

인자보정 방법을 이용한 로봇트 운동 정밀도 개선

이 상 조 조 의 정
연세대학교 공과대학 기계공학과

Improvement of Robot Motion Accuracy
through Link Parameter Calibration

Sang Jo Lee and Eui Chung Cho
Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

Abstract

The application of robot to industry is increasing and as a result the study on robot is widely being carried out. In this study, to improve the accuracy of robot motion the method which calibrates initially assumed link parameters is considered. This method calibrates 4N link parameters for N D.O.F. robot with rigid links.

1. 서 론

공장 자동화의 일연으로 여러제조 분야에서 산업용 로봇트의 사용이 증가됨에 따라 점차 생산성 향상과 품질의 고급화 및 정밀가공을 위한 다양한 연구가 행하여 지고 있다. 특히, 특정작업의 수행은 로봇트 팔 (Manipulator arms)의 동작을 통하여 이루어 지므로 로봇트 기구학(Manipulator kinematics)은 로봇트의 설계 및 제어에 기본적인 연구이다. 로봇트의 운동 정밀도는 각 링크와 링크 사이의 관계를 결정시켜주는 링크 인자(Link parameter)의 정확성에 크게 영향을 받는다. 이 링크 인자는 로봇트 제작과정상의 문제 및 측정상의 문제 등으로, 처음 가정한 링크인자와 실제 링크 인자 사이에 오차가 발생하게 되고, 이 오차는 로봇트 운동 정밀도에 커다란 영향을 주게 된다.

본 논문에서는 6자유도 로봇트에 대해 24개의 링크 인자를 보정함으로써 위치제어 및 방향제어의 정밀도를 향상시키는 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였으며, 자체 제작한 3R로봇트-각 조인트가 모두 회전 조인트(revolute joint)인-와 3차원 위치 측정장치를 이용하여 실험적으로 타당성을 입증하였다.

2. 이론 해석

여러 요인으로 인해 발생된 링크 인자의 오차를 줄임으로써 로봇트의 위치 및 방향 제어의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 2차 이상의 미소 변위 항은 무시하였으며, 모든 링크는 강체로 가정하였다.

2-1 링크 인자 오차에 따른 미소 변화

i 번째 링크 인자의 오차에 따른 i 번째 좌표계에 대한 미소 작진 변의 dx, dy, dz 와 미소 회전 변위 $\delta x, \delta y, \delta z$ 가 발생할 때, 미소 변환 행렬을 dA_i 라 하면, 실제의 좌표 변환 행렬 A_{ci} 와 처음 선정한 좌표 변환 행렬 A_i 와의 관계식은 다음과 같다.

$$A_{ci} = A_i + dA_i = A_i \text{Trans}(dx, dy, dz) \text{Rot}(\delta x, \delta y, \delta z) \quad (1)$$

또, δA_i 를 $(\text{Trans} \cdot \text{Rot} - I)$ 라 정의하면,

$$dA_i = A_i \delta A_i = \begin{bmatrix} 0 & -\delta z & \delta y & dx \\ \delta z & 0 & -\delta x & dy \\ -\delta y & \delta x & 0 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

이다. 이 때, 미소 변환 행렬 dA_i 를 다음과 같은 선형식으로 표현할 수 있다.

$$dA_i = \frac{\partial A_i}{\partial \theta_i} \delta \theta_i + \frac{\partial A_i}{\partial a_i} \delta a_i + \frac{\partial A_i}{\partial d_i} \delta d_i + \frac{\partial A_i}{\partial \alpha_i} \delta \alpha_i \quad (3)$$

여기서, $\delta \theta_i, \delta a_i, \delta d_i, \delta \alpha_i$ 는 각 링크 인자간의 미소 오차 량이다.

식(3)을 식(2)의 형태로 변환 시키기 위해 다음과 같은 식을 만족하는 행렬 $Q_\theta, Q_a, Q_d, Q_\alpha$ 를 도입한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_i}{\partial \theta_i} &= A_i Q_\theta & \frac{\partial \theta_i}{\partial a_i} &= A_i Q_a \\ \frac{\partial \theta_i}{\partial d_i} &= A_i Q_d & \frac{\partial \theta_i}{\partial \alpha_i} &= A_i Q_\alpha \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)를 식(3)에 대입한 후 식(2)와 비교하여 $\delta \theta_i$ 를 구하여 미소변위를 구하면,

$$\begin{aligned} \delta \theta_i &= \vec{k}_i^1 \Delta \theta_i + \vec{k}_i^2 \Delta d_i + \vec{k}_i^3 \Delta a_i \\ \delta \theta_i &= \vec{k}_i^1 \Delta \theta_i + \vec{k}_i^2 \Delta a_i \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 여기서,

$$\begin{aligned} \delta \theta_i^A &= \begin{bmatrix} dx_i \\ dy_i \\ dz_i \end{bmatrix} & \delta \theta_i^B &= \begin{bmatrix} \delta x_i \\ \delta y_i \\ \delta z_i \end{bmatrix} \\ \vec{k}_i^1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ a_i c \alpha_i \\ -a_i s \alpha_i \end{bmatrix}, & \vec{k}_i^2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ s \alpha_i \\ c \alpha_i \end{bmatrix}, & \vec{k}_i^3 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이다.

2-2 로봇트 첨단부의 위치 및 방향오차.

N자유도계 로봇트 첨단부의 위치 및 방향정밀도는

4개의 링크인자 정밀도에 의해 결정된다. $I_N = \sum_{i=1}^N A_i$ 라고 정의하고 미소변화량의 곱차항을 무시하면, N자유도계 로봇트 첨단부의 실제 위치 및 방향은 다음과 같이 표현된다.

$$I_N + dI_N = I_N + \sum_{i=1}^N (A_i \delta a_i + \dots + A_{i-1} dA_i + \dots + A_N) \quad (6)$$

식(6)에 식(2)를 대입하면,

$$\begin{aligned} dI_N &= I_N \left[\sum_{i=1}^N (U_{i+1}^{-1} \delta A_i U_{i+1}) \right] \\ &= I_N \delta I_N \end{aligned} \quad (7)$$

이다. 여기서 U_i 와 δI_N 을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} U_i &= A_i A_{i+1} \dots A_{N-1} A_N \\ &= \begin{bmatrix} n_i^u & o_i^u & a_i^u & p_i^u \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \delta I_N &= \begin{bmatrix} 0 & -\delta z^N & \delta y^N & \delta x^N \\ \delta z^N & 0 & -\delta x^N & \delta y^N \\ -\delta y^N & \delta x^N & 0 & \delta z^N \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

식(7)로부터 δI_N 을 정리하여 구하면 다음과 같다.

$$\delta I_N = \begin{bmatrix} 0 & \sum_{i=1}^N (a_{i+1}^u \delta a_i^u) & \sum_{i=1}^N (o_{i+1}^u \delta a_i^u) \\ \sum_{i=1}^N (a_{i+1}^u \delta a_i^u) & 0 & -\sum_{i=1}^N (n_{i+1}^u \delta a_i^u) \\ -\sum_{i=1}^N (o_{i+1}^u \delta a_i^u) & \sum_{i=1}^N (n_{i+1}^u \delta a_i^u) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N [n_{i+1}^u d_i^A + (p_{i+1}^u \times n_{i+1}^u) \delta_i^A] \\ \sum_{i=1}^N [o_{i+1}^u d_i^A + (p_{i+1}^u \times o_{i+1}^u) \delta_i^A] \\ \sum_{i=1}^N [a_{i+1}^u d_i^A + (p_{i+1}^u \times a_{i+1}^u) \delta_i^A] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(5)를 식(8)에 대입한 후 각 행렬요소를 비교하면, 다음과 같은 형태의 링크 인자 오차와 번째 좌표계에 대한 미소 변화량 사이의 관계 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} dx^N \\ dy^N \\ dz^N \\ \delta x^N \\ \delta y^N \\ \delta z^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} THF1_1 & THF1_2 & \dots & THF1_N & LDF1_1 & LDF1_2 & \dots \\ THF2_1 & THF2_2 & \dots & THF2_N & LDF2_1 & LDF2_2 & \dots \\ THF3_1 & THF3_2 & \dots & THF3_N & LDF3_1 & LDF3_2 & \dots \\ THF4_1 & THF4_2 & \dots & THF4_N & LDF4_1 & LDF4_2 & \dots \\ THF5_1 & THF5_2 & \dots & THF5_N & LDF5_1 & LDF5_2 & \dots \\ THF6_1 & THF6_2 & \dots & THF6_N & LDF6_1 & LDF6_2 & \dots \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_N \\ \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \vdots \\ \Delta a_N \\ \Delta \alpha_1 \\ \Delta \alpha_2 \\ \vdots \\ \Delta \alpha_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\overline{DX} = R \Delta \overline{PAR}$$

또한, 절대좌표계에 대한 미소 변화 행렬 dI_N 은 다음 식으로 부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} dI_N &= U_i \delta I_N \\ &= \begin{bmatrix} d\vec{n} & d\vec{o} & d\vec{a} & d\vec{p} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

2-3 링크 인자의 보정

처음 가정한 링크 인자 (\overline{PAR}) 상태에서의 로봇트 첨단부의 위치 및 방향과 실제 위치 및 방향을 비교하여 절대 좌표계에 대한 위치 및 방향 오차 $d\vec{n}, d\vec{o}, d\vec{a}, d\vec{p}$ 를 구한 후, 식(10)으로 부터 미소 변위 $dx^N, dy^N, dz^N, \delta x^N, \delta y^N, \delta z^N$ 을 구한다. 각각 다른 m개의 위치 및 방향제어로 다음과 같은 행렬식을 구한다.

$$\begin{bmatrix} \overline{DX}_1 \\ \overline{DX}_2 \\ \vdots \\ \overline{DX}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} \Delta \overline{PAR} \quad (11)$$

여기서 \overline{DX}_i 와 R_i 는 매 측정마다 변화하게 된다.

식(11)에서 ΔPAR 를 최소 자승 추정 방법(Least square method)의 결론인 가상 역변환 방법(Pseudo inverse method)을 이용하여 구한 후, 다음 식으로부터 향상된 링크 인자 벡터 PAR' 를 구한다.

$$PAR' = PAR + \Delta PAR$$

이 과정은 비선형 추정 문제(Non Linear estimation problem)이므로 ΔPAR 가 일정한 허용 오차량 보다 작아질 때까지 위의 과정을 반복한다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션한 로봇의 실제 링크 인자 a_{ci}, a_i, d_{ci} 와 처음 가정된 링크 인자 a_i, a_i, d_i 의 값은 각각 Table 1, Table 2와 같고, 조인트 변수 θ_i 의 오차량은 모두 2° 로 주었다.

링크 인자 보정 시뮬레이션은 Table 1과 Table 2의 값들을 사용하여 정방향 기구학(Forward kinematics)으로 첨단부의 위치 및 방향을 계산한 후 이로부터 로봇 첨단부의 위치 및 방향의 오차량을 구한다. 이 오차량과 초기 가정치를 사용하여 개발한 프로그램으로 보정된 인자를 얻는다.

시뮬레이션은 3자유도 및 6자유도 로봇에 대하여 각각 행하였으며, 3자유도 로봇의 링크 인자는 Table 1, Table 2의 처음값 3개를 취하였다. 6자유도 로봇에 대해서는 2개의 조인트 변수쌍과 10개의 조인트 변수쌍에 대해 각각 정방향 기구학으로 계산한 위치 및 방향 오차쌍을 이용하여 링크 인자의 보정을 행하였다. 3자유도 로봇에 대해서는 3개의 조인트 변수쌍과 10개의 조인트 변수쌍에 대해 정방향 기구학으로 얻은 위치 오차쌍만을 이용하여 링크 인자의 보정을 행하였다. Fig. 1은 6자유도 로봇에 대한 인자 보정의 결과이고, Fig. 2는 3자유도 로봇에 대한 인자 보정 시뮬레이션의 결과이다.

4. 실험 및 결과.

4-1 실험 장치

로봇

자체 제작한 3R 로봇은 각 조인트가 모두 회전 조인트인 3자유도 로봇이다. 각 조인트는 DC 서어보 모터로 구동되며 로봇의 전반적인 형상은 Photo-graph과 같다.

조인트를 구동시키는 각 DC 서어보 모터에는 타코미터(Tachometer)가 직접 연결 되어 있고, 감속된 회전축에는 로터리 엔코더(Rotary encoder)가 부착되어

있다. 타코미터는 모터의 속도를 피드백 제어(Feedback control)하여 DC 모터계의 안정성을 높여주는 역할을 담당하고 있으며, 로터리 엔코더는 로봇의 초기 형상 상태에서 회전한 각을 감지하기 위하여 부착하였다.

3R 로봇의 링크 인자는 Table 3와 같다. 로봇의 제어는 먼저 조그 모우드(Jog mode)로 로봇의 각 조인트에 부착된 팁(Tip)이 원점 감속 센서에서 충분한 양의 여유각을 갖도록 Fig. 3(b)와 같이 유지시킨다. 원점 감속 센서 및 팁은 Fig. 3(c)에 나타난 바와 같다. 원점 감속 센서로는 포토인터럽터(Photo interrupter)를 사용하였고, 조인트에 고정된 팁이 이 센서를 지나게 되면 회전 속도가 점차 감소하여, 초기 형상에 도달하면 정지하도록 설계하였다. 전체적인 로봇 제어는 Fig. 4에 나타난 바와 같다.

3차원 측정 장치

로봇 첨단부의 공간상의 위치를 측정하기 위한 장치로, 좌표를 알고 있는 세 고정점으로 부터 측정점까지의 거리를 측정하여, 측정점의 공간 좌표를 구한다.

3차원 측정 장치의 거리 측정을 위한 카운터부는 Photo-graph 2와 같다.

자체 제작한 3차원 측정 장치의 구조 및 로봇 좌표계와 측정 장치 좌표계와의 관계는 Fig. 5와 같다.

측정점으로 부터 고정점 P_1, P_2, P_3 까지의 거리 L_1, L_2, L_3 는 각 선이 감긴 축의 회전각을 엔코더(Encoder)로 읽어들이 값에 각각 다음과 같은 환산치 η_1, η_2, η_3 를 곱하여 얻었다.

$$\eta_i = 1000 / n_i \quad [\text{mm/slot}]$$

여기서, n_i 는 각 선이 1000mm 늘어났을 때, 엔코더의 슬롯(Slot) 수를 측정하여 얻은 값이다. 본 실험에서는 5번 반복하여 η_i 를 구하였다

이 3차원 측정 장치의 원리는, 세 고정점의 좌표와 세 고정점에서 측정점까지의 거리를 알므로 측정점의 좌표를 구할 수 있다는 사실을 이용한다.

4-2 실험 방법

3R로봇과 3차원 측정 장치를 이용한 링크 인자 보정에 관한 실험 방법은 다음과 같다.

- (1) 자체 제작한 3R 로봇의 첨단부에 3차원 측정 장치의 홀더(Holder)를 고정시킨 후 DC 모터 제어부 칩(Chip)의 전원을 공급하는 앰프의 전원을 켜다.
- (2) 제어 프로그램의 컴파일링이 끝난 후, 모터에 전원을 공급하는 선형 앰프(Linear Amplifier)의 전원을 켜다.
- (3) 조그 모우드 루틴을 수행하여 로봇의 각 조인트가 원점 감속 센서에서 충분한 양의 여유각을 갖도록

록 한 후, 로봇트를 초기 형상화 시킨다.

- (4) 3차원 측정 장치로 측정한 로봇트 첨단부의 좌표를 데이터로 저장한다.
- (5) (3)-(4)의 과정을 같은 목적 위치에 대하여 5번 반복하여 로봇트 첨단부 좌표의 평균치를 얻는다.
- (6) (3)-(5)의 과정을 8개의 각각 다른 목적 위치에 대하여 행한 후 8개의 측정 좌표를 데이터로 저장한다.
- (7) (6)에서 얻은 8개의 데이터를 읽어들이어 인자 보정 프로그램으로 로봇트의 링크 인자 보정을 행한 후 보정된 링크 인자를 구한다.
- (8) 보정된 링크 인자를 역기구학 루틴의 초기 가정 링크 인자 대신 도입한 후 (1)-(6)의 과정을 다시 행하여 보정된 좌표를 얻는다.

4-3 실험 결과

8개의 목적하는 점에 대한 역기구학으로 구한 조인트 변수와, 처음 가정된 링크 인자로 위치 제어한 경우의 로봇트 첨단부의 위치와, 보정된 링크 인자로 제어한 경우의 로봇트 첨단부의 위치 측정 결과는 Table 4와 같다.

Table 4에서 링크 인자를 보정한 경우의 로봇트 첨단부의 위치 오차가 보정전 보다 대체적으로 작음을 알 수 있다.

링크 인자 보정 시뮬레이션 결과와 비교해 보면 위치 오차가 없어야 하나, 상당히 큰 실험상의 오차가 발생되었다. 이는 측정 장치의 오차 및 y 축에 대한 비틀림 각을 무시한 결과로 생각할 수 있다.

5. 결 론

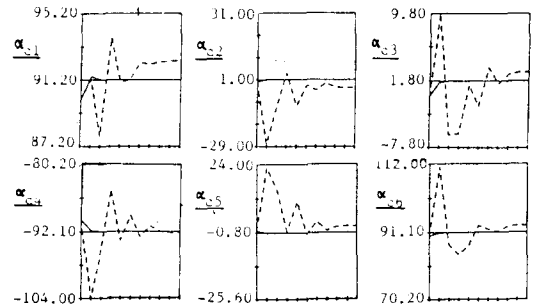
3자유도 및 6자유도 로봇트에 대한 인자 보정 시뮬레이션과 자체 제작한 3자유도 로봇트와 3차원 측정 장치를 이용한 위치 제어 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 링크 인자의 보정 시뮬레이션 및 실험으로부터, 로봇트의 링크 인자 보정을 통하여 위치 및 방향 제어의 정밀도를 향상시킬 수 있다.
- 2) 3자유도 로봇트에 대해서는 위치 측정 만으로도 인자 보정을 통하여 위치 정밀도를 향상시킬 수 있다.

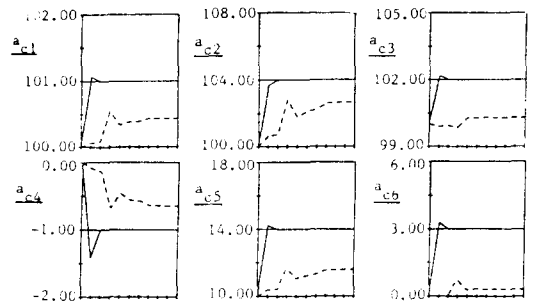
Reference

1. Veitschegger, W.K. "Robot accuracy analysis based on kinematics", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-2, No.3, September, 1986,

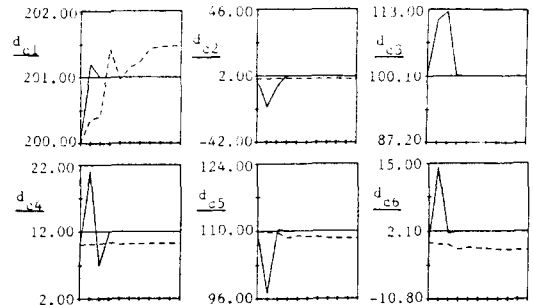
2. Wu, C.H. , "A Kinematic CAD Tool for The Design and Control of a Robot Manipulators", The International Journal of Robotics Research, Vol.3, Spring 1984
3. Hollerbach, J.M., and Bennet, D.J., "Automatic Kinematic Calibration Using a Motion Tracking System", Modeling and Control of Robotic Manipulators and Manufacturing Processes, PCS-Vol.6, PP.93-100



(a) Corrected α_i



(b) Corrected a_i

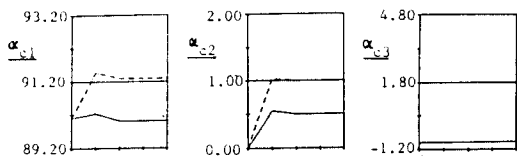


(c) Corrected d_i

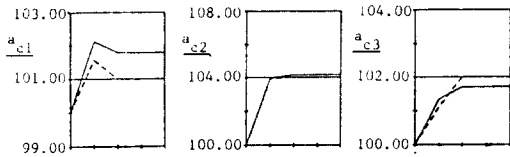
Fig.1 Calibrated parameters of 6 D.O.F. robot

--- When data no. is 2
 ——— When data no. is 10

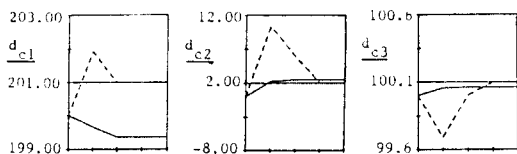
Center line is actual parameter value



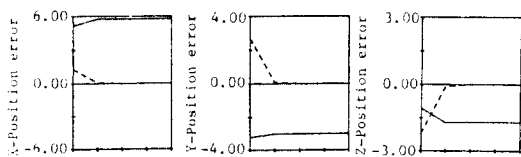
(a) Corrected α_i



(b) Corrected a_i



(c) Corrected d_i



(d) Position error

Fig.2 Calibrated parameters of 3 D.O.F. robot

- When data no. is 3
- - - When data no. is 10

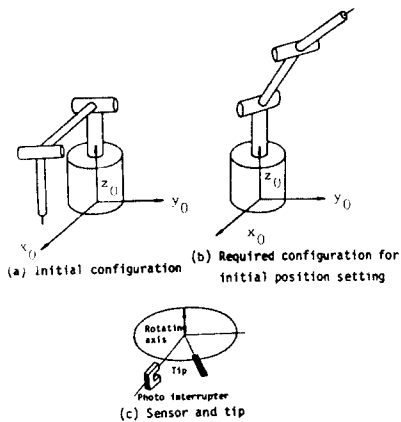


Fig.3 Initialization of 3R robot

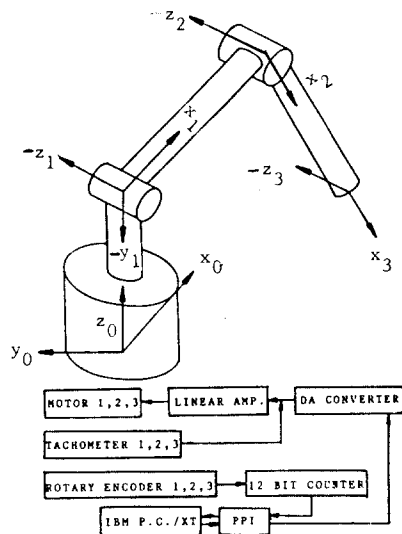


Fig.4 Coordinate assignment and control scheme

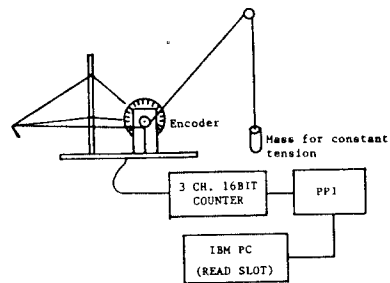
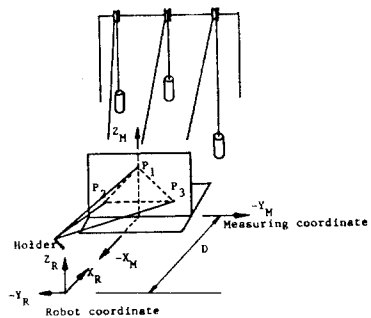


Fig.5 The structure and I/O scheme of 3 dim. measurer

Table 1 Actual link parameters

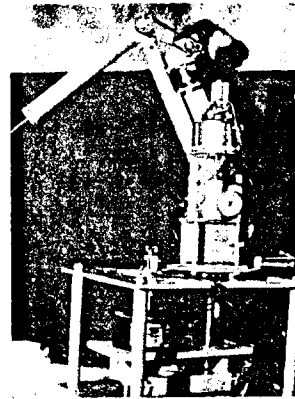
i	Parameter	α_{ci} (Deg)	a_{ci} (mm)	d_{ci} (mm)
1		91.2	101.0	201.0
2		1.0	104.0	2.0
3		1.8	102.0	100.1
4		-92.1	-1.0	12.0
5		-0.8	14.0	110.0
6		91.1	3.0	2.1

Table 2 Initially assumed link parameters

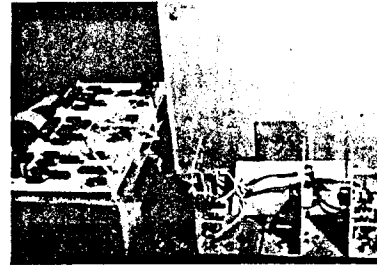
i	Parameter	α_{ci} (Deg)	a_{ci} (mm)	d_{ci} (mm)
1		90.0	100.0	200.0
2		0.0	100.0	0.0
3		0.0	100.0	100.0
4		-90.0	0.0	10.0
5		0.0	10.0	100.0
6		90.0	0.0	0.0

Table 3 Link parameters of 3R robot

i	parameter	α_i (deg)	a_i (mm)	d_i (mm)
0		0.0	0.0	0.0
1		90.0	0.0	433.0
2		0.0	400.0	0.0
3		0.0	345.0	0.0



Photograph 1 Close view of 3R robot

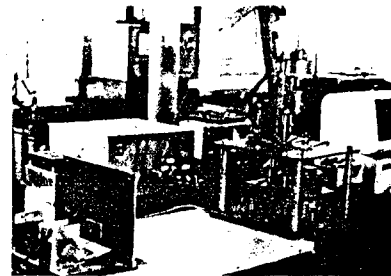


Photograph 2 Close view of 3 dim. measurer

Table 4 Experimental data

Data no.	Object position (mm)			Measured position (mm)					
	x_w	y_w	z_w	With initial parameter			With calibrated parameter		
	x_i	y_i	z_i	x_{ci}	y_{ci}	z_{ci}	x_{ci}	y_{ci}	z_{ci}
1	606.8	214.1	371.3	587.4	216.1	366.0	594.4	217.2	365.1
2	628.1	172.2	177.3	610.5	185.3	166.7	622.7	181.2	172.1
3	378.1	216.5	106.6	365.7	214.3	105.2	365.1	216.6	105.0
4	500.5	45.9	220.9	494.6	56.8	219.2	496.7	52.7	223.2
5	534.4	46.3	382.4	526.2	56.4	373.8	527.3	50.2	384.7
6	652.6	358.8	438.7	621.0	389.4	418.2	640.7	388.7	420.6
7	600.0	345.7	633.0	601.2	380.6	610.2	602.3	378.2	619.4
8	815.0	887.0	937.0	810.7	892.0	935.3	813.2	885.7	933.1

x_i, y_i, z_i : Measured data before link parameter calibration
 x_{ci}, y_{ci}, z_{ci} : Measured data after link parameter calibration



Photograph 3 Overall view of experimental set-up