

로봇 비전 제어기법에 사용된 카메라의 최적 배치에 대한 실험적 연구

민관웅*, 장완식⁺

(논문접수일 2009. 05. 04, 심사완료일 2009. 11. 03)

An Experimental Study on the Optimal Arrangement of Cameras Used for the Robot's Vision Control Scheme

Kwan-Ung Min*, Wan-Shik Jang⁺

Abstract

The objective of this study is to investigate the optimal arrangement of cameras used for the robot's vision control scheme. The used robot's vision control scheme involves two estimation models, which are the parameter estimation and robot's joint angle estimation models. In order to perform this study, robot's working region is divided into three work spaces such as left, central and right spaces. Also, cameras are positioned on circular arcs with radius of 1.5m, 2.0m and 2.5m. Seven cameras are placed on each circular arc. For the experiment, nine cases of camera arrangement are selected in each robot's work space, and each case uses three cameras. Six parameters are estimated for each camera using the developed parameter estimation model in order to show the suitability of the vision system model in nine cases of each robot's work space. Finally, the robot's joint angles are estimated using the joint angle estimation model according to the arrangement of cameras for robot's point-position control. Thus, the effect of camera arrangement used for the robot's vision control scheme is shown for robot's point-position control experimentally.

Key Words : Arrangement of camera(카메라배치), Robot's vision control scheme(로봇 비전제어기법), Parameter estimation(매개변수 추정), Joint angle estimation(회전각 추정), Point-position control(점 위치제어)

* 조선대학교 대학원 기계공학과
+ 교신저자, 조선대 기계공학과 (wsjang@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

1. 서론

오늘날의 로봇은 하나의 작업을 되풀이하는 능력뿐만 아니라, 작업 사이클의 프로그램을 쉽게 변경할 수 있는 기능까지 요구된다.

최근에 컴퓨터 연산속도는 향상되고 소형화가 되면서 로봇발달을 촉진하여 인간의 오감(시각·청각·촉각·후각·미각)에 상응하는 기능을 가진 장치, 즉 센서가 로봇기술의 새로운 과제로서 대두되었다.

그 중 로봇 비전(Robot Vision)이란 앞에서 말한 인간의 오감 중에 시각에 해당하는 대표적인 비점측센서인 CCD 카메라를 이용해 2차원의 위치 데이터를 입력받아 로봇을 제어하는 장치를 말하는데 컴퓨터의 비약적 발전과 새로운 광학 센서 등의 개발에 힘입어 비전을 활용한 기술은 인간의 시각기능을 능가하는 수준으로 발전하고 제어하고자 하는 대상을 중심으로 주변 작업환경을 통합적으로 인지하여 처리함과 동시에 주변 작업환경의 변화에 따른 상황을 예측하여 처리할 수 있는 장점과 여러 제어알고리즘에의 안정된 이식성 때문에 로봇 비전 시스템의 연구는 더욱더 활발하게 진행되고 있다^(5,7).

그러나 비전 시스템을 로봇에 적용시키기 위해서는 해결해야 할 많은 문제들이 있는데 첫째로 방대한 데이터를 저장하기 위한 메모리의 확보와 메모리 손실에 따른 처리속도의 저하이고, 두 번째로는 로봇과 비전 시스템간의 효과적인 보정을 위해서 3차원 공간에서 움직이는 로봇의 위치를 2차원 카메라 좌표계로 매핑하기 위한 로봇 좌표계와 카메라 좌표계 상호간의 관계에 대한 정보가 정확해야 한다는 것이다^(3,8).

컴퓨터의 비약적인 발달로 메모리와 처리속도에 대한 문제를 상당수 해결되었으며, 로봇과 카메라 좌표계간의 보정 문제에 대해서도 많은 연구진에 의해 연구되고 있다.

Kelly⁽⁶⁾는 카메라를 로봇의 말단부에 부착하고 카메라 이미지 평면상의 특징점 오차를 사용하는 이미지 제어기반 알고리즘을 제시하였는데 제어입력이 로봇의 기구학적 특성이 포함되지 않는 단순한 구조를 갖는 특성이 있다.

Goncalves와 Pinto⁽⁴⁾는 Kelly⁽⁶⁾의 제어알고리즘을 확장시켜 로봇의 움직임에 따라 변화하는 카메라의 위치에 상관없이 제어 가능한 방법을 제안하였다.

따라서 본 연구에서는 카메라 위치, 방향 또는 내부 파라미터들이 카메라 보정 단계와 로봇 매니퓰레이션 단계 중에 변한다 하여도 사용가능한 로봇 비전 제어 기법을 적용하였다⁽⁹⁾. 이때 사용되는 카메라의 개수가 증가함에 따라서 비전 시스템 추정모델을 통한 위치 결정에서 오차율이 줄어든다

고 보기는 힘들다는 결론을 선행된 연구⁽⁹⁾에서 확인하였다. 선행된 연구결과에 따라서 3대의 카메라를 하나의 카메라 배치로 설정하여 로봇 작업영역에 따라서 카메라 배치가 로봇 비전 제어기법에 어떠한 영향을 미치는가를 실험적으로 조사 하였다.

2. 시스템 모델 개발

2.1 비전 시스템 모델

본 연구에서 사용된 비전 시스템 모델은 Eq. (1)과 같다^(9,10).

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

$$Y_m = 2(C_2C_3 - C_1C_4)f_x + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)f_y + 2(C_3C_4 + C_1C_2)f_z + C_6 \quad (1)$$

여기서, X_m 과 Y_m 은 6개의 시각 매개변수($C_1 \sim C_6$)가 알려졌다고 가정할 때, 3차원 실제 공간에서 정의된 물체의 위치벡터를 매개변수에 의해서 카메라 좌표계로 변환한 값을 나타내며, f_x, f_y 및 f_z 는 삼성 스카라형 4축 로봇의 정기구학 모델식이다. 또한, 매개변수($C_1 \sim C_4$)는 카메라의 자세의 변화성을 나타내고, 매개변수($C_5 \sim C_6$)는 카메라에 대한 시험 모형의 거리 또는 로봇 및 주변 환경의 불확실성을 나타낸다.

2.2 로봇 기구학 모델

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 삼성 SM7 4축 로봇의 기하

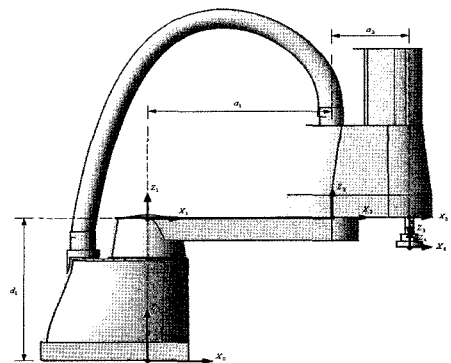


Fig. 1 Samsung SM7 4-axis robot

Table 1 Link parameters of Samsung SM7 4-axis robot

axis	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	388	θ_1
2	0	400	0	θ_2
3	180	250	d_3	0
4	-180	0	79	θ_4

학적 형상 및 각 관절 좌표계를 보여주며, 4×4 요소를 갖는 행렬 ${}^i_{i-1}T$ 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 나타낼 수 있다⁽¹⁾.

Table 1은 삼성 SM7 4축 로봇의 각 관절에 대한 4개의 Denavit-Hartenberg 링크 인자 값을 보여준다.

Table 1을 이용하여 베이스 좌표계에서 마지막 관절까지의 변환행렬 0_4T 는 Eq. (2)와 같다.

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & p_x \\ l_y & m_y & n_y & p_y \\ l_z & m_z & n_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} l_x &= \cos\theta_4 \cos(\theta_1 + \theta_2) - \sin\theta_4 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_y &= \cos\theta_4 \sin(\theta_1 + \theta_2) - \sin\theta_4 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ l_z &= 0 \\ m_x &= -\sin\theta_4 \cos(\theta_1 + \theta_2) - \cos\theta_4 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ m_y &= -\sin\theta_4 \sin(\theta_1 + \theta_2) - \cos\theta_4 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_z &= 0 \\ n_x &= 0 \\ n_y &= 0 \\ n_z &= 1 \\ p_x &= 250\cos(\theta_1 + \theta_2) + 400\cos\theta_1 \\ p_y &= 250\sin(\theta_1 + \theta_2) + 400\sin\theta_1 \\ p_z &= 388 - d_3 + 79 \end{aligned}$$

이며, 마지막 좌표계 원점에 부착된 큐의 끝점까지의 위치벡터는 다음과 같다.

$${}^4P = (P_x, P_y, P_z, 1)^T \quad (3)$$

따라서, 로봇 베이스 좌표계에 대한 큐의 끝점 P 까지의 위치벡터는 Eq. (4)와 같이 계산된다.

$$\bar{F} = {}^0_4T \cdot {}^4P \quad (4)$$

Eq. (4)를 베이스 좌표계에 대해 x, y, z 성분별로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_x &= \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_x - \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_y \\ &\quad + 250\cos(\theta_1 + \theta_2) + 400\cos\theta_1 \\ f_y &= \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_x + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_y \\ &\quad + 250\sin(\theta_1 + \theta_2) + 400\sin\theta_1 \\ f_z &= P_z + 388 - d_3 + 79 \end{aligned} \quad (5)$$

3. 추정 모델 개발

3.1 비전 시스템 모델의 매개변수 추정

비전 시스템 모델에 포함된 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.

$$J(C_k) = \sum_{i=1}^n \{ [X_m^i - X_c^i]^2 + [Y_m^i - Y_c^i]^2 \} \quad (6)$$

여기서, $i(i=1, 2, \dots, n)$ 는 측정된 데이터의 개수(이동 단계 수), X_c^i 와 Y_c^i 는 각 이동 단계에서 얻어진 실제 큐에 대한 비전데이터 값, X_m^i 과 Y_m^i 는 매개변수 C_k 를 포함한 비전 시스템 모델 값을 나타낸다.

Eq. (6)에서 매개변수 C_k 를 계산하기 위해 Newton-Raphson 공식을 적용하면

$$\begin{aligned} C_{k,n+1} &= C_{k,n} - \left[\frac{\partial g(C_{k,n})}{\partial C_k} \right]^{-1} g(C_{k,n}) \\ &= C_{k,n} + \Delta C \end{aligned} \quad (7)$$

이 때, Eq. (7)에서 ΔC 를 계산하는 경우 대부분 정방행렬이 아니므로 최소 노움해 또는 최소 이산해를 이용하여

역행렬을 구하면 ΔC 는 Eq. (8)과 같다^(9,10).

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

여기서, A행렬은 6개 시각매개변수 ($C_1 \sim C_6$)를 포함하는 $2n \times 6$ 자코비안 행렬을 나타내며, 가중행렬 W 는 단위행렬로 사용하였다.

3.2 로봇 회전각 추정

매개변수 추정절차에 따라서 각 카메라에 대한 매개변수 C_k 가 얻어지면, 이를 사용하여 목표점에 대한 매니퓰레이터의 회전각($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) 추정이 필요하게 된다. 회전각 추정은 아래 주어진 성능지수 $J_a(\theta)$ 를 최소화시키는 방법에 의해서 얻어진다.

$$J_a(\theta) = \sum_{q=1}^3 \{ [X_m^q(f_x(\theta), f_y(\theta), f_z(\theta); C_k^q) - X_t^q]^2 + [Y_m^q(f_x(\theta), f_y(\theta), f_z(\theta); C_k^q) - Y_t^q]^2 \} \quad (9)$$

여기서, $q(=1,2,3)$ 는 카메라의 수, $k(=1,2,\dots,6)$ 는 매개변수의 수를 나타낸다. 또한 X_t^q 와 Y_t^q 는 목표지점의 큐에 대한 q 번째 카메라의 좌표 값을 나타내며, X_m^q 와 Y_m^q 는 추정된 매개변수 C_k 에 근거한 q 번째 카메라에 대한 큐의 비전 시스템 모델 값을 나타낸다.

Eq. (9)에 주어진 성능지수 $J_a(\theta)$ 를 최소화하기 위하여 매개변수 추정 방법을 회전각 추정 방법에 적용하면 Eq. (10)과 같다.

$$\theta_{k,n+1} = \theta_{k,n} + \Delta\theta \quad (10)$$

Eq. (10)의 회전각 수정벡터 $\Delta\theta$ 는 Eq. (11)와 같이 된다^(9,10).

$$\Delta\theta = (B^T W B)^{-1} B^T W R \quad (11)$$

여기서, B행렬은 로봇 회전각 4개($\theta_1 \sim \theta_4$)를 포함하는 $2q \times 4$ 자코비안 행렬을 나타내며, 가중행렬 W 는 단위행렬로 사용하였다.

4. 실험

4.1 실험 장치

본 연구에서 사용한 실험 장치는 크게 비전 시스템, 로봇 시스템 및 PC로 크게 3부분으로 구분하였으며 실험 장치에 대한 사양은 Table 2에 나타내었고, 전체적인 구성도는 Fig. 2과 Fig. 3에 나타내었다.

Table 2 Specification of experimental apparatus

System	Parts	Specification
Vision System	CCD Camera	• XC-ES51(SONY)
		• AVENIR TV 줌 렌즈
		• 756(H)×485(V)의 유효 화소수
Vision System	Vision Board	• 흑백Meteor2-MC4 (MATROX)
		• 해상도 - 640(H)×480(V), 256
	Library	• Matorx Imaging Library 8.0DEV
Robot System	Robot	• SM7 Robot(삼성)
	Robot controller	• MMC-BDPO41PNB
PC	Main Board	• MB800V(산업용)
	CPU	• 2.8GHz
	RAM	• 256MB

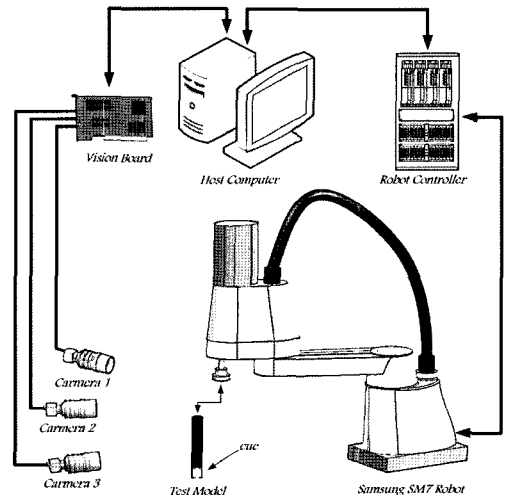


Fig. 2 Experiment set-up

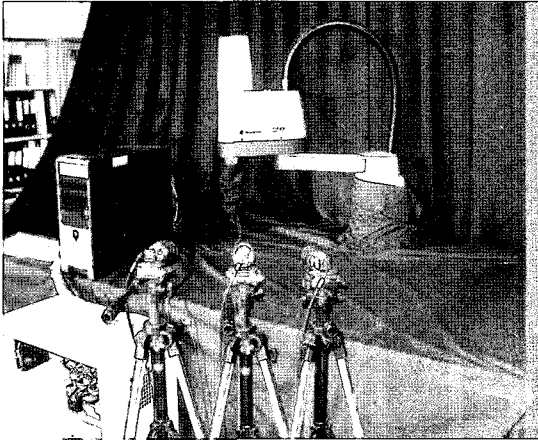


Fig. 3 Experimental apparatus

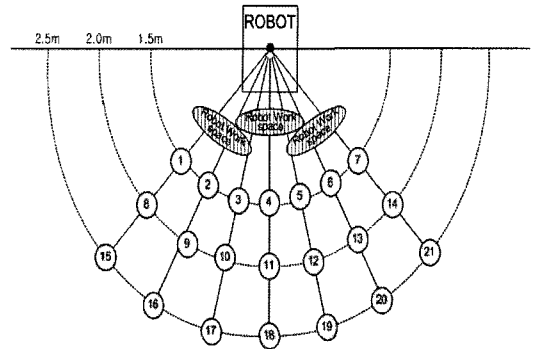


Fig. 4 Setting of camera position

Table 3 Cases of camera setting for the experiment

Work space	Camera arrangement #	Setting position number	Characteristic
Each Robot's work space (left, central, right)	case #1	1, 2, 3	1.5m 좌측 편중 배치
	case #2	3, 4, 5	1.5m 중앙 배치
	case #3	5, 6, 7	1.5m 우측 편중 배치
	case #4	8, 9, 10	2.0m 좌측 편중 배치
	case #5	10, 11, 12	2.0m 중앙 배치
	case #6	12, 13, 14	2.0m 우측 편중 배치
	case #7	15, 16, 17	2.5m 좌측 편중 배치
	case #8	17, 18, 19	2.5m 중앙 배치
	case #9	19, 20, 21	2.5m 우측 편중 배치

4.2 실험 방법

로봇 위치제어를 위해 사용한 비전 시스템 모델이 카메라의 배치 형태에 따라서 어떠한 영향을 미치는가를 보기 위해서 로봇의 작업 영역을 Fig. 4와 같이 좌측, 중앙 및 우측 등 3개 영역으로 구분하여 로봇 운동 궤적을 설정하였다.

카메라는 로봇 베이스로부터 3개의 동심원(1.5m, 2.0m, 2.5m)을 설정하여 21개의 지점에 설치하였다. 최종적으로 Table 3에서 보여준 것 같이 각각의 작업영역에 모든 상황을 설명할 수 있도록 9개 경우의 카메라 배치형태를 설정하였으며, 각 경우에 모두 3대의 카메라를 사용하였다.

4.3 실험 결과

4.3.1 각 카메라에 대한 비전 시스템 모델의 적합성

각 카메라에 대한 비전 시스템 모델의 적합성을 조사하기 위해 Fig. 4에 따라 카메라를 선택하고 각 카메라에 대하여 비전 데이터를 획득한 다음 매개변수 추정방법에 따라서 계산된 비전 시스템 모델 값과 실제 데이터 값을 비교하여 비전 시스템 모델의 적합성을 조사하였다. 이때 로봇의 이동궤적은 각각의 작업영역에서 19단계를 가지고 운동하도록 설정하였으며 카메라는 로봇 베이스로부터 반경 1.5m, 2.0m 및 2.5m의 원호 상에 각각 7대를 배치하여 실험하였다.

실험을 위하여 각각의 카메라를 통해 얻은 비전 데이터를 매개변수 추정모델에 적용하여 각각의 카메라에 대한 6개의 시각 매개변수($C_1 \sim C_6$)를 계산하고 계산된 시각 매개변수를 비전 시스템 모델에 적용하여 추정 모델 값을 구하여 카메라가 배치되어있는 원호상별로 비전 시스템 적합성을 조사하였다. 본 논문은 로봇이 각각 작업영역에서 운동할 때 각 원호상에 배치한 7대의 카메라에 대해서 실험을 행하였으며 각 원호 상에서 임의적으로 2대의 카메라에 대해서만 실험결과를 Fig. 5~Fig. 13에 나타내었다.

로봇의 작업영역에서 얻어진 결과를 보여주는 각 그림들에서 부호 \triangle 는 19단계를 걸쳐서 로봇이 이동하는 경로를 비전 시스템을 이용하여 측정된 데이터이고, 부호 \times 는 추정된 6개의 시각 매개변수를 가지고 계산된 추정 모델의 결과값이다.

(1) 로봇 좌측 작업영역

로봇 베이스로부터 1.5m떨어진 7개 카메라 각각에 대해 19단계를 갖는 로봇의 이동궤적과 Table 3의 1~2번 카메라

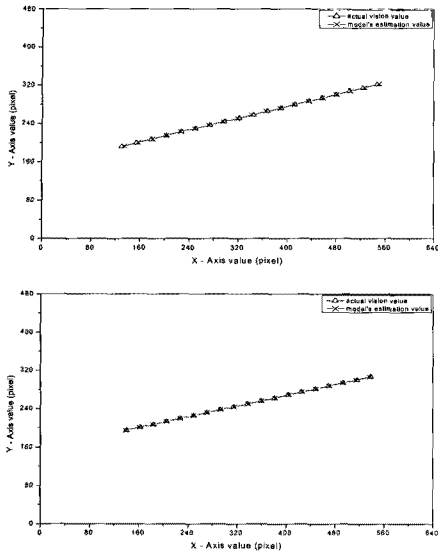


Fig. 5 Comparison between estimation values and actual values of camera 1,2 in robot's left work space

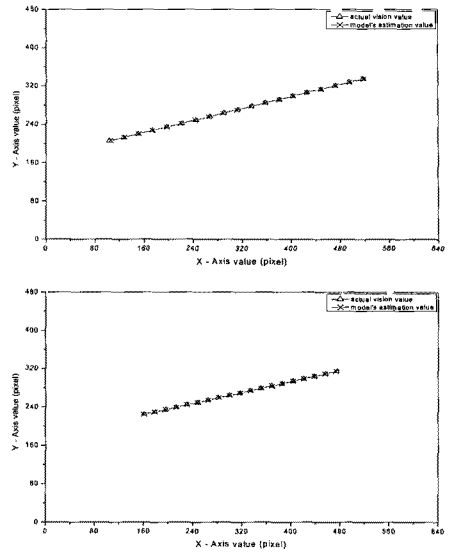


Fig. 7 Comparison between estimation values and actual values of camera 15, 16 in robot's left work space

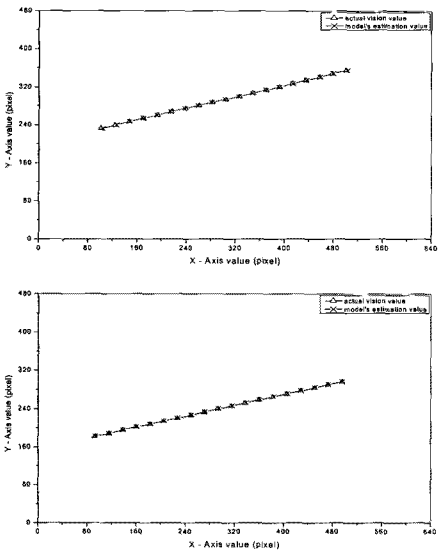


Fig. 6 Comparison between estimation values and actual values of camera 8,9 in robot's left work space

의 6개 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 Fig. 5에 제시하였다. 각 카메라에 따른 실제 값과 추정 모델 값의 오차는 $\pm 0.2\text{pixel} \sim \pm 5.0\text{pixel}$ 의 정밀도를 보여 주었다.

로봇 베이스로부터 2.0m 떨어진 각 카메라에 대해 설정된 로봇 이동궤적의 실제 비전 데이터와 Table 3의 8~9번 카메라의 6개 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하였다. 비교 결과는 Fig. 6에 제시하였으며, 각 카메라에 대하여 실제 값과 추정 모델 값이 $\pm 0.3\text{pixel} \sim \pm 5.0\text{pixel}$ 의 정밀도를 보여 주었다.

로봇 베이스로부터 2.5m 떨어진 각 카메라에 대해 로봇이 19단계에 걸쳐 이동할 때 획득된 실제 비전 데이터와 Table 3의 15~16번 카메라의 6개 시각 매개변수에 근거를 둔 추정 모델의 결과를 비교하여 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 7에서 보여준 것 같이 각 카메라에 대한 실제 값과 추정 모델 값의 오차는 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 3.7\text{pixel}$ 의 정밀도를 가지고 있다.

(2) 로봇 중앙 작업영역

로봇 베이스로부터 1.5m 떨어진 각 카메라에 대한 19단계 를 갖는 로봇 위치 시퀀스와 Table 3의 3~4번 카메라의 6개 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 Fig. 8에 제시하였으며, 각 카메라에 따른 실제 값과 추정 모델 값이 $\pm 0.8\text{pixel} \sim \pm 7.8\text{pixel}$ 의 정밀도를 보여 주었다.

로봇 베이스로부터 2.0m 떨어진 각 카메라에 대한 결과는 Table 3의 10~11번 카메라의 6개 시각 매개변수에 근거한 추정모델의 값을 각 카메라에 대하여 로봇이 19단계에 걸쳐서 이동할 때 획득된 실제 값과 비교하여 Fig. 9에 나타내었

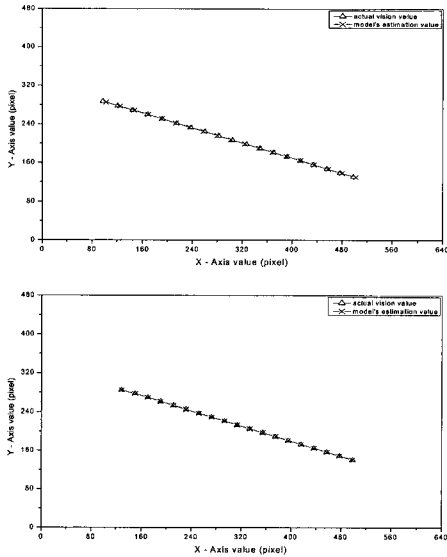


Fig. 8 Comparison between estimation values and actual values of camera 3, 4 in robot's central work space

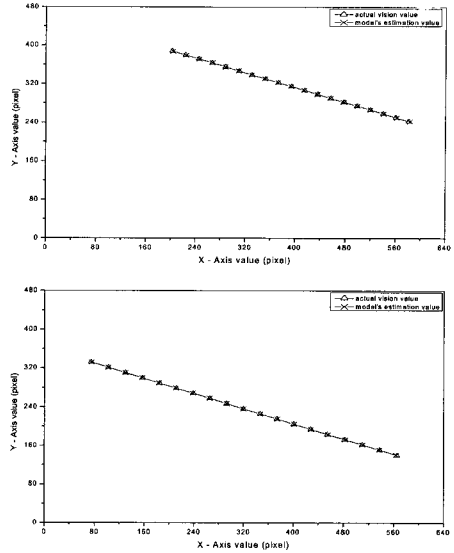


Fig. 10 Comparison between estimation values and actual values of camera 17, 18 in robot's central work space

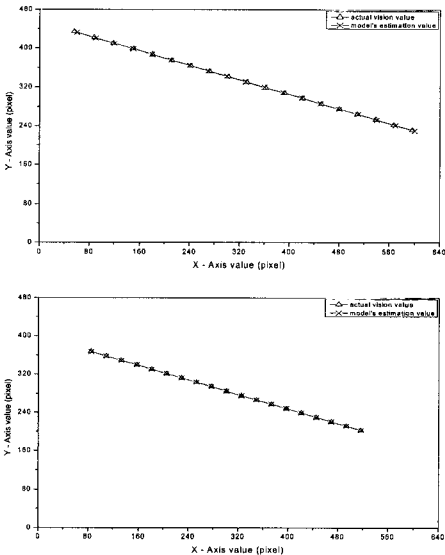


Fig. 9 Comparison between estimation values and actual values of camera 10, 11 in robot's central work space

으며, 각 카메라에 대한 실제 값과 추정 모델의 값이 $\pm 0.2\text{pixel}$ ~ $\pm 3.9\text{pixel}$ 의 정밀도를 보여 주었다.

로봇 베이스로부터 2.5m떨어진 각 카메라에 대하여 획득된 19단계의 로봇이동 궤적의 실제 비전 데이터와 Table 3의 17~18번 카메라의 6개의 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 Fig. 10에 제시하였으며, 각 카메라에 따른 실제 값과 추정 모델 값이 $\pm 0.1\text{pixel}$ ~ $\pm 3.4\text{pixel}$ 의 정밀도를 보여 주었다.

(3) 로봇 우측 작업영역

로봇 베이스로부터 1.5m떨어진 각 카메라에 대한 19단계를 갖는 로봇 위치 시퀀스와 Table 3의 5~6번 카메라의 6개의 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 Fig. 11에 제시하였다. $\pm 0.2\text{pixel}$ ~ $\pm 5.2\text{pixel}$ 의 정밀도를 가지고 각 카메라에 따른 실제 값과 추정 모델 값을 보여 주었다.

로봇 베이스로부터 2.0m떨어진 각 카메라에 대하여 로봇이 19단계로 이동할 때 비전 프로그램에 의해서 획득된 실제 데이터 값과 Table 3의 12~13번 카메라의 6개의 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 Fig. 12에 제시하였다. 각 카메라에 따른 실제 값과 추정 모델 값이 $\pm 0.1\text{pixel}$ ~ $\pm 3.6\text{pixel}$ 의 정밀도를 보여 주었다.

로봇 베이스로부터 2.5m떨어진 각 카메라에 대하여 Fig. 13에는 로봇이 19단계로 이동할 때의 비전 데이터와 Table 3

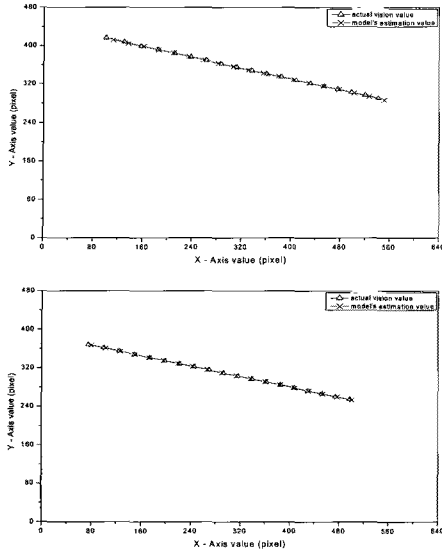


Fig. 11 Comparison between estimation values and actual values of camera 5, 6 in robot's right work space

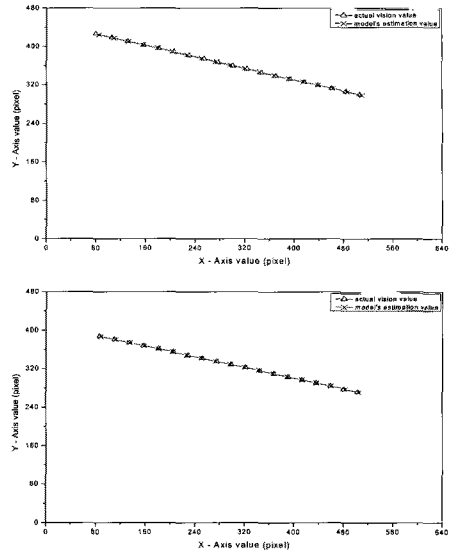


Fig. 13 Comparison between estimation values and actual values of camera 19, 20 in robot's right work space

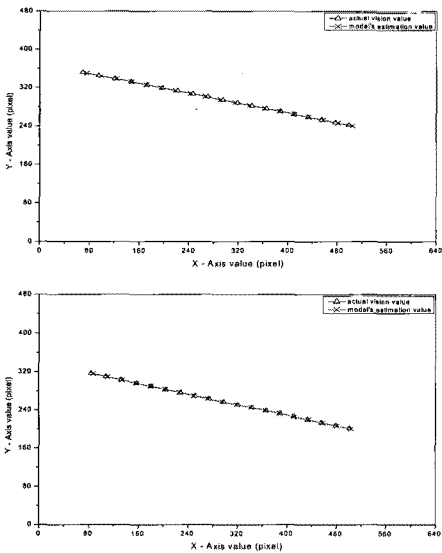


Fig. 12 Comparison between estimation values and actual values of camera 12, 13 in robot's right work space

의 19~20번 카메라의 6개의 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 제시하였고, $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 2.7\text{pixel}$

의 정밀도를 보여주었다.

Fig. 4에서 로봇의 각 작업 영역별 1.5m, 2.0m 및 2.5m의 반경에서 각7개의 카메라에 대해 실험하였으나 본 논문에서는 로봇의 각 작업영역에서 같은 반경에 배치한 2대의 카메라에 대해서 나타내었지만 다른 모든 카메라에 대해서도 거의 같은 결과를 보여 주었다.

결과적으로 로봇이 좌측, 중앙 그리고 우측 작업영역에서 이동할 때 비전 시스템 모델이 사용되는 모든 카메라에 대해서 적합함을 알 수 있다.

4.3.2 카메라 배치에 따른 로봇의 점 위치제어 실험 결과

4.3.1절에서는 로봇의 점 위치제어에서의 카메라 배치형태에 따른 비전 시스템 모델의 적합성을 보여주었다. 4.3.1절의 결과 값을 근거로 로봇 회전각 추정 모델을 이용하여 카메라 배치가 로봇 점 위치제어에 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig. 4와 Table 3과 같이 3개의 로봇 작업영역별 각 9개의 경우를 적용하여 로봇이 목표지점으로 이동하였을 때 목표지점과의 차이를 비교함으로써 카메라 배치가 로봇 위치제어에 미치는 영향을 확인 하였다.

Table 4, Table 6와 Table 8의 실제값(actual value)들은 Table 5, Table 7과 Table 9의 각각의 목표지점의 실제 값

(actual value)들을 모션컨트롤러의 내부명령어인 “get position()”을 이용하여 각 로봇의 엔코더(회전각)를 받아들여 알려진 값에 의해 $\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4$ 로 변환하여 나타내었다.

(1) 로봇 좌측작업영역

로봇 작업영역이 좌측일 때 로봇 베이스로부터 카메라가 각 1.5m, 2.0m, 2.5m떨어진 거리의 좌측, 중앙 및 우측에 카메라를 배치한 9개의 경우에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각을 실제 값과 비교하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Estimation values of each joint angle in robot's left work space

Camera Placement	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	d_3 (mm)	θ_4 (rad)	
Robot's left work space	case #1	7.024	-96.581	147.866	0.000
	case #2	7.245	-96.133	149.131	0.000
	case #3	7.179	-95.997	146.146	0.000
	case #4	7.176	-96.553	146.672	0.000
	case #5	7.059	-96.539	147.326	0.000
	case #6	7.530	-96.834	147.868	0.000
	case #7	7.152	-96.434	146.768	0.000
	case #8	7.235	-96.430	147.445	0.000
	case #9	7.412	-96.941	145.913	0.000
actual value	7.177	-96.459	147.500	0.000	

Table 5 Comparison between actual and estimated coordinate values in robot's left work space

Camera Placement	estimated value			average	
	Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	error(mm)	
Robot's left work space	case #1	398.928	-201.081	119.634	0.904214
	case #2	401.660	-199.508	118.369	1.373345
	case #3	402.012	-199.958	121.354	1.404833
	case #4	399.464	-200.256	120.828	0.588525
	case #5	399.237	-200.833	120.174	0.659894
	case #6	399.587	-197.563	119.632	1.442518
	case #7	400.021	-200.179	120.732	0.435161
	case #8	400.331	-199.597	120.055	0.302436
	case #9	398.713	-198.390	121.587	1.504882
actual value	400.000	-200.000	120.000		

Table 4의 회전각을 정기구학 모델에 적용하여 목표지점에 대한 추정모델의 좌표 값과 실제의 좌표 값을 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 보여준 것 같이 추정된 좌표 값과 실제 좌표 값이 $\pm 0.3\text{mm} \sim \pm 1.5\text{mm}$ 의 오차를 가지고 점 위치 제어를 수행하였고, 그에 대한 그래프를 Fig. 14에 나타내었다.

(2) 로봇 중앙작업영역

로봇 작업영역이 중앙일 때 로봇 베이스로부터 카메라가 각 1.5m, 2.0m, 2.5m떨어진 거리의 좌측, 중앙 및 우측에 카메라를 배치하여 9개의 경우에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각을 실제 값과 비교하여 Table 6에 나타내었다. Table 6의 회전각을 로봇 정기구학 모델에 적용하여 목표지

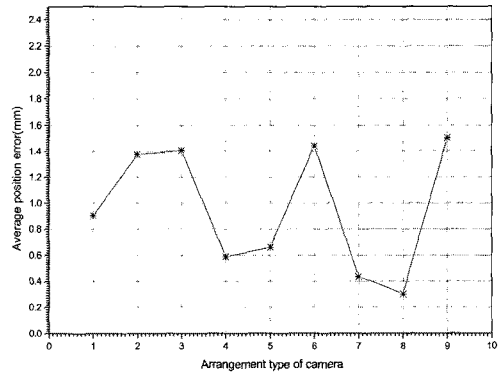


Fig. 14 Average position error according to the arrangement of camera in left work space

Table 6 Estimation values of each joint angle in robot's central work space

Camera Placement	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	d_3 (mm)	θ_4 (rad)	
Robot's central work space	case #1	-13.433	63.526	146.042	0.000
	case #2	-13.278	63.670	147.964	0.000
	case #3	-12.860	63.053	148.238	0.000
	case #4	-13.709	64.152	146.603	0.000
	case #5	-13.283	63.403	146.820	0.000
	case #6	-13.163	63.899	148.093	0.000
	case #7	-13.569	63.429	145.913	0.000
	case #8	-13.133	63.350	147.813	0.000
	case #9	-13.015	63.160	147.871	0.000
actual value	-13.234	63.256	147.500	0.0000	

점에 대한 추정모델의 좌표 값과 실제의 좌표 값을 Table 7에 보여주었다. 추정된 좌표 값과 실제 좌표 값이 Table 7에서 보여준 것같이 $\pm 0.4\text{mm} \sim \pm 1.8\text{mm}$ 의 오차를 가지고 점 위치제어를 수행하였으며, Fig. 15에 그래프로 나타내었다.

(3) 로봇 우측작업영역

로봇 작업영역이 우측일 때 로봇 베이스로부터 카메라를 좌측 및 중앙과 같이 카메라를 배치한 9개의 경우에서 목표 지점에 대해 추정된 로봇 회전각을 실제 값과 비교하여 Table 8에 나타내었고, 이 결과를 이용하여 목표지점에 대

한 추정모델의 좌표 값과 실제의 좌표 값을 Table 9에 나타내었다. Table 9에서 보여준 것 같이 추정된 좌표 값과 실제 좌표 값이 $\pm 0.8\text{mm} \sim \pm 1.6\text{mm}$ 의 오차를 가지고 점 위치제어를 수행하였고, 오차를 Fig. 16에 그래프로 나타내었다.

결과적으로 Table 4~Table 9 및 Fig. 14~Fig. 16을 종합하여 볼 때 모든 경우에서 만족할만한 로봇 점 위치제어를 수행하였다. 다만 같은 반경에서 카메라를 배치할 때 로봇이 작업하는 영역의 정면에 집중 배치한 영역에서는 평균 $\pm 0.4\text{mm} \sim \pm 0.8\text{mm}$ 의 향상된 정밀도를 가지고 로봇 점 위치제어를 수행할 수 있다는 것을 실험을 통하여 보여주었다.

Table 7 Comparison between actual and estimated coordinate values in robot's central work space

Camera Placement	estimated value			average error(mm)
	Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	
case #1	549.442	98.847	121.458	1.120596
case #2	548.689	100.735	119.536	0.908061
case #3	550.017	103.024	119.262	1.797130
case #4	547.815	97.956	120.897	1.803502
case #5	549.595	99.941	120.680	0.457869
case #6	547.713	102.470	119.407	1.973503
case #7	549.997	97.277	121.587	1.819938
case #8	549.510	101.229	119.687	0.785195
case #9	549.937	101.838	119.629	1.082995
actual value	550.000	100.000	120.000	

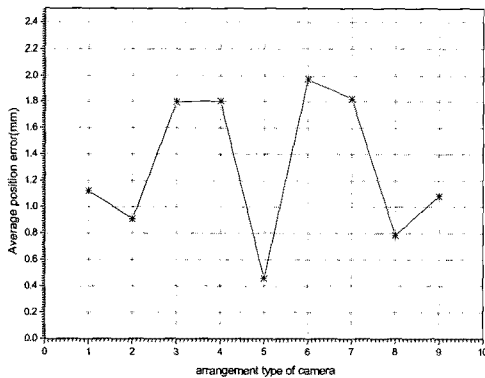


Fig. 15 Average position error according to the rramgement of camera in central work space

Table 8 Estimation values of each joint angle in robot's right work space

Camera Placement	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	d_3 (mm)	θ_4 (rad)
case #1	-7.386	97.098	146.125	0.000
case #2	-7.422	96.237	146.310	0.000
case #3	-7.343	96.679	146.347	0.000
case #4	-7.493	96.509	148.791	0.000
case #5	-7.367	96.381	146.378	0.000
case #6	-7.327	96.338	146.580	0.000
case #7	-7.450	96.582	146.386	0.000
case #8	-7.013	96.856	147.267	0.000
case #9	-7.312	96.326	147.053	0.000
actual value	-7.177	96.459	147.500	0.0000

Table 9 Comparison between actual and estimated coordinate values in robot's right work space

Camera Placement	estimated value			average error(mm)
	Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	
case #1	397.938	198.576	121.375	1.650277
case #2	401.822	198.273	121.190	1.604060
case #3	399.615	198.862	121.153	0.961283
case #4	400.878	197.801	118.709	1.556920
case #5	401.000	198.671	121.122	1.158403
case #6	401.047	198.953	120.920	1.006476
case #7	400.410	198.107	121.114	1.290125
case #8	397.691	201.161	120.233	1.498016
case #9	401.049	199.057	120.447	0.854429
actual value	400.000	200.000	120.000	

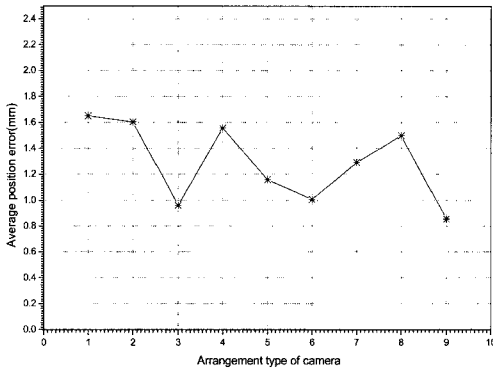


Fig. 16 Average position error according to the arrangement of camera in right work space

5. 결론

본 논문은 로봇 위치제어를 위해 사용된 비전 제어기법이 카메라 배치에 따라 어떠한 영향을 받는가를 연구하였다. 이를 위해 로봇 작업영역을 3개로 구분하여 각각의 영역에 9개의 가능한 카메라 배치를 설정하여 로봇 점 위치제어를 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 3개의 각각 작업영역에서 사용된 21개의 카메라 위치에서 매개변수 추정모형을 통한 비전 시스템 모델의 적합성을 보이는 실험에서 모든 경우에 실제 값과 비전 시스템 모델 값은 좌측 작업영역에서 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 5.0\text{pixel}$ 의 정밀도, 중앙 작업영역에서 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 7.8\text{pixel}$ 의 정밀도 및 우측 작업영역에서 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 5.2\text{pixel}$ 의 정밀도를 가지고 일치함을 보여주었다.
- (2) (1)의 매개변수 추정 결과를 토대로 3개 작업영역의 각각에 9개의 가능한 카메라 배치를 설정하여 회전각 추정모형을 이용한 로봇 점 위치제어 실험을 수행한 결과 실제 값과 모델 값이 좌측 작업영역에서 $\pm 0.3\text{mm} \sim \pm 1.5\text{mm}$, 중앙 작업영역에서 $\pm 0.4\text{mm} \sim \pm 1.8\text{mm}$, 우측 작업영역에서 $\pm 0.8\text{mm} \sim \pm 1.6\text{mm}$ 의 정밀도를 가지고 점 위치제어를 수행하였다.
- (3) 결론적으로 로봇 점 위치제어 실험을 수행한 결과 로봇의 3개의 각 작업영역에서 카메라 배치가 로봇위치제어에 큰 영향은 미치지 못하나 좀 더 향상된 정밀도를 갖기 위해서는 로봇의 작업영역에 카메라를 집중적으로 배치하는 것이 본 연구에서 제안한 로봇 비전 제어기법에 적용하기 위한 최적의 환경임을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 조선대학교 레이저 응용 신기술 개발 연구센터의 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) John J. C., 1989, *Introduction to Robotics mechanics and control, second edition*, Addison-Wesley, USA, pp. 84.
- (2) Junkins, J. L., 1978, *An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems*, Sijthoff and Noordhoff, Alphen Aan Den Rijn, pp. 29~33.
- (3) Masaki, I., 1983, *Method and Apparatus for Manipulator Welding Apparatus with Vision Correction for Workpiece Sensing*, United States Patent: 4,380,696.
- (4) Goncalves, P. J. and Pinto, J. R., 2003, "Dynamic Visual Servoing of Robotic Manipulators," *IEEE Conf. on Emerging Technologies and factory Automation*, Vol. 2, pp. 560~565.
- (5) Smith, P. W., Nandhkumar, N., and Ramadorai, A. K., 1996, "Vision Based Manipulation of Non Rigid Objects," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 3191~3196.
- (6) Kelly, R., Carelli, R., Nasisis, O., Kuchen, B., and Reyes, F., 2000, "Stable Visual servoing of camera-inhand robotics systems," *IEEE/ASME Trns. on Mechatronics*, Vol. 5, No. 1, pp. 39~48.
- (7) Kumaresan, S. S. and Li, H. H., 1994, "Hand-Eye Coordination of A Robot Manipulator Based on Fuzzy Logic," *IEEE Comput. Soc.*, Vol. 3, pp. 221~225.
- (8) Tani, K., Abe, M. and Ohno, T., 1977, "High Precision Manipulator with Visual Sense," *Proceedings 7th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan*, pp. 19~21.
- (9) Jang, W. S., Kim, K. S., Kim, K. Y., and Ahn, H. C., 2004, "An Experimental Study on the Optimal number of Cameras used for Vision Control System," *KSMET*, Vol. 13, No. 2, pp. 94~103.
- (10) Jang, W. S., Min, K. U., and Son, J. k., 2008, "A study on the effectiveness of vision system Varying with location of Camera," *KSPE Spring Conference*, pp. 21~22.