

이동 타겟 추적을 위한 N-R과 EKF방법의 로봇비전제어기법에 관한 연구홍성문^a, 장완식^{a*}, 김재명^a**A Study on the Robot Vision Control Schemes of N-R and EKF Methods for Tracking the Moving Targets**Sung-Mun Hong^a, Wan-Shik Jang^{a*}, Jae-Meung Kim^a^a *Det. of Mechanical Engineering, Chosun University, Seoseok, Dong-gu, Gwang-ju 501-759, Korea***ARTICLE INFO***Article history:*

Received 11 April 2014
 Revised 16 July 2014
 Accepted 11 September 2014

Keywords:

Extended Kalman Filtering
 Newton-Raphson
 Robot vision control scheme
 Tracking
 Moving target

ABSTRACT

This paper presents the robot vision control schemes based on the Newton-Raphson (N-R) and the Extended Kalman Filter (EKF) methods for the tracking of moving targets. The vision system model used in this study involves the six camera parameters. The difference is that refers to the uncertainty of the camera's orientation and focal length, and refers to the unknown relative position between the camera and the robot. Both N-R and EKF methods are employed towards the estimation of the six camera parameters. Based on the these six parameters estimated using three cameras, the robot's joint angles are computed with respect to the moving targets, using both N-R and EKF methods. The two robot vision control schemes are tested by tracking the moving target experimentally. Given the experimental results, the two robot control schemes are compared in order to evaluate their strengths and weaknesses.

1. 서론

컴퓨터와 센서기술의 발전은 산업용 로봇이 더 정밀하면서 다양한 작업을 할 수 있도록 연구되어지고 있다. 수동적인 작업을 벗어나기 위한 프로그래밍 기술은 기본적으로, 복잡한 작업 환경에 대처하기 위해선 센서 결합기술이 필수적이다. 특히, 센서결합 기술의 경우 반복적인 작업을 수행 할 때에는 특별히 많은 센서가 필요하지 않고 정밀도가 강조되고 있다. 인간의 경우 상황을 판단하고 대처 할 때에 시각이 중요한 감각중의 하나이다. 이처럼 중요한 시각기능을 로봇분야에 적용하기 위해 비전시스템이 활용되고 있다. 이것은 제한적이기는 하지만 로봇에게 지능을 부여함으로써 다양하고 복잡한 작업조건을 판단하고 정확하게 처리하도록 만들었다.

그러나 실제 산업 현장에서 비전시스템을 결합한 로봇을 적용하는데 있어서 크게 2가지 문제점이 발생하게 된다.

첫 번째 문제는 CCD카메라에 의해서 측정된 많은 데이터를 저장하기 위한 메모리의 확보와 메모리 손실에 따른 처리 속도의 저하이다. 이에 대해 H/W적인 부분에 있어서 1970년대 후반부터 이루어진 LSI (Large Scale Integrate)로 대표되는 대규모 기억소자의 꾸준한 개발로 인해 메모리 문제를 해결하였으며, 마이크로프로세서의 발달은 많은 양의 데이터에 의한 처리 속도저하와 복잡한 알고리즘에 의한 처리 속도저하에 대한 문제를 상당수 해결하였다. 또한 이치화 기법을 사용한다든지 큐(cue)를 사용하여 데이터의 양을 최소화 하며 작업의 조건과 특성을 명확히 함으로써 비전시스템을 특정 작업에만 적합하도록 적용하고, 획득되어지는 데이

* Corresponding author. Tel.: +82-62-230-7212

Fax: +82-62-230-7045

E-mail address: wsjang@chosun.ac.kr (Wan-Shik Jang).

터의 양을 최소로 줄이는 등의 물리적인 작업환경을 통해 데이터를 처리하는데 소요되는 시간들을 줄이는 방법들이 연구되었다^{11,21}.

두 번째는 로봇과 비전 시스템간의 효과적인 보정을 위해 3차원 공간에서 움직이는 로봇의 위치를 2차원 카메라 좌표계로 매핑하기 위한 로봇 좌표계와 카메라 좌표계 상호간의 관계에 대한 정보가 정확해야 한다는 것이다. 이 문제에 대한 대표적인 연구는 Kelly¹³가 카메라 이미지 평면상의 특징점 오차를 사용하는 이미지 제어기반 알고리즘을 제시하였으며, Yoshihiro¹⁴ 등은 카메라와 로봇 사이의 상대적인 위치 변화가 있는 경우에도 보정이 필요하지 않는 퍼지 논리를 사용하였으며, Bacakoglu¹⁵ 등은 카메라 내부 매개변수와 외부 매개변수를 결정하는 과정에 대한 최적화된 3단계 카메라 보정 알고리즘을 개발하였다. 또한, Tsai¹⁶는 정확하게 알려진 물리적인 공간의 점들에 대해 매니플레이션을 하기 전에 카메라에 대한 보정과 이러한 점들의 3차원 직교좌표계를 2차원 영상평면좌표계로 일치시키기 위한 모델에서 매개변수들을 추정하는 방법을 제시하였으며, Beardsley¹⁷ 등은 보정된 카메라와 3차원 기하학적 구조를 기본으로 하는 기존의 연구방법과 달리 카메라에 대한 보정이 필요하지 않고 초점거리와 같은 카메라의 내부 매개변수가 도중에 자유로이 변경될 수 있는 연구 방법을 제시하였다.

연구된 다양한 제어기법 중 수치해석적으로 해석하기 위해서 N-R방법과 EKF방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 반복기법인 N-R방법을 사용한 대표적인 연구는 Skaar⁸ 등이 2개 이상의 카메라를 이용한 공간상 로봇 구동 알고리즘을 연구하였으며, Wedepohl⁹ 등은 주파수의 변환 매트릭스를 평가하는데 사용하였다. 또한 Piepmeier¹⁰은 고정된 이미지와 보정되지 않은 비전-가이드 로봇 추적 제어를 위한 동적 quasi-Newton 방법을 개발하고 증명하였으며, Shahamiri¹¹는 Newton method를 사용하여 궤적이 단수 또는 단수지역을 피하도록 온라인으로 궤적이 수정되는 방법과 간단한 시각 장애물의 회피를 위한 바이어스 방법을 적용하는 방법을 제안하고, Yang¹² 등은 6축 평형로봇에 N-R방법을 적용하여 정기구학에 대한 해석을 하였다. 순환기법인 EKF방법을 사용한 대표적인 연구는 Kalman^{13,14}이 선형 필터링 및 예측 문제에 대한 새로운 제시를 하였으며, Kerr¹⁵는 레이더에서 목표의 추적에 사용하였다. 또한 Shademan¹⁶ 등은 비전기반 위치제어에 EKF를 사용하였고, Lippiello¹⁷ 등 이동물체의 위치와 방위에 대한 비전시스템을 이용한 실시간 추정 값을 향상시키기 위해 적응 EKF (Adaptive EKF)방법을 사용하였으며, Chen¹⁸은 Extended Kalman Filter를 이용하여 휴머노이드 로봇 비전 시스템에서 사용할 수 있는 카메라 교정 방법을 제시하였다.

본 논문은 카메라 방위와 초점거리의 불확실성 뿐만 아니라, 알려지지 않은 카메라와 로봇 사이의 상대적인 위치를 설명해주는 6개의 매개변수를 포함한 비전시스템 모델을 사용하였다. 단, 본

논문에서 제안된 N-R방법과 EKF방법을 적용한 비전제어기법 적용할 때, 로봇 말단부에 부착된 타겟은 임의적으로 설정한 로봇계적을 따라 이동시 본 연구에서 사용된 3대의 각각 카메라 이미지 평면상에 벗어나지 않으면서 화면 가득히 포착되도록 배치하였다¹⁹. N-R방법과 EKF방법을 적용하여 개발한 두 개의 로봇 비전 제어 알고리즘은 Fig. 6에 보여준 로봇 말단부에 부착된 1개 큐를 시험모형으로 이동 타겟에 대한 추적 실험을 하였으며, 본 실험결과는 비전시스템을 이용한 로봇 용접시 용접선 추적 작업등에 적용할 수 있을 것으로 기대한다. N-R방법과 EKF방법의 실험을 통해 얻어진 데이터를 위치 정밀도와 처리시간을 비교 평가하여 장단점을 알아보고자 한다.

2. 로봇 비전 시스템

2.1 기구학 모델

로봇의 기구학은 로봇에 대한 관점각이 주어졌을 때, 로봇 베이스 좌표계에 대한 로봇의 위치 벡터를 구하는 것이다.

Fig. 1은 본 연구의 점 이동 타겟 추적실험에 사용한 4축 스카타입 로봇의 링크 인자와 관절 좌표계의 설정을 보여주며, Table 1은 로봇의 4개의 관절에 대한 Denavit- Hartenberg (D-H) 링크 인자²⁰를 보여준다.

Table 1의 링크인자를 사용하여 계산된 로봇기구학모델의 성분별 위치는 식 (1)과 식 (2)에 나타내었다^{19,20}.

Table 1 Link parameters of 4 axis robot

| Axis | α_{i-1} (degree) | a_{i-1} (mm) | d_i (mm) | θ_i (degree) |
|------|----------------------------|-------------------|---------------|------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 387 | θ_1 |
| 2 | 0 | 400 | 0 | θ_2 |
| 3 | 180 | 250 | d_3 | 0 |
| 4 | -180 | 0 | 0 | θ_3 |

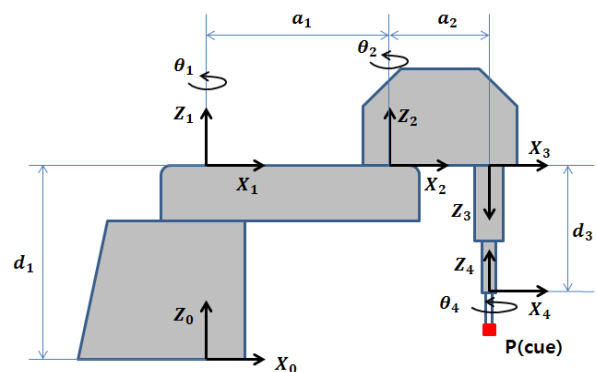


Fig. 1 Link parameters and link frame assignments of 4 axis robot manipulator

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

여기서, i 는 로봇의 운동궤적에서의 이동단계 수이며, a_1, a_2, d_1, d_4 는 D-H 링크인자를 나타내며, $\theta_1^i, \theta_2^i, d_3^i, \theta_4^i$ 는 i 이동단계에서의 로봇 관절각이다. 또한, 마지막 관절 좌표계의 원점에 부착된 시험모형의 끝점 P 에 대한 위치벡터(P_x, P_y, P_z)는 다음과 같다.

$$P = (P_x, P_y, P_z) = (0, 0, -96) \tag{2}$$

2.2 비전 시스템 모델

본 연구에서 제안된 비전 시스템 모델은 6개의 카메라 매개변수 ($C_1 \sim C_6$)를 포함하고 있다. 여기서, $C_1 \sim C_4$ 는 카메라의 초점거리 및 방향의 불확실성을 설명하는 카메라 내부 매개변수이며, C_5 와 C_6 는 카메라와 로봇사이의 상대위치에 대한 불확실성을 설명하는 카메라 외부 매개변수이다. 이에 대한 비전 시스템 모델은 다음식(3)에 나타내었다^[19,21].

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

여기서,

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

로봇 끝점 P 에 대한 i 이동단계에서 X_m^i 과 Y_m^i 는 2차원 카메라 좌표를 나타낸다. 또한 F_x^i, F_y^i, F_z^i 는 2.1절의 식 (1)과 식 (2)와 같이 성분별 위치 값을 나타낸다.

3. 로봇 비전 제어 기법

본 연구의 로봇 비전 제어 알고리즘은 2.1절의 성분별 위치 벡터를 이용하여 2.2절의 비전 시스템 모델에 포함된 각 카메라에 대한 6개의 카메라 매개변수를 추정하며, 추정된 매개변수를 이용하여 점 이동 타겟에 대한 로봇의 관절각을 추정하는 것이다. 본 논문에서

서는 N-R방법과 EKF방법을 각각 적용한 2가지 로봇 비전 제어 알고리즘을 개발하고자 하며, 3.1절에는 N-R방법을 이용한 로봇 비전 제어 알고리즘, 3.2절에는 EKF방법을 이용한 로봇 비전 제어 알고리즘을 각각 설명한다.

3.1 N-R방법

본 연구에 사용된 N-R방법은 카메라 매개변수 추정 기법과 로봇 관절각 추정 기법에 사용된다. 이에 대한 전체적인 흐름은 Fig. 2에서 보여주고, 자세한 제어알고리즘은 Fig. 9에 설명한다.

3.1.1 카메라 매개변수 추정 기법

로봇이 점 이동 타겟이 주어진 운동 궤적을 따라 이동 할 때 각 이동 단계에서 로봇 끝점 P 에 대한 비전 데이터와 로봇 관절각이 얻어진다면, 6개의 매개변수를 추정하기 위해 각 카메라에 대하여 식 (5)과 같이 성능지수를 정의한다.

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

여기서, $k (= 1, 2, \dots, 6)$ 는 매개변수의 개수, $i (= 1, \dots, n)$ 는 로봇 운동궤적에서의 이동단계 수를 나타낸다. X_c^i, Y_c^i 는 로봇의 각 이동 단계에서 카메라를 통해 얻어진 로봇 끝점 P 에 대한 실제 비전 데이터 값들이다. X_m^i, Y_m^i 은 2.2절의 비전 시스템 모델에서 매개변수 $C_1 \sim C_6$ 을 포함한 비전 시스템 모델 값을 나타낸다.

식 (5)를 N-R 방법을 적용하여 최소화 시키면 식 (6)과 같이 나타낸다^[21,22].

$$\begin{aligned}
 C_{k,l+1} &= C_{k,l} + \Delta C \\
 &= C_{k,l} + (A^T W A)^{-1} A^T W R
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, l 은 계산과정에서 반복된 횟수이며, W 는 일반적으로 단위

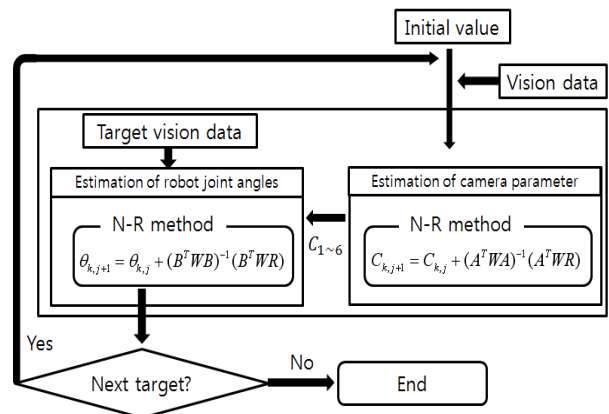


Fig. 2 Method of N-R

행렬을 사용하는 가중행렬이다. 또한, A 는 $2i \times 6$ 의 크기를 가지는 자코비안 행렬로 식 (7)과 같이 주어지며,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^i}{\partial C_1} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_2} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_3} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_4} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_5} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_6} \\ \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_1} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_2} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_3} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_4} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_5} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_6} \end{bmatrix} \quad (7)$$

R 은 $2i \times 1$ 요소를 가지는 유수벡터로 식(8)과 같이 주어진다.

$$R = \begin{bmatrix} X_m^i - X_c^i \\ Y_m^i - Y_c^i \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (6)의 ΔC 가 0에 근접할 때까지 반복적인 계산이 이루어지며, 유수벡터 R 이 허용오차를 만족하였을 때 최종적으로 3대 카메라에 대한 6개의 카메라 매개변수가 추정된다.

3.1.2 로봇 관절각 추정 기법

3.1.1절에서 각각의 3대 카메라에 대한 6개의 카메라 매개변수가 추정되면, 이를 이용하여 점 이동 타겟에 대한 로봇 관절각 $\theta_i (i=1 \sim 4)$ 을 추정하기 위해 다음 식 (9)과 같이 성능지수를 정의하였다.

$$J(\theta_k) = \sum_{q=1}^3 [X_m^q(F_x(\theta_i), F_y(\theta_i), F_z(\theta_i); C_k^q) - X_c^q]^2 + [Y_m^q(F_x(\theta_i), F_y(\theta_i), F_z(\theta_i); C_k^q) - Y_c^q]^2 \quad (9)$$

여기서, $q(=1 \sim 3)$ 는 카메라의 개수, k 는 매개변수의 수를 나타낸다. 또한, X_c^q 와 Y_c^q 는 점 이동 타겟에 대한 q 번째 카메라에서 카메라 좌표 값을 나타내며, X_m^q 와 Y_m^q 는 추정된 카메라 매개변수 $C_1 \sim C_6$ 에 근거한 q 번째 카메라에서 끝점 P 의 추정된 비전 시스템 모델 값이다.

식 (9)를 N-R방법으로 최소화시키면 식 (10)과 같다^[21,22].

$$\theta_{i,l+1} = \theta_{i,l} + \Delta\theta = \theta_{i,l} + (B^T W B)^{-1} B^T W R \quad (10)$$

여기서, l 은 계산과정 중 반복된 횟수이며, W 는 가중행렬로서 본 연구에서는 단위행렬을 사용하였다. 또한, B 는 $2 \times q \times 4$ 의 크기를 가지는 자코비안 행렬로 식 (11)와 같이 주어지며,

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^q}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X_m^q}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X_m^q}{\partial d_3} & \frac{\partial X_m^q}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial Y_m^q}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y_m^q}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y_m^q}{\partial d_3} & \frac{\partial Y_m^q}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \quad (11)$$

R 은 $2 \times q \times 1$ 의 크기를 가지는 유수벡터로 식 (12)과 같이 주어진다.

$$R = \begin{bmatrix} X_m^q - X_c^q \\ Y_m^q - Y_c^q \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (11)의 $\Delta\theta$ 는 3.1.1절의 카메라 매개변수 추정 기법과 마찬가지로 0에 근접할 때까지 반복적인 계산을 하며, 유수벡터 R 이 허용오차를 만족 하였을 때 최종적으로 이동 타겟에 대한 로봇 관절각 $(\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4)$ 이 추정된다.

3.2 EKF방법

Fig. 3은 본 연구에 사용된 EKF 방법의 전체적인 흐름을 보여주며, Fig. 10은 자세한 제어알고리즘의 흐름을 설명한다.

EKF 방법의 칼만 이득값 K_k 를 구하기 위해 사용된 방정식의 자코비안 H_k 는 측정데이터를 정확히 전달하거나 확대하기 위하여 사용된다. 또한, Fig. 3에서 보여준 EKF방법의 측정모델과 공정모델을 사용하여 각 카메라에 대한 매개변수와 점 이동 타겟에 대한 로봇 관절각을 추정한다.

3.2.1 카메라 매개변수 추정 기법

비전 시스템 모델에 포함된 불확실한 6개 카메라 매개변수를 EKF방법을 이용하여 추정하기 위해서는 비선형 함수인 f 와 h 를 정의하는 것이 필요하며, 카메라 매개변수 C 를 추정하기 위해 정의된 공정 및 측정모델에 대한 방정식은 식 (13)과 식 (14)에 주어진다.

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) \quad (13)$$

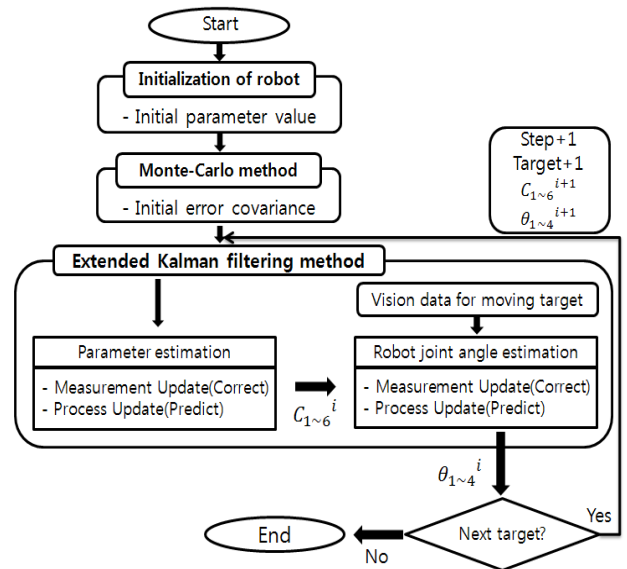


Fig. 3 Method of the EKF

$$z_k = h(x_k, V_k) \quad (14)$$

식 (13)에 주어진 공정 모델에 대한 함수 f 는 다음과 같이 정의한다.

$$f(x_k, u_k) = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6]^T \quad (15)$$

또한, 식 (14)에 주어진 측정 모델에 대한 함수 h 는 2.2절에 주어진 비전 시스템 모델을 사용하여 다음과 같이 정의한다.

$$h(x_k, 0) = [h_x^i \ h_y^i]^T = [X_m^i \ Y_m^i]^T \\ = \begin{bmatrix} (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2)F_x^i + 2(C_2C_3 + C_1C_4)F_y^i + 2(C_2C_4 - C_1C_3)F_z^i + C_5 \\ 2(C_2C_3 + C_1C_4)F_x^i + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)F_y^i + 2(C_3C_4 - C_1C_2)F_z^i + C_6 \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, i 는 로봇이 이동한 단계를 나타낸다. 이렇게 정의된 f 함수와 h 함수를 이용하여 6개의 카메라 매개변수를 추정한다.

(1) 측정모델의 보정

측정모델의 보강 방정식은 칼만 이득값 K_k , 각각의 카메라에 대한 매개변수 \hat{x}_k 및 오차 공분산 P_k 로 크게 3개로 구성된다.

$$K_k = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1} \quad (17)$$

$$\hat{x} = \hat{x}^- + K_k (z_k - h(\hat{x}^-, 0)) \quad (18)$$

$$P_k = (1 - K_k H_k) P_k^- \quad (19)$$

여기서,

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h^i}{\partial C_{1-6}} \\ = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_x^i}{\partial C_1} & \frac{\partial h_x^i}{\partial C_2} & \frac{\partial h_x^i}{\partial C_3} & \frac{\partial h_x^i}{\partial C_4} & \frac{\partial h_x^i}{\partial C_5} & \frac{\partial h_x^i}{\partial C_6} \\ \frac{\partial h_y^i}{\partial C_1} & \frac{\partial h_y^i}{\partial C_2} & \frac{\partial h_y^i}{\partial C_3} & \frac{\partial h_y^i}{\partial C_4} & \frac{\partial h_y^i}{\partial C_5} & \frac{\partial h_y^i}{\partial C_6} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$Z_k = [X_c^i \ Y_c^i]^T \quad (21)$$

또한, 식 (17)의 측정모델의 잡음에 의한 영향 성분 $V_k R_k V_k^T$ 는 단위행렬을 사용하였으며, 식 (21)의 X_c^i 와 Y_c^i 는 로봇이 이동하는 동안 각 단계에서 큐에 대한 카메라에서 측정된 비전 데이터 x 성분과 y 성분을 나타낸다.

(2) 공정모델의 예측

공정모델의 예측 방정식은 매개변수 예측 \hat{x}_{k+1}^- 과 오차 공분산 값 P_{k+1}^- 등 크게 2개로 구성되며, 아래와 같이 정의하였다.

$$\hat{x}_{k+1}^- = f(\hat{x}_k, u_k, 0) = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6]^T \quad (22)$$

$$P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + W_k Q_k W_k^T \quad (23)$$

여기서, 행렬 A_k 는 6×6 행렬의 크기를 갖는 단위행렬로 정의하였으며, 공정모델의 잡음에 의한 영향 성분 $W_k Q_k W_k^T$ 는 동등한 가중치를 주는 단위행렬로 정의하였다.

3.2.2 로봇 관절각 추정 기법

3.2.1절에서 추정된 3대의 카메라 매개변수($C_1 \sim C_6$)를 사용하여 로봇의 4개 관절각($\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4$)을 Fig. 3에서 보여준 EKF방법으로 추정한다. 관절각 추정을 위해 비전시스템모델식 (3)과 (4)를 변형하면 다음과 같다.

$$X_t^q = (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2)F_x^q(\theta_t) + 2(C_2C_3 + C_1C_4)F_y^q(\theta_t) \\ + 2(C_2C_4 - C_1C_3)F_z^q(\theta_t) + C_5 \\ Y_t^q = 2(C_2C_3 - C_1C_4)F_x^q(\theta_t) + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)F_y^q(\theta_t) \\ + 2(C_3C_4 - C_1C_2)F_z^q(\theta_t) + C_6 \quad (24)$$

여기서, $q(=1 \sim 3)$ 는 사용된 카메라 개수이고, X_t^q 와 Y_t^q 는 로봇이 이동하는 동안 q 번째 카메라에서 점 이동 타겟에 대한 측정된 비전 데이터의 x 성분과 y 성분을 나타내며, $\theta_t(=\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4)$ 는 점 이동 타겟으로 로봇을 구동하기 위해 추정되어야 할 알려지지 않은 로봇 관절각이다.

3.2.1절에서 EKF방법의 카메라 매개변수 추정과 같이 공정 및 측정모델에 대한 방정식 식 (13), 식 (14)의 함수 f 와 h 를 정의하는 것이 필요하며, 식 (13)에 주어진 공정 모델에 대한 함수 f 는 다음 식 (25)과 같이 정의한다.

$$f(x_k, u_k) = [\theta_1 \ \theta_2 \ d_3 \ \theta_4]^T \quad (25)$$

또한, 식 (14)에 주어진 측정 모델에 대한 함수 h 는 식 (24)에 주어진 식을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$h(x_k, 0) = [h_x^q \ h_y^q]^T = [X_t^q \ Y_t^q]^T \quad (26)$$

(1) 측정모델의 보정

측정모델의 보강 방정식은 칼만 이득값 K_k , 사용한 카메라의 매개변수 \hat{x}_k 및 오차 공분산 P_k 등 크게 3개로 구성된다.

$$K_k = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1} \quad (27)$$

$$\hat{x} = \hat{x}^- + K_k (z_k - h(\hat{x}^-, 0)) \quad (28)$$

$$P_k = (1 - K_k H_k) P_k^- \quad (29)$$

여기서,

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h^q}{\partial \theta_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_x^q}{\partial \theta_1} & \frac{\partial h_x^q}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_x^q}{\partial d_3} & \frac{\partial h_x^q}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial h_y^q}{\partial \theta_1} & \frac{\partial h_y^q}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_y^q}{\partial d_3} & \frac{\partial h_y^q}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$Z_k = [X_i^q \quad Y_i^q]^T \quad (31)$$

또한, q 는 사용한 카메라 개수를 나타내며, 측정모델의 잡음에 의한 영향 성분 $V_k R_k V_k^T$ 는 동등한 가중치를 주는 단위행렬로 정의하였다.

(2) 공정모델의 예측

공정모델의 예측 방정식은 매개변수 예측 \hat{x}_{k+1}^- 과 오차 공분산 행렬 P_{k+1}^- 등 크게 2개로 구성되며, 아래와 같이 정의하였다.

$$\hat{x}_{k+1}^- = f(\hat{x}_k, u_k, 0) = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad d_3 \quad \theta_4]^T \quad (32)$$

$$P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + W_k Q_k W_k^T \quad (33)$$

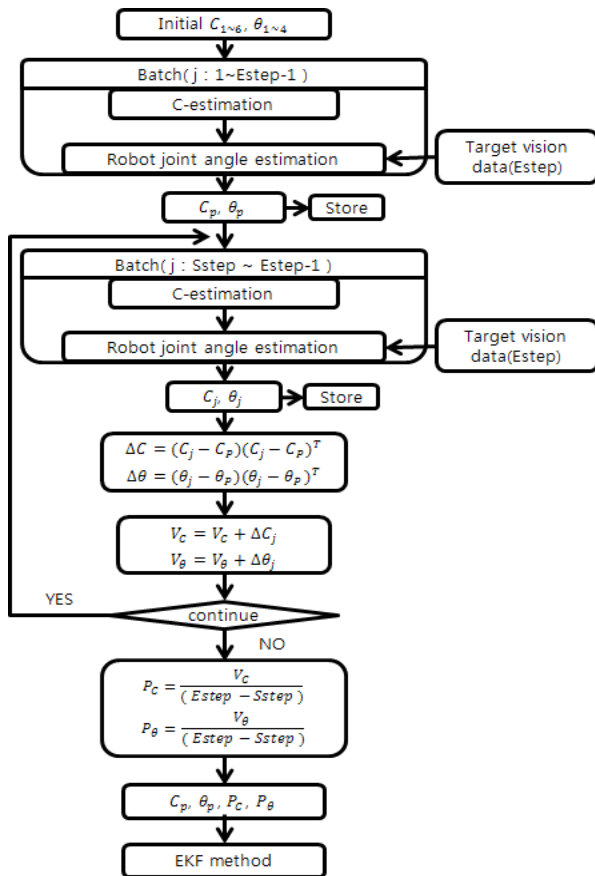


Fig. 4 Procedure of Monte-Carlo method

여기서, 행렬 A_k 는 단위행렬로 정의하였고, 공정모델의 잡음에 의한 영향성분 $W_k Q_k W_k^T$ 도 동등한 가중치를 갖는 단위행렬로 정의하였다.

3.2.3 EKF방법의 초기값 추정

EKF방법을 카메라 매개변수 및 로봇 관절각 추정기법에 적용하고자 할 때, 초기 상태 변수와 초기 오차 공분산을 효과적으로 계산하는 것이 매우 중요하다.

이리하여 본 연구에서는 EKF방법에 필요한 초기값의 정확한 계산을 위해 Monte-Carlo 방법을 이용한다. 이에 대한 절차는 Fig. 4에서 보여준다.

여기서, 본 논문의 제어 알고리즘을 적용하는데 있어서 초기 구동 단계는 10단계로 설정하였다. 위 EKF방법의 초기 값 추정을 위해 사용한 Monte-Carlo 방법은 일괄처리(Batch)방법을 적용하는데, 컴퓨터 시뮬레이션 결과 초기 상태변수인 카메라 매개변수 C 값과 관절각 θ 값을 계산하는데 최소 5단계 데이터가 필요하였다. 이리하여 오차공분산 행렬을 계산하기 위해 Sstep은 6번째 단계, 초기구동의 마지막 단계인 Estep은 10번째 단계로 설정하고, 이 단계는 타겟으로 이용하였다. 그리하여 계산되어진 카메라 매개변수 초기 값 C_p , 로봇 관절각 초기 값 θ_p , 초기 오차 공분산 행렬 P_C, P_θ 는 3.2.1절과 3.2.2절의 EKF방법의 초기 값으로 사용된다.

4. 실험장치 및 제어방법

4.1 실험장치

4.1.1 실험장치 구성

본 연구에 사용된 실험장치의 구성은 Fig. 5와 Fig. 6과 같이, 3대의 카메라를 포함한 640×480해상도를 갖는 비전 시스템, 4축 스카라 타입 로봇과 시험모형을 포함하는 로봇 시스템, PC 시스템으로 구성되었다.



Fig. 5 Experiment apparatus

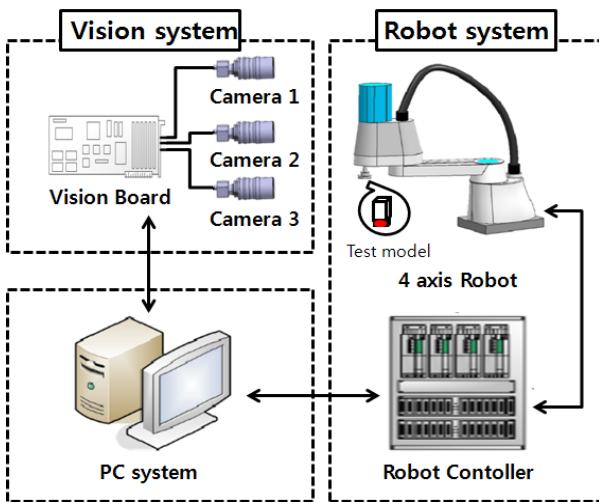


Fig. 6 Experimental set-up

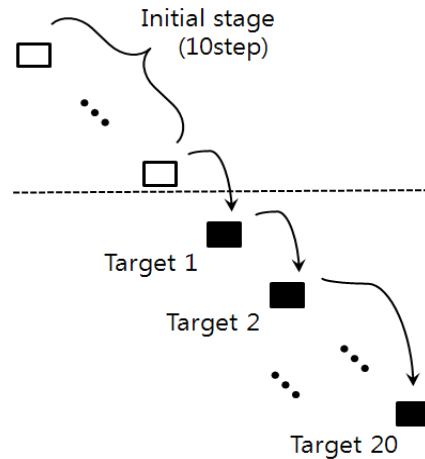


Fig. 8 Moving target trajectory

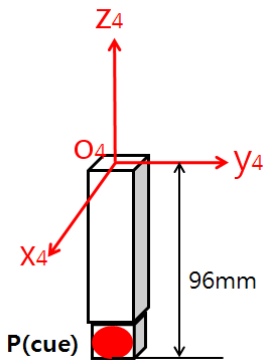


Fig. 7 Test model of a point

4.1.2 실험모형

본 연구에서는 점 이동 타겟 실험을 위해 로봇의 끝점 P에 1개의 LED를 플라스틱 봉 끝에 조합하여 1 cue 시험모형을 제작하였다. Fig. 7은 LED가 부착된 점 이동 타겟 시험모형의 치수를 보여 준다.

4.2 실험절차

Fig. 8은 사용된 로봇 운동 궤적을 보여준다. 두 개의 로봇 비전 제어알고리즘을 이동 타겟 추적에 적용하기 위한 로봇 운동궤적은 10개의 초기 구동 단계와 20개의 이동 타겟으로 설정 되어 있다. 본 실험은 점 이동 타겟을 추적하는 과정을 수행하였으므로 오직 로봇 끝점 P의 위치만을 고려하고 방향은 고려하지 않았다. 특히, 초기 구동 단계의 로봇 운동궤적이 짧은 경우 카메라 매핑에 있어서 오류가 발생하므로 최소한 26 mm~30 mm 이상은 이동 되어야 한다. 또한, 선행된 두 개의 연구결과^{19,21)}에 의해 좀 더 향상된 실험결과를 얻기 위해 로봇으로부터 2.0 m~2.5 m 거리에 3대의 카메라를 작업방향에 집중되도록 배치하였다.

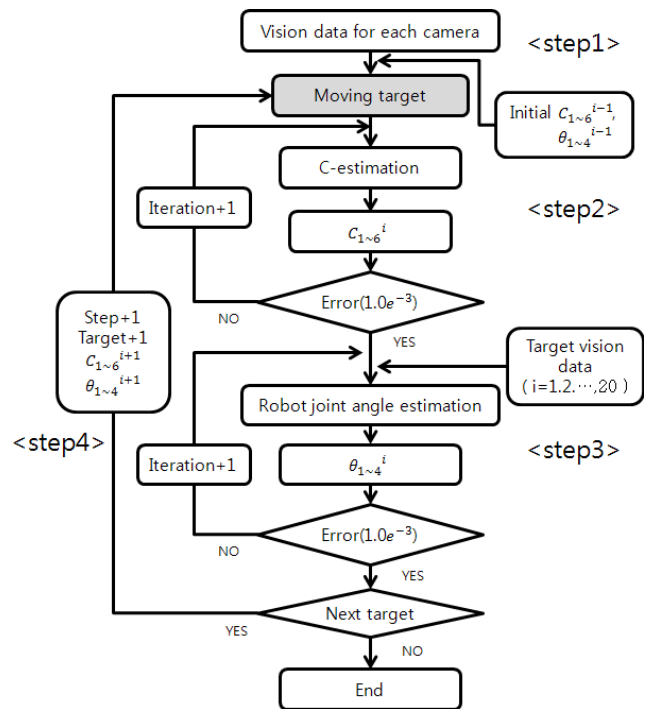


Fig. 9 Control algorithm and Experimental procedures of N-R method for the point moving targets tracking

4.2.1 N-R제어알고리즘 및 실험절차

N-R방법에 의한 점 이동 타겟 추적에 대한 제어알고리즘 및 실험절차는 Fig. 9에 보여주며 다음과 같다.

Step 1: 로봇이 Fig. 8에 설정된 운동 궤적의 초기 구동 단계 10번째 단계까지 운동할 때 3대의 카메라에서 점 이동 타겟에 대한 비전 데이터를 획득한다.

Step 2: Step 1에서 획득된 비전 데이터를 매개변수 추정 기법에 의하여 각 카메라에 대한 매개변수를 추정한다.

Step 3: 추정된 각 카메라에 대한 매개변수와 점 이동 타겟에

대한 비전 데이터를 로봇 관절각 추정 기법에 적용하여 점 이동 타겟에 대한 로봇의 관절각을 추정한다.

Step 4: Step 3에서 추정된 현재 타겟에 대한 카메라 매개변수 C 값과 로봇 관절각 θ 값을 다음 타겟을 추정하기 위한 초기 값으로 사용되고, 현재 타겟 비전데이터 값은 다음 카메라 매개변수 C 값을 추정할 때 비전데이터로 추가 사용되어진다. 이와 같은 값들은 Fig. 8의 Moving target부분으로 보내져서 Step 2와 Step 3을 마지막 이동 타겟 단계까지 반복 진행한다.

4.2.2 EKF제어알고리즘 및 실험절차

EKF방법에 의한 점 이동 타겟 추적실험에 대한 제어알고리즘 및 실험절차는 Fig. 10에 보여주며 다음과 같다.

Step 1: 로봇이 Fig. 8에 설정된 운동 궤적의 초기 구동 단계 10번째 단계까지 운동할 때 3대의 카메라에서 점 이동 타겟에 대한 비전데이터를 획득한다.

Step 2: Step 1에서 획득된 비전 데이터들을 3.2.3절에 보여준 Monte-Carlo방법에 의해 EKF방법에 사용할 초기 오차 공분산들을 계산한다.

Step 3: Step 2에서 계산된 값들을 EKF방법에 초기 변수들로 사용한다.

Step 4: Step 2와 Step 3에서 계산된 초기 매개변수들과 오차 공분산들을 EKF방법에 적용하여 Fig. 8의 현재 타겟에 대한 카메라

매개변수와 로봇 관절각을 추정한다.

Step 5: Step 4에서 추정된 현재 타겟에 대한 카메라 매개변수 C 와 로봇 관절각 θ 는 다음 타겟 추정 시 초기 값으로 사용되며, 최종 이동 타겟까지 순환하면서 추정한다.

5. 실험결과

본 연구에서 매개변수 추정을 위한 N-R방법과 EKF방법을 비전 시스템 모델에 적용하여, 사용된 3대의 카메라에 대한 실제 비전데이터 값과 추정된 비전시스템 모델 값을 5.1절에서 비교하였다. 또한, 5.2절에서는 추정된 카메라 매개변수들을 사용하여 N-R방법과 EKF방법을 통해 추정된 점 이동 타겟에 대한 관절각의 위치 정밀도와 데이터 처리시간을 비교하였다.

5.1 비전 시스템 모델의 적합성 비교

N-R방법과 EKF방법을 각각 사용하여 각 이동타겟 추적단계에서 카메라 매개변수를 이용하여 추정된 비전 시스템 모델 값과 매개변수를 추정하는데 사용한 각 이동단계에서의 실제 획득된 비전 데이터를 비교하여 제안된 비전 시스템 모델의 적합성을 보이고자 한다.

3대 카메라 각각에 대한 실제 비전 데이터와 비전 시스템 모델의 추정 값 사이의 오차는 식 (34)과 같이 r.m.s.^[23]를 정의하여 사용하였다.

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{(e_x^i)^2 + (e_y^i)^2\}}{n}} \quad (34)$$

여기서, $e_x^i, e_y^i (i = 1, 2, \dots, 20)$ 는 큐에 대한 실제 비전 데이터와 비전 시스템 모델의 추정 값 사이의 x 및 y 축 오차값, n 은 로봇이 이동 타겟이 이동하는 동안 비전 데이터가 얻어진 단계 수이다.

5.1.1 N-R방법 결과

Fig. 11은 로봇이 운동궤적을 따라 점 이동 타겟이 초기 구동 단계를 제외한 이동하는 동안 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터와 N-R방법을 적용하여 각 카메라에 대한 매개변수에 근거를 둔 추정된 비전 시스템 모델값을 비교하여 나타내었다. 여기서, □는 각 카메라에 대한 실제 비전 데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델 값이다.

각 카메라에서 오차는 camera 1에서 ± 0.0866 pixel, camera 2에서 ± 0.1499 pixel, camera 3에서 ± 0.1016 pixel 정도로 근사함을 보여주며, 비전시스템 모델에 적합함을 알 수 있다.

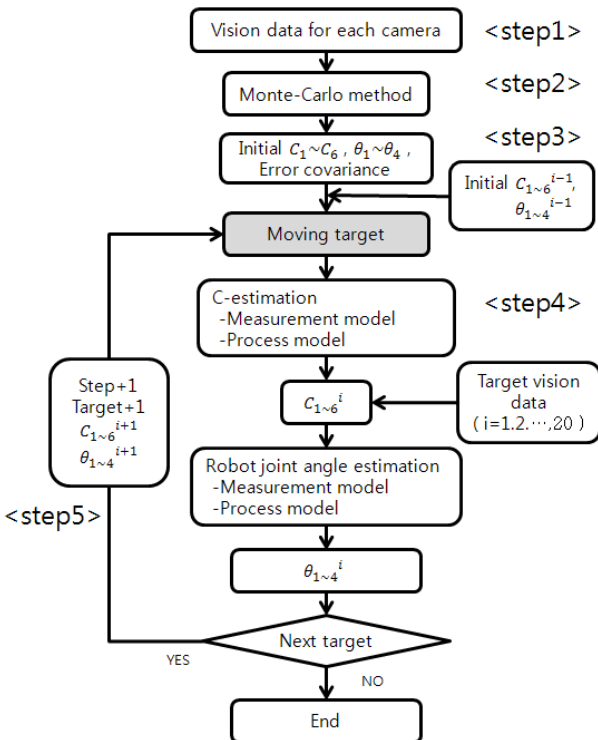
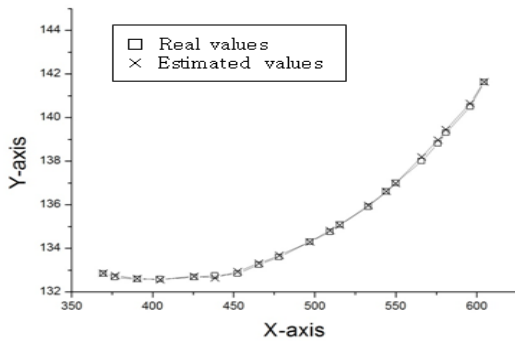
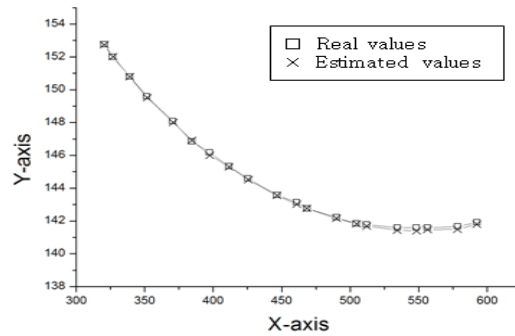


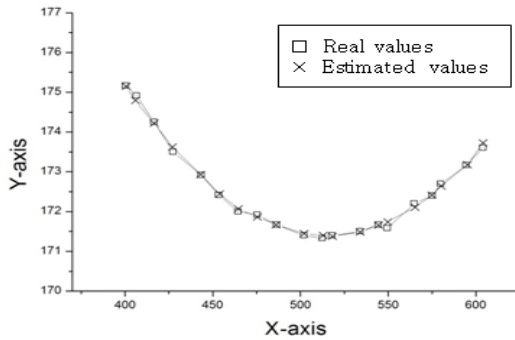
Fig. 10 Control algorithm and Experimental procedures of EKF method for the point moving targets tracking



(a) Camera 1

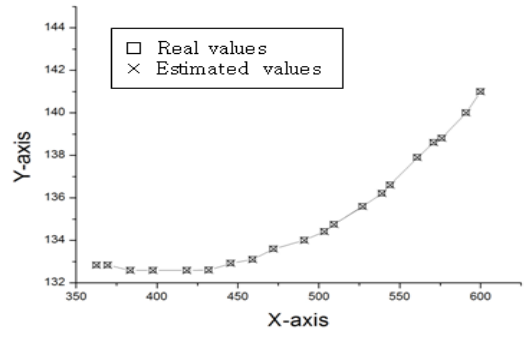


(b) Camera 2

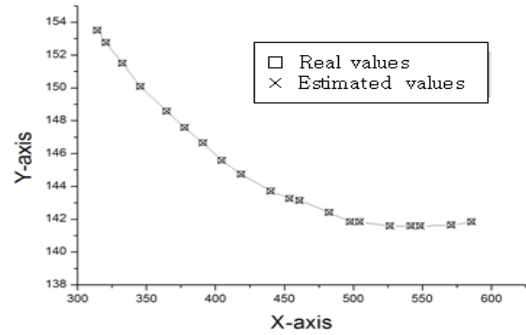


(c) Camera 3

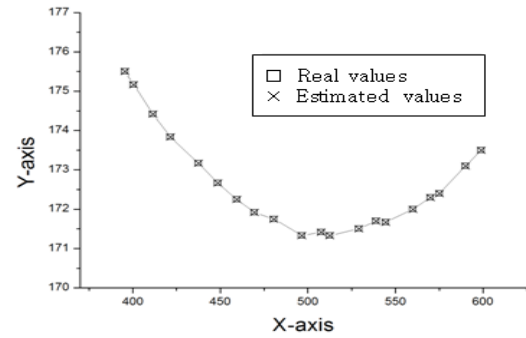
Fig. 11 For N-R method, comparison of the real and the estimated vision system model values for each camera



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 12 For EKF method, comparison of the real and the estimated vision system model values for each camera

5.1.2 EKF방법 결과

Fig. 12는 로봇이 점 이동 타겟을 추적하기 위해 이동하는 동안 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터와 EKF방법을 적용하여 각 카메라에 대한 매개변수에 근거를 둔 추정된 비전 시스템 모델 값을 비교하여 나타내었다. 여기서, □는 각 카메라에 대한 실제 비전데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델이며, 초기 값들을 계산하는 초기 구동 단계를 제외한 EKF방법을 적용한 부분에 대해서만 실제 비전데이터와 비교하여 나타내었다.

각 카메라에서 오차는 camera1에서 ±0.0957pixel, camera2에서 ±0.0812pixel, camera3에서 ±0.0504pixel 정도로 근사함을 보여주며, 비전시스템 모델에 적합함을 알 수 있다.

5.2 점 이동 타겟 추적 결과 비교

N-R과 EKF방법에 의한 점 이동 타겟 추적실험 결과 점 이동 타겟에 대한 추정된 이동 타겟 위치 값과 실제 타겟 위치 값을 비교한 오차 값은 식 (35)과 같이 r.m.s.로 정의하였다. 특히, 공간상에서 이동 타겟에 대한 실제 위치 값은 로봇제어기로부터 얻어진 엔코더 값, 추정된 위치값은 관절각 추정기법에 의해 계산된 관절각을 식 (1)과 식 (2)의 4축 스카라 타입 로봇의 정기구학 모델에 적용하여 계산하였다.

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{(e_x^i)^2 + (e_y^i)^2 + (e_z^i)^2}{3}} \quad (35)$$

여기서, $e_x^i, e_y^i, e_z^i (i=1,2,\dots,20)$ 는 각 이동 타겟에 대한 x 성분

오차, y 성분 오차, z 성분 오차를 나타낸다.

5.2.1 N-R 방법 결과

로봇이 N-R 방법을 사용하여 점 이동 타겟 추적실험을 수행 하였을 때, 3.1.2절의 로봇 관절각 추정 기법에 의해 추정된 점 이동

타겟에 대한 로봇 관절각을 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에서 보여준 것과 같이 실제관절각과 측정된 관절각 값을 비교한 결과, 오차범위는 $\theta_1 = -0.138 \sim -0.12$ (degree), $\theta_2 = -0.246 \sim -0.344$ (degree), $d_3 = -0.051 \sim -0.149$ (mm), $\theta_4 = 0$ (degree)로 매우 유사한 값을 나타낸다. 또한, Fig. 12의 관절각은 식 (1)과 식 (2)의 정기구학을 통해 3차원 공간상의 x - y - z 좌표를 변환하여 Table 2에 나타내었다. 특히, 본 연구는 하나의 cue를 부착하여 방위는 고려하지 않고 위치만을 고려하는 점 이동 타겟 추적 작업을 수행하였으므로, 스

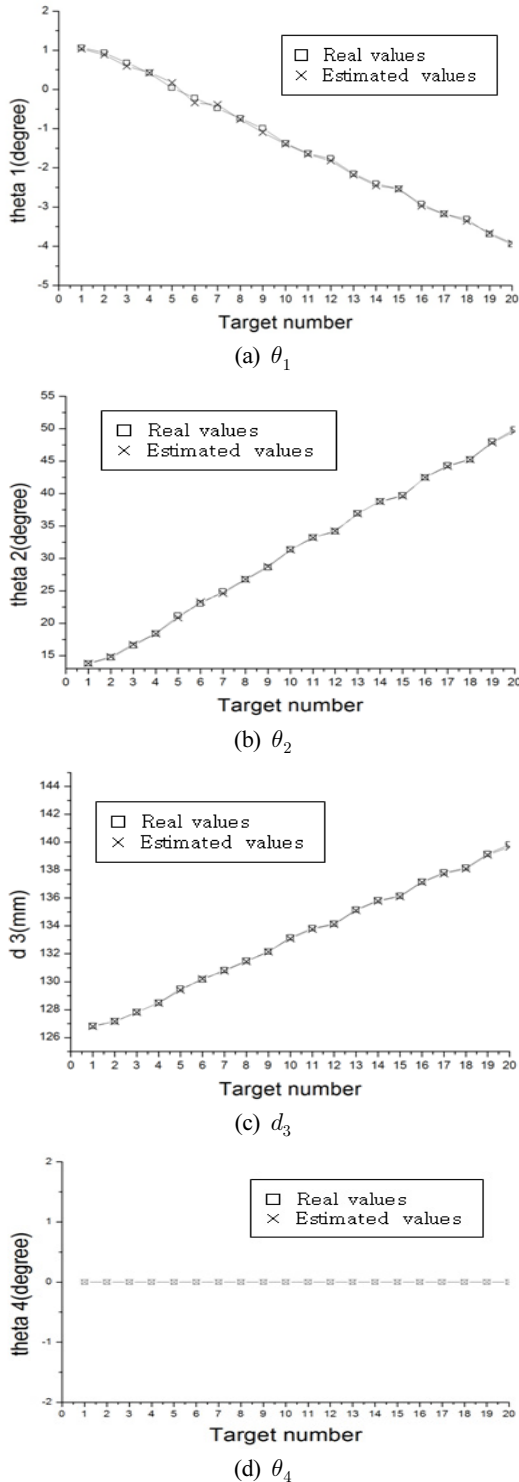


Fig. 13 Comparison of the real values and the estimated values for the point targets in joint coordinates

Table 2 Comparison of the real values and the estimated values for the moving point targets in x-y-z coordinates

| Target | Fx (mm) | | Fy (mm) | | Fz (mm) | | r.m.s (mm) |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|
| | Est. | Real | Est. | Real | Est. | Real | |
| 1 | Est. | 641.573 | Est. | 71.379 | Est. | 108.017 | 0.044 |
| | Real | 642.445 | Real | 68.978 | Real | 108.333 | |
| 2 | Est. | 640.607 | Est. | 73.901 | Est. | 107.658 | 0.053 |
| | Real | 641.596 | Real | 71.447 | Real | 108.000 | |
| 3 | Est. | 638.618 | Est. | 78.659 | Est. | 107.011 | 0.106 |
| | Real | 639.752 | Real | 76.347 | Real | 107.333 | |
| 4 | Est. | 636.633 | Est. | 83.598 | Est. | 106.352 | 0.013 |
| | Real | 637.714 | Real | 81.192 | Real | 106.667 | |
| 5 | Est. | 633.385 | Est. | 90.831 | Est. | 105.419 | 0.206 |
| | Real | 634.298 | Real | 88.346 | Real | 105.667 | |
| 6 | Est. | 630.239 | Est. | 95.020 | Est. | 104.616 | 0.230 |
| | Real | 631.784 | Real | 93.032 | Real | 105.000 | |
| 7 | Est. | 627.956 | Est. | 99.954 | Est. | 104.035 | 0.172 |
| | Real | 629.082 | Real | 97.646 | Real | 104.333 | |
| 8 | Est. | 624.661 | Est. | 104.292 | Est. | 103.374 | 0.078 |
| | Real | 626.195 | Real | 102.182 | Real | 103.667 | |
| 9 | Est. | 621.309 | Est. | 108.506 | Est. | 102.668 | 0.225 |
| | Real | 623.126 | Real | 106.636 | Real | 103.000 | |
| 10 | Est. | 616.562 | Est. | 114.991 | Est. | 101.721 | 0.182 |
| | Real | 618.183 | Real | 113.153 | Real | 102.000 | |
| 11 | Est. | 612.934 | Est. | 119.193 | Est. | 101.055 | 0.165 |
| | Real | 614.666 | Real | 117.380 | Real | 101.333 | |
| 12 | Est. | 610.909 | Est. | 121.214 | Est. | 100.688 | 0.175 |
| | Real | 612.842 | Real | 119.457 | Real | 101.000 | |
| 13 | Est. | 605.216 | Est. | 127.191 | Est. | 99.704 | 0.193 |
| | Real | 607.113 | Real | 125.535 | Real | 100.000 | |
| 14 | Est. | 601.085 | Est. | 130.919 | Est. | 99.037 | 0.265 |
| | Real | 603.082 | Real | 129.453 | Real | 99.333 | |
| 15 | Est. | 599.103 | Est. | 132.959 | Est. | 98.722 | 0.216 |
| | Real | 601.005 | Real | 131.370 | Real | 99.000 | |
| 16 | Est. | 592.313 | Est. | 138.349 | Est. | 97.691 | 0.231 |
| | Real | 594.528 | Real | 136.948 | Real | 98.000 | |
| 17 | Est. | 588.096 | Est. | 141.808 | Est. | 97.076 | 0.350 |
| | Real | 590.011 | Real | 140.517 | Real | 97.333 | |
| 18 | Est. | 585.448 | Est. | 143.469 | Est. | 96.722 | 0.293 |
| | Real | 587.694 | Real | 142.255 | Real | 97.000 | |
| 19 | Est. | 578.562 | Est. | 148.570 | Est. | 95.743 | 0.352 |
| | Real | 580.514 | Real | 147.277 | Real | 96.000 | |
| 20 | Est. | 573.698 | Est. | 151.506 | Est. | 95.149 | 0.501 |
| | Real | 573.000 | Real | 152.000 | Real | 95.000 | |

카라 형태의 로봇 특성상 방위를 결정하는 θ_4 값은 Fig. 13(d)에서 보여주는 것 같이 일정한 값을 보여준다.

Table 2에서 보여준 것 같이, N-R방법을 적용한 점 이동 타겟 실험의 결과, 위치 정밀도 r.m.s. 오차 평균은 ± 0.202 mm 이며, 데이터 처리 시간은 406 ms이다.

5.2.2 EKF 방법 결과

로봇이 점 이동 타겟 추적실험에 EKF방법을 적용하여 수행 하였을 때, 3.2.2절의 로봇 관절각 추정 기법에 의해 추정된 점 타겟에 대한 로봇 관절각을 Fig. 14에서 보여준다. Fig. 14에서 보여준 것 같이 실제관절각 값과 추정된 관절각을 비교한 결과 오차범위는

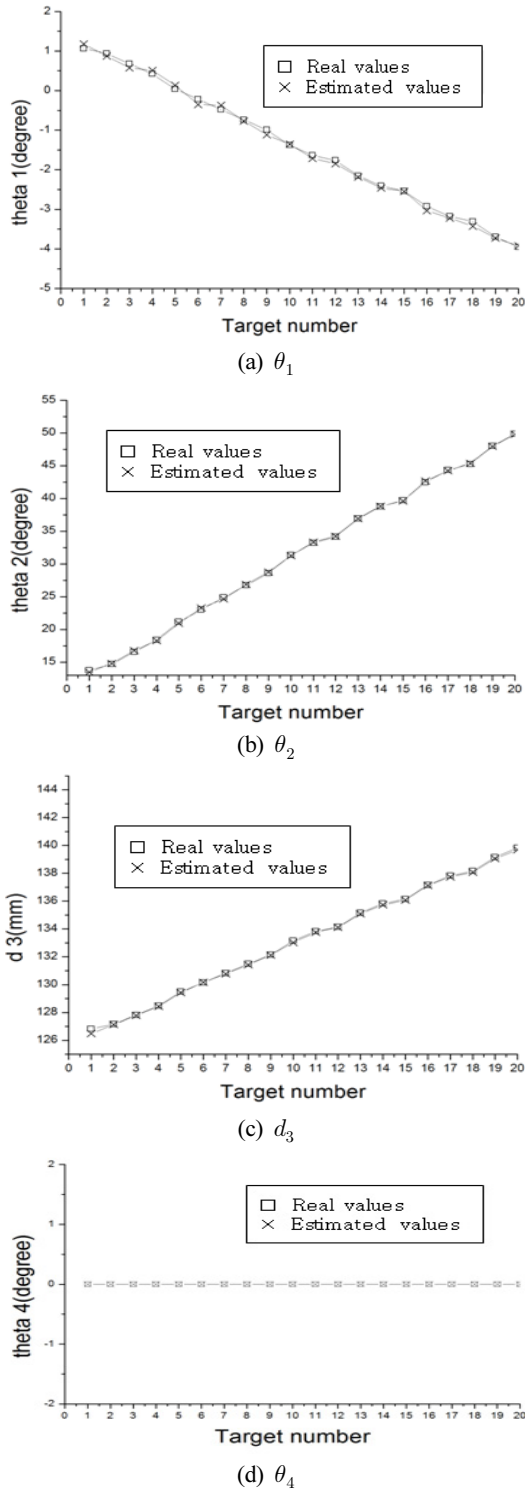


Fig. 14 Comparison of the real values and estimated values for the point targets in joint coordinates

Table 3 Comparison of the real values and the estimated values for the moving point targets in x-y-z coordinates

| Target | Fx (mm) | Fy (mm) | Fz (mm) | r.m.s (mm) |
|--------|--------------|--------------|--------------|------------|
| 1 | Est. 641.776 | Est. 71.531 | Est. 108.341 | 0.228 |
| | Real 641.596 | Real 71.447 | Real 108.000 | |
| 2 | Est. 640.649 | Est. 73.646 | Est. 107.693 | 0.152 |
| | Real 640.698 | Real 73.904 | Real 107.667 | |
| 3 | Est. 638.581 | Est. 78.663 | Est. 107.024 | 0.122 |
| | Real 638.757 | Real 78.777 | Real 107.000 | |
| 4 | Est. 636.663 | Est. 84.078 | Est. 106.385 | 0.283 |
| | Real 636.623 | Real 83.593 | Real 106.333 | |
| 5 | Est. 633.302 | Est. 90.751 | Est. 105.402 | 0.146 |
| | Real 633.065 | Real 90.698 | Real 105.333 | |
| 6 | Est. 630.250 | Est. 94.925 | Est. 104.646 | 0.272 |
| | Real 630.456 | Real 95.349 | Real 104.667 | |
| 7 | Est. 627.896 | Est. 100.166 | Est. 104.040 | 0.196 |
| | Real 627.662 | Real 99.924 | Real 104.000 | |
| 8 | Est. 624.499 | Est. 104.575 | Est. 103.398 | 0.144 |
| | Real 624.683 | Real 104.420 | Real 103.333 | |
| 9 | Est. 621.372 | Est. 108.205 | Est. 102.693 | 0.372 |
| | Real 621.523 | Real 108.831 | Real 102.667 | |
| 10 | Est. 616.626 | Est. 115.156 | Est. 101.788 | 0.144 |
| | Real 616.447 | Real 115.279 | Real 101.667 | |
| 11 | Est. 612.698 | Est. 119.127 | Est. 101.068 | 0.212 |
| | Real 612.842 | Real 119.457 | Real 101.000 | |
| 12 | Est. 610.878 | Est. 121.075 | Est. 100.702 | 0.258 |
| | Real 610.975 | Real 121.509 | Real 100.667 | |
| 13 | Est. 605.145 | Est. 127.246 | Est. 99.725 | 0.156 |
| | Real 605.118 | Real 127.508 | Real 99.667 | |
| 14 | Est. 600.977 | Est. 130.999 | Est. 99.088 | 0.221 |
| | Real 601.005 | Real 131.370 | Real 99.000 | |
| 15 | Est. 599.068 | Est. 132.968 | Est. 98.754 | 0.204 |
| | Real 598.886 | Real 133.259 | Real 98.667 | |
| 16 | Est. 591.955 | Est. 138.332 | Est. 97.687 | 0.308 |
| | Real 592.289 | Real 138.748 | Real 97.667 | |
| 17 | Est. 588.063 | Est. 141.512 | Est. 97.079 | 0.481 |
| | Real 587.694 | Real 142.255 | Real 97.000 | |
| 18 | Est. 585.216 | Est. 143.239 | Est. 96.747 | 0.425 |
| | Real 585.338 | Real 143.961 | Real 96.667 | |
| 19 | Est. 578.284 | Est. 148.388 | Est. 95.762 | 0.323 |
| | Real 578.045 | Real 148.885 | Real 95.667 | |
| 20 | Est. 573.204 | Est. 152.008 | Est. 95.134 | 0.141 |
| | Real 573.000 | Real 152.000 | Real 95.000 | |

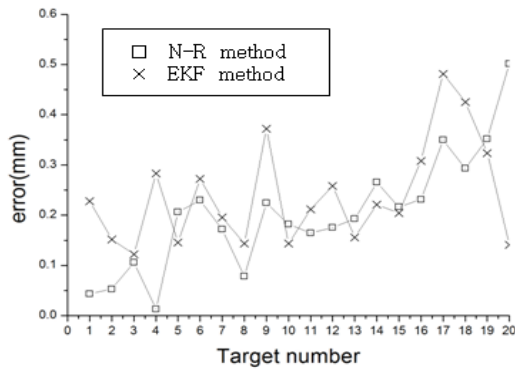


Fig. 15 Comparison of the N-R method and EKF method in position accuracy\

Table 4 Comparison of the N-R and EKF

| Target | Time (ms) | Average error (mm) |
|--------|-----------|--------------------|
| N-R | 406 | 0.202 |
| EKF | 172 | 0.239 |

$\theta_1 = -0.118 \sim -0.13$ (degree), $\theta_2 = -0.249 \sim -0.295$ (degree), $d_3 = -0.021 \sim -0.341$ (mm), $\theta_4 = 0$ (degree)로 매우 유사한 값을 나타낸다. Fig. 14(d)에서 보여준 θ_4 에 대한 추정 관절각은 N-R방법과 같이 방위를 고려하지 않고 위치만 고려하기 때문에 일정하게 추정된다. 이 관절각은 2.1절의 큐에 대한 정기구학에 적용하여 Table 3에 3차원 공간상의 x-y-z 좌표로 나타내었다.

Table 3에서 보여준 것 같이 EKF방법을 적용한 점 이동 타겟 추적실험의 결과, 위치 정밀도 r.m.s. 오차 평균은 ± 0.239 mm이며, 데이터 처리 시간은 172 ms이다.

5.2.3 N-R방법과 EKF 방법 비교

Fig. 15에서는 각 타겟에 대한 오차 값을 그래프로 나타내었다. 인접한 타겟과의 오차 변화를 보았을 때 안정적인 N-R방법과 비교하면 순환기법의 특성상 EKF는 다소 불안정한 상태를 보이고 있다.

Table 4에서 보여준 것 같이, 점 이동 타겟 추적 실험 결과 처리 시간에서는 N-R방법 406ms, EKF방법 172 ms의 결과를 보이고, 평균 오차값에서는 N-R방법 ± 0.202 mm, EKF방법 ± 0.239 mm의 결과를 나타내고 있다.

6. 결론

본 논문은 위치만 고려하는 점 이동 타겟 추적작업을 수행 하며, N-R방법과 EKF방법을 적용한 두 개의 로봇 비전 제어 알고리즘의 위치 정밀도와 데이터 처리 시간을 비교 평가하였다.

두 개의 로봇 비전 제어 방법에 대한 비전 시스템 모델의 적합성의 비교는 N-R방법과 EKF방법 둘 다 ± 1.0 pixel 미만으로 본 연구의 비전 시스템 모델에 적합함을 알 수 있었다. 특히, 점 이동 타겟 추적실험의 결과는 N-R 방법을 적용하였을 때의 r.m.s. 오차 평균은 ± 0.202 mm, EKF 방법을 적용하였을 때의 r.m.s. 오차 평균은 ± 0.239 mm로 N-R방법이 더 좋은 결과를 얻었다. 데이터 처리 시간에서는 N-R방법에서는 406 ms, EKF방법에서는 172 ms의 결과를 얻었다.

위의 결과들을 종합해 보면, 점 이동 타겟 추적 작업에 로봇 비전 제어기법 적용 시, 처리속도보다는 정밀도를 우선 해야 할 경우에는 N-R방법을 사용하는 것이 좋으며, 다소 정밀도는 떨어지지만 신속한 작업을 진행해야 할 경우에는 EKF방법을 사용하는 것이 바람직하다. 본 실험결과는 비전시스템을 이용한 로봇 용접시 용접선 추적 작업등에 적용할 수 있을 것으로 기대한다. 본 논문에서 사용된 점 이동 타겟은 방위를 고려하지 않고 오직 위치만을 고려 하였으므로, 향후 연구에서는 위치 및 방위까지 고려하는 실험 모형을 제작하여 이동 타겟 추적 실험에 적용하고자 한다.

후 기

이 논문은 2014학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] Berthold, K. P. H., 1986, Robot vision, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press 46-48.
- [2] Peter, A. S., 1993, Control of eye and arm movements using active, attentional vision, Applications of AI, Machine vision and robotics 1471-1491.
- [3] Kelly, R., Carelli, O., Nasisis, B., Kuchen., Reyes, F., 2000, Stable Visual servoing of camera-inhand robotics systems, IEEE/ASME Trnsns. on Mechatronics 5:1 39-48.
- [4] Yoshihiro, T., Yasuo, K., Hiroyuki, I., 1996, Positioning-Control of Robot Manipulator Using Visual Sensor, Int. Conference on Control, Automation, Robotics and Vision 894-898.
- [5] Bacakoglu, H., Kamel, M., 1997, An Optimized Two-Step Camera Calibration Method, IEEE International Conference on Robotics and Automation 1347-1352.
- [6] Tsai, R. Y., 1989, Synopsis of recent progress on camera calibration for 3D machine vision, The Robotics Review, Cambridge, MIT Press 146-159.

- [7] Beardsley, P. A., Zisserman, A., Murray, D. W., 1997, Sequential Updating of Projective and Affine Structure from Motion, *International Journal of Computer Vision* 23:3 235-259.
- [8] Skaar, S. B., Brockman, W. H., Jang, W. S., 1990, Three-dimensional camera space manipulation, *International Journal of Robotics Research* 9:4 22-39.
- [9] Wedepohl, L. M., Nguyen, H. V., Irwin, G. D., 1996, Frequency-Dependent Transformation Matrices for Untransposed Transmission Line using Newton-Raphson method, *IEEE Transactions on Power Systems* 11:3 1538-1546.
- [10] Piepmeier, J. A., McMurray, G. V., Lipkin, H., 2004, Uncalibrated Dynamic Visual Servoing, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 20:1 143-147.
- [11] Shahamiri, M., Jagersand, M., 2005, Uncalibrated Visual Servoing using a Biased Newton method for On-line Singularity Detection and Avoidance, *IEEE/RSJ International Conference* 3953-3958.
- [12] Yang, C., Huang, Q., Ogbobe, P. O., Han, J., 2009, Forward Kinematics Analysis of Parallel Robots Using global Newton-Raphson Method, *Proceedings of 2009 Second ICICTA* 407-410.
- [13] Kalman, R. E., 1960, A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *J. basic Rng. Trans. ASEM* 82D 35-45.
- [14] Kalman, R. E., 1963, *New Method In Wiener Filtering Theory*, John Wiley&Sons Inc., New York 82D 35-45.
- [15] Kerr, H. T., 1991, Streamlining Measurement Iteration for EKF Target Tracking, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 27:2 408-421.
- [16] Shademan, A., Janabi-Sharifi, F., 2005, Sensitivity Analysis of EKF and Iterated EKF Pose Estimation for Position-Based Visual Servoing, *IEEE Conference on Control Applications Toronto, Canada* 755-760.
- [17] Lippiello, V., Siciliano, B., Villani, L., 2007, Adaptive extended Kalman filtering for visual motion estimation of 3D objects, *Control Engineering Practice* 15 123-134.
- [18] Chen, G., Xia, Z., Ming, X., Lining, S., Ji, J., Du, Z., 2009, Camera Calibration based on Extended Kalman Filter using Robot's Arm Motion, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* 1839-1844.
- [19] Min, K. U., Jang, W. S., 2010, An Experimental Study on the Optimal Arrangement of Cameras used for the Robot's Vision Control Scheme, *Journal of the KSMTE* 19:1 15-25.
- [20] John, J. C., 1989, *Introduction to Robotics mechanics and control*, 2nd ed., Addison-Wesley, USA 84.
- [21] Jang, W. S., Kim, K. S., Kim, K. Y., 2004, An Experimental Study on the Optimal number of Cameras used for Vision Control System, *Journal of the KSME* 13:2 94-103.
- [22] Junkins, J. L., 1978, *An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems*, Sijthoff and Noordhoff, Alphen Aan Den Rijn 29-33.
- [23] David, F., Robert, P., Roger, P., 1978, *Statistic*, W. W. Norton, Canada 58-59.