

# 불확실한 환경에서 매니플레이터 위치제어를 위한 실시간 비전제어기법에 관한 연구

장완식\*, 김경석\*, 신광수\*\*, 주철\*\*, 김재확\*\*, 윤현권\*\*

## A Study on the Real-Time Vision Control Method for Manipulator's Position Control in the Uncertain Circumstance

W.S. Jang\*, K.S. Kim\*, K.S. Shin\*\*, C. Joo\*\*, C.H. Kim\*\*, H.K. Yoon\*\*

### ABSTRACT

This study is concentrated on the development of real-time estimation model and vision control method as well as the experimental test. The proposed method permits a kind of adaptability not otherwise available in that the relationship between the camera-space location of manipulable visual cues and the vector of manipulator joint coordinates is estimated in real time.

This is done based on a estimation model that generalizes known manipulator kinematics to accomodate unknown relative camera position and orientation as well as uncertainty of manipulator. This vision control method is robust and reliable, which overcomes the difficulties of the conventional research such as precise calibration of the vision sensor, exact kinematic modeling of the manipulator, and correct knowledge of position and orientation of CCD camera with respect to the manipulator base.

Finally, evidence of the ability of real-time vision control method for manipulator's position control is provided by performing the thin-rod placement in space with 2 cues test model which is completed without a prior knowledge of camera or manipulator positions. This feature opens the door to a range of applications of manipulation, including a mobile manipulator with stationary cameras tracking and providing information for control of the manipulator event.

**Key Words** : camera-space location(카메라 평면상의 위치), vision control method(비전제어기법), calibration (보정), vision sensor(시각 센서)

### 1. 서론

로봇에 비전시스템을 적용하는 것은 로봇에게 인간의 5감(시각, 청각, 촉각, 미각, 후각)중의 하나인 시각을 부여하는 것으로 로봇이 스스로 주변환

경 및 장애물을 인식하여 정확한 작업을 수행할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다. 이것은 로봇에게 일정한 지능을 부여하는 것으로 다소 제한적이긴 하지만 다양한 종류의 작업을 스스로 판단하여 정확하게 처리하도록 한 것이다.

\* 조선대학교 기계공학부

\*\* 조선대학교 대학원 기계공학과

기존의 시각센서중 CCD 카메라는 환경에 대한 3차원 정보를 종합적으로 제공하는 가장 진보적인 센서로서, 처리속도가 빠른 고성능 컴퓨터의 개발에 힘입어 비전시스템에 활발하게 응용되고 있다. 또한, 향후 그 중요성이 급속도로 커질 것으로 예상되며 카메라를 통하여 주위의 환경정보를 인식하며 신경회로망 및 퍼지이론등 여러 가지 제어알고리즘을 바탕으로 로봇의 궤적 안내, 도장 작업, 용접작업, 부품검사, 물체의 위치 및 2방향 결정 그리고 3차원 물체 인식 등에 사용될 수 있을것이다<sup>(1)</sup>.

기존의 대부분의 연구는 비전시스템을 매니플레이터에 적용하는데 있어서 제한조건들을 가지고 있다. 첫 번째, 이 방법들은 기구학 모델의 정확도에 의해 직접 제한되므로 기구학적 보정을 위한 정교한 노력이 필요하게 될 것이다<sup>(2)</sup>. 두 번째, 매니플레이터 베이스에 부착된 기준계와 카메라에 부착된 카메라 좌표계 사이의 변환관계가 정확하게 알려져야만 한다<sup>(3)~(4)</sup>. 세 번째, 카메라 내부 파라미터들이 카메라 보정 단계와 로봇 매니플레이션 단계 중에 변하면 초기 보정은 더 이상 유효하지 않는 것이다<sup>(5)~(7)</sup>. 네번째, 만일 그리퍼에 물려 있는 물체가 이동 중의 어느 시간 동안 다른 물체에 의해 가려졌을 때 시각적인 궤환정보를 이용하기 위한 보정에서 얻어낸 이미지 평면 위치의 추정치를 사용하는 것이 필요할 것이다<sup>(2)~(7)</sup>.

따라서, 본 연구는 위와 같은 문제점을 해결하기 위해 지금까지 발표된 기존의 방법들과는 달리 로봇 매니플레이션을 위한 6개의 시각매개변수를 갖는 비전시스템 모델을 개발하여 불확실한 작업환경의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 실용적인 비전 제어기법을 개발함과 동시에 제시한 제어기법을 매니플레이터 위치 제어에 사용하기 위하여 비전 센서의 위치나 방향 또는 초점거리 같은 내부 매개변수들이 변화하는 불확실한 환경에서 공간상 얇은 막대 배치(thin-rod placement)에 대한 실험을 통하여 비전 제어기법의 타당성을 보이고자 한다.

## 2. 시스템 모델 개발

### 2.1 매니플레이터 기구학 모델

본 논문에서 사용한 SCORBOT-ER VII 4축 매니플레이터 기구학 모델은 계  $\{i-1\}$ 에 기준하여 계  $\{i\}$ 의 변환관계를 표시하는 동차변환행렬(homogen-

-ous transformation matrix)  ${}^{i-1}T$ 를 이용하여 계산된다.  $4 \times 4$  요소를 갖는 행렬  ${}^{i-1}T$ 는  $i-1$  링크와  $i$  링크 사이의 상대적인 위치와 자세를 나타내는 4개의 링크 인자( $a_{i-1}, \alpha_{i-1}, d_i, \theta_i$ )의 함수로서 Eq. (1)과 같이 주어진다.

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

여기서,  $a_{i-1}$ 은  $\hat{x}_{i-1}$ 를 따라 측정된  $\hat{z}_{i-1}$ 에서  $\hat{z}_i$ 까지의 거리,  $\alpha_{i-1}$ 은  $\hat{x}_{i-1}$ 주위로 측정된  $\hat{z}_{i-1}$ 과  $\hat{z}_i$ 사이의 각도,  $d_i$ 는  $\hat{z}_i$ 를 따라 측정된  $\hat{x}_i$ 에서  $\hat{x}_{i-1}$ 까지의 거리,  $\theta_i$ 는  $\hat{z}_i$ 주위로 측정된  $\hat{x}_{i-1}$ 에서  $\hat{x}_i$ 사이의 각도를 나타낸다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 4축 SCORBOT 매니플레이터의 기구학적 형상 및 각 관절 좌표계를 보여주며, Table 1은 4축 SCORBOT 매니플레이터의 각 관절에 대한 4개의 Denavit- Hartenberg 링크 인자값을 보여준다.

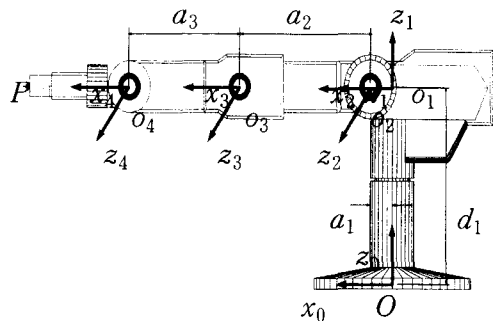


Fig. 1 SCORBOT-ER VII 4-axis manipulator

Table 1 Link parameters of SCORBOT manipulator

axis	$a_{i-1}(\text{degree})$	$a_{i-1}(\text{mm})$	$d_i(\text{mm})$	$\theta_i(\text{degree})$
1	0	0	358.5	$\theta_1$
2	-90	50	-135.3	$\theta_2$
3	0	300	100	$\theta_3$
4	0	250	0	$\theta_4$

Eq. (1)과 Table 1을 이용한 베이스 좌표계에서 마지막 관절까지의 변환행렬  ${}^0_4T$  는 Eq. (2)와 같다

$${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T$$

$$= \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & p_{orgx} \\ l_y & m_y & n_y & p_{orgy} \\ l_z & m_z & n_z & p_{orgz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots (2)$$

여기서,

$$l_x = \cos\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4),$$

$$l_y = \sin\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4),$$

$$l_z = -\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4),$$

$$m_x = -\cos\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4),$$

$$m_y = -\sin\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4),$$

$$m_z = -\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4),$$

$$n_x = \sin\theta_1, \quad n_y = \cos\theta_1, \quad n_z = 0,$$

$$p_{orgx} = a_3 \cos\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_1 \cos\theta_2$$

$$+ a_1 \cos\theta_1 - \sin\theta_1 (d_2 + d_3),$$

$$p_{orgy} = a_3 \sin\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2 \sin\theta_1$$

$$+ a_1 \sin\theta_1 + \cos\theta_1 (d_2 + d_3),$$

$$p_{orgz} = -a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_2 \sin\theta_2 + d_1$$

이다. 마지막 4번째 관절 좌표계의 원점  $O_4$ 에서 그리퍼의 임의의 점  $p^i$  까지의 위치벡터는 다음과 같다.

$${}^4P^i = [p_x^i \ p_y^i \ p_z^i \ 1]^T \dots (3)$$

여기서,  $i$ 는 큐(cue)의 번호( $i=1, 2 \dots a$ )이다. 이리하여, 매니퓰레이터 베이스 좌표계에 대한 그리퍼의 임의의 점  $p^i$ 의 위치벡터는 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{F} = {}^0_4T^{-1} P^i = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & p_{orgx} \\ l_y & m_y & n_y & p_{orgy} \\ l_z & m_z & n_z & p_{orgz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x^i \\ p_y^i \\ p_z^i \\ 1 \end{bmatrix} (4)$$

그리고 Eq. (4)를 전개하여 위치벡터를 성분별 ( $f_x^i, f_y^i, f_z^i$ )로 나타내면 Eq. (5)와 같다.

$$f_x^i = c_1 c_{234} p_x^i - c_1 s_{234} p_y^i - s_1 p_z^i + a_3 c_1 c_{23}$$

$$+ a_2 c_1 c_2 + a_1 c_1 - (d_2 + d_3) s_1$$

$$f_y^i = s_1 c_{234} p_x^i - s_1 s_{234} p_y^i + c_1 p_z^i + a_3 s_1 c_{23}$$

$$+ a_2 c_2 s_1 + a_1 s_1 + (d_2 + d_3) c_1$$

$$f_z^i = -s_{234} p_x^i - c_{234} p_y^i - a_3 s_{23} - a_2 s_2 + d_1$$

$$+ a_1 c_1 - (d_2 + d_3) s_1 \dots (5)$$

### 2.2 카메라 모델

임의의 기준계에 대한 카메라의 회전은 오일러 매개변수(Euler parameter)를 사용하여 나타낼 수 있으며<sup>(8)-(9)</sup>, 이때, 카메라 회전모델은 오일러 매개변수들의 향으로 나타내진 방향 코사인 행렬(direction cosine matrix)을 사용함으로써 다음과 같이 정의한다<sup>(10)</sup>.

$$\begin{bmatrix} X_m^i \\ Y_m^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11}(C_i) & K_{12}(C_i) & K_{13}(C_i) \\ K_{21}(C_i) & K_{22}(C_i) & K_{23}(C_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x^i \\ f_y^i \\ f_z^i \end{bmatrix} \dots (6)$$

여기서, 각각의  $K_{ij}$  요소들은 4개의 시각 매개변수 ( $C_1, C_2, C_3, C_4$ )의 적절한 조합으로 이루어지며 Eq. (7)과 같이 주어진다.

$$K_{11} = C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2$$

$$K_{12} = 2(C_2 C_3 + C_1 C_4)$$

$$K_{13} = 2(C_2 C_4 - C_1 C_3)$$

$$K_{21} = 2(C_2 C_3 - C_1 C_4)$$

$$K_{22} = C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2$$

$$K_{23} = 2(C_3 C_4 + C_1 C_2) \dots (7)$$

### 2.3 비전시스템 모델

카메라 평면에 대한 매니퓰레이터 위치의 불확실성을 보완하기 위해 시각 매개변수  $C_5$ 와  $C_6$ 를 Eq. (6)의 카메라 회전모델에 첨가하면 Eqs. (8)과 (9) 같이 비전시스템 모델이 주어진다.

$$X_m^i = (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2) f_x^i + 2(C_2 C_3 + C_1 C_4) f_y^i$$

$$+ 2(C_2 C_4 - C_1 C_3) f_z^i + C_5$$

$$(8)$$

$$Y'_m = 2(C_2 C_3 - C_1 C_4) f'_x + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2) f'_y + 2(C_3 C_4 + C_1 C_2) f'_z + C_6 \quad (9)$$

여기서,  $X'_m$  과  $Y'_m$  은 각각 3차 공간상의 임의의 점에 대한 위치 벡터를 2차원 카메라 좌표계로 변환했을 때  $x, y$  성분을 나타낸다. 6개 시각 매개변수중  $C_1 \sim C_4$  는 카메라의 위치 및 초집거리의 변화성을 나타내고,  $C_5 \sim C_6$  는 카메라에 대한 매니플레이터 위치의 불확실성을 나타낸다.

### 2.4 매개변수 추정모델

비전시스템 모델의 6개 매개변수는 3차원 공간의 매니플레이터 그리퍼의 위치벡터를 2차원 카메라 좌표계로 변환하는데 있어서 매우 중요한 인자이며, 매개변수  $C_k(k=1,2 \dots 6)$ 를 추정하는 과정은 다음과 같다. 매니플레이터가 주어진 궤적을 이동하는 동안 매니플레이터 그리퍼에 놓여있는 임의의 점에 대한 위치벡터  $P^i$ 에 대해서  $n$  번째 이동 단계에서의 순간시간  $t_n(n=1,2 \dots h)$ 까지 비전시스템 데이터와 매니플레이터 회전각  $\theta_i(= \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ 이 동시에 연속적으로 얻어진다고 가정하고, 3차원 좌표계의 임의의 점 위치벡터를 2차원 카메라 좌표계로 변환하는데 사용되는 6개의 시각 매개변수는 각 카메라에 대하여 아래 주어진 성능지수  $J_a(C_k)$ 를 최소화시킴으로써 구해진다.

$$J_a(C_k) = \sum_{n=1}^h \sum_{i=1}^m \{ [X'_m(t_n; C_k) - X'_c(t_n)]^2 + [Y'_m(t_n; C_k) - Y'_c(t_n)]^2 \} \quad (10)$$

여기서,  $n$  은 매니플레이터 이동 단계의 번호,  $X'_c(t_n)$ 와  $Y'_c(t_n)$ 는 시간  $t_n$  에서 카메라를 통하여 실제 얻어진 카메라 평면의  $x, y$  좌표값을 나타낸다. 또한  $X'_m$ 과  $Y'_m$  은 시간  $t_n$  에서의 비전시스템 모델의  $x, y$  좌표값을 나타낸다. 주어진 성능지수  $J_a(C_k)$  를 최소화시키기 위해서 다음과 같은 함수를 정의한다.

$$g(C_k) = \begin{bmatrix} g'_x \\ g'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_m(t_n; C_k) - X'_c(t_n) \\ Y'_m(t_n; C_k) - Y'_c(t_n) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Eq. (11)의 매개변수  $C_k$  를 계산하기 위해 다음과 같은 Newton-Raphson 방법을 적용한다.

$$C_{k,j-1} = C_{k,j} - \left[ \frac{\partial g(C_{k,j})}{\partial C_k} \right]^{-1} g(C_{k,j}) = C_{k,j} + \Delta C \quad \dots (12)$$

여기서,  $j$ 는 계산과정 중 반복횟수를 나타낸다. 주어진 Eq. (12)에서  $\left[ \frac{\partial g(C_{k,j})}{\partial C_k} \right]^{-1}$  을 계산할 때 대부분의 경우 정방행렬이 아니므로 Gauss 소거법과 같은 일반적인 방법으로는 역행렬을 계산할 수가 없다. 따라서 역행렬을 구하기 위하여 최소 노름해(minimum norm solution), 또는 최소 이산해(least square solution)를 이용한다. 즉,  $c \times d$ 인 행렬  $A$ 가 정방 행렬이 아닌 경우  $y=A \cdot x$ 에서  $x$  값을 계산하기 위해 다음과 같은 식을 이용하여 해를 구한다<sup>(11)</sup>.

$$x = A^T (A A^T)^{-1} y \quad (c < d) \quad \dots (13)$$

$$x = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (c > d) \quad \dots (14)$$

Eq. (12)에서 매개변수 수정벡터 (parameter correction vector)  $\Delta C$  는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta C = (A^T W A)^{-1} A^T W R \quad \dots (15)$$

여기서,  $W$  는 가중행렬(weighting matrix)이고,  $2ha \times 1$  요소를 갖는 유수벡터(residual vector)  $R$  은 다음과 같이 주어진다.

$$R = \begin{bmatrix} X_m(t_n) - X_c(t_n) \\ Y_m(t_n) - Y_c(t_n) \end{bmatrix} \quad \dots (16)$$

또한, Eq. (15)에 주어진 함수  $g(C_k)$ 를 최소화하는  $2ni \times 6$  요소를 갖는 자코비안 행렬(jacobian matrix)  $A$ 는 Eq. (17)에 의해서 주어진다.

$$A_{(2n-1)i, k} = \partial X'_m / \partial C_k, \quad A_{2ni, k} = \partial Y'_m / \partial C_k \quad \dots (17)$$



여기서,  $n = 1, 2, 3, \dots, h$  이고,  $i$ 는 큐 번호,  $n(= 2ha)$ 는 카메라를 통해 측정된 총 데이터 수이다. 또한  $a_x, a_y, a_{x0}, a_{y0}$ 는 가중계수이며,  $a_x$ 와  $a_y$ 는 본 실험에서 설정한 가중계수 값을 사용하였고,  $a_{x0}$ 와  $a_{y0}$ 는 1.0으로 정의하였다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 크게 비전시스템과 매니플레이터 시스템으로 구분하였으며, 실험장치에 대한 전체적인 구성도는 Fig. 2에 나타내었다.

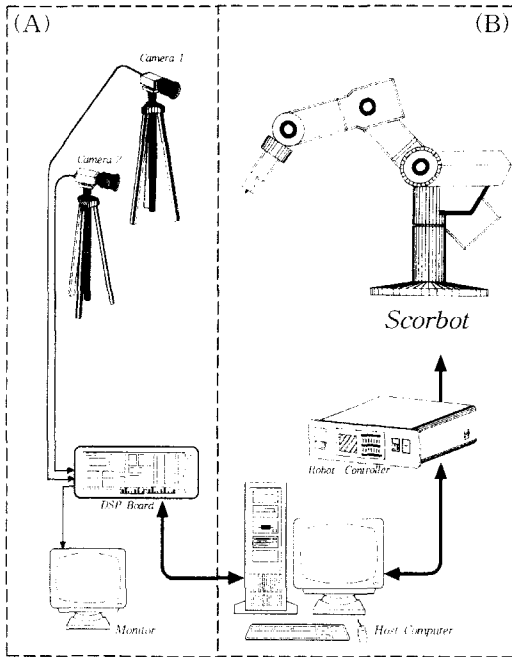


Fig. 2 Overall experimental set-up

본 실험에서 사용된 매니플레이터 시스템은 매니플레이터, 매니플레이터 제어기, 호스트 PC 등으로 구성되어 있다. 매니플레이터 시스템의 구성도는 Fig. 2의 (B) 부분에서 보여준다. 또한, 본 실험에서 사용된 비전시스템의 구성은 Fig. 2의 (A)에서 보여준 것 같이 2개의 CCD 카메라, 화상처리 비전보드, 모니터로 이루어졌다.

#### 3.2 시험 모형

본 논문에서 제시된 비전 제어기법을 얇은 막대 배치를 위한 매니플레이터 위치 제어에 적용하기 위해 Fig. 3 과 같은 시험모형을 제작하였다.

Fig. 3은 2개의 큐를 갖는 시험모형을 나타내며, 이 모형을 사용하여 두 점의 위치가 알려진 목표점에 대한 막대 배치 실험을 행한다. 보여준 시험모형은 매니플레이터 그리퍼에 물려져 있으며 비전데이터의 크기를 최소화시키기 위하여 각 시험모형의 끝에 큐를 부착하였다. 모형의 규격은 사각기둥이  $30 \times 43\text{mm}$ 이며, 상단부 원기둥은 길이  $40\text{mm}$ 이고 지름은  $10\text{mm}$ 이며, 각 큐의 지름이  $2\text{mm}$ 이다. 중간부분의 원기둥의 총 높이는  $11\text{mm}$ 이고 지름은  $10\text{mm}$ 이다.

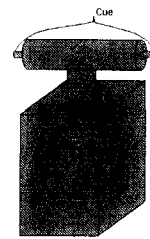


Fig. 3 Experimental test model with 2 cues

### 4. 컴퓨터 비전을 이용한 얇은 막대 배치 실험

본 실험은 2개의 큐를 갖는 시험모형을 이용하여 얇은 막대의 배치에 적용하기 위한 실험을 행하여, 제시된 비전제어기법의 유용성을 보이고자 한다.

#### 4.1 막대 배치 실험절차

실험절차는 Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 크게 8 단계로 구분되고 그 내용은 다음과 같다.

- (1) 단계 1 : 매니플레이터 그리퍼에 물려있는 환봉에 놓여있는 2개 큐와 목표점이 2개의 카메라 이미지 평면상에서 벗어나지 않도록 설정하고, 또한 임의의 궤적을 설정하여 매니플레이터를 구동한 후 매개변수 추정모형을 위한 초기의  $C_k$  값을 결정한다.

- (2) 단계 2 : 처음 위치에서 목표점에 접근하는 매니플레이터의 이동궤적을 설정한다.
- (3) 단계 3 : 목표점의 비전데이터를 각각의 카메라로부터 얻는다.
- (4) 단계 4 : 임의적으로 생성된 궤적을 따라서 목표점을 향해서 매니플레이터를 구동함으로써 비전시스템 추정 알고리즘의 준비작업을 수행한다.

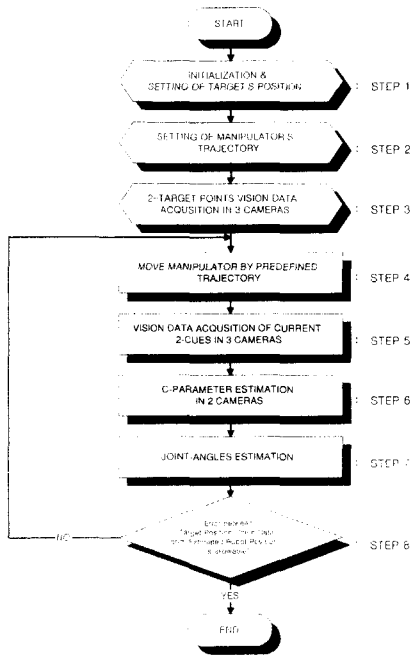


Fig. 4 Experimental procedure of the rigid body placement based on the computer vision system

- (5) 단계 5 : 매니플레이터가 임의적으로 생성된 궤적을 따라 목표점을 향해서 이동할 때 각 단계에서 매니플레이터 그리퍼에 물려있는 큐의 비전데이터를 비전데이터 획득 프로그램을 사용하여 각 카메라별로 얻는다.
- (6) 단계 6 : 3차원 공간상의 큐의 위치를 2차원 카메라 평면으로 변환하는 관계를 나타내는 시각 매개변수  $C_1 \sim C_6$ 를 2.3절에서 설명한 방법에 따라 추정한다.
- (7) 단계 7 : 단계 6에서 추정된 6개의 시각 매개변수  $C_1 \sim C_6$ 를 사용하여 2.4절에서 설명한 방법에 따라 로봇회전각을 추정하고, 추

정된 로봇회전각을 매니플레이터가 목표점을 향해 구동하는데 사용한다.

- (8) 단계 8 : 이미 각 카메라로부터 얻어진 목표점의 비전데이터  $X, Y$ 와 현재 매니플레이터 말단의 큐 위치에 대한 카메라 평면의 비전데이터  $X, Y$ 의 오차가 허용오차 이내인가를 검사하여 실험을 종료하거나 단계 4로부터 반복한다.

## 4.2 얇은 막대 배치 실험 및 결과

매니플레이터가 생성된 연속적인 데이터 시퀀스를 갖는 궤적과 불연속적인 데이터 시퀀스를 갖는 궤적 등 2종류의 궤적을 따라서 이동하는 동안 각 단계마다 매니플레이터 각 축의 엔코더 값(회전각)과 그리퍼에 물려있는 시험모형에 부착된 큐의 위치가 2차원 카메라 좌표계에 대한 비전데이터를 2개의 카메라를 통해서 얻고 4.1절에서 설명된 실험절차에 따라서 막대배치실험을 행한다.

비전데이터는 카메라 화소단위인 픽셀을 사용하여  $640 \times 480$ 의 범위를 가지고 얻어지는데, 본 실험에서 사용한 비전 제어기법은 카메라와 매니플레이터의 상대적인 위치에 대해서 고려하지 않으므로 픽셀의 단위로 얻어진 비전데이터를 그대로 사용하는다.

### 4.2.1 연속적인 10개 데이터 시퀀스를 갖는 궤적

4축 류마타입 매니플레이터를 이용한 얇은 막대 강체 배치 실험을 통하여 본 연구에서 제시된 비전 제어기법의 유용성을 보이고자 한다. 매니플레이터 그리퍼에 물려있는 강체가 목표점을 향하여 움직이는 동안 얻어지는 카메라 좌표계의 비전데이터를 Eqs. (10)~(17)에 적용하여 시각 매개변수  $C_k$ 를 계산한다. 계산되어진 시각 매개변수  $C_k$ 값을 바탕으로 Eq. (18)에 보여준 성능지수  $J_b(\theta)$ 를 최소화시키는 방법을 사용하여 목표점에 대한 매니플레이터의 회전각을 추정한다. 이때  $C_k$ 와  $\theta_i$ 를 추정하는 방법은 수치 해석적 반복법인 Newton Raphson 방법을 사용하였다. 이 방법은 수렴이 빠르나 초기값에 따라 수렴속도가 늦어지거나 발산할 수도 있으므로 최적의 초기값을 설정하기 위해서 실험절차의 단계 1에서 초기값을 설정하여 실험을 행하였다.

또한, 가중행렬  $W$ 의 가중계수 값은 시각대개변수  $C_k$ 와 회전각  $\theta_i$ 를 추정할 때 모두 0.0을 사용하였다.

Fig. 5 ~ Fig. 12은 본 실험에서 임의로 생성한 매니플레이터의 경로와 계산되어진 추정모델값을 카메라 이미지 평면상에 나타낸 것이며, 각 단계에서 부호  $\circ$ 은 실제 비전데이터이고, 부호  $\times$ 는 추정된 추정모델값이다. 그림의 가장 아래에 있는 부호  $\square$ 는 강체를 위치시키고자 하는 목표점이다. Fig. 5 ~ Fig. 6은 5단계, Fig. 7 ~ Fig. 8은 7단계, Fig. 9 ~ Fig. 10은 9단계를 이동하는 동안 2개의 카메라에 대해 각각 추정된 결과를 실제값과 비교하여 보여준다. 또한, 목표점과 가장 가까운 10단계로 이동했을때 추정 결과값을 Fig. 11 ~ Fig. 12에서 보여주고 있다.

각 그림에서 알 수 있듯이 측정된 데이터의 개수가 증가될수록 즉, 매니플레이터가 목표점에 근접할수록 목표점에 대한 실제값과 추정된 결과값을 카메라 좌표계상에서 비교하면 오차가 점점 감소함을 알 수 있다.

Table 2는 Fig. 5 ~ Fig. 12에서 보여준 결과를 이용하여 각 단계별로 회전각 추정모델절차에 따라서 매니플레이터를 구동하기 위하여 계산된 관절값을 보여준다. 여기서 계산된 관절각을 이용하여 각 단계에서 매니플레이터를 목표점에 이동시켰을 때 각 큐에 대한 절대 오차값을 Table 3에서 보여준다.

Table 3에서 보여준 것과 같이 측정된 비전데이터의 개수가 증가함에 따라 매니플레이터 절대 좌표계에 대해 추정되는 큐의 위치를 실제 목표점과 비교하여 보여준다. 또한, 평균 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e_{avg} = \sqrt{\frac{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2}{3}} \quad \dots (25)$$

여기서,  $e_x$ 는  $x$ 성분 오차,  $e_y$ 는  $y$ 성분 오차,  $e_z$ 는  $z$ 성분 오차를 나타낸다.

Eq. (25)를 이용하여 각 단계에서 2개 큐에 대한 계산된 평균오차값은 Fig. 13 ~ Fig. 14에서 각각 보여준다.

Table 3 과 Fig. 13 ~ Fig. 14에서 보여준 것 같이 비전데이터를 얻는 단계가 증가할수록 각 큐에 대한 오차가 적어짐을 확실하게 알 수 있다. 또한, 제어하고자 하는 전체적인 경로에 대해 60%만의 정보만으로도  $\pm 2\text{mm}$ 내의 오차를 가지고 강체 배치

작업을 성공적으로 수행하였다.

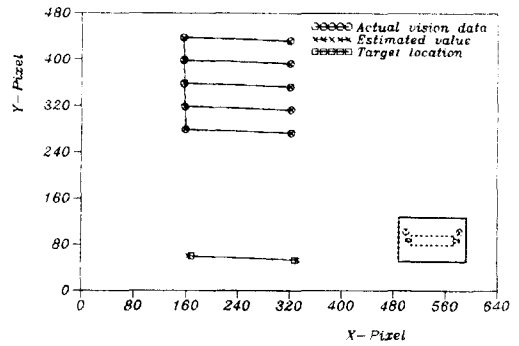


Fig. 5 Predictive sequence of 2 cue-rigid body placement with 5 step measurement data in view of camera #1

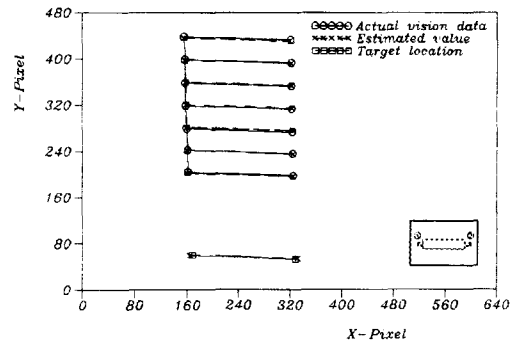


Fig. 6 Predictive sequence of 2 cue-rigid body placement with 7 step measurement data in view of camera #1

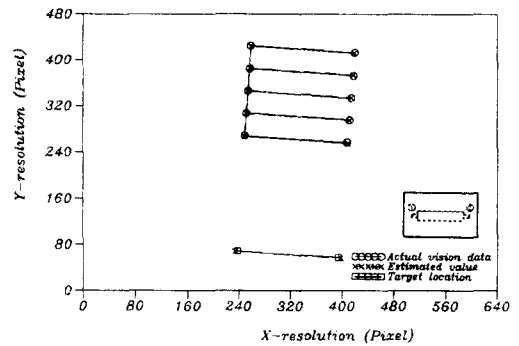


Fig. 7 Predictive sequence of 2 cue-rigid body placement with 5 step measurement data in view of camera #2



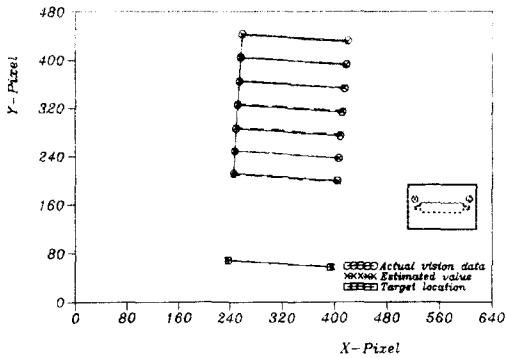


Fig. 8 Predictive sequence of 2 cue-rigid body placement with 7 step measurement data in view of camera #2

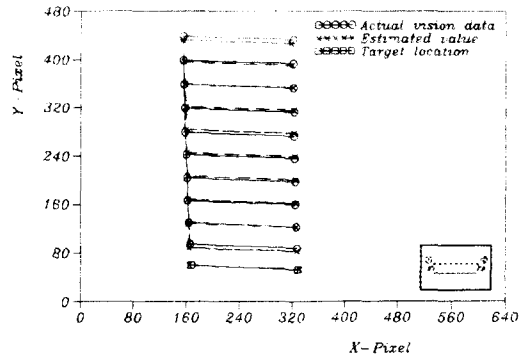


Fig. 11 Predictive sequence of 2 cue-rigid body placement with 10 step measurement data in view of camera #1

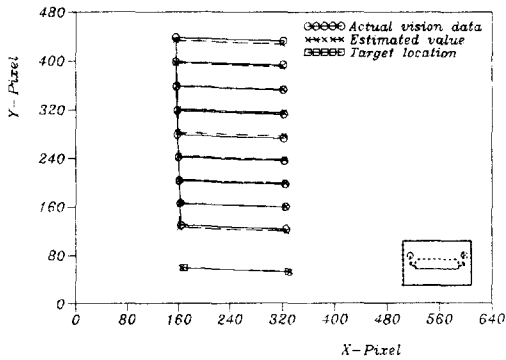


Fig. 9 Predictive sequence of 2 cue-rigid body placement with 9 step measurement data in view of camera #1

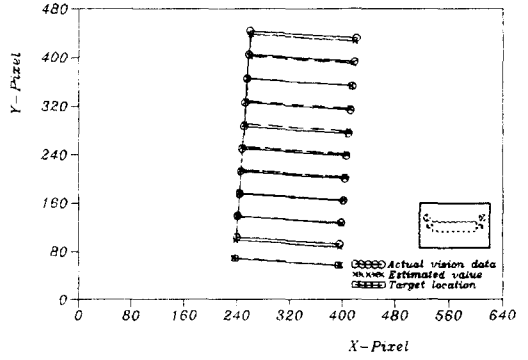


Fig. 12 Predictive sequence of 2 cue-rigid body placement with 10 step measurement data in view of camera #2

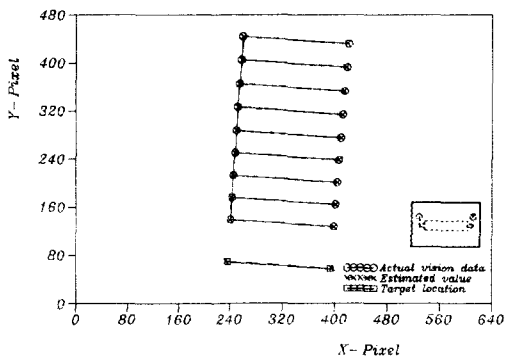


Fig. 10 Predictive sequence of 2 cue-rigid body placement with 9 step measurement data in view of camera #2

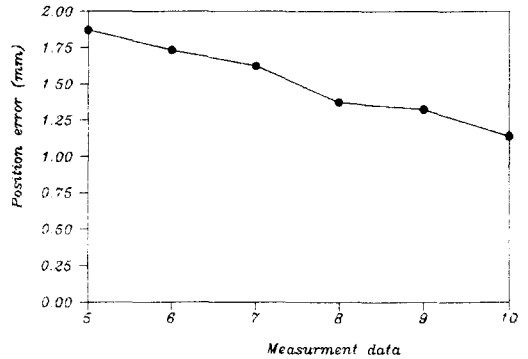


Fig. 13 For cue ①, average position errors according to the variation of the measurement data

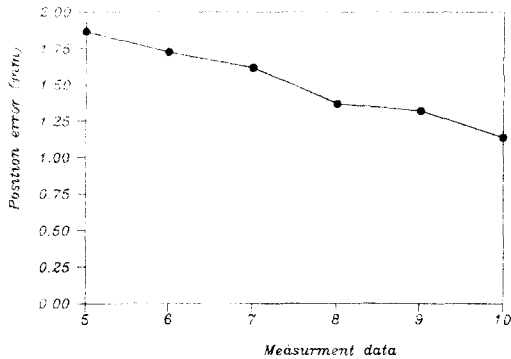


Fig. 14 For cue ②, average position errors according to the variation of the measurement data

Table 2 Estimated joint angles according to increase of measurement data.

(Unit : Degree)

Cue #		1	2		
Real value	Fx	659.0	659.0		
	Fy	-59.8	-9.8		
	Fz	-237.2	-237.2		
	estimated value	errors	estimated value	errors	
step 5	Fx	657.8	1.2	657.8	1.1
	Fy	-59.9	0.1	-9.9	0.1
	Fz	-234.9	-2.2	-234.9	-2.2
step 7	Fx	658.1	0.8	658.1	0.8
	Fy	-59.9	0.1	-9.9	0.1
	Fz	-235.3	-1.8	-235.3	-1.8
step 9	Fx	658.3	0.6	658.4	0.6
	Fy	-59.8	0.0	-9.8	0.0
	Fz	-235.8	-1.3	-235.8	-1.3
step 10	Fx	658.4	0.5	658.4	0.5
	Fy	-59.8	0.0	-9.8	0.0
	Fz	-236.1	-1.0	-236.1	-1.0

Table 3 Estimated cue coordinate values in the physical space according to the increase of the number of the measurement data.

(Unit : mm)

Joint angle		$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$
Estimated angle	step 5	-0.015	-18.556	82.911	-38.367
	step 7	-0.010	-17.830	82.957	-40.296
	step 9	-0.006	-17.493	82.894	-41.063
	step 10	-0.004	-16.148	83.005	-44.865

#### 4.2.2 불연속적인 10개 데이터 시퀀스를 갖는 궤적

앞에서는 데이터 시퀀스가 증가할 때 획득한 비전데이터가 연속성을 유지하고 있는 경우에 관하여 논하였다. 여기서는 비전데이터를 얻음에 있어서 장애물 출현으로 인하여 불연속적인 상황이 발생한 경우에 대해 본 논문에서 제시한 비전시스템 모델의 적합성과 유용성을 확인하고자 한다. 그리고 장애물에 의한 데이터 획득에 대한 연속성 상실 실험 환경은 매니플레이터가 목표점을 향해 이동하는 도중 CCD 카메라를 종이(장애물)로 가려서 일정시간 동안 비전데이터를 획득할 수 없도록 하였다.

Fig. 15 ~ Fig. 16은 매니플레이터가 목표점을 향하여 이동할 때 비전시스템을 통하여 획득한 비전데이터와 추정모델값을 카메라 화소단위인 픽셀 값으로 나타낸 것이다. 각 그림에서 장애물의 출현에 의해 데이터를 얻지 못한 구간을 빗금친 부분으로 표시하였다. 매니플레이터가 목표점을 향해 이동하는 도중 장애물에 의해 데이터 획득에 연속성을 상실했다 할지라도 추후 얻어지는 비전데이터와 앞에서 얻어진 비전데이터를 이용하여 제시된 비전 제어기법을 적용하였다. Fig. 15 ~ Fig. 16에서 보는 것과 같이 목표점에 대한 실제 비전데이터와 추정결과값을 각 카메라에 대해서 비교하면 매우 일치함을 알 수 있다.

Table 4는 Fig. 15 ~ Fig. 16의 결과 값을 이용하여 회전각을 추정하여 로봇을 목표점을 향해 구동했을 때 오차값을 나타내며, 이때 각 큐에 대한 약 0.646mm 평균오차를 가지고 강체배치를 훌륭히 수행하였다

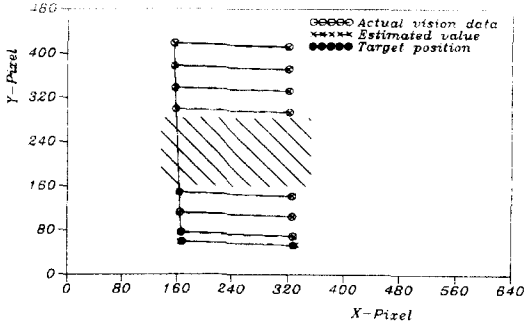


Fig. 15 In case of obstacle appearance with 2 cues, comparison of the actual vision data and estimation model's values in camera #1

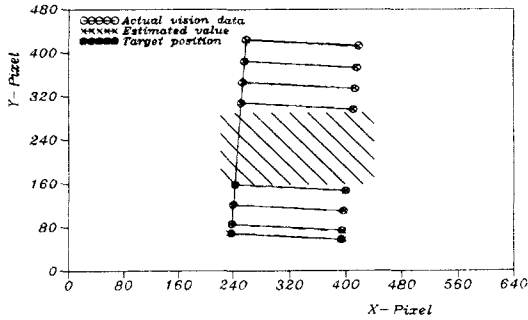


Fig. 16 In case of obstacle appearance with 2 cues, comparison of the actual vision data and estimation model's values in camera #2

Table 4 Several types of errors in case of obstacle appearance with 2 cues

Cue number	Errors	
	Error for each axis	Average errors for each cue
#1	Fx	0.633
	Fy	0.019
	Fz	-0.923
#2	Fx	0.632
	Fy	0.019
	Fz	-0.923

### 5. 결 론

본 논문에서는 컴퓨터 비전시스템을 불확실한

환경에서 매니플레이터 위치 제어에 적용하기 위하여 실시간 비전 제어기법을 개발하였고, 2개의 큐를 갖는 시험모형의 강제 배치 실험을 개발된 비전 제어기법에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 3차원 공간상에 존재하는 강체의 위치를 2차원 평면상의 카메라 좌표계로 변환하는데 사용되는 비전시스템 모델의 적합성을 2큐를 갖는 막대 시험모형을 가지고 실험을 통하여 보여주었으며, 또한 측정되어지는 비전데이터의 개수가 증가할수록, 즉 목표점에 근접할수록 오차 발생이 적어짐을 알 수 있었다.
- (2) 강제중 얇은 막대의 배치에 적용하기 위한 방법으로 2개의 큐를 갖는 시험모형을 가지고 강제 배치 실험을 행한 결과 강제 위치가 전체 이동궤적의 60%정도 목표점에 근접함에 따라 더이상 카메라로부터 측정된 데이터 없이도 약  $\pm 2\text{mm}$ 미만의 정확성을 가지고 목표점에 도달할 수 있는 것을 보여 주었다.
- (3) 본 연구에서 제시된 제어기법은 로봇이 이동하는 도중 장애물 출현 등으로 인하여 비전데이터 획득이 불가능하게 되는 불확실한 환경에서도 먼저 측정된 데이터와 향후 측정될 데이터를 이용하여 로봇이 얇은 막대를 목표점에 1mm미만의 정확성을 가지고 성공적으로 배치시켰다.
- (4) 본 논문에서 사용한 SCORBOT이외의 어떠한 다축 매니플레이터에 대해서도 그 매니플레이터에 맞는 기구학 모델링만 변경하면 제시된 비전 제어기법을 적용할 수 있다.

### 후 기

본 논문은 1998년도 조선대학교 교수 해외파견 연구비의 지원을 받아 연구(전반기 연구결과)되었습니다.

### 참고문헌

1. Masaki, I., Method and Apparatus for Manipulator Welding Apparatus with Vision Correction for Workpiece Sensing, United States Patent Vol. 4, pp. 680~696, April 19, 1983.

2. Abidi, M. A., Gonzalez, R. C., The use of multisensor data for robotic applications, IEEE Trans. Robot. Automation, vol. 6, pp. 159~177, 1990.
3. Tani, K., Abe, M. and Ohno, T., High Precision Manipulator with Visual Sense. Proceedings 7th International Symposium on Industrial Robots. Tokyo, Japan, pp. 19~21, October, 1977.
4. Tsai, R.Y., Synopsis of recent progress on camera calibration for 3D machine vision, The Robotics Review, Cambridge: MIT Press., pp. 146~159, 1989.
5. Majumdar, J., Seethalakshmy A.G., "A CAD Model Based System for Object Recognition," Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol. 18 No. 4, pp. 351~365, 1997.
6. Bacakoglu, H., Kamel, M., "An Optimized Two-Step Camera Calibration Method," Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1347~1352, April 1997.
7. 박경택, "로봇트 비전을 이용한 대상물체의 위치 결정에 관한 연구," 「한국정밀공학회지」, 제13권, 제9호, 104~113, 1996. 9.
8. Morton, H., Junkins, J. and Blanton, J., Analytical Solutions for Euler Parameters, Celestial Mechanics, 10, Dordrecht-Holland, D. Reidal Publishing Company, pp. 287~301, 1974.
9. Whittaker, E.T, Analytical Dynamics of Particles and Rigid Bodies, Cambridge Univ. Press, pp. 2~16(Reprint), 1965.
10. 장완식 · 장종근 · 신광수, "평면상에 있는 물체 위치 결정을 위한 컴퓨터 비전시스템의 응용," 「한국공작기계학회지」, 제7권, 제2호, pp. 62~68, 1998. 4.
11. Junkins, J. L., An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems, Sijthoff and Noordhoff International Publishers, Alphen Aan Den Rijn, pp. 29~33, 1978.