

# 움직이는 물체의 안정적인 파지를 위한 시각추적 알고리즘 개발

## The Development of a Visual Tracking Algorithm for the Stable Grasping of a Moving Object

차 인 혁 , 손 영 갑 , 한 창 수  
(In-Hyuk Cha, Young-Gab Sun, Chang-Soo Han)

**Abstract** : This paper proposes an advanced visual tracking algorithm for the stable grasping of a moving target(2D). This algorithm is programmed to find grasping points of an unknown polygonal object and execute visual tracking. The Kalman Filter(KF) algorithm based on the SVD(Singular Value Decomposition) is applied to the visual tracking system for the tracking of a moving object. The KF based on the SVD improves the accuracy of the tracking and the robustness in the estimation of state variables and noise statistics. In addition, it does not have the numerical unstability problem that can occur in the visual tracking system based on Kalman filter. In the grasping system, a parameterized family is constructed, and through the family, the grasping system finds the stable grasping points of an unknown object through the geometric properties of the parameterized family. In the previous studies, many researchers have been studied on only 'How to track a moving target'. This paper concern not only on 'how to track' but also 'how to grasp' and apply the grasping theory to a visual tracking system.

**Keywords** : SVD, Kalman filter, visual tracking, grasping system, parameterized family

### I. 서론

제조 공정이 다품종 소량 생산체제로 변화함에 따라 한 가지 작업만 수행하도록 프로그래밍된 로봇 시스템으로는 자주 변화하는 작업 공정에 유연하게 적응하기가 용이하지 않다. 따라서 로봇에 일정한 지능을 부여하여 작업의 변화를 스스로 감지하고 적절한 대응을 하기 위해서는 주변 상황을 감지하기 위한 센서 시스템의 구성이 필수적이다. 여러 가지 센서 시스템 중에서 CCD 카메라를 이용하는 비전 시스템은 인간의 눈과 비슷하게 구성되어 있으므로 인식 시스템이 필요한 분야라면 어디나 적용이 가능하다. 여러 분야에 적용 가능성을 갖고 있기 때문에 각종 지능형 인식 작업에 이 시스템을 적용시키려는 연구가 활발히 진행되고 있고, 이미 많은 연구 결과가 보고되고 있다. 측정 잡음을 포함하고 있는 CCD카메라를 이용하여 비전 시스템을 구성하기 위해서는 측정 오차를 가능한 줄일 수 있도록 하는 것이 무엇보다 중요하다. 또한 정밀한 작업을 수행할 수 있는 시스템의 구성뿐만 아니라 작업에 필요한 시간도 가능하면 짧도록 하여야 한다. 이와 같은 제어 조건을 만족시킬 제어 방법으로 시스템의 상태 변수의 변화를 추정하여 가장 최적의 제어 계인을 찾아내어 시스템을 구동 시키는 방법이 제안되었다.

시스템의 상태 변수는 시스템 출력을 이용하여 추정하게 되는데 칼만 필터는 다른 추정 알고리즘에 비해 정확한 추정이 가능한 알고리즘이다. William과 Wang[1]등은 칼만 필터를 이용한 추정 알고리즘을 연구하여 로봇 시스템에 적용하였다. William은 이 연구에서 하나의 카메라로 물체의 3차원 위치와 자세를 계산해 내고 추정하는 알고리즘을 제안하였으며 물체의 크기와 모양에 대한 정보는 이미 알고 있다고 가정하였다. Papanikolopoulos[2]는 PID, LQG, Pole-placement 등의 다양한 고전적 제어법칙을 이용하여 추정 알고리즘을 연구하였다. 칼만 필터를 비선형 시스템에 적용

할 수 있도록 확장한 EKF(Extended Kalman Filter)알고리즘에 대한 연구는 이미 수 년전부터 이루어져 왔다. EKF알고리즘은 잡음이나 모델링 외란이 있는 비선형 시스템의 상태 변수나 시스템 인자들의 추정에 적용될 수 있으나 계산 과정에서 발생하는 상호분산 행렬이 수치적인 불안정성을 갖고 있었다[3]. EKF알고리즘의 수치적 불안정성을 해결하기 위하여 Potter [4]는 상호분산 행렬의 제곱근을 이용하는 방법을 제안하였고 Bierman[5]는 제곱근 분해 대신 상호분산 행렬을 로 분해하는 방법을 제안하였다. 그러나 이러한 알고리즘들은 비상관 측정잡음(uncorrelated measurement noise)을 갖는 1차원 측정(single dimensional measurement)일 때만 적용가능하며 상관 측정 잡음(correlated measurement noise)이 있는 경우 추가적인 변환요소가 필요하게 된다. 따라서 Wang[4]은 수치적인 안정성 뿐만 아니라 부가적인 변환이 없이도 서로 상관된 측정잡음도 다룰 수 있도록 칼만 필터 알고리즘에 특이값 분해법(Singular Value Decomposition)을 적용하였다. 이 알고리즘은 EKF알고리즘에 비해 서로 다른 초기값과 잡음에 대해서 상태변수나 시스템 인자의 추정이 좀 더 정확하다. Wang의 연구이후 Zhang[6]은 선형시스템에만 적용되었던 Wang의 연구를 비선형 시스템을 다룰 수 있도록 EKF에 SVD방법을 적용하여 비행체를 추적할 수 있는 추적 알고리즘을 개발하였다.

추적한 대상물을 grasping하기 위한 이미지 예측 알고리즘에 대한 연구로는 Kornatzky[7]이 최고 가능성이론으로 제한된 영역에서 특정 모서리 점을 예측하는 알고리즘을 구현하였고 Aisbett[8]와 Shariat[9]는 여러 개의 대응된 특징 점으로부터 이미지의 기하학적 특성을 예측하는 방법을 연구하였다. 화상정보를 이용한 물체의 추적과 파지(grasping)에 대한 연구[10]-[14]는 정지된 물체의 인식 및 파지[14]에 관한 연구에서 시작하여 현재는 움직이는 물체를 추적하여 파지할 수 있도록 하는 연구가 진행되고 있다. 그러나 기존의 연구는 움직이는 물체를 추적하여 파지하는 것에만 관심이 있으며 물체를 어떻게 잡을 것인가 즉, 안정한 파지에 대한 문제는 생각하지 않고있다. 따라서 본 연구에서는 추적시스템을 통하여 추적한 2차원 물체를 안정하게 파지할

수 있도록 추적 시스템을 구성하고 물체를 인식하고 파지점을 찾아내는 알고리즘을 구성하였다. 이때 추적 시스템은 SVD를 적용한 KF알고리즘을 사용하여 구성하였고 파지 시스템은 사전지식이 없는 작업 대상물의 기하학적인 특성을 인식할 수 있도록 대상 물체의 기하학적 특징을 매개화된 군체로 표현하고, 이 군체를 이용하여 안정한 파지[15]를 위한 파지점(grasping point)을 선정하도록 구성하였다. 본 연구의 최종목표는 작업 대상물을 CCD 카메라를 이용한 시각정보를 이용하여 추적하고 추적한 대상물의 기하학적 특성을 사전지식이 없이 인식하며 안정한 파지점을 선정할 수 있는 시스템을 구성하는데 있다.

II. 시스템 구성

본 연구를 수행하기 위하여 그림1과 같은 시스템 블록을 구성하였으며 크게 기능별로 추적시스템(tracking system)과 파지 시스템 그리고 로봇 시스템으로 나눌 수 있다. 여기서 추적 시스템은 이미지 예측기와 궤적 생성부로 구성되며 파지시스템은 형상 추론기와 파지 계획기(grasp planner)로 구성된다. 이미지 예측기는 카메라가 화상정보로 받아들이는 영역을 결정하며 칼만 알고리즘을 이용하여 이 영역의 위치를 추정하게 된다. 이때 추적 대상물체의 위치를 함께 추정하게 되며 화상처리와 형상추론은 이 영역내의 정보로 수행하게 된다. 궤적 생성부는 현재의 로봇 시스템 위치를 추정된 대상물체의 위치로 이동시키기 위하여 필요한 궤적을 생성하여 로봇 시스템부로 전달한다. 형상 추론기는 카메라로부터 얻어진 화상정보를 처리하여 물체의 형상을 유도하고 매개화된 군체를 구성한다. 이 부분이 전체 프로그램 모듈 중 계산시간을 가장 많이 차지하는 부분이며 수행 알고리즘의 개선이나 고성능 데이터 처리장치나 병렬연산 기법의 도입으로 계산 시간을 단축시킬 수 있을 것으로 생각된다.

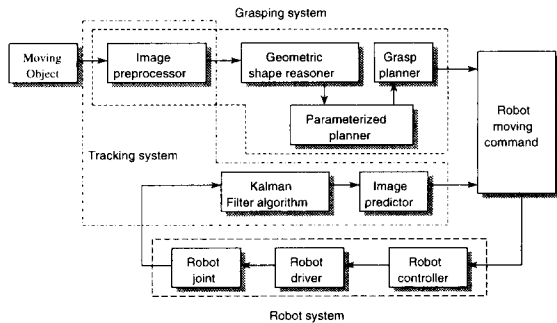


그림 1. 시스템 구성도.  
Fig. 1. System construction.

파지계획자는 매개화된 군체를 이용하여 파지시 물체에 대하여 force closure가 이루어지는 파지위치를 선정한다. 이때 로봇 손가락의 크기를 사전에 입력받아 파지할 물체의 선정된 파지위치가 로봇 손가락이 도달할 수 없는 위치라면 다른 파지위치를 선정할 수 있도록 구속조건을 줄 수 있다. 파지계획자는 불필요한 계산을 줄이기 위하여 추적장에 처음 입력된 추적 물체에 대하여만 수행하도록 한다. 일단 추적장에 입력된 물체의 파지점이 선정되면 물체의 중심위치만을 추정하여 추적하게 되며 파지 점은 추정된 값으로부터 계산할 수 있다. 파지를 완료할 때까지 추적 시스템이 추적 점들을 추적하게 되며 작업종료 후 새로운 추적 물체를 포착할 수 있도록 카메라를 이동하게 된다. 그림 2는 전체 시스템을 운영하는 프로그램의 흐름도이다. 그림 2에서 물체의 추적부분에는 로봇의 구동부분이 포함되어 있으며 파지가 완료되었는지를 알려주는 신호를 발생한다.

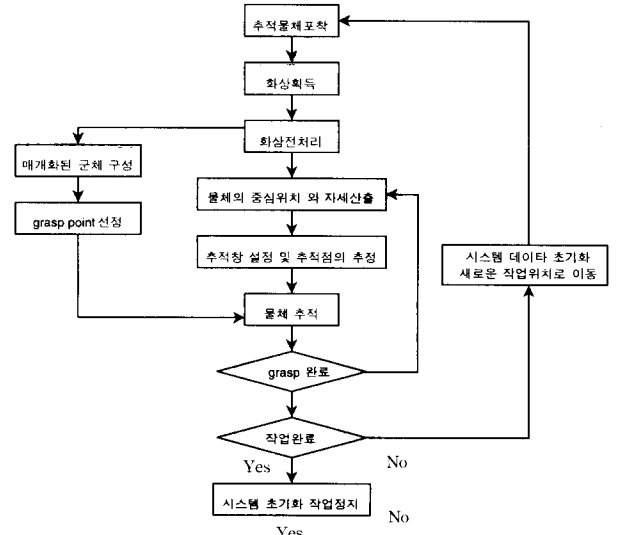


그림 2. 시스템 운영 프로그램 흐름도.  
Fig. 2. The flowchart of the system program.

시스템을 구성하는 H/W를 살펴보면 controller는 모든 계산 과정의 처리시간 단축과 시스템의 운영효율을 높이기 위하여 586PC와 TMS320C31 DSP가 데이터를 분담하여 처리하도록 구성하였다. 주변 장치로는 화상획득을 위한 image grabber와 각 신호의 입출력을 위한 I/O channel과 로봇암을 움직이기 위한 구동명령 출력장치 등으로 구성되어 있다. 본 시스템이 안정적으로 작동하기 위해서 물체의 움직임이 각 샘플링 시간동안 그 속도가 상수로 표현될 정도로 서서히 움직이며 움직임 궤적은 충분히 부드럽게 움직인다고 가정한다. 그리고 샘플링 시간은 화상데이터를 처리하고 최종적으로 로봇암에 추종명령을 내릴때까지 걸리는 시간에 따라 결정되며 일반적으로 1 cycle time(4 msec)보다 길게 설정한다. 구동용 로봇으로는 SCARA type의 FARA로봇으로 선정하였고 카메라는 16mm lens, inter pixel space 0.0086mm, 초점거리 12mm 그리고 640 x 480 pixel array를 지닌 CCD를 사용하였다.

III. 시각추적 시스템(tracking system)

1. 확장된 칼만필터를 이용한 위치추정

움직이는 물체의 위치를 추정하기 위한 알고리즘에 필요한 출력모델식과 시스템 모델은 각각 (1),(2)와 같다.

$$Z_k = HX_k + \xi_k \tag{1}$$

$$X_k = AX_{k-1} + \eta_k \tag{2}$$

여기서

- $Z_k = [x_k, y_k, \theta_k]$  : 출력벡터
- $X_k = [x, \dot{x}, y, \dot{y}, \theta, \dot{\theta}]$  : 시스템 상태 벡터
- $A$  : 시스템 행렬
- $H$  : 시스템 출력 행렬
- $x, y, \theta$  : 추적물체의 중심좌표와 회전각
- $\xi_k$  : 상호분산  $R$ 을 지닌 영 평균가우시안 백색외란
- $\eta_k$  : 상호분산  $Q$ 를 갖는 동적 모델링 외란 벡터

상호분산 행렬(covariance matrix)의 갱신(update)을 위하여 SVD를 적용하였다. 측정 방정식에서 각 상태변수에 따른 잡음(noise)항은 서로 독립적이므로 상호분산 행렬은 실험을 통하여 얻은 값인  $R = \text{diag}\{0.06, 0.06, 0.06\}$ 로 정하였다. 따라서 SVD를 적용한 칼만필터를 (3),(4)와 같이 정식화 한다[6].

• Time update formulation

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k+1/k} &= A \hat{X}_{k/k} \\ P_{k/k} &= U_{k/k} D_{k/k}^2 U_{k/k}^T \\ P_{k+1/k} &= A_{k+1/k} U_{k/k} D_{k/k}^2 U_{k/k}^T A_{k+1/k}^T + Q_k \end{aligned} \quad (3)$$

• Measurement update formulation

$$\begin{aligned} K_{k+1} &= U_{k+1/k} D_{k+1/k}^2 U_{k+1/k}^T H_k^T (R_k + H_k P_{k+1/k} H_k^T)^{-1} \\ \hat{X}_{k+1/k+1} &= \hat{X}_{k+1/k} + K_{k+1} [Z_{k+1} - H_k \hat{X}_{k+1/k}] \\ P_{k+1/k+1}^{-1} &= P_{k+1/k}^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k \\ L_k L_k^T &= R_k^{-1} \text{ (cholesky decomposition)} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$H(X_k) = -F \begin{bmatrix} \frac{1}{P_x Z^c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{P_y Z^c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{F} & 0 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- $F$  : 카메라 초점거리(0.0173m)
- $P_x$  : 1 화소의 x방향 크기(0.00006m/pixel)
- $P_y$  : 1 화소의 y방향 크기(0.00006m/pixel)
- $T$  : 샘플링 시간 (0.01sec)
- $Z^c$  : 카메라에서 물체까지의 거리(0.2m)

이때 상호분산 행렬을 구하기 위한 행렬[3]을

$$SVD \left[ \begin{array}{c} D_{k/k} U_{k/k}^T A_k^T \\ \sqrt{Q^T G^T} \end{array} \right] = U_k \begin{bmatrix} D_k \\ 0 \end{bmatrix} V_k^T \quad \begin{array}{l} U_{k/k-1} = V_k \\ D_{k/k-1} = D_k \end{array} \quad (5)$$

$$SVD \left[ \begin{array}{c} L_k^T H_{k/k} U_{k/k-1} \\ D_{k/k-1}^{-1} \end{array} \right] = U_k \begin{bmatrix} D_k \\ 0 \end{bmatrix} V_k^T \quad \begin{array}{l} U_{k/k} = U_{k/k-1} V_k \\ D_{k/k} = D_{k/k-1} \end{array} \quad (6)$$

과 같이 유도하고 계산된 값을 이용하여 상호분산 행렬을 갱신(update)한다.

2. 화상위치 예측 알고리즘

카메라를 통하여 광범위한 작업 영역 전체의 영상 정보를 얻어내어 처리하는 경우 여러가 많아지며 방대한 데이터 처리로 추적시스템(tracking system)에 필수적인 실시간 처리(real-time processing)가 불가능하게 된다. 따라서 작업 대상물의 위치를 예측하고 그 위치를 기준으로 일정한 크기의 창(window)을 설정하여 창 내부의 화상 이미지만 받아들여 처리하도록 시스템을 구축한다. 이때 물체의 대략적인 초기 위치와 크기는 이미 알고 있는 것으로 가정한다. 물체가 일단 창 내부로 들어오면 그 물체의 다음 위치는 추적 시스템이 추정하며 카메라를 그 위치로 이동시켜 다음 화상(image)을 받아 들일 수 있도록 한다. 추적 대상은 물체의 중심좌표이며 비전 시스템을 이용하여 얻어낸 화상 데이터를 처리하여 중심좌표를 추출한다. 한번 추적을 시작한 물체에 대해서는 작업이 종료될 때까지 추적을 계속하게 되며 물체의 파지점은 물체의 화상을 받아들인 직후 찾아내어 중심점에 대한 좌표로 데이터화하고 물체를 파지할 때 그 데이터를 사용할 수 있도록 하였다. 화상 예측 알고리즘이란 바로 이러한 일련의 과정을 결정하는 것이며 단계별로 설명하면 다음과 같다.

단계1 (화상 획득) : 단계4로부터 전달된 예측된 창의 위치에 근거하여 새로운 화상을 받아들인다.

단계2 (특징점 추출) : 화상의 특징점을 칼만 필터의 입력값으로 이용

단계3 (칼만 예측) : 칼만 필터 알고리즘으로 다음 샘플링 시간의 센서 입력값 예측

단계4 (창의위치계산) : 예측된 특징점이 영역창 안에 존재하도록 창의 시작점을 결정한다.

IV. 파지 시스템

1. 형상 추론

사전지식이 없는 대상물체를 안정하게 파지하기 위해서는 작업 대상의 크기, 형상, 표면의 재질등과 같은 데이터가 요구되며 특히, 물체의 크기와 형상은 파지 위치를 결정하는데 있어서 중요한 인자들이다. 물체의 형상과 크기와 같은 기하학적 정보를 얻기 위하여 먼저 카메라로부터 얻은 화상 정보로부터 작업 대상물체의 형상을 유도하여야 하며 대상물체의 모서리 점을 검출하여 형상을 유도하는 방법 [11]을 사용하였다. 이때 원 영상에 포함된 잡음을 제거하기 위하여 메디안 필터를 사용하였고, 화상 내의 gray level 변화에 무관하게 물체와 배경의 분리하기 위한 임계값을 자동으로 설정하도록 [11] 구성 하였고 추출된 물체의 외곽선에 모멘트법을 적용하여 물체의 도심을 구한다. 또한 모서리 점은 chain code의 차로 표현되는 방향벡터를 이용하여 경계선의 방향 변화율을 고려하는 방법을 적용하여 구한다 [11]. 유도된 형상정보 즉 선과 모서리 점에 대한 정보와 도심의 위치는 안정한 파지를 위하여 매개화 된 군체[11]로 구성하였다. 이때 변과 접촉 시에는 변의 법선 벡터가 필요하며 절점 과의 접촉 시에는 절점을 이루는 양변의 접선 벡터가 필요하다[10]. 따라서 매개화 된 군체의 방향벡터 성분은 접촉시 발생하는 wrench계의 방향을 표현한다. 매개화 된 군체의 기본 형태는 물체의 마찰 계수가 주어진 경우 다음과 같이 표현된다.

$$\text{변} : E_i = [(\vec{n}_i - \mu \vec{t}_i, \vec{n}_i + \mu \vec{t}_i), (P_C, P_{C_{i+1}})]$$

$$\text{모서리 점} : C_i = [(\vec{n}_i - \mu \vec{t}_i, \vec{n}_{i+1} + \mu \vec{t}_{i+1}), (P_C)]$$

여기서

$$\vec{n}_i : i \text{ 번째 단위법선 } \vec{t}_i : i \text{ 번째 접선벡터}$$

$\mu$  : 물체의 마찰계수  $P_C$  :  $i$  번째 모서리 점 위치좌표  
 마찰 계수가 주어진 경우 좀 더 정확한 파지점을 찾아낼 수 있으나 마찰 계수를 미지수로 두는 경우 안정된 파지를 이루기 위한 문제는 힘 방향에 기준하여 파지 위치를 선정하는 문제로 귀결된다[16]. 로봇 파지 시스템에 적용하는 경우에는 로봇 손가락의 위치오차나 힘 방향 오차에 매우 둔감한 파지위치를 선정할 수 있으므로 형상 유도시 발생할 수 있는 오차에 둔감하게 대처할 수 있다. 본 연구에서는 마찰계수를 0으로 가정하고 실험을 수행하였다.

매개화 된 군체는 물체의 기하학적 특징을 나타내며 force closure 파지를 구성하기 위해 제한된 여러 가지 이론에 필요한 물체의 기하학적 정보를 제공할 수 있으므로 유용성이 매우 크다. 그림 3에 물체를 인식하기 위하여 카메라를 통하여 입력된 원화상(a)와 화상 처리된 형상(b) 그리고 그에 따른 매개화 된 군체의 예를 들어 놓았다.



(a)

(b)

| 10각형  | Parameterized families<br>[ 도심 : 141, 79 ]                 |       |
|-------|--|-------|
| $E_1$ | $[(-0.257 \ -0.966 \ -0.257 \ -0.966), (172, 24, 78, 49)]$ | 1     |
| $C_1$ | $[(-0.257 \ -0.966 \ -0.616 \ 0.788), (78, 49)]$           | 2 불록점 |
| $E_2$ | $[(-0.616 \ 0.788 \ -0.616 \ 0.788), (78, 49, 110, 74)]$   | 3     |
| $C_2$ | $[(-0.616 \ 0.788 \ -0.267 \ -0.963), (110, 74)]$          | 4 오목점 |
| $E_3$ | $[(-0.269 \ -0.963 \ -0.269 \ -0.963), (110, 74, 67, 86)]$ | 5     |
| $C_3$ | $[(-0.269 \ -0.963 \ -0.490 \ 0.872), (67, 86)]$           | 6 불록점 |

그림 3. 유도된 형상과 매개화된 군체.

Fig. 3. The derived shape and parameterized family.

2. 파지 계획자(grasp planner)

방향 벡터가 vector closure를 만족하는가는 convex hull 알고리즘을 이용하여 평가한다[11]. 그리고 매개화된 군체를 이용하여 변과 모서리 점의 조합으로 파지위치가 선정될 수 있는 기본 범위(field)를 구성한 후 접촉을 통해 물체에 적용할 수 있는 힘의 방향에 기준하여 여러 개의 파지 위치들을 선정한다. 선정된 파지 위치들을 평가하여[10] 최종의 파지 위치들을 구하며 이때 사용자가 로봇 손가락의 구속 조건을 입력하여 평가에 반영할 수 있도록 하였다. 일반적으로 다각형의 경우 선정할 수 있는 파지 위치는 여러 가지가 있으므로 기본 범위에서 구한 파지 위치들 중 최적의 파지 위치를 선정하기 위하여 평가식이 필요하게 된다. 본 연구에서는 힘 방향과 위치 그리고 도심과의 상대 거리와 관련된 다섯 개의 범주로 구성된 heuristic 함수[10]를 평가식으로 이용하여 각각의 파지 위치를 평가한다. Young[10]은 대상물체의 기하학적 특성이 사전에 주어진 경우 force closure를 이루는 파지 위치를 선정하였으나 본 연구에서는 기하학적 정보를 유도하여 매개화된 군체로 표현하고 이 군체를 이용하여 Young이 제안한 파지 위치선정 방법을 구현함으로써 대상물체의 형상변화에 대응하도록 하였다. 그림 4는 임의의 형태를 갖고 있는 원 영상으로부터 물체의 형상을 유도한 후 파지 위치를 찾아낸 결과이고 그림 5은 양변이 90도 이하의 각을 가지고 있을 때 손가락이 도달할 수 없다는 구속 조건이 있는 경우 파지 위치를 찾아낸 결과를 보여 준다. 본 연구에서 대상으로 하는 작업 로봇의 손가락은 3개이며 각각의 손가락이 다자유도를 갖고 있다고 가정하였다.



그림 4. 다각형의 파지 위치.

Fig. 4. Grasping point.

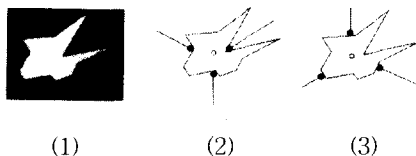


그림 5. 구속 조건의 유,무에 따른 파지 위치.

Fig. 5. Grasp position with/without the constraint condition.

V. 시스템 성능 평가

시각 추적 시스템을 위하여 구성한 칼만 필터의 성능은 실험에 의하여 얻은 센서오차 분산과 칼만 필터를 통하여

얻은 출력오차 분산을 비교하여 평가할 수 있다. 표 1은 정지한 물체의 중심좌표 값을 추출한 경우 각각의 오차분산(error variance)을 비교한 것으로 칼만 필터를 적용한 경우의 비로부터의 잡음이 초기 잡음 분산값의 0.3%정도로 감소하였음을 알 수 있다.

표 1. 오차 분산의 비교.

Table 1. Comparison of error variance.

| Feature(도심)                  |     | Error Variance<br>( $cm^2$ ) |
|------------------------------|-----|------------------------------|
| Sensor Error Variance        | $x$ | 0.06                         |
|                              | $y$ | 0.06                         |
| Kalman Output Error Variance | $x$ | 0.0002                       |
|                              | $y$ | 0.0002                       |

표 2. 속도 증가에 따른 선형운동에 대한 추적오차.  
Table 2. Tracking error of the linear motion in each velocity.

| Velocity<br>(cm/sampling time) | Error Variance(X)<br>( $cm^2$ ) | Error Variance(Y)<br>( $cm^2$ ) |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0.2                            | 0.002                           | 0.002                           |
| 0.4                            | 0.004                           | 0.004                           |
| 0.6                            | 0.006                           | 0.006                           |
| 0.8                            | 0.008                           | 0.008                           |
| 1.0                            | 0.010                           | 0.010                           |

표 2는  $Q=diag(0, 0.1, 0, 0.1)$  행렬을 고정시킨 상태에서 물체의 속도가 변화함에 따른 오차분산을 나타낸 것인데 속도가 커짐에 따라 오차가 커짐을 볼 수 있으며 이때  $Q$ 행렬의 각 해당 항을 적절한 값으로 변경시켜야 추적오차를 줄일 수 있다. 시스템 모델의 외란은 물체의 속도관련 상태변수에 관련되므로  $Q$ 행렬의 위치 관련 상태변수에 관련되는 항들은 0으로 선택하였고 나머지 항들은 각 샘플사이의 속도오차 분산을 계산하여 결정하였다.

표 3은 잡음 분산값의 변화에 따른 추적오차를 나타내었다. 측정시 가해지는 잡음을 단계적으로 1000배 가량 확장시켰을 경우 특이값 분해법을 적용한 칼만 필터를 통하여 계산된 추적값의 오차분산은 약 10배만 증가했음을 알 수 있었다. 여기에 비해 일반적인 칼만 필터를 적용한 경우 잡음의 분산값이 증가함에 따라 오차 분산값이 크게 영향을 받아 3000배 가량 증가한 것을 알 수 있었다. 따라서 SVD를 적용한 칼만 필터는 잡음 상태에 대하여 일반적인 칼만 필터를 적용한 경우보다 강건하다는 것을 알 수 있었다.

표 3. 잡음상태에 따른 추적오차(V=1.0).

Table 3. Tracking Error according to the noise statistic.

| Noise Variance<br>( $cm^2$ ) | Error Variance of<br>SVD KF output ( $cm^2$ ) | Error Variance of<br>KF output ( $cm^2$ ) |
|------------------------------|---|---|
| 0.06                         | 0.0101  | 0.010                                     |
| 0.6                          | 0.0118  | 0.315                                     |
| 6.0                          | 0.024   | 4.584                                     |
| 60                           | 0.113   | 31.673                                    |

본 연구에서 구성한 추적 시스템은 외부 잡음에 대하여 강건한 경향을 보인 특이점 분해법을 적용한 칼만 필터를 사용하였다. 특이점 분해법을 적용한 칼만 필터의 계산 시

간은 약 5 msec로 실시간 계산이 가능하지만 일반 칼만 필터의 계산 시간(약 3 msec)보다 다소 느리다. 그러나 추적 요소를 정확히 추정하고 물체를 추적하기 위해서는 외부 잡음에 강건한 특징점 분해법을 이용한 칼만 필터를 사용하는 것이 유리할 것으로 생각된다. 알고리즘의 성능검증에 있어서 이동하는 물체의 중심 좌표를 오차 없이 정확하게 측정하기란 불가능하므로 추적 시스템의 성능을 평가하기 위하여 사각형의 어떤 물체가 원 궤적과 사각형 궤적으로 각각 일정한 속도를 가지고 회전 없이 이동한다고 가정하고 이동 궤적에 해당하는 좌표를 설정하여 이 좌표를 추적하게 함으로써 알고리즘의 성능을 평가하였다. 이때 계산된 좌표값에 카메라가 갖는 측정잡음의 분산값 0.06을 갖도록 잡음 요소를 첨가하여 추적 알고리즘의 입력으로 사용하였다. 평가 방법은 잡음이 포함되지 않은 좌표값과 추적 알고리즘을 통하여 추정된 값과의 차이에 대한 평균과 분산값으로 성능을 검사한다.

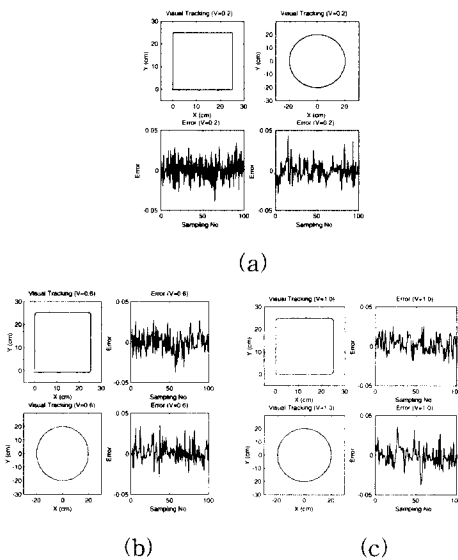


그림 6. 궤적의 속도에 따른 추적결과.  
Fig. 6. Tracking results according to the velocity of the path.

그림 6이 가상 이동하는 물체의 궤적과 함께 그 물체의 중심좌표를 추적한 결과와 추적 오차를 그래프로 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 이때 추정된 이동 물체의 중심좌표는 화상 예측 알고리즘의 화상 위치 예측에 사용된다. 이동하고 있는 물체를 추적하기 위해서는 물체의 화상이 카메라의 창 내부에 계속 머물러야 한다. 그러므로 추정 알고리즘은 물체의 다음 위치를 추정할 수 있어야 하고 카메라를 추정 위치로 이동시킴으로써 창 내부에 계속 물체의 화상을 머무르게 할 수 있다. 따라서 물체의 다음 위치를 정확하게 추정하는 성능은 추적 시스템의 주요 기능이라 하겠다. 본 연구에서도 추정된 중심좌표로 카메라의 중심을 이동시킴으로써 카메라의 창 내부에 물체의 화상을 계속 머무르게 함으로써 화상 예측 알고리즘을 수행하게 된다. 그림 6에서 알 수 있듯이 카메라 측정시 발생하는 잡음의 분산값(0.06)보다 작은 추적오차 분산값을 나타낸다. 보다 명확한 비교 평가를 위하여 표 4에 두 궤적에 따른 속도별 오차 분산값을 정리하여 놓았다. 표 4의 결과를 살펴보면 변수에 대한 추적 뿐만 아니라 카메라 측정시 수반되는 잡음에 대한 필터링도 수행되고 있음을 알 수 있다. 그러나 표 2의 결과에 따르면 각 속도에 대한 추적 성능을 비교하면 속도가 높아 질수록 추적오차가 커짐을 알 수 있으며, 추적 물체의 속도에 따른 적절한 Q값의 변경이 요구된다. 사각형 궤적과 원궤적 운

동 외에 직선운동궤적에 대하여도 추적을 수행한 결과 직선부에서는 상당한 추적성능을 보여주지만 사각궤적의 꼭지점과 같은 급격한 궤적이 변화하는 부분에서는 운동속도에 비례하여 추적 오차가 증가함을 알 수 있었고, 원 궤적과 같이 진행 방향이 계속 변하는 경우도 속도와 비례하여 일정한 오차를 내고 있음을 확인할 수 있었다.

표 4. 속도별 각 궤적의 오차 분산.

Table 4. Error variance of each path according to velocity.

| Velocity (cm/sampling time) | Error Variance of Rectangle path (cm <sup>2</sup> ) | Error Variance of Circle path (cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------|---|--|
| 0.2                         | 0.0021  | 0.0021   |
| 0.6                         | 0.0062  | 0.0062   |
| 1.0                         | 0.0106  | 0.0103   |

그림 6과 표 4를 통하여 각 궤적을 추적한 결과를 비교하여 알 수 있듯이 SVD를 적용한 칼만 필터를 추적 시스템에 적용한 경우 추적 물체의 궤적 변화에 둔감한 특징을 보이는 것을 알 수 있었다. 좀 더 정확한 성능검증을 위하여 회전하며 이동하는 물체를 추적하여 파악하는 성능을 고찰하여 보았다. 그림 7과 같은 직육면체(40 x 20mm)의 물체를 선정하여 일정한 회전속도를 갖고 임의로 설정한 직선 궤적을 이동하도록 하였다.

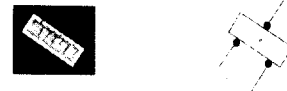


그림 7. 회전하는 물체의 시각추적을 위한 사각 물체와 파악점.

Fig. 7. A rotating rectangle object for the visual tracking and grasp point.

이때 시각 추적 시스템은 물체의 중심좌표와 물체의 회전 각만을 추정하게 되며 각 파악점은 시각 추적 초기에 파악시스템을 통하여 찾아낸 후 파악점을 중심점과 회전각을 기준으로 한 위치 좌표로 변환하여 저장한다. 따라서 이동하는 물체의 중심좌표와 회전 각도만 주어지면 이동된 파악점을 계산할 수 있다. 그림 8은 그림 6(a)의 경우와 같은 속도로 0.5(도/sampling time)의 회전을 하며 직선 궤적을 이동하였을 때의 알고리즘 수행 결과를 보여주고 있다.

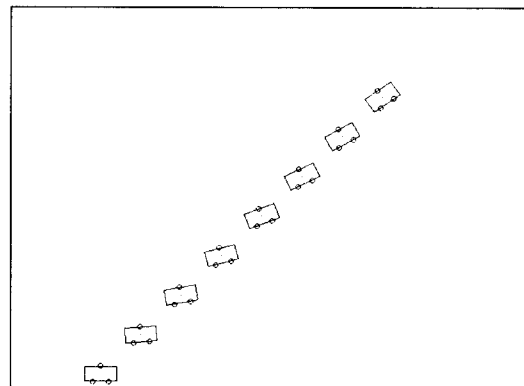


그림 8. 회전하는 물체의 시각 추적과 파악점의 이동.

Fig. 8. Visual tracking of a rotating rectangle object and the movement of grasping points.

그림 8의 결과는 실험정보를 근거로 한 시뮬레이션 결과이며 실제 실험시 프레임의 중심에 물체의 중심이 오도록 제어기가 작동하게 되므로 그림 8과 같이 물체의 이동모습

이 모니터 되지 않는다. 알고리즘 동작시 발생하는 이동위치와 파지점에 대한 모든 정보는 파일로 저장되며 이 정보를 근거로 하여 그림 8의 시뮬레이션을 수행하였다.

## VI. 결론

본 연구에서는 움직이는 물체를 추적하여 파지하기 위한 시각추적 시스템에 물체를 안정하게 파지하는 것을 고려한 파지이론을 적용하여 사전 지식이 없는 물체를 인식하여 안정한 파지점을 찾아 물체를 추적한 후 안정하게 파지할 수 있는 시스템을 구성하였다. 이때 파지를 수행할 로봇의 끝단은 3개의 다자유도 손가락을 갖고 있다고 가정하였다. 따라서 이동 물체의 추적시 로봇의 끝단을 추적 정보에 따라 이동시키며 안정한 파지점을 찾아 파지할 수 있는 상태로 로봇의 위치 및 자세에 대한 명령을 출력할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과를 통하여 전체 시스템을 구성하고 있는 각각의 하위 시스템을 성능 평가하여 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 외부 잡음에 대하여 SVD를 적용한 칼만 필터가 일반 칼만 필터에 비해 우수한 성능을 보이고 있으므로 시각 추적 시스템에 SVD를 적용한 칼만 필터를 사용하였다. 그러나 아직 추적 물체의 이동속도에 따른 영향이 크게 나타나고 있으므로 이 문제를 해결하기 위한 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

프로그램 처리시간은 시각 추적부의 경우 칼만 필터의 계산 시간은 5 msec이하 이고 물체의 중심좌표를 찾는 데 필요한 시간은 원이나 사각형과 같은 단순구조의 물체를 추적하는 경우 1 cycle당 약 4 msec이하로 나타나고 있지만 파지 system의 처리시간이 다소 많이(약 1-2초) 걸리는 것으로 나타났다. 따라서 좀 더 처리시간을 단축시키기 위해서는 보다 효과적인 화상 처리 알고리즘의 개발이 필요하며 데이터의 빠른 처리가 가능한 고성능 처리장치가 필요하다. 또한 효과적인 시스템 운영기법의 개발도 병행되어야 할 것이다. 본 연구에서는 1개의 카메라를 사용하여 시스템을 구성하였으므로 3D 물체에 적용할 경우 다소 큰 오차를 수반한다. 3D 물체에 적용할 수 있는 시스템 구성 및 알고리즘의 확장은 현재 연구 중에 있다. 3D물체에 적용하기 위하여 2개의 카메라를 사용하는 stereo vision system을 구축할 계획이며 현재의 시스템을 구성하는 시각 추적 알고리즘은 3D로의 확장을 고려하여 확장이 용이 하도록 구성하였다.

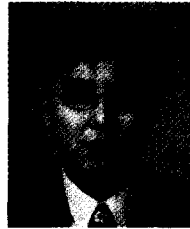
## 참고문헌

- [1] J. Wang and W. J. Wilson, "3D relative and orientation estimation using Kalman filter for robot control," *Proc. of IEEE Conf. Robotics and Automation*, Nice, France-May, pp. 2638-2645, 1992.
- [2] N. Papanikolopoulos and P. K. Khosla, "Vision and control techniques for robotic visual tracking," *Proc. of IEEE I. Conf. Robotics and Automation*, pp. 857-864, 1992.
- [3] V. C. Llama and A. J. Laub, "The singular value decomposition : Its computation and some applications," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. AC-25, no. 2, pp. 164-176, 1980.
- [4] L. Wang, G. Libert and P. Manneback, "Kalman filter algorithm based on singular value decomposition," *Proc. of 31th IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 1224-1229, Dec., 1992.
- [5] G. J. Bierman, *Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation*, New York : Academic Press, 1977.
- [6] Y. Zhang and G. Dai, "A SVD-based extended Kalman filter and applications to aircraft flight state and parameter estimation," *Proc. of the American Control Conference*, Maryland, pp. 1809-1813, June, 1994.
- [7] Y. Kornatzky, S. E. Shimony, "Predicting image features for tracking and navigation," *Computer Vision*, 1994.
- [8] Janet Aisbett An iterated estimation of motion "Parameters of a rigid body from noisy displacement vectors," *IEEE Trans. PAMI*, pp. 12-11 : 1092-1098, 1990.
- [9] Hormoz Shariat and Keith E. Price., "Motion estimation of motion with more two frames," *IEEE Trans. PAMI*, pp. 12-5:417-434, 1991.
- [10] Y. C. Park and G. P. Starr, "Grasp synthesis of polygonal objects using a three - fingered robot hand," *Int. J. of Robotics Research*, 1992.
- [11] Y.-G. Sun, C.-S. Han, "A study on the grasping system using identification of geometric property," *Pro. of 9th Robotics and Automation Workshop*, Seoul, Korea, pp. 127-131, April, 1995.
- [12] K. Hashimoto, *Visual Servoing*, World Scientific, pp. 71-104, 1993.
- [13] P. K. Allen, "Trajectory filtering and prediction for automated tracking and grasping of a moving object," *Image Understanding Workshop*, pp. 1019-1033, Jan., 1992.
- [14] R. Kelly and M. W. Spong, "Fixed-camera visual servo control for planar robots," *IEEE Conf. Robotics and Automation*, Minnesota, pp. 2643-2649, April, 1996.
- [15] Y. Funahashi, "Grasp stability analysis considering the curvatures at contact points," *IEEE, Conf. Robotics and Automation*, Minnesota, pp. 3040-3046, April, 1996.
- [16] V. D. Nguyen, Constructing Force-Closure Grasps, *Int. J. of Robotics Research*, 1986.



**차 인 혁**

1992년 한양대 기계공학과 졸업 동대학원 석사(1994). 1994년~현재 한양대학교 정밀기계공학과 박사과정. 주관심분야는 메카트로닉스, 자동화, 지능제어임.



**손 영 갑**

1993년 한양대학교 기계공학과 졸업 동대학원 기전공학과 석사(1995). 1995년~현재 대우전자 부평연구소 부품전략부문 K-PJ팀 연구원 관심분야는 이산신호처리, 자동제어, 구조해석임.



**한 창 수**

1983년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1985년 Univ. of Texas at Austin 석사과정 졸업. 1989년 동대학원 박사과정 졸업 관심분야는 로봇틱스, 공장 자동화, 자동화 전자제어임.