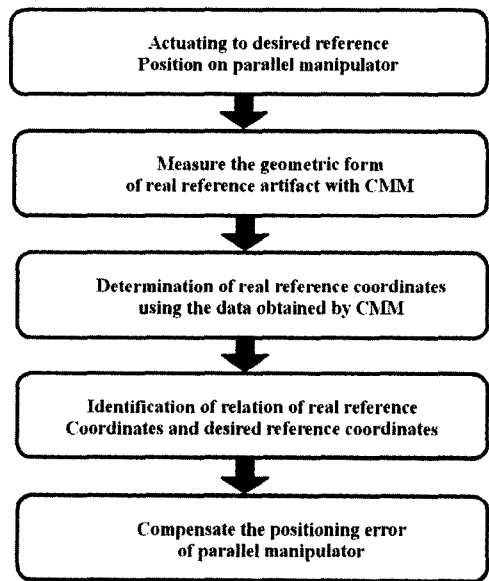


Fig. 2 Error compensation process

구의 기구학적 정보를 이용하여 수직한 영상을 이루는 3점의 정보를 얻는다. 또, 실제 공간의 기준점들의 형상은 병렬기구의 끝단(end-effector)에 정구를 설치하여 수직한 영상을 이루는 3점으로 이동하였을 때 실제 구동된 위치를 3차원 좌표측정기(CMM : Coordinate Measuring Machine)로 측정하여 얻어진다. 기준 좌표계에 의해 표시되는 목적구의 위치정보 역시 병렬기구를 공간상의 위치로 이동시켜 CMM을 통하여 얻어낸다. 목적구가 위치하게 되는 점들은 보정하고자 하는 기구의 작업영역과 보정 후의 목적하는 정

밀도를 고려하여 설정한다. 기구 좌표계의 보정량은 CMM으로 측정된 기준좌표계와 목적구의 형상정보를 토대로 기구 좌표계의 형상정보와 비교하여 그 오차량으로써 산출된다.

보정작업의 주요순서는 Fig. 2와 같다.

먼저 정구를 병렬기구의 엔드이펙터(end-effector)에 설치하고 CMM내에서 병렬기구를 구동시켜 기준점들에 대한 형상정보를 이용하여 실제(real) 기준 좌표계를 결정한다. CMM으로 기준 좌표계와 목적구 사이의 측정 데이터를 이용하여 위치정보를 획득하고 병렬기구에서 이상(desired) 기준좌표계로 좌표변환하여 얻은 데이터를 이용하여 병렬기구의 위치결정 오차를 추정하여 보정량을 산출한다. 최종적으로 비교한 데이터들을 데이터베이스화하여 기구의 위치결정오차를 보정한다.

3. 위치결정오차의 보정량 산출

3.1 좌표계 동정

3.1.1 오차를 포함한 3점 측정

CMM에서 측정된 기준 좌표계 결정부를 구성하는 정구의 좌표를 식 (1)과 같이 표기 하기로 한다.

$${}^cP_i = (x_i, y_i, z_i) \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

같은 방법으로, 병렬기구의 기준 좌표계를 결정하는 정구의 좌표를 식 (2)와 같이 표기하기로 한다.

$${}^mP_i = (x_{im}, y_{im}, z_{im}) \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

측정에 앞서 3점의 위치를 설정하게 되는데, 기준물의 공간을 그림의 정육면체로 표현되는 보정 대상 영역과 같다고 할 경우, Fig. 3에 보이는 바와 같이, 각각의 점 ${}^mP_1, {}^mP_2, {}^mP_3$

을 xy평면의 세 꼭지점에 위치시키고 있으며 mP_1 을 기준으로 x축상에 mP_2 를 위치시키고 y축상에 mP_3 를 위치시킨다. 작업영역 전체에 걸쳐 정구가 흘러져 있도록 배치하는 것이 오차를 최소화 할 수 있으므로 작업영역을 계산 후 적절히 배치하도록 한다. ${}^mP_1, {}^mP_2, {}^mP_3$ 로 이동시킨 세 점들의 실제 구동된 위치는 오차로 인해 ${}^mP_1 + \Delta_1, {}^mP_2 + \Delta_2, {}^mP_3 + \Delta_3$ 가 된다. 이 세 점들을 CMM을 이용하여 측정하고 ${}^mP_1, {}^mP_2, {}^mP_3$ 값들을 얻는다.

3.1.2 작업 공간상의 기준좌표계 설정

한편, 앞서 이미 언급한 바와 같이, 지점 ${}^mP_1, {}^mP_2, {}^mP_3$ 를 각각 병렬기구 좌표계에서 디자인된 수직한 형상의 세 점으로 하고 기준 좌표계의 원점을 mP_1 으로 정의하면,

$${}^mP_o = {}^mP_1 \quad (3)$$

과 같이 주어진다.

또, 기준 좌표계의 x축 방향을 기준 좌표계 원점 mP_1 에서 mP_2 로 향하는 방향으로 정의하고, y축 방향은 기준 좌표계 원점 mP_1 에서 mP_3 로 향하는 방향으로 정의하면, z축 방향은 x축과 y축에 직교하는 방향으로 결정되어 다음과 같이 얻어진다.

$${}^m\hat{x}_r = {}^mP_1{}^mP_2 / |{}^mP_1{}^mP_2| \quad (4)$$

$${}^m\hat{y}_r = {}^mP_1{}^mP_3 / |{}^mP_1{}^mP_3| \quad (5)$$

$${}^m\hat{z}_r = {}^m\hat{x}_r \times {}^m\hat{y}_r \quad (6)$$

또, ${}^mP_1, {}^mP_2, {}^mP_3$ 의 실제 위치인 ${}^cP_1, {}^cP_2, {}^cP_3$ 로써 좌표계를 정의하게 되는데, Fig. 4에서 보이는 바와 같이 세

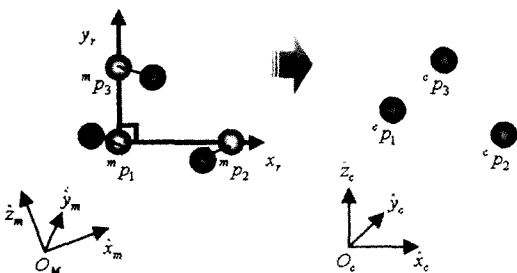


Fig. 3 The real position and desired position of reference

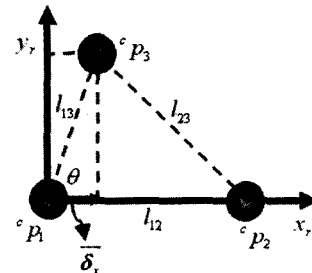


Fig. 4 Geometry of real reference coordinates system

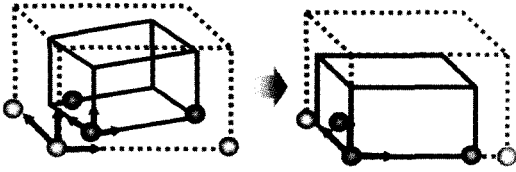


Fig. 5 Identification of two reference coordinates systems

점들의 관계는 오차로 인해 수직한 형상을 가지지 않는다. 그래서 먼저, cP_1 을 기준 좌표계의 원점으로 정의하고, cP_2 가 x 축 상에 있도록 x 축을 정의하고, cP_3 가 xy 평면 위에 있도록 하여 y 축을 정의하고 하고, x 축과 y 축에 직교하는 방향으로 z 축을 정의한다.

$${}^cP_o = {}^cP_1 \quad (7)$$

$${}^c\hat{x}_r = \overrightarrow{{}^cP_1P_2}/l_{12} \quad (8)$$

$${}^c\hat{y}_r = (\overrightarrow{{}^cP_1P_3} - \delta_{xc})/l_{13}\sin\theta \quad (9)$$

$$\overrightarrow{\delta_x} = l_{13}\cos\theta \cdot \hat{x}_r \quad (10)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{l_{12}^2 + l_{13}^2 - l_{23}^2}{2l_{12}l_{13}}\right) \quad (11)$$

$${}^c\hat{z}_r = {}^c\hat{x}_r \times {}^c\hat{y}_r \quad (12)$$

3.1.3 기준 좌표계 일치

이상에서 보듯 병렬기구의 좌표값으로 이루어진 기준 좌표계는 CMM의 좌표값으로 이루어진 기준 좌표계와 비교할 때 이상 좌표계와 실제 좌표계의 관계로 표현될수 있다. 보정작업에 앞서 이 두 좌표계의 x 축, y 축, z 축을 일치시켜 스케일이 서로 다른 두 좌표계의 동정 작업을 완료한다.

3.2 보정량 산출

3.2.1 좌표계 변환

앞의 3.1.2절에서 설명한 방법에 의해 결정된 좌표계는 식 (13), (14)와 같은 동차변환 행렬식(homogeneous transformation matrix)으로서 주어지는 변환식에 의해 변환되어 적용된다.

식 (13)은 기준 좌표계를 결정함에 있어 병렬기구 좌표계에서 기준 좌표계로의 변환식이고, 식 (14)는 CMM좌표계에서 기준 좌표계로의 변환식이다.

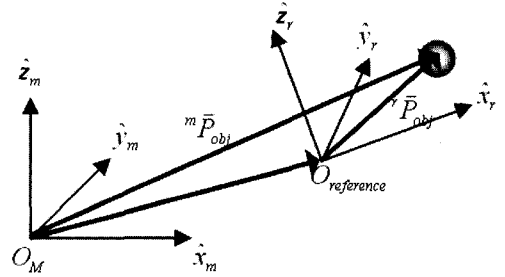


Fig. 6 Relationships between the manipulator coordinates system and the reference coordinates system

$${}^m_rT = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$n_x = \hat{x}_r \cdot \hat{x}_{1m} \quad n_y = \hat{x}_r \cdot \hat{y}_{1m} \quad n_z = \hat{x}_r \cdot \hat{z}_{1m}$$

$$o_x = \hat{y}_r \cdot \hat{x}_{1m} \quad o_y = \hat{y}_r \cdot \hat{y}_{1m} \quad o_z = \hat{y}_r \cdot \hat{z}_{1m}$$

$$a_x = \hat{z}_r \cdot \hat{x}_{1m} \quad a_y = \hat{z}_r \cdot \hat{y}_{1m} \quad a_z = \hat{z}_r \cdot \hat{z}_{1m}$$

$$p_x = x_{1m} \quad p_y = y_{1m} \quad p_z = z_{1m}$$

$$\hat{x}_m = (1, 0, 0), \quad \hat{y}_m = (0, 1, 0), \quad \hat{z}_m = (0, 0, 1)$$

$${}^c_rT = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$n_x = \hat{x}_r \cdot \hat{x}_{1c} \quad n_y = \hat{x}_r \cdot \hat{y}_{1c} \quad n_z = \hat{x}_r \cdot \hat{z}_{1c}$$

$$o_x = \hat{y}_r \cdot \hat{x}_{1c} \quad o_y = \hat{y}_r \cdot \hat{y}_{1c} \quad o_z = \hat{y}_r \cdot \hat{z}_{1c}$$

$$a_x = \hat{z}_r \cdot \hat{x}_{1c} \quad a_y = \hat{z}_r \cdot \hat{y}_{1c} \quad a_z = \hat{z}_r \cdot \hat{z}_{1c}$$

$$p_x = x_{1c} \quad p_y = y_{1c} \quad p_z = z_{1c}$$

$$\hat{x}_c = (1, 0, 0), \quad \hat{y}_c = (0, 1, 0), \quad \hat{z}_c = (0, 0, 1)$$

각각의 동차 변환 행렬식을 이용하여 Fig. 6에서 보이는 것처럼 기준 좌표계상에서의 목적구 벡터를 구하면, desired 기준 좌표계로 정의된 벡터는 다음과 같이 표현되며

$${}^m\vec{P}_{o, desire} = {}^r\vec{P}_{obj} = {}^m_rT {}^r\vec{P}_{obj} \quad (15)$$

실제 기준 좌표계로 정의된 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$${}^c\vec{P}_{o, comp} = {}^r\vec{P}_{obj} = {}^c_rT {}^r\vec{P}_{obj} \quad (16)$$

3.2.2 목적구의 보정량 산출

실제 기준 좌표계에서 얻어진 목적구의 위치벡터 ${}^c\vec{P}_{o,comp}$ 는 병렬기구의 계통오차를 포함한 실제 값이다. 그러므로 병렬기구 계통오차의 보정량 e_{scale} 은 두 벡터 ${}^c\vec{P}_{o,comp}$ 와 ${}^m\vec{P}_{o,comp}$ 의 차로 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{scale} = {}^c\vec{P}_{o,comp} - {}^m\vec{P}_{o,desire} \quad (17)$$

여기서,

$$\begin{aligned} {}^c\vec{P}_{o,comp} &= (x_{o,comp}, y_{o,comp}, z_{o,comp})^T \\ {}^m\vec{P}_{o,comp} &= (x_{o,desire}, y_{o,desire}, z_{o,desire})^T \end{aligned}$$

그러므로 목적구의 보정량은 식 (18)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} e_{xscale} &= x_{o,comp} - x_{o,desire} \\ e_{yscale} &= y_{o,comp} - y_{o,desire} \\ e_{zscale} &= z_{o,comp} - z_{o,desire} \end{aligned} \quad (18)$$

따라서, 엔드이펙터를 보정 공간상의 여러 위치로 이동시켜, CMM을 이용하여 측정하고, 측정된 데이터를 통하여 보정량을 얻고 그 값들을 저장하여 실제 병렬기구의 작업시에 보정하여 사용한다.

3.3 적용된 병렬기구의 모델링

3.3.1 순기구학, 역기구학

앞서 제안된 보정 알고리즘의 검토를 위하여 여러 병렬기구 중 적합한 모델을 선정하여 적용하여 보았다. 여기서 검토된 병렬기구의 모델이 Fig. 8에 보여지고 있다.

이 모델은 HSM형 병렬기구의 형태로 침단부가 회전이 일어나지 않고 병진 운동만을 하는 특징을 가지고 있으며,

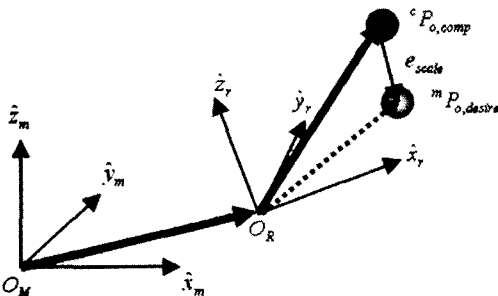


Fig. 7 Compensated position of object sphere

다른 병렬 기구에 비해 넓은 작업영역을 가진다는 것과 구동부가 베이스에 설치된다는 장점을 가지고 있다.

Fig. 9은 병렬기구의 벡터도식을 그린 것이다.

순기구학적 관계는 다음 식 (19)와 같으며,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_1 - A_2 & B_1 - B_2 \\ A_1 - A_3 & B_1 - B_3 \end{bmatrix}^{-1} \\ &\begin{bmatrix} l_1^2 - l_2^2 + A_2^2 + B_2^2 - (A_1^2 + B_1^2) \\ l_1^2 - l_3^2 + A_3^2 + B_3^2 - (A_1^2 + B_1^2) \end{bmatrix} \\ z_s &= \sqrt{l^2 - (x_s + A_1)^2 - (y_s + B_1)^2} + l_s \end{aligned} \quad (19)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_i &= r \cos \theta_\pi - \lambda_i \cos \theta_{bi} \\ B_i &= r \sin \theta_\pi - \lambda_i \sin \theta_{bi}, \quad (i = 1, 2, 3) \end{aligned}$$

역기구학적 관계는 다음 식 (20)과 같다.

$$\lambda_i = A + \sqrt{A^2 - B} \quad (20)$$

여기서,

$$A_i = \cos \theta_{bi}(x_s + r \cos \theta_\pi) + \sin \theta_{bi}(y_s + r \sin \theta_\pi)$$

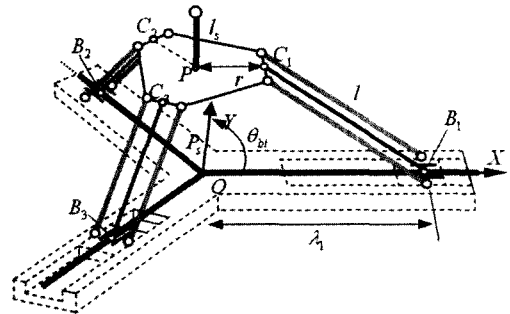


Fig. 8 Schematic of three-DOF translational parallel manipulator

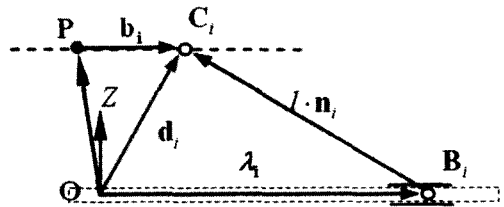


Fig. 9 Vector diagram for a kinematic chain of three-DOF translational parallel manipulator

$$B_i = (x_s + r \cos \theta_\pi)^2 + (y_s + r \sin \theta_\pi)^2 + (z_s - l_s)^2 - l^2$$

$i = 1, 2, 3$

4. 병렬기구의 보정성능

본 연구에서 제안한 좌표계 동정을 통한 오차 보정법은 병렬기구가 갖는 계통오차를 제거하기 위한 것이므로, 우연 오차에 의한 영향은 여전히 남아있게 된다. 그리고, 보정작업 시 유입되는 측정오차나 진구도오차, 작업중의 외란을 포함한 여러가지 오차들이 보정량에 포함되며 그 보정량은 불확도를 갖는다. 보정량 산출을 위한 측정 중에 유입된 오차는 Fig. 10에서 보이는 것과 같이 보정 과정 중에 순차적으로 전파되며, 최종적으로는 보정오차의 형태로 나타나게 된다.

이러한 보정오차를 검토하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 적용하였으며 각 검토사항

에 대해 1000회씩 수행하였다. 우연오차 성분으로 CMM의 측정분해능(0.5 μ m)과 엔드이펙터에 설치되는 정구의 진구도(1 μ m)와 병렬기구에서 발생하는 정밀오차로 구동오차(0.1 μ m, 1 μ m, 5 μ m)가 고려되었으며 병렬기구의 계통오차는 작업영역의 각 축에 대해 2%로 하였다.

우연오차의 경우 정규분포(Normal distribution)와 사각분포(Uniform distribution)의 두 가지 분포형태를 고려하였으며 정규분포의 경우 분해능의 한계구간을 99% 신뢰구간으로 생각하여 오차성분이 발생되었으며, 사각분포의 경우 분해능의 한계구간이 사각분포구간과 동일하게 설정되었다.

4.1 좌표계 결정오차

Table 1과 Table 2에 보정작업시 발생하는 우연오차에 의한 기준 좌표계의 결정성능을 보인다.

Table의 값들은 식 (21)와 식 (22)에서 보이는 바와 같이 세 좌표축 값들을 합성하여 구하였다.

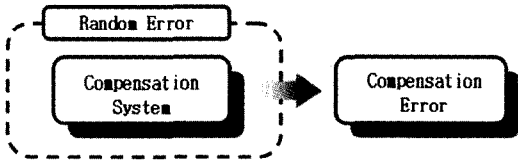


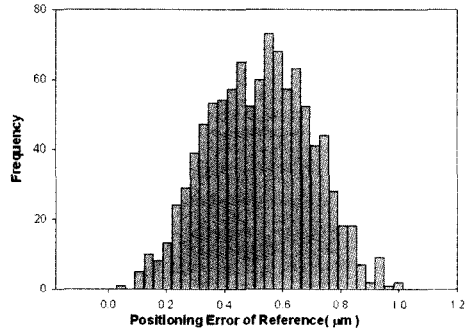
Fig. 10 Uncertainty propagation in compensation system

Table 1. Uncertainties of reference coordinates system generated from the measuring error

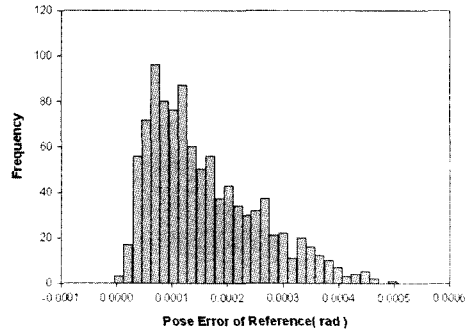
Measuring Error [μ m]	Uniform Distribution		Normal Distribution	
	$(e_p)_{rms}$ [μ m]	$(e_\theta)_{rms}$ [rad]	$(e_p)_{rms}$ [μ m]	$(e_\theta)_{rms}$ [rad]
$e_{m1}=0.5$	0.56	0.2×10^{-3}	0.32	0.1×10^{-3}
$e_{m2}=1.0$				

Table 2. Uncertainties of reference coordinates system generated from the actuating error

Manipulator precision error(e_a) [μ m]	Uniform Distribution		Normal Distribution	
	$(e_p)_{rms}$ [μ m]	$(e_\theta)_{rms}$ [rad]	$(e_p)_{rms}$ [μ m]	$(e_\theta)_{rms}$ [rad]
$e_a=0.1$	0.04	0.14×10^{-4}	0.02	0.83×10^{-5}
$e_a=1.0$	0.38	0.15×10^{-3}	0.22	0.84×10^{-4}
$e_a=5.0$	1.89	0.69×10^{-3}	1.07	0.43×10^{-3}



(a) Positioning Error



(b) Pose Error

Fig. 11 Estimation error from measuring process due to uniform distributed error($e_{m1} = 0.5\mu$ m, $e_{m2} = 1\mu$ m, population : 1000)

$$e_p = \sqrt{e_{px}^2 + e_{py}^2 + e_{pz}^2} \quad (21)$$

$$e_\theta = \sqrt{e_{\theta\alpha}^2 + e_{\theta\beta}^2 + e_{\theta\gamma}^2} \quad (22)$$

Table 1에서의 e_{m1} , e_{m2} 는 각각 CMM측정오차와 진구도오차를 의미하며 Table 2에서의 e_a 는 병렬기구의 구동오차를 의미한다.

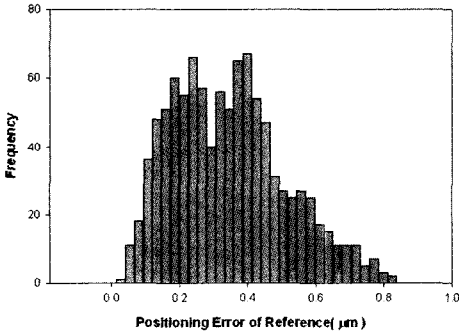
기준좌표의 원점은 병렬기구 좌표계로 $x = -5.92\text{mm}$, $y = -5.93\text{mm}$, $z = 60.69\text{mm}$ 로 설정하였으며, 시뮬레이션을 수행한 결과 기준 좌표계 원점의 위치파악 결과에 보이는 불확도 e_p 와 기준좌표계의 자세파악 결과에 보이는 불확도 e_θ 는 측정오차로 인한 경우 각축에 동일한 값을 보이는 것을 알 수 있었으나 병렬기구의 정밀오차의 경우 축마다 다른 값을 가지게 되는데 이는 축에 따라 구동부에 대한 민감도가 다르기 때문에 발생한 것으로 사료된다.

균일분포의 형태를 따르는 원인오차 성분 중 측정오차로

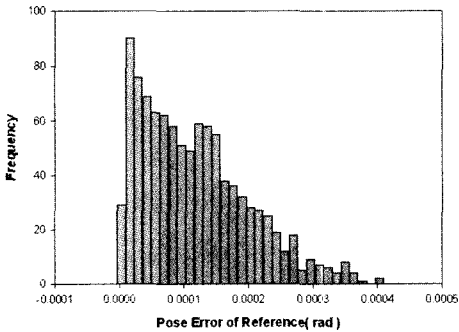
인한 기준좌표계 원점위치 및 자세오차의 분포형태를 Fig. 11에 보이며, 구동오차로 인한 기준좌표계 위치 및 자세오차의 분포형태를 Fig. 12에 보이고 있다. 각각의 분포 형태들은 세 축의 합성한 결과로 나타내었다.

4.2 위치 결정오차

병렬기구 계통오차의 보정량 결정을 위해, 이제까지 검토한 기준 좌표계결정을 통해 목적구의 위치파악 능력의 검토 결과를 사각분포와 정규분포의 경우로 나눠 각각 Table 3에 보이고 있다. 목적구 위치의 추정 성능 평가를 위해, 목적구의 위치는 작업영역 내에서 기준 좌표계의 원점으로부터 최대거리에 있도록 설정되었다. 이것은 목적구의 위치가 기준물의 원점에서 거리가 멀어질수록, 기준 좌표계 추정오차의 영향에 의해 목적구 위치의 추정 성능이 저하하기 때문에, 비교적 큰 오차의 발생을 관찰하기 위한 것이다.



(a) Positioning Error

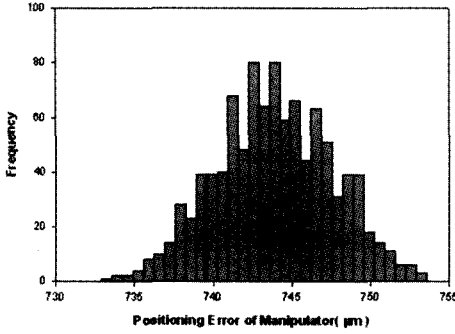


(b) Pose Error

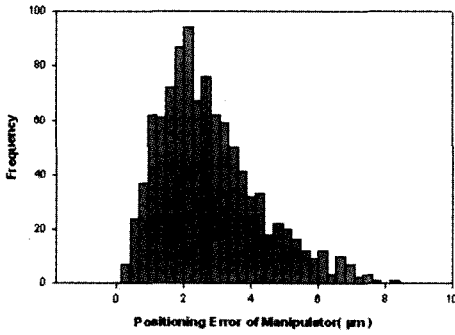
Fig. 12 Estimation error from actuating process of the manipulator due to uniform distributed error ($e_{m1} = 0.5\mu\text{m}$, $e_{m2} = 1\mu\text{m}$, population : 1000)

Table. 3 Estimated positioning error in workspace of parallel manipulator after compensation (Uniform distribution, Population:1000)

CMM Measuring Error[μm] (3σ)	Roundness Error[μm] (3σ)	Manipulator precision Error[μm] (3σ)	$(\sqrt{\Delta x^2 \Delta y^2 + \Delta z^2})_{\max}$ [μm] (confidence interval 99%)
0	0	0	0
		0.05	0.25
		0.5	2.41
	0.5	2.5	12.61
		0	3.62
		0.05	3.63
0.25	0	0.5	4.33
		2.5	13.02
		0	1.84
	0.5	0.05	1.89
		0.5	3.09
		2.5	12.90
0.5	0	4.04	
	0.05	4.07	
	0.5	4.89	
	2.5	13.00	



(a) Positioning error before error compensation

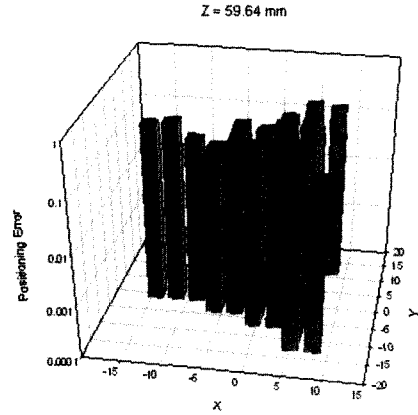


(b) Positioning error after error compensation

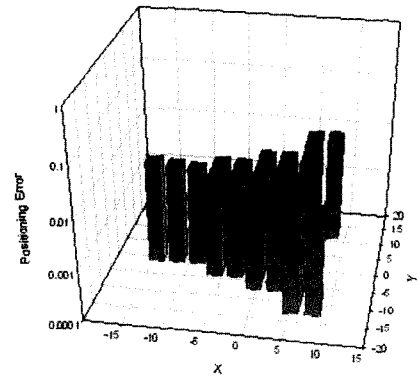
Fig. 13 Positioning error due to uniform distributed error ($e_{m1} = 0.5\mu\text{m}$, $e_{m2} = 1\mu\text{m}$, $e_a = 5\mu\text{m}$, population : 1000 $x = 8.10\text{mm}$, $y = 11.87\text{mm}$, $z = 59.64\text{mm}$)

Table3의 결과로부터, 이 우연오차 크기에 따른 위치결정 오차의 한계구간을 알 수 있다.

보정 알고리즘을 이용해 계통오차를 제거한 결과와 계통오차를 무시한 알고리즘을 사용한 결과 비교를 최대오차가 발생하는 지점에서 각 축에 발생하는 오차들을 합성한 결과를 Fig. 13에 보인다. Fig. 13(a)에서 보는 바와 같이 약 740~750 μm 정도의 바이어스 오차가 (b)에서는 거의 제거됨을 확인할 수 있다. Fig. 14은 xy 평면에 대한 전체적인 경향을 보이고 있으며, 기준좌표 원점으로부터 멀어질수록, 작업영역의 가장자리일수록, 위치결정오차가 커지는 것을 볼 수 있다. (a)의 결과는 보정작업을 하지 않고 추정된 위치오차를 보이며 (b)는 제안된 알고리즘을 통하여 추정된 위치오차를 보인다. 측정에 유입된 우연오차 등의 영향에 의해 두 결과 모두 산포하고 있으나, (a)의 결과는 병렬기구가 갖는 스케일오차의 영향으로 전체적으로 바이어스된 추정값



(a) Positioning error before error compensation



(b) Positioning error after error compensation

Fig. 14 Positioning error in XY section due to uniform distributed error($e_{m1} = 0.5\mu\text{m}$, $e_{m2} = 1\mu\text{m}$, $e_a = 5\mu\text{m}$, population : 1000, $z = 59.64\text{mm}$)

을 보이고 있으며, (b)의 결과는 이러한 영향이 제거되고 있음을 알 수 있다

5. 결론

정밀도 향상을 목적으로 새로운 보정 기법을 제안 하고, 병렬기구에 적용시켜 적용 가능성을 검토한 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) CMM과 정구를 이용하여 새로운 병렬기구의 위치오차 보정법을 제안하였다.
- (2) 기구학적 오차를 갖는 병렬기구의 작업영역 내에서, 그

영향을 제거하여 효율적으로 좌표계 및 형상 파악이 가능한 알고리즘을 제안하였다.

- (3) 불확도 분석에 의해 보정량의 추정성능을 평가하고, 본 연구에 의해 제안된 보정법의 적용가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Donmez, M. A., Blomquist, D. S., Hocken, R. J., Liu, C. R., and Barash, M. M., 1986, "A General Methodology for Machine Tool Accuracy Enhancement by Error Compensation," *Precision Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 187~196.
- (2) Mou, J., and Liu, C. R., 1995, "A methodology for Machine Tools Error Correction using Reference Parts," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 8, No. 1, pp. 64~77.
- (3) Kruth, J. P., Vanherck, P., and De Jonge, L., 1994, "Self-calibration Method and Software Error Correction for Three-dimensional Coordinate Measuring Machines using artefact Measurements," *Measurement*, Vol. 14, pp. 157~167.
- (4) Kim, K. D., and Chung, S. C., 2000, "Error Identification and Compensation for NC Machine Tools Using the Reference Artifact," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 9, No. 2, pp. 102~111.
- (5) Zhuang, H., 1997, "Self-Calibration of Parallel Mechanisms with a Case Study on Stewart Platforms," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 13, No. 3, pp. 387~397.
- (6) Zhuang, H., and Liu, L., 1996, "Self-Calibration of Parallel manipulators," *Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 994~999.
- (7) Newman, W. S., and Osborn, D. W., 1993, "A New Method for Kinematic Parameter Calibration via Laser Line Tracking," *Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 160.