

확장칼만 필터링의 비전시스템 모델을 이용한 물체 치수 측정에 관한 연구

A Study on the Estimation of Object's Dimension based on the Vision System Model of Extended Kalman Filtering

장완식*[†], 안힘찬** , 김경석***

W. S. Jang*[†], H. C. Ahn** and K. S. Kim***

초 록 비전시스템을 검사, 물체위치 결정 및 용접 작업 등에 실시간 응용하고자할 때 CCD카메라에서 얻어진 많은 데이터를 처리해야 하기 때문에 전산처리 속도를 줄이는 것이 매우 중요하다. 또한, 비전시스템 모델에 포함되어있는 매개변수를 추정하는데 있어서 Newton-Raphson 방법 같은 반복적인 기법을 사용하면 많은 전산처리 시간을 필요하게 되어 실시간 응용을 어렵게 한다. 위의 문제점을 해결하기 위해 확장칼만필터링 같은 효율적인 방법이 필요하다. 확장칼만필터링 방법은 CCD카메라로부터 얻어지는 측정데이터의 불확실성을 고려할 뿐만 아니라, 순환적인 처리 기법을 사용하므로 전산처리 속도 향상을 가져온다. 이리하여 본 연구는 비전시스템 모델에 포함된 카메라 내부 및 외부 매개변수를 설명하는 6개 매개변수 추정과 이를 이용한 물체 치수를 추정하는데 확장칼만필터링 방법을 적용하였다. 마지막으로 개발된 추정기법의 실시간 적용의 타당성을 실험을 통하여 보였다.

주요용어: 비전시스템, 전산처리시간, 일괄처리기법, 확장칼만필터링, 매개변수추정, 물체 치수

Abstract It is very important to reduce the computational processing time for the application of the vision system in real time such as inspection, the determination of object's dimension and welding etc, because the vision system model involves a lot of measurement data acquired by CCD camera. Also, a lot of computation time is required in estimating the parameters in the vision system model if the iterative batch estimation method such as Newton Raphson is used. Thus, the effective computation method such as the Extended Kalman Filtering(EKF) is required to solve the above problems. The EKF has much advantages in that it takes explicitly into account the measurement uncertainties, and is a simple and efficient recursive procedures. Thus, this study is to develop the EKF algorithm to compute the parameters in the vision system model in real time. This vision system model involves the six parameters to account for the cameras inner and outer parameters. Also the EKF is applied to estimate the object's dimension. Finally, practicality of the estimation scheme of the vision system based on the EKF is verified experimently by performing the estimation of object's dimension.

Keywords: vision system, computational processing time, batch estimation, Extended Kalman Filtering, parameter estimation, object's dimension

1. 서 론

비전시스템을 제품의 검사, 주변검사 및 치수결정 등을 위한 실시간 산업현장에 적용하기까지는 해결해야할 많은 문제들이 있는데, 해결해야할 주요 문제점들은 첫째로 많은 데이터를 저장하기 위한 메모리의 확보와 메모리 손실에 따른 처리 속도의 저하와 3차원 공간에서 존재하는 물체 위치를 2차원 카메라 좌표계로 매핑하기 위한 상호간의 보정관계식에 대한 정보가 정확해야 한다[1-5].

이리하여 실시간 비전시스템을 적용하기 위해서는 비전시스템에 사용되는 CCD카메라의 내부 및 외부 매개변수추정을 위한 비전시스템 모델개발이 필수적이다. 비전시스템을 실시간에 효과적으로 적용하기 위해 반복적인 계산을 필요로 하는 일괄 처리 기법(Batch method) 대신에 칼만 필터링을 사용하여 시스템에 존재하는 매개변수(상태변수)들을 추정하는 방법이 개발되었다[6,7]. 칼만 필터(Kalman filter)는 선형시스템의 상태변수를 추정하는 방법으로서 시스템이 선형이기는 하지만 그 시스템 변수들을 모를 때, 시스템변수와 상태변수를 동시에 추정할 수 있다는 장점을 지니고 있으나, 선형화된 모델을 잘못 선정하였을 경우 전혀 다른 값을 추정하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해, 개발된 확장 칼만 필터링(Extended Kalman Filtering)방법은 초기치에 대하여 선형화 된 모델에서 다음의 추정치를 구하고, 새로운 추정치를 사용하여 다시 선형화 모델을 구하여 다음 값을 추정하는 방법을 사용한다[8]. 이러한 장점 때문에 본 연구는 물체치수 추정 시 사용된 비전 센서(CCD카메라)의 많은 데이터로 인한 처리속도의 저하로 실시간 추정의 어려움을 해결하기 위하여 Skarr 등[4]이 사용한 일괄처리기법 대신에 실시간 처리가 가능한 확장 칼만 필터링을 이용하였다. 이리하여 본 연구는 사용되는 비전시스템 모델의 6개 매개변수 추정과 이를 이용한 물체치수를 추정하는데 확장 칼만 필터링을 적용하는데 그 목표를 두었다. 또한 개발된 추정기법의 실시간 적용의 타당성을 실험을 통하여 보이고자 한다.

2. 비전시스템 모델 개발

비전시스템 모델은 6개의 매개변수를 포함하는데 $C_1 \sim C_4$ 는 카메라의 초점거리 및 방향의 변화성을 설

명하는 내부 매개변수를 나타내고, $C_5 \sim C_6$ 는 카메라에 대한 물체 위치와 방향의 불확실성을 설명하는 외부매개변수를 나타낸다. 이에 대한 비전시스템 모델식은 다음과 같다[9].

$$\begin{aligned}
 X_m &= (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2)f_x + 2(C_2C_3 + C_1C_4)f_y \\
 &\quad + 2(C_2C_4 - C_1C_3)f_z + C_5 \\
 Y_m &= 2(C_2C_3 - C_1C_4)f_x + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)f_y \\
 &\quad + 2(C_3C_4 + C_1C_2)f_z + C_6
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, f_x , f_y 와 f_z 는 공간상 물체 위치의 좌표값을 나타낸다.

3. 확장 칼만 필터링을 이용한 비전시스템의 추정기법 개발

비전시스템의 추정기법에 사용된 확장 칼만 필터링의 전체적인 작동방법은 Fig. 1에서 보여준다.

확장 칼만 필터링의 칼만 이득값 K_k 를 구하기 위해 사용된 방정식의 자코비안 H_k 는 측정데이터를 정확히 전달하거나 확대하기 위하여 사용된다. 확장 칼만 필터링의 측정모델과 공정모델을 사용하여 비전시스템의 매개변수 및 물체치수 추정 모델을 각각 개발한다.

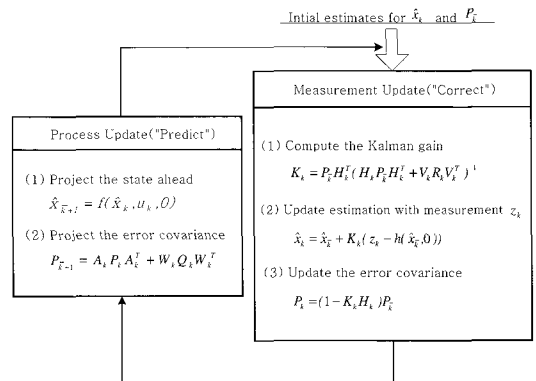


Fig. 1 The procedure of the operation of the Extended Kalman Filter

3.1. 비전시스템의 매개변수 추정기법

비전시스템의 6개 매개변수를 Fig. 1에서 보여주는 확장 칼만 필터링을 이용하여 추정하기 위해서는 Fig. 1의 비선형 함수인 f 와 h 를 정의하는 것이

필요하다. 매개변수 C 를 추정하기 위해 정의된 공정 및 측정모델에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$\cdot \text{공정모델} \quad x_{k+1} = f(x_k, u_k) \quad (2)$$

$$\cdot \text{측정모델} \quad z_k = h(x_k, V_k) \quad (3)$$

Eq. (2)과 (3)에 주어진 공정 모델 및 측정모델에 대한 함수 f 와 h 는 다음과 같이 정의한다.

$$f(x_k, u_k) = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6]^T \quad (4)$$

$$h(x_k, 0) = \begin{bmatrix} h_x^i \\ h_y^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_m^i \\ Y_m^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2)f_x^i + 2(C_2C_3 + C_1C_4)f_y^i + 2(C_2C_1 - C_1C_3)f_z^i + C_3 \\ 2(C_2C_3 - C_1C_4)f_x^i + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)f_y^i + 2(C_3C_4 + C_1C_2)f_z^i + C_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, i 는 측정하고자 하는 물체들의 개수를 나타낸다.

3.1.1. 측정모델의 보강 방정식

매개변수 추정을 위한 Fig. 1의 측정모델 보강 방정식은 칼만 이득값 K_k 사용한 카메라의 매개변수 \hat{x}_k 및 오차 공분산 P_k 등 크게 3개로 구성된다.

$$K_k = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1} \quad (6)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - h(\hat{x}_k^-, 0)) \quad (7)$$

$$P_k = (1 - K_k H_k) P_k^- \quad (8)$$

여기서,

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial C_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_x}{\partial C_1} & \frac{\partial h_x}{\partial C_2} & \frac{\partial h_x}{\partial C_3} & \frac{\partial h_x}{\partial C_4} & \frac{\partial h_x}{\partial C_5} & \frac{\partial h_x}{\partial C_6} \\ \frac{\partial h_y}{\partial C_1} & \frac{\partial h_y}{\partial C_2} & \frac{\partial h_y}{\partial C_3} & \frac{\partial h_y}{\partial C_4} & \frac{\partial h_y}{\partial C_5} & \frac{\partial h_y}{\partial C_6} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$z_k = \begin{bmatrix} X_c^i \\ Y_c^i \end{bmatrix} \quad (10)$$

또한, Eq. (6)의 측정치 모델의 잡음에 의한 영향 성분 $V_k R_k V_k^T$ 는 2×2 의 단위행렬을 사용하였으며 Eq. (10)의 X_c^i 와 Y_c^i 는 측정하고자 하는 물체의 각 지점의 측정된 비전데이터 x 성분과 y 성분을 나타낸다.

3.1.2. 공정 모델의 예측 방정식

Fig. 1의 매개변수 추정을 위한 공정모델 예측 방정식은 매개변수 예측 \hat{x}_{k+1}^- 과 오차 공분산값 P_{k+1} 등 크게 2개로 구성된다.

$$\hat{x}_{k+1}^- = f(\hat{x}_k, u_k) \quad (11)$$

$$P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + W_k Q_k W_k^T \quad (12)$$

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. 물체치수 추정모델개발

비전시스템 모델에 포함된 3개의 공간상 물체 위치의 좌표 $f_x \sim f_z$ 을 Fig. 1에서 보여준 확장칼만 필터링을 이용하여 추정하기 위해서 3.1절에서 각 카메라에 대한 매개변수 ($C_1 \sim C_6$)가 계산되었다는 가정 하에서 추정방법이 개발된다. 이를 위해 Eq. 1의 비전 시스템 모델 방정식을 변형하면 다음과 같다.

$$X_i^q = C_{11}^q f_x + C_{12}^q f_y + C_{13}^q f_z + C_5^q \quad (13)$$

$$Y_i^q = C_{21}^q f_x + C_{22}^q f_y + C_{23}^q f_z + C_5^q \quad (14)$$

여기서, C_i^q 는 사용된 q 개 카메라에 대해 3.1절에서 계산되어 알려진 카메라 매개변수 값이고, X_i^q 와 Y_i^q 는 각 카메라에 대한 목표지점의 측정된 비전 데이터의 x 성분과 y 성분을 나타내며 f_x, f_y, f_z 는 알려지지 않은 목표지점의 위치의 성분값을 나타낸다.

Fig. 1에서 보여준 확장 칼만 필터링의 매개변수 추정과 같이 공정 및 측정모델에 대한 함수 f 와 h 를 다음과 같이 정의하였다.

$$f(x_k, u_k, 0) = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$h^q(x_k, 0) = \begin{bmatrix} h_x^q \\ h_y^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{C_i}^q \\ Y_{C_i}^q \end{bmatrix} \quad (16)$$

3.2.1. 측정모델 보강 방정식

Fig. 1의 물체치수 추정을 위한 측정모델 보강 방정식은 칼만 이득값 K_k , 매개변수 \hat{x}_k 및 오차 공분산 P_k 등 크게 3개로 구성되어진다.

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

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

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

여기서,

$$H_k = \frac{\partial h^q}{\partial x} = \frac{\partial h_x^q}{\partial f_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_x^q}{\partial f_x} & \frac{\partial h_x^q}{\partial f_y} & \frac{\partial h_x^q}{\partial f_z} \\ \frac{\partial h_y^q}{\partial f_x} & \frac{\partial h_y^q}{\partial f_y} & \frac{\partial h_y^q}{\partial f_z} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$z_k = \begin{bmatrix} X_t^q \\ Y_t^q \end{bmatrix} \quad (21)$$

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

3.2.2. 공정 모델 예측 방정식

물체 치수 추정을 위한 Fig. 1의 공정모델 예측 방정식은 매개변수 예측 \hat{x}_{k+1} 과 오차 공분산 행렬 P_{k+1} 등 크게 2개로 구성되어진다.

$$\hat{x}_{k+1}^- = f(\hat{x}_k, u_k, 0) \quad (22)$$

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

여기서, 행렬 A_k 는 4×4 행렬의 크기를 갖는 단위행렬로 정의하였으며, 공정모델의 잡음에 의한 영향 성분 $W_k Q_k W_k^T$ 는 동등한 가중치를 갖는 4×4 단위 행렬로 정의하였다.

4. 실험 및 결과

4.1. 실험장치

Photo 1은 본 연구에서 행해진 실험장치에 대한 전체적인 구성을 보여준다. 실험장치는 비전시스템, Host PC, 시험모형 등 크게 3가지로 구성되며, 비전시스템에서 사용된 CCD카메라는 AVENIR TV 줌 렌즈를 부착한 유효화소수 768(H) × 494(V), 570 × 485(TV) 해상도를 본을 갖는다.

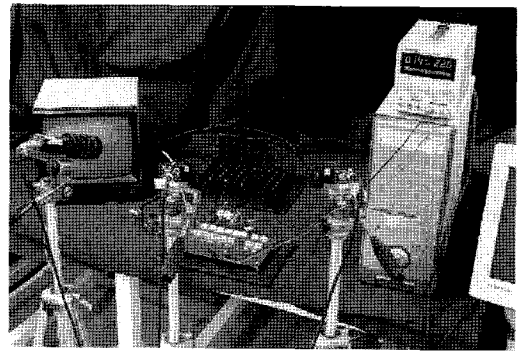


Photo 1 Experimental apparatus

4.2. 실험모형

본 실험에서 물체윤곽의 치수를 측정하기 위해서 물체의 형상이 각 카메라 평면상에 존재해야 하고, 그 형상으로부터 비전 데이터를 얻을 수 있어야 한다. 따라서 본 실험에서 사용한 시험 모형은 Fig.2와 같이 평면상에서 치수를 알고 있는 물체의 형태를 나타내기 위한 큐들을 일정한 간격으로 배치하였다. 큐의 개수는 총 44개를 사용하였고, Part 1~2의 큐들은 EKF에 사용될 초기 값을 얻기 위한 초기 구동구간으로 물체 치수 측정 전 단계까지 일괄 처리기법이 적용되었으며[10], Part 5~9의 큐들은 Part 1~2에서 얻어진 초기값을 이용한 EKF에서 물체 치수 결정을 위한 구간으로 사용되었다. 본 실험에서는 보여준 시험모형의 큐들을 적절히 조합하여 직사각형과 삼각형 형상을 구현하였다.

본 실험에서는 시험 모형의 정면의 좌우 방향에서 2대의 카메라를 사용하여 본 시험 모형이 각 카메라 화면상에 나타나도록 조정한 후, 각 큐의 비전 데이터를 얻는다. 이를 토대로 6개의 매개 변수와 물체의 치수를 추정하게 된다.

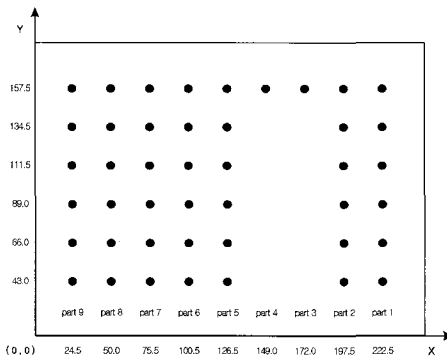


Fig. 2 Experimental test model using LED in the plane

4.3. 실험절차

확장 칼만 필터링을 이용한 비전 제어기법을 물체 치수 추정을 위해 행한 실험 방법은 Fig. 3과 같으며, 각 단계에 대한 설명은 다음과 같다.

- (1) Step1 : 물체 치수 결정 초기 단계로 Part1~2 까지 큐를 이동 시킨다.
- (2) Step2 : 2대 이상의 카메라와 비전 보드에 의해서 각각의 카메라에 대한 비전 데이터를 획득한다.

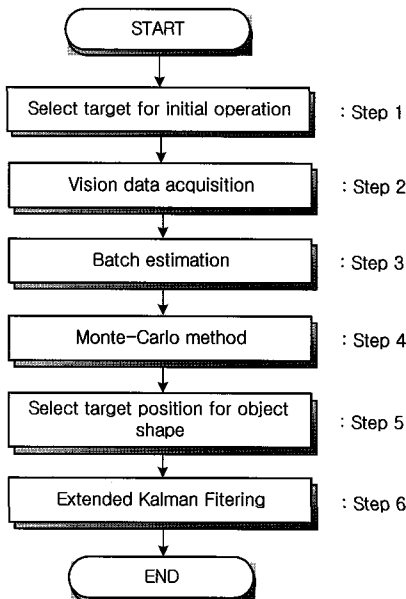


Fig. 3 The experimental procedures for the estimation of object's dimension

- (3) Step3 : 물체 치수 결정 초기 단계구동단계 동안 각각의 단계에 대한 매개변수와 $f_x \sim f_z$ 을 일괄처리기법을 통하여 추정한다. 그리고 마지막 단계의 매개변수와 초기 목표점(target)의 $f_x \sim f_z$ 을 저장하여 확장 칼만 필터링 사용 시 초기값으로 사용한다.
- (4) Step4 : Monte-carlo 방법[10]을 통하여 각각의 카메라에 대한 매개변수의 오차 공분산 행렬과 $f_x \sim f_z$ 의 오차 공분산 행렬을 구하여 저장한다.
- (5) Step5 : 물체 형상에 맞는 target을 선정하여 각 target에 대한 비전 데이터를 획득한다.
- (6) Step6 : Step3에서 구해진 초기값과 Step4에서 구해진 공분산 행렬을 확장 칼만 필터링에 적용시켜 선정된 각 target에 대한 물체치수를 추정하여 측정한다.

4.4. 실험결과

4.4.1. 매개변수 추정 결과

Fig. 4~5는 직사각형 물체형상에 존재하는 18개 큐에 대해 3.1절에서 설명되어진 매개변수 추정기법을 통해 구해진 매개변수 ($C_1 \sim C_6$)를 비전시스템 모델식 Eq. (1)에 적용하여 얻어진 추정모델값과 실제 얻어진 데이터를 카메라 별로 비교하여 나타낸 것이다. 각 Fig에서 실제로 카메라로부터 얻어진 데이터값은 ×로 표시하였으며, EKF 추정모델값은 ○으로 표시하였다. 각 큐에 대해서 실제값과 추정값을 비교하면 카메라 평면상에 평균오차는 ±0.1 픽셀이 되어 거의 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 6~7은 삼각형 물체에 존재하는 12큐에 대해 3.1절에서 설명된 매개변수 추정기법을 통해 얻어진 추정모델값과 실제 얻어진 데이터를 카메라 별로 비교하여 나타내었는데 직사각형 형상과 같이 추정값과 실제값을 비교하면 평균오차가 ±0.1픽셀로 거의 일치함을 보여준다. 이리하여 본 연구에서 사용된 EKF의 비전시스템 매개변수 추정기법은 타당함을 알 수 있다. 또한, 일반적인 반복기법인 Newton-Raphson 방법은 매개변수 값이 수렴하기 위해서는 4~5번의 반복수행이 필요하였으나, 순환기법인 EKF방법은 단 1번의 계산으로 매개변수값을 얻을 수 있어 4~5배의 처리 속도 향상을 보였다.

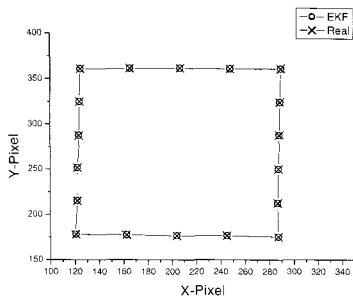


Fig. 4 Comparison of the actual vision data and model's value based on EKF in camera #1 in the rectangle object

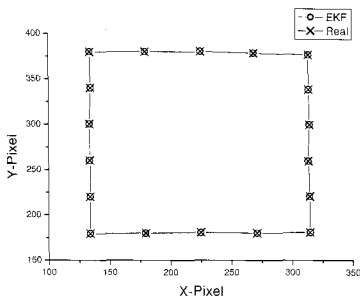


Fig. 5 Comparison of the actual vision data and model's value based on EKF in camera #2 in the rectangle object

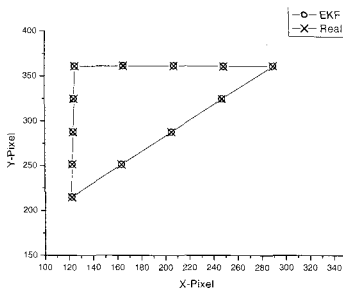


Fig. 6 Comparison of the actual vision data and model's value based on EKF in camera #1 in the triangle object

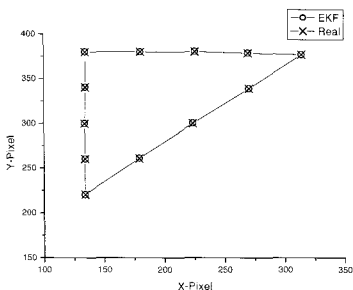


Fig. 7 Comparison of the actual vision data and model's value based on EKF in camera #2 in the triangle object

4.4.2. 물체치수 추정 결과

Fig. 8~9는 4.4.1절에서 추정된 매개변수 C 를 이용하여 2개 물체 형상에 존재하는 각 큐들의 치수 추정값(\bullet)과 실제값(\circ)을 비교하여 보여주며, EKF를 이용한 추정된 각 큐들이 치수값이 큰 오차 없이 추정되고 있음을 알 수 있다.

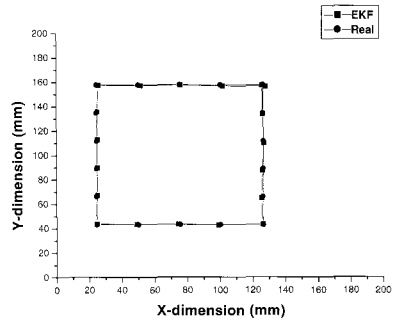


Fig. 8 Comparison of the real value and estimated f_x, f_y based on EKF for the rectangle object's dimension

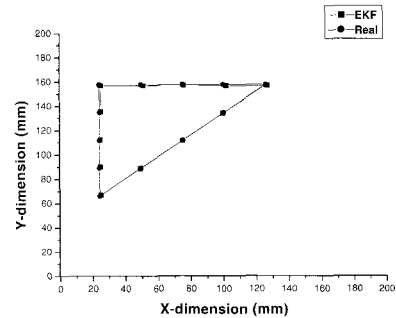


Fig. 9 Comparison of the real value and estimated f_x, f_y based on EKF for the triangle object's dimension

Fig. 8은 직사각형 형상에 존재하는 18개 큐들의 치수 추정값을 실제값과 비교하여 보여주며, 각 큐들에 대한 평균 절대오차값 ± 0.5 mm의 정밀도를 나타내었다. 특히 Fig 오른쪽 상단 큐에 대해서만 ± 1.0 mm의 절대오차가 발생하였는데, 이 큐는 치수추정 시 첫 번째 큐로 사용되어 EKF의 수렴성 때문에 발생한 것으로 생각된다. Fig. 9는 삼각형 형상에 존재하는 12개 큐들에 대한 평균절대 오차값은 직사각형 형상과 마찬가지로 ± 0.5 mm의 정밀도를 보여주었다. 여기서 직사각형 형상과 마찬가지로 치수 추정 시 첫 번째 큐로 사용된 Fig 우측

상단 큐에서만은 EKF의 수렴성 때문에 ± 0.9 mm 정도가 발생되었다고 생각된다. 그리고 물체치수추정을 위한 알고리즘 처리속도는 매개변수 추정기법과 같이 EKF의 방법을 이용하여 1번의 계산으로 물체 치수 추정값을 얻을 수 있어 반복기법에 비해 4~5배의 처리속도 향상을 기하였다.

5. 결 론

선정된 평면상에 존재하는 직사각형과 삼각형 물체 형상들의 치수를 추정하기 위해, 비전시스템 모델에 포함된 6개 매개변수들과 물체 치수들을 확장 칼만 필터링을 사용하여 실시간으로 추정하는 기법을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 알고리즘을 실시간 물체 치수 추정에 적용하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 선정된 2개 물체 형상에 대해서 확장 칼만 필터링을 사용하여 매개변수를 추정하여 얻은 비전시스템 모델값과 실제 얻어진 데이터 값을 비교하면 평균오차가 ± 0.1 픽셀 정도의 오차를 가져 거의 정확한 값이 추정되었다.
- (2) 물체 치수 추정에서 실험 결과는 2개의 물체 형상들을 나타내기 위하여 사용되는 큐들의 실제 좌표와 확장 칼만 필터링을 적용하여 추정된 큐들의 치수를 비교 분석한 결과 평균오차는 약 ± 0.5 mm이고, 추정 시 첫 번째 큐에 대해서만 EKF의 수렴성 때문에 최대 오차가 ± 1.0 mm를 나타내어 추정되었다.
- (3) 비전시스템 매개변수 및 물체 치수값을 추정하는데 순환기법인 확장칼만 필터링을 사용하여 기존의 Newton-Raphson의 반복기법보다 4~5배 이상의 처리속도 향상을 기했다.
- (4) 평면상 물체치수 추정결과를 이용하여 공간상에 존재하는 물체 치수 추정 기법 연구가 필요하며, 또한 본 논문에 사용한 추정기법은 실시간 처리가 가능하므로 공장 자동화 조립 작업, 물체치수검사, 표면결함 탐사 및 용접작업등에 적용할 경우 상당한 시간절감의 효과를 가져올 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2004년도 조선대학교 레이저 응용 신기술 개발 연구센터의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

- [1] K. P. H. Berhord, "Robot Vision," Cambridge, Massachusetts, The MIT press, pp. 46-48, (1986)
- [2] W Li. and L. Grier, "An application of on-line calibration of machine vision for object position determination," Robotics and Vision (ICARCU '96), Singapore. pp. 105-109, (1996)
- [3] S. B. Skaar, H. W. Brockman, and Hanson R., "Camera-Space Manipulation", The International Journal of Robotics Research, Vol. 6, No. 4, pp. 20-32, (1987)
- [4] J. Bales and L. Barker, Marking Parts to Aid Robot Vision: NASA Technical Paper 1819, April, (1981)
- [5] I. Masaki, Method and Apparatus for Manipulator Welding Apparatus with Vision Correction for Workpiece Sensing: United States Patent 4,380,696, April, (1983)
- [6] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, " J. basic Rng. Trans. ASEM. Vol. 82D, pp. 35-45, (1960)
- [7] R. E. Kalman, "New Method In Wiener Filtering Theory," Proceedings of the First Symposium on Engineering Applications of Random Function Theory and Probability, J. L. Bogdanoff & F. Kosin. Eds, New York : Wiley, (1963)
- [8] H. Weiss, and J. B. Moore, "Dither in Exterded Kalman Filters," Optimization Days, Montreal, May (1977)
- [9] 장완식, 유창규 "비전시스템을 이용한 로봇 시스템의 점배치 실험에 관한 연구, 한국정밀공학 회지, Vol. 13, No. 8, pp. 175-183, (1996)
- [10] 김기영 "확장 칼만 필터링 모델의 비전 제어기법을 이용한 로봇 위치제어에 관한 연구" 조선대학교 석사학위 논문, pp. 44-45, (2004)