

## 불연속적인 궤적에서 로봇 점 배치작업에 사용된 비전 제어기법의 실용성에 대한 연구

손재경\*, 장완식<sup>+</sup>

(논문접수일 2010. 07. 28, 수정일 2011. 01. 27, 심사완료일 2011. 05. 03)

### A Study on the Practicality of Vision Control Scheme used for Robot's Point Placement task in Discontinuous Trajectory

Jae-Kyeong Son\*, Wan-Shik Jang<sup>+</sup>

#### Abstract

This paper is concerned with the application of the vision control scheme for robot's point placement task in discontinuous trajectory caused by obstacle. The proposed vision control scheme consists of four models, which are the robot's kinematic model, vision system model, 6-parameters estimation model, and robot's joint angles estimation model.

For this study, the discontinuous trajectory by obstacle is divided into two obstacle regions. Each obstacle region consists of 3 cases, according to the variation of number of cameras that can not acquire the vision data. Then, the effects of number of cameras on the proposed robot's vision control scheme are investigated in each obstacle region.

Finally, the practicality of the proposed robot's vision control scheme is demonstrated experimentally by performing the robot's point placement task in discontinuous trajectory by obstacle.

**Key Words** : Vision control scheme(비전제어기법), Discontinuous trajectory(불연속궤적), Point placement(점 배치), Obstacle region(장애물 영역)

## 1. 서론

로봇에 비전 시스템을 적용할 때에는 카메라의 위치, 방향 및 초점거리에 대한 보정이 가장 중요한 요소 중의 하나가 되며, 만약 이 보정이 정확하게 되어 있지 않으면 로봇은 정상적인 위치 보정을 하지 못하고 오동작을 할 우려가 있다<sup>(4-7)</sup>. 또한, 카메라와 로봇과의 상대적인 위치가 변화하면 이에 대한 새로운 카메라 보정이 필요하다.

이러하여 본 연구는 위와 같은 보정 문제점을 해결하기 위해

제안된 6개의 시각매개변수를 갖는 비전 시스템 모델을 사용하여 불확실한 작업환경의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 실용적인 로봇 비전 제어기법을 제시하고, 비전 데이터를 획득함 있어서 장애물출현으로 인하여 불연속적인 상황이 발생한 경우에 대해 로봇 점 배치작업에 사용된 로봇 비전 제어기법의 적합성과 실용성을 확인하고자 한다.

제안된 매개변수 추정모델과 관절각 추정모델은 모두 비선형방정식의 형태를 가지며, 특히 관절각 추정모델의 경우에는 많은 제한조건을 포함한다. 따라서 카메라 개수가 증가함에 따

\* 조선대학교 기계공학과 대학원

<sup>+</sup> 교신저자, 조선대학교 기계공학과 (wsjang@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

라서 비전 시스템 추정모델을 통한 위치 결정에서 오차가 줄어들다고 보기는 힘들다는 연구결과<sup>(8)</sup>와 카메라 배치가 로봇 위치제어에 큰 영향을 미치지 못하나 좀 더 높은 정밀도를 갖기 위해서는 로봇의 작업영역에 카메라를 집중적으로 배치하는 것이 바람직하다는 선행된 연구결과<sup>(9)</sup>에 따라서 좀 더 향상된 정밀도를 가질 수 있도록 로봇이 이동하는 방향에 집중적으로 2.0M~2.5M사이에 3대의 카메라를 배치하였다.

본 연구를 수행하기 위해 로봇이 이동하는 임의의 로봇 운동 궤적에서 장애물 영역을 중간 및 목표지점 근처로 구분하고, 각 영역에 3개 경우를 설정하였다. 즉, 1대의 카메라에서 데이터 획득실패, 2대의 카메라에서 데이터 획득 실패와 3대의 카메라에서 데이터 획득 실패한 각 경우에 대해 매개변수 추정기법을 사용하여 비전 시스템 모델의 적합성을 보였다. 또한, 매개변수 추정 결과를 관절각 추정 모델에 적용한 로봇 점 배치 작업 실험을 통해 장애물 영역 위치 및 장애물로 인하여 영향을 받는 카메라 개수 변화에 따른 영향을 조사하여 제시된 비전 제어기법의 실용성을 조사하였다.

## 2. 로봇 비전 제어기법

본 논문은 불연속적인 로봇 운동궤적에서 비전 시스템을 사용하여 로봇 점 배치작업을 효율적으로 제어하기위한 연구로서, Fig. 1에서 보여준 것 같이 시스템 모델 및 비전 제어기법으로 구성된다.

### 2.1 비전 시스템 모델

본 연구에서 제시된 비전 시스템은 로봇 기구학 모델 및 6개의 매개변수 등으로 구성된다.

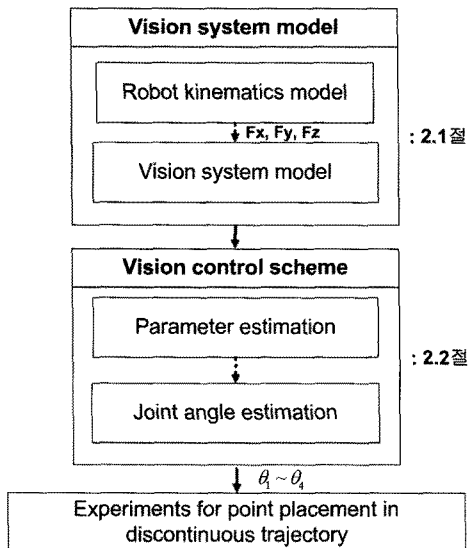


Fig. 1 Contents of this chapter

### 2.1.1 로봇 기구학 모델

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 삼성 SM7 4축 로봇의 관절 좌표계 및 링크인자를 보여주며, 정기구학 모델 식은 식 (1)과 같다<sup>(1,11)</sup>.

$$F_x = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_x - \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_y + a_2(\theta_1 + \theta_2) + a_1\cos\theta_1$$

$$F_y = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_x + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_y + a_2(\theta_1 + \theta_2) + a_1\cos\theta_1 \quad (1)$$

$$F_z = P_z + d_1 - d_3 - d_4$$

여기서,  $a_1, a_2, d_1, d_4$ 는 Denavit-Hartenberg 링크 인자 값을 나타내며,  $a_1=400 \text{ mm}$ ,  $a_2=250 \text{ mm}$ ,  $d_1=387 \text{ mm}$ ,  $d_4=67.05 \text{ mm}$  이다. 또한,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 는 로봇의 관절각을 나타내며,  $P_x, P_y, P_z$ 는 마지막 관절 좌표계의 원점에서 로봇 끝점 P까지의 위치벡터 성분으로 식 (2)와 같다(단위: mm).

$$P = (P_x, P_y, P_z) = (0, 0, -46.6) \quad (2)$$

### 2.1.2 비전 시스템 모델

Fig. 1에서 보여준 비전 시스템 모델은 6개의 불확실한 시각 매개변수를 사용하여 3차원 공간상에 움직이는 로봇 끝점의 위치벡터를 2차원 카메라 좌표계로 변환하기 위해 로봇기구학 모델과 결합하여 식 (3)과 같이 나타낸다<sup>(8~11)</sup>.

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_5 \\ C_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

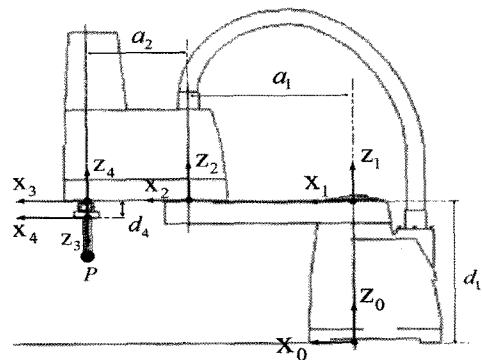


Fig. 2 Geometric configuration of Samsung SM7 4-axis robot

여기서,

$$C_{11} = C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2, \quad C_{12} = 2(C_2 C_3 + C_1 C_4),$$

$$C_{13} = 2(C_2 C_4 - C_1 C_3), \quad C_{21} = 2(C_2 C_3 - C_1 C_4),$$

$$C_{22} = C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2, \quad C_{23} = 2(C_3 C_4 + C_1 C_2)$$

또한,  $X_m$ 과  $Y_m$ 은 3차원 로봇 끝점 P의 위치벡터( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )를 2차원 카메라 좌표계로 변환시키는 비전 시스템 모델 값이며, 6개의 C매개변수는 카메라 방위 및 초점거리( $C_1 \sim C_4$ )와 카메라에 대한 로봇 위치의 불확실성( $C_5, C_6$ )을 나타낸다.

## 2.2 비전 제어기법

Fig. 3은 매개변수 및 로봇 관절각 추정을 포함한 비전 제어 기법의 전체적인 제어알고리즘의 흐름을 보여준다.

본 연구에 사용된 제어기법은 비전 시스템 모델에 포함된 6개 시각 매개변수를 각 카메라에 대해 일괄처리 기법으로 추정 후, 이것을 근거로 목표지점에 대한 로봇 관절각을 일괄처리 기법을 사용하여 추정하는 데, 이에 대한 과정은 Fig. 3에서 보여준다. 이때 추정된 관절각으로 로봇을 목표지점으로 구동한 후, 위치 정밀도를 조사하여 본 제어기법의 효율성을 확인하고자 한다.

### 2.2.1 6개 매개변수 추정기법

3차원 로봇 끝점 위치를 2차원 카메라 좌표계로 변환 하기 위해 사용된 비전 시스템 모델에 포함된 6개의 매개변수  $C_k(k=1 \sim 6)$ 를 추정하기 위해 식 (4)와 같이 성능지수를 정의 하였다.

$$J(C_k) = \sum_{i=1}^n [X_m^i - X_c^i]^2 + [Y_m^i - Y_c^i]^2 \quad (4)$$

여기서,  $i(=1 \sim n)$ 는 로봇 운동계획에서 이동단계 수를 나타내며,  $X_c, Y_c$ 는 로봇이 이동하는 각 단계에서 카메라를 통해 얻어진 로봇 끝점 P에 대한 실제 비전 데이터 값들이다.

식 (4)를 최소화하기 위해 Newton-Raphson방법을 사용하여 구해진 추정모델 식은 다음과 같다<sup>(2,11)</sup>.

$$C_{k,j+1} = C_{k,j} + \Delta C \quad (5)$$

여기서,  $\Delta C = (A^T W A)^{-1} A^T W R$ 이며,  $A$ 는 자코비안 행렬,  $R$ 은 유수벡터,  $j$ 는 반복횟수이며,  $W$ 는 가중치 행렬로서 본 논문에서는 단위행렬을 사용하였다. 6개 매개변수를 추정하기위해 사용된 식 (5)는 본 논문에서 사용된 카메라의 각 각에 대해 적용한다.

### 2.2.2 로봇 관절각 추정 기법

로봇 관절각 추정모델은 각 카메라에 대한 6개 매개변수를 구한 후, 이를 이용하여 목표지점에 대한 로봇의 관절각  $\theta_i(i=1 \sim 4)$ 을 추정 하기위해 식 (6)과 같이 성능지수를 정의 하였다.

$$J(\theta_i) = \sum_{q=1}^3 [X_m^q(F_x(\theta_i), F_y(\theta_i), F_z(\theta_i); C_k^q) - X_c^q]^2 + [Y_m^q(F_x(\theta_i), F_y(\theta_i), F_z(\theta_i); C_k^q) - Y_c^q]^2 \quad (6)$$

여기서,  $q(=1 \sim 3)$ 는 카메라의 개수,  $k(=1 \sim 6)$ 는 매개변수의 수를 나타낸다. 또한  $X_c^q$ 와  $Y_c^q$ 는 목표지점의  $q$ 번째 카메라의 좌표 값을 나타내며,  $X_m^q$ 와  $Y_m^q$ 는 추정된 매개변수  $C_1 \sim C_6$ 에 근거한  $q$ 번째 카메라의 비전 시스템 모델의 추정 값이다.

매개변수 추정기법과 같이 식 (6)을 최소화 하기위해 Newton-Raphson방법을 적용하여 구해진 관절각 추정모델 식은 아래와 같다<sup>(2,11)</sup>.

$$\theta_{i,j+1} = \theta_{i,j} + \Delta \theta \quad (7)$$

여기서,  $\Delta \theta = (B^T W B)^{-1} B^T W R$ 이고,  $B$ 는 자코비안 행렬,  $R$ 은 유수벡터,  $j$ 는 반복횟수이며, 가중치 행렬  $W$ 는 단위행렬을 사용하였다.

식 (7)에서 계산된  $\theta_i$ 값은 로봇을 목표지점으로 구동하기 위해 추정된 로봇 관절각이다.

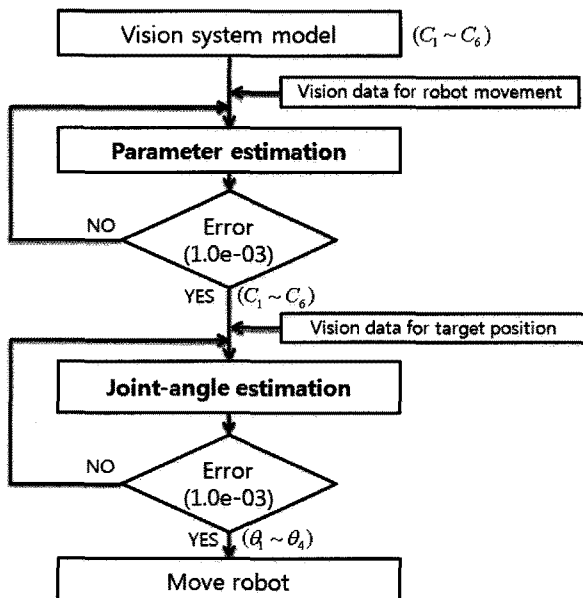


Fig. 3 Flow-chart of robot's vision control algorithm

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치 구성

본 연구에 사용한 실험장치는 비전 시스템, 로봇 시스템 및 Host PC로 전체적인 사양 및 구성은 Table 1과 Fig. 4에 나타내었다.

#### 3.2 실험방법

로봇 구동 시 장애물 등에 의해 불연속적인 로봇 운동궤적이 발생하는 경우, 2장에서 제시된 로봇 비전 제어기법을 로봇 점 배치작업 실험에 적용하여 장애물이 존재하지 않는 경우와 장애물이 존재하는 경우를 비교함과 동시에 장애물의 영역 위치 및 장애물로 인하여 영향을 받는 카메라 개수변화에 따라 어떠한 영향을 받는지를 해석하고자 한다.

본 실험은 선행된 연구결과<sup>(8,9)</sup>에 따라 로봇이 이동하는 방향에 집중적으로 2.0~2.5m 거리에 3대의 카메라를 배치하였으며, 실험방법은 다음과 같다.

- ① Fig. 5와같이 임의의 20이동단계의 로봇 운동궤적을 설정한다.
- ② 여러 경우의 실험을 행한 결과<sup>(11)</sup> 2개 장애물 영역은 로봇 운동궤적의 15%로 설정(중간 장애물 영역 A: 13~15 단계, 목표지점 근처 장애물 영역 B: 18~20단계)
- ③ 각 장애물 영역에서 Table 2와 같이 3개의 경우를 설정한다.
- ④ 로봇 이동 시 각 장애물 영역 A와 B에서 3개 경우에 대해 로봇 관절각을 추정한다.
  - 3대 카메라가 획득한 비전 데이터를 매개변수 추정모델에 적용하여 각 카메라에 대한 매개변수( $C_1 \sim C_6$ ) 추정
  - 3대 카메라에 대해 각각 추정된 매개변수를 관절각 추정 모델에 적용하여 목표지점에 대한 로봇 관절각 추정
- ⑤ 추정된 관절각을 사용하여 목표지점으로 로봇을 구동한 후, 측정된 로봇 위치 값과 실제 목표지점 값을 5장에서 비교하여 그 결과를 해석한다.

Table 1 Specification of experimental apparatus

System	Specification	
Vision System	CCD Camera	Sony XC-ES51
		Avenir TV zoom 렌즈
	Vision Board	MATROX 흑백 meteor2-MC4
		해상도: 640 × 480 화상도 256계조 최대 Sampling rate 30MHz
Library	Matrox Imaging Library 8.0DEV	
Robot System	Robot	삼성 SM7 4축 Robot
	Robot controller	MMC-BDPO41PNB
PC	· 산업용 MB800V · CPU:2.8GHz · 512MB	

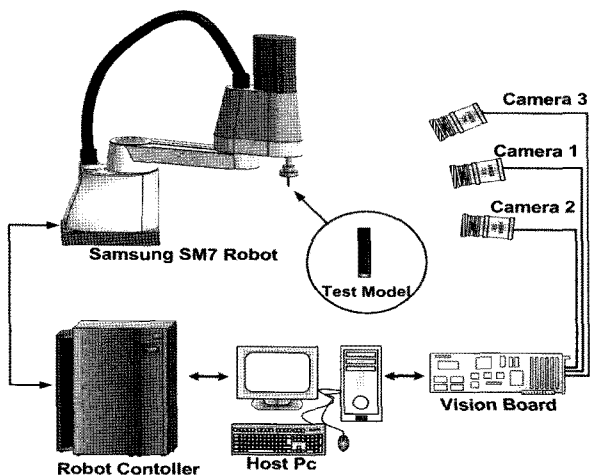


Fig. 4 Experimental set-up

### 4. 비전 시스템 모델 적합성 실험결과

비전 시스템 모델의 적합성을 보이하고자 3대 카메라의 각각에 대해 실제 비전 데이터와 비전 시스템 모델의 추정 값 사이의 오차는 식 (8)과 같이 r.m.s.를 정의하여 사용하였다<sup>(3)</sup>.

Table 2 The cases in each obstacle region

Case #	Type
Case 1	Failure of the data acquisition in camera 1
Case 2	Failure of the data acquisition in camera 1,2
Case 3	Failure of the data acquisition in camera 1,2,3

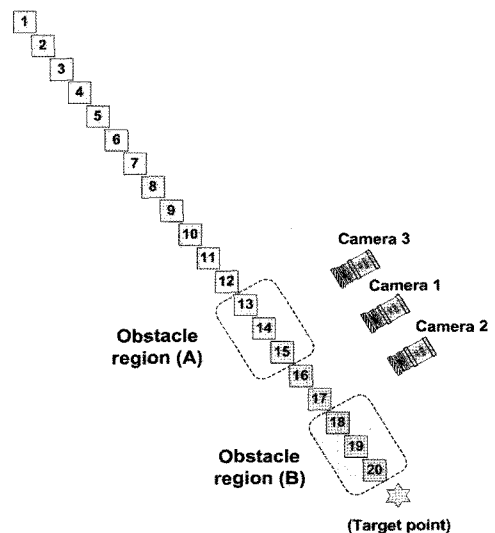


Fig. 5 Types of obstacle regions in robot's trajectory

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m \{(e_x^n)^2 + (e_y^n)^2\}}{m}} \quad (8)$$

여기서,  $e_x, e_y$ 는 실제 비전 데이터와 비전 시스템 모델의 추정 값 사이의  $x$  및  $y$ 축 오차 값,  $m$ 은 획득된 총 비전 데이터 개수이며,  $n$ 은 로봇이 목표지점을 향해 이동하는 동안 비전 데이터가 얻어지는 단계 수이다.

Fig. 6~Fig. 8에서 부호( $\circ, \triangle, \square$ )는 20단계로 로봇이 이동하는 동안 각 카메라에서 측정된 실제 비전 데이터이다. 부호( $+, \nabla, \times$ )는 추정된 6개의 매개변수를 가지고 계산된 각 카메라의 비전 시스템 모델의 추정 값을 나타내며,  $\bullet$ 은 목표지점 값을 보여준다.

#### 4.1 장애물 영역이 존재하지 않는 경우

로봇이 장애물 영역이 없는 20단계의 연속적인 운동궤적을 따라 목표지점으로 움직이는 동안, 이때 3대 카메라로부터 얻어진 20단계의 실제 비전 데이터와 각 카메라에 대해 매개변수 추정모델에 의해 계산된 6개 매개변수에 근거를 둔 비전 시스템 모델의 추정 값을 비교하여 Fig. 6에 제시하였다.

장애물 영역이 존재하지 않는 20단계의 연속적인 로봇 운동 궤적을 가지는 본 실험은 Table 3에서 보여준 것과 같이 비전 시스템 모델의 추정 값과 실제 획득된 비전 데이터 값을 비교하면 각 카메라에서 오차 값은  $\pm 0.1789\text{pixel} \sim \pm 0.2494\text{pixel}$  정도로 근사함을 보여준다.

Table 3 r.m.s. error values in no obstacle (unit : pixel)

No obstacle		Errors
r.m.s.	camera 1	0.2494
	camera 2	0.1789
	camera 3	0.1875

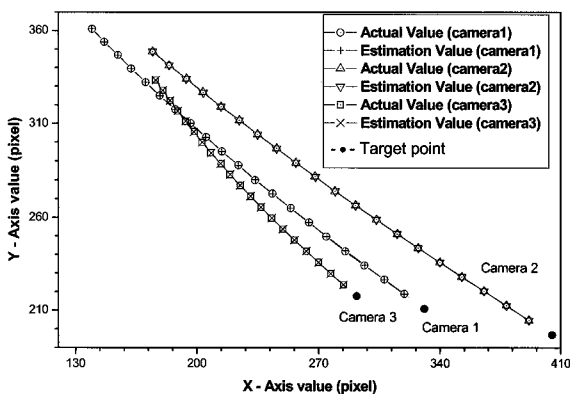
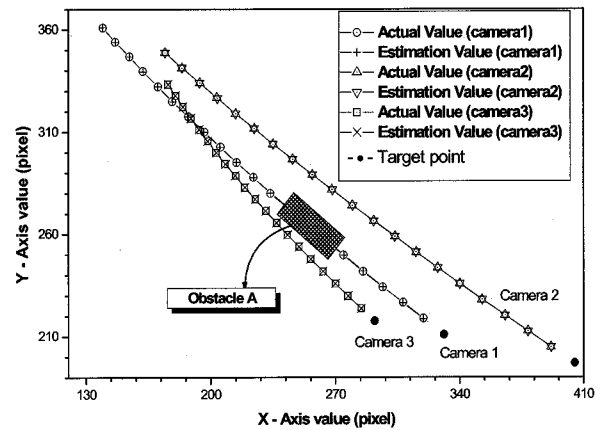


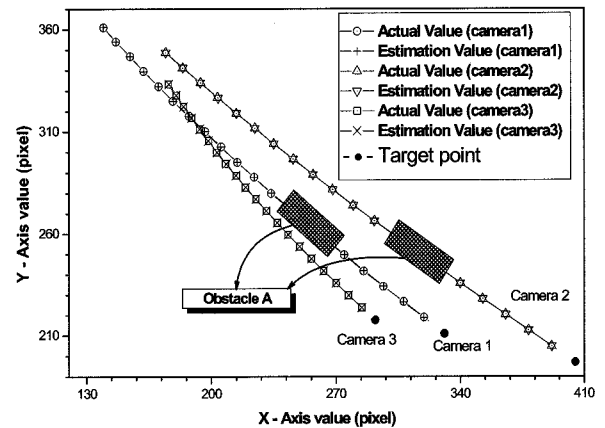
Fig. 6 For each camera, comparison of the actual and estimated vision system model values in no obstacle region

#### 4.2 장애물 영역이 존재하는 경우

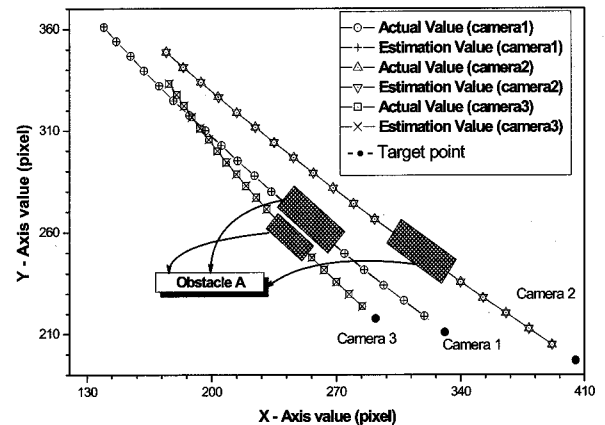
장애물 영역은 로봇 운동궤적의 중간에서 장애물이 존재하는 영역 A와 목표지점 근처에 장애물이 존재하는 영역 B로 구분하였으며, 각 영역 내에서 Table 2에서 보여준 것 같이



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 7 Comparison of the actual and estimated vision system model values for each case in the obstacle region A

3경우로 설정하였다. Fig. 7~8과 Table 4~5는 각 장애물 영역에서의 실험결과를 보여주며, Table 4~5의 음영부분은 카메라가 비전 데이터를 얻지 못한 경우를 나타낸다.

(1) 중간 장애물 영역 A

Fig. 7은 장애물이 중간 장애물 영역 A에 존재할 때, 3개의 경우에서 각 카메라에 대해 매개변수 추정모델을 통하여 얻어진 매개변수  $C_k$ 를 이용한 비전 시스템 모델의 추정 값을 획득된 실제 비전 데이터 값과 비교한 결과를 보여준다.

Table 4는 각 카메라에 대해 실제 비전 데이터와 비전 시스템 모델의 추정 값을 비교한 오차 값을 식 (8)에서 정의한 r.m.s.를 사용하여 나타내었다. 3개의 경우에서 데이터 획득에 실패한 각 카메라에 대해 장애물 영역이 존재하지 않는 경우와 결과를 비교하면, camera1은 0.2494pixel에서 0.2534pixel, camera2는 0.1789pixel에서 0.1725pixel, camera3은 0.1875pixel에서 0.1962pixel로 정밀도가 변화하였다. 그 이유는 로봇 운동궤적의 15%를 차지한 중간 장애물 영역 A에서는 비전 데이터를 획득하지 못하지만 다음 단계의 비전 데이터 획득에 의해 충분히 보정이 이루어지기 때문에 장애물이 없는 경우와 거의 비슷하다.

(2) 목표지점 근처 장애물 영역 B

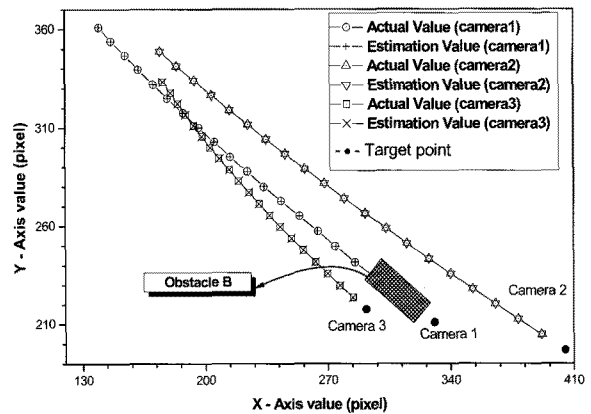
목표지점 근처 장애물 영역 B인 18~20단계 내에서 3개 경우에서 얻지 못한 비전 데이터를 제외한 각 카메라에서 얻어진 비전 데이터를 가지고 카메라에 대해서 추정된 매개변수 값을 이용한 비전 시스템 모델의 추정 값과 실제 비전 데이터를 비교한 결과를 Fig. 8과 Table 5에 보여준다.

각 카메라에 대해 실제 비전 데이터와 비전 시스템 모델의 추정 값들의 오차는 식 (8)에서 정의한 r.m.s.를 사용하였다.

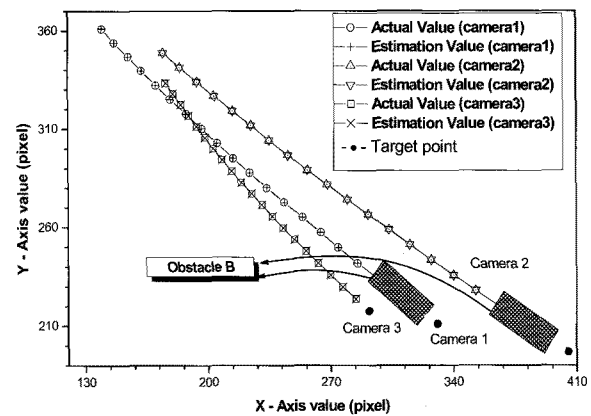
3개의 각각의 경우에서 데이터 획득에 실패한 각 카메라에 대해 장애물이 존재하지 않는 경우의 결과와 비교하면 camera1은 0.2494pixel에서 0.2486pixel, camera2는 0.1789pixel에서 0.1845pixel, camera3은 0.1875pixel에서 0.1968pixel로 정밀도가 변화하였다. 그 이유는 장애물 영역 B는 중간에 장애물이 있는 영역 A와 다르게 목표지점 근처에 존재하는 장애물에 도달하기 전까지는 모든 단계에서 연속적으로 비전 데이터가 얻어지기 때문에 비전 시스템 모델의 추정 값은 장애물이 없는 경우와 거의 비슷한 결과를 갖는다.

Table 4 r.m.s. error values in obstacle region A (unit : pixel)

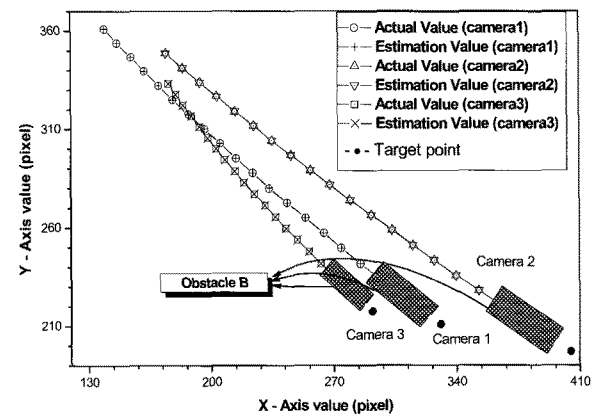
Obstacle region A		Case 1	Case 2	Case 3
r.m.s.	camera 1	0.2534	0.2534	0.2534
	camera 2	0.1789	0.1725	0.1725
	camera 3	0.1875	0.1875	0.1962



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 8 Comparison of the actual and estimated vision system model values for each case in the obstacle region B

Table 5 r.m.s. error values in obstacle region B (unit : pixel)

Obstacle region A		Case 1	Case 2	Case 3
r.m.s. (pixel)	camera 1	0.2486	0.2486	0.2486
	camera 2	0.1789	0.1845	0.1845
	camera 3	0.1875	0.1875	0.1968

### 5. 로봇 점 배치작업 실험결과

장애물에 의한 불연속 운동궤적을 따라 로봇이 목표지점으로 이동 할 때 장애물 영역 위치 및 장애물로 인하여 영향을 받는 카메라 개수 변화가 본 논문에서 제안된 로봇 비전 제어 기법에 어떠한 영향을 받는가를 조사하기 위해 로봇 점 배치작업 실험을 행하였다. 이 실험을 위해 필요한 로봇 관절각은 매 개변수 추정모델에 의해 계산된 값을 사용하여 관절각 추정모델에 의해 계산하며, 계산된 관절각을 이용하여 로봇을 목표지점으로 이동하여 로봇 점 배치작업의 정밀도를 조사하였다.

로봇 점 배치작업 실험은 장애물이 존재하지 않는 경우와 2개 장애물 영역의 각 3개 경우에 대해 수행하였다. 로봇을 목표지점을 향해 구동 후 로봇제어기로부터 얻어진 엔코더 값을 사용하여 측정된 로봇 위치 값과 실제 목표지점 값을 비교한 오차 값은 식 (9)와 같이 r.m.s.오차로 정의하여<sup>(3)</sup>, 그 결과를 Table 6~8 및 Fig. 9~10에 나타내었다.

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{(e_x)^2 + (e_y)^2 + (e_z)^2}{3}} \quad (9)$$

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

#### 5.1 장애물 영역이 존재하지 않는 경우

장애물 영역이 없는 로봇 점 배치작업 실험에서 목표지점에 대해 로봇 구동 후 측정된 로봇 위치 값과 실제 목표지점 값을 비교하여 Table 6에 나타내었으며, ±0.418mm의 정밀도를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행하였다.

#### 5.2 장애물 영역이 존재하는 경우

##### (1) 중간 장애물 영역 A

Table 7과 Fig. 9에 나타낸 것과 같이 로봇 운동궤적에서 중간구간에 해당하는 장애물 영역 A의 각 경우의 오차는 Case 1에서 ±0.420mm, Case 2에서 ±0.422mm와 Case 3에서 ±0.418mm로 장애물 영역이 없는 경우인 ±0.418mm와 거의 비슷한 오차를 갖는다. 즉, 중간 장애물 영역에서는 장애물이 없는 경우와 비교하면 장애물에 영향을 받아 데이터획득에 실패한 카메라 개수에 무관하게 점 배치작업을 수행하였다. 그

Table 6 For no obstacle, comparison of the actual and measured values for target point in x-y-z coordinate

Obstacle region #	Fx (mm)	Fy (mm)	Fz (mm)	r.m.s. (mm)
No obstacle	559.099	166.733	113.508	0.418
Real value	559.200	166.800	112.800	

이유는 장애물 영역에 의해 비전 데이터획득에 실패하여도 목표지점 근처까지 다음 단계들의 비전 데이터에 의해 보정이 이루어지기 때문에 장애물이 없는 경우와 비교하면 Table 7과 Fig. 9에서 보여준 것 같이 거의 유사한 오차를 갖는다.

##### (2) 목표지점 근처 장애물 영역 B

로봇 운동궤적에서 목표지점 근처의 장애물 영역 B의 3개 경우 오차는 Table 8과 Fig. 10에서 보여준 것 같이 Case 1에서 ±0.466mm, Case 2에서 ±0.514mm와, Case 3에서 ±0.668mm의 오차를 갖는다. 그 이유는 장애물이 없는 경우 및 중간 장애물 영역 A경우와 다르게, 목표지점 근처에서 장애물의 영향을 받아 더 이상 보정을 할 비전 데이터가 없기 때문에 Table 8과 Fig. 10에서 보여준 것 같이 장애물의 영향을 받는 카메라의 개수가 증가함에 따라 오차가 커진다.

Table 7 For obstacle region A, comparison of the actual and measured values for target point in x-y-z coordinate

Obstacle region A	Fx (mm)	Fy (mm)	Fz (mm)	r.m.s. (mm)
Case 1	559.087	166.728	113.509	0.420
Case 2	559.077	166.714	113.509	0.422
Case 3	559.093	166.730	113.507	0.418
No obstacle	559.099	166.733	113.508	0.418
Real value	559.200	166.800	112.800	

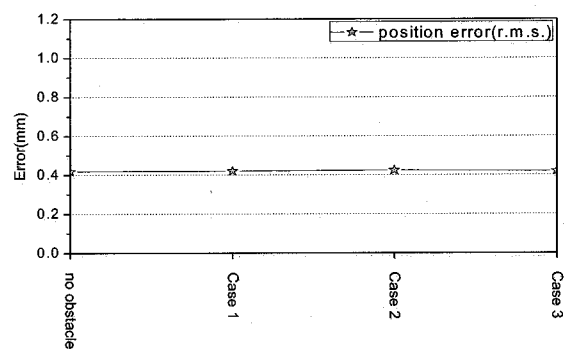


Fig. 9 For obstacle region A, r.m.s errors between the actual and measured values of target point in x-y-z coordinate

Table 8 For obstacle region B, comparison of the actual and measured values for target point in x-y-z coordinate

Obstacle region B	Fx (mm)	Fy (mm)	Fz (mm)	r.m.s. (mm)
Case 1	559.074	166.793	113.592	0.466
Case 2	558.986	166.689	113.648	0.514
Case 3	558.651	166.374	113.700	0.668
No obstacle	559.099	166.733	113.508	0.418
Real value	559.200	166.800	112.800	

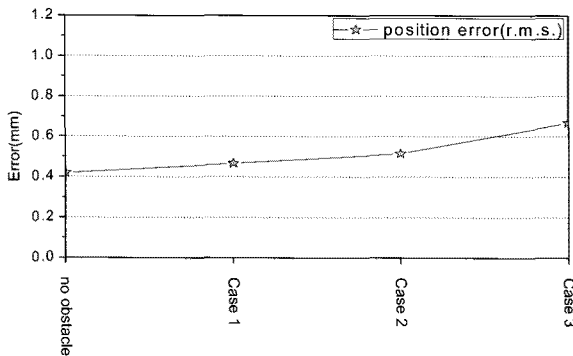


Fig. 10 For obstacle region B, r.m.s errors between the actual and measured values of target point in x-y-z coordinate

## 6. 결론

본 논문은 장애물 출현 등에 의한 불확실한 작업환경에서 제시된 로봇 비전 제어기법의 실용성을 연구하였다. 이를 위해 20단계를 가지는 임의의 운동궤적에 대해 2개의 장애물 영역을 설정하고, 각 장애물 영역 내에서 카메라들이 비전 데이터를 획득 할 수 없는 3경우에 대해서 로봇 점 배치작업을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 불연속적인 운동궤적을 따라 로봇 점 배치작업 실험을 수행한 결과, 로봇이 이동하는 도중 장애물 출현 등으로 인하여 비전 데이터 획득이 불가능하게 되는 불확실한 작업 환경에서도 로봇 운동궤적의 15%로 설정한 장애물 영역 위치 및 각 장애물 영역에서 데이터획득에 실패한 카메라 개수와 무관하게 최대  $\pm 0.668\text{mm}$  정밀도를 가지고 충분히 안정된 로봇 점 배치작업을 수행할 수 있다.
- (2) 특히, 장애물 출현 등에 의한 불확실한 환경에서 사용되는 로봇 비전 제어기법을 장애물이 출현하지 않는 경우(오차  $\pm 0.418\text{mm}$ )와 비교하면, 장애물이 목표지점 근처에 존재하는 장애물 영역 B에서는 최대  $\pm 0.668\text{mm}$  오차를 갖는 반면, 목표지점으로부터 떨어진 중간 장애물 영역 A에서는 거의 동일한  $\pm 0.422\text{mm}$ 의 정밀도로 로봇 점 배치작업을 수행하였다.
- (3) 위와 같이 로봇이 이동하는 운동궤적에서 목표지점 근처 장애물 영역 B보다 중간 장애물 영역 A에서 장애물에 의해 비전 데이터 획득에 실패했을 경우가 좀 더 향상된 정밀성을 갖는 것을 알 수 있었다. 그 이유는 장애물에 의해 데이터 획득에 실패하여도 다음 단계들의 비전 데이터에 의해 충분히 보정이 이루어지기 때문이다.
- (4) 본 연구는 장애물 영역을 로봇운동궤적의 15%로 설정하여 결과를 제시하였으며, 여러 실험을 행한 결과<sup>(11)</sup> 15% 내외로 장애물이 존재하는 경우 거의 같은 결과를 얻었다.

다만, 30%이상의 장애물 영역이 존재하는 경우 큰 오차가 발생하므로 카메라를 재배치하거나, 식 (5) 및 식 (7)의  $\Delta C$ 와  $\Delta \theta$ 에 사용한 가중치 행렬 W를 단위행렬로 사용하지 않고 가중치를 부여한 행렬로 모델링하여 사용하면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

- (5) 로봇 제어 시 로봇 끝점에 대한 위치(position) 및 방위(orientation)를 일반적으로 고려하여야 하는데, 본 논문은 로봇 점 배치작업 실험을 행하였기 때문에 로봇에 대해 위치만을 고려하고 방위는 무의미하므로 고려하지 않았다. 향후 장애물 출현에 의한 불연속적인 로봇 운동궤적에서 로봇의 위치 및 방위를 고려한 얇은 막대(2큐) 및 강체(4큐 이상) 배치 실험을 통해 본 논문에서 제시된 비전 제어 기법의 실용성을 연구하고자 한다.

## 후 기

이 논문은 2009학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

## 참 고 문 헌

- (1) John, J. C., 1989, *Introduction to Robotics Mechanics and Control, second edition*, Addison-Wesley, U.S.A., 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) David, F., Robert, P., and Roger, P., 1978, *Statistic*, W. W. Norton, Canada, pp. 58~59.
- (4) Kelly, R., Carelli, R., Nasisis, O., Kuchen, B., and Reyes, F., 2000, "Stable Visual servoing of camera-inhand robotics systems," *IEEE/ASME Trnsns. on Mechatronics*, Vol. 5, No. 1, pp. 39~48.
- (5) Yoshihiro, T., Yasuo, K., and Hiroyuki, I., 1996, "Positioning-Control of Robot Manipulator Using Visual Sensor," *Int. Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, pp. 894~898.
- (6) Bacakoglu, H., and Kamel, M., 1997. "An Optimized Two-Step Camera Calibration Method," *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics And Automation*, pp. 1347~1352.
- (7) Machiko, S., and Aggarwal, J. K., 1997, "Estimation of Position and Orientation from Image sequence of a Circle," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2252~2257.



- (8) 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," *KSMTE*, Vol. 13, No. 2, pp. 94~103.
- (9) Min, K. U., and Jang, W. S., 2010, "An Experimental Study on the Optimal Arrangement of Cameras used for the Robot's Vision Control Scheme," *KSMTE*, Vol. 19, No. 1, pp. 15~25.
- (10) Son, J. k., Jang, W. S., and Min, K. U., 2009, "An experimental study on the effectiveness of robot vision control scheme in discontinuous robot's trajectory caused by obstacle" *KSPE Spring Conference*, pp. 127~128.
- (11) Son, J. K., 2010, *An experimental study on the practicality of vision control scheme used for robot's point placement task in discontinuous trajectory*, A thesis for master's degree, Chosun University, Republic of Korea.