

비전 제어시스템에 사용된 카메라의 최적개수에 대한 실험적 연구

장완식*, 김경석⁺, 김기영⁺⁺, 안힘찬⁺⁺
(논문접수일 2003. 7. 14, 심사완료일 2003. 9. 5)

An Experimental Study on the Optimal Number of Cameras used for Vision Control System

Wan-Shik Jang*, Kyoung-Suk Kim⁺, Ki-Young Kim⁺⁺, Him-Chan Ahn⁺⁺

Abstract

The vision system model used for this study involves the six parameters that permits a kind of adaptability in that relationship between the camera space location of manipulable visual cues and the vector of robot joint coordinates is estimated in real time. Also this vision control method requires the number of cameras to transform 2-D camera plane from 3-D physical space, and be used irrespective of location of cameras, if visual cues are displayed in the same camera plane. Thus, this study is to investigate the optimal number of cameras used for the developed vision control system according to the change of the number of cameras. This study is processed in the two ways : a) effectiveness of vision system model b) optimal number of cameras. These results show the evidence of the adaptability of the developed vision control method using the optimal number of cameras.

Key Words : Vision System Model, Parameter Estimation, Robot Joint Angle Estimation, Optimal Number of Cameras

1. 서론

1980년대 후반부터 화상처리 등의 센서 기술을 로봇에 적용시켜 로봇의 위치 및 자세를 제어함으로써 사람을 대

신하여 로봇을 산업현장에 배치하고자 하는 노력들이 시도되기 시작했다.

그러나 로봇 비전 시스템을 로봇에 적용시키기 위해서 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 들어 많은 연구가 이

* 주저자, 조선대학교 기계공학과 (wsjang@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

+ 조선대학교 기계공학과

++ 조선대 대학원 기계공학과

루어졌고 상당한 성과를 이루었다. Tsai⁽²⁾는 정확하게 위치가 알려진 cue를 이용하여 카메라를 보정하고 3차원 직교 좌표계를 2차원 영상 좌표계로 일치시켜 매개변수를 추정하는 방법을 연구하였고 Bacakoglu와 Kamel⁽³⁾은 카메라 내부의 특성(내부 매개변수)과 특정 기준 좌표계에 대한 카메라의 위치와 방향(외부 매개변수)를 결정하는 카메라 보정 알고리즘을 개발하였다. 그리고 Yoshihiro TODA⁽⁴⁾ 등은 카메라와 로봇의 베이스 좌표계 사이의 상대적인 위치 변화에도 보정을 필요로 하지 않는 퍼지 논리(fuzzy logic)를 적용한 보정방법을 발표하였다.

그러나 이들의 연구⁽²⁻⁴⁾는 ‘추정되어진 매개변수들은 기준 좌표계와 카메라 사이의 변화에 더 이상 유효하지 않는다’라는 한계성과 제어 방법이 복잡하다는 단점이 있다.

위와 같은 비전 시스템 보정방법들의 단점을 보완하기 위해 Skaar⁽⁵⁻⁷⁾와 Jang^(8,9) 등은 변화하는 카메라 위치와 방향에 대한 보정 없이 사용할 수 있는 매개변수 추정모델과 회전각 추정모델로 대표되는 새로운 형태의 비전 시스템 모델을 개발하였다.

본 연구는 Jang 등이 제안한 비전 시스템 모델의 카메라 개수에 따른 효율성과 최적의 카메라 개수에서의 카메라 위치에 따른 효율성을 조사하기 위한 것이다. 제안된 매개변수 추정모델과 회전각 추정모델은 모두 비선형 방정식의 형태를 가지며, 특히 회전각 추정모델의 경우에는 많은 제한 조건을 포함한다. 따라서 카메라의 개수가 증가함에 따라서 비전 시스템 추정모델을 통한 위치 결정에서 오차율이 줄어든다고 보기는 힘들다.

이를 확인하기 위해서 동일한 조건(동일한 로봇의 경로를 사용)에서 카메라의 수만을 1개에서부터 증가시키면서 매개변수 추정모델에 의해 추정되는 각 카메라에 대한 매개변수를 확인하고, 매개변수가 확인된 카메라의 개수를 증가시키면서 로봇의 위치를 목표지점에 접근시킬 때 목표지점과 로봇의 이동지점간의 오차를 조사함으로써 최적의 카메라 개수를 실험적으로 연구한다.

2. 시스템 모델 개발

2.1 매니플레이터 정기구학 모델

Fig.1은 본 연구에서 사용한 4축 SCORBOT 로봇의 Denavit-Hartenberg의 관례에 따른 관절 좌표계를 보여주며, Table 1은 이 로봇의 각 링크에 대한 4개의 Denavit-Hartenberg 인자값을 보여준다⁽¹⁰⁾.

Fig. 1과 Table 1을 이용하여 베이스 좌표계에 대한 마지

막 링크까지의 변환행렬 0_4T 는 식 (1)과 같다.

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & p_{orgx} \\ l_y & m_y & n_y & p_{orgy} \\ l_z & m_z & n_z & p_{orgz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

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

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

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

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

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

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

$$n_x = -\sin \theta_1,$$

$$n_y = \cos \theta_1,$$

$$n_z = 0$$

$$p_{orgx} = a_3 \cos \theta_1 \cos (\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + a_1 \cos \theta_1 - \sin \theta_1 (d_2 + d_3),$$

$$p_{orgy} = a_3 \sin \theta_1 \cos (\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos \theta_2 \sin \theta_1 + a_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 (d_2 + d_3),$$

Table 1 Link parameters of SCORBOT robot

axis	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	358.5	θ_1
2	-90	50	-135.3	θ_2
3	0	300	100	θ_3
4	0	250	0	θ_4

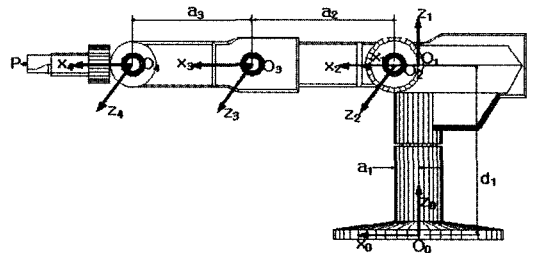


Fig. 1 SCORBOT-ER VII robot and link parameters

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

여기서, $s = \sin$, $c = \cos$,

$$c_{ijk} = \cos(i+j+k), \quad s_{ijk} = \sin(i+j+k)$$

마지막 관절 좌표계의 원점 O_4 에서 말단 공구계의 끝점 P 까지의 위치벡터는 식 (2)와 같다.

$${}^4P = [p_x \ p_y \ p_z \ 1]^T \quad (2)$$

이리하여 로봇 베이스 좌표계에 대한 말단 공구계의 끝점 P 의 위치벡터는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ 1 \end{bmatrix} = {}_0^4 T {}^4P \quad (3)$$

식 (3)에 식 (1)과 (2)를 대입하여 계산하면 끝점 P 에 대한 위치벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_x &= c_1 c_{234} p_x - c_1 s_{234} p_y - s_1 p_z + a_3 c_1 c_{23} \\ &\quad + a_2 c_1 c_2 + a_1 c_1 - (d_2 + d_3) s_1 \\ f_y &= s_1 c_{234} p_x - s_1 s_{234} p_y + c_1 p_z + a_3 s_1 c_{23} \\ &\quad + a_2 c_2 s_1 + a_1 s_1 + (d_2 + d_3) c_1 \\ f_z &= -s_{234} p_x - c_{234} p_y - a_3 s_{23} - a_2 s_2 \\ &\quad + d_1 + a_1 c_1 - (d_2 + d_3) s_1 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $s = \sin$, $c = \cos$,

$$c_{ijk} = \cos(i+j+k), \quad s_{ijk} = \sin(i+j+k)$$

2.2 비전 시스템 모델

비전 시스템 모델은 6개의 불확실한 시각 매개변수를 이용하여 3차원 공간상의 물체의 위치를 2차원의 카메라 공간으로 변환하여 나타내는 관계식은 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

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

여기서,

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

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

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

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

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

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

이리하여 식 (5)를 정리하면 비전 시스템 모델에 대한 최종식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} X_m &= (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2) f_x + 2(C_2 C_3 + C_1 C_4) f_y \\ &\quad + 2(C_2 C_4 - C_1 C_3) f_z + C_5 \\ Y_m &= 2(C_2 C_3 - C_1 C_4) f_x + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2) f_y \\ &\quad + 2(C_3 C_4 + C_1 C_2) f_z + C_6 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, X_m 과 Y_m 은 6개의 시각 매개변수 ($C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$)가 알려졌다고 가정할 때, 3차원 실제 공간에서 정의된 물체의 위치벡터를 매개변수에 의해서 카메라 좌표계로 변환한 값을 나타낸다. 또한, 처음 4개 매개변수 ($C_1 \sim C_4$)는 카메라의 초점거리 및 방향의 변화성을 설명하는 카메라 내부 매개변수를 나타내고, 마지막 2개 매개변수 ($C_5 \sim C_6$)는 카메라에 대한 로봇의 위치와 방향의 불확실성을 설명하는 카메라 외부 매개변수를 나타낸다.

2.3 매개변수 추정 모델

비전 시스템 모델에서 오일러 매개변수를 포함하는 6개의 시각 매개변수는 3차원의 실제 좌표계를 2차원의 카메라 좌표계로 변환하는데 매우 중요한 인자이다.

시험 모형 또는 로봇 말단의 큐의 위치벡터를 2차원 카메라 좌표계로 변환하는데 사용되는 6개의 시각 매개변수는 아래 주어진 성능지수 $J(C)$ 를 최소화시킴으로써 구해진다.

$$J(C) = \sum_{i=1}^n \{ [X_m^i - X_c^i]^2 + [Y_m^i - Y_c^i]^2 \} \quad (7)$$

여기서, $i(i=1, 2, \dots, n)$ 는 측정된 데이터의 개수 (측정 단계 수), X_c^i 와 Y_c^i 는 얻어진 실제 큐에 대한 화상 처리 값, X_m^i 과 Y_m^i 는 6개 매개변수 C_k 를 포함한 비전 시스템 모델값을 나타낸다.

위 식에 매개변수 C_k 를 계산하기 위해 Newton-Raphson 공식을 적용하면

$$C_{k,n+1} = C_{k,n} - \left[\frac{\partial g(C_{k,n})}{\partial C_k} \right]^{-1} g(C_{k,n})$$

$$= C_{k,n} + \Delta C \quad (8)$$

이 때, 식 (8)의 ΔC 는 일반적으로 정행렬이 아니므로 ΔC 에 대한 역행렬을 구하기 위해서 Junkins의 최소 노름해(minimum norm solution)방법⁽¹¹⁾을 다음과 같이 적용하였다.

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

와 같이 된다.

여기서, $2n \times 1$ 요소를 갖는 유수벡터(residual vector) R 은 다음과 같다.

$$R = \begin{bmatrix} X_m^i - X_c^i \\ Y_m^i - Y_c^i \end{bmatrix} \quad (10)$$

또한, $2n \times 6$ 요소를 갖는 행렬 A 는 다음 식 (11)과 같이 주어진다.

$$A_{2i-1, k} = \partial X_m^i / \partial C_k,$$

$$A_{2i, k} = \partial Y_m^i / \partial C_k \quad (11)$$

여기서, $i (= 1, 2, \dots, n)$ 는 각 단계에 대한 측정된 데이터의 총 수이고, $k (= 1, 2, \dots, 6)$ 는 매개변수의 수이다. ,

2.4 로봇회전각 추정기법

매개변수 추정절차에 따라서 각 카메라에 대한 매개변수 C_k 가 얻어지면, 이를 사용하여 목표점에 대한 매니플레이터의 회전각($\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4$) 추정이 필요하게 된다. 회전각 추정은 아래 주어진 성능지수 $J_a(\theta)$ 를 최소화시키는 방법에 의해서 얻어진다.

$$J_a(\theta) = \sum_{i=1}^N [X_m^i(f_x(\theta), f_y(\theta), f_z(\theta); C_k^i) - X_c^i]^2$$

$$+ [Y_m^i(f_x(\theta), f_y(\theta), f_z(\theta); C_k^i) - Y_c^i]^2 \quad (12)$$

여기서, $N (= 1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 은 카메라의 수, $k (= 1, 2, \dots, 6)$ 는 매개변수의 수를 나타낸다. 또한 X_c^i 와 Y_c^i 는 목표점(target point)의 i 번째 카메라에 대한 카메라 좌표값

을 나타내며, X_m^i 와 Y_m^i 는 추정된 매개변수 C_k 에 근거한 i 번째 카메라에 대해 비전 시스템 모델값을 나타낸다.

식 (12)에 주어진 성능지수 $J_a(\theta)$ 를 최소화하기 위하여 앞 절에 설명되어진 Newton-Raphson 방법을 이용한 매개변수 추정 방법을 회전각 추정 방법에 적용하면 다음과 같다.

$$\theta_{k,n+1} = \theta_{k,n} + \Delta \theta \quad (13)$$

식 (13)의 회전각 수정벡터 $\Delta \theta$ 는

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

이다. 여기서, $2i \times 4$ 의 요소를 갖는 자코비안 행렬 B 는 식 (15)에 주어진다.

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^i}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial Y_m^i}{\partial \theta_1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

또한, $2i \times 1$ 의 요소를 갖는 유수벡터 행렬 R 은 식 (16)와 같다.

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

이와 같이 추정된 로봇 회전각은 여기서 사용된 카메라 개수 i 는 최소한 2개 이상을 사용하여야만 3차원과 2차원 사이의 관계설정을 주어진 매개 비전 시스템 모델의 변수로서 설명할 수 있다. 그러나 카메라 개수가 계속적으로 증가한다고 해서 구하고자 하는 회전각의 오차값을 감소시킬 수 없다. 그 이유는 카메라 개수가 많을수록 회전각을 구하는데 필요한 제한 조건이 증가하기 때문이다 이리하여 아래 실험을 통하여 본 연구에서 사용된 비전 시스템 모델의 최적의 카메라 개수를 확인하고자 한다. 또한, 구해진 로봇 회전각으로 로봇을 구동하여 로봇이 목표지점에 도달하도록 한다. 이때 로봇이 도달한 목표지점의 위치는 여기서 구한 회전각을 식 (4)에 주어진 정기구학 모델에 대입하면 구해진다.

3. 실험

본 실험은 제안된 비전시스템 모델에 사용되는 최적의 카메라 개수를 결정하기 위하여 행하여졌다.

3.1 실험 장치

실험 장치는 비전시스템, 로봇시스템 및 시험모형으로 구성되어, Fig. 2는 실험장치의 개략도를 보여준다.

3.1.1 비전 시스템

본 실험에서 사용된 비전시스템은 CCD 카메라, 비전보드 및 host pc로 구분된다. CCD 카메라는 AVENIR TV 줌 렌즈를 부착한 동경 전자공업(주)의 제품을 사용하였고, 화상처리 비전보드는 삼성전자 흑백 MVB-03, host pc는 삼성 펜티엄 II pc(400MHZ)를 사용하였다.

3.1.2 로봇 시스템

로봇시스템은 ESHED ROBOTEC사의 scorbot-ER II 을 사용하였다.

3.1.3 시험 모형

전체적인 모형의 형상을 Fig. 3에 보였으며 $30 \times 30 \times$

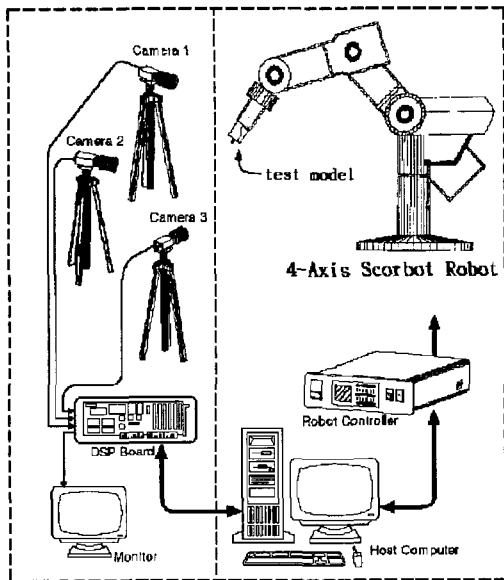


Fig. 2 Experimental Set-up

43mm인 사각기둥과 지름이 8.4mm이고 높이가 6.3mm인 원기둥을 조합하여 구성하였다.

Fig. 2에서는 카메라를 3개로 보여주었지만 실험에서는 카메라의 개수를 1대에서부터 6대까지 증가시키며 각각에 대하여 동일하게 적용하였다. 본 실험에서는 카메라를 Fig. 4과 같이 배치하였으며 각각의 실험을 위한 카메라의 선택은 Table 2에서 보여준다.

또한 Table 2에서 보여준 각 경우를 로봇의 위치제어에 적용하여 최적의 카메라 개수를 결정하기 위하여 Fig. 5와 같은 이동궤적을 따라 로봇이 목표지점 (target point)에 도달하도록 설정하였다. 로봇의 이동궤적을 27단계로 임의로 나누는 것은 로봇 이동시 충분한 비전데이터를 얻어서 실험의 효율성을 높이기 위해서이다.

3.2 결과

3.2.1 비전 시스템 모델의 적합성

본 장에서는 실험에 사용될 각각의 카메라에 대한 매개변

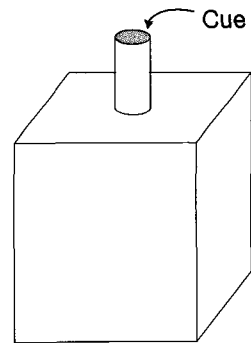


Fig. 3 Test model for experiment

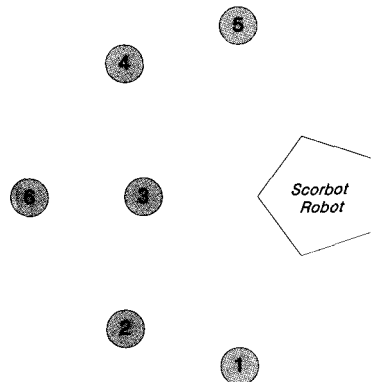


Fig. 4 Arrangement of camera location

수 추정모델의 적합성을 보이고자 한다.

실험을 위하여 로봇이 Fig. 5와 같이 설정된 이동 궤적을 따라 운동하는 동안 각각의 카메라를 통해 얻어진 비전 데이터를 식 (8)~식 (11)에 적용하여 각각의 카메라에 대한 6개의 시각 매개변수 ($C_1 \sim C_6$)를 계산하고 계산된 시각 매개변수를 식 (6)에 보여준 비전 시스템 모델에 적용하여 비전 모델값을 구한다.

Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11은 각각 카메라1, 카메라2, 카메라3, 카메라4, 카메라5, 카메라6에 대해 실제 비전 데이터와 비전 모델값을 비교하여 나타낸 것이다. 각 그림의 (a)는 실제 비전 데이터와 비전 모델값의 차이를 카메라의 이미지 평면과 동일한 스케일(scale)상에 나타낸 것이며, 부호 \circ 은 실제로 매니플레이터를 이동시

키며 얻은 비전 데이터이고 부호 $+$ 은 매개변수 추정모델을 통해 추정되어진 비전 모델값이다. 그리고 각 그림의 (b)는 오차를 수치적으로 나타낸 것이다.

위 그림들에서 실제 비전 데이터와 비전 시스템 모델의 추정값은 모든 카메라에서 ± 0.5 화소이내의 오차를 가지고 일치하고 있음을 알 수 있으며, 결과적으로 사용되는 모든 카메라에 대해서 매개변수 추정모델이 적합함을 알 수 있다.

3.2.2 카메라 개수에 따른 효율성

매개변수 추정모델 실험을 통하여 그 타당성이 확인된 6대의 카메라를 Table 2에 따라 카메라를 선택하고 각 경우에 대해 Fig. 5에서 보여준 로봇 이동궤적을 사용하여 로봇 위치제어 실험을 수행하였다. 이때 로봇을 구동하기 위해

Table 2 Selection of cameras

Case	Selected camera number
Case #1	3
Case #2	2, 4
Case #3	1, 3, 5
Case #4	1, 2, 4, 5
Case #5	1, 2, 3, 4, 5
Case #6	1, 2, 3, 4, 5, 6

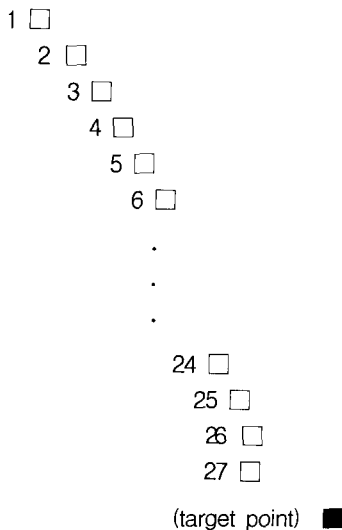
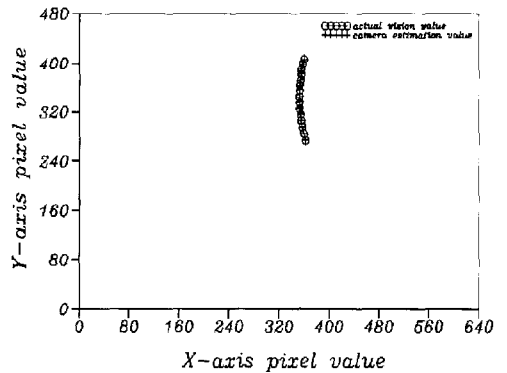
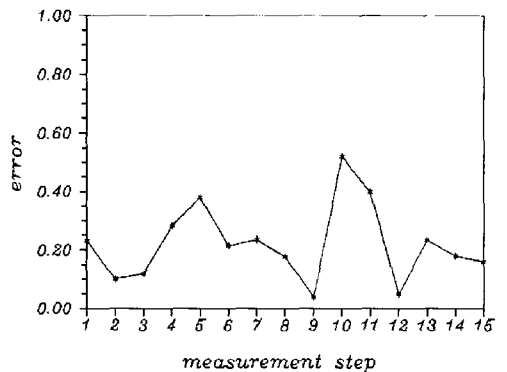


Fig. 5 Robot's trajectory for position control

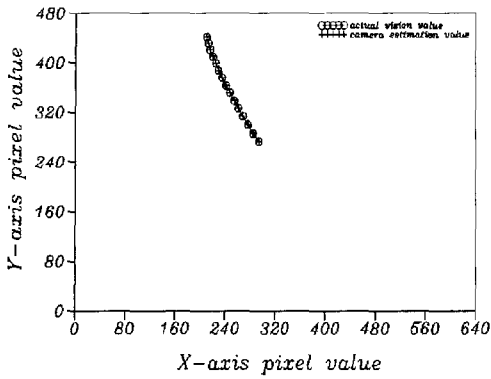


(a) comparison

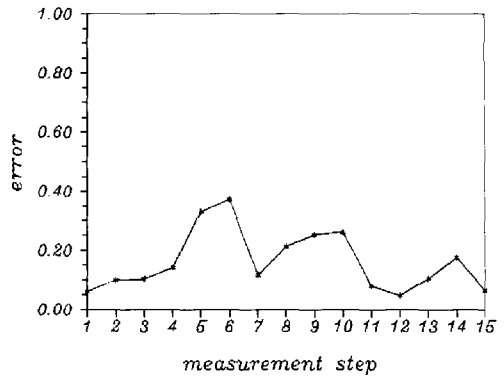


(b) error

Fig. 6 Comparison of the measured vision data and estimated model values(case #1)

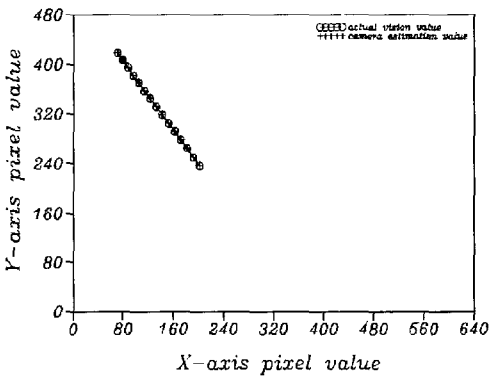


(a) comparison

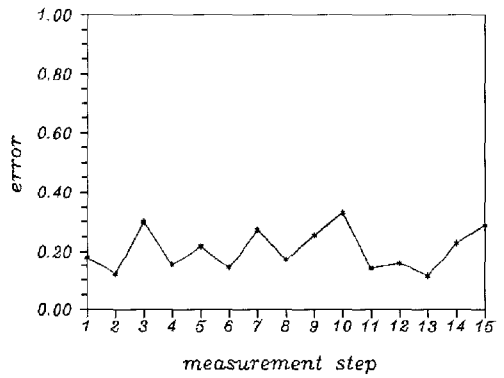


(b) error

Fig. 7 Comparison of the measured vision data and estimated model values(case #2)

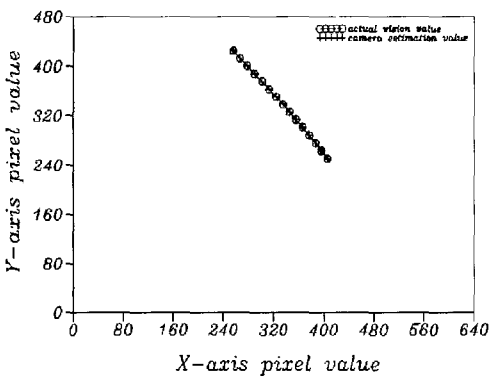


(a) comparison

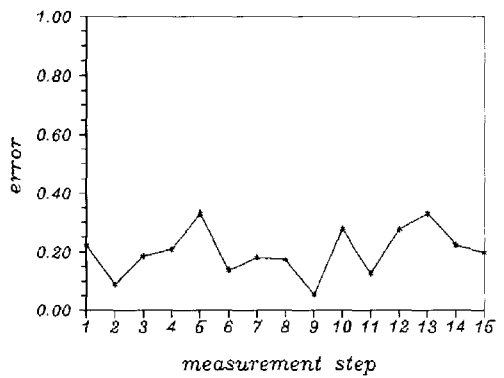


(b) error

Fig. 8 Comparison of the measured vision data and estimated model values(case #3)

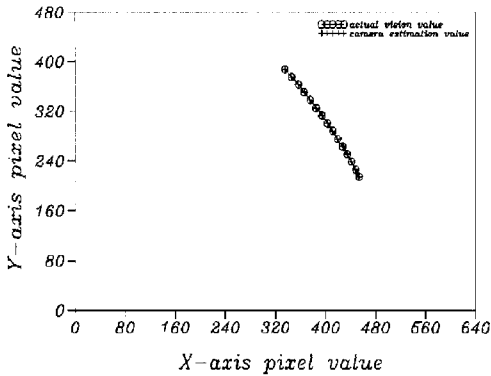


(a) comparison

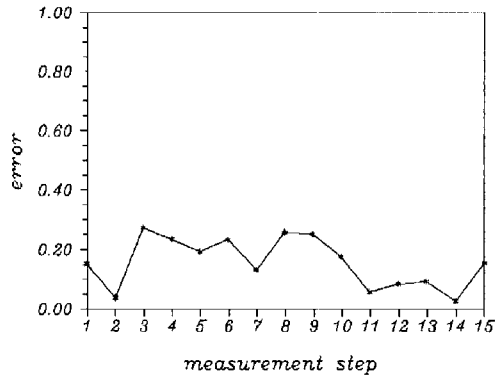


(b) error

Fig. 9 Comparison of the measured vision data and estimated model values(case #4)

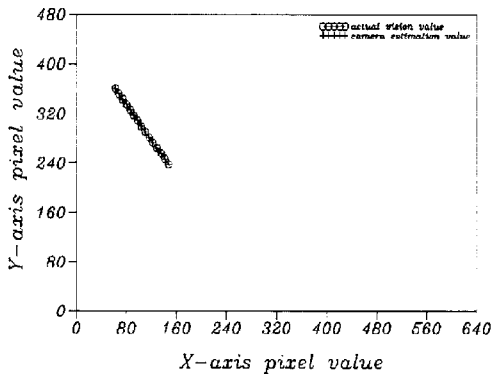


(a) comparison

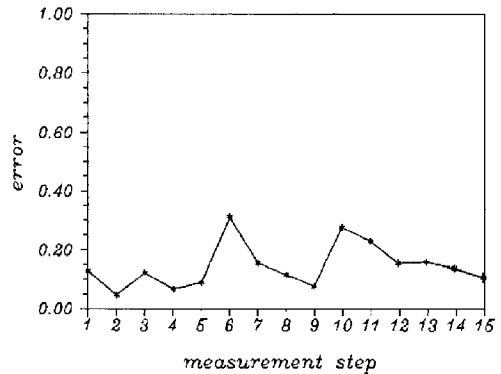


(b) error

Fig. 10 Comparison of the measured vision data and estimated model values(case #5)



(a)



(b)

Fig. 11 Comparison of the measured vision data and estimated model values(case #6)

필요한 회전각은 앞서 계산된 각 카메라에 대한 추정된 6개 매개변수를 근거로 식 (13)~식 (16)을 사용하여 계산한다. 사용된 카메라 개수에 따른 오차값을 비교함으로써 제시된 비전 시스템 모델에 사용되는 최적의 카메라 개수가 몇 개인지를 확인하였다.

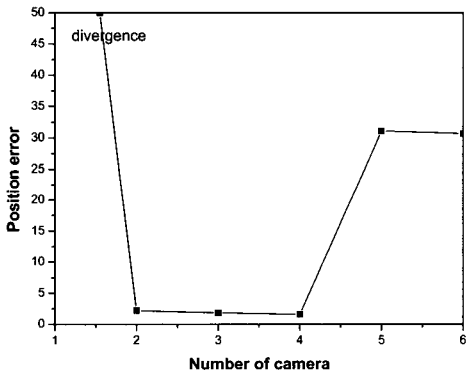
Table 3은 각 경우에 대해서 로봇이 목표지점에 도착했을 때 로봇 실제 위치값과 오차를 나타낸다. 1대의 카메라를 사용하여 점 배치 작업을 수행한 경우 수렴되지 않고 발산되어서 그 결과를 그래프로 나타내지 못했다. Table 3과 Fig. 12에서 보여준 것 같이 2대의 카메라를 사용했을 때 오차값은 약 2.2 mm, 3대의 카메라를 사용 시 오차값은 약 1.8 mm이고, 4대의 카메라를 사용했을 때는 약 1.5 mm로서 가장 높은 위치 정밀도를 보여준다. 그러나 5대 이상의

카메라를 사용했을 때는 약 30 mm이상의 오차값을 보여준다.

위와 같은 실험결과를 종합하면 1대의 카메라를 사용하여서는 비전 시스템 추정모델을 적용할 수 없고, 2~4대의 카메라를 사용할 때 2mm이내의 정확도를 얻을 수 있으며, 5대 이상의 카메라에서는 오차가 많이 증가하여 사용하기에 적당하지 않다는 것을 알 수 있다. 또한, 최적의 카메라 개수로 결정된 2~4대 카메라 사용 환경을 실험결과를 토대로 분류하면, 2대의 카메라는 낮은 정밀도는 요구하면서 데이터 처리속도를 빠르게 요하는 환경에서 사용하기에 적합하고, 3대의 카메라는 적절한 정밀도와 데이터 처리속도를 요하는 곳에 알맞으며, 4대의 카메라는 매우 세밀한 정확도를 요하는 곳에 사용하기 알맞다.

Table 3 Error values between actual coordinate value and estimated coordinated value

Numbers	Fx	Fy	Fz	Error
Actual value	775.787	86.110	-72.662	
1 Estimation value	?	?	?	divergence
2 Estimation value	775.992	84.641	-69.170	2.190335
3 Estimation value	775.539	84.535	-69.903	1.839720
4 Estimation value	775.854	85.534	-69.981	1.583696
5 Estimation value	753.792	80.892	-23.826	31.069645
6 Estimation value	760.020	91.742	-22.253	30.667109

**Fig. 12 Position errors in x, y, z-coordinate**

4. 결론

본 논문은 제시된 비전 시스템 모델에 사용되는 최적의 카메라 개수를 조사하기 위해 동일한 환경에서 카메라 개수만을 변화시켜 로봇을 목적지로 이동하는 위치제어 실험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 카메라가 1대일 때는 수렴하지 않고 발산한다. 따라서 1개의 카메라로는 비전 시스템 추정모델을 적용할 수 없다.
- (2) 2~4대의 카메라를 사용했을 때는 2mm이하의 오차로 로봇 위치제어를 수행하였으므로 이 경우가 최적의 카

메라 개수이다.

- ① 2대의 카메라는 데이터 처리속도를 빠르게 요하는 환경에서 사용하기에 적합하다.
 - ② 3대의 카메라는 적절한 데이터 처리속도와 정밀도를 요하는 일반적인 환경에서 사용하기에 적합하다.
 - ③ 4대의 카메라는 고정밀도를 요하는 환경에서 사용하기에 적합하다.
- (3) 5대 이상의 카메라를 사용하였을 때는 오차가 30mm이상으로 커져 사용하기에 부적합하다.

후 기

본 논문은 2003년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음 (본 연구에 사용된 일부 연구기자재는 한국 과학재단 목적 기초 연구 (R05-2000-000 -00320-0(2002)) 지원으로 구입한 장비를 사용하였음).

참 고 문 헌

- (1) Bales, J., and Barker, L., 1981, "Marking Parts to Aid Robot Vision", *NASA Technical Paper 1819*, April.
- (2) Tsai, R. Y., 1989, "Synopsis of recent progress on camera calibration for 3D machine vision", *The Robotics Review*, MIT Press, Cambridge, pp. 146 ~ 159.
- (3) Bacakoglu, H., and Kamel, M., 1997, "An Optimized Two-Step Camera Calibration Method", *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April, pp. 1347 ~ 1352.
- (4) Toda, Y., Konishi, Y., and Ishigaki, H., 1996, "Positioning-Control of Robot Manipulator Using Visual Sensor", *Int. Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, December, pp. 894 ~ 898.
- (5) Skaar, S. B., Brockman, H. W., and Hanson, R., 1987, "Camera-Space Manipulation", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 4, pp. 20 ~ 32.
- (6) Chen, W. Z., Korde, U. A., and Skaar, S. B., 1994, "Position

- Control Experiments Using Vision”, *Int. J. Robotics Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 199~208.
- (7) Emilio, J. G., and Skaar, S. B., 1996, “Efficient Camera-Space Manipulation using Moments”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April, pp. 3407~3412.
- (8) Jang, W. S., Jang, J. G., and Shin, K. S., 1998 “An Application of Computer Vision System for the Determination of Object Position in the Plane”, *KSMTE*, Vol. 7, No. 2, pp. 62~68.
- (9) Jang, W. S., Shin, K. S., and Ahn, B. C., 1998, “A Study on Rigid body Placement Task of based on Robot Vision System”, *KSPE*, Vol. 15, No. 11, pp. 100~108.
- (10) Jang, W. S., and Kim, S. O., 2001, *A Study on Effectiveness of Vision Control System Varying with the Number and Location of Camera*, thesis of master, Chosun University.
- (11) Junkins, J. L., 1978, *An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical System*, Sijthoff and Noordhoff International Publishers, Alphen Aan Den Rijn, pp. 29~33.