

로봇 비전시스템을 이용한 강체 배치 실험에 대한 연구

장완식*, 신광수**, 안철봉**

A Study on Rigid body Placement Task of based on Robot Vision System

Wan-Shik Jang*, Kwang-Soo Shin**, Chul-Bong An**

ABSTRACT

This paper presents the development of estimation model and control method based on the new robot vision. This proposed control method is accomplished using the sequential estimation scheme that permits placement of the rigid body in each of the two-dimensional image planes of monitoring cameras.

Estimation model with six parameters is developed based on the model that generalizes known 4-axis scara robot kinematics to accommodate unknown relative camera position and orientation, etc. Based on the estimated parameters, depending on each camera the joint angle of robot is estimated by the iteration method.

The method is experimentally tested in two ways, the estimation model test and a three-dimensional rigid body placement task. Three 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 assembly and welding.

Key Words : Vision system (비전시스템), Estimation model (추정모델), Gripper (그리퍼), Cue (큐)
Weighting matrix(가중행렬), rigid body placement (강체배치), Orientation (자세)

1. 서 론

대부분의 산업현장에서 사용되는 로봇은 인간의 5각 감각 기능 중 가장 중요하게 사용되는 촉각과 시각 기능이듯이 로봇에 있어서도 광학적 비전센서와 접촉센서가 우선적으로 활용되고 있다. 특히 1980년대 중반 이후로 시각정보에 의한 매니플레이션(Manipulation)에 대한 관

심이 증가되어왔다.⁽¹⁾⁽²⁾ 비전시스템의 로봇에 대한 적용은 시각정보의 중요성과 유연성 때문에 지속적으로 연구되고 있으며, 어느 정도 제한된 범위 내에서 산업용로봇은 불확실한 물리적인 공간의 위치와 자세를 갖는 소체에 대한 작업을 수행하고있다. 그러므로 시각정보를 귀환신호로 이용하는 로봇은 로봇이 목표지점으로 이동할 때마다 로봇과 비전시스템의 모델링 및 상호간의 보정이 필요

* 조선대학교 기계공학과

** 조선대학교 대학원 기계공학과

하다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 다시 말해서, 시각정보를 이용한 로봇 매니플레이션에는 몇가지 어려움이 뒤따른다. 첫째, 로봇 기구학 모델의 정확도에 의해 직접 제한되고, 따라서 기구학적 보장을 위한 정교한 노력이 필요하게 될 것이다. 둘째, 로봇 베이스에 부착된 기준계와 카메라에 부착된 카메라 좌표계 사이의 좌표 변환이 정확하게 알려져야만 한다. 세 번째, 만일 카메라 위치, 방향 또는 내부 매개변수들이 카메라 보정 단계와 로봇 매니플레이션 단계 중에 변한다면, 초기 보정은 더 이상 유효하지 않는 것이다. 마지막으로, 시각정보의 귀환이 매니플레이션에 대한 어려움들을 어느 정도까지는 극복할 수 있지만, 반면에 만일 물체가 이동 중의 어느 부분이 다른 물체에 의해 가려졌을 때 시각적인 귀환정보를 이용하기가 어렵게 된다.

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Jang⁽⁶⁾등은 새로운 비전 제어기법을 제시하여 오직 위치만을 고려한 점배치실험 연구를 통하여 제시된 기법의 타당성을 입증하였다. 그리고 제시된 제어기법의 필요한 제한조건은 사용한 모든 카메라 이미지 평면에 로봇이 이동하는 동안 목표지점의 위치와 매니플레이터의 끝점의 위치가 항상 존재해야 한다. 이리하여 본 연구는 Jang⁽⁶⁾에서 제시한 제어기법을 보완하여 위치와 자세의 정보를 요구하는 강체배치에 응용함으로써 제시된 제어기법이 조립작업에의 응용가능성과 합리성을 보이고자 한다.

2. 추정 모델

2.1 4축 매니플레이터 기구학 모델

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

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

$$= \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & r_x \\ l_y & m_y & n_y & r_y \\ l_z & m_z & n_z & r_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$$l_x = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4), \quad m_x = -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4), \quad n_x = 0,$$

$$l_y = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4), \quad m_y = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4), \quad n_y = 0,$$

$$l_z = 0, \quad m_z = 0, \quad n_z = 1,$$

$$r_x = a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos \theta_1$$

$$r_y = a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos \theta_1$$

$$r_z = d_1 - d_3 + d_4$$

마지막 관절 좌표계의 원점 O_4 에서 말단 공구계의 끝점 P까지의 위치벡터는 식(2)에 주어 진다.

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

여기서, $j(=1,2,3,4)$ 는 큐(Cue)의 수를 나타낸다. 로봇 베이스 좌표계에 대한 말단공구계의 끝점 P의 위치벡터는 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{F} = {}^4_0T {}^4P = \begin{bmatrix} f_x^j \\ f_y^j \\ f_z^j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)P_x^j - \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_y^j \\ + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos \theta_1 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)P_x^j - \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_y^j \\ + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \sin \theta_1 \\ P_z^j + d_1 - d_3 + d_4 \\ 1 \end{bmatrix}$$

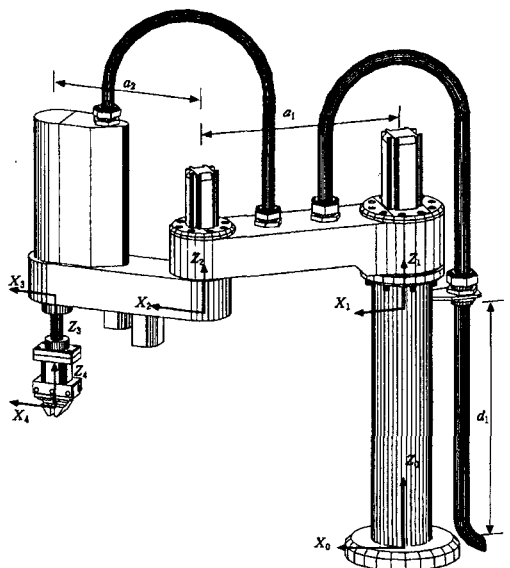


Fig.1 4-Axis SCARA robot

Table 1 Link parameters of four-axis robot

	$\alpha_{i-1}(\text{°})$	$a_{i-1}(\text{mm})$	$d_i(\text{mm})$	$\theta_i(\text{°})$
1	0	0	449	θ_1
2	0	350	0	θ_2
3	180	260	d3	0
4	-180	0	-246	θ_4

2.2 카메라 모델

카메라 모델은 6개의 불확실한 시각 매개변수의 향으로 써 나타낸다. 이러한 매개변수들은 로봇에 대한 카메라 위치, 자세 및 초점거리의 불확실성을 설명할 뿐만 아니라, 3차원 공간에서 움직이는 매니플레이터 끝점 위치를 2차원 카메라 좌표계로의 변환 관계를 나타낸다. 이와 같이 기준 좌표계에 대해 하나의 주축에 회전을 하고 있는 좌표계의 변환관계를 보여주는 오일러 매개변수(Euler parameter) 향으로 표시된 방향 코사인 행렬(direction cosine matrix)을 사용한 카메라 회전 모델은 다음과 같다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

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

여기서, $E_{11} = C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2$, $E_{12} = 2(C_2C_3 + C_1C_4)$, $E_{13} = 2(C_2C_4 - C_1C_3)$, $E_{21} = 2(C_2C_3 - C_1C_4)$, $E_{22} = C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2$, $E_{23} = 2(C_3C_4 + C_1C_2)$ 이다. 또한 카메라 평면에 대한 매니플레이터 위치의 불확실성을 보완하기 위해 $X_{c0}(=C_5)$, $Y_{c0}(=C_6)$ 을 식 (4)에 첨가시키면 비전 시스템의 카메라 모델은 다음과 같다

$$X_m = (C_1^2 + C_2^2 + C_3^2 + C_4^2)f_x + 2(C_2C_3 + C_1C_4)f_y + 2(C_2C_4 - C_1C_3)f_z + C_5 \quad (5)$$

$$Y_m = 2(C_2C_3 - C_1C_4)f_x + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)f_y + 2(C_3C_4 + C_1C_2)f_z + C_6 \quad (6)$$

여기서, X_m 와 Y_m 는 6개의 매개변수가 알려졌다고 가정 할 때 3차원 공간에서 움직이는 로봇 말단 공구계의 위치 벡터가 카메라 좌표계로 변환된 값을 나타낸다.

2.3 매개변수 추정

Fig.1 에서 보여준 로봇 말단 공구계의 위치 벡터 P에 대해서 순간시간(Instant time) t_i ($i = 1, 2, \dots, n$)에

서 비전시스템 데이터와 로봇의 각 관절의 회전각 ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$)이 동시에 연속적으로 얻어진다면 3차원 공간의 로봇 말단 공구계의 위치벡터를 2차원 카메라 좌표 계로 변환하는데 사용되는 6개 매개변수는 각 카메라에 대하여 식(7)에서 주어진 성능지수 $J(C)$ 를 최소화시키는 방법에 의해서 구해진다.

$$J(C) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 \{ [X_m^{i,j} - X_c^{i,j}]^2 + [Y_m^{i,j} - Y_c^{i,j}]^2 \} \quad (7)$$

여기서, n 은 측정된 데이터 개수, $j(j=1\sim 4)$ 는 로봇의 말단공구계에 물린 강체의 위치벡터, $X_c^{i,j}$ 와 $Y_c^{i,j}$ 는 측정된 카메라 좌표계 X, Y 값을 나타내며, $X_m^{i,j}$ 와 $Y_m^{i,j}$ 는 로봇의 공간상 위치 및 매개변수 C_k 에 기초한 카메라 모델 X, Y 값을 나타낸다. 주어진 성능지수 $J(C)$ 를 최소화 시킴으로써 매개변수 수정벡터 ΔC 는 식(8)과 같이 계산된다.

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

여기서, W 는 가중행렬(Weighting matrix)이며, 유수 벡터(Residual vector) R 은 식(9), 식(10)과 같이 주어 진다.

$$R_{2i-1} = X_m^{i,j} - X_c^{i,j} \quad (9)$$

$$R_{2i} = Y_m^{i,j} - Y_c^{i,j} \quad (10)$$

매개변수 C 추정을 위한 목표 지점과의 거리인 R 의 영향력을 목표 지점에 가까이 접근 할 수록 큰 비중을 주기 위해 $W = [V_v]^{-1}$ 로 하였다. 이때 V_v 식(11)와 같이 정의 하였다.

$$V_v = \begin{bmatrix} V_{1,1} & & & & & \\ & V_{2,2} & & & \Phi & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \ddots & & \\ \Phi & & & & V_{2n-1, 2n-1} & \\ & & & & & V_{2n, 2n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서, $V_{2n-1, 2n-1} = [A_x | X_c^j(t_n) - X_c^j(t_m)] + A_{x0}$, $V_{2n, 2n} = [A_y | Y_c^j(t_n) - Y_c^j(t_m)] + A_{y0}$, $A_{x0} = A_{y0} = 1$, $m = j \times n$ 이며, j 는 큐의 수(1~4), A_x 와 A_y 는 가중상수를 나타낸다.

또한, $2n \times 6$ 요소를 갖는 행렬 A 는 성능지수 $J(C)$ 를 최소화하는 자코비안 행렬이며 식(12)과 (13)에 의해서 주어진다.

$$A_{2i-1,k} = \partial X_m^{i,j} / \partial C_k \quad (12)$$

$$A_{2i,k} = \partial Y_m^{i,j} / \partial C_k \quad (13)$$

여기서, i 는 측정된 데이터 개수($i = 1, 2, \dots, n$)이고 k 는 매개변수의 개수($k = 1, 2, \dots, 6$)이다. 매개변수 추정은 근본적으로 반복법이 사용되므로 최초의 매개변수 수정벡터는 가정된 초기값을 가지고 식(14)와 같은 관계식을 사용하여 계산된다.

$$C_{i+1} = C_i + \Delta C \quad (14)$$

2.4 매니플레이터 회전각 추정

매개변수 추정절차에 따라서 매개변수 C 가 얻어지면 목표지점에 대한 로봇의 회전각 추정값($\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4$)는 식(15)와 같이 주어진 성능지수 P 를 최소화시키는 방법에 의해서 얻어진다.

$$P(\theta) = \sum_{l=1}^3 \sum_{j=1}^4 \{ [F_x^{l,j}(f_x(\theta), f_y(\theta), f_z(\theta); C_k^l) - X_{cl}^{l,j}]^2 + [F_y^{l,j}(f_x(\theta), f_y(\theta), f_z(\theta); C_k^l) - Y_{cl}^{l,j}]^2 \} \quad (15)$$

여기서, l 은 카메라의 수(1~3), j 는 큐의 수(1~4), k 는 매개변수의 수(1~6)을 나타낸다. 또한 $X_{cl}^{l,j}$ 와 $Y_{cl}^{l,j}$ 는 목표지점에 대한 l 번째 카메라에 대한 카메라 좌표값을 나타내며, 또한 $F_x^{l,j}$ 와 $F_y^{l,j}$ 는 각 카메라에 대해 독립적으로 추정된 매개변수 C_k 에 근거한 카메라 모델값을 나타낸다. 앞절에 설명되었던 매개변수 추정 방법을 이용하면 회전각 수정벡터 $\Delta\theta$ 는 식(16)과 같다.

$$\Delta\theta = (B^T W B)^{-1} B^T W R \quad (16)$$

여기서, W 는 단위행렬을 사용하였으며, 24×4 의 요소를 갖는 B 행렬은 식(17)과 같다.

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x^{l,j}}{\partial \theta_m} \\ \frac{\partial F_y^{l,j}}{\partial \theta_m} \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서, l 은 카메라의 수(1~3), j 는 큐의 수(1~4), m 은 로봇 회전각($\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4$)을 나타낸다. 24×1 의 요소를 갖는 유수벡터의 행렬 R 은 다음 식(18)과 같이 주어진다.

$$R = \begin{bmatrix} F_x^{l,j} - X_{cl}^{l,j} \\ F_y^{l,j} - Y_{cl}^{l,j} \end{bmatrix} \quad (18)$$

식(17)~(18)을 식(16)에 적용하여 가정된 초기값을 가지고 다음과 같은 관계식을 사용하여 반복적으로 계산된다.

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta \quad (19)$$

3. 실험 장치

3.1 실험 장치 구성

본 연구에서 행해진 실험 장치는 다음과 같이 크게 3종류로 분류되며, 전체적인 개략도는 Fig. 2와 같다.

(1) 비전시스템

3대의 Mono CCD카메라, 모니터 및 FARA MVB-02 흑백 화상처리 보드.

(2) 삼상전자의 4축 SCARA형 FARA SM5 로봇 시스템 및 실험 모형.

(3) IBM 586 PC 및 모니터.

3.2 실험 모형

본 연구에 사용한 실험 모형은 Fig. 3에서 보여 준 것 같이 로봇의 그리퍼에 물려 있으며 규격은 5×5 cm이며 각 큐에 대한 구별은 LED 또는 여러 장치를 사용할 수



Fig. 2 Overall experimental set-up

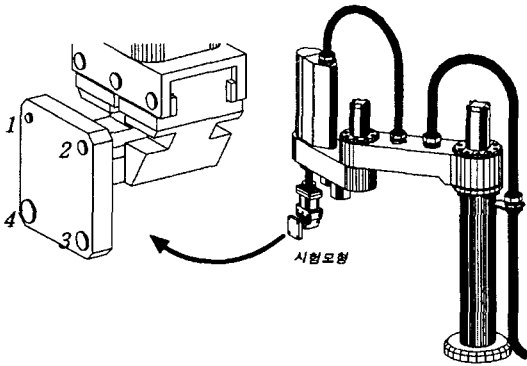


Fig. 3 Experimental test model

있으나 본 연구에서는 4개의 서로 다른 크기의 원형을 큐로 사용하였다.

4. 실험 및 결과 고찰

4.1 강체를 사용한 비전시스템 추정모델 실험 결과

본 실험에서 비전데이터는 각기 다른 위치에 있는 3개의 카메라로부터 얻어지는데, 로봇이 생성된 궤적에 의해서 움직일 때 각 단계에서 로봇 회전각과 비전시스템을 사용하여 회전각에 의해서 좌우되는 로봇의 그리퍼에 물린 강체의 위치에 대한 2차원 카메라 좌표계 데이터가 동시에 얻어진다. 앞에서 언급된 것과 같이 제시된 제어방법은 카메라와 로봇이 놓여 있는 상대적 위치에 대한 관계식이 필요로 하지 않으므로, 여기서 얻어진 비전데이터는 임의적으로 스케일링하여 무차원으로 사용하며 이렇게 얻어진 데이터는 제어법의 유용성을 알아보기 위하여 사용한다.

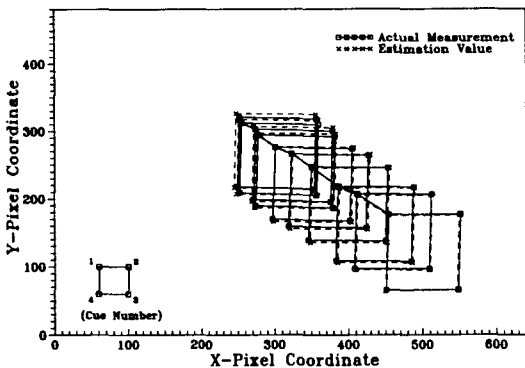


Fig. 4 Comparison of actual measurement and estimation model's fit in camera 1

로봇에 대한 카메라 모델식과 실험을 통하여 얻어진 비전데이터를 식(7)~식(14)에 적용하면, 3개의 카메라에 대한 각각의 6개 매개변수($C_1 \sim C_6$)가 계산된다. 이 계산 과정에서 사용된 가중행렬 W 는 매개변수 C 추정을 위해 목표 지점과의 거리에 대한 영향력을 로봇이 목표 지점에 접근 할 수록 큰 비중을 주기 위해 사용되는데 가중 계수 (Weighting factor)는 0.1을 사용하였다. 계산된 매개변수를 사용하여 식(5)과 식(6)에 주어진 추정모델의 결과치를 구할 수 있다.

Fig. 4는 카메라 좌표계에서 10단계를 갖는 로봇 위치 시퀀스를 보여주며 카메라 1에서 비전시스템을 이용하여 얻어진 값과 6개 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과 값에 대한 비교를 나타낸다. 각 그림에서 부호 \square 는 10 단계를 걸쳐서 로봇이 이동하는 추정 경로를 비전시스템을 이용한 측정 데이터이고 부호 \circ 는 추정된 6개 매개변수를 가지고 계산된 추정모델의 결과 값이다. Fig. 4에서 보여준 것과 같이 로봇의 그리퍼가 쥐고 있는 강체의 위치에 대해 실제로 측정된 비전데이터와 카메라 추정모델의 결과 값은 거의 일치한다.

카메라 2와 카메라 3에서 추정모델의 값은 카메라 1과 같은 결과치를 보여주었다. 실험에서 사용한 3대의 카메라는 로봇 베이스로부터 약 1~1.5m 가량 떨어진 위치에 설치하여 실험하였다.

4.2 강체 배치 제어에 관한 실험

앞에서 언급한 제어 알고리즘을 사용하여 4축 SCARA Type 로봇을 이용한 강체 배치 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 보이고자 한다. 2개의 카메라만 있어도 제어 알고리즘을 행할 수 있으나 본 연구에서는 3개의 카메라를 사용하여 실험하였다. 로봇이 그리퍼에 강체를 쥐고 목표 지점을 향하여 움직이는 동안 동시에 얻어지는 카메라 좌표계 데이터와 함께 식(7)~식(14)을 사용하여 매개변수 C 를 계산하며 이것을 바탕으로 식(15)에 보여준 성능지수 J 를 최소화시키는 방법을 사용하여 목표 지점에 대한 로봇의 회전각이 각 단계에서 추정되는데, 이때 매개변수 C 를 계산하는 과정에서 목표 지점과의 거리에 대한 영향력을 로봇이 목표 지점에 접근 할 수록 큰 비중을 주기 위해 사용되는 가중행렬 W 를 사용하였으며 가중행렬 W 의 가중계수는 0.1을 사용하였다. 보통 최초의 매개변수 C 에 대한 추정값은 수렴하기에 앞서 식(7)~식(14)을 여러번 반복하는 것이 필요로 한다. 그러나 그 이후 로봇이 목표지점으로 향하는 동안 각 단계에서 새로운

측정 데이터를 가지고는 1~2번의 반복에 의해서 매개변수 C가 계산된다. 이렇게 계산된 매개변수를 이용하여 추정된 로봇의 회전각 θ^* 는 각 카메라에서 측정되는 새로운 데이터를 이용하여 새롭게 계산되어진다. 즉, 목표지점에 더 가까이 다가갈수록 로봇의 회전각과 카메라 영역 사이에 존재하는 비선형 관계식을 더 좋게 반영하기 위해서 카메라 모델의 6개 매개변수 추정값이 변화하기 때문에 로봇의 회전각의 추정값 θ^* 는 개선된다. 이때 θ^* 값은 처음 단계에서 임의적인 초기값을 사용하기 때문에 수렴하기 위해서 여러번 반복이 필요하나 그 이후의 단계에서는 1~2번의 반복에 의해서 수렴된다.

Fig. 5~Fig. 7은 카메라 1 영역에서 로봇 그리퍼가 쥐고 있는 강체의 이동 상황을 연속적으로 보여준다. 각 그림에서 부호 \blacksquare 과 \square 는 실제로 카메라로부터 얻어지는 로봇 그리퍼가 쥐고 있는 강체의 위치에 대한 측정 데이터를 나타내는데, 부호 \blacksquare 는 강체에 대한 데이터를 측정하는 순간 시각 이전에 측정된 데이터를 말하며, 부호 \square 는 향후 측정되어지는 데이터를 나타낸다. 부호 \bullet 는 카메라 1 영역에서 목표 지점을 나타내며, 즉 로봇이 그리퍼에 쥐고 있는 강체를 이동시키고자 하는 지점을 나타낸다. 또한 Fig. 5~Fig. 7에서는 로봇이 목표 지점에 가깝게 다가감에 따라 각 단계에서 계산된 C값을 사용하여 로봇의 그리퍼가 쥐고 있는 강체의 위치에 대한 추정모델의 값들을 각 그림에 부호+로 나타내어, 향후 실제로 측정값과 시각적으로 비교하기 위하여 함께 표시하였다. 각 그림에서 보여준 것 같이 측정된 데이터의 개수가 증가할수록 실제측정된 값과 모델추정값은 매우 근사하게 됨을 알 수 있으며, 카메라 2와 3에서도 카메라 1과 같은 결과를 얻었다.

이와 같이 측정된 데이터의 개수가 점점 더 증가할 때 각 단계에서 3대의 카메라에서 얻어진 매개변수 C를 이용하여 로봇이 목표 지점에 도달할 수 있도록 로봇 회전각 추정 값이 식(19)에 의해서 계산된다. Table 2에서 볼 수 있듯이 로봇 회전각이 변화하게 되는데 선형적으로 궤적을 형성해 나가며 목표 지점에 도달할 수 있도록 궤적이 수정되어 감을 알 수 있다. 이리하여 최종적으로 로봇의 그리퍼가 쥐고 있는 강체를 목표 지점에 배치할 수 있다. Table 3은 측정된 비전데이터 개수를 증가하면서 추정된 로봇 회전각을 이용하여 로봇 그리퍼가 쥐고 있는 강체를 목표지점에 배치하였을 때 각 큐의 위치오차값을 3차원 좌표상에서 각 단계별로 보여준다. 여기서 보여준 것 같이 비전데이터 개수가 증가할수록 실제 목표지점

Table 2 Estimated joint angles according to increase of measurement date

Joint Angle	Real Value	Estimation Value			
		Step 4	Step 6	Step 7	Step 9
θ_1	49.0	51.1	50.4	49.9	49.4
θ_2	-51.0	-54.3	-53.4	-52.7	-51.9
d_3	66.0	70.1	68.5	67.3	66.1
θ_4	-4.0	-5.0	-4.4	-4.3	-4.3

Table 3 Estimated cue position values according to increase of measurement data

Cue #	Coord.	Real Value (mm)	Estimation Value (mm)			
			Step 4	Step 6	Step 7	Step 9
1	Fx	518.7	510.3	512.9	515.1	518.3
	Fy	294.2	295.7	294.5	293.8	293.2
	Fz	162.0	158.0	159.5	160.7	161.9
2	Fx	469.0	460.8	463.3	465.4	468.6
	Fy	299.5	302.8	301.0	299.9	299.1
	Fz	162.0	157.9	159.5	160.7	161.9
3	Fx	469.0	460.8	463.3	465.4	468.6
	Fy	299.5	302.8	301.0	299.9	299.1
	Fz	112.0	107.9	109.5	110.7	111.9
4	Fx	518.7	510.3	512.9	515.1	518.3
	Fy	294.2	295.6	294.5	293.8	293.2
	Fz	112.0	107.9	109.5	110.7	111.9

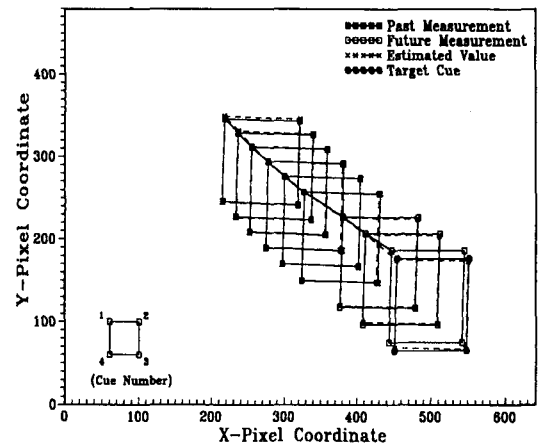


Fig. 5 Predictive sequence for rigid body placement from 6 measurement data in camera 1

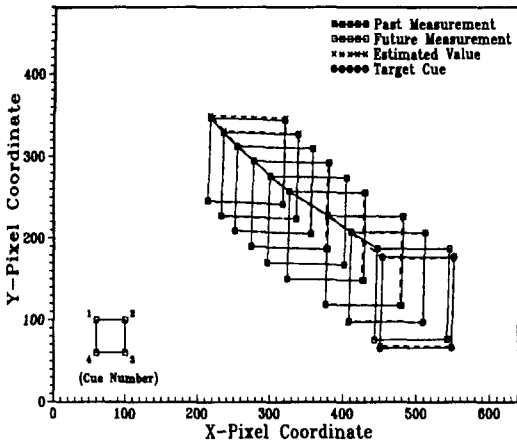


Fig. 6 Predictive sequence for rigid body placement from 7 measurement data in camera 1

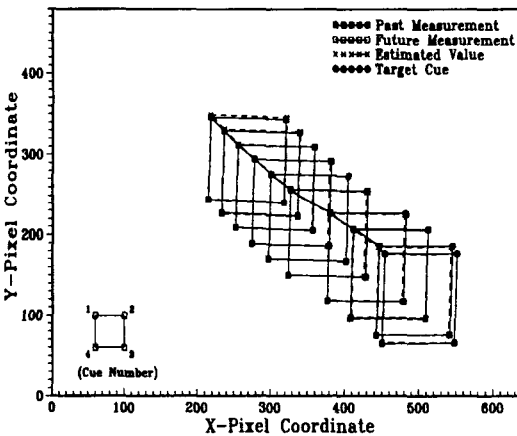


Fig. 7 Predictive sequence for rigid body placement from 9 measurement data in camera 1

의 위치에 접근함을 알 수 있으며, 최종 단계에서 추정된 값은 $\pm 1\text{mm}$ 내의 오차값을 가지고 강체를 목표지점에 정확히 배치하였다. 또한 실험을 통하여 로봇의 그리퍼가 쥐고있는 강체가 전체 이동 궤적의 80% 정도 목적지에 다가감에 따라 더이상 카메라로부터 측정된 데이터 정보 없이도 목적지점에 2mm내외의 오차도내에서 도달할 수 있는 것을 알 수 있었다. 이것은 곧, 로봇이 목표지점에 가까이 접근하면서 전체 궤적의 80%이후 어떠한 이유로 인해서 로봇 그리퍼가 쥐고 있는 강체가 카메라로 측정되는 것을 방해 받았을때도 제시된 제어 기법은 원하는 목적을 수행할 수 있다는 것을 보여준다.

5. 결 론

본 논문에서 제시된 제어 방법이 로봇의 강제 배치 작업을 행하는데 있어서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 논문에서는 3차원 공간의 로봇 말단 공구 계에 물린 강제에 대한 위치를 2차원 카메라 좌표계로 변환 시키는데 사용된 추정모델의 적합성을 보였으며, 기존의 방법들과 다르게 카메라와 로봇 사이의 거리, 카메라 자세 및 초점 거리에 대한 불확실성은 카메라 모델에서 사용되는 6개의 매개변수가 설명하고 있으므로 이에 대한 사전 정보나 보정 없이 사용할 수 있어 복잡성을 피할 수 있다.

(2) 3개의 카메라를 사용한 강제 배치 실험을 통하여 로봇이 원하는 지점에 1mm 내외의 오차를 가지고 로봇이 목표지점에 도달할 수 있으며, 또한 로봇이 목표지점의 80% 도달할 때까지 카메라 측정 데이터를 얻는다면 그 이후 측정 데이터 없이도 로봇을 원하는 지점까지 이동시킬 수 있는 것을 실험을 통하여 확인하였다..

(3) SCARA Type이외의 로봇에 대해서도 그것의 기구학 모델만 변형시키면 위의 제어법은 손쉽게 사용될 수 있으며, 또한 화상 데이터의 처리속도, 해상도 및 각 시스템간의 통신 등의 문제점이 해결된다면 실시간 제어 또는 보다 높은 정밀도를 요구하는 조립 작업등의 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 한국과학재단 지정 지역협력 연구센터인 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터의 1998학년도 연구비의 지원에 의해 연구 되었으며, 또한 시험모형제작에 도움을 주신 기독교병원 시설관리과 안철봉 과장님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Corke, P.I., Video-Rate Robot Visual Servoing, In K. Hashimoto, Editor, Visual Servoing, pp. 257~ 283. World Scientific, 1993.
2. Yoshihiro TODA, Yasuo KONISHI, Hiroyuki ISHIGAKI, Positioning-Control of Robot Manipulator Using Visual Sensor. Int.

- Conference on Control, Automation, Robotics and Vision., pp. 894~898, December, 1996.
3. Emilio J. Gonzalez-Galvan, Steven B. Skaar, Efficient Camera-Space Manipulation using Moments, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3407~3412, April, 1996.
 4. Tani, K., Abe, M. and Ohno, T., "High Precision Manipulator with Visual Sense," Proceedings 7th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, October 19-21, Tokyo: Japan Industrial Robot Association, 1977.
 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. 장완식, 유창규, 비전시스템을 이용한 로봇 시스템의 점배치 실험에 관한 연구, 한국 정밀공학회지 제 13권 제8호 pp.175~183, 8월, 1996.
 7. 장완식, 장종근, 신광수, 평면상에 있는 물체 위치 결정을 위한 컴퓨터 비전시스템의 응용, 한국 공작기계학회지 제7권 제2호 pp. 62~68, 4월, 1998.