

매니플레이터의 조립작업을 위한 비전시스템 모델 개발

장 완 식*, 백 은 석**

Development of Vision System Model for Manipulator's Assembly task

Wan-Shik Jang*, Eun-Sock Back**

Abstract

This paper presents the development of real-time estimation and control details for a computer vision-based robot control method. 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 4-axis Scorbot 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 : First the validity of estimation model is tested by using the self-built test model. Second, the practicality of the presented control method is verified in performing 4-axis manipulator's assembly task. These results show that control scheme used is precise and robust. This feature can open the door to a range of application of multi-axis robot such as deburring and welding.

Key words : Vision system (비전시스템), Kinematic model(기구학 모델), Estimation model (추정모델), Performance index (성능지수), Assembly task (조립작업)

1. 서 론

매니플레이터 위치 제어 방법에 있어 기존의 대부분
은 매니플레이터 베이스 좌표계에 대한 매니플레이터 기

* 조선대학교 기계공학과(수송기계부품공장자동화 연구센터)
** 조선대학교 대학원 기계공학과

구학적 모델과 목표 지점의 위치를 정확히 알아야 한다. 만약 목표지점 위치가 측정하기 어려운 환경에 놓여있거나 혹은 부정확한 정보가 주어졌을때는 소기의 목적 달성을 이루지 못한다. 이리하여 1980년 초반부터 화상처리 방법을 이용한 매니플레이터의 위치 제어에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾ 그러나 대부분의 매니플레이션에 대한 컴퓨터 비전시스템의 적용은 정확한 매니플레이터의 기구학적 모델과 카메라의 방위 초점거리에 대한 정확한 보정(calibration)을 필요로 한다.⁽³⁾⁽⁴⁾

본 연구는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 지금까지 발표된 기존의 방법들과는 달리 실용적인 비전제어 방법을 제안하고자 한다. 본 연구의 중요한 개념은 매니플레이터의 회전각을 사용하여 두개 이상의 카메라 화상에 조화시키는 것이다. 다시 말하자면 화상처리 문제와 매니플레이션 문제가 별도로 처리되는 것이 아니고 조정 목적(manuever objection)에 의해서 함께 처리되어진다. 비전시스템 모델은 매니플레이터 끝점(혹은 목표지점)에 대한 카메라 좌표 값과 매니플레이터의 기구학적 모델 사이의 상호 관계식을 6개의 매개변수를 사용하여 설명하고 있다. 또한 매니플레이터를 구동하기 위해 필요한 회전각들은 2개 이상의 독립적인 카메라를 사용하여 제어하고자 하는 매니플레이터 끝점과 목표 지점 사이의 오차를 최소화시키는 방법에 의해서 결정되어진다.

제안된 방법의 필요한 제한 조건은 각각의 카메라 계에서 목표 지점의 위치와 매니플레이터 끝점의 위치가 함께 존재해야 한다. 이리하여 본 연구에서는 사용된 제어기법의 중요한 근간이 되는 6개의 불확실한 시각 매개변수를 사용하는 비전시스템모델을 개발하고, 그 모델에 대한 정확성을 2종류의 실험을 통하여 입증하고자 한다. 마지막으로 4축 Scorbot 매니플레이터를 이용한 조립 작업을 통하여 이 제어 방법의 실용성을 확인한다.

2. 비전시스템 모델

본 논문에서 제안한 모델은 6개의 불확실한 시각 매개변수를 사용하여 공간상의 4축 매니플레이터 위치를 2차원 카메라 좌표계 위치로 변환시키는 카메라 모델이다. 6개의 매개변수를 포함하는 추정 모델은 매니플레이터 기구학적 모델과 카메라 모델이 이용된다.

2.1 4축 매니플레이터 기구학 모델

본 연구에서 사용되는 4축 Scorbot 매니플레이터는 Fig.1에서 보여주며, 그것에 대한 링크 인자는 Table 1에서 보여준다. Table 1을 사용하여 베이스좌표계에서 마지막 링크까지의 변환 행렬은 식(1)과 같다.

$${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & k_x \\ l_y & m_y & n_y & k_y \\ l_z & m_z & n_z & k_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $l_x = C_1 C_{2+3+4}$ $l_y = S_1 C_{2+3+4}$
 $l_z = -S_{2+3+4}$ $m_x = -C_1 S_{2+3+4}$
 $m_y = -S_1 S_{2+3+4}$ $m_z = -C_{2+3+4}$
 $n_x = -S_1$ $n_y = C_1$ $n_z = 0$
 $k_x = a_3 C_1 C_{2+3} + a_2 C_{12} + a_1 C_1 - S_1(d_2 + d_3)$
 $k_y = a_3 S_1 C_{2+3} + a_2 C_2 S_1 + a_1 S_1 - C_1(d_2 + d_3)$
 $k_z = -a_3 S_{2+3} - a_2 S_2 + d_1$

여기서, $S = \text{Sin}$, $C = \text{Cos}$, $C_{12} = \text{Cos } \theta_1 \text{Cos } \theta_2$.

$S_{1+2+3} = \text{Sin}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ 이다.

마지막 링크 O_4 에서 끝점 P까지의 위치 벡터는 식(2)에 주어진다.

$${}^4P = (0, P_y, 0, 1)^T \quad (2)$$

4축 매니플레이터의 베이스 좌표계에 대한 매니플레이터 끝점 P의 위치 벡터는 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{F} = {}^0_4T \cdot {}^4P = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & k_x \\ l_y & m_y & n_y & k_y \\ l_z & m_z & n_z & k_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ P_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$$f_x = C_1 S_{2+3+4} P_y + a_3 C_1 C_{2+3} + a_2 C_1 C_2 + a_1 C_1 - S_1(d_2 + d_3)$$

$$f_y = S_1 S_{2+3+4} P_y + a_3 S_1 C_{2+3} + a_2 S_1 C_2 + a_1 S_1 + C_1 (d_2 + d_3)$$

$$f_z = C_{2+3+4} P_y - a_3 S_{2+3} - a_2 S_2 + d_1$$

사용하여 카메라 회전 모델은 다음과 같이 나타낸다.⁽⁵⁾

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11}(C_i) & E_{12}(C_i) & E_{13}(C_i) \\ E_{21}(C_i) & E_{22}(C_i) & E_{23}(C_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, $E_{11} = C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2$ $E_{12} = 2(C_2 C_3 + C_1 C_4)$
 $E_{13} = 2(C_2 C_4 - C_1 C_3)$ $E_{21} = 2(C_2 C_3 - C_1 C_4)$
 $E_{22} = C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2$ $E_{23} = 2(C_3 C_4 + C_1 C_2)$

카메라 평면에 대한 매니플레이터 위치의 불확실성을 보완하기 위해 $X_{co}(=C_5)$ 와 $Y_{co}(=C_6)$ 을

식 (4)에 첨가시키면 비전시스템의 카메라 모델은 다음과 같다

$$X_c = (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2)f_x + 2(C_2 C_3 + C_1 C_4)f_y + 2(C_2 C_4 - C_1 C_3)f_z + C_5 \quad (5)$$

$$Y_c = 2(C_2 C_3 - C_1 C_4)f_x + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)f_y + 2(C_3 C_4 + C_1 C_2)f_z + C_6 \quad (6)$$

여기서, X_c 와 Y_c 는 6개의 매개변수가 알려졌다고 가정할 때 3차원 공간에서 움직이는 매니플레이터 끝점의 위치 벡터가 카메라 좌표계로 변환된 값을 나타낸다. 여기서 매개변수 ($C_1 \sim C_4$)는 카메라 방위 및 초점거리의 변화성을 나타내고, 마지막 2개 매개변수 (C_5, C_6)는 카메라에 대한 매니플레이터 위치의 불확실성을 나타낸다.

Table 1 Link parameter of 4-axis manipulator

	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	358.5	θ_1
2	-90°	50	-35.3	θ_2
3	0	300	0	θ_3
4	0	250	0	θ_4

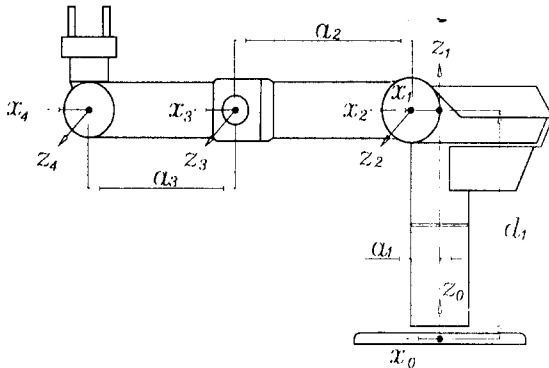


Fig. 1 4-axis Scorbobot manipulator

2.2 카메라 모델

카메라 모델은 6개 불확실한 시각매개 변수의 향으로 써 나타낸다. 이러한 매개변수들은 매니플레이터에 대한 카메라 위치, 방위 및 초점거리의 불확실성을 설명할 뿐만 아니라, 3차원 공간에서 움직이는 매니플레이터 끝점 위치를 2차원 카메라 좌표계로의 변환 관계를 나타낸다. 오일러 매개변수(Euler parameter) 향으로 나타내진 방향 코사인 행렬(direction cosine matrix)을

2.3 매개변수 추정

매니플레이터의 위치 벡터를 2차원 카메라 좌표계로 변환하는데 사용되는 6개 매개변수는 각 카메라에 대하여 독립적으로 아래 주어진 성능지수 $J(C)$ 를 최소화 시킴으로써 구해진다.

$$J(C) = \sum_{i=1}^k \{ [X_{ni} - X_c(F; C)]^2 + [Y_{ni} - Y_c(F; C)]^2 \} \quad (7)$$

여기서, k 는 측정된 데이터 개수, X_{ni} 와 Y_{ni} 는 측정된 카메라 좌표계 X, Y 값, X_c 와 Y_c 는 매니플레이터의 공간상 위치 및 매개변수 C 에 기초한

카메라 모델의 식을 나타낸다.

이때 식 (7)로부터 매개변수 수정 벡터 ΔC 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta C = (A^T W A)^{-1} A^T W R \quad (8)$$

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

$$R_{2i-1} = X_r(t_i) - X_c(t_i) \quad (9)$$

$$R_{2i} = Y_r(t_i) - Y_c(t_i) \quad (10)$$

또한, $2k \times 6$ 요소를 갖는 행렬 A 는 식(11)과 (12)에 의해서 주어진다.

$$A_{2i-1,j} = \partial X_c / \partial C_j \quad (11)$$

$$A_{2i,j} = \partial Y_c / \partial C_j \quad (12)$$

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

2.4 매니플레이터 회전각 추정

매개변수 추정 절차에 따라서 매개변수 C 가 얻어지면 목표 지점에 대한 매니플레이터 회전각의 추정값 θ^* 는 아래 주어진 성능지수 $J(\theta)$ 를 최소화시키는 방법에 의해서 얻어진다.

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^n \{ [X_{ct}^i - g_x^i(\theta^*; C^i)]^2 + [Y_{ct}^i - g_y^i(\theta^*; C^i)]^2 \} \quad (13)$$

여기서, n 은 사용된 카메라수, X_{ct}^i 와 Y_{ct}^i 는 목표 지점에 대한 i 번째 카메라에 대한 카메라 좌표계 데이터를 나타내며, 또한 g_x^i 와 g_y^i 는 각 카메라에 대해 독립적으로 추정된 매개변수 C^i 에 근거한 카메라 모델의 값을 나타낸다. 식 (13)으로부터 회전각 수정벡터

$$\Delta \theta = (B^T W B)^{-1} B^T W S \quad (14)$$

이며, W 는 가중행렬을 나타낸다. 또한 $2n \times k$ 의 크기를 갖는 행렬 B 는

$$B_{2n-1,k} = \partial g_x^i / \partial \theta_k^* \quad (15)$$

$$B_{2n,k} = \partial g_y^i / \partial \theta_k^* \quad (16)$$

이며, k 는 매니플레이터의 회전각 수를 나타낸다($k = 1, 2, \dots, l$). 또한 $2n \times 1$ 의 크기를 갖는 유수벡터 S 는

$$S_{2n-1} = X_{ct}^i - g_x^i \quad (17)$$

$$S_{2n} = Y_{ct}^i - g_y^i \quad (18)$$

3. 실험장치 및 실험결과 고찰

3.1 실험장치

Fig.2는 본 연구에서 행해진 실험 장치에 대한 전체적인 블록 선도이다. 본 논문에서 제시된 제어법의 타당성을 입증하기 위하여 행해진 실험의 하드웨어는 아래와 같이 크게 3개로 구분된다.

- (1) 비디오 카메라, 모니터 및 삼성 MVB-02 DSP 보드로 화상처리 기능을 포함하는 비전 시스템.
- (2) 4축 Scorbot 매니플레이터 및 시험모델
- (3) IBM - PC.

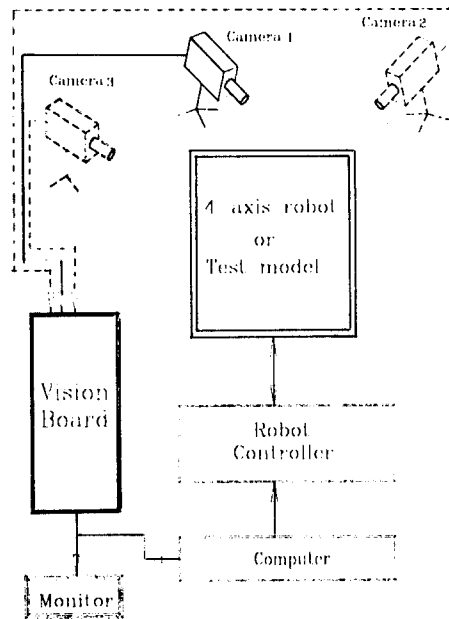


Fig.2 Overall experimental schematic diagram

3.2 개발된 비전시스템 모델 시험결과

3.2.1 시험모델

개발된 비전시스템의 모델의 적합성을 확인하기 위하여 매니플레이터 시스템을 대신하여 Fig. 3에서 주어진 시험모형을 제작하여 실험하였다. 그 이유는 공간상에서 원하는 위치에 대한 좌표값을 오차없이 정확하게 나타낼 수 있는 장점 때문에 이러한 시험모형을 사용하였으며, 원하는 위치시퀀스를 3차원 공간좌표상에서 선택하였다.

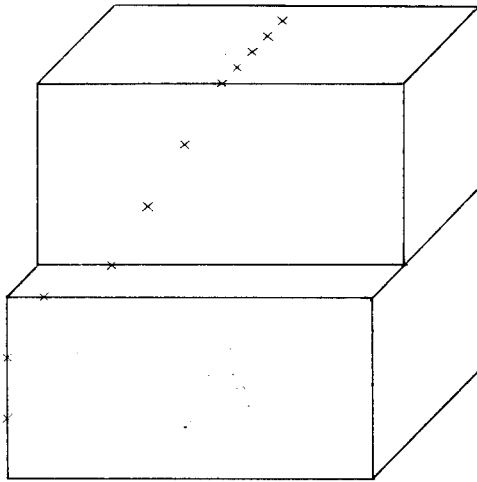


Fig. 3 Test model for vision system

3.2.2 시험결과 및 분석

Fig.3의 시험 모형에 × 로 표시된 3차원 공간상의 12개 위치 시퀀스를 갖는 궤적을 선택하여 개발된 비전시스템의 추정모델의 적합성을 보인다. 즉 3차원 공간상의 좌표값을 2차원 카메라 좌표값으로 변환시키는 것이다. 주어진 위치 시퀀스의 각 점에 대해 3대의 카메라를 사용하여 얻어진 비전데이터를 사용하여 매개변수 추정절차에 따라 각 카메라에 대한 매개변수 C 값을 계산하면 Table 2 와 같다. Table 2를 이용하여 각 카메라에서 계산된 추정모델값과 실제 측정값을 비교하면 Fig.4~Fig.6과 같다. 이 그림에서 보여준 것과 같이 카메라 추정모델의 결과치는 실제 비전 시스템을 이용하여 얻어진 값과 비교하면 0.7%이내의 오차값을 갖는다. 이리하여 3대의 카메라를 사용하여 본 논문에서 제시된 제어법을 조립 작업에 적용하였다.

Table 2. The estimated six parameters in three cameras

Camera	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
1	1.49856	0.86506	-0.01220	-0.03135	248.795	137.566
2	1.47588	0.84841	0.17142	0.31670	236.663	161.456
3	1.71930	0.96974	0.43689	0.61139	100.418	73.1105

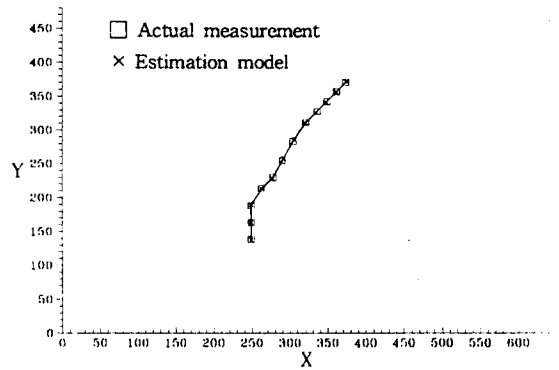


Fig.4 Comparison of actual measurement and estimation model's fit in camera 1 (X : pixel's horizontal coordinate, Y : pixel's vertical coordinate.)

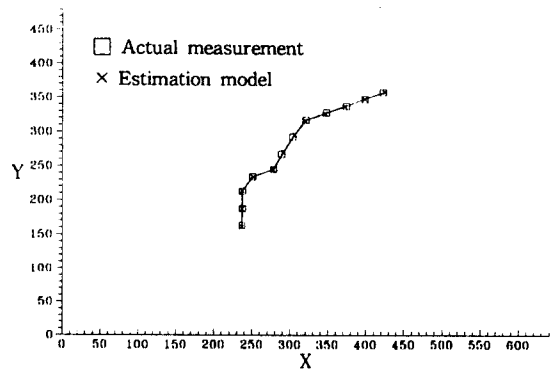


Fig.5 Comparison of actual measurement and estimation model's fit in camera 2 (X : pixel's horizontal coordinate, Y : pixel's vertical coordinate)

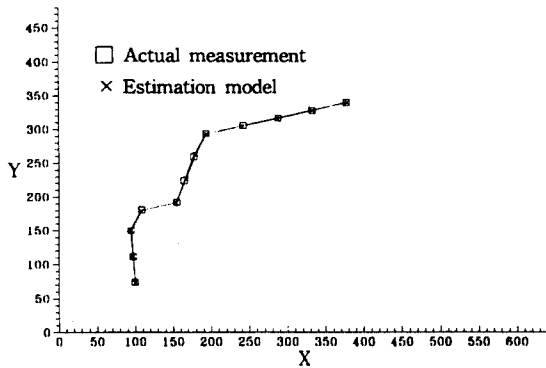


Fig.6 Comparison of actual measurement and estimation model's fit in camera 3 (X: pixel's horizontal coordinate, Y: pixel's vertical coordinate)

3.3 조립 작업에 대한 시험 및 결과

3.3.1 시험 모형

앞에서 보여준 비전시스템의 모델의 적합성에 근거하여 Photo.1에서 보여준 것과 같이 4축 Scorbobot 매니플레이터를 사용하여 Fig.7에서 보여준 것과 같이 매니플레이터의 그리퍼(gripper)에 직경 3mm의 막대를 직경 3.5mm의 홀에 조립시키기 위해 제안된 제시법을 이용한다.

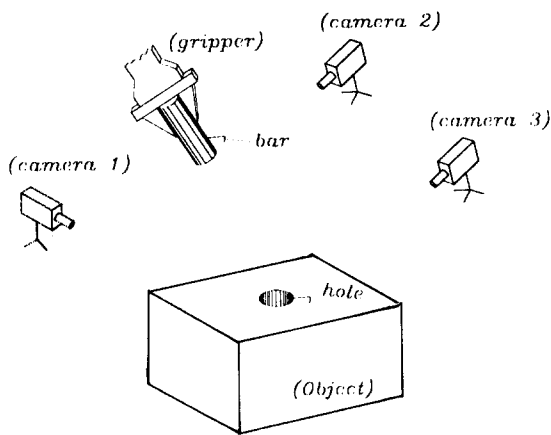


Fig.7 Assembly task

3.3.2 시험결과 및 분석

식(13) ~ (18)을 사용하여 매니플레이터가 목표 지점을 향해 이동하는 동안 매니플레이터의 회전각이 각 단계에서 추정되는데, 이 추정값 θ^* 는 각 카메라에서 측정되는 새로운 데이터를 사용하여 새롭게 계산된다. 즉, 목표 지점에 더 가까이 다가올수록 매니플레이터 회전각과 카메라 영역 사이에 존재하는 비선형 관계식을 더 좋게 반영하기 위해서 카메라에 해당되는 6개 매개 변수들의 추정값이 변화하기 때문에 매니플레이터 회전각의 추정값 θ^* 는 개선된다.

Fig.8은 카메라 영역에서 매니플레이터의 막대 이동 상황을 연속적으로 보여준다. 그림에서 부호 \blacksquare 과 \square 는 실제로 카메라로부터 얻어지는 매니플레이터의 막대 끝점의 측정 데이터를 나타내는데, Fig.8의 (a)(b)(c)에서 부호 \blacksquare 는 그 시각 이전에 측정된 데이터를 말하며, 부호 \square 는 향후 측정되어지는 데이터를 나타낸다. 부호 \bullet 는 카메라 영역에서 목표 지점을 나타내며, 즉 매니플레이터의 막대가 도착하고자 하는 지점을 나타낸다. Fig.8의 (a)에서 같이 이용 가능한 처음 5개의 측정 데이터를 사용하여 계산된 $C_1 \sim C_5$ 의 값은 $C = [0.772376, 0.656530, -0.704598, -0.563902, 226.7315, -43.66831]$ 이다. Fig.8의 (b)와 같이 3개의 새로운 측정 데이터를 첨가하여 계산된 C 의 값은 $C = [0.971208, 0.716855, -0.499657, -0.477438, -272.9074, -237.2753]$ 이며, Fig.8의 (c)와 같이 12개의 측정 데이터를 사용하여 $C = [1.152746, 0.779963, -0.339650, -0.398296, -699.3565, -406.1295]$ 를 계산하였다. Fig.9와 Fig.10은 각각 camera 2와 camera 3 영역에서 매니플레이터 막대의 이동 상황을 연속적으로 보여주며 각각의 그림에서 보여주는 부호에 대한 설명은 Fig.8과 동일하다.

Fig.8~Fig.10에서는 매니플레이터 막대가 목표 지점에 가깝게 다가감에 따라 각각 단계에서 계산된 C 값을 사용하여 매니플레이터 막대 끝점에 대한 추정 모델의 값들을 각 그림에 \times 부호로 나타내어, 향후 실제로 측정값과 시각적으로 비교하기 위하여 함께 표시하였다. 각 그림에서 보여준 것같이 매니플레이터 막대 끝점이 전체 이동 궤적의 70~80% 정도 목적지에 다가감에 따라 더이상 카메라로부터 측정된 데이터 정보없이 정확

성을 가지고 목적지점에 도달할 수 있는것을 보여준다. 이동 궤적의 70~80%에 도달했을때 Table 3에서 보여준 것과 같이 추정된 매니플레이터 회전각 θ^* 값으로 계산한 매니플레이터 막대 끝점의 위치는 실제 목표지점 위치와 약 1mm 이내의 오차만을 발생시킨다. 이리하여 매니플레이터가 목적지점에 가까이 접근하면서 즉, 전체 궤적의 70~80%이후 어떠한 이유로 인해서 매니플레이터 막대 끝점이 카메라로 측정되는 것을 방해 받았을때도 제안된 제어 방법은 원하는 목적을 훌륭히 수행할 수 있다는 것을 Fig.8~Fig.10의 (c)에서 잘 보여주고 있다.

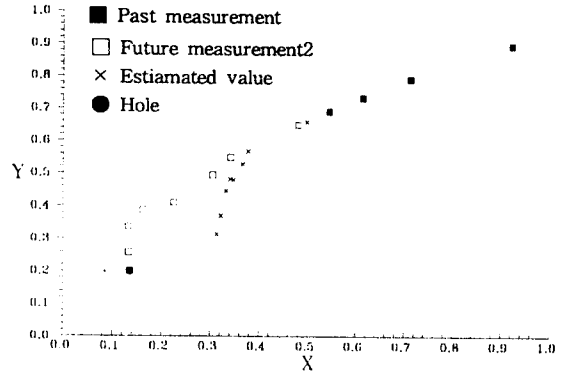
Table 3. The sequence of estimated manipulator joint position

Steps	4-axis joint angles			
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
4	0.32811	-0.48257	1.18044	2.20777
6	0.27029	-0.35456	0.84502	2.63638
9	0.23790	-0.36199	0.87798	2.59449
목표지점	0.24303	-0.34147	0.84690	2.61123

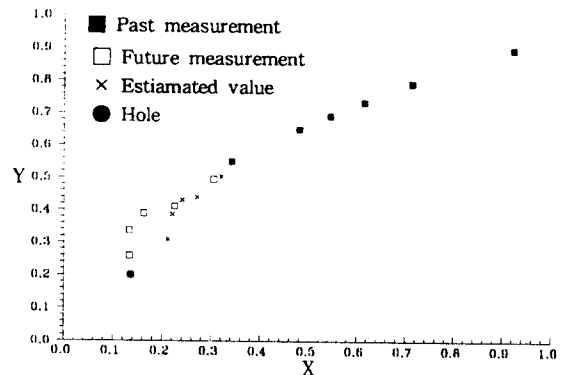
4. 결론

본 논문에서 제시된 제어 방법이 매니플레이터의 조립 작업을 행하는데 있어서 다음과 같은 결론을 얻었다.

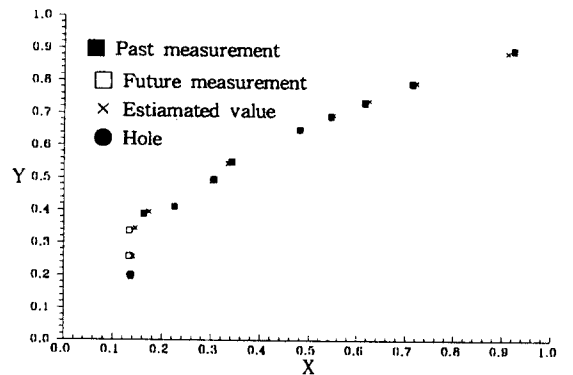
- (1) 시험 모형을 사용하여 2차원 및 3차원 공간상 위치를 2차원 카메라 좌표계로 변환시키는데 사용된 비전시스템 모델의 적합성을 보였다.
- (2) 3개의 카메라를 사용한 4축 Scorbot 매니플레이터를 사용한 조립작업 실험을 통하여 매니플레이터가 목표지점의 70~80% 도달할때까지 카메라 측정데이터를 얻는다면 그 이후 측정데이터 없이도 조립작업을 수행할 수 있었다.
- (3) 4축 이상의 다축 매니플레이터에 대해서도 기구학 모델만 변형시키면 위의 제어법은 손쉽게 사용되어 진다.



(a) 4 measurement

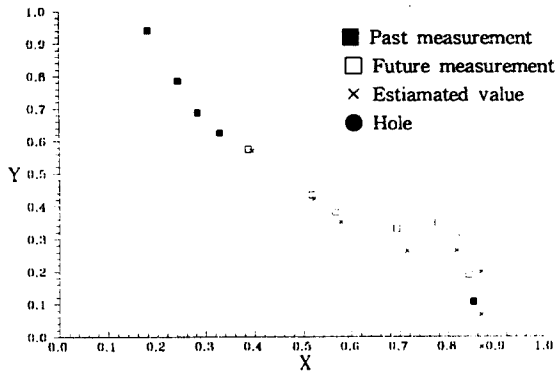


(b) 6 measurement

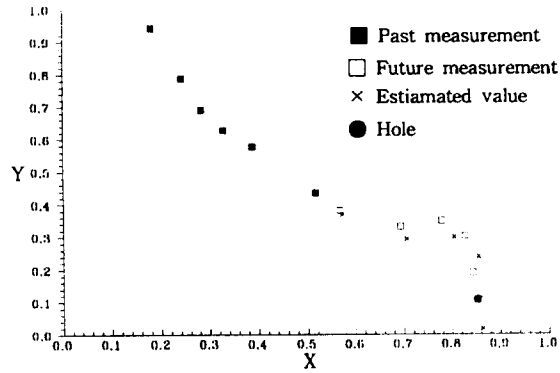


(c) 9 measurement

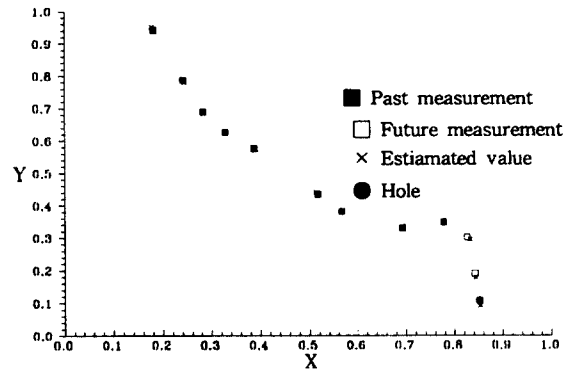
Fig.8 Predictive sequence for assembly task from camera 1 viewpoint (X: normalized pixel's horizontal coord., Y: normalized pixel's vertical coord.)



(a) 4 measurement

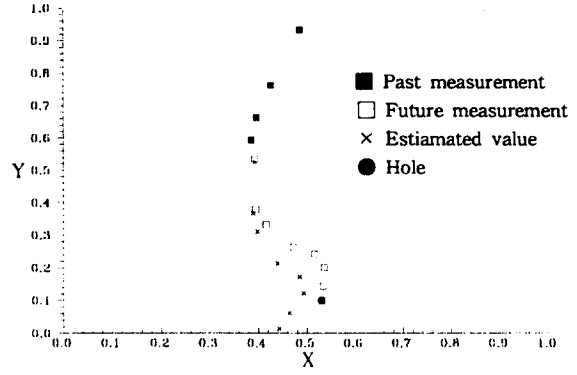


(b) 6 measurement

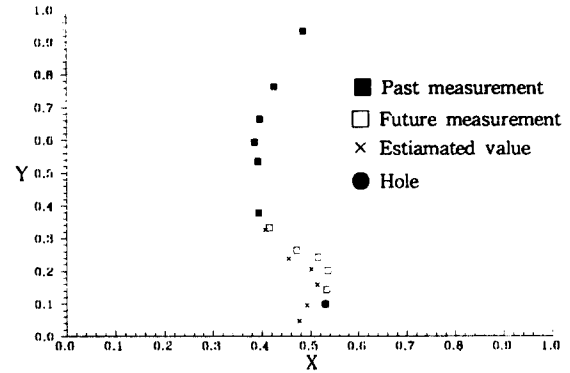


(c) 9 measurement

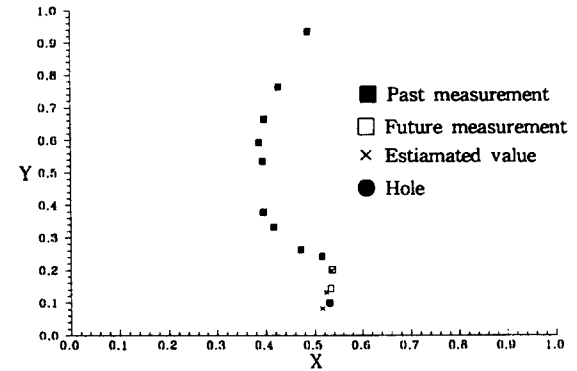
Fig.9 Predictive sequence for assembly task from camera 2 viewpoint
(X : normalized pixel's horizontal coord.,
Y : normalized pixel's vertical coord.)



(a) 4 measurement



(b) 6 measurement



(c) 9 measurement

Fig.10 Predictive sequence for assembly task from camera 3 viewpoint
(X : normalized pixel's horizontal coord.,
Y : normalized pixel's vertical coord.)

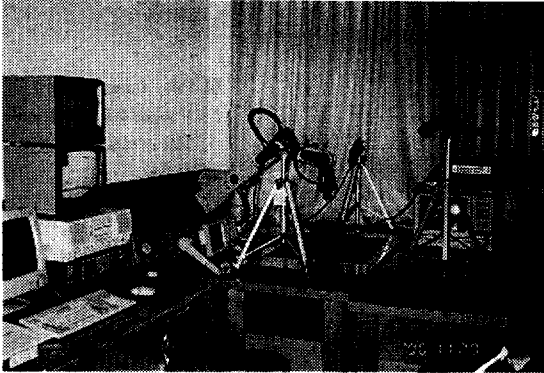


Photo.1 Experimental set-up

후 기

본 논문은 1995학년도 조선대학교 교내연구비를 수혜 받아 수행된 연구 결과임.

참고문헌

(1) Tani, K., Abe, M. and Ohno, T., " High Precision Manipulator with Visual sense ", Proc. 7th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, October 19-21, 1977.

- (2) Shirae, Y., and Inoue, H., " Guiding a Robot by Visual Feedback in Assembling Tasks ". Pattern Recognition, 5, pp. 99-105, 1973.
- (3) Masaki, I., "Method and Apparatus for Manipulator Welding Apparatus with Vision Correction for Workpiece Sensing," United States Patent 4,380,696, 1983.
- (4) Bales, J. and Barker, L., "Marking Parts to Aid Robot Vision," NASA Technical Paper 1819, April 1981.
- (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 System, Sijthoff