

다중 측정 좌표계를 이용한 로봇 캘리브레이션 방법 연구

임생기*, 김정태**, 범진환***, 최재성****

Study on Robot Calibration Using Multi-measurement Coordinate System

Saeng-Ki Lim*, Jung-Tae Kim**, Jin-Hwan Borm***, Jae-Sung Choi****

ABSTRACT

Robot calibration needs accurate measurements of robot end-effector position at a number of different robot configurations. One of the efficient ways of the measurement is "Touching on Jig" method suggested in [7], which utilizes a touch sensor and a fixture consisting of various sizes of blocks. By moving the end-effector to touch the surface of a block whose position relative to the other is known, the end-effector position relative to the fixture coordinate system can be obtained at the instant of touching. However, the global size of fixture is too small to cover the various configurations of the robot. Because of the manufacturing difficulties, the fixture cannot be manufactured large enough for well distributed position measurement. It results in the improvement of robot accuracy only in the limited space near to the fixture rather than over the whole space of the robot working volume.

The paper proposes a method to resolve the above problem by measuring the end-effector positions with respect to several different coordinate system using the same measurement devices. It is found that the proposed method leads the improvements of robot position accuracy over the large space of working volume. The experimental studies are performed to show the validity of the method and their results are discussed.

Key Words : Robot calibration(로봇 캘리브레이션), Multi-measurement coordinate system(다중 측정 좌표계)¹⁾

1. 서론

로봇 캘리브레이션을 수행하기 위해서는 여러 위치에서 로봇 손끝의 위치 및 방향을 측정하여야 한다. 로봇 손끝의 위치 및 방향을 측정하는 방법으로는 Ball-tip에 로봇의 손끝을 맞추고 여러가지 각도에서 측정하는 방법^[1], 정밀한 격자 테이블

과 현미경을 사용하는 방법^[2], 한대 또는 두대의 카메라와 Image processing을 이용하는 방법^{[3][4]}, 레이저 센서 혹은 Laser tracking system을 이용하는 방법^[5], 압력 센서를 이용한 Active touch sensing 방법^[6] 등 많은 방법들이 개발되어 있다.

* 고등기술연구원, 아주대학교 대학원 시스템공학과

** KIST 기전부 휴먼로봇센터

*** 아주대학교 기계 및 산업공학부

**** 고등기술연구원 생산기술연구실

지금까지 대부분의 논문에서는 측정장비가 고가 이면서 측정 좌표계가 하나인 경우를 다루었으며, 참고문헌[7]에서는 저가의 비용과 손쉬운 방법으로서 규격화된 지그에 아-크 용접 로봇의 토치(Torch) 끝단을 접촉시킴(Touch sensing)으로서 로봇의 상대 위치를 측정하는 방법을 이미 개발한 바 있다.

그러나 이 방법은 사용자 측면을 고려할 때 로봇의 작업 공간을 모두 포함하도록 크게 만들기가 어렵기 때문에 작업 공간내에 골고루 분포된 측정 데이터를 얻기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 지그를 작업 공간내 여러 곳에 위치시키고 각각의 지그에서 측정 데이터를 얻을 수 있다면 로봇 캘리브레이션은 다양한 작업 공간내에서 로봇 손끝의 위치 정밀도를 일정하게 유지시킬 수 있을 뿐만 아니라 향상시킬 수가 있다.

본 논문에서는 다중 측정 좌표계를 이용하여 로봇 캘리브레이션을 수행하기 위한 이론적, 실험적 방법을 제시하고자 하며, 실제 실험을 수행한 결과, 제시된 방법은 하나의 측정 좌표계를 이용하는 경우보다 로봇 위치 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있고, 위치 정밀도 분포 역시 로봇의 작업 공간상에 좀더 일정하게 유지하는 것을 알 수 있었다.

2. 오차 전파 모델

2.1 캘리브레이션된 로봇 시스템 모델

본 연구는 일반적인 로봇에도 적용 가능하지만 편의상 Fig. 1과 같은 6축 로봇을 대상으로 하였다.

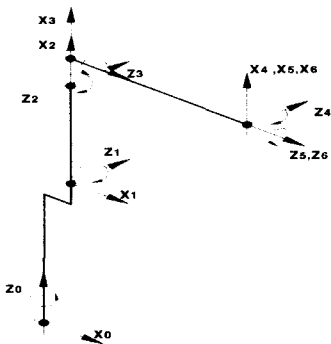


Fig. 1 Robot coordinate system (Home position)

Fig. 2는 본 로봇 시스템을 정의하는데 있어서 필요한 지그 좌표계[W](World coordinate system),

로봇의 기준 좌표계[R](Base coordinate system), 로봇의 6축 좌표계[6], 그리고 로봇 손끝의 좌표계[E](Tool coordinate system)를 나타내고 있다.

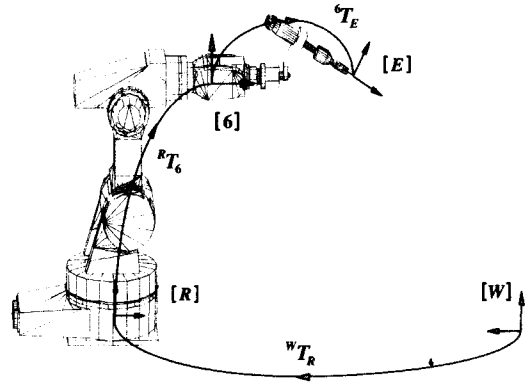


Fig. 2 Definition of robot coordinate system

Fig. 2에서 로봇 시스템을 정의하기 위해 다음과 같은 세가지의 좌표 변환을 정의하였다.

- Base Transformation (${}^W T_R$)

$${}^W T_R = Trans(W_x, W_y, W_z) \cdot Rot_z(W_{Roll}) \cdot Rot_y(W_{Pitch}) \cdot Rot_x(W_{Yaw}) \quad (1)$$

- Tool Transformation (${}^6 T_E$)

$${}^6 T_E = Trans(T_x, T_y, T_z) \cdot Rot_z(T_{Roll}) \cdot Rot_y(T_{Pitch}) \cdot Rot_x(T_{Yaw}) \quad (2)$$

- Calibrated Robot Transformation (${}^R T_6^c$)

로봇 좌표계 [i-1]축에서 [i]축까지의 캘리브레이션을 하기 위한 좌표 변환은 식(3)과 같이 정의된다.

$${}^{i-1} A_i = Rot_z(\theta_i) \cdot Trans(a_i, 0, d_i) \cdot Rot_x(a_i) \cdot Rot_y(\beta_i) \quad (3)$$

여기서 θ_i 는 조인트 각(Joint angle), a_i 는 링크의 길이, d_i 는 링크의 오프셋(Offset), a_i 는 링크의 비틀림 각도, $Rot_y(\beta_i)$ 는 연속된 두 좌표계사이에서의 y축에 대한 β_i 만큼의 회전 변환을 나타내는데, y축에 대한 회전량을 고려하는 이유는 인접한 두축이 평행한 경우 작은 형상 오차가 매우 큰 파라미터의 변화를 초래하게 되어 불연속성을 보여주기 때문이다.

또한 식(1)~(3)을 이용하여 지그 좌표계 [W]에서 로봇 손끝의 좌표계 [E]까지의 순기구학은 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$${}^W T_E^C = {}^W T_R \cdot {}^0 A_1 \cdot {}^1 A_2 \cdots {}^{n-1} A_n \cdot {}^n T_E \quad (4)$$

2.2 오차의 전파

로봇 손끝의 위치 및 방위는 계산에 사용된 각종 파라미터의 공칭값과 실제값이 서로 차이가 있을 때 오차를 발생시키며, 이 오차는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$dT = {}^W T_E^r - {}^W T_E^N \quad (5)$$

여기서, ${}^W T_E^r$ 는 [W]에서 [E]로의 실제 변환 행렬이고, ${}^W T_E^N$ 는 [W]에서 [E]로의 공칭 변환 행렬이다. 또한, 로봇 손끝의 오차가 매우 작다고 가정하면, 식(5)는 식(6)과 같이 표현될 수 있다.

$${}^E \Delta = \begin{bmatrix} 0 & -{}^E \delta_z & {}^E \delta_y & {}^E d_x \\ {}^E \delta_z & 0 & -{}^E \delta_x & {}^E d_y \\ -{}^E \delta_y & {}^E \delta_x & 0 & {}^E d_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, ${}^E d_x, {}^E d_y, {}^E d_z, {}^E \delta_x, {}^E \delta_y, {}^E \delta_z$ 는 로봇 손끝의 좌표계 [E]에서의 미소 병진과 미소 회전을 나타낸다. 손끝의 미소 병진과 미소 회전은 식(1)~(3)에서 정의내렸던 파라미터들의 오차로부터 기인한다고 볼 수 있으며, 이들 파라미터 오차는 지그 좌표계 [W]와 로봇의 기준 좌표계 [R]사이의 파라미터 오차 ($dp_{0x}, dp_{0y}, dp_{0z}, da_0, d\beta_0, d\gamma_0$), 좌표계 [R]과 좌표계 [N]사이의 파라미터 오차 ($da_i, dd_i, d\theta_i, da_i, d\beta_i$; ($i = 1, 2, \dots, N$)), 그리고 좌표계 [N]과 좌표계 [E]사이의 파라미터 오차 ($dp_{Ex}, dp_{Ey}, dp_{Ez}, da_E, d\beta_E, d\gamma_E$)로서 자유도가 N인 로봇의 경우 그 개수는 총 $(12+5N)$ 개이다. 또한, Fig. 3과 같이 임의의 좌표계 [C]의 Z축 방향 회전에 미소 오차 da_0 만큼의 오차가 있을 경우 좌표계 [E]를 기준했을 때 da_0 에 의한 로봇 손끝의 위치 오차는 식(8)과 같다.

$${}^E \vec{P} - {}^E \vec{P} = d{}^E \vec{P} = da_0 [({}^c \vec{P}_E \times {}^c \vec{n}_E)_z i + ({}^c \vec{P}_E \times {}^c \vec{o}_E)_z j + ({}^c \vec{P}_E \times {}^c \vec{a}_E)_z k] \quad (8)$$

즉, 식(8)은 파라미터 오차 da_0 와 da_0 로 인한 로봇 손끝의 위치 오차 $d{}^E \vec{P}$ 와의 관계를 나타내며, 같은 방법으로 임의의 링크 파라미터 오차가 로봇 손끝으로 전파되는 과정을 유도할 수 있다.

2.3 다중 측정 좌표계를 이용한 오차 전파 행렬의 유도

상기의 방법을 이용하여 지그 좌표계 [W]와 로봇의 기준 좌표계 [R]사이의 파라미터 오차 $dp_{0x}, dp_{0y}, dp_{0z}, da_0, d\beta_0, d\gamma_0$ 들에 의한 로봇 손끝의 위치 오차들을 구하기 위해 몇가지 변환 행렬들을 정의하였다.

$$U_0 = {}^0 T_E \quad (9)$$

$$U_0' = Rot_x(\gamma_0) \cdot {}^0 T_E \quad (10)$$

$$U_0'' = Rot_y(\beta_0) \cdot U_0' \quad (11)$$

$$U_0''' = Rot_z(\alpha_0) \cdot U_0'' \quad (12)$$

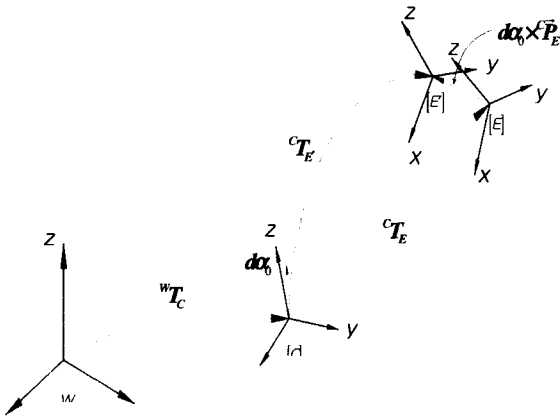


Fig. 3 Error propagation of da_0 in frame[C] to frame [E]

$$dT = {}^W T_E^N \cdot {}^E \Delta \quad (6)$$

여기서, ${}^E \Delta$ 는 좌표계 [E]에서의 미소 변환 행렬이고, 식(7)과 같이 표현된다.^[8]

여기서 U_0, U_0', U_0'', U_0''' 들은 식(13)과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$U_0 = \begin{bmatrix} U_0 n_x & U_0 o_x & U_0 a_x & U_0 p_x \\ U_0 n_y & U_0 o_y & U_0 a_y & U_0 p_y \\ U_0 n_z & U_0 o_z & U_0 a_z & U_0 p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$= \begin{bmatrix} \vec{U}_0 \vec{n} & \vec{U}_0 \vec{o} & \vec{U}_0 \vec{a} & \vec{U}_0 \vec{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

그리고 좌표계 [E]에서 본 $d\gamma_0$ 에 의한 로봇 손끝의 위치 오차는 식(14)를 이용하여 구할 수 있다.

$$(d^E \vec{P})_{d\gamma_0} = \begin{aligned} & \vec{U}_0 \vec{n} \cdot (\vec{i}_0 \times \vec{U}_0 \vec{p}) d\gamma_0 \vec{i} \\ & + \vec{U}_0 \vec{o} \cdot (\vec{i}_0 \times \vec{U}_0 \vec{p}) d\gamma_0 \vec{j} \\ & + \vec{U}_0 \vec{a} \cdot (\vec{i}_0 \times \vec{U}_0 \vec{p}) d\gamma_0 \vec{k} \end{aligned}$$

$$= [(\vec{U}_0 \vec{p} \times \vec{U}_0 \vec{n})_x \vec{i} + (\vec{U}_0 \vec{p} \times \vec{U}_0 \vec{o})_x \vec{j} + (\vec{U}_0 \vec{p} \times \vec{U}_0 \vec{a})_x \vec{k}] d\gamma_0 \quad (14)$$

여기서 $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ 는 좌표계 [E]의 단위 벡터들이다. 같은 방법으로 $d\beta_0, da_0, d\vec{p}_0$ 등에 의한 로봇 손끝의 위치 오차들을 구하면 식(15)~(17)과 같다.

$$(d^E \vec{P})_{d\beta_0} = [(\vec{U}_0 \vec{p} \times \vec{U}_0 \vec{n})_y \vec{i} + (\vec{U}_0 \vec{p} \times \vec{U}_0 \vec{o})_y \vec{j} + (\vec{U}_0 \vec{p} \times \vec{U}_0 \vec{a})_y \vec{k}] d\beta_0 \quad (15)$$

$$(d^E \vec{P})_{da_0} = [(\vec{U}_0 \vec{p} \times \vec{U}_0 \vec{n})_z \vec{i} + (\vec{U}_0 \vec{p} \times \vec{U}_0 \vec{o})_z \vec{j} + (\vec{U}_0 \vec{p} \times \vec{U}_0 \vec{a})_z \vec{k}] da_0 \quad (16)$$

$$(d^E \vec{P})_{d\vec{p}_0} = (d\vec{p}_0 \cdot \vec{U}_0 \vec{n}) \vec{i} + (d\vec{p}_0 \cdot \vec{U}_0 \vec{o}) \vec{j} + (d\vec{p}_0 \cdot \vec{U}_0 \vec{a}) \vec{k} \quad (17)$$

또한 식(3)에서 정의한 로봇의 기준 좌표계 [R]에서부터 [N]까지의 링크 파라미터들의 오차에 의한 로봇 손끝의 위치 오차를 좌표계 [E]에 대하여 표현하면, 식(18)~(21)과 같이 몇개의 변환 행렬로 정의된다.

$$U_i = \begin{bmatrix} U_i n_x & U_i o_x & U_i a_x & U_i p_x \\ U_i n_y & U_i o_y & U_i a_y & U_i p_y \\ U_i n_z & U_i o_z & U_i a_z & U_i p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^i T_E \quad (18)$$

$$= {}^i A_{i+1} \dots {}^{N-1} A_N \cdot {}^N T_E \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5)$$

$$U_i' = \text{Rot}_y(\beta_i) \cdot U_i \quad (19)$$

$$U_i'' = \text{Rot}_x(\alpha_i) \cdot U_i' \quad (20)$$

$$U_i''' = \text{Trans}(a_i, 0, d_i) \cdot U_i'' \quad (21)$$

상기와 같은 방법으로 좌표계 [E]에 대해 각 링크 파라미터의 오차 $da_i, dd_i, d\theta_i, d\alpha_i, d\beta_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$)에 의한 로봇 손끝의 위치 오차는 식(22)~(24)와 같다.

$$d^E P_{dx} = \sum_{i=1}^N [(\vec{U}_i \vec{p} \times \vec{U}_i \vec{n})_z d\theta_i + \vec{U}_i n_z dd_i + \vec{U}_i n_x da_i + (\vec{U}_i \vec{p} \times \vec{U}_i \vec{n})_x d\alpha_i + (\vec{U}_i \vec{p} \times \vec{U}_i \vec{n})_y d\beta_i] \quad (22)$$

$$d^E P_{dy} = \sum_{i=1}^N [(\vec{U}_i \vec{p} \times \vec{U}_i \vec{o})_z d\theta_i + \vec{U}_i o_z dd_i + \vec{U}_i o_x da_i + (\vec{U}_i \vec{p} \times \vec{U}_i \vec{o})_x d\alpha_i + (\vec{U}_i \vec{p} \times \vec{U}_i \vec{o})_y d\beta_i] \quad (23)$$

$$d^E P_{dz} = \sum_{i=1}^N [(\vec{U}_i \vec{p} \times \vec{U}_i \vec{a})_z d\theta_i + \vec{U}_i a_z dd_i + \vec{U}_i a_x da_i + (\vec{U}_i \vec{p} \times \vec{U}_i \vec{a})_x d\alpha_i + (\vec{U}_i \vec{p} \times \vec{U}_i \vec{a})_y d\beta_i] \quad (24)$$

같은 방법으로 좌표계 [N]과 [E]사이의 기하학적 파라미터 오차 $dP_{Ex}, dP_{Ey}, dP_{Ez}, da_E, d\beta_E, d\gamma_E$ 에 의한 로봇 손끝의 위치 오차를 좌표계 [E]에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$U_E = I \quad (25)$$

$$U_E' = \text{Rot}_x(\gamma_E) \quad (26)$$

$$U_E'' = \text{Rot}_y(\beta_E) \cdot U_E' \quad (27)$$

$$U_E''' = \text{Rot}_z(\alpha_E) \cdot U_E'' \quad (28)$$

여기서, I는 단위 행렬이다.

$$(d^E \vec{P})_{d\gamma_E} = \left\{ \begin{aligned} & \left(\begin{matrix} \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{n} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{o} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{a} \end{matrix} \right)_x \vec{i} \\ & + \left(\begin{matrix} \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{n} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{o} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{a} \end{matrix} \right)_y \vec{j} \\ & + \left(\begin{matrix} \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{n} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{o} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{a} \end{matrix} \right)_z \vec{k} \end{aligned} \right\} d\gamma_E \quad (29)$$

$$(d^E \vec{P})_{d\beta_E} = \left\{ \begin{aligned} & \left(\begin{matrix} \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{n} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{o} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{a} \end{matrix} \right)_y \vec{i} \\ & + \left(\begin{matrix} \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{n} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{o} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{a} \end{matrix} \right)_z \vec{j} \\ & + \left(\begin{matrix} \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{n} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{o} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{a} \end{matrix} \right)_x \vec{k} \end{aligned} \right\} d\beta_E \quad (30)$$

$$(d^E \vec{P})_{da_E} = \left\{ \begin{aligned} & \left(\begin{matrix} \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{n} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{o} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{a} \end{matrix} \right)_z \vec{i} \\ & + \left(\begin{matrix} \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{n} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{o} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{a} \end{matrix} \right)_x \vec{j} \\ & + \left(\begin{matrix} \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{n} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{o} \\ \vec{U}_E \vec{p} \times \vec{U}_E \vec{a} \end{matrix} \right)_y \vec{k} \end{aligned} \right\} da_E \quad (31)$$

$$(d^E \vec{P})_{d\vec{p}_E} = \left(\vec{d}\vec{p}_E \cdot \vec{U}_E \vec{n} \right) \vec{i} + \left(\vec{d}\vec{p}_E \cdot \vec{U}_E \vec{o} \right) \vec{j} + \left(\vec{d}\vec{p}_E \cdot \vec{U}_E \vec{a} \right) \vec{k} \quad (32)$$

위에서 구한 식들을 풀어서 정리하면 식(33)과 같이 간단한 행렬식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E dx \\ E dy \\ E dz \end{bmatrix} = [E e(\vec{x}, \vec{\theta})] \vec{\varepsilon} = \begin{bmatrix} E w_x(\vec{x}, \vec{\theta}) & E e_x(\vec{x}, \vec{\theta}) \\ E w_y(\vec{x}, \vec{\theta}) & E e_y(\vec{x}, \vec{\theta}) \\ E w_z(\vec{x}, \vec{\theta}) & E e_z(\vec{x}, \vec{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\varepsilon}_1 \\ \vec{\varepsilon}_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

여기서, $E dx$, $E dy$, $E dz$ 는 좌표계 [E]에 대해 표현한 로봇 손끝의 위치 오차이며, $\vec{\varepsilon} = [\vec{\varepsilon}_1^T, \vec{\varepsilon}_2^T]^T$ 은 이들 파라미터의 오차 벡터로서

$$\vec{\varepsilon}_1 = [dP_{Wx}, dP_{Wy}, dP_{Wz}, da_W, d\beta_W, d\gamma_W]^T$$

$$\vec{\varepsilon}_2 = [d\theta_1, \dots, d\theta_N, dd_1, \dots, dd_N, da_1, \dots,$$

$$da_N, da_1, \dots, da_N, d\beta_1, \dots, d\beta_N,$$

$$dP_{Ex}, dP_{Ey}, dP_{Ez}, da_E, d\beta_E, d\gamma_E]^T \text{이다.}$$

즉, $\vec{\varepsilon}_1$ 은 지그 좌표계 [W]와 좌표계 [R]사이에서 사용된 파라미터들의 오차 벡터이고, $\vec{\varepsilon}_2$ 는 Calibrated robot transformation에 사용된 파라미터 오차와 좌표계 [N]과 [E]사이의 기하학적 관계를 나타내는데 사용한 파라미터들의 오차 벡터이다. 그리고 $e = e(\vec{x}, \vec{\theta})$ 을 오차 전파 행렬(Error propagation matrix)이라고

부르는데^[7], 이것은 모델 파라미터들(\vec{x})과 조인트 각($\vec{\theta}$)의 함수로서, 각 파라미터 오차들이 로봇 손끝의 위치 오차로 전파되는 특성을 나타낸다.

그리고 다중 측정 좌표계를 사용하려면 서로 다른 지그 좌표계에서 측정된 데이터들을 통합하여 캘리브레이션을 할 수 있어야 하는데, 각 지그의 Base transformation 파라미터들은 지그들의 고유 파라미터들이고 로봇과 Tool 파라미터들은 공통된 파라미터이므로 식(33)은 식(34)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E dx^{J_1} \\ E dy^{J_1} \\ E dz^{J_1} \\ E dx^{J_2} \\ E dy^{J_2} \\ E dz^{J_2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E w_x^{J_1}(\vec{x}, \vec{\theta}) & 0 & \dots & E e_x(\vec{x}, \vec{\theta}) \\ E w_y^{J_1}(\vec{x}, \vec{\theta}) & 0 & \dots & E e_y(\vec{x}, \vec{\theta}) \\ E w_z^{J_1}(\vec{x}, \vec{\theta}) & 0 & \dots & E e_z(\vec{x}, \vec{\theta}) \\ 0 & E w_x^{J_2}(\vec{x}, \vec{\theta}) & \dots & E e_x(\vec{x}, \vec{\theta}) \\ 0 & E w_y^{J_2}(\vec{x}, \vec{\theta}) & \dots & E e_y(\vec{x}, \vec{\theta}) \\ 0 & E w_z^{J_2}(\vec{x}, \vec{\theta}) & \dots & E e_z(\vec{x}, \vec{\theta}) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\varepsilon}_1^{J_1} \\ \vec{\varepsilon}_1^{J_2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vec{\varepsilon}_2 \end{bmatrix} \quad (34)$$

즉, $E dx^{J_1}$ 은 지그 1좌표계에서 측정된 좌표계 [E]에서 본 손끝 위치의 x 방향 오차이며, $\vec{\varepsilon}_1^{J_1}$ 은 지그 1좌표계 [W]와 좌표계 [R]사이에서 Base transformation 파라미터들의 오차 벡터이고, $\vec{\varepsilon}_1^{J_2}$ 은 지그 2좌표계 [W2]와 좌표계 [R]사이에서 Base transformation 파라미터들의 오차 벡터이다.

따라서, 측정 좌표계가 1개 증가함에 따라 추정될 모델 파라미터의 수는 6개씩 증가하며, 증가한 좌표계를 기준으로 측정된 데이터를 사용하여 식(14)~(17), (22)~(24), (29)~(32)를 이용하면 다중 측정 좌표계 시스템의 오차 전파 행렬을 구성할 수 있다.

2.4 모델 파라미터의 추정 알고리즘

일반적으로 모델 파라미터값을 추정하기 위해서는 여러 위치 및 자세에서 로봇 손끝의 위치 (${}^W \vec{p}^m$) 및 그때의 로봇 조인트 각($\vec{\theta}^m$)을 측정해야 한다.

따라서, 지그의 y-z면에 Mx번, x-z면에 My번, x-y면에 Mz번의 측정을 했을 경우, 기구학 모델을 사용하여 표현된 로봇 손끝의 x, y, z 위치와 측정된 위치사이의 차이는 식(35)~(37)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} {}^W dx^{J_1} \\ {}^W dy^{J_1} \\ {}^W dz^{J_1} \\ {}^W dx^{J_2} \\ {}^W dy^{J_2} \\ {}^W dz^{J_2} \\ \vdots \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} {}^W w_x^{J_1}(\vec{x}, \vec{\theta}^m) & 0 & \dots & {}^W e_x(\vec{x}, \vec{\theta}^m) \\ {}^W w_y^{J_1}(\vec{x}, \vec{\theta}^m) & 0 & \dots & {}^W e_y(\vec{x}, \vec{\theta}^m) \\ {}^W w_z^{J_1}(\vec{x}, \vec{\theta}^m) & 0 & \dots & {}^W e_z(\vec{x}, \vec{\theta}^m) \\ 0 & {}^W w_x^{J_2}(\vec{x}, \vec{\theta}^m) & \dots & {}^W e_x(\vec{x}, \vec{\theta}^m) \\ 0 & {}^W w_y^{J_2}(\vec{x}, \vec{\theta}^m) & \dots & {}^W e_y(\vec{x}, \vec{\theta}^m) \\ 0 & {}^W w_z^{J_2}(\vec{x}, \vec{\theta}^m) & \dots & {}^W e_z(\vec{x}, \vec{\theta}^m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\varepsilon}_1 \\ \vec{\varepsilon}_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^E R_W^{J_1} & 0 & \dots \\ 0 & {}^E R_W^{J_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^E dx^{J_1} \\ {}^E dy^{J_1} \\ {}^E dz^{J_1} \\ {}^E dx^{J_2} \\ {}^E dy^{J_2} \\ {}^E dz^{J_2} \\ \vdots \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} {}^E R_W^{J_1} & 0 & \dots \\ 0 & {}^E R_W^{J_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^E w_x^{J_1}(\vec{x}, \vec{\theta}^m) & 0 & \dots & {}^E e_x(\vec{x}, \vec{\theta}^m) \\ {}^E w_y^{J_1}(\vec{x}, \vec{\theta}^m) & 0 & \dots & {}^E e_y(\vec{x}, \vec{\theta}^m) \\ {}^E w_z^{J_1}(\vec{x}, \vec{\theta}^m) & 0 & \dots & {}^E e_z(\vec{x}, \vec{\theta}^m) \\ 0 & {}^E w_x^{J_2}(\vec{x}, \vec{\theta}^m) & \dots & {}^E e_x(\vec{x}, \vec{\theta}^m) \\ 0 & {}^E w_y^{J_2}(\vec{x}, \vec{\theta}^m) & \dots & {}^E e_y(\vec{x}, \vec{\theta}^m) \\ 0 & {}^E w_z^{J_2}(\vec{x}, \vec{\theta}^m) & \dots & {}^E e_z(\vec{x}, \vec{\theta}^m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\varepsilon}_1 \\ \vec{\varepsilon}_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (39)
 \end{aligned}$$

$$({}^W dx_E)_i = {}^W p_x(\vec{x}^N + \vec{\varepsilon}, \vec{\theta}_i^m) - ({}^W p_x^m)_i \quad (35)$$

$$({}^W dy_E)_j = {}^W p_y(\vec{x}^N + \vec{\varepsilon}, \vec{\theta}_j^m) - ({}^W p_y^m)_j \quad (36)$$

$$({}^W dz_E)_k = {}^W p_z(\vec{x}^N + \vec{\varepsilon}, \vec{\theta}_k^m) - ({}^W p_z^m)_k \quad (37)$$

단, $i = 1, 2, 3, \dots, M_x$, $j = 1, 2, 3, \dots, M_y$, $k = 1, 2, 3, \dots, M_z$ (M : 총 측정횟수 = $M_x + M_y + M_z$)이다.

여기서 ${}^W p_x^m$, ${}^W p_y^m$, ${}^W p_z^m$ 은 로봇 손끝이 지그의 Y-Z면, X-Z면, 또는 X-Y면을 접촉하였을 때의 지그 좌표계 [W]에 대하여 표현되어진 로봇 손끝의 위치이며, \vec{x}^N 은 모델 파라미터의 공칭값이다. 참고로, 2.3절에서 전개한 오차 전과 행렬은 좌표계 [E]에서 바라본 로봇 손끝의 위치 오차로서 유도하였는데, 실제 로봇 손끝의 측정 데이터는 측정의 기준 좌표계가 지그 좌표계인 [W]이므로 식(38)에 의해 오차 전과 행렬을 식(39)와 같이 좌표계 [W]에 관한 식으로 바꾸어 쓸 수도 있다.

$$\begin{bmatrix} {}^E dx^{J_1} \\ {}^E dy^{J_1} \\ {}^E dz^{J_1} \\ {}^E dx^{J_2} \\ {}^E dy^{J_2} \\ {}^E dz^{J_2} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^E R_W^{J_1} & 0 & \dots \\ 0 & {}^E R_W^{J_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^W dx^{J_1} \\ {}^W dy^{J_1} \\ {}^W dz^{J_1} \\ {}^W dx^{J_2} \\ {}^W dy^{J_2} \\ {}^W dz^{J_2} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (38)$$

여기서, ${}^E R_W$ 는 로봇 손끝의 좌표계 [E]에서 바라본 지그 좌표계 [W]의 회전 변환 행렬이다. 따라서, 우리가 구하고자 하는 오차 전과 행렬은 기본적으로 식(40)에 의해 계산할 수 있는데,

$$\begin{aligned}
 \vec{y}_f &= E(\vec{x}^N, {}^m \vec{\theta}) \cdot \vec{\varepsilon} \\
 (\vec{y}_f = \vec{y}(\vec{\varepsilon}) - {}^m \vec{y}) & \quad (40)
 \end{aligned}$$

여기서 $\vec{y}(\vec{\varepsilon})$ 는 각 측정 위치에서의 로봇 기구학 방정식을 이용하여 계산된 손끝의 단방향 위치 벡터이며, ${}^m \vec{y}$ 는 실제 측정된 위치들이다. 즉,

$$\begin{aligned}
 \vec{y}(\vec{\varepsilon}) &= [{}^W p_x(\vec{x}^N + \vec{\varepsilon}, \vec{\theta}_1^m) \\ & \quad \dots {}^W p_x(\vec{x}^N + \vec{\varepsilon}, \vec{\theta}_{M_x}^m), \\ & \quad {}^W p_y(\vec{x}^N + \vec{\varepsilon}, \vec{\theta}_1^m) \\ & \quad \dots {}^W p_y(\vec{x}^N + \vec{\varepsilon}, \vec{\theta}_{M_y}^m), \\ & \quad {}^W p_z(\vec{x}^N + \vec{\varepsilon}, \vec{\theta}_1^m) \\ & \quad \dots {}^W p_z(\vec{x}^N + \vec{\varepsilon}, \vec{\theta}_{M_z}^m)]^T \quad (41)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 {}^m \vec{y} &= [({}^W p_x^m)_1 \dots ({}^W p_x^m)_{M_x}, \\ & \quad ({}^W p_y^m)_1 \dots ({}^W p_y^m)_{M_y}, \\ & \quad ({}^E p_z^m)_1 \dots ({}^E p_z^m)_{M_z}]^T \quad (42)
 \end{aligned}$$

식(40)에서 로봇 손끝의 오차 벡터 \vec{y}_f 와 오차 전과 행렬 $E(\vec{x}^N, {}^m \vec{\theta})$ 는 지그 좌표계 [W]에서 본

것이며, 파라미터 오차가 포함된 식(43)의 비선형 기구학 방정식을 직접 이용할 경우 보다 정확한 파라미터 오차 벡터 $\vec{\epsilon}$ 을 추정할 수가 있다. 이는 식(43)의 함수값을 최소로 하는 $\vec{\epsilon}$ 를 구함으로써 얻을 수 있다.

$$\Psi(\vec{\epsilon}) = [\vec{y}(\vec{\epsilon}) - {}^m\vec{y}]^T \cdot [\vec{y}(\vec{\epsilon}) - {}^m\vec{y}] \quad (43)$$

식(43)은 비선형이므로 $\vec{\epsilon}$ 의 최적해는 참고문헌[7]과 같은 방법을 이용하여 반복적으로 구할 수 있다.

3. 다중 측정 좌표계를 이용한 캘리브레이션 방법 및 실험

3.1 실험 장치

실험 장치는 Fig. 4와 같이 크게 6축 수직 다관절 용접 로봇과 계단형 지그로 구성되어 있으며, 실험을 수행하기 전에 로봇은 Digital 수준기로 정밀 마스터링 하여 각 축별 마스터링 오차가 $1/100^\circ(\text{Degree})$ 이내인 상태에서 실험하였다.

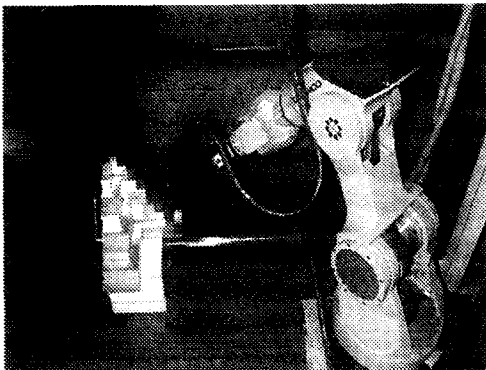
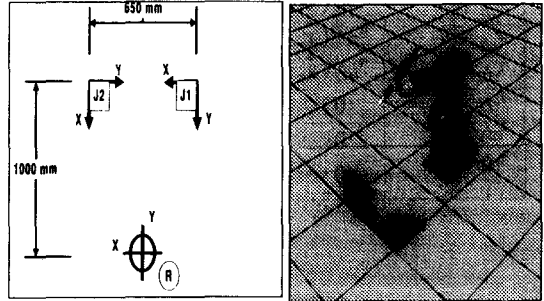


Fig. 4 Experimental devices for calibration

3.2 다중 측정 좌표계를 이용한 캘리브레이션 실험 방법

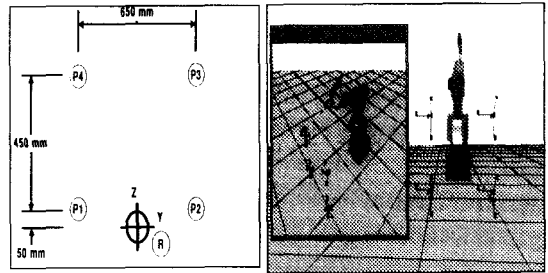
Fig. 5와 같이, 대상 로봇의 작업 공간상의 좌우 양쪽에 지그를 위치시키고 각각의 지그 좌표계 [W]를 기준하여 터치 센싱함으로써 로봇 손끝의 위치를 측정하였다. 이때 하나의 지그로부터 96개의 측정 데이터를 얻은 다음, 각각의 지그에 대해 캘리브레이

션한 결과와 이들 두개의 데이터를 통합하여 다중 측정 좌표계를 이용한 결과를 비교, 분석하였다.



- * [R] : Robot 설치 위치
- * J1, J2 : Jig 설치 위치

Fig. 5 Positions of jigs for experiments using multi-measurement coordinate systems



- * P1, P2, P3, P4 : Test Point 위치
- * P1 : (1000, -325, 50) * P2 : (1000, 325, 50)
- * P3 : (1000, 325, 500) * P4 : (1000, -325, 500)
- * Robot 좌표계에서 본 위치임. (단위 : mm)

Fig. 6 Test points for measuring absolute position error of robot end effector

4. 다중 측정 좌표계를 사용한 캘리브레이션 결과 및 단일 측정시와의 비교

4.1 캘리브레이션 결과

Table 1.은 캘리브레이션을 수행하기 전의 실험 대상 로봇 시스템의 파라미터 값들이며, 각 위치에서 측정된 데이터를 이용하여 이들 파라미터들을 캘리브레이션한 결과는 Table 2.와 같다. 또한, 캘리브레이션은 추정된 파라미터들이 로봇 호스트 프로그램상의 공칭 역기구학 방정식(Nominal inverse kinematics)에 적용할 수 있도록 추정될 모델 파라미터를 선택하여 실행하였으며, 이때 최종적으로 추정한 파라미터의 갯수는 17개이다.

Table 1. Nominal parameters of robot system

	Nominal values of parameters (단위 : Degree, mm)					
	$\Delta\theta_i$	a_i	d_i	a_i	β_i	
1	0	-90	400	60	0	
2	0	0	0	350	0	
3	0	-90	0	80	0	
4	0	90	390	0	0	
5	0	-90	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	
	P_x	P_y	P_z	α	β	γ
${}^wT_R^1$	445	1000	0	0	0	-90
${}^wT_R^2$	1000	445	0	0	0	180
6T_E	1.85	0.25	451.0	0	-30	0

4.2 절대 위치 오차 측정

4.2.1 절대 위치 오차의 측정 및 실험 방법

캘리브레이션된 모델 파라미터를 로봇 컨트롤러에 내장되어 있는 역기구학 방정식(Inverse kinematics)에 적용하고, 실제 로봇 손끝을 작업 공간상의 4개의 절대 위치(Test points)에 위치시킨 다음, Height gauge, Digital caliper, 줄자등의 측정 기구를 사용하여 로봇 손끝의 절대 위치 오차를 측정하였다. 따라서 측정값에는 약간의 측정 오차를 포함할 수

있기때문에 Fig. 6과 같이 각 Test point에서 절대 위치 오차의 평균값을 구해 그 크기를 비교하였다. 비교는 공칭 파라미터를 사용했을 경우와 단일 측정 좌표계 시스템을 이용하여 캘리브레이션된 파라미터를 사용했을 경우, 그리고 다중 측정 좌표계 시스템을 이용하여 캘리브레이션된 파라미터를 사용했을 경우의 절대 위치 오차를 비교하였다.

4.2.2 절대 위치 오차 측정 결과

Table 3. Measured error using nominal parameters

구분	단위 : mm				RMS Error	표준 편차
	P1	P2	P3	P4		
X	6.94	-1.38	0.00	6.79	8.78 mm	2.29 mm
Y	-16.25	-10.61	-11.85	-17.16		
Z	-1.68	-2.35	-1.98	-2.27		

Table 4. Measured error using calibrated parameters of single coordinate system jig

구분	단위 : mm				RMS Error	표준 편차
	P1	P2	P3	P4		
X	0.00	-0.50	1.57	1.03	1.08 mm	0.77 mm
Y	0.50	0.50	1.76	1.57		
Z	-0.53	-1.85	0.02	0.65		

Table 2. Results of calibrations

	Estimated values of parameters (단위 : Degree, mm)																	
	지그 1 좌표계 측정 데이터 사용					지그 2 좌표계 측정 데이터 사용					다중 좌표계 측정 데이터 사용							
	$\Delta\theta_i$	α_i	d_i	a_i	β_i	$\Delta\theta_i$	α_i	d_i	a_i	β_i	$\Delta\theta_i$	α_i	d_i	a_i	β_i			
1	0	-90	400	53.10	0	0	-90	400	55.63	0	0	-90	400	55.28	0			
2	-0.81	0	0	348.10	0	0.44	0	0	349.81	0	-0.24	0	0	348.27	0			
3	0.62	-90	0	79.80	0	0.25	-90	0	81.00	0	0.48	-90	0	81.05	0			
4	0.11	90	393.8	0	0	0.26	90	392.7	0	0	0.21	90	392.8	0	0			
5	-0.17	-90	0	0	0	-0.10	-90	0	0	0	-0.13	-90	0	0	0			
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	P_x	P_y	P_z	α	β	γ	P_x	P_y	P_z	α	β	γ	P_x	P_y	P_z	α	β	γ
${}^wT_R^1$	439.7	981.2	0.06	0.04	0.36	-89	-	-	-	-	-	-	439.4	982.2	-0.5	-0.0	-0.0	-89
${}^wT_R^2$	-	-	-	-	-	-	980.5	446.8	-1.4	0.16	-0.5	180	981.1	446.4	-1.5	0.04	-0.1	180
6T_E	3.286	0.203	435.0	0	-30	0	3.023	-0.21	452.0	0	-30	0	3.26	0.11	451.0	0	-30	0

Table 5. Measured error using calibrated parameters of single coordinate system jig 2

구분	단위 : mm				RMS Error	표준 편차
	P1	P2	P3	P4		
X	0.83	1.16	0.20	0.50	1.66 mm	1.14 mm
Y	1.03	2.39	3.85	-1.72		
Z	2.32	-0.17	-0.15	0.84		

Table 6. Measured Error w.r.t jig 1 using calibrated parameters of multi-coordinate system

구분	단위 : mm				RMS Error	표준 편차
	P1	P2	P3	P4		
X	0.63	-1.00	-1.42	0.93	0.73 mm	0.62 mm
Y	0.54	0.00	-0.17	0.76		
Z	-0.44	-0.78	0.52	-0.32		

Table 7. Measured error w.r.t jig 2 using calibrated parameters of multi-coordinate system

구분	단위 : mm				RMS Error	표준 편차
	P1	P2	P3	P4		
X	0.75	1.28	0.75	1.00	1.38 mm	0.56 mm
Y	1.33	2.94	2.69	0.71		
Z	0.17	-0.91	0.38	0.29		

5. 직선 운동 성능 측정

5.1 직선 운동 추종 성능 실험 방법

로봇을 사용하고 있는 여러 현장에서 공칭 파라미터를 이용하여 직선 보간 운동을 했을 때 로봇 손끝의 오차는 운동 방향으로 (10/800~15/800)mm 정도의 길이 오차가 발생하고, 동시에 이론적인 직선대비 중간부분에서 ±(2~5)mm 정도의 편차가 발생하는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 본 캘리브레이션 결과를 적용했을 때 직선 운동상에 어느정도 성능이 향상되는가를 측정하기 위해 다음과 같은 실험을 하였다.

- ① Move-L 운동 : 초기점과 종료점을 교시한 다음 수평 및 수직 방향의 직선 보간 운동
 - ② I-Move 운동 : 초기점을 교시해주고 진행 방향 및 이동 거리를 지정한 다음 수평 직선 보간 운동
- 상기의 두 가지 로봇 명령을 사용하여 공간상에서 직선 운동하는 성능을 확인하고, Move-L 운동중의 배나움 현상(Deviation) 및 I-Move 운동시 길이 오차의 측정 결과를 Table 9~10.에 나타내었다.

Table 8. Comparison between simple coordinate system and multi-coordinate system

	로봇 위치 오차의 평균	로봇 위치 오차의 표준편차
① 단일 측정 좌표계 사용시	1.370mm	0.955mm
② 다중 측정 좌표계 사용시	1.055mm	0.590mm
다중 측정 좌표계 사용시 개선효과 (① / ②)	약 30% 오차 감소	약 60% 편차 감소

5.2 직선 운동 추종 성능 실험 결과

Table 9~10.의 실험 결과와 같이, 로봇의 직선 운동 오차는 공칭 파라미터를 사용한 경우보다 캘리브레이션된 파라미터를 사용하는 것이 오차가 현저히 줄어드는 것을 알 수 있었다. 또한, 동일한 캘리브레이션된 파라미터를 사용하더라도 캘리브레이션 데이터를 수집한 부근에 가까워질수록 오차가 줄어드는 현상을 나타내었다.

Table 9. Measured error using nominal link parameters

로봇기준 X=1000mm에서 Y방향 직선운동 오차	
I-Move 800mm	$\Delta L \approx 12.0\text{mm}$
Move-L	$\Delta X \approx -4.7\text{mm}$
	$\Delta Y \approx 2.0\text{mm}$

Table 10. Measured error using calibrated parameters of multi-coordinate system

로봇기준 X=300mm, Y=325mm에서 X방향 직선운동 오차	
I-Move 400mm	$\Delta L \approx 2.5\text{mm}$
Move-L	$\Delta X \approx 0.0\text{mm}$
	$\Delta Y \approx 0.3\text{mm}$
로봇기준 X=1000mm에서 Y방향 직선운동 오차	
I-Move 800mm	$\Delta L \approx 0.0\text{mm}$
Move-L	$\Delta X \approx 0.0\text{mm}$
	$\Delta Y \approx 0.0\text{mm}$
로봇기준 X=1000mm, Y=-325mm에서 Z방향 직선운동 오차	
I-Move 400mm	$\Delta L \approx 0.8\text{mm}$
Move-L	$\Delta X \approx 0.1\text{mm}$
	$\Delta Y \approx 0.0\text{mm}$

6. 결론

Table 3~7.의 실험 결과로부터 로봇의 절대 위치 오차는 공칭 파라미터를 사용하는 것보다 캘리브레이션된 파라미터를 사용하는 것이 오차가 크게 줄어드는 것을 알 수 있다.(RMS Error가 8.78mm에서 2.0mm이하로 감소) 또한, Table 8.과 같이, 단일 측정 좌표계보다는 다중 측정 좌표계를 이용하여 캘리브레이션된 파라미터를 사용하는 것이 로봇 손끝의 절대 위치 오차를 좀더 줄일 수 있고, 오차 분포도 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

그리고 Table 9~10.의 부가적으로 실시한 직선 보간 실험 결과로부터 도출할 수 있는 것은 동일한 캘리브레이션된 파라미터를 사용하더라도 캘리브레이션용 데이터를 수집한 부근에 가까워질수록 직선 보간시의 운동 성능이 크게 향상된다는 것이다. 즉, 이것은 캘리브레이션에 사용되는 측정 데이터의 분포가 넓을수록 로봇의 위치 정밀도가 전체 작업 공간에서 향상된다는 것을 의미한다.

따라서, 보다 효율적이고 효과적인 캘리브레이션을 하기 위해서는 관측성^[9]이 높은 측정과 동시에 작업 공간 내에 잘 분포된 캘리브레이션 데이터를 수집하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

결국, 지그를 여러 곳에 위치시켜 얻은 측정 데이터로부터 캘리브레이션을 수행하는 다중 측정 좌표계 시스템은 단일 측정 좌표계 시스템을 이용하는 것보다 로봇의 위치 정밀도를 보다 향상시킬 수 있고, 로봇 손끝의 절대 위치 오차에 대한 분포 역시 로봇의 전체 작업 공간에 걸쳐 비교적 일정하게 유지시킬 수 있다는 장점이 있다.

참고문헌

1. Jigien Chen and Lih-Ming Chao, "Positioning Error Analysis for Robot Manipulators with All Rotary Joints," *IEEE Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, April 1986.
2. S. P Ananthanarayanan, C. Szymczyk and A. A. Goldenberg, "Identification of Kinematic Parameters of Multiple Closed Chain Robotics Manipulators Working in Coordination," *IEEE Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, May 1992.
3. Keith D. Gremban, Charles E. Thorpe and Takeo Kanade, "Geometric Camera Calibration using Systems of Linear Equations," *IEEE Journal of Robotics and Automation* CH2555-1, pp. 562-567, 1988.
4. Yuh-Lin Chang and Ping Liang, "On Recursive Calibration of Cameras for Robot Hand-eye Systems," *IEEE Journal of Robotics and Automation* CH2750-8, pp. 838-843, 1989.
5. J. P. Prenninger, M. Vincze and H. Gander, "Contactless Position and Orientation Measurement of Robot End-Effectors," *IEEE Journal of Robotics and Automation* 1050-4729, pp. 180-185, 1993.
6. Makoto Shimojo and Masatoshi Ishikawa, "An Active Touch Sensing Method Using a Spatial Filtering Tactile Sensor," *IEEE Journal of Robotics and Automation* 1050-4279, pp. 948-954, 1993.
7. 범진환, "아-크 용접 로봇의 오프-라인 프로그램 응용을 위한 효과적 캘리브레이션 방법 연구," *한국정밀공학회*, 제13권, 제1호, 131-142, 1996.
8. Richard P. Paul, "Robot Manipulators : Mathematics, Programming, and Control," *The MIT Press*, pp. 85-92, 1981.
9. Borm, J. H., and Menq, C. H., "Determination of optimal measurement configurations for robot calibration based on observability measure," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 10.1, pp. 51-63, 1991.