

움직이는 물체의 안정한 Grasping을 위한 시각추적 시스템 개발

The development of a visual tracking system for the stable grasping of a moving object

차인혁*, 손영갑**, 한창수*

*한양대학교 정밀기계공학과(Tel: 02, 281-8423; E-mail : cnrlab@hyunp2.hanyang.ac.kr)

**대우전자 품질경영연구소 (Tel : 032, 510-7860; Fax : 032, 523-6082)

Abstracts We propose a new visual tracking system for grasping which can find grasping points of an unknown polygonal object. We construct the system with the image prediction technique and Extended Kalman Filter algorithm. The Extended Kalman Filter(EKF) based on the SVD can improve the accuracy and processing time for the estimation of the nonlinear state variables. By using it, we can solve the numerical unstability problem that can occur in the visual tracking system based on Kalman filter. The image prediction algorithm can reduce the effect of noise and the image processing time. In the processing of a visual tracking, we can construct the parameterized family and can found the grasping points of unknown object through the geometric properties of the parameterized family.

Keywords SVD, Extended Kalman Filter, Visual tracking, Grasping system, Parameterized family

1. 서론

1.1 연구동향

공장 자동화가 가속화 됨에 따라 스위치식 On,Off센서를 이용하여 작업 대상물의 위치를 파악한 후 로봇암(Robot Arm)을 움직여 작업하는 기존의 로봇 작업형태로는 차세대 생산형태인 다품종 소량생산의 작업에 대처하기가 용이하지 않았다. 따라서 작업 대상물이 바뀔때도 유연하게 적용이 가능한 로봇시스템이 필요하게 되었으며 이것이 로봇에 시각시스템을 도입하는 계기가 되었다. 즉, 로봇 스스로 시각시스템을 이용하여 얻은 영상 정보를 통해 작업에 필요한 데이터를 만들어 내고 이 데이터에 따라 작업하게 함으로써 작업대상품의 다양한 형태와 자세의 변화에 훨씬 유연하게 대처할 수 있게 하려는 것이다. 특히 물류나 조립등 대상물을 이송하는 작업에 적용되는 로봇의 경우 시각시스템과 결합되어 작업 대상물이 움직이고 있더라도 로봇암(Robot Arm)이 대상물을 추적하여 작업할 수 있도록 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

William과 Wang[1]등은 칼만필터를 이용한 추정 알고리즘을 연구하여 로봇에 적용하였고 Allen은 optical flow를 사용하여 물체의 위치를 추정하였다. Papanikolopoulos는 PID, LQG, Pole-placement 등의 다양한 제어법칙을 이용한 추정 알고리즘을 연구

하였다. 추적한 대상물을 grasping하기 위한 이미지 예측 알고리즘에 대한 연구로는 Kornatzky이 최고 가능성이론으로 제한된 영역에서 특정 모서리점을 예측하는 알고리즘을 구현하였고 Aisbett와 Shariat는 여러개의 대응된 특징점으로 부터 이미지의 기하학적 특성을 예측하는 방법을 연구하였다. 화상정보를 이용한 물체의 추적과 grasping에 대한 연구[1][2]는 정지된 물체의 인식 및 grasping에서 시작하여 현재는 움직이는 물체를 추적하여 grasping할 수 있도록 하는 연구가 진행되고 있으며 이때 좀더 빠르고 정확한 대상 물체의 인식 및 안정한 grasping이 중요한 문제가 되었다.

1.2 연구범위

본 연구에서는 작업 대상물의 시각추적을 위하여 확장된 칼만필터(Extended Kalman Filter)를 사용하였으며 크게 두가지 이론을 적용하였다[3]. 첫 번째로 칼만필터의 수치적 불안정성을 해결하고 계산시간을 줄이기 위하여 특이점 분해이론[2]을 적용하였고 두 번째로 화상처리 속도의 개선을 위하여 가능한 작은 영역의 영상 이미지를 이용하여 특징점을 찾아내는 이미지 예측 알고리즘을 적용하였다. 확장된 칼만필터의 수치적 불안정성 문제를 해결하기 위한 방법으로 Bierman의 제곱근 필터링(Square root filtering)방법이나 상호분산(covariance)matrix의 제곱근을 이용한 Potter의 방법이 있다. 그러나 이러한 알고리즘은 비상관

센서 외란(Unrelated sensor noise)을 지닌 1차원 측정(single dimensional measurement)에서만 사용될 수 있다는 단점이 있다. 따라서 수치적으로 안정하고 비관관 센서 외란까지 다룰 수 있는 SVD이론을 Kalman Filter에 적용하여 추적 시스템을 구성하였다. Grasping 시스템은 사전지식이 없는 작업대상물의 전체적인 기하학적 특성인식 문제를 매개화된 군체로 표현하여 처리함으로써 해결하였고, 이 군체를 이용하여 grasping를 수행하도록 구성하였다. 본 연구의 최종목표는 작업대상물을 시각정보를 통하여 추적하고 대상물의 기하학적 특성을 사전지식이 없이 인식하며 안정한 grasping point를 찾아 grasping할 수 있도록 하는데 있다.

2. 시스템 구성

본 연구를 수행하기 위하여 그림 1과 같이 시스템을 구성하였으며 크게 기능별로 tracking system과 grasping system 그리고 robot system으로 나눌 수 있다. 각 시스템은 각각 독립적으로 개발되었으며 본 논문에서는 각 system의 성능향상과 유기적인 통합을 위한 연구에 중점을 둔다. Grasping system은 카메라로 부터 얻어진 화상정보를 처리하여 물체의 형상을 유도하여 매개화된 군체를 구성하는 형상 추론가와 매개화된 군체를 이용하여 grasp시 물체에 대해 force closure가 이루어지도록 grasp 위치를 선정하는 grasp계획자로 구성된다. 추적 시스템(tracking system)은 카메라의 화상정보로 받아들일 영역을 결정하는 이미지 예측자와 대상물체의 움직임과 동적요소들의 변화를 예측하여 로봇암의 궤적을 생성하는 Kalman Filter알고리즘으로 구성된다.

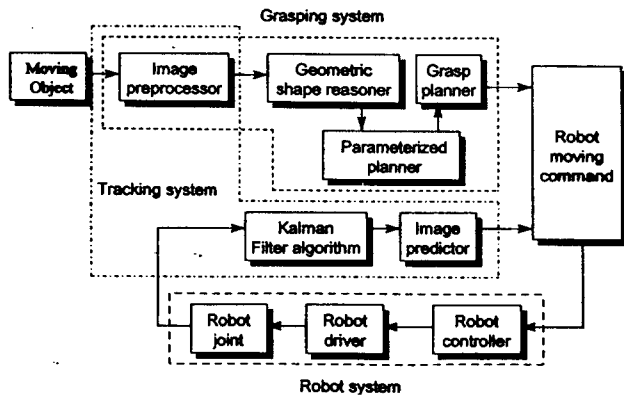


그림 1 시스템 구성도
Fig. 1 System construction

3절과 4절에 두 시스템을 구성하는데 필요한 기본 개념과 구조를 좀 더 자세히 설명하였다. 시스템을 구성하는 H/W를 살펴보면 Controller는 모든 계산 과정의 처리시간 단축과 시스템의 운영효율을 높이기 위하여 586PC와 TMS320C31 DSP가 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 동작하기 위해서 물체의 움직임이 각

sampling 시간동안 그 속도가 상수로 표현될 정도로 서서히 움직이며 움직임 궤적은 충분히 부드럽게 움직인다고 가정한다. 그리고 sampling time은 화상데이터를 처리하고 최종적으로 로봇암에 추종명령을 내릴때까지 걸리는 시간에 따라 결정되며 일반적으로 1cycle time보다 길게 설정한다. 구동용 로봇으로는 SCARA type의 FARA로봇으로 선정하였고 카메라는 16mm lens, inter pixel space 0.0086mm, 초점거리 12mm그리고 640x480 pixel array를 지닌 CCD를 사용하였다.

3. 시각추적 시스템(Tracking System)

3.1 확장된 칼만필터를 이용한 위치추적

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

$$Z_k = h(X_k) + \zeta_k \quad (1)$$

$$X_k = f(X_{k-1}) + \eta_{k-1} \quad (2)$$

여기서 $Z_k = [X_i, Y_i]$: 출력벡터

ζ_k : 상호분산 R을 지닌 영 평균가우시안 백색외란

X_k : 시스템 상태 벡터

$f(\cdot)$: 상태 천이 함수

이때 $h(X_k)$ 과 $f(\cdot)$ 는 비선형항이므로 확장 칼만필터에 적용하기 위하여 식(3),(4)와 같이 테일러 급수 전개한 측정 매트릭스와 상태 천이 매트릭스(state transient matrix)를 구한다.

$$H_k = \left. \frac{\partial h}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}_k} \quad (3)$$

$$\Phi_k = \left. \frac{\partial f}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}_k} \quad (4)$$

따라서 SVD를 적용한 확장칼만필터를 식(5),(6)과 같이 정식화 한다.

- Time update formulation

$$\begin{aligned} \hat{X}_{K+1|K} &= f(\hat{X}_{K|K}) \\ P_{K|K} &= U_{K|K} D_{K|K}^2 U_{K|K}^T \\ P_{K+1|K} &= \Phi_{K+1,K} U_{K|K} D_{K|K}^2 U_{K|K}^T \Phi_{K+1,K}^T + Q_K \end{aligned} \quad (5)$$

- Measurement update formulation

$$\begin{aligned} \hat{X}_{K|K} &= \hat{X}_{K|K-1} + K_K [Z_K - h(\hat{X}_{K|K-1})] \\ P_{K|K}^{-1} &= P_{K|K-1}^{-1} + H_K^T R_K^{-1} H_K \\ K_K &= U_{K|K} D_{K|K}^2 U_{K|K}^T H_K^T L_K L_K^T \\ L_K L_K^T &= R_K^{-1} \quad (\text{cholesky decomposition}) \end{aligned} \quad (6)$$

3.2 이미지 예측 알고리즘

카메라를 통하여 광범위한 작업 영역 전체의 영상 정보를 얻어내어 처리하는 경우 에러가 많아지며 방대한 데이터 처리로 추적시스템(Tracking system)에 필수적인 실시간 처리(Real

time processing)가 불가능하게 된다. 따라서 작업 대상물의 대략적인 위치는 다른 방법을 통해 이미 알고 있다고 가정하고 그 위치를 기준으로 일정한 크기의 창(window)을 설정하여 창 내부의 화상 이미지만 받아들여 처리하도록 시스템을 구축하게 된다. 이미지 예측 알고리즘이란 바로 이러한 창을 설정할 위치를 결정하는 것이며 단계별로 설명하면 다음과 같다.

- 단계1 (이미지 획득): 단계4로부터 전달된 예측된 창의 위치에 근거하여 새로운 화상을 받아들인다.
- 단계2 (특징점 추출): 칼만필터의 센서입력값으로 이용
- 단계3 (칼만 예측) : 칼만필터 알고리즘을 이용하여 다음 샘플링 시간의 센서 입력값 예측
- 단계4 (창의위치계산): 예측된 특징점이 영역창 안에 존재하도록 창의 시작점을 결정하여 단계1에 전달한다.

3.3 시각추적 시스템 simulation

칼만필터의 성능은 실험에 의해서 얻은 센서오차 분산과 칼만필터를 통해서 얻은 출력오차 분산을 비교하여 평가할 수 있다. 표 1은 물체가 정지해 있을 경우 각각의 오차분산(Error variance)을 비교한 것으로 칼만 필터를 적용한 경우 성능이 향상되었음을 알 수 있다. 표 2는 Q 매트릭스를 고정시킨 상태에서 물체의 가속도가 변화함에 따른 오차분산을 나타낸 것인데 가속도가 커짐에 따라 오차가 커짐을 볼 수 있으며 Q매트릭스의 가중치를 변경시켜야 추적오차를 줄일 수 있다.

표 1 오차 분산의 비교
Table 1. Comparison of Error Variance

Feature(도심)	Error Variance	
Sensor Error Variance	x	0.06
	y	0.06
Kalman Output Error Variance	x	0.0084
	y	0.0084

표 2 가속도 증가에 따른 선형운동에 대한 추적오차
Table 2. Tracking Error for Linear Motion with increasing Acceleration

Acceleration (pixels/sampling time)	Maximum Error(pixel)	Error Variance
0.5	1.575	0.240
0.7	1.985	0.402
1.0	2.575	1.007
1.3	3.176	1.496
1.5	5.417	2.176
1.7	6.837	3.129

실험에 의하여 상호분산 매트릭스 R은 diag[0.06,...0.06] 과 같이 선택되었다. 시스템 모델의 외란은 물체의 속도관련 상태 변수에 관련되므로 Q 매트릭스의 위치 관련 상태변수에 관련되는 항들은 0으로 선택하였고 나머지 항들은 각 샘플사이의 속도 오차 분산을 계산하여 결정하였다. 그림 2와 그림 3은 각각 물체가 원 궤적과 사각형 궤적을 그리는 경우 추정된 결과를 나타

낸 것이다.

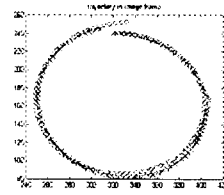


그림 2 원 궤적의 시각 추적 결과 비교
Fig. 2 The comparison of visual tracking result for the circle

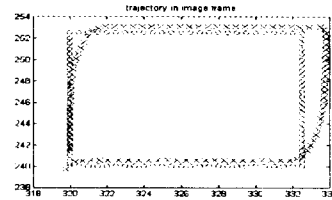


그림 3 사각 궤적의 시각 추적 결과 비교
Fig. 3 The comparison of visual tracking result for the rectangular

각 결과에서 알 수 있듯이 원궤적의 경우 변곡점과 사각형 궤적의 경우 사각형의 모서리점에서 추적오차가 커짐을 알 수 있다. 이것은 추적 대상물체의 이동 궤적이 부드러워야 추적이 잘 된다는 가정의 타당성을 뒷받침한다.

4. Grasping system

4.1 형상 추론

사전지식이 없는 대상물체를 grasp하기 위해서는 먼저 카메라로부터 얻은 화상정보로부터 작업 대상물체의 형상을 유도하여야 하며 대상물체의 모서리점을 검출하여 형상을 유도하는 방법을 사용하였다. 안정적인 grasp을 위하여 유도된 형상정보 즉 선과 모서리점에 대한 정보와 도심의 위치를 매개화된 군체로 구성하였다.[5] 이때 변과 접촉시에는 변의 법선 벡터가 필요하며 절점과의 접촉시에는 절점을 이루는 양변의 접선 벡터가 필요하다.[3] 따라서 매개화된 군체의 방향벡터 성분은 접촉시 발생하는 wrench계의 방향을 표현한다. 매개화된 군체의 기본 형태는 다음과 같다.

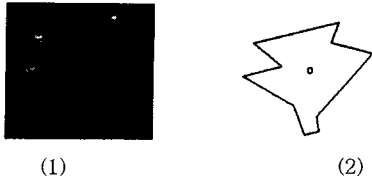
$$\text{변} : E_i = [(\vec{n}_i - \mu \vec{t}_i, \vec{n}_i + \mu \vec{t}_i), (P_C, P_{C_i})]$$

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

여기서 \vec{n}_i : i번째 단위법선 \vec{t}_i : i번째 접선벡터

μ : 물체의 마찰계수 P_C : 1번째 모서리점 위치좌표

매개화된 군체는 물체의 기하학적 특징을 나타내며 force closure grasp를 구성하기 위해 제안된 여러 가지 이론에 필요한 물체의 기하학적 정보를 제공할 수 있으므로 유용성이 매우 크다. 위 그림 4에 유도된 형상과 그에 따른 매개화된 군체의 예를 들어 놓았다.



(1) (2)

10 각형	Parameterized families [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 볼록점
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 볼록점
.	.	.
.	.	.

그림 4 유도된 형상과 매개화된 군체

Fig. 4 The drived shape and parameterized family

4.2 Grasp 계획자(Grasp planner)

매개화된 군체를 이용하여 변과 모서리점의 조합으로 grasp 위치가 선정될 수 있는 기본 field를 구성한 후 접촉을 통해 물체에 적용할 수 있는 힘의 방향에 기준하여 여러개의 grasp 위치들을 선정한다.[1] 선정된 grasp 위치들을 평가하여 최종의 grasp 위치들을 구하며 이때 사용자가 로봇손가락의 구속조건을 입력하여 평가에 반영할 수 있도록 하였다. 그림 5는 원형상으로부터 물체의 형상을 유도하고 grasp 위치를 찾아낸 결과를 나타내고 있고 그림 6은 구속이 있는 경우 grasp 위치를 찾아낸 결과를 보여 준다. 이것은 손가락이 3개인 로봇을 대상으로 하고 있으며 양면이 90도 이하의 각을 가지고 있을 때 손가락이 도달할 수 없다는 구속 조건을 입력한 결과이다.

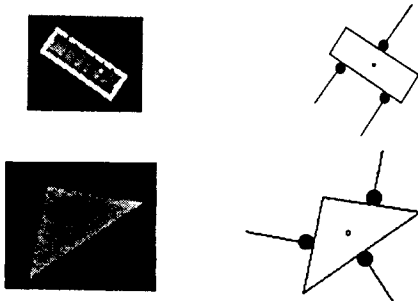
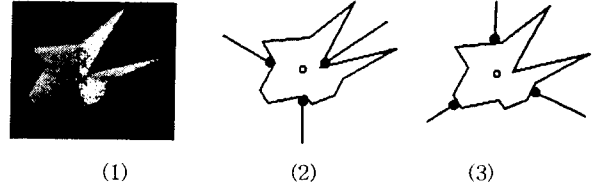


그림 5 Grasp 위치

Fig. 5 Grasp position



(1) (2) (3)

그림 6 구속 조건을 갖는 Grasp 위치

Fig. 6 Grasp position with the constraint condition

5. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 움직이는 물체의 grasping을 위한 시각추적 시스템을 구성하였다. 통합 시스템 구성에 앞서 각각 필요한 하위 시스템을 구성하여 성능 평가 하였으며 각각 비교적 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 아직 외란에 대한 영향이 크게 나타나므로 여기에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것이다. 또한 시스템 구성시 1개의 카메라를 사용하였으므로 3D물체에 대한 적용은 어려우며 향후 3D물체로의 적용을 위하여 2개의 카메라를 사용하는 Stereo vision system을 구축할 계획이며 본 논문에서 안정한 grasp를 위하여 로봇이 3개의 다 자유도 손가락을 갖는다고 가정하였으나 3개의 다 자유도 손가락을 갖는 로봇 손을 개발하는 것은 다음 연구 과제로 남겨 두고자 한다. 따라서 본 연구 수행시 3개의 손가락을 각각 독립적으로 움직여 최적의 grasp 위치로 이동하여 물체를 잡는 부분은 program을 이용하여 simulation처리 하였다.

참고 문헌

- [1] Jiang Wang and William J. Wilson, "3D Relative And Orientation Estimation Using Kalman Filter For Robot Control", IEEE, International Conference on Robotics and Automation, Nice, France-May, pp2638-2645, 1992
- [2] Youmin Zhang and Guanzhong Dai, "A SVD-based extended Kalman filter and applications to aircraft flight state and parameter estimation", Proceeding of the american control conference, maryland, June, pp1809-1813, 1994
- [3] Young C. Park and Gregory P. Starr, "Grasp synthesis of polygonal objects using a three - Fingered robot hand", International Journal of Robotics Research, 1992
- [4] 김신중, 이철원, 한창수, "SVD에 근거한 칼만 필터를 이용한 시각추적 시스템의 구현", 대한기계학회, 추계(1), pp655-660, 1995
- [5] 손영갑, 한창수, "기하학적 특성인식을 이용한 grasping 시스템에 관한 연구", Proceeding of 9th Robotics and Automation workshop, pp127-131, 1995
- [4] Koichi Hashimoto, VISUAL SERVOING, world scientific, pp71-104, 1993
- [5] M. Boutayeb and H. Rafaralahy, "Convergence analysis of the Extended Kalman Filter as an observer for non-linear discrete-time systems", IEEE, Proceedings of the 34th conference on Decision and control, LA-December., pp1555-1560, 1995