

점 배치 작업 시 제시된 로봇 비전 제어알고리즘의 가중행렬의 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of Weighting Matrix of Robot Vision Control Algorithm in Robot Point Placement Task

손재경¹, 장완식^{2,✉}, 성윤경²

Jae Kyung Son¹, Wan Shik Jang^{2,✉}, and Yoon Gyung Sung²

¹ 조선대학교 대학원 기계공학과 (Graduate School of Mechanical Engineering, Chosun Univ.)

² 조선대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chosun Univ.)

✉ Corresponding author: wsjang@chosun.ac.kr, Tel: 062-230-7212

Manuscript received: 2011.11.1 / Revised: 2012.2.27 / Accepted: 2012.6.5

This paper is concerned with the application of the vision control algorithm with weighting matrix in robot point placement task. The proposed vision control algorithm involves four models, which are the robot kinematic model, vision system model, the parameter estimation scheme and robot joint angle estimation scheme. This proposed algorithm is to make the robot move actively, even if relative position between camera and robot, and camera's focal length are unknown. The parameter estimation scheme and joint angle estimation scheme in this proposed algorithm have form of nonlinear equation. In particular, the joint angle estimation model includes several restrictive conditions. For this study, the weighting matrix which gave various weighting near the target was applied to the parameter estimation scheme. Then, this study is to investigate how this change of the weighting matrix will affect the presented vision control algorithm. Finally, the effect of the weighting matrix of robot vision control algorithm is demonstrated experimentally by performing the robot point placement.

Key Words: Robot Point Placement Task (로봇 점 배치 작업), Vision Control Algorithm (비전 제어알고리즘), Parameter Estimation (매개변수 추정), Joint Angle Estimation (관절각 추정), Weighting Matrix (가중행렬)

1. 서론

인간이 수행하기 어려운 3D 환경(Dirty, Dangerous, Difficult)인 스폿 용접 및 도장작업 등에 산업용 로봇이 본격적으로 도입되어, 현재는 국내외 다양한 산업분야 로봇을 도입하고 있다.

이러한 산업로봇은 1980 년에 최초로 적용한 이후 여러 산업 제조분야에 로봇 보급을 급속히 확산되었으며, 1990 년대까지는 거의 인간에 의존한 공작기계의 가공대상물 탈착 및 조립작업 등의 자동

화를 2000 년대 이후 로봇에 비전시스템을 탑재하여 자율성을 확보한 산업용 지능로봇이 등장하여 지금까지의 로봇으로는 할 수 없는 고도작업을 자동화할 수 있게 되었다. 이렇게 제어기술, 센서기술 등의 발전에 의해 로봇의 작업능력이 향상되어 적용하는 범위가 크게 확대되고 있으며, 로봇 비전 센서를 이용하여 로봇의 자율적인 주행경로 결정기술, 2차원 시각정보의 3차원 공간재현, 물체 추적기술 등에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. Hosoda⁸는 다리를 가진 로봇에 비전센서를 사용하여 흔들리는

물체를 추적하여 자세를 제어하는 연구를 수행하였으며, John⁹ 은 한 개의 비전 센서를 이용하여 움직이는 물체의 위치를 예측하여 비전 센서의 자세를 제어하는 연구를 수행하였다.

이렇게 인간이 획득하는 정보의 60%를 시각을 통해 얻는 것과 같이, 산업용 지능로봇의 경우도 정보의 획득 및 상황판단 등에 비전 시스템이 매우 중요한 역할을 하지만 로봇에 비전 시스템을 적용할 때에 가장 중요한 요소인 카메라의 위치, 방향 및 초점거리에 대한 보정이 정확하게 되어 있지 않으면 로봇은 정상적인 위치 보정을 하지 못하고 오 동작을 할 우려가 있다.^{4,9}

본 연구는 위와 같은 보정문제를 해결하기 위해 제안된 6 개의 매개변수를 포함하는 비전 시스템 모델을 적용하여 카메라와 로봇과의 상대적인 위치와 카메라의 초점 거리가 알려지지 않아도 제어가 가능한 효과적인 비전 제어알고리즘을 제시하며, 정밀성을 요하는 고도의 산업현장에 적용할 수 있도록 제안된 매개변수 추정모델에 일반적인 단위 행렬 대신에 목표점 근처 최근 정보에 비중을 두는 가중행렬을 적용한 점 배치 실험을 행하여 제안된 비전 제어 알고리즘의 가중행렬의 영향 조사하였다.

2. 로봇 비전 제어알고리즘

본 논문은 제시된 비전 제어알고리즘에 목표점 근처 최근 정보에 비중을 두는 가중행렬을 적용한 연구이다. 또한, Fig. 1 은 비전 시스템 모델 매개변수 추정 모델, 관절각 추정 모델로 구성된 비전

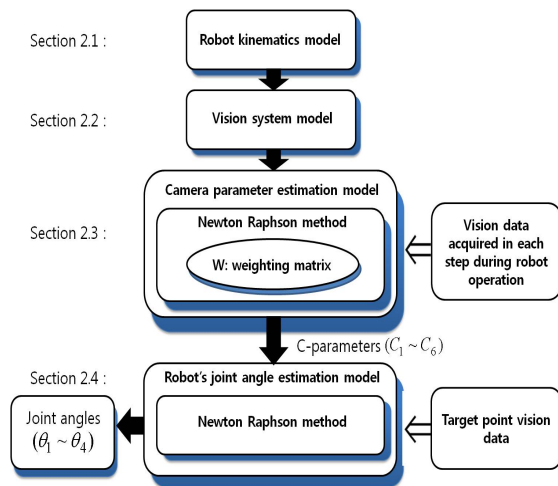


Fig. 1 Flow-chart of robot's vision control algorithm

제어알고리즘의 전체적인 흐름을 보여주며 각 절에서 설명을 한다.

2.1 로봇 기구학 모델

Fig. 2 는 본 연구에 사용한 삼성 SM7 4 축 로봇의 각 관절 좌표를 보여주며, 정기구학 모델은 식 (1)과 같다.^{1,13}

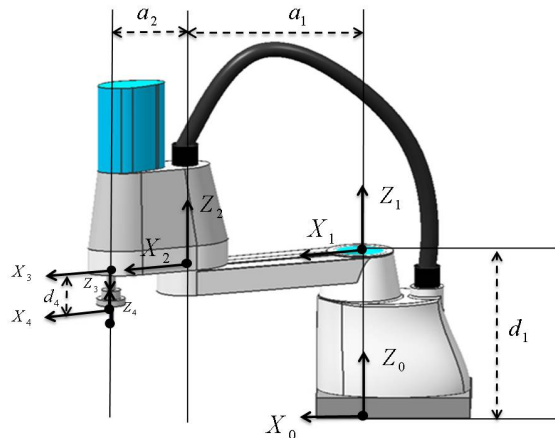


Fig. 2 Geometric configuration of Samsung SM7 4-axis robot

$$\begin{aligned}
 F_x &= \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_x - \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_y \\
 &\quad + a_2(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos \theta_1 \\
 F_y &= \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_x + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_y \\
 &\quad + a_2(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos \theta_1 \\
 F_z &= P_z + d_1 - d_3 - d_4
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, $a_1 (= 400 \text{ mm})$, $a_2 (= 250 \text{ mm})$, $d_1 (= 387 \text{ mm})$, $d_4 (= 56.35 \text{ mm})$ 는 Denavit-Hartenberg 링크 인자 값을 나타낸다. 또한, $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 는 로봇의 관절각을 나타내며, P_x, P_y, P_z 는 마지막 관절 좌표계 원점에서 로봇 끝점 P까지의 위치벡터 성분으로 식(2)와 같다.

$$(P_x, P_y, P_z) = (0, 0, -33.35 \text{ mm})
 \tag{2}$$

2.2 비전 시스템 모델

비전 시스템 모델은 6 개의 불확실한 매개변수를 사용하여 3 차원 공간상에 움직이는 로봇 끝점의 위치벡터를 2 차원 카메라 좌표계로 변환

하기 위해 로봇 기구학 모델과 결합하여 식(3)과 같이 나타낸다.¹⁰⁻¹³

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

여기서,

$$\begin{aligned} C_{11} &= C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2, & C_{12} &= 2(C_2C_3 + C_1C_4), \\ C_{13} &= 2(C_2C_4 - C_1C_3), & C_{21} &= 2(C_2C_3 - C_1C_4), \\ C_{22} &= C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2, & C_{23} &= 2(C_3C_4 + C_1C_2) \end{aligned} \quad (4)$$

또한, X_m 과 Y_m 은 2.1 절의 3 차원 로봇 끝점 P 의 위치벡터(F_x, F_y, F_z)를 2 차원 카메라 좌표계로 변환시키는 비전 시스템 모델 값이며, 6 개의 C 매개변수는 카메라 방위 및 초점거리의 변화성 ($C_1 \sim C_4$)과 카메라에 대한 로봇 위치의 불확실성 (C_5, C_6)을 나타낸다.

2.3 매개변수 추정기법

로봇이 임의의 운동궤적을 따라 목표점 근처까지 이동하는 각 단계에서 비전 데이터와 로봇 관절 각이 얻어진다면, 3 차원 로봇 끝점 위치를 2 차원 카메라 좌표계로 변환 하기 위해 사용된 비전 시스템 모델에 포함된 6 개의 매개변수 $C_k (k=1 \sim 6)$ 를 추정하기 위해 식(5)와 같이 성능지수를 정의한다.

$$J(C_k) = \sum_{i=1}^n \left[X_m^i - X_c^i \right]^2 + \left[Y_m^i - Y_c^i \right]^2 \quad (5)$$

여기서, $i(=1, \dots, n)$ 는 로봇 운동궤적에서 이동단계 수를 나타내며, X_c^i, Y_c^i 는 로봇의 각 이동단계에서 카메라를 통해 얻어진 로봇 끝점 P 에 대한 실제 비전 데이터 값들이다.

식(5)에 주어진 성능지수 $J(C_k)$ 를 최소화 하면 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\underline{g} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_m^i - X_c^i \\ Y_m^i - Y_c^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)의 매개변수를 계산하기 위해 Newton-

Raphson 방법^{2,13} 을 사용하면 다음과 같이 주어진다.

$$C_{k,j+1} = C_{k,j} - \left[\frac{\partial \underline{g}(C_{k,j})}{\partial C_k} \right]^{-1} \underline{g}(C_{k,j}) = C_{k,j} + \Delta C \quad (7)$$

이 때, 식(7)의 ΔC 는 일반적으로 정행렬이 아니므로 ΔC 에 대한 역행렬을 구하기 위해서 최소 노름해(minimum norm solution)방법² 을 적용하여 식(8)과 같이 주어진다.

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

식(8)을 식(7)에 대입하면 다음과 같이 매개변수 추정 모델 식이 주어진다.

$$C_{k,j+1} = C_{k,j} + (A^T W A)^{-1} A^T W R \quad (9)$$

여기서, j 는 계산과정 반복횟수, A 는 $2n \times 6$ 의 크기를 가지는 자코비안 행렬로 식(10)과 같이 주어지며,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^i}{\partial C_1} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_2} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_3} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_4} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_5} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_6} \\ \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_1} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_2} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_3} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_4} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_5} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_6} \end{bmatrix} \quad (10)$$

R 은 $2n \times 1$ 요소를 가지는 유수벡터로 식(11)와 같이 주어진다.

$$R = \begin{bmatrix} X_m^i - X_c^i \\ Y_m^i - Y_c^i \end{bmatrix} \quad (11)$$

식(9) 의 W 에 단위행렬을 사용할 경우에는 로봇이 목표점에 도달 할 때까지의 모든 데이터에 동등한 비중을 두게 된다. 하지만 본 연구에서는 로봇이 목표지점에 가깝게 접근했을 때 획득한 비전 데이터가 이미 획득했던 비전 데이터 보다 더 큰 중요성을 가지므로 목표점에 대한 정밀한 로봇 비전 제어를 위해 가중행렬을 적용하였다. 이에

대한 가중행렬을 식(12)에 나타냈다.²

$$W = V^{-1} = \begin{bmatrix} V_{1,1} & & & & \\ & V_{2,2} & & \emptyset & \\ & & \ddots & & \\ & & & \emptyset & V_{2n-1,2n-1} \\ & & & & & V_{2n,2n} \end{bmatrix}^{-1} \quad (12)$$

여기서, 식(12)의 대각요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{2n-1,2n-1} &= [a_x | X_c(t_n) - X_c(t_i) + a_{x_0}]^2, \\ V_{2n,2n} &= [a_y | Y_c(t_n) - Y_c(t_i) + a_{y_0}]^2 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, t_i ($i=1, \dots, n$) 는 로봇이 목표점으로 이동하는 각각의 시간을 나타내고, t_n 은 로봇의 마지막 이동단계에서의 시간을 나타낸다. 또한, a_x, a_y 는 가장 최근 데이터에 비중을 두기 위해 사용되는 가중계수이다. 만약 가중계수를 사용하지 않고 로봇이 운동하는 동안 획득한 모든 비전 데이터에 동등한 비중을 주기 위해서는 가중행렬 W 를 단위행렬로 사용하여야 하는데 이를 위해 $a_{x_0} = a_{y_0} = 1$ 로 설정하였다.

본 연구는 가중계수 a_x, a_y 를 변화시켜 로봇 점 배치 실험을 통해 최적의 가중계수를 얻고자 하며, 각 카메라에 대해 추정된 6 개 매개변수들은 2.4 절의 로봇 관절각 추정기법에 사용된다.

2.4 로봇 관절각 추정기법

로봇 관절각 추정모델은 2.3 절의 매개변수 추정 기법에 의하여 각 카메라에 대한 6 개 매개변수를 구한 후, 이를 이용하여 목표점에 대한 로봇의 관절각 θ_i ($i=1 \sim 4$) 을 추정 하기 위해 식(14)와 같이 성능지수를 정의하였다.

$$J(\theta_i) = \sum_{q=1}^3 \left[X_m^q \left\{ F_x(\theta_i), F_y(\theta_i), F_z(\theta_i); C_k^q - X_i^q \right\} \right]^2 + \left[Y_m^q \left\{ F_x(\theta_i), F_y(\theta_i), F_z(\theta_i); C_k^q - Y_i^q \right\} \right]^2 \quad (14)$$

여기서, q ($=1 \sim 3$) 는 카메라의 개수, k ($=1 \sim 6$) 는 매개변수의 수를 나타낸다. 또한 X_i^q 와 Y_i^q 는 목표점의 q 번째 카메라의 좌표 값을 나타내며, X_m^q 와

Y_m^q 는 추정된 매개변수에 근거한 q 번째 카메라의 비전 시스템 모델의 추정 값이다.

매개변수 추정기법에서 설명된 Newton-Raphson 방법을 식(14)에 적용하면 다음과 같다.

$$\theta_{i,j+1} = \theta_{i,j} + (B^T W B)^{-1} B^T W R \quad (15)$$

여기서, j 는 반복횟수이며, W 가중행렬로서 본문에서는 단위행렬을 사용하였다. 또한, B 는 $(2 \times q) \times 4$ 의 크기를 가지는 자코비안 행렬로 식(16)과 같이 주어지며,

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^q}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X_m^q}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X_m^q}{\partial d_3} & \frac{\partial X_m^q}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial Y_m^q}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y_m^q}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y_m^q}{\partial d_3} & \frac{\partial Y_m^q}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \quad (16)$$

R 은 $(2 \times q) \times 1$ 의 크기를 가지는 유수벡터로 식(17)와 같이 주어진다.

$$R = \begin{bmatrix} X_m^q - X_c^q \\ Y_m^q - Y_c^q \end{bmatrix} \quad (17)$$

최종적으로 식(15)에서 계산된 로봇 관절각은 로봇을 목표점으로 구동하기 위해 사용된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

3.1.1 실험장치 구성

본 연구에 사용된 실험장치 구성은 Fig. 3 과 Fig. 4 와 같이 크게 비전 시스템, 로봇 시스템, PC 시스템으로 구성되었다.



Fig. 3 Experimental apparatus

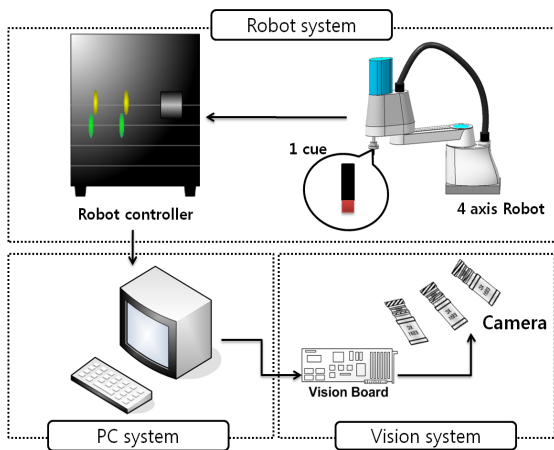


Fig. 4 Experimental set-up

3.1.2 실험장치 사양

실험장치의 세부 사양은 Table 1 과 같이 640×480 의 해상도를 지원하는 비전 시스템과 삼성 SM7 4 축 스카라 타입의 로봇 시스템 및 2.4GHz 의 산업용 보드를 사용하는 PC 시스템을 사용하였다.

Table 1 Specification of experimental apparatus

Apparatus	Spec
Vision system	CCD camera : - Sony XC-ES51 - Avenir TV zoom lens Vision board : - Matrox meteor2-MC4 - Resolution (640X480) - Image level (256)
Robot system	Robot : - Samsung SM7 4axis Robot controller : - MMC-BDPO41PNB
PC	MB800V for industry CPU : 2.8 GHz

3.1.3 시험모형

시험모형은 비전 데이터 획득 시 발생할 수 있는 오차를 줄이면서 로봇의 허용 중량을 고려하여 플라스틱 봉과 한 개의 LED 를 조합하여 제작하였다. 또한 시험모형의 치수는 Fig. 5 에서 보여준다.

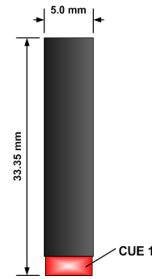


Fig. 5 Dimensions of 1-cue test model used for experiment

3.2 실험방법

본 실험에서 사용된 삼성 SM7 로봇의 운동궤적을 Fig. 6 에서 보여주며, 로봇이 목표점에 도달하기 까지 251.28 mm 거리를 40 이동단계로 설정하였다.

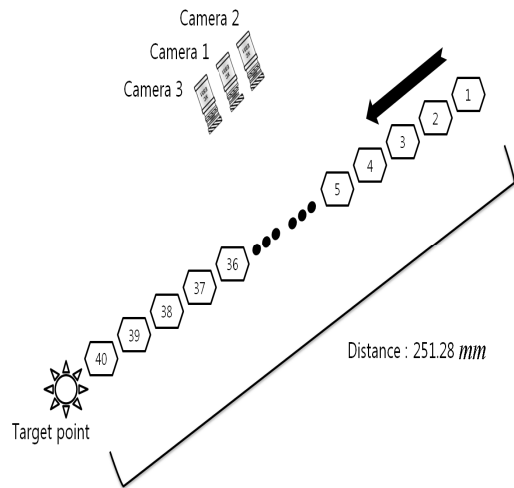


Fig. 6 Robot's trajectory

본 연구는 2 장에 제시된 로봇 비전 제어 알고리즘을 로봇 점 배치작업 실험에 적용할 때, 매개 변수 추정기법에 사용된 가중행렬의 변화에 따라 어떠한 영향을 받는지를 해석하고자 한다.

카메라의 개수가 증가함에 따라서 비전 시스템 추정모델을 통한 위치결정에서 오차가 줄어든다고 보기는 힘들다는 첫 번째 선행 연구결과¹⁰와 카메라 배치가 로봇 위치제어에 큰 영향을 미치지 못하나 좀 더 높은 정밀도를 위해서는 로봇의 작업 영역에 카메라를 집중적으로 배치하는 것이 바람직하다는 두 번째 선행 연구 결과¹¹에 따라 최적의 실험 환경에서 향상된 결과를 얻기 위하여 로

봇 운동 궤적이 하나의 이미지 평면에 전부 보이도록 베이스로부터 2.0 m ~ 2.5 m 거리에 3 대의 카메라를 집중 배치하였다.

Fig. 7 에 나타낸 본 연구의 실험절차에 대한 설명은 다음과 같다.

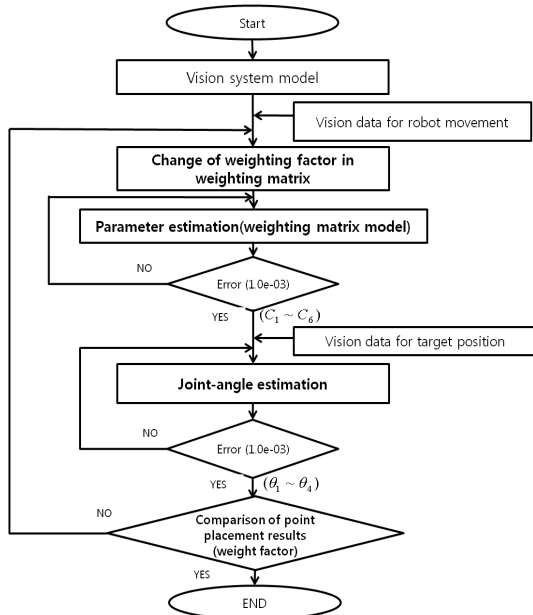


Fig. 7 Experimental Procedures of robot vision control algorithm

- ① 로봇이 Fig. 6 의 이동궤적을 따라 목표점을 향해 이동하는 때 단계마다 3 대의 카메라로부터 비전 데이터를 획득한다.
- ② 가중행렬의 크기를 설정을 위해 가중계수를 변화시킨다.
- ③ 각각의 카메라에서 획득한 비전 데이터를 매개변수 추정기법에 적용하여 각 카메라에 대한 매개변수 ($C_1 \sim C_6$) 를 추정한다. 이 때 매개변수 추정기법에 목표점 근처 최근 비전 데이터에 비중을 두는 가중행렬을 적용한다.
- ④ 추정된 매개변수와 목표점의 비전 데이터를 관절각 추정기법에 적용하여 목표점에 대한 로봇 관절각을 추정한다.
- ⑤ 가중계수의 변화에 따른 점 배치 작업 결과를 각각 비교하여 오차가 커지기 전까지 가중계수를 변화시켜가며 ②, ③, ④ 단계를 반복 수행한다.

- ⑥ 목표점에 대하여 추정된 관절각의 좌표 값과 실제 좌표 값의 차이를 비교하여 로봇 비전 제어 알고리즘에 적용된 가중행렬의 영향 및 최적의 가중계수를 조사한다.

4. 실험결과

4.1 가중계수 변화의 영향

매개변수 추정기법에 적용한 가중행렬에서 가중계수의 변화에 따른 가중행렬의 변화는 Fig. 8 에서 보여 준 것 같이 획득된 비전 데이터 중 목표점의 바로 전 단계의 데이터는 모든 가중행렬 모델에서 1 의 가중치를 가지며, 가중계수가 증가함에 따라 목표점 근처 최근 데이터를 제외한 다른 측정데이터에 적용되는 가중행렬의 값이 점점 0 에 가까워지고 있음을 알 수 있다. 이리하여, 가중계수의 크기가 증가하면 목표점에 좀더 비중을 주는 가중행렬이 매개변수 추정 기법에 적용됨을 보여준다.

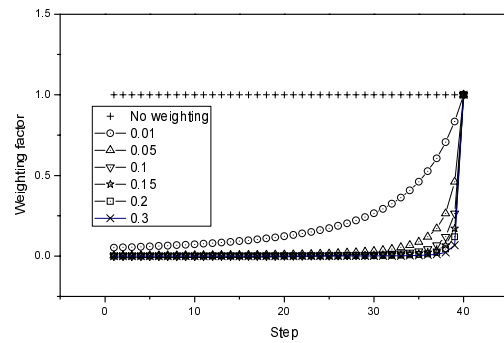


Fig. 8 Effectiveness of weighting factor

4.2 비전 시스템모델의 적합성

본 연구에서는 2.3 절의 각 카메라에 대한 매개변수 추정에 필요한 비전 시스템모델 값들 중 목표점에 대한 모델 값은 필요하지 않지만 매개변수 추정기법에 목표점에 비중을 두는 정도가 다른 가중행렬을 적용하였을 때의 영향을 조사하기 위해 목표점에 대한 비전 시스템모델 값까지 추정하였으며, 각 카메라에 대하여 Table 2, Table 3, Table 4 에 제시하였다.

3 대의 카메라에서 측정한 목표점에 대한 실제 비전 데이터와 추정된 6 개의 매개변수를 가지고 계산된 각 카메라의 비전 시스템 모델의 추정 값의 오차는 Camera 1 에서 $\pm 0.203 \text{ pixel} \sim \pm 0.311 \text{ pixel}$,

Camera 2 에서 ±0.092 pixel ~ 0.132 pixel 그리고 Camera 3 에서 ±0.114 pixel ~ 0.181 pixel 정도의 근사함을 보여주어 본 연구에 사용된 비전 시스템모델의 적합성을 확인하였다.

Table 2 Comparison of estimated target vision data in camera 1

Weighting factor	X target (pixel)		Y target (pixel)		Average error
	Real	Esti-mation	Real	Esti-mation	
No weighting	515.5	515.856	289.75	289.680	0.257
0.05		515.701		289.524	0.214
0.1		515.639		289.435	0.243
0.15		515.600		289.382	0.270
0.2		515.575		289.349	0.288
0.3		515.546		289.312	0.311

Table 3 Comparison of estimated target vision data in camera 2

Weighting factor	X target (pixel)		Y target (pixel)		Average error
	Real	Esti-mation	Real	Esti-mation	
No weighting	522.0	521.819	305.5	305.490	0.128
0.05		521.895		305.578	0.092
0.1		521.932		305.624	0.100
0.15		521.959		305.651	0.111
0.2		521.977		305.668	0.120
0.3		522.000		305.687	0.132

Table 4 Comparison of estimated target vision data in camera 3

Weighting factor	X target (pixel)		Y target (pixel)		Average error
	Real	Esti-mation	Real	Esti-mation	
No weighting	509.5	509.317	299.4	299.453	0.139
0.05		509.395		299.524	0.126
0.1		509.418		299.568	0.162
0.15		509.430		299.594	0.142
0.2		509.437		299.611	0.169
0.3		509.442		299.630	0.181

4.3 로봇 점 배치 작업의 실험결과

4.2 절은 4.1 절의 다양한 가중행렬에 따른 비전 시스템 모델의 적합성을 보여주었다. 이리하여 4.3 절에서는 4.2 절의 결과 값을 근거로 목표점에 대한 로봇 관절각 추정을 행하여 목표점 근처에 비중을 두는 가중행렬이 로봇 점 배치 작업에 미치는 영향을 조사하였다.

로봇을 목표점을 향해 구동 후 로봇제어기로부터 얻어진 엔코더 값을 사용하여 측정된 로봇 위치 값과 실제 목표점 값을 비교한 오차 값은 식 (18)과 같이 r.m.s. 오차로 정의하였으며, 그 결과를 Table 5 와 Fig. 9 에 나타내었다.³

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{(e_x)^2 + (e_y)^2 + (e_z)^2}{3}} \quad (18)$$

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

각각의 가중행렬을 적용한 점 배치 작업의 실험결과는 Table 5 와 Fig. 9 에서 보여준 것 같이 가중행렬을 일반적인 단위 행렬을 적용한 결과인 ±0.625 mm 와 비교하면 ±0.2 mm 이상의 향상된 오차를 갖는다. 또한 목표점에 다양한 비중을 두는 가중행렬을 적용한 실험들은 거의 비슷한 결과를 갖지만, 특히 가중계수 0.05 근처에서 더욱 향상된 정확도를 가짐을 확인하였다.

Table 5 Comparison of the actual and measured value for target in x-y-z coordinate in each weighting factor

Weighting factor	Fx (mm)	Fy (mm)	Fz (mm)	Average Error (mm)
No weighting	563.790	240.452	132.355	0.625
0.05	563.065	240.997	132.218	0.328
0.1	563.390	241.456	132.300	0.378
0.15	562.847	241.033	132.184	0.402
0.2	562.818	241.040	132.181	0.414
0.3	562.792	241.047	132.179	0.424
Actual value	563.390	241.456	132.300	X

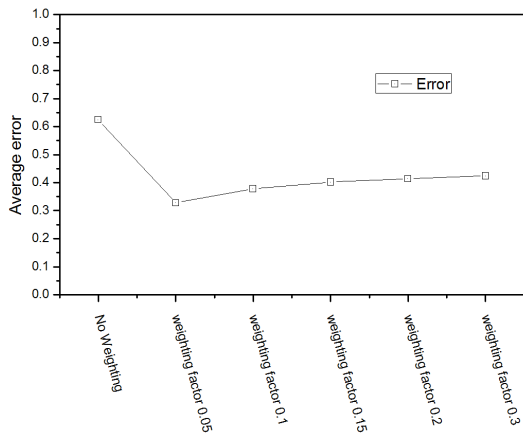


Fig. 9 Average error in each weighting factor

5. 결론

본 논문은 로봇 비전 제어 알고리즘을 이용한 점 배치 작업 시 목표점 근처 최근 데이터에 비중을 두는 가중행렬을 적용함으로써 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 이를 위해 40 단계를 가지는 임의의 운동궤적에 대해 다양한 크기의 가중행렬을 적용한 실험을 행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 로봇 비전 제어 알고리즘에서 6 개의 카메라 매개변수를 추정하는 매개변수 추정기법에 목표점 근처 최근 데이터에 비중을 두는 가중행렬을 적용 하였을 때 일반적인 단위 행렬을 적용한 경우보다 ±0.2 mm 이상 향상된 추정 결과를 얻었다.

(2) 또한, 목표점 근처 최근 데이터에 비중을 설정하기 위해 가중계수를 0.05 ~ 0.3 까지 변화시키면 점 배치 작업의 오차는 Table 5 에서 보여주는 것 같이 가중계수 0.05 에서 실험에 의한 최적의 결과인 ±0.328 mm 를 얻으며, 가중계수 0.1 ~ 0.3 에서는 ±0.378 mm ~ ±0.424 mm 로 실험결과 값이 거의 비슷함을 알 수 있다. 그 이후 가중계수를 증가시키면 오차는 상승한다.

(3) 다양한 로봇 궤적을 설정하여 가중계수 값의 변화를 적용한 실험들을 행한 결과, 모든 로봇 궤적에서 가중계수 0.05 근처에서 최적의 값을 얻었다.

(4) 최종적으로, 여러 가중계수 중 가장 최적의 가중계수인 0.05 을 사용한 가중행렬을 로봇 비전 제어 알고리즘에 적용하면 로봇 점 배치 작업 시 가장 최적의 추정 결과를 얻을 수 있다.

후 기

이 논문은 2010 학년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기본연구사업(유형 1)임(2010-0021223).

참고문헌

- John, J. C., "Introduction to Robotics Mechanics and Control, 2nd ed.," Addison-Wesley, p. 84, 1989.
- Junkins, J. L., "An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems," Sijthoff and Noordhoff, pp. 29-33, 1978.
- David, F., Robert, P., and Roger, P., "Statistics," W. W. Norton, pp. 58-59, 1978.
- Kelly, R., Carelli, R., Nasisis, O., Kuchen, B., and Reyes, F., "Stable Visual Servoing of Camera-inhand Robotics Systems," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 5, No. 1, pp. 39-48, 2000.
- Yoshihiro, T., Tasuo, K., and Hiroyuki, I., "Positioning-Control of Robot Manipulator Using Visual Sensor," Int. Conference on Control, Automation, Robotics, and Vision, pp. 894-898, 1996.
- Bacakoglu, H. and Kamel, M., "An Optimized Two-Step Camera Calibration Method," Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1347-1352, 1997.
- Machiko, S. J. and Aggarwal, K., "Estimation of Position and Orientation from Image Sequence of a Circle," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2252-2257, 1997.
- Hosoda, K., Kamado, M., and Asada, M., "Vision-Based Servoing Control for Legged Robots," Proc. of IEEE, pp. 3154-3159, 1997.
- John, T. F. and LEE, C. S. G., "Adaptive Image Feature Prediction and Control for Visual Tracking with a Hand-Eye Coordinated Camera," IEEE Trans., Vol. 20, No. 5, pp. 1172-1182, 1990.
- Jang, W. S., Kim, K. S., Kim, K. Y., and Ahn, H. C., "An Experimental Study on the Optimal Number of Cameras Used for Vision Control System," KSMTE, Vol. 13, No. 2, pp. 94-103, 2004.
- Min, K. U. and Jang, W. S., "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, 2010.
12. Son, J. K., Jang, W. S., and Min, K. U., "An experimental study on the effectiveness of robot vision control scheme in discontinuous robot's trajectory caused by obstacle," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 127-128, 2009.
 13. Son, J. K., "An experimental study on the practicality of vision control scheme used for robot's point placement task in discontinuous trajectory," M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chosun University, 2010.