

본 논문은 1994학년도 조선대학교 교내 연구비를 수혜받아 수행된 연구의 결과임.

비전시스템을 이용한 로봇시스템의 점배치실험에 관한 연구

장 완 식*, 유 창 규**

A Study on the Point Placement Task of Robot System Based on the Vision System

Wan-Shik Jang*, Chang-gyou You**

ABSTRACT

This paper presents three-dimensional robot task using the vision control method. A minimum of two cameras is required to place points on end effectors of n degree-of-freedom manipulators relative to other bodies. This is accomplished using a sequential estimation scheme that permits placement of these points in each of the two-dimensional image planes of monitoring cameras.

Estimation model is developed based on a model that generalizes known three-axis manipulator kinematics to accommodate unknown relative camera position and orientation, etc. This model uses six uncertainty-of-view parameters estimated by the iteration method.

The method is tested experimentally in two ways :the estimation model test and a three-dimensional point placement task. Three results show that control scheme used is precise and robust.

Key Words: Vision system (비전시스템), Estimation model (추정모델), Parameter (매개변수), Performance index (성능지수), Point placement (점배치), Orientation(방위)

1. 서 론

현재 사용하고 있는 로봇 매니플레이션에 컴퓨터를 적용하는 대부분의 방법들은 로봇과 비전시스템의 모델링 및 상호간의 보정(Calibration)을 필요로 한다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 이러한 두가지 요구 조건들은 매우 제한적이며, 또한 정확해야 한다.

첫 번째는 3차원 직교공간에서 움직이는 매니플레이터

위치를 2차원 카메라 좌표계에 대해 맵핑하기 위해서는 상호간의 관계식에 대한 완전한 이해가 필요하다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 일반적으로 이것은 로봇의 직교 좌표 공간에서 많이 알려진 점들을 카메라를 가지고 관찰함으로써 얻어진다. 이러한 데이터를 근거로하여 카메라 방위, 초점거리 등을 포함한 카메라 매개변수를 계산한다.

두 번째는 같은 좌표계에서 매니플레이터 각 관절 위치와 목표지점의 위치 및 방위사이의 관계식을 정확히 아는

* 조선대학교 기계공학과 수송기계부품 공장자동화 연구센터
 ** 조선대학교 대학원 기계공학과

것을 필요로 한다.⁽¹⁾⁽²⁾ 이러한 제약들은 매니플레이터 고정단과 카메라 고정단이 독립적으로 이동 되어지는 경우에는 비전응용을 기존의 방법으로는 어렵게 만든다. 더구나 물체를 원하는 위치로 정확하게 이동시키는 오차한계는 매니플레이터의 기구학적 모델과 카메라 모델과의 알려진 관계식에 의해서 결정된다.

본 연구는 이와같은 문제점을 해결하기 위해서 지금까지 발표된 기존의 방법들과는 달리 실용적인 비전제어 방법을 제안하고자 한다. 본 연구의 중요한 개념은 매니플레이터 관절각을 사용하여 두개 이상의 카메라 화상에 조화시키는 것이다. 다시 말하자면 화상처리 문제와 로봇 매니플리케이션 문제가 별도로 처리되는 것이 아니고 조정 목적(manever objection)에 의해서 함께 처리되어지는데, 이것은 개발된 카메라 추정모델에서 보여 준다. 카메라 추정모델은 매니플레이터 끝점(혹은 목표지점)에 대한 카메라 좌표값과 매니플레이터 기구학적 모델사이의 상호 관계식을 6개의 매개변수를 사용하여 설명하고 있다. 또한 매니플레이터를 조정하기 위해 필요한 회전각들은 2개 이상의 독립적인 카메라를 사용하여 제어하고자 하는 매니플레이터 끝점과 목표지점 사이의 오차를 최소화시키는 방법에 의해서 결정되어진다.

본 연구에서 사용된 제어 방법은 카메라와 매니플레이터가 놓여져있는 상대적 위치에 대한 정보를 필요로 하지 않으며, 또한 매니플레이터 기구학적 모델에 대한 정확한 정보를 다소 경감시킬수 있기 때문에 위치제어에 대한 정확성을 향상시킬 수 있다. 제안된 방법의 필요한 제한조건은 각각의 카메라계에서 목표지점의 위치와 매니플레이터 끝점의 위치가 함께 존재해야 한다. 그리고 측정된 회전각을 갖는 매니플레이터 기구학적 모델이 필요로 하게 되는데, 이것은 각 카메라에서 얻어지는 매니플레이터 끝점에 대한 카메라 좌표계값과 매니플레이터 기구학적 모델과의 관계를 설명하는 비선형 방정식에 존재하는 매개변수값들을 결정하기 위해서 사용된다.

본 연구에서 제시된 제어기법은 제어가 이루어지고자 하는 최종 목표지점에 근접해서는 비전 측정데이터를 얻는 것을 필요로 하지않는다. 그 이유는 매니플레이터 끝점의 카메라 좌표계 위치는 앞서 측정된 비전데이터를 이용하여 목표지점에 대한 매니플레이터 회전각 함수를 예측할 수 있기 때문이다. 이것은 원하는 목표지점에 70% 근접했을때 매니플레이터가 어떠한 장애요소로 인해서 비전 데이터 측정이 불가능하게 되었을때도 매니플레이션을 하는데 지장을 주지않는다.

이와같이 본 연구에서 제안된 제어기법은 현재의 매개변수 추정값을 이용해서 회전각 궤적플랜에 대한 연속적인 새로운 정보를 얻는 것을 요구한다. 본 연구에서 요구되는 과정은 4단계로 다음과 같이 구분할 수 있다.

- (1) 매니플레이터 기구학적 모델과 카메라 모델
- (2) 각 카메라에 선택된 위치들에 대한 매니플레이터 회전각과 비전데이터.
- (3) 매개변수 추정.
- (4) 가장 최근의 매개 변수들을 이용해서 매니플레이터 부드러운 궤적플랜을 위한 회전각 계산.

그러므로 본 연구에서는 사용된 제어기법의 중요한 근간이 되는 6개의 불확실한 시각매개 변수를 사용하는 카메라 추정모델을 개발하고, 그 모델에 대한 정확성을 실험을 통하여 입증하고자 한다. 마지막으로 점 배치(Point placement)작업을 통하여 이 제어방법의 유용성을 확인한다.

2. 추정 모델(Estimation Model)

본 논문에서 제안한 모델은 6개의 불확실한 시각 매개변수를 사용하여 3차원 매니플레이터 위치를 2차원 카메라 좌표계 위치로 변환시키는 카메라 모델이다. 6개의 매개변수를 포함하는 추정모델은 매니플레이터 기구학적 모델과 카메라 모델이 이용된다.

2.1 3축 매니플레이터 기구학모델(Kinematic Model)

3차원 공간에서 매니플레이터 기구학 모델은 균질변환(Homogeneous transformation)을 사용하여 얻어진다. $i-1$ 링크와 연결된 i 링크 사이에 상대적인 위치와 자세를 나타내는 이 균질변환은 4개의 링크인자를 사용하여 식 (1)과 같이 4×4 요소를 갖는 행렬형태로 나타내진다.

$${}_{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{i-1} \\ -\sin\alpha_{i-1}d_i \\ -\cos\alpha_{i-1}d_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서

$a_{i-1} = X_{i-1}$ 를 따라 측정된 Z_{i-1} 에서 Z_i 사이 까지의 거리.

$a_{i-1} = X_{i-1}$ 주위로 측정된 Z_{i-1} 에서 Z_i 사이의 각도.

$d_i = Z_{i-1}$ 를 따라 측정된 X_{i-1} 에서 X_i 사이 까지의 거리.

$\theta_i = Z_{i-1}$ 주위로 측정된 X_{i-1} 에서 X_i 사이의 각도.

이며, A 행렬의 처음 3개 열은 상대적인 방향을 나타내고 마지막 열은 상대적 위치를 나타낸다.

본문에서 사용되는 3축 매니퓰레이터는 Fig.1에서 보여주며, 그것에 대한 링크인자는 Table 1에서 보여준다. Table 1을 사용하여 베이스좌표계에서 마지막 링크까지의 변환 행렬은 식(2)와 같다.

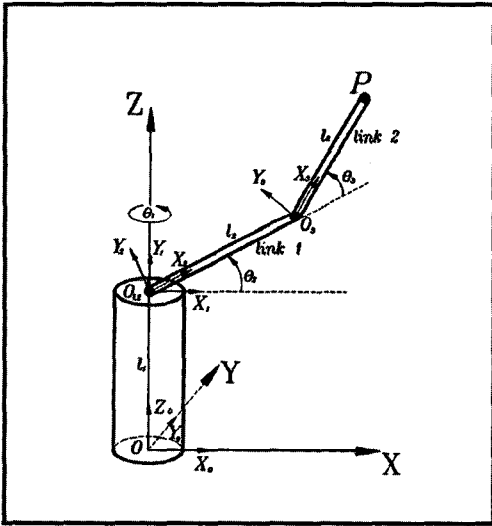


Fig.1 Three-axis manipulator

$${}^0_3A = A_1^0 A_2^1 A_3^2 = \begin{bmatrix} C_{123} - C_1 S_{23} & -C_{12} S_3 - C_{13} S_2 \\ C_{23} - S_{123} & -C_2 S_{13} - C_3 S_{12} \\ C_3 S_2 + C_2 S_3 & -S_{23} + C_{23} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} S_1 & C_{12} l_2 \\ -C_1 & C_2 S_{12} \\ 0 & S_2 l_2 + l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $C = \text{Cos}$, $S = \text{Sin}$. 이다.

마지막 링크 o_3 에서 끝점 P 까지의 위치벡터는 식(3)에 주어진다.

$${}^3P = (l_3, 0, 0, 1)^T \quad (3)$$

매니퓰레이터 베이스 좌표계에 대한 매니퓰레이터 끝점 P 의 위치벡터는 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{F} = {}^0_4A {}^4P = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1(l_3 C_{23} + l_2 C_2) \\ S_1(l_3 C_{23} + l_2 C_2) \\ l_3 S_{23} + l_2 S_2 + l_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Table.1 Link parameters of three-axis manipulator

	a_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	l_1	θ_1
2	90°	0	0	θ_2
3	0	l_2	0	θ_3

* $l_1 = 0.431(\text{m})$ $l_2 = 0.298(\text{m})$ $l_3 = 0.241(\text{m})$

2.2 카메라 모델 (Camera model)

카메라 모델은 6개 불확실한 시각매개 변수의 향으로써 나타낸다. 이러한 매개변수들은 매니퓰레이터에 대한 카메라 위치, 방향 및 초점거리의 불확실성을 설명할 뿐만 아니라, 3차원 공간에서 움직이는 매니퓰레이터 끝점 위치를 2차원 카메라 좌표계의로의 변환 관계를 나타낸다. 오일러 매개변수(Euler parameter) 향으로 나타내진 방향 코사인 행렬(direction cosine matrix)를 사용하여 카메라 회전모델은 다음과 같이 나타낸다.⁽⁵⁾

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11}(C_i) & K_{12}(C_i) & K_{13}(C_i) \\ K_{21}(C_i) & K_{22}(C_i) & K_{23}(C_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 K_{ij} 요소들은 4개의 오일러 매개변수 (C_1, C_2, C_3, C_4)의 적절한 조합에 의해서 좌우되며 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} K_{11} &= C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2 \\ K_{12} &= 2(C_2 C_3 + C_1 C_4) \\ K_{13} &= 2(C_2 C_4 - C_1 C_3) \\ K_{21} &= 2(C_2 C_3 - C_1 C_4) \\ K_{22} &= C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2 \\ K_{23} &= 2(C_3 C_4 + C_1 C_2) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)를 식 (5)에 대입하고, 카메라 평면에 대한 매니플레이터 위치의 불확실성을 보완하기 위해 $X_{co}(=C_5)$ 와 $Y_{co}(=C_6)$ 를 첨가시키면 카메라 모델은 다음과 같다

$$X_c = (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2)f_x + 2(C_2C_3 + C_1C_4)f_y + 2(C_2C_4 - C_1C_3)f_z + C_5 \quad (7)$$

$$Y_c = 2(C_2C_3 - C_1C_4)f_x + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)f_y + 2(C_3C_4 + C_1C_2)f_z + C_6 \quad (8)$$

여기서 X_c 와 Y_c 는 6개의 매개변수가 알려졌다고 가정할 때 3차원 공간에서 움직이는 매니플레이터 끝점의 위치벡터가 카메라 좌표계로 변환된 값을 나타낸다. 여기서 매개변수 $C_1 \sim C_4$ 는 카메라 방위 및 초점거리의 변화성을 나타내고, 마지막 2개 매개변수 $C_5 \sim C_6$ 는 카메라에 대한 매니플레이터 위치의 불확실성을 나타낸다. 다음절에서는 카메라 모델의 중요한 변수인 6개 매개변수를 추정하는 방법에 대해서 설명한다.

2.3 매개변수 추정 (PARAMETER ESTIMATION)

6개 매개변수는 3차원 매니플레이터 위치 벡터를 2차원 카메라 좌표계로 변환하는데 있어서 매우 중요한 인자이므로 매개변수 $C_i(i=1, 2, \dots, 6)$ 를 추정하는 과정은 다음과 같다.

Fig.1에서 보여준 매니플레이터 끝점 P에 대해서 순간시간 $t_i(i=1, 2, \dots, k)$ 에서 비전시스템 데이터와 매니플레이터 각 관절의 회전각 ($\theta_1 \sim \theta_3$)이 동시에 연속적으로 얻어진다면 매개변수 수정벡터(Correction vector) ΔC 는 식(9)에 의해서 계산되어진다.⁽⁶⁾

$$\Delta C = (A^T W A)^{-1} A^T W R \quad (9)$$

여기서 W 는 가중행렬(Weighting matrix)이고, $1 \times 2k$ 크기를 갖는 유수벡터(Residual vector) R 은 다음과 같이 주어진다.

$$R_{2i-1} = X_{cr}(t_i) - X_c(t_i) \quad (10)$$

$$R_{2i} = Y_{cr}(t_i) - Y_c(t_i) \quad (11)$$

여기서, $X_{cr}(t_i)$ 와 $Y_{cr}(t_i)$ 는 시간 t_i 에서 측정된 매니플레이터 끝점 위치에 대한 카메라 좌표계 X, Y 를 나타낸다. 또한 여기서 $2k \times 6$ 요소를 갖는 행렬 A 는 식 (12)과 (13)에 의해서 주어진다.

$$A_{2j-1,i} = \partial X_c / \partial C_i \quad (12)$$

$$A_{2j,i} = \partial Y_c / \partial C_i \quad (13)$$

여기서 $i=1, 2, \dots, 6$ 이고 $j=1, 2, \dots, k$ 이다.

매개변수 추정은 근본적으로 반복법이 사용되므로 최초의 매개변수 수정벡터는 가정된 초기값을 가지고 계산된다. 그이후 6개 매개변수 초기값은 다음과 같은 관계식을 사용하여 계산된다.

$$C_{in} = C_{io} + \Delta C \quad (14)$$

여기서 C_{in} 은 6개 매개변수의 현재값을 나타내고, C_{io} 는 6개 매개변수의 이전 값을 나타낸다. 이러한 반복적인 계산은 매개변수 수정벡터가 영에 근접할 때까지 계속된다. 6개 매개변수의 최종적인 값은 사용자가 원하는 허용오차에 의해서 결정된다.

2.4 매니플레이터 회전각 추정

매개변수 추정절차에 따라서 매개변수 C 가 얻어지면 목표지점에 대한 매니플레이터 회전각의 추정값 θ^* 는 아래 주어진 성능지수 J 를 최소화시키는 방법에 의해서 얻어진다.

$$J = \sum_{i=1}^3 \left\{ \left[X_{cr}^i - f_x(\theta^*; \underline{C}^i) \right]^2 + \left[Y_{cr}^i - f_y(\theta^*; \underline{C}^i) \right]^2 \right\} \quad (15)$$

여기서 X_{cr}^i 와 Y_{cr}^i 는 목표지점에 대한 i 번째 카메라에 대한 카메라 좌표계 데이터를 나타내며, f_x 와 f_y 는 식(7)과 (8)에서 주어진 카메라 모델식이다.

3. 실험장치

Fig.2는 본 연구에서 행해진 실험장치에 대한 전체적인 블록선도이다. 본 논문에서 제시된 제어법의 타당성을 입증하기 위하여 행해진 실험의 하드웨어는 아래와 같이 크게 3개로 구분된다.

(1) 비디오 카메라, 신호처리기 및 모니터를 포함하는 비전시스템.

(2) 컴퓨터, A/D 및 D/A 변환기를 포함하는 제어 하드웨어.

(3) 서보모터, 기어박스, 퍼텐쇼미터 및 링크를 포함하는 매니플레이터.

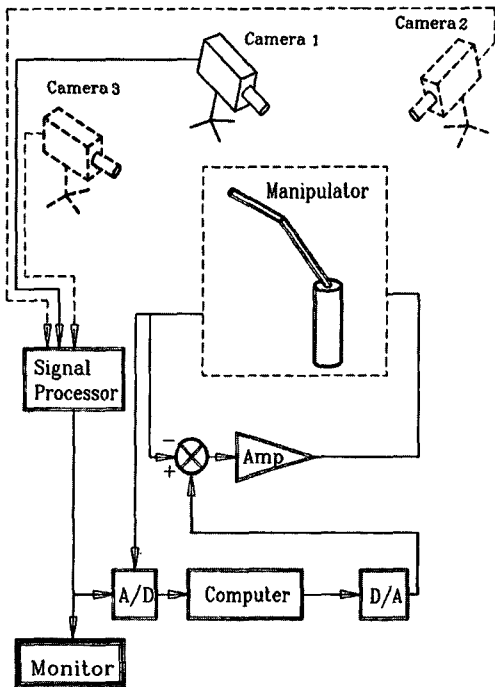


Fig 2. Overall experimental schematic diagram

3.1 비전시스템

비전시스템의 목적은 실시간에서 매니플레이터 끝점 혹은 목표지점 위치에 대한 2차원 카메라 좌표계 데이터를 제공하는 것이다. 이 시스템은 매니플레이터 위치가 카메라에 의해 확인되면 곧바로 신호처리에 의해서 계산되어 컴퓨터로 전달되어진다. 앞에서 언급된것과 같이 제시된 제어방법은 카메라와 매니플레이터가 놓여있는 상대적 위치에 대한 관계식이 필요로하지 않으므로, 여기서 얻어진 목표지점과 매니플레이터 끝점에 대한 비전 데이터는 임의적으로 스케일링하여 무차원으로 사용한다. 본 연구에서는 Fig.2에서 보여준 각각의 카메라 위치로 카메라를 이동하여 각 위치에서 비전데이터를 활용하여 제시된 제어기법의 유용성을 확인하고자 한다.

3.2 제어하드웨어

본 실험에서 IBM PC 와 D.E.C.P 300 Series Ana-

log Data Module 의 A/D 및 D/A 변환기가 사용되었다. IBM PC 는 제어 알고리즘을 실행하고, A/D 변환기는 카메라 좌표계 위치에 대한 아날로그 신호를 디지털 값으로 변환하는데 사용하며, D/A 변환기는 제어 알고리즘에서 계산되어진 회전각을 매니플레이터에 제공하기 위하여 사용된다.

3.3 매니플레이터

매니플레이터는 D/A변환기로 부터 제공된 회전각신호와 매니플레이터 축에 부착된 퍼텐쇼미터로부터 실제 회전각을 나타내는 신호를 비교하여 얻어진 오차신호를 증폭기를 통하여 보냄으로서 구동 된다. 본 실험을 위해서 사용된 3축 매니플레이터 제원은 Table 1과 같다.

4. 실험 및 결과 고찰

4.1 비전시스템 추정모델의 적합성에 대한 실험

매니플레이터가 생성된 궤적의 13단계에 의해서 움직일때 각 단계에서, A/D 변환기를 이용한 매니플레이터 회전각과 비전 시스템을 사용하여 회전각에 의해서 좌우되는 매니플레이터 끝점 P 위치에 대한 2차원 카메라 좌표계 데이터가 동시에 얻어진다. 본 실험에서 사용된 비전 데이터는 Table 2 에서 보여준것 같이 각기 다른 위치에 있는 3개의 카메라로 부터 얻어진다. 이렇게 얻어진 데이터는 제어법의 유용성을 알아보기 위하여 사용한다.

Table 2. Actual measurement data in three cameras

Sequence	Camera 1		Camera 2		Camera 3	
	X _c	Y _c	X _c	Y _c	X _c	Y _c
1	0.462966	0.896423	0.540788	0.912409	0.863521	0.907382
2	0.463118	0.896423	0.541246	0.911914	0.862911	0.908054
3	0.465102	0.890243	0.543535	0.911997	0.866807	0.908839
4	0.468995	0.887442	0.530989	0.807102	0.786504	0.785172
5	0.510117	0.788726	0.544145	0.723878	0.747703	0.700229
6	0.546882	0.688281	0.550554	0.691495	0.718100	0.606705
7	0.591449	0.560561	0.563982	0.598712	0.703147	0.580996
8	0.630055	0.514087	0.590838	0.524058	0.684988	0.508649
9	0.676290	0.436714	0.626698	0.442152	0.694754	0.330253
10	0.738911	0.277847	0.699332	0.318387	0.708640	0.296881
11	0.798890	0.250243	0.768151	0.218766	0.690176	0.271419
12	0.905179	0.140486	0.842158	0.150374	0.703757	0.188278
13	0.930204	0.094507	0.922727	0.051823	0.782342	0.075143

3축 매니플레이터에 대한 카메라 모델(식(7)~식(8))과 실험을 통하여 얻어진 비전데이터(Table 2)를 식(9)~식(14)에 적용하면, 3개의 카메라에 대한 각각의 6개 매개변수($C_1 \sim C_6$)가 Table 3과 같이 계산된다. 여기서 처음 4개 매개변수는 카메라 방향 및 초점거리의 불확실성을 나타내고, 마지막 2개 매개변수는 매니플레이터와 카메라 사이 위치에 대한 불확실성을 나타낸다. 이러한 매개변수를 사용하여 식(7)과 식(8)에 주어진 추정모델의 결과치를 구한다.

Table 3 The estimated six parameters in three cameras

Camera	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
Camera 1	0.232854	-0.004803	-0.066632	-0.000407	1.393043	-0.173731
Camera 2	0.257228	0.017750	0.002901	0.001373	1.881873	-0.353802
Camera 3	0.219455	-0.002020	0.105525	0.006224	1.690387	-0.258240

Fig.3~Fig.5은 카메라 좌표계에서 13단계를 갖는 매니플레이터 위치 시퀀스를 보여준다. 또한 3개의 카메라에서 비전 시스템을 이용하여 얻어진 값과 6개 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과치를 비교한다. 각 그림에서 부호 □는 13단계를 걸쳐서 매니플레이터가 이동하는 추정 경로를 비전 시스템을 이용한 측정데이터이고 부호 X는 추정된 6개 매개변수를 가지고 계산된 추정 모델의 결과치이다.

Fig.3은 카메라 1에 대한 결과이고, 이때 카메라는 매니플레이터 약 3 m 가량 떨어진 정면에 위치해 있다. 이 그림에서 보여준 것과 같이 매니플레이터 끝점 위치에 대한 실제로 측정된 비전데이터와 카메라 추정모델의 결과치는 거의 일치한다. Fig.4는 카메라 2에 대한 결과이며, 본 실험에서 카메라 2는 매니플레이터 우측에 배치하였으며 사이거리는 약 3.5m 이다. Fig.4에서 보여준 것 같이 이 결과는 카메라 1의 결과치와 같이 아주 유사함을 보여준다. 또한 Fig.5는 카메라 3에 대한 결과치이며, 카메라는 매니플레이터 좌측에 위치해 있으며 거리는 약 3.5 m 이다. 본 실험에서는 매니플레이터에 대한 카메라 위치와 사이거리를 변화시키면서 여러 경우에 대해서 실험을 행하였는데 모든 경우에서 위와 같은 결과를 얻었다. 그러므로, 3개의 그림에서 보여준 것과 같이 카메라 추정모델의 결과치는 실제 비전 시스템을 이용하여 얻어진 값과 아주 근사함을 보여주므로 최소한 2개 이상의 카메라를 사용하여 본 논문에서 제시된 제어법이 여러 응용

분야에서 손쉽게 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

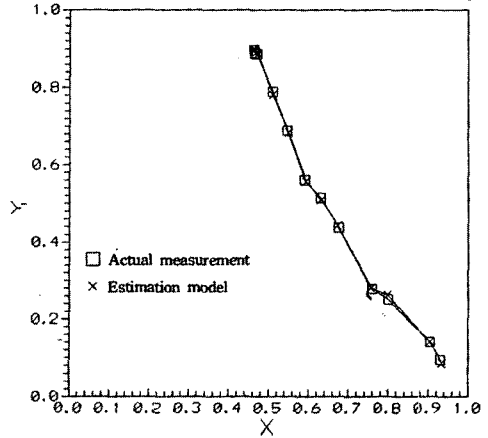


Fig. 3 Comparison of actual measurement and estimation model's fit in camera 1

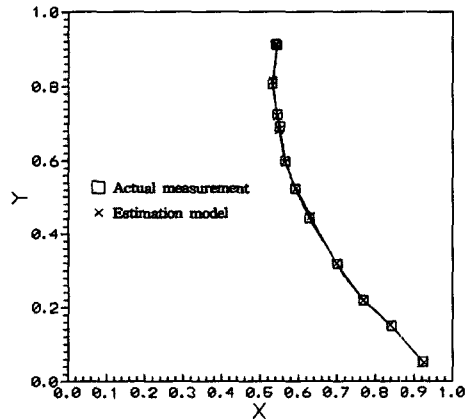


Fig. 4 Comparison of actual measurement and estimation model's fit in camera 2

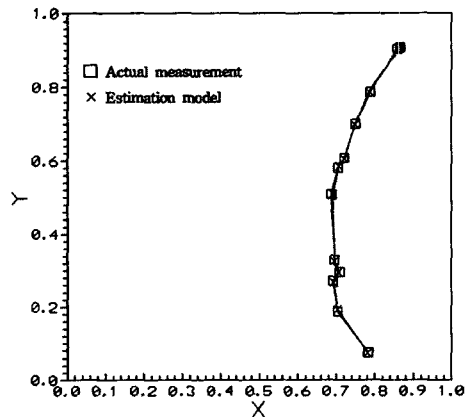


Fig. 5 Comparison of actual measurement estimation model's fit in camera 3

4.2 점 배치 제어에 관한 실험

앞에서 언급한 제어알고리즘을 사용하여 3축 매니플레이터 끝점 P를 원하는 목표지점에 정확히 옮겨놓을수 있는가를 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 보이 고자 한다. 이러한 실험을 선택하게 된 이유는 간단한 3 축 매니플레이터를 사용하여 쉽게 실험할수 있고, 또한 실험을 했을때 실제의 오차를 쉽게 찾아 낼 수 있기 때 문이다. 2개의 카메라만 있어도 제어 알고리즘을 행할 수 있으나 본 실험에서는 실제로 3개의 카메라를 사용하였 다. 매니플레이터가 목표지점을 향하여 움직이는 동안 식 (15)에 보여준 성능지수 J를 최소화 시키는 방법을 사용 하여 목표지점에 대한 매니플레이터 회전각이 각 단계에 서 추정되는데, 이 추정값 θ^* 는 각 카메라에서 측정되는 새로운 데이터를 사용하여 새롭게 계산된다. 즉, 목표지 점에 더 가까이 다가올수록 매니플레이터 회전각과 카메 라 영역사이 에 존재하는 비선형 관계식을 더 좋게 반영하 기 위해서 카메라에 해당되는 6개 매개변수들의 추정값 이 변화하기 때문에 매니플레이터 회전각의 추정값 θ^* 는 개선된다. 이때 θ^* 값은 처음단계에서 임의적인 초기 값을 사용하기 때문에 수렴하기 위해서 여러번 반복이 필 요하나 그이후의 단계에서는 1~2번의 반복에 의해서 수 령된다.

식(9) ~ (14)식을 사용하여 매개변수 C를 계산하는 데 본 연구에서는 가중행렬 W를 단위행렬로 사용하였 다. 특히 식(9)에서 매개변수 수정 벡터를 ΔC 를 계산하 는데 사용하는 $(A^TWA)^{-1}$ 에서 특이 행렬의 위험성이 이론적으로 고려할수 있으나, 지금까지 여러번을 반복 시 행한 실험에서는 이러한 위험성은 나타나지 않았다. 그러 나 만약 이러한 결과가 나타난다면 그 순간에서 ΔC 를 계산하지 않고 다음 단계에서 새로운 측정 데이터를 얻어 서 새롭게 ΔC 를 계산할수 있도록 프로그램을 조절하면 해결될수 있으리라 믿는다. 보통 최초의 C 벡터에 대한 추정값은 수렴하기에 앞서 식(9)~(14)을 여러번 반복하 는 것이 필요로 한다. 그러나 그 이후 매니플레이터가 목 표지점으로 향하는 동안 각 단계에서 새로운 측정 데이타 를 가지고는 1~2번의 반복에 의해서 매개변수 C 벡터 가 계산된다.

Fig.6은 카메라 영역에서 매니플레이터 끝점의 이동상 황을 연속적으로 보여준다. 그림에서 부호 ■ 과 □ 는 실 제로 카메라로 부터 얻어지는 매니플레이터 끝점의 측정 데이터를 나타내는데, Fig.6의 (a)(b)(c) 에서 부호 ■ 는 그 시각 이전에 측정된 데이터를 말하며, 부호 □는 향

후 측정되어지는 데이터를 나타낸다. 부호 ●는 카메라 영역에서 목표지점을 나타내며, 즉 매니플레이터 끝점이 도착하고자 하는 지점을 나타낸다. Fig.6의 (a)에서 같이 이용 가능한 처음 4개의 측정 데이터를 사용하여 계산된 $C_1 \sim C_6$ 의 값은 $C = [0.005495, -0.055481, 0.251923, 0.010352, -0.237369, -0.813433]$ 이다. Fig.6의 (b)와 같이 2개의 새로운 측정 데이터를 첨가하 여 계산된 C의 값은 $C = [0.243306, 0.015121, -0.059546, 0.004513, 1.524348, -0.369516]$ 이며, Fig.6의 (c)와 같이 7개의 측정 데이터를 사용하여 $C = [0.247878, 0.22990, -0.061551, 0.009125, 1.541233, -0.485941]$ 를 계산하였다. Fig.7과 Fig.8 은 각각 camera2 와 camera3 영역에서 매니플레이터 끝점의 이동상황을 연속적으로 보여주며 각각의 그림에 서 보여주는 부호에 대한 설명은 Fig.6과 동일하다. 또한 Table 4는 각각 카메라에서 추정된 매개변수 C 값의 변 화하는 양상을 보여준다.

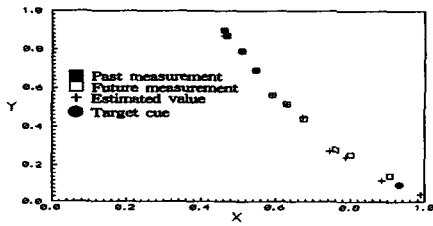
Table 4. Sequence of six-parameter estimated for three cameras

Camera	Steps	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
Camera 1	4	0.005495	-0.055481	0.251923	0.010352	-0.237369	-0.813433
	6	0.243306	0.015121	-0.059546	0.004513	1.524348	-0.369516
	7	0.247878	0.22990	-0.061551	0.009125	1.541233	-0.485941
Camera 2	4	0.237441	-0.003016	0.018318	-0.010569	1.796123	-0.042983
	6	0.25738	0.011259	-0.000558	0.003501	1.792869	-0.314906
	7	0.25004	0.016802	-0.007174	0.008907	1.777778	-0.415384
Camera 3	4	0.203325	-0.010415	0.123526	0.003450	1.533878	-0.214677
	6	0.204752	-0.014122	0.119836	0.007191	1.549110	-0.252801
	7	0.216001	-0.000386	0.113295	0.000992	1.658462	-0.207644

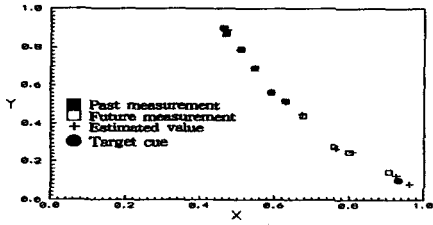
Fig.6~Fig.8에서는 매니플레이터가 목표지점에 가깝 게 다가감에 따라 Table 4에서 보여준 것 같이 각각 단계 에서 계산된 C 값을 사용하여 매니플레이터 끝점에 대 한 추정모델의 값들을 각 그림에 +부호로 나타내어, 향 후 실제로 측정값과 시각적으로 비교하기 위하여 함께 표 시하였다. 각 그림에서 보여준 것같이 매니플레이터 끝점 이 전체 이동궤적의 70% 정도 목적지에 다가감에 따라 더이상 카메라로 부터 측정된 데이터 정보없이 정확성을 가지고 목적지점에 도달할수 있는것을 보여준다. 이동궤 적의 70%에 도달했을때 정보를 가지고 식(15)에서 정의 된 성능지수 J를 최소화 시킨 값은 0.0008 이며 이때 Table 5에서 보여준 추정된 매니플레이터 회전각 θ^* 값

Table 5. The sequence of estimated manipulator joint position

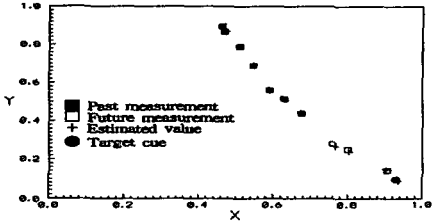
Steps	3-axis joint angles		
	θ_1^*	θ_2^*	θ_3^*
4	1.20602	2.94919	0.350110
6	1.04462	3.12328	0.496746
7	1.07929	3.14096	0.491112
목표지점	1.05229	3.15726	0.532708



(a)



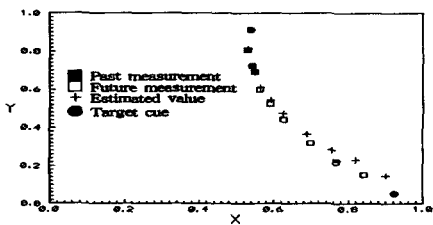
(b)



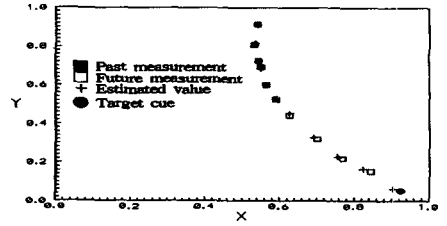
(c)

Fig. 6 Predictive sequence for point placement task from camera 1 viewpoint ;

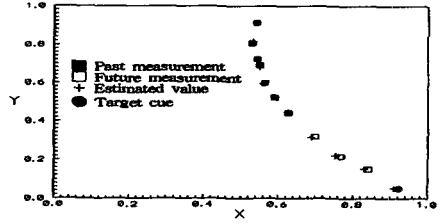
(a) 4 measurement , (b) 6 measurement , (c) 7 measurement



(a)



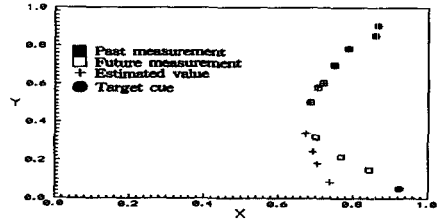
(b)



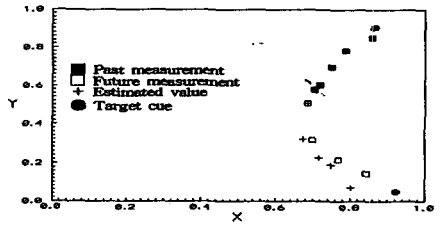
(c)

Fig. 7 Predictive sequence for point placement task from camera 2 viewpoint ;

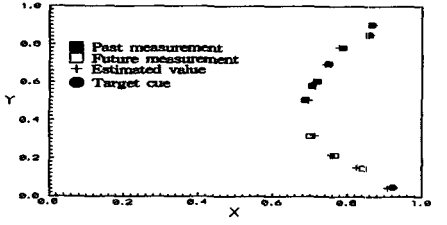
(a) 4 measurement , (b) 6 measurement , (c) 7 measurement



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Predictive sequence for point placement task from camera 3 viewpoint ;

(a) 4 measurement , (b) 6 measurement , (c) 7 measurement

으로 계산한 매니플레이터 끝점의 위치는 실제 목표지점 위치와 약 1~2mm 정도의 오차만을 발생시킨다. 이리하여 매니플레이터가 목적지점에 가까이 접근하면서 즉, 전체 궤적의 70%이후 어떠한 이유로 인해서 매니플레이터 끝점이 카메라로 측정되는 것을 방해 받았을때도 제한된 제어 방법은 원하는 목적을 훌륭히 수행할수 있다는 것을 Fig.6~Fig.8의 (c)에서 잘 보여주고 있다.

5. 결 론

본 논문에서 제시된 제어방법이 매니플레이터 위치제어를 행하는데 있어서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 논문에서는 3차원 매니플레이터의 위치를 2차원 카메라 좌표계로 변환시키는데 사용된 추정모델의 적합성을 보였다.

i) 기존의 방법들과 다르게 카메라와 매니플레이터 사이의 거리, 카메라 방위 및 촛점거리에 대한 계산, 혹은 보정없이 사용하므로 복잡성을 피할 수 있다.

ii) 매니플레이터의 각 링크 길이 측정에 대한 약간의 오차가 발생하여 매니플레이터 기구학 모델이 정확하지 않을지라도 카메라 모델에서 사용되어지는 6개 매개변수가 이를 보완해주기 때문에 우리가 원하는 결과에는 전혀 영향을 주지 않는다는 것을 본 연구를 통해서 알수 있었다.

(2) 3개의 카메라를 사용한 점 배치 실험을 통하여 매니플레이터가 목표지점을 향하여 70% 도달할때까지 카메라 측정데이터를 얻는다면 그 이후 측정데이터 없이도 매니플레이터를 원하는 지점까지 이동시킬수 있다.

(3) 다축 매니플레이터에 대해서도 그것의 기구학 모델만 변형시키면 위의 제어법은 손쉽게 사용되어 진다.

(4) 본 연구를 통하여 제시된 제어방법의 유용성을 보여주었으므로, 이를 바탕으로 최소한 2개 이상의 카메라 멀티프렉싱(Multiplexing)을 이용하여 실시간에서 매니플레이터와 목표지점의 위치와 방위가 요구되는 강체이

동(rigid body movement)에 대한 연구가 기대된다.

참 고 문 헌

1. Tani, K., Abe, M. and Ohno, T., "High Precision Manipulator with Visual Sense," Proceedings 7th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, October 19-21, Tokyo: Japan Industrial Robot Association, 1977.
2. Masaki, I., "Method and Apparatus for Manipulator Welding Apparatus with Vision Correction for Workpiece Sensing," United States Patent 4,380,696, April 19, 1983.
3. Bales, J. and Barker, L., "Marking Parts to Aid Robot Vision," NASA Technical Paper , 1819, April, 1981.
4. Anderson, R. L., "Real-Time Gray Scale Video Processing Using a Moment-Generating Chip," IEEE Journal of Robotics and Automation, June, 1985.
5. Morton, H., Junkins, J. and Blanton, J., "Analytical Solutions for Euler Parameters," Celestial Mechanics, 10, D. Reidal Publishing Company, Dordrecht-Holland, pp. 287-301, 1974.
6. Junkins, J. L., "An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems," Sijthoff and Noordhoff International Publishers, Alphen Aan Den Rijn, pp. 29-33, 1978.
7. Sage, A. and White, C., "Optimum Systems Control," Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1977.