

# 수정 D-H 표기법을 이용한 로봇 캘리브레이션에 관한 연구

박 상호<sup>o</sup>, 정 명진

한국 과학 기술원 전기및 전자공학부

## A Study of Robot Calibration Using Modified D-H Notation

Park Sang Ho<sup>o</sup>, Chung Myung Jin  
Dept. of E.E. KAIST

**Abstract** - This paper introduces what calibration is and how it is operated. The steps of calibration methods are discussed, which are modeling, measurement, parameter identification and compensation. Using modified D-H model, a new algorithm for parameter identification is developed. This algorithm is very simple and applicable to off-line robot simulator.

### 1. 서론

높은 정밀도(30/㎞)를 요구하는 작업에 사용되는 로봇은 정밀성이 보장되어야 한다. 그러나 로봇 자체는 충분한 정밀성을 가지고 있으면서도 로봇 파라미터 값이 정확히 알려져 있지 않아 정밀 작업을 수행하지 못하는 경우가 종종 있다. 이는 로봇 제작사와 작업장 구성시에 오차가 포함되고, 노화 등으로 인한 기구학적 변형이 발생하기 때문이다. 외부 측정을 통하여 변형된 정보를 알아내어 정확한 로봇 파라미터 값을 구하고, 이로부터 로봇 제어 소프트웨어의 입력값을 수정하는 과정을 로봇 캘리브레이션(Robot Calibration)이라고 한다.

로봇 캘리브레이션은 세가지 종류로 구분된다[1,2]. 첫째는 조인트 수준 캘리브레이션(joint level calibration)이라고 정의되며, 가장 단순한 형태이다. 대부분의 로봇은 증기형 인코더(incremental encoder)를 가지고 있기 때문에, 전원이 처음 들어가는 순간에는 관절이 가지는 조인트 값을 알 수가 없다. 현재 제작되는 대부분의 로봇 제어기(robot controller)는 전원이 들어가는 순간에 로봇 관절을 한계 값까지 움직여 인코더의 초기값을 알아낸다. 둘째는 기구학 모델 캘리브레이션(kinematic model calibration)으로 정의되며, 로봇의 기구학적 오차만을 고려하는 과정으로 대부분의 연구가 이 수준에서 이루어진다. 셋째는 동적 모델 캘리브레이션(nongeometric model calibration)으로서 관절 및 조인트의 유연성(flexibility)과 컴플라이언스(compliance), 기어의 백래쉬(backlash)와 편심(eccentricity), 이탈, 중력의 작용, 마찰의 영향 등 동적인 특성에 의한 오차까지 고려한다. 그러나 기어의 백래쉬와 중력에 대한 연구만이 미미한 정도로 진척이 되고 있을 뿐[3,4,5]. 현재까지의 연구 방향은 기구학 모델 캘리브레이션에 머물러 있다.

앞에서 설명한 각 수준의 로봇 캘리브레이션은 다음의 4단계를 거쳐야 한다[1].

첫 단계는 로봇의 모델을 세우는 과정(modeling step)이다. 로봇의 기하학적 관계를 나타내는 방식으로 우리는 D-H 표기법(Denavit-Hartenberg parameter)을 가장 많이 사용한다. 그러나 이 표기법은 로봇 캘리브레이션을 위한 모델의 기본 조건인 완전성(completeness)과 연속성(parametric continuity)을 만족시키지 못한다. 연속성 문제는 연속된 두 개의 운동축이 평행

할 때 적은 양의 좌표계 변형이 적은 양의 파라미터 변화로 나타내어 질 수 없다는 데서 발생하였으며, Hayati는 y축에 대한 회전을 나타내는 새로운 파라미터  $\beta$ 를 D-H 파라미터  $a, \alpha, d, \theta$ 에 첨가하여 모두 5개의 파라미터를 들으로써 해결하였다[6]. 또한 Everett는 모델이 완전성을 만족시키기 위해서 가져야 하는 최소의 파라미터 수(C)는 아래와 같다고 말했다[7].

$$C = 4N - 2P + 6 \quad (1)$$

N은 전체 로봇의 조인트 수이며 P는 직선 운동 조인트 수이다. 마지막에 6을 더하는 이유는 로봇의 마지막 축 좌표계와 공구 좌표계 사이에 6차원의 임의의 변형이 있을 수 있기 때문이다. 이와는 다르게 로봇을 정확하게 묘사하기 위해 한 축당 6개 또는 7개의 파라미터를 사용하여야 한다고 제안한 논문도 많이 있다[8,9,10].

로봇의 모델링이 끝나면 여러 자세에 대해 정확한 위치 또는 위치/방향 측정을 해야 한다. 이 단계를 측정 단계(measurement step)라고 하며, 정밀한 3차원 위치 센서 혹은 위치/방향 센서가 사용된다.

세번째 단계는 일치화 단계(identification step)로서, 측정된 값들이 잘 들어 맞도록 모델링 단계에서 설정한 파라미터들의 값을 구하는 것이다. 파라미터 값의 수정법은 여러가지가 있으며, Veitschegger와 Wu에 의하여 잘 정리되어 있다[11]. 과거에 많이 쓰인 방법은 측정된 센서 데이터가 가장 잘 들어 맞는 파라미터 값들을 반복적인 계산으로 찾아내는 것이다. 그러나 이 방법은 계산 시간이 많이 요구되며 또한 수렴 오차를 가지고 있고, 알고리즘을 구현하는 방법도 까다롭다. 최근의 연구는 반복적인 계산을 통해 수렴 값을 얻어내는 대신 단시간 계산함으로써 파라미터 값을 얻어내는 방법(closed form solution)을 제시한다[12,13].

캘리브레이션의 마지막 단계는 로봇의 작업 확일을 적절히 수정하는 보상 단계(compensation step)이다. 일치화 단계에서 구해진 새로운 로봇의 기구학은 그 형태의 복잡성으로 인해 역 기구학을 수식적으로 구해낸다는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서 많은 경우 정상 로봇의 역기구학을 통하여 구해진 작업 확일의 내용을 보상해 주어야 한다[14].

### 2. Hayati 수정 D-H 표기법

로봇 캘리브레이션을 수행하기 위해서 사용되는 모델은 다음의 두 조건을 만족해야 한다[13].

1. 완전성 (Completeness)

2. 파라미터 연속성 (Parametric Continuity)

완전성은 말 그대로 하나의 로봇 모델을 완전하게 묘사할 수 있느냐 하는 것이다. 기준 좌표계에 대하여 로봇이 설치되는

위치/방향과, 로봇 끝단에 대해 공구가 실리는 위치/방향은 항상 자유롭게 선택 되어질 수 있으므로 이 관계를 4개의 파라미터로 항상 나타낸다는 것은 불가능한 일이다. 이 문제는 중간 좌표계의 추가 설정으로 해결된다[11].

연속성이란, 좌표계가 조금 변형되면, 로봇의 파라미터 역시 적은 변화를 하여야 한다는 조건이다. 초기 캘리브레이션 연구에서는 파라미터 값의 어긋난 정도로 오차를 정의했고, 그 오차의 크기에 근거한 로봇 파라미터 값의 수정법을 사용하였기 때문에 이 조건은 필수적이었다. 근래에는 반복적 수정에 의해 파라미터 값을 찾아내지 않고, 한 번의 계산으로 그 값을 얻는 방식을 사용하기 때문에 이 조건은 반드시 만족하지 않아도 좋다. 그러나  $d$ 값의 이중성 문제와 좌표계가 로봇에 매우 멀리 떨어진 점에 설정된다는 단점은 연속성을 무시할 수 없게 만든다.

D-H 표기법은 완전성 뿐만 아니라 연속성 역시 보장이 되지 않으며[13], 1983년 Hayati는  $\alpha, a, d, \theta$ 에  $\beta$ 라는 새로운 파라미터를 첨가함으로써 이 문제를 해결하였다[6]. 즉 연속된 두 운동축이 거의 평행한 상태에 있을 때에는 운동축이 평행이라고 가정하고 좌표계를 설정한 다음, Y축을 중심으로  $\beta$ 만큼 회전시켜 새로운 좌표계를 설정한다(그림 1).

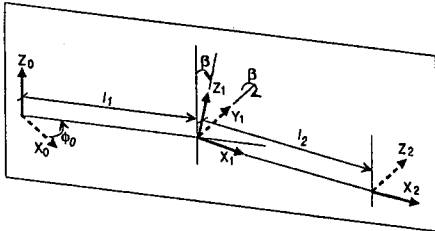


그림 1. 수정 D-H 파라미터

각 운동축에 대한 독립적인 파라미터는  $\alpha, a, d, \theta$  혹은  $\alpha, \beta, d, \theta$ 로 4개이기 때문에 완전성이 보장된다[2]. 수정 D-H 표기법의 좌표계 변환 행렬  $A_i$ 는 식(2)와 같다[15].

$$A_i = T_{z,d_i} T_{x,\theta_i} T_{x,\alpha_i} T_{y,\beta_i} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i S\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\theta_i C\theta_i + S\alpha_i C\theta_i & \alpha C\theta_i \\ C\alpha_i S\theta_i + S\alpha_i S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & \alpha S\theta_i \\ -C\alpha_i S\theta_i & 0 & S\alpha_i & C\alpha_i C\theta_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

기준 좌표계에서 바라본 공구의 위치/방향은 다음과 같은 변환 행렬  $T$ 로 나타낼 수 있다[11].

$$T = \text{BASE} \cdot A_1 \cdots A_{n-1} \cdot A_n \cdot \text{FLANGE} \cdot \text{TOOL} \quad (3)$$

- BASE : 기준 좌표계에서 로봇 첫번째 좌표계로의 변환 행렬
- $A_i$  : 좌표계(i-1)에서 좌표계(i)로의 변환 행렬
- FLANGE: 좌표계(n)에서 공구를 실을 수 있는 로봇의 끝단 좌표계로의 변환 행렬
- TOOL : 로봇의 끝단 좌표계에서 공구 좌표계로의 변환 행렬

식(3)에서 시간에 따라 변하는 부분은  $A_1$ 에서  $A_n$ 까지이다. 그러므로 FLANGE·TOOL을 하나의 상수 행렬로 여길 수 있다.

### 3. 측정

로봇 캘리브레이션은 공간 상에 놓인 실제 로봇과, 설계시 원했던 정상 로봇 사이의 차이를 없애 주는 것이다. 정상 로봇의 형태는 주어진 제한에 잘 나타나 있으며, 실제 로봇의 형태는 직

접적인 측정을 통해서만 이루어진다. 로봇의 형태를 알기 위해서는 많은 횟수의 측정이 필요한데, 측정에 소요되는 시간과 노력은 결코 무시할 수 있는 만큼 적은 것이 아니므로, 캘리브레이션 작업에서는 목적에 맞는 최소한의 측정만을 행하여야 한다.

본 논문에서는 IV장의 파라미터 일치화 방법을 위해서, 측정 과정에서 로봇 운동축의 방정식과 끝단 좌표계를 알아내어야 한다. (그림 2)와 같은 3차원 위치 센서를 사용하여 N축 로봇에 대해 2N-P+3회의 측정을 행함으로써 모든 정보를 얻어낼 수 있다(P는 직선 운동 관절 수)[17].

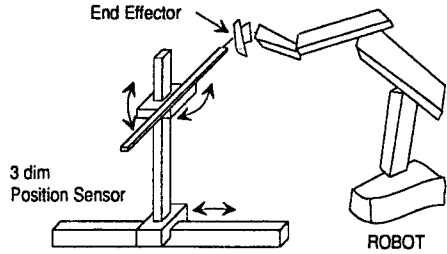


그림 2. 3차원 위치 센서의 구조

### 4. 일치화 단계 (Parameter Identification)

본 장에서는 2장에서 설정한 수정 D-H 표기법의 파라미터 값을 설정하는 간단한 방법을 제시한다. 운동축 방정식  $l_i$ 가 모두 구해졌다면, 좌표계는 다음과 같은 순서로 설정된다.

단계 1 : 초기 자세로 로봇을 이동시킨다. 이 자세에서 관절 변수  $q_i$ 는 모두 0의 값을 갖는다.

단계 2 :  $l_i$ 의 방향으로  $Z_i$ 축을 정한다. 기준 좌표계는 좌표계 (-1)로 나타내며, FLANGE는 좌표계(n+1), 공구 좌표계는 좌표계(n+2)로 표시한다.

단계 3 :  $i = 0$  으로 잡고 다음 단계를 시작한다.

단계 4 :  $l_i$ 축의 좌표계를 정하고 수정 D-H 파라미터 값을 얻는다.

i)  $l_{i-1}$ 축과  $l_i$ 축이 평행하지 않은 경우(그림 3).

조건 판단 식 :  $\|Z_{i-1} \cdot Z_i\| < 0.99$

$l_{i-1}$  위의 점들과  $l_i$  위의 점들 중 그 거리가 가장 짧은 점을 구해내어 각각을  $Q_i, O_i$ 로 정한다.  $Z_i$ 축은 이미 정해져 있고,  $X_i$ 축과  $Y_i$ 축은 다음 식으로 구한다.

$$X_i = Z_{i-1} \times Z_i \quad (4)$$

$$Y_i = Z_i \times X_i$$

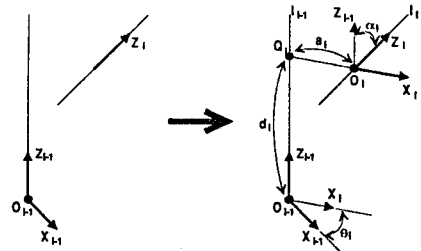


그림 3. 연속된 두 축이 평행하지 않을 경우의 좌표축 설정

위와 같이 좌표축을 설정하였다면, 파라미터들은 아래처럼 구해진다.

- $\alpha_i = \text{angle from } Z_{i-1} \text{ to } Z_i \text{ about } X_i$
- $\beta_i = 0$
- $\theta_i = \text{angle from } X_{i-1} \text{ to } X_i \text{ about } Z_{i-1}$
- $d_i = \text{distance from } O_{i-1} \text{ to } Q_i \text{ along } Z_{i-1}$
- $a_i = \text{distance from } Q_i \text{ to } O_i \text{ along } X_i$

ii)  $l_{i-1}$ 축과  $l_i$ 축이 평행한 경우(그림 4).

조건 판단 식 :  $\|Z_{i-1} \cdot Z_i\| \geq 0.99$

좌표계(i)의 원점  $O_i$ 는 좌표계(i-1)의  $XY_{i-1}$  평면과  $l_i$ 가 만나는 점으로 정한다.  $X_i$ 축과  $Y_i$ 축은 다음과 같다.

$$X_{i,temp} = \frac{O_i - O_{i-1}}{\|O_i - O_{i-1}\|}$$

$$Y_i = Z_i \times X_{i,temp}$$

$$X_i = Y_i \times Z_i$$

$$Z_{i,temp} = X_{i,temp} \times Y_i$$

좌표축 설정 후, 파라미터들은 다음과 같이 구해진다.

- $\alpha_i = \text{angle from } Z_{i-1} \text{ to } Z_{i,temp} \text{ about } X_{i,temp}$
- $\beta_i = \text{angle from } Z_{i,temp} \text{ to } Z_i \text{ about } Y_i$
- $\theta_i = \text{angle from } X_{i-1} \text{ to } X_{i,temp} \text{ about } Z_{i-1}$
- $d_i = 0$
- $a_i = \text{distance from } O_{i-1} \text{ to } O_i \text{ along } X_{i,temp}$

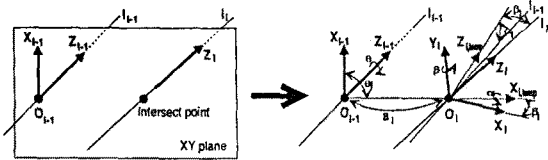


그림 4. 연속된 두 축이 거의 평행한 경우의 좌표축 설정

단계 5 : i를 1씩 증가시키면서 n이 될 때까지 단계 4를 반복한다. 여기서 n은 로봇의 자유도이다. i가 n일 경우에  $l_n$ 을 끝단 좌표계의 Z축으로 정의를 한다. 이때 좌표계(n)은 좌표계(n-1)과 끝단 좌표계 사이의 중간 좌표계 역할을 한다.

단계 6 : 끝단 좌표계는 센서를 통하여 직접적으로 얻어져 있으며, 좌표계(n)은 기존 좌표계에서부터 단계 4를 거쳐 구해졌다. 좌표계(n)과 끝단 좌표계는 Z축이 일치하므로(그림 6)에서 볼 수 있듯이 두 개의 파라미터로 나타내어진다. 정상 로봇인 경우 대개 좌표계(n)와 끝단 좌표계는 구별하지 않는다.

단계 5까지는 로봇축에 대해서 좌표축을 설정하고 4개의 파라미터 값을 얻는 방법을 보여 준다. 단계 6은 끝단 좌표계가 좌표계(n-1)에 대하여 임의로 놓일 수 있어 4개의 파라미터로는 그 관계를 나타낼 수 없다는 문제의 해결 부분이다. 여기서 새롭게 삽입된 중간 좌표계는 좌표계(n)이며, 좌표계(n-1)에서 좌표계(n)으로의 변환은  $\alpha_n, a_n, d_n$ (혹은  $\beta_n, \theta_n$ )으로, 좌표계(n)에서 끝단 좌표계로의 변환은  $d_{n+1}, \theta_{n+1}$ 로 나타내어져, 총 6개의 파라미터가 필요하다.

PUMA 560에 대하여 좌표계를 설정하고 파라미터를 구하면(그림 5)와 같이 된다.

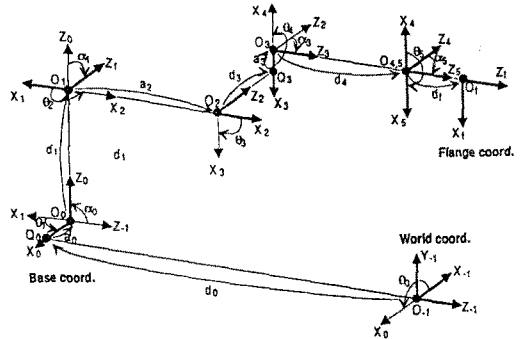


그림 5. PUMA 560의 좌표계 설정과 파라미터

PUMA 560의 수정 D-H 파라미터는(표 1)과 같다. (표 2)는 임의의 변형이 가해진 후의 수정 D-H 파라미터 값들이며, 변형 후 끝단 좌표계는(그림 6)과 같은 모양이 된다.

표 1. PUMA 560의 수정 D-H 파라미터값

i	$\alpha_i$	$\beta_i$	$\theta_i$	$d_i$ (mm)	$a_i$ (mm)
0	90°	--	180°	-1000.00	-100.00
1	90°	--	-90°	700.00	0
2	0°	0°	180°	--	431.82
3	90°	--	90°	149.09	-20.32
4	90°	--	180°	433.07	0
5	90°	--	180°	0	0
6	0°	--	0°	56.25	0

표 2. 캘리브레이션 후 PUMA 560의 수정 D-H 파라미터값

i	$\alpha_i$	$\beta_i$	$\theta_i$	$d_i$ (mm)	$a_i$ (mm)
0	89.9874°	--	179.9758°	-1000.0189	-99.8772
1	90.0185°	--	-90.0013°	700.2150	0.0272
2	-0.0096°	-0.0223°	-179.9874°	--	431.8107
3	89.9869°	--	89.9981°	149.4914	-20.2903
4	89.9972°	--	-179.9996°	433.0229	-0.1275
5	90.0128°	--	-179.9838°	-0.4531	0.3303
6	0.0208°	-0.0921°	179.9925°	--	-0.0752
끝단	--	--	-179.9773°	56.2263	--

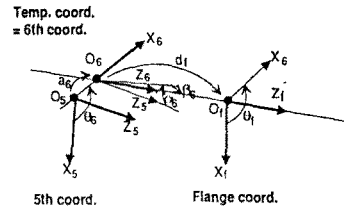


그림 6. 캘리브레이션 후 좌표계(n)과 끝단 좌표계

### 5. 역기구학의 보상 (Compensation)

4장에서는 로봇의 좌표계를 기준축부터 공구축까지 차례로 설정하면서 모델의 파라미터 값을 동시에 구할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 과정에서 구해진 파라미터 값은 로봇 기구학 행렬의 구성 요소가 되어 변형된 로봇의 기구학적 형태를 알 수 있게 되었다. 그러나 로봇이 운용되는 곳에서는 놓여지기를 원하는 위치와 방향이 주어지고, 그 자세로 로봇을 움직이는 조인트 변수값이 얼마인지를 찾는 문제가 대부분이다. 이 문제는

로봇의 역기구학 해를 구함으로써 간단하게 풀릴 수 있으나, 대부분의 경우에 있어 캘리브레이션 후 로봇의 역기구학 해를 단순한 꼴로 구한다는 것은 어렵다고 알려져 있다[12,16].

Broderick은 정상 역기구학의 반복적 사용법을 보여 주었다. (그림 7)은 평면 2축 로봇에 대해 이 알고리즘을 도해적으로 설명한 것이다. 로봇이 놓여지기 원하는 위치는 (a)의 T점이며, 실제로 로봇이 위치한 곳은 R점이다. R에서 T까지의 관계를 오차로 정의하여 T<sub>1</sub>을 (b)와 같이 정하면, 정상 역기구학을 통해 구해진 위치 R은 T에 더욱 근접한다. 같은 방법으로 T<sub>2</sub>를 정하여 다시 R을 구하면 점점 T값에 접근하며(c), 오차는 점점 줄어든다.

Broderick은 방향 오차에 대하여 고려하지 않았지만, 이 부분의 확장은 간단히 이루어지며, 위 알고리즘과 거의 비슷하다. (표 3)은 그 결과를 나타낸다.

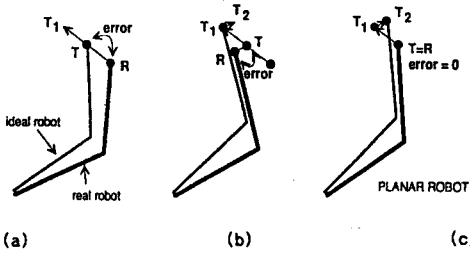


그림 7. 정상 역기구학 반복적으로 이용한 보상 방법

표 3. Broderick 방법에 방향 오차를 포함

	위치 오차	방향 오차	전체 오차
초기값	100%	100%	100%
2회 반복 후	0.0089%	0.0245%	0.0134%
3회 반복 후	0.0023%	0.0059%	0.0034%
4회 반복 후	0.0023%	0.0058%	0.0033%

## 6. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 정상 로봇과 실제 로봇과의 기구학적 차이를 줄여주는 방법에 대하여 연구하였다. 두 모델 간의 차이를 없앤다는 것은 두 개가 완전히 같아지도록 어느 하나를 바꾼다는 것이 아니라, 하나의 작업을 수행할 때 두 로봇이 같은 결과를 낼 수 있도록 조인트 변수 값을 조정한다는 뜻이다. 이러한 목적을 위한 로봇의 캘리브레이션은 1장에서 설명된 바와 같이 4단계로 구성이 되며 본 논문에서는 2장부터 5장까지 각 단계 별로 다루었다.

본 논문에서 논의된 캘리브레이션 방법은 로봇 시뮬레이터와 결합이 용이하며, 정밀한 외부 센서를 갖추면 정밀 작업의 OFF-LINE 시뮬레이션이 가능해진다.

## 참고 문헌

[1] Z. S. Roth, B. W. Mooring and R. Ravani, "An Overview of Robot Calibration," *IEEE J. of Robotics and Automat.*, vol. RA-3, no. 5, Oct. 1987, pp. 377-385.

[2] L. J. Everett, M. Driels and B. W. Mooring, "Kinematic Modeling for Robot Calibration," in *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics Automat.*, Oct. 1987, pp. 183-189.

[3] N. G. Dagalakis and D. R. Myers, "Adjustment of Robot Joint Gear Backlash Using the Robot Joint Test Excitation Technique," *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 4, no. 2, Sum. 1985, pp. 65-79.

[4] R. P. Judd and A. B. Knasinski, "A Technique to Calibrate Industrial Robots with Experimental Verification," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automat.*, 1985, pp. 351-357.

[5] D. E. Whitney, C. A. Lozinski and J. M. Rourke, "Industrial Robot Calibration Method and Results," in *Proc. of Int. Computers in Engineering Conf. and Exhibit*, vol. 1, pp. 92-100.

[6] S. Hayati and M. Mirmirani, "Improving the Absolute Positioning Accuracy of Robot Manipulators," *Journal of Robotic Systems*, 11(14), Dec. 1985.

[7] L. J. Everett and A. H. Suryodadirojo, "A Study of Kinematic Models for Forward Calibration of Manipulators," in *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics Automat.*, 1988, pp. 798-800.

[8] H. W. Stone, A. C. Sanderson and C. P. Neuman, "Arm Signature Identification," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automat.*, Apr. 1986, pp. 41-48.

[9] J. Chen, C. B. Wang, and J. C. S. Yang, "Robot Positioning Accuracy Improvement through Kinematic Parameter Identification," in *Third Canadian CAD/CAM Robotics Conf.*, 1985, pp. 4.7-4.12.

[10] J. C. Ziegert and P. Datsis, "Basic Considerations for Robot Calibration," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Advanced Automation*, 1988, pp. 932-938.

[11] W. K. Veitschegger and C. H. Wu, "Robot Calibration and Compensation," *IEEE J. of Robotics and Automat.*, vol. 4, no. 6, Dec. 1988, pp. 643-656.

[12] P. L. Broderick and R. J. Cipra, "A Method for Determining and Correcting Robot Position and Orientation Errors Due to Manufacturing," *ASME J. Mechanisms, Transmissions, and Automat. Design*, vol. 110, no. 3, Mar. 1988, pp. 3-10.

[13] H. Zhuang, Z. S. Roth and F. Hamano, "A Complete and Parametrically Continuous Kinematic Model for Robot Manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automat.*, vol. 8, no. 4, Aug. 1992, pp. 451-463.

[14] C. H. Wu, J. Ho and K. Y. Young, "Design of Robot Accuracy Compensator after Calibration," in *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics Automat.*, 1988, pp. 780-785.

[15] G. V. Puskorius and L. A. Feldkamp, "Global Calibration of a Robot/Vision System," in *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics Automat.*, Oct. 1987, pp. 190-195.

[16] S. Hayati, K. Tso and G. Roston, "Robot Geometry Calibration," in *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics Automat.*, 1988, pp. 947-951.

[17] 박상호, "수정 D-H 표기법을 이용한 로봇 캘리브레이션에 관한 연구," 한국과학기술원, 석사학위논문(1993).