

CMM 을 이용한 3 자유도 병렬기구 위치 오차의 정밀 평가 기법

권기환*, 박재준*, 이일규*, 조남규#, 양현익**

Precision Evaluation Method for the Positioning Error of Three-DOF Parallel Mechanism using Coordinate Measuring Machine (CMM)

Ki Hwan Kwon*, Jae-Jun Park*, Il Gyu Lee*, Nahm Gyoo Cho#, Hyun Ik Yang**

ABSTRACT

This paper proposes precision evaluation method for the positioning error of three-DOF translational parallel mechanism. The proposed method uses conventional CMM as metrology equipment to measure the position of end-effector. In order to obtain accurate measurement data from CMM, the transform relationship between the coordinate system of the parallel mechanism and the CMM coordinate system must be identified. For this purpose, 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 error components at any arbitrary position of the end-effector is derived. In addition, mathematical fitting models to represent the position error components in the two-dimensional workspace of the parallel mechanism are also constructed based on response surface methodology. The proposed error evaluation method proves its effectiveness through the experimental results and its application to real three-DOF parallel mechanism.

Key Words: Parallel Mechanism(병렬 기구), Positioning error(위치결정오차), Coordinate Measuring Machine(CMM, 3 차원 좌표 측정기)

1. 서론

산업용 로봇분야에서 널리 채용되고 있는 직렬구조(serial mechanism)는 베이스(base)와 엔드 이펙터(end effector)사이를 하나의 링크 트레인(link train)을 연결하는 외팔보 형태로, 넓은 작업공간과

높은 유연성을 가지며, 제어부가 간단한 장점을 갖고 있으나 구조상 강성이 낮고, 각 조인트에 대한 오차들이 엔드 이펙터에 누적되어 정밀도가 떨어지는 단점을 갖고 있다. 이러한 직렬기구의 단점을 극복하기 위한 대안으로써 병렬기구(parallel mechanism)가 80년대 중반부터 활발히 연구되어

* 접수일: 2004년 3월 3일; 게재승인일: 2004년 8월 13일

* 한양대 대학원 정밀기계 공학과

교신저자: 한양대 기계 공학과

E-mail ngcho@hanyang.ac.kr Tel. (031) 400-5286

** 한양대 기계·정보·경영공학부

왔다. 병렬기구는 구조적으로 폐루프(closed-loop) 형상을 지니고 있으므로, 구조강성이 높고 고속작업에 적합하며, 구조상 각 조인트 및 구동기의 오차가 엔드 이펙터에 누적되지 않아 직렬구조에 비해 이론적으로 높은 정밀도를 갖는 장점을 갖는다. 그러나, 병렬기구는 부품의 가공 및 조립과정에서 발생하는 치수공차 및 조립오차 등에 의해 처음 설계시 요구되었던 측정 정밀도를 얻기가 힘들기 때문에 실제 적용을 위해서는 병렬기구의 위치 오차를 분석/평가하고, 각종 오차 요인을 기구학적으로 보정해 주어야 한다. 현재까지 사용되고 있는 직렬 또는 병렬기구의 보정법으로는 외부 측정기기 및 센서를 이용하여 엔드 이펙터의 위치/자세를 직접 측정하여 기구학적 변수들을 규명하는 기구학적 교정법이 일반적이다.

엔드 이펙터의 포즈(pose)를 측정하는 방법으로는 레이저 간섭계(laser interferometer)¹, 레이저 트래킹(laser tracking)^{2,3}, 비전 시스템(vision system)⁴, 경의의(theodolite)⁵, 수평계(inclinometer)⁶ 등이 이용된다. 이러한 측정방법들은 보정의 직접적인 대상인 엔드 이펙터를 직접 측정할 수 있다는 장점을 갖고 있음에도 불구하고, 설치가 복잡하고 시간이 오래 걸리는 단점을 갖고 있으며 특히, 측정시 설치오차의 영향을 제거하기 위해 정밀 얼라인먼트(alignment)기술이 요구된다. 한편, Sato⁷ 등은 병렬기구의 보정을 위해 엔드 이펙터의 위치를 측정하는 방법으로 CMM 을 이용하였다. CMM 은 측정 프로브를 접촉시켜 물체의 3 차원 좌표 정보를 얻는 정밀 측정 장비로써, 서브 마이크로미터(sub-micrometer)의 고분해능으로 엔드 이펙터의 위치 측정이 가능하다. 그러나, Sato 는 측정을 위한 병렬기구의 설치시 CMM 좌표계와 병렬기구 좌표계 간의 불일치가 측정 오차에 미치는 영향을 고려하지 않았다. 따라서, 엄밀한 위치 결정 오차의 평가를 위해서는 좌표계 불일치가 측정에 미치는 영향을 제거 시켜야 한다.

본 논문에서는 병렬 기구의 보정에 적용하기 위해 CMM 을 이용한 병렬기구 위치결정 오차의 정밀 평가법이 제시되었다. 제안된 방법에서는 CMM 에 의한 측정시 좌표계간 불일치가 측정 오차에 미치는 영향을 제거하기 위해 공간상에 기준 좌표계(reference coordinate system)를 설정하고, 이를 매개로 하여 CMM 좌표계와 병렬기구 좌표계간의 관계를 규명하는 새로운 좌표계 동정(coordinate

system identification) 알고리즘이 고안된다. 또한, 동정된 좌표 관계를 이용하여 주어진 구동영역에 대한 위치 결정 오차의 산출 및 평가 방법이 논의된다. 본 논문의 2 절에서는 적용된 3 자유도 병렬기구의 구조와 기구학적 해석이 설명되며, 3 절과 4 절에서는 제안된 위치 오차 평가 방법이 설명되고 이를 적용한 실험결과들이 제시된다.

2. 적용된 병렬기구의 구조 및 기구학

2.1 기구 구조

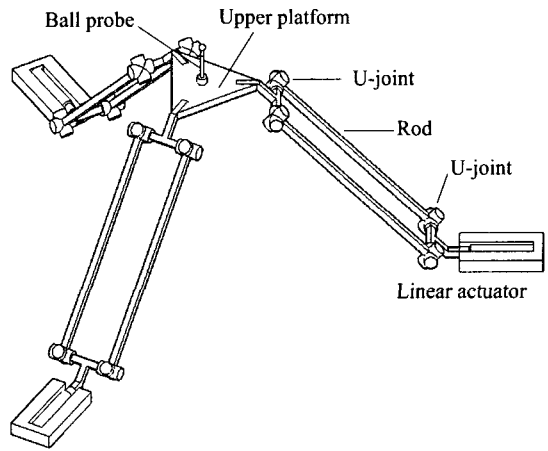


Fig. 1 Schematic of translational three-DOF parallel mechanism

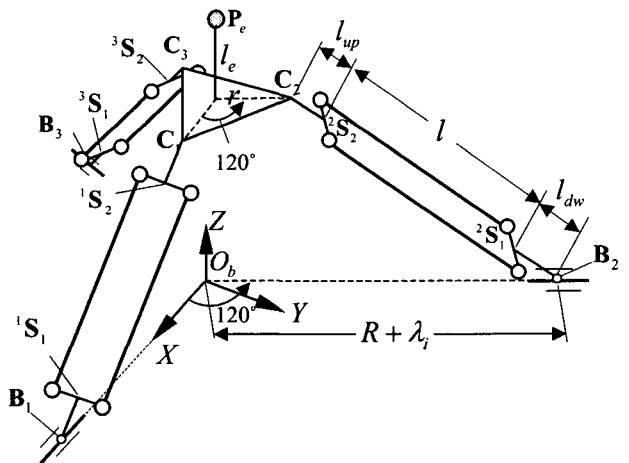


Fig. 2 Definition of geometrical parameters

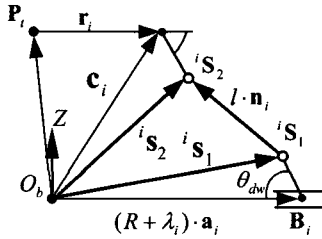


Fig. 3 Vector diagram for a kinematic chain

Fig.1 은 3 자유도 병렬 메카니즘의 기구구조를 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이, 기구는 3-PUU 형태의 구조를 갖는다⁸. 베이스 부에는 선형 액츄에이터(linear actuator)가 120°간격으로 배치되며, 각각의 선형 액츄에이터와 상판 사이는 두 쌍의 로드(rod)와 유니버설 조인트(universal joint)로 구성된 평행 크랭크 메커니즘(parallel crank mechanism)으로 연결 되어있다. 따라서, 상판에 부착되는 엔드 이펙터는 평행 크랭크 메커니즘에 의해 회전 운동 없이 3 자유도의 병진 운동만 발생하게 된다. Fig.2 는 병렬 메커니즘의 기구학적 모델링을 위해 정의되는 기구 변수들을 보인다. Fig.2 에서 r 은 상판의 반경, l_c 는 구형 엔드 이펙터의 중심 P_e 와 상판의 중심점 사이의 길이를 각각 나타낸다. 또한, 임의의 기구학적 체인(kinematic chain), $i(i=1, 2, 3)$ 에 대하여 l 은 유니버설 조인트 사이의 링크길이, l_{up} 은 상부 유니버설 조인트들을 연결하는 링크의 중심 iS_2 와 상판의 꼭지점 C_i 사이의 길이, l_{dw} 은 하부 유니버설 조인트들을 연결하는 링크의 중심 iS_1 와 선형 구동기의 동작점 B_i 사이의 길이를 각각 나타낸다. 마지막으로, R 은 초기 상태에서 원점 O_b 와 B_i 사이의 길이를 나타내며, λ_i 는 입력 구동변위를 나타낸다.

2.2 기구학(Kinematics)

적용된 병렬기구의 정기구학은 주어진 입력 구동벡터 $\lambda=[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$ 에 대하여 상판에 장착된 엔드 이펙터의 위치 벡터 $P_e=[x_e, y_e, z_e]^T$ 를 구하는 것이다. 한 개의 기구학적 체인에 대한 변수들 사이의 벡터 관계가 Fig.3 에 보인다. 그림에서 보는 바와 같이, 위치 벡터 iS_1 과 iS_2 는 일정한 길이 l 를 갖는 링크에 의해 식(1)과 같은 구속 방정식이 얻어진다.

$$\|{}^iS_2 - {}^iS_1\| = l^2 \quad (1)$$

또한, iS_1 과 iS_2 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^iS_1 = \begin{bmatrix} (R - \lambda_i - l_{dw} \cos \theta_{dw}) \cos \theta_{bi} \\ (R - \lambda_i - l_{dw} \cos \theta_{dw}) \sin \theta_{bi} \\ l_{dw} \sin \theta_{dw} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^iS_2 = \begin{bmatrix} x_e + (r + l_{up} \cos \theta_{up}) \cos \theta_{pi} \\ y_e + (r + l_{up} \cos \theta_{up}) \sin \theta_{pi} \\ z_e - l_c - l_{up} \sin \theta_{up} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, 각도 θ_{up} 과 θ_{dw} 는 같은 값을 지니며, 식 (1)의 관계로부터 정기구학의 해 $P_e=[x_e, y_e, z_e]^T$ 는 식 (4)와 같이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i - A_2 & B_i - B_2 \\ A_i - A_3 & B_i - B_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_2^2 + B_2^2 - (A_1^2 + B_1^2) \\ A_3^2 + B_3^2 - (A_1^2 + B_1^2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$z_e = \sqrt{l^2 - (x_e + A_i)^2 - (y_e + B_i)^2} + (l_{up} + l_{dw}) \sin \theta_{up} + l_c$$

식(4)에서 A_i 와 B_i 는 각각 식(5)와 (6)으로써 표현되며,

$$A_i = \hat{r} \cos \theta_{pi} - (\hat{\lambda}_i) \cos \theta_{bi} \quad (i=1,2,3) \quad (5)$$

$$B_i = \hat{r} \sin \theta_{pi} - (\hat{\lambda}_i) \sin \theta_{bi} \quad (6)$$

또한, \hat{r} 와 $\hat{\lambda}_i$ 는 각각 식(7)과 (8)로써 표현된다.

$$\hat{r} = r + l_{up} \cos(\theta_{up}) \quad (7)$$

$$\hat{\lambda}_i = R - \lambda_i - l_{dw} \cos(\theta_{dw}) \quad (8)$$

여기서, θ_{pi} 와 θ_{bi} 는 각각 0, 2/3π, 4/3π 값을 갖는다. 한편 역기구학은 엔드 이펙터의 위치 P_e 로부터 입력 구동벡터 λ 를 계산하는 것이다. 식(1)의 구속 방정식을 이용하면 정기구학의 해 $\lambda=[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$ 는 식 (9)와 같이 얻어진다.

$$\lambda_i = R - l_{dw} \cos(\theta_{dw}) - C - \sqrt{C^2 - D} \quad (i=1,2,3) \quad (9)$$

여기서, C 와 D 는 다음과 같이 표현된다.

$$C = \cos \theta_{bi} (x_e + \hat{r} \cos \theta_{pi}) + \sin \theta_{bi} (y_e + \hat{r} \sin \theta_{pi}) \quad (10)$$

$$D = (x_e + \hat{r} \cos \theta_{pi})^2 + (y_e + \hat{r} \sin \theta_{pi})^2 + (z_e - l_e - (l_{up} + l_{dw}) \sin \theta_{up})^2 - l^2 \quad (11)$$

본 절에서 유도된 기구학식은 작업 공간내에서 엔드 이펙터를 공간상의 임의의 위치로 이동시키기 위한 기준 모델식으로 사용된다.

3. CMM 을 이용한 위치 오차 산출/평가법

본 연구에서 제안된 CMM 을 이용한 3 자유도 병렬기구의 위치 오차 산출 및 평가 과정은 크게 좌표계 동정과정과 위치 오차 산출 과정의 두 부분으로 나뉘어진다. 좌표계 동정과정은 2 절에서 유도된 기구학식을 이용하여 엔드 이펙터의 위치를 공간상의 3 점으로 이동시키고, CMM 을 이용하여 이동된 3 점의 위치를 측정한다. 3 점의 좌표 정보로부터 공간상의 기준 좌표계를 정의하고, 설정된 기준 좌표계를 매개로하여 CMM 좌표계와 병렬기구 좌표계를 동정한다. 한편, 병렬기구의 위치 오차 산출과정은 동정된 좌표계 관계를 기준으로 엔드 이펙터의 목적 위치와 CMM 으로 측정된 위치를 비교하여 주어진 목적위치들에 대한 병렬기구의 오차를 산출/평가하는 것이다

3.1 좌표계 동정

병렬기구 좌표계와 CMM 좌표계간의 동정을 위해 기준 좌표계를 정의하기 위한 공간상의 3 점의 위치가 Fig. 4 에 나타낸 바와 같이 결정되며, 그 과정은 다음과 같다.

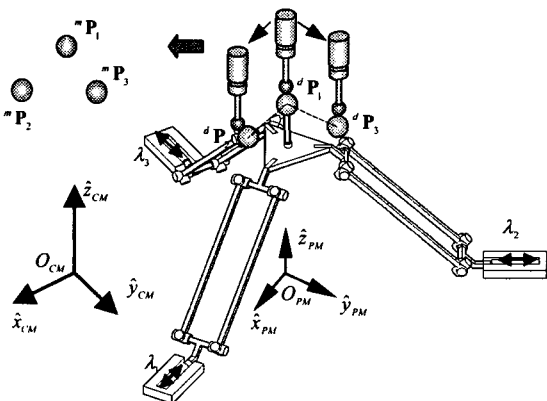


Fig. 4 Coordinates of triangular points to define reference coordinate system

- (i). 작업 공간상에 3 점의 위치 (${}^dP_1, {}^dP_2, {}^dP_3$)가 ${}^dP_1, {}^dP_2 \perp {}^dP_1, {}^dP_3$ 이 되도록 설정한다.
- (ii). 역기구학으로부터 계산된 구동입력(${}^1\lambda_1, {}^1\lambda_2, {}^1\lambda_3$)에 의해 엔드 이펙터를 한점의 위치(dP_1)로 이동시킨다.
- (iii). CMM 을 이용하여 실제 이동된 엔드 이펙터의 좌표 mP_1 를 측정한다.
- (iv). 같은 방법으로 설정된 위치 좌표 ${}^dP_2, {}^dP_3$ 는 CMM 에 의해 ${}^mP_2, {}^mP_3$ 로서 측정된다.

3 점의 위치가 결정되면 이들을 이용하여 공간상에 기준 좌표계를 정의해야 한다. 이상적인 기준 좌표계 ${}^dCs = [{}^d\hat{x}, {}^d\hat{y}, {}^d\hat{z}]^T$ 는 식(12)와 같이 정의된다.

$${}^d\hat{x}_r = \frac{\overrightarrow{{}^dP_1 {}^dP_2}}{\| \overrightarrow{{}^dP_1 {}^dP_2} \|}, {}^d\hat{y}_r = \frac{\overrightarrow{{}^dP_1 {}^dP_3}}{\| \overrightarrow{{}^dP_1 {}^dP_3} \|}, {}^d\hat{z}_r = {}^d\hat{x}_r \times {}^d\hat{y}_r \quad (12)$$

또한, CMM 에 의해 측정된 3 점(${}^mP_1, {}^mP_2, {}^mP_3$)에 의해 기준 좌표계 ${}^mCs = [{}^m\hat{x}, {}^m\hat{y}, {}^m\hat{z}]^T$ 을 정의하게 되는데, Fig. 5 와 같이 3 점들은 병렬기구의 구동오차가 포함되어 식(12)와 같이 좌표계를 정의할 수 없다. 그래서, 우선 mP_1 을 기준 좌표계의 원점으로 정의하고, 식(13)과 같이 벡터 ${}^mP_1, {}^mP_2$ 을 길이 l_{12} 로 나눈 값을 x 축으로 정의한다.

$${}^m\hat{x}_r = \frac{\overrightarrow{{}^mP_1 {}^mP_2}}{l_{12}} \quad (13)$$

한편, y 축은 3 점(${}^mP_1, {}^mP_2, {}^mP_3$)이 이루는 평면상에 존재하고, 설정된 x 축과 수직해야 함으로 x 축 방향의 계통오차 $\vec{\delta}_x$ 를 고려하여 식(14)와 같이 정의한다.

$${}^m\hat{y}_r = \frac{\overrightarrow{{}^mP_1 {}^mP_3} - \vec{\delta}_x}{l_{13} \sin \theta} \quad (14)$$

여기서, $\vec{\delta}_x$ 와 θ 는 식(15)와 (16)으로 각각 표현된다.

$$\vec{\delta}_x = l_{13} \cos \theta \cdot {}^m\hat{x}_r \quad (15)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{l_{12}^2 + l_{13}^2 - l_{23}^2}{2l_{12}l_{13}} \right) \quad (16)$$

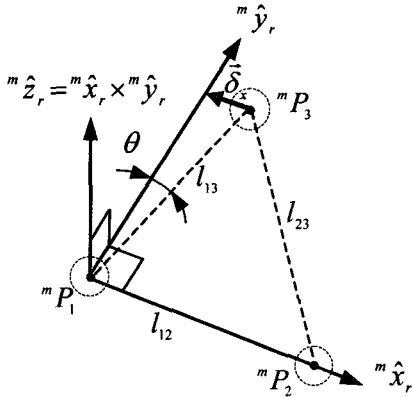


Fig. 5 Definition of real reference coordinate system

식(15)와 (16)에서 l_{12} , l_{13} , l_{23} 은 CMM 에 의해 측정된 3 점간의 길이로 반복측정에 의해 측정 오차는 거의 없다고 가정한다. 마지막으로, z 축은 식(17)과 같이 정의된다.

$${}^m \hat{z}_r = {}^m \hat{x}_r \times {}^m \hat{y}_r \quad (17)$$

이상의 방법에 의해 결정된 기준 좌표계를 이용하여 좌표계 동정을 하게 되는데, 이 작업은 기준 좌표계를 매개로 하여 CMM 좌표계와 병렬기구 좌표계간 변환이 가능하도록 하는 것이다. 병렬기구 좌표계 ${}^{PM} \mathbf{C}_s = [\hat{x}_{PM} \ \hat{y}_{PM} \ \hat{z}_{PM}]^T$ 에서 이상적인 기준 좌표계 ${}^d \mathbf{C}_s = [{}^d \hat{x}_r \ {}^d \hat{y}_r \ {}^d \hat{z}_r]^T$ 까지의 변환행렬은 식(18)과 같이 정의 된다.

$${}^{PM}_{dr} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서,

$$\begin{aligned} n_x &= {}^d \hat{x}_r \cdot \hat{x}_{PM}, n_y = {}^d \hat{x}_r \cdot \hat{y}_{PM}, n_z = {}^d \hat{x}_r \cdot \hat{z}_{PM}, p_x = {}^d x_1 \\ o_x &= {}^d \hat{y}_r \cdot \hat{x}_{PM}, o_y = {}^d \hat{y}_r \cdot \hat{y}_{PM}, o_z = {}^d \hat{y}_r \cdot \hat{z}_{PM}, p_y = {}^d y_1 \\ a_x &= {}^d \hat{z}_r \cdot \hat{x}_{PM}, a_y = {}^d \hat{z}_r \cdot \hat{y}_{PM}, a_z = {}^d \hat{z}_r \cdot \hat{z}_{PM}, p_z = {}^d y_1 \end{aligned} \quad (19)$$

또한, CMM 좌표계 ${}^{CM} \mathbf{C}_s = [\hat{x}_{CM} \ \hat{y}_{CM} \ \hat{z}_{CM}]^T$ 에서 실제 기준 좌표계 ${}^m \mathbf{C}_s = [{}^m \hat{x}_r \ {}^m \hat{y}_r \ {}^m \hat{z}_r]^T$ 까지의 변환행렬은 식(20)과 같이 정의 된다.

$${}^{CM}_{mr} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서,

$$\begin{aligned} n_x &= {}^m \hat{x}_r \cdot \hat{x}_{CM}, n_y = {}^m \hat{x}_r \cdot \hat{y}_{CM}, n_z = {}^m \hat{x}_r \cdot \hat{z}_{CM}, p_x = {}^m x_1 \\ o_x &= {}^m \hat{y}_r \cdot \hat{x}_{CM}, o_y = {}^m \hat{y}_r \cdot \hat{y}_{CM}, o_z = {}^m \hat{y}_r \cdot \hat{z}_{CM}, p_y = {}^m y_1 \\ a_x &= {}^m \hat{z}_r \cdot \hat{x}_{CM}, a_y = {}^m \hat{z}_r \cdot \hat{y}_{CM}, a_z = {}^m \hat{z}_r \cdot \hat{z}_{CM}, p_z = {}^m y_1 \end{aligned} \quad (21)$$

3.2 병렬기구의 위치 오차 산출

오차가 없는 경우 이상적인 임의의 엔드 이펙터의 목표점 ${}^d \mathbf{P}_e$ 를 기준 좌표계 ${}^d \mathbf{C}_s$ 상에서 표현하면 식(22)과 같고,

$${}^d \mathbf{P}_e = {}^{PM}_{dr} \mathbf{T}^{-1} {}^d \mathbf{P}_e = {}^{dr}_{PM} \mathbf{T} {}^d \mathbf{P}_e \quad (22)$$

병렬기구의 위치 오차가 포함되어 CMM 에 의해 측정된 목표점의 좌표 ${}^m \mathbf{P}_e$ 를 실제 기준 좌표계 ${}^m \mathbf{C}_s$ 상에서 표현하면 식(23)과 같다.

$${}^m \mathbf{P}_e = {}^{CM}_{mr} \mathbf{T}^{-1} {}^m \mathbf{P}_e = {}^{mr}_{CM} \mathbf{T} {}^m \mathbf{P}_e \quad (23)$$

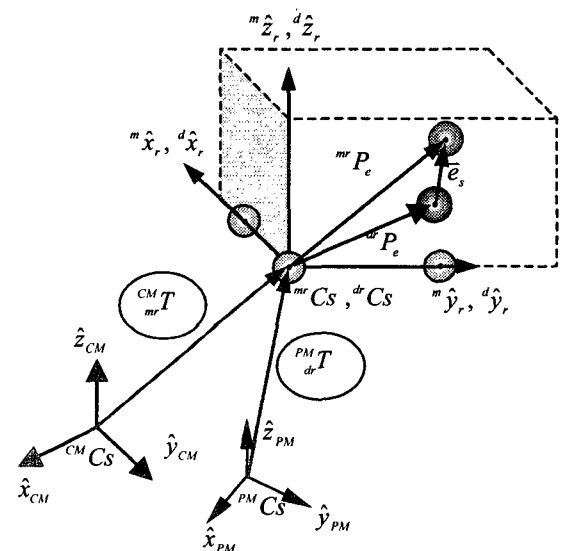


Fig. 6 Calculation of the positional errors at a target point

그러므로, 임의의 목표점의 위치에서 병렬기구 엔드 이펙터의 오차벡터 e_s 는 식(24)와 같이 표현될 수 있다.

$$e_s = {}^{mr}T^m P_e - {}^{mr}T^d {}^{dr}T^d P_e = {}^{mr}P_e - {}^{mr}T^d P_e \quad (24)$$

여기서, ${}^{mr}T$ 는 이상적인 기준 좌표계와 실제 기준 좌표계간의 변환행렬이다. 각 축에 대한 위치 오차 성분은 다음과 같다.

$$e_s = (e_x, e_y, e_z) \quad (25)$$

Fig. 6 은 식 (22~25)에서 유도된 좌표계 변환관계를 이용하여 병렬기구의 위치 오차를 산출하는 개념도를 개략적으로 나타내고 있다.

3.3 반응 표면법(Response surface method)에 의한 위치 오차의 모델링 및 평가

본 논문에서는 병렬기구의 작업평면상의 오차 성분(e_x, e_y, e_z)를 표현하기 위해 반응 표면법을 적용하였다. 반응 표면법은 어떤 시스템의 성능이 여러 설계변수들에 의해 영향을 받아 복잡한 비선형 거동을 보이거나 해석적으로 표현하기 어려울 경우, 실험을 통해 얻은 데이터로부터 시스템의 성능을 명시적인 함수로 모델링하고 해석하는 수학적 통계적 기술로 주로 최적설계⁹에 적용되어 왔다. 최근 들어, 이러한 반응표면법은 직렬 또는 병렬기구의 비선형 위치 오차를 모델링 하고 분석하기 위한 기법으로 연구되고 있다^{10,11}. 일반적으로 반응표면은 다음과 같이 최소제곱법에 의한 n 차 다중 회귀 모델식에 의해 생성된다¹¹.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (i < j) \quad (26)$$

본 논문에서는 각각의 오차 성분(e_x, e_y, e_z)을 표현하기 위한 근사식으로서 3 차 다중 회귀 모델이 식(27)과 같이 적용된다.

$$e_k = \beta_{k0} + \beta_{k1}X_c + \beta_{k2}Y_c + \beta_{k3}Z_c + \beta_{k4}X_c Y_c + \beta_{k5}X_c Z_c + \beta_{k6}Y_c Z_c + \beta_{k7}X_c^2 + \beta_{k8}Y_c^2 + \beta_{k9}Z_c^2 + \beta_{k10}X_c Y_c Z_c + \beta_{k11}X_c^2 Y_c + \beta_{k12}X_c^2 Z_c + \beta_{k13}X_c Y_c^2 + \beta_{k14}X_c Z_c^2 + \beta_{k15}Y_c^2 Z_c + \beta_{k16}Z_c Y_c^2 + \beta_{k17}X_c^3 + \beta_{k18}Y_c^3 + \beta_{k19}Z_c^3 \quad (27)$$

여기서, e_k 는 x, y 그리고 z 축방향의 오차 산출값들로 이루어진 벡터열을 의미하며, (X_c, Y_c, Z_c)는 병렬기구의 작업 평면 상에 일정간격으로 배치된 격자 점들의 좌표를 의미한다. 또한, 계수 $[\beta_k]$ 는 최소제곱법에 의해 식(28)과 같이 추정할 수 있다.

$$[\hat{\beta}_k] = (P_c^T P_c)^{-1} P_c^T e_k \quad (28)$$

여기서, $P_c = [X_c, Y_c, Z_c]$ 로 정의된다.

4. 위치 오차 평가 실험 및 결과

4.1 실험 장치 및 방법

본 논문에서 제안된 오차 평가 방법을 적용하기 위해 Fig. 7 과 같이 병진형 3 자유도 병렬기구의 시제품(prototype)을 설계/제작하였다. 병렬기구의 몸체의 재질은 Al-7075 이며, 상판은 정밀한 진구도를 갖는 범용 CMM 프로브(probe)가 부착되며, 병렬기구의 입력 구동부는 2mm 의 구동범위에서 1 μ m 의 분해능을 갖는 1 축 매뉴얼 스테이지(manual stage)가 장착 된다. 상판과 입력 구동부 사이에는 두 쌍의 로드(rod)와 탄성 힌지 구조를 갖는 유니버설 조인트로 구성된 평행 크랭크 메커니즘으로 연결 되어있다. 특히, 각각의 조인트들은 양방향 노치 힌지(notch hinge) 구조에 의해 2 자유도의 회전 운동을 하게 되므로 유니버설 조인트의 역할을 수행하며, 높은 반복 정밀도를 구현할 수 있는 장점을 갖는다.

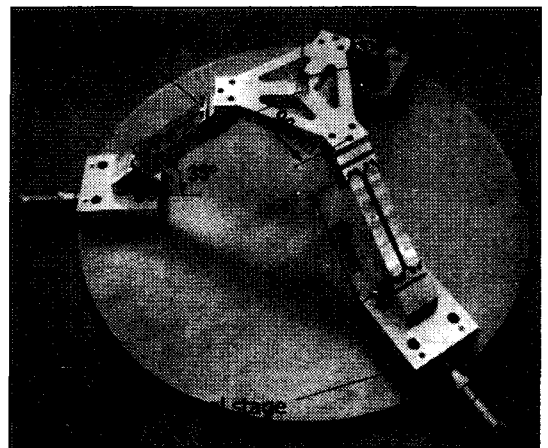


Fig. 7 Prototype of three-DOF parallel mechanism

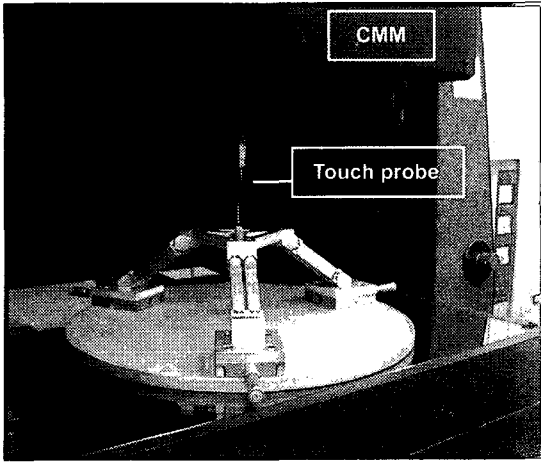


Fig. 8 Photograph of experimental setup

제작된 병렬기구의 위치 오차를 측정/평가하기 위해 Fig. 8 과 같이 CMM 올려 놓게 된다. 측정에서 사용된 CMM(Werth, Probe-check®)의 정밀도는 0.1 μ m 이며, 측정 범위는 xyz 축에서 600 \times 650 \times 300mm 를 갖는다. 상판에 장착된 프로브의 볼 중심 위치는 접촉식 프로브(Renishaw, TP-200)에 의해 총 5 점을 측정하고, 최소 제곱법(least-squares method)에 의해 찾게 된다.

4.2 실험 결과

제작된 병렬기구의 위치 오차를 평가하기 위해 평면 작업공간상에 250 μ m 의 간격을 갖는 82 개의 격자점 들을 설정하고, 설정된 격자점들로 엔드 이펙터를 이동시킨 후 그 위치들을 CMM 을 이용하여 측정하였으며, 제안된 좌표계 동정 알고리즘을 평가하기 위해 CMM 좌표계의 Z 축을 중심으로 약간 회전된 상태로 병렬기구를 설치하였다. Fig.9 는 CMM 에 의해 측정된 격자점들의 좌표값을 보이고 있다. Fig.9(b)에서 보는 바와 같이 CMM 좌표계를 기준으로 얻어진 측정값들은 CMM 좌표계의 Z 축에 대하여 전체적으로 약간 회전되어 나타남을 볼 수 있으며, 각각의 격자선상에 있는 점들에 대하여 선형 회기 직선을 구한 후 기울기들의 평균값들을 분석한 결과 Z 축에 대하여 약 2.1°정도 회전되어 있음을 확인할 수 있었다. Fig.10 은 본 연구에서 제안된 좌표계 동정 알고리즘을 이용하여 식(22)에 의해 기준 좌표계 상에서 표현된 좌표값 들을 보인다. Fig.10(a)에서 보는 바

와 같이, 측정값들의 위치가 기준 좌표계 상으로 이동되어 나타났으며, Fig.10(b)의 그래프에서 선형

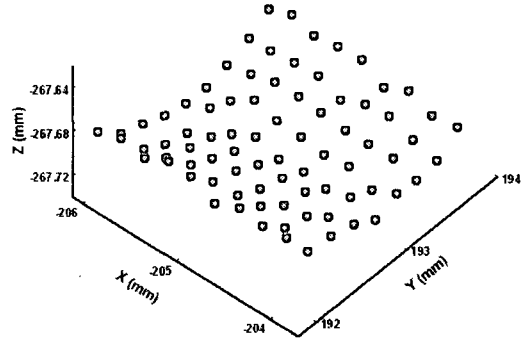


Fig. 9(a) Three-dimensional representation for the end-effector positions measured by CMM

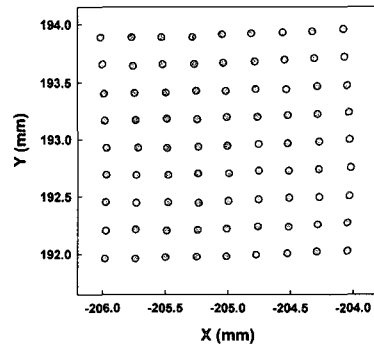


Fig. 9(b) Two-dimensional representation for the end-effector positions measured by CMM

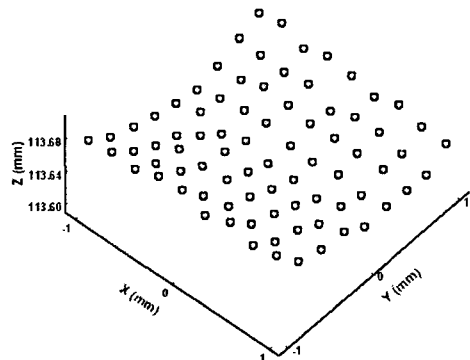


Fig. 10(a) Three-dimensional representation for the measured end-effector positions after the coordinate system identification

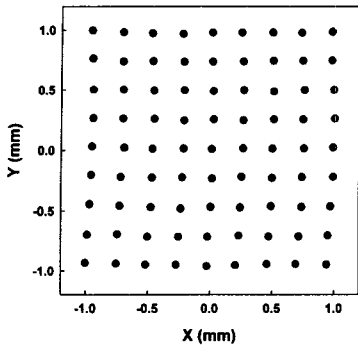


Fig. 10(b) The measured end-effector positions after the coordinate system identification

회기에 의한 격자선상의 평균 기울기를 분석한 결과 약 0.06° 의 값을 보였으며, 좌표계 불일치에 의한 좌표값들의 기울어짐이 좌표계 동정 알고리즘에 의해 거의 개선 되어 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 11(a), Fig. 11(b) 그리고 Fig. 11(c)는 각각 평면 $Z=113.61\text{mm}$ 에서 x 축, y 축 그리고 z 축 방향의 위치오차 성분 (e_x , e_y , e_z)을 표현하는 반응표면들을 보여준다. 반응표면을 생성하기 위해 사용된 3차 회귀모델에 관한 F-검정을 실시한 결과 회귀제곱평균에 대한 잔차 평균 제곱의 비를 나타내는 F값들(F-values)이 각각 981.08, 437.40, 361.61을 보였으며, 이러한 수치들은 $F(20,60,0.01)$ 의 값 2.20보다 큰 값을 보인다. 따라서, 추정된 3차 회귀모델식은 99% 신뢰수준에서 통계적으로 유의함을 확인할 수 있다. 추정된 오차 모델식을 이용하여 병렬기구의 작업 평면상에 있는 임의의 격자점들에 대한 각 방향의 오차 성분(e_x , e_y , e_z)을 병렬기구 엔드 이펙터의 위치의 함수로 표현 할 수 있으며, 이것은 설정된 작업평면 상에 존재하는 임의의 엔드 이펙터 위치에서 오차성분의 크기의 산출이 가능해 짐을 의미한다. Table 1은 각각의 위치 오차 성분(e_x , e_y , e_z)에 대한 3차 회귀 모델 계수들의 추정값을 보여주며, Table 2는 분산분석 결과를 보여주고 있다. 또한, Fig. 12(a), Fig. 12(b) 그리고 Fig. 12(c)는 Fig. 11의 반응표면에 대한 등고선 그래프를 보여준다. 그림에서 각 방향의 위치오차 성분은 구동영역에 대하여 비선형적 거동을 보이며, 최대위치오차 절대값은 x 축이 $51.2\mu\text{m}$, y 축이 $63.8\mu\text{m}$, 그리고 z 축이 $65.4\mu\text{m}$ 로 비교적 크게 나타났다. 이것은 병렬기구의 제작 및 조립 과정 등

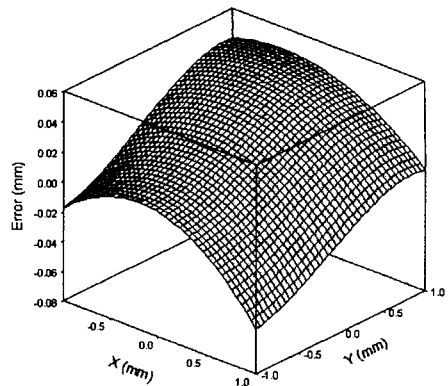


Fig. 11(a) Error component e_x in the X direction at plane $Z=113.61\text{mm}$

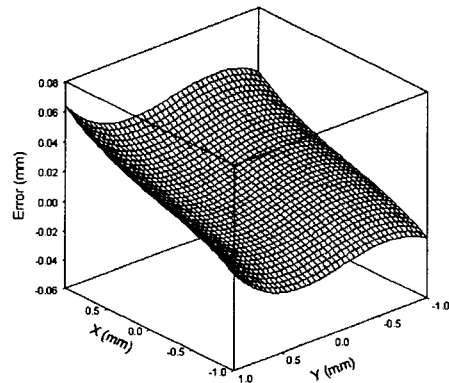


Fig. 11(b) Error component e_y in the Y direction at plane $Z=113.61\text{mm}$

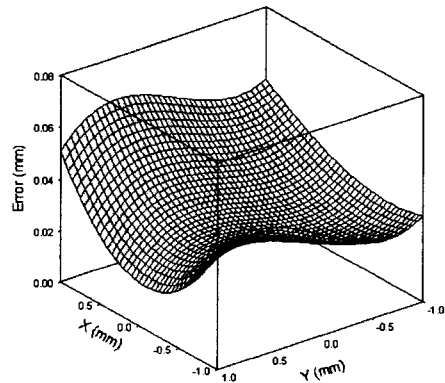


Fig. 11(c) Error component e_z in the Z direction at plane $Z=113.61\text{mm}$

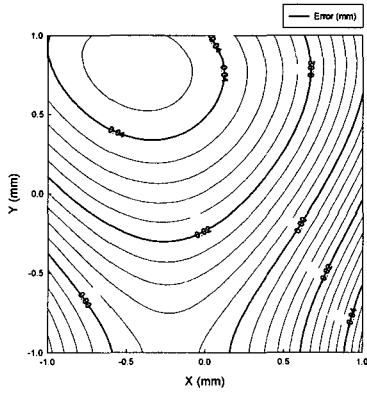


Fig. 12(a) Counter lines of error component e_x in the X direction (at plane $Z=113.61\text{mm}$)

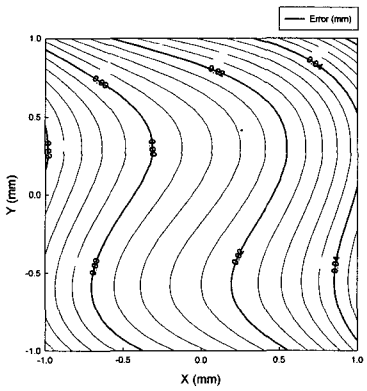


Fig. 12(b) Counter lines of error component e_y in the Y direction (at plane $Z=113.61\text{mm}$)

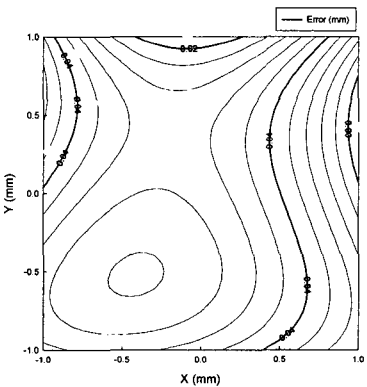


Fig. 12(c) Counter lines of error component e_z in the Z direction (at plane $Z=113.61\text{mm}$)

Table 1 Coefficients of the regression equation

Error Coefficients	e_x	e_y	e_z
β_0	3.186×10^{-14}	1.328×10^{-14}	3.995×10^{-14}
β_1	1.859×10^{-10}	-2.837×10^{-10}	-1.506×10^{-10}
β_2	-3.486×10^{-10}	2.018×10^{-10}	-1.182×10^{-10}
β_3	3.110×10^{-12}	1.297×10^{-12}	3.899×10^{-12}
β_4	-1.795×10^{-7}	7.304×10^{-8}	-3.820×10^{-7}
β_5	1.815×10^{-8}	-2.769×10^{-8}	-1.470×10^{-8}
β_6	-3.403×10^{-8}	1.970×10^{-8}	-1.154×10^{-8}
β_7	-3.032×10^{-6}	2.818×10^{-7}	2.417×10^{-6}
β_8	-5.865×10^{-7}	1.411×10^{-6}	-4.796×10^{-7}
β_9	3.036×10^{-10}	1.266×10^{-10}	3.806×10^{-10}
β_{10}	-1.752×10^{-5}	7.130×10^{-6}	-3.728×10^{-5}
β_{11}	-8.525×10^{-3}	-2.385×10^{-5}	-1.315×10^{-2}
β_{12}	-2.959×10^{-4}	2.751×10^{-5}	2.359×10^{-4}
β_{13}	8.890×10^{-4}	1.274×10^{-3}	4.163×10^{-3}
β_{14}	1.772×10^{-6}	-2.703×10^{-6}	-1.435×10^{-6}
β_{15}	-5.725×10^{-5}	1.377×10^{-4}	-4.682×10^{-5}
β_{16}	-3.321×10^{-6}	1.923×10^{-6}	-1.127×10^{-6}
β_{17}	9.494×10^{-5}	-1.094×10^{-2}	2.064×10^{-3}
β_{18}	1.314×10^{-2}	-3.426×10^{-2}	2.120×10^{-2}
β_{19}	2.964×10^{-8}	1.236×10^{-8}	3.715×10^{-8}

Table 2 Analysis of variance-ANOVA(e_x, e_y, e_z)

Error	Source of variance	Sum of squares	D.O.F	Mean square	F_{cal}
(e_x)	Regression	4.240×10^{-2}	20	2.099×10^{-3}	981.08
	Residual	1.317×10^{-4}	60	2.160×10^{-6}	
	Total	4.250×10^{-2}			
(e_y)	Regression	4.520×10^{-2}	20	2.301×10^{-3}	437.40
	Residual	3.155×10^{-4}	60	5.258×10^{-6}	
	Total	4.550×10^{-2}			
(e_z)	Regression	1.230×10^{-2}	20	6.151×10^{-4}	361.61
	Residual	1.020×10^{-4}	60	1.701×10^{-6}	
	Total	1.240×10^{-2}			

에서 발생하는 기구변수 값들의 오차로 인하여 발생한 것으로 사료되며, 기구의 정밀도를 높이기 위해서는 가공 및 조립오차의 줄이거나, 실제 기구변수들의 값을 정확히 추정하기 위한 기하학적 보정이 필요하다. 실제 산출된 오차값과 3 차 회귀

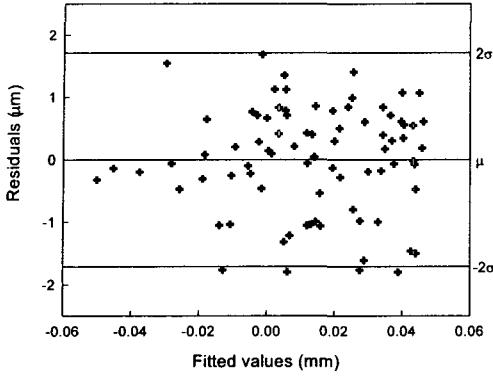


Fig. 13(a) Residuals plotted against fitted values (e_x)

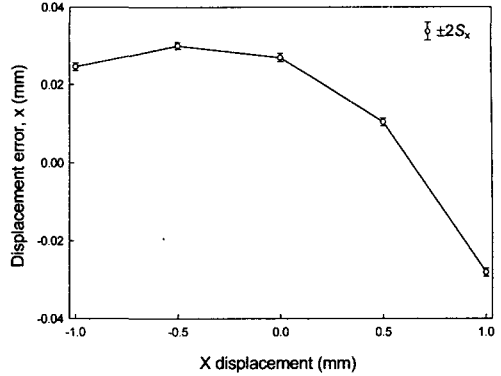


Fig. 14(a) Displacement error in x-direction

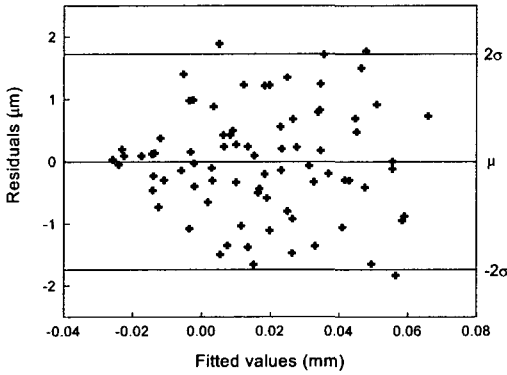


Fig. 13(b) Residuals plotted against fitted values (e_y)

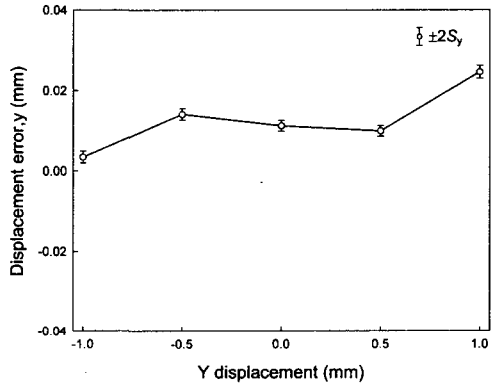


Fig. 14(b) Displacement error in y-direction

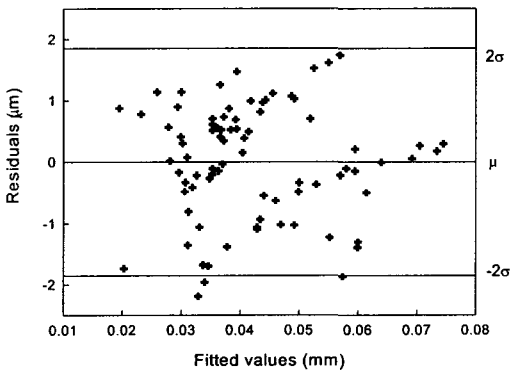


Fig. 13(c) Residuals plotted against fitted values (e_z)

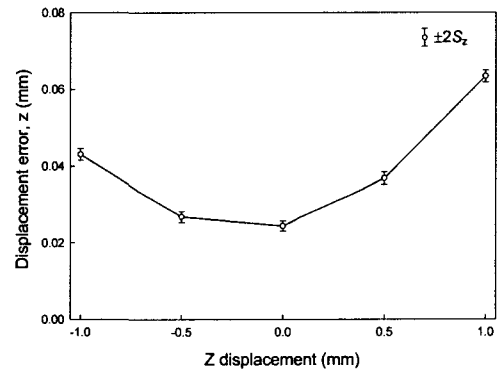


Fig. 14(c) Displacement error to the z-direction

모델로 추정된 값과 차이인 잔차(residual)의 분포를 Fig.13(a)-(c)에서 보여주고 있다. Fig.13의 그래프에서 확인할 수 있는 바와 같이 잔차들의 값이 약 $\pm 2.0\mu\text{m}$ 의 범위 내에서 산포하고 있음을 볼 수

있다. 이러한 잔차 성분들의 값은 수동으로 움직임에 따른 매뉴얼 스테이지들의 반복오차와 외부, 측정시간 동안 발생하는 온도 변화 등에 의해 발생한 것으로 사료된다. 병렬기구의 반복 정밀도

평가를 위해 병렬기구 엔드 이펙터의 위치를 각각 x 축, y 축 그리고 z 축 방향으로 6 번 반복하여 이동시켰을 때 발생한 위치 오차들을 분석하였으며, 그 결과를 Fig.14(a)~(c)에서 보여준다. 각 방향의 반복 오차를 2 배의 표준편차 ($\pm 2S_x$, $\pm 2S_y$, $\pm 2S_z$)로 산정하였을 때, x 축, y 축 그리고 z 축 방향으로 각각 최대 $\pm 1.94\mu\text{m}$, $\pm 2.05\mu\text{m}$, $\pm 2.12\mu\text{m}$ 정도의 반복오차를 갖는 것으로 평가 되었다.

5. 결론

CMM 을 이용한 병진형 3 자유도 병렬기구 위치 오차의 정밀 평가법을 제안하고 실험을 통해 제안된 방법의 적용성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CMM 에 의한 병렬 기구의 엔드 이펙터 측정 시 좌표계 불일치가 측정에 미치는 영향을 제거 하기 위해, CMM 좌표계와 병렬기구 좌표계간의 좌표변환 관계를 명확히 규명하는 새로운 좌표계 동정 알고리즘을 고안하고 실험을 통해 고안된 알고리즘의 효용성을 확인하였다.
- (2) 좌표계간의 변환관계를 나타내는 동차변환행렬을 이용하여 병렬기구 작업 공간내의 임의의 목표 위치에서 엔드 이펙터의 오차 성분을 산출하는 관계식을 도출하였다.
- (3) 작업 평면상에 일정한 간격으로 설정된 격자 점들에 대하여 병렬기구의 위치 오차 성분들이 실험을 통해 산출하였으며, 산출된 오차성분들은 반응 표면법에 의해 잔차의 크기가 $\pm 2\mu\text{m}$ 이내로 3 차 다중 회귀 모델식으로 표현 되었다. 따라서, 추정된 오차 모델식을 이용하면 설정된 작업평면 상에 존재하는 임의의 엔드 이펙터 위치에서의 오차성분의 산출 및 평가가 가능하다.

참고문헌

1. Nakamura, O., Goto, M., "Laser interferometric calibration of microscan mechanisms by using three laser beams," Precision Engineering, Vol.15, No. 1, pp.39-43, 1993.
2. Koseki, Y., Arai, T., Sugimoto, K., Takatiji, T. and Goto, M., "Design and accuracy evaluation of high-

- speed and high precision parallel mechanism," Proc. Of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robot. Automat., Vol. 2, pp. 1340-1345, 1998.
3. Spiess, Vincze M. and Avromlou, M., "On the calibration of a 6-D laser tracking system for dynamic robot measurements," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 47, No. 1, pp. 270-274, 1998.
4. Renaud, P., Andreff, N., Dhome, M. and Martinet, P., "Experimental evaluation of a vision-based measuring device for parallel machine-tool calibration," Proc. Of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell.Robot. Syst., Vol. 2, pp. 1868-1873, 2002.
5. Masory, O. and Jiahua, Y., "Measurement of pose repeatability of stewart platform," J. of Robot. Syst., Vol. 12, No. 12, pp. 821-832, 1995.
6. Desnard, S. and Kahlil, W., "Calibration of parallel robots using two inclinometers," Proc. Of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robot. Automat., Vol. 2, pp. 1758-1763, 1999.
7. Sato, O., Hiraki, M. and Takamusu, K., "The Calibration of Parallel-CMM: Parallel-Coordinate Measuring Machine," Proc. of the 3rd euspen International Conference, pp. 573-576, 2002.
8. Lung-wen, T. and Sameer, J., "Comparison studies of architectures of four 3 degree-of-freedom translational parallel manipulators," Proc. Of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robot. Automat., Vol. 2, pp. 1283-1288, 2001.
9. Han, H.S. and Park, T.W., "Robust Design of Mechanisms Using the Response Surface Analysis," KSPE, Vol.13, No.12, pp.56-61, 1996.
10. Xiaoliu, Y., Mingyang, Z., Lijin, F. Honggua, W. and Qiyi, W., "Measuring Data Based Non-linear Error Modeling for Parallel Machine Tool," Proc. Of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robot. Automat., Vol. 2, pp. 3535-3540, 2001.
11. Joao, B., de Aquino, S. and Burdekin, M. "A modular space frame for assessing the performance of co-ordinate measuring machines (CMMs)," Precision Engineering, Vol.26, No. 1, pp. 37-48, 2002.