

# 다각 근사화된 그리퍼 영상을 이용한 로봇의 위치 정렬

박광호\* · 김남성\* · 기석호\*\* · 기창두\*\*\*

## Pose alignment control of robot using polygonal approximated gripper images

Kwang Ho Park, Nam Seong Kim, Seok Ho Kee, Chang Doo Kee

**Key Words :** Polygonal Approximation (다각근사화), Vision based control (비전기반 제어), Image Jacobian (영상 자코비안), Camera Model (카메라 모델)

### Abstract

In this paper we describe a method for aligning a robot gripper using image information. The region of gripper is represented from HSI color model that has major advantage of brightness independence. In order to extract the feature points for vision based position control, we find the corners of gripper shape using polygonal approximation method which determines the segment size and curvature of each points. We apply the vision based scheme to the task of alignment of gripper to reach the desired position by 2 RGB cameras. Experiments are carried out to exhibit the effectiveness of vision based control using feature points from polygonal approximation of gripper.

### 1. 서 론

비전 위치 제어의 기초적 작업은 로봇 공간의 영상으로부터 추출된 정보를 사용하여 로봇 그리퍼의 자세를 제어하는 것이다. 비전 기반 제어는 물체의 카메라 이미지 상의 변화와 카메라 자세 사이의 관계인 이미지 자코비안을 가지고 로봇을 제어하는 방법이다. 1970 년대이후 비전에 의한 로봇 제어에 대한 광범위한 연구가 있었다. 스테레오 비전, 위치와 깊이 추정, 카메라 모델과 보정 기술, 영상 특징 선택, 추적 생성, 적응 제어, 동적 안정성 해석 등 다양한 연구가 있었다[1]. 많은 비주얼 제어시스템의 제한은 단순하고 불안정한 비전 기술의 사용에 기인한다. 전형적으로 몇 개의 점과 직선과 같은 물체의 형상 정보가 영상 특징으로 사용되었다. Skaar 와 Radu Horaud 는 점 특징을 사용하였으며 이러한 점은 물체의 코너나 물체 영역의 중심 또는 목표점으로 사용되었다[2][3][4]. 주로 4 개 이상의 점이 사용되며 이것은 임의의 물체에 자세를 결정하기 위한 최소한의 개수이다. 형상학적 특징을 기반으로 한 접근이 유용한 결과를 가져왔지만 많은 실제 환경하에서 얻어진 영상

에서 믿을 만한 정보를 제공한다고 할 수 없다. 물체의 형상과 질감, 겹침, 잡음, 그리고 조명 조건 등은 특징의 가시성에 큰 영향을 미친다. 그러므로 전체 영상 특징을 사용하는 것이 특징의 견고한 대안이 될 수 있다. 최근에 많은 연구자들이 영상 특징으로 보다 더 전역적인 정보를 사용하고 있다. Optic flow 는 Allen 에 의해 제안되었으며 Corke 와 Andersson 은 목표물의 중심을 구하기 위해 1 차 모멘트[5]를 사용하기도 하였다.

본 논문에서는 그리퍼 영상 정보로부터 직접 특징 영상점을 추출하기 위해 다각 근사화 방법을 제안하고 이러한 정보를 이용하여 로봇의 위치정렬을 수행하였다. 논문의 구성은 제 2 장에서 카메라 모델, 3 장에서는 다각 근사화 방법, 4 장에서는 비전 기반 제어, 그리고 실험 및 결론 순으로 기술한다.

### 2. 카메라 모델

카메라에 대한 그리퍼상의 점을  $x, y, z$  로 표현할 때 이 점들의 영상 투영 좌표는 핀홀 카메라 모델에 의해 식 (1)으로 표현할 수 있다.

$$x_c = f \frac{X}{Z}, \quad y_c = f \frac{Y}{Z} \tag{1}$$

그리퍼 좌표계에서 카메라 좌표계로의 변환행렬

\* 전남대 기계공학과 대학원  
 \*\* 서강정보대 소방관리학과  
 \*\*\* 전남대 기계공학과

을 식 (2)로 쓸 수 있으며,  $X_0, Y_0, Z_0$ 는 카메라 좌표계에 대한 물체 좌표계의 위치 벡터를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$X, Y, Z$  : Camera frame

$x, y, z$  : Gripper frame

$x_c, y_c$  : Image plane coordinate system

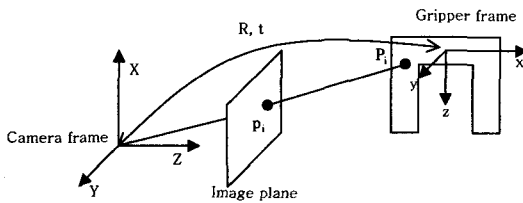


Fig. 1 Pin-hole camera model

카메라와 그리퍼 좌표 사이의 변환행렬을 오일러 파라미터를 이용하여 기술하면 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} e_0^2 + e_1^2 - e_2^2 - e_3^2 & 2(e_1e_2 + e_3e_0) & 2(e_1e_3 - e_2e_0) \\ 2(e_1e_3 - e_2e_0) & e_0^2 - e_1^2 + e_2^2 - e_3^2 & 2(e_2e_3 + e_1e_0) \\ 2(e_2e_3 + e_1e_0) & 2(e_2e_3 - e_1e_0) & e_0^2 - e_1^2 - e_2^2 + e_3^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

그러므로 핀홀 카메라 모델은 7 개의 독립 파라미터의 식으로 표현될 수 있다.

$$x_c = f \frac{X}{Z} = f \frac{T_{11}x + T_{12}y + T_{13}z + X_0}{T_{31}x + T_{32}y + T_{33}z + Z_0} \quad (4.a)$$

$$y_c = f \frac{Y}{Z} = f \frac{T_{21}x + T_{22}y + T_{23}z + Y_0}{T_{31}x + T_{32}y + T_{33}z + Z_0} \quad (4.b)$$

대상물체의 길이가 카메라에서 물체까지의 거리인  $Z_0$ 와 비교하여 상대적으로 충분히 작다고 가정하면 핀홀 카메라 모델은 테일러 전개한 후 1차 근사화하여 정리하면 새로운 파라미터  $C = [C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6]$ 을 사용하여 식 (5.a)와(5.a)으로 간략화 할 수 있다[2].

$$x_c = ((C_1)^2 + (C_2)^2 - (C_3)^2 - (C_4)^2)x + 2(C_2C_3 + C_1C_4)y + 2(C_2C_4 - C_1C_3)z + C_5 \quad (5.a)$$

$$y_c = 2(C_3C_3 - C_1C_4)x + ((C_1)^2 - (C_2)^2 + (C_3)^2 - (C_4)^2)y + 2(C_3C_4 + C_1C_2)z + C_6 \quad (5.b)$$

이 카메라 모델은 중심사영의 1차 근사인 의사 중심사영으로 카메라 렌즈의 왜곡을 고려하지 않는 핀홀 카메라 모델과 같다.  $x_c, y_c$ 이 카메라의 공간에서 그리퍼 점의 목표 위치를 나타낸다면 로봇 공간으로부터 카메라 공간으로의 국부적 매핑

을 나타낸다.  $C_i$ 의 추정은 식 (6)의 성능지수를 최소화 시키는 방법에 의해서 얻어진다.

$$\min J = \sum_{i=1}^N \{[(x_i - x_c)^2] + [(y_i - y_c)^2]\} \quad (6)$$

### 3. 다각 근사화를 이용한 특징 추출

영상으로부터 추출된 점, 선, 원, 사각형, 영역 등이 영상의 특징으로 사용된다. 이 중에서 물체의 코너, 구멍, 물체 영역의 중심 또는 목표 큐에 상응하는 점 특징이 영상에서 정보를 얻는데 자주 사용된다. 점 특징은 4 개나 그 이상이 사용되며 이것은 임의의 물체에 자세를 결정하기 위한 최소한의 개수이다.

본 논문에서는 그리퍼 윤곽선으로부터 특징점을 추출하기 위해 다각 근사법을 사용한다. 물체의 윤곽선은 다각형에 의해 단순화 시킴으로써 물체에 관한 정보량을 줄이면서도 임의의 정확도로 근사화 시킬 수 있다. 또한 영상의 잡음제거에도 효과적이다. 본 논문에서는 세그먼트 크기를 커브의 국소적 특성에 기초하여 외곽선 상의 각 점들에서 독립적으로 결정하고 각 점의 세그먼트 크기에 해당하는 곡률을 사용하여 국소적으로 최대 곡률을 가지는 코너 후보점을 추출한 후, 다각형 근사화를 통하여 불필요한 코너 후보점을 제거함으로써 코너점을 검출하는 알고리즘을 사용하였다.

#### 3.1 다각 근사화 알고리즘[6]

##### 3.1.1 세그먼트 크기 결정

커브의 국소적 특성에 기초하여 외곽선상의 각 점들에서 독립적으로 세그먼트의 크기를 결정하기 위해 Teh 와 Chin[7]이 제안한 물체의 형태와 크기에 따른 가변적 세그먼트 크기를 사용하기로 한다.

세그먼트 크기의 결정은

1) 외곽선상의 두 점  $p_{i-k}, p_{i+k}$ 를 연결하는 직선을 정의한다. 점  $p_i$ 에서 직선  $l_{ik}$ 에 내린 수선의 길이를  $d_{ik}$ 로 정의한다.

$$l_{ik} = \sqrt{p_{i-k} p_{i+k}} \quad (7)$$

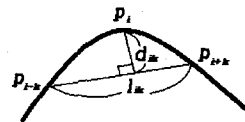


Fig. 2 The definition of  $l_{ik}$  and  $d_{ik}$

2)  $k=1$  부터 시작하여 다음과 같은 조건이 만족할 때까지  $l_{ik}$ 와  $d_{ik}$ 를 계산한다.

$$a) l_{ik} \geq l_{i,k+1} \quad (8)$$

$$b) \frac{d_{ik}}{l_{ik}} \geq \frac{d_{i,k+1}}{l_{i,k+1}} \quad (9)$$

여기서 구한 k가 점  $p_i$ 의 세그먼트 크기가 된다.

### 3.1.2 곡률 추정

커브상의 연속되는 기울기는 각도변화가 45°의 배수로 변화하기 때문에 이를 해결하기 위해 스무딩된 이산 곡률을 추정하였고, 이 때 세그먼트 크기가 스무딩 파라미터가 된다. 본 논문에서는 입력 스무딩 파라미터가 필요없고 커브상의 한 점  $p_i$ 의 스무딩 파라미터를 그 점의 국소적 특성에 근거하여 결정하는 알고리즘을 사용하였다.

추정된 곡률  $C_i$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$C_i = d_{ik} / l_{ik} \quad (10)$$

### 3.1.3 코너 후보점 추출

커브상에서 국소적으로 최대 곡률을 갖는 점을 코너 후보점으로 추출한다. 즉, 점  $p_i$ 의 세그먼트 크기 내의 모든 다른 점  $p_j$ 의 곡률보다 점  $p_i$ 의 곡률이 클 때 코너 후보점으로 추출한다.

연속 구간의 후보점 제거는 세그먼트와 곡률에 의해 구한 코너 후보점이 두 점 이상으로 구성된 연속 구간으로 나타나는 점들에 대해서는 그 구간 내의 가장 큰 곡률을 가지는 점을 제외하고는 코너 후보점에서 제거 시킨다.

매우 인접한 후보점 제거를 위해서 위에서 구한 코너 후보점 중 매우 인접한 점들에 대해서는 세그먼트 크기를 인접한 후보점들 간의 세그먼트 평균치로 하여 새로운 곡률을 구해 작은 곡률의 후보점을 제거한다.

### 3.2.4 다각형 근사화

코너 후보점에 대해 다각형 근사화를 하여 최종적인 코너점을 추출한다.

1) 코너 후보점 중 가장 큰 곡률을 가지는 점을 시작점으로 정한다.

2) 시작점  $p_a$ 에 연속하는 두 후보점을  $p_b, p_c$ 라고 하면 점  $p_b$ 에서 점  $p_a$ 와  $p_c$ 를 잇는 직선  $\overline{p_a p_c}$ 에 이르는 거리가 임의의 문턱값보다 크면  $p_b$ 는 코너점이 되고 새로운 세 점  $p_b, p_c, p_d$ 에 대해 위의 과정을 되풀이한다. 임의의 문턱값보다 작으면  $p_a, p_b, p_c$ 에 대해서 위의 과정을 되풀이한다.

## 4. 비전 기반 제어

비전 기반 제어에서 오차 신호는 영상 특징 파

라미터의 관점에서 정의되며 메니플레이터 위치의 미소 변화에 대한 영상 특징의 미소 변화 관계를 나타내는 이미지 자코비안을 결정해야 한다.

$$s = [u_1 \quad v_1 \quad \dots \quad u_n \quad v_n]^T \quad (11)$$

$s$ 은 영상벡터를 나타내며  $\dot{s}$ 은 영상벡터의 속도를 나타낸다.

$$\dot{s} = J\dot{\theta} \quad (12)$$

현재 위치와 목표위치 사이의 차를 최소화 하도록 로봇을 구동하기 위해 이미지 평면상의 로봇 끝단의 위치  $s$ 와 영상 목표치  $s^*$ 사이의 자승 오차로 정의된 목적 함수  $F$ 를 정의한다. 이는  $F$ 를 최소화 하는 비선형 자승 오차 최소화 문제가 된다.

그리고 현재 관절 변수를  $\theta_k$ 라 하면, 목표 관절 위치  $\theta_{k+1}$ 는 quasi-Newton 방법[8]에 의해 추정할 수 있다.

$$F = f^T f = (s - s^*)^T (s - s^*) \quad (13)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \alpha J^+ f \quad (14)$$

여기서  $\alpha$ 는 가중계수를 나타내며  $J^+$ 은  $J$ 의 의사역행렬을 의미하고 특징점의 수에 따라 행의 크기가 달라지는 비정방행렬이므로 의사역행렬을 이용하였다.  $J^+$ 은 식 (15)으로 정의된다.

$$J^+ = (J^T J)^{-1} J^T \quad (15)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial u_1}{\partial \theta_m} \\ \frac{\partial v_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial v_1}{\partial \theta_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial u_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial u_n}{\partial \theta_m} \\ \frac{\partial v_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial v_n}{\partial \theta_m} \end{bmatrix} \quad (16)$$

이 방정식에서  $J [n \times m]$ 는  $[(2 \times Q \times N) \times m]$ 행렬을 갖는다.

$N$ : 특징점의 수

$Q$ : 카메라의 수

$m$ : 로봇 메니플레이터 관절 수

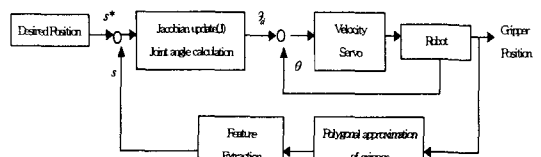


Fig. 3 Controller block diagram

## 5. 실험

실험을 위한 제어 시스템은 비전시스템, 주컴퓨터, 제어기, 로봇 매니플레이터로 구성된다. 영상 처리 보드(Matrox Meteor Image Processing Board)를 사용하여 칼라 영상 처리를 수행하였다. 컬러 영상을 이용하는 경우에는 명암정보 뿐만 아니라 색상정보도 이용할 수 있어서 흑백 영상에서의 경우보다 환경변수의 변화에 대한 신뢰성을 보장할 수 있다는 장점이 있으므로 PULNiX RGB CCD 카메라 2 대를 사용했으며, 처리 화소수는 640×480 이다. 로봇 제어기는 MMC 보드를 사용했으며, 주컴퓨터와 로봇 구동부를 연결하여 주컴퓨터의 구동 입력을 로봇 매니플레이터에 전달한다. 제어 대상은 삼성 FARAMAN-AS1 6 축 로봇 매니플레이터이다. 그림 4는 실험 구성도를 보여준다.

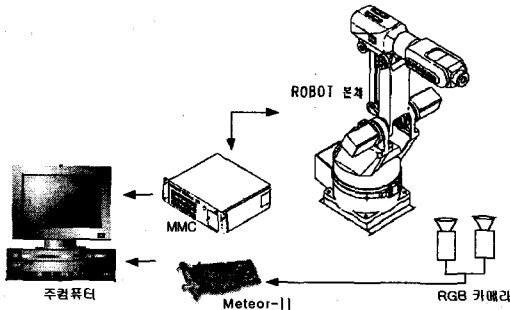


Fig. 4 Experimental setup

초기의 그리퍼 영상과 목표지점의 그리퍼 영상으로부터 다각 근사화를 통해 특징점을 생성하고 초기와 목표 영상좌표의 차이를 입력신호로 하여 목표지점에 그리퍼를 정렬시키기 위한 로봇 매니플레이터의 관절각을 추정하게 된다. 추정된 관절각은 제어기를 통해서 로봇 매니플레이터에 전달되고 허용오차 내까지 위 과정을 반복한다.

그림 5는 그리퍼 영상의 색상정보로부터 추출된 그리퍼 끝단을 보여준다. 일반적으로 사용되는 흑백 시스템은 영상처리가 간단하다는 장점을 제외하면 추종하려는 물체의 인식이 복잡한 배경이나 조도에 따라서 가변적인 경우가 많다는 단점을 가지고 있다. 이에 반하여 칼라 영상은 영상처리 시간이 길지만, 물체와 배경의 구별 및 인식이 용이하고, 조도의 영향도 흑백의 경우보다 줄일 수 있게 된다. 그러나 RGB 컬러모델을 이용할 경우 각 컬러성분이 intensity와 밀접한 관련을 가지고 있으므로, 같은 색이라 하더라도 밝기 변화에 대하여 RGB 값이 달라지는 문제가 있다. 이러한 밝기 의존성 문제를 HSI 컬러 모델 사용하여 감소시켰다. 물체가 빛을 받았을 경우 상대적으로 밝은 부분과 어두운 부분이 나타나게 되는데 이것을 HSI 공간에 투영시켜 이것을 그리퍼에 속한 샘플

들과 비교하여 허용오차 이하이면 그리퍼로 인식한다.

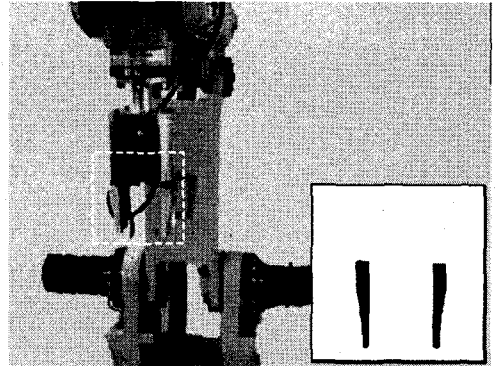


Fig. 5 The binary image of the gripper

그림 6은 그리퍼 끝단의 윤곽선 추출 결과와 다각 근사화를 통해 얻은 다각화된 점을 보여준다. 전처리된 영상은 제시한 알고리즘에 따라 다각 근사화 되고 길이가 가장 긴 두 세그먼트의 양 끝 점을 추출하여 네 개의 특징점을 얻는다.

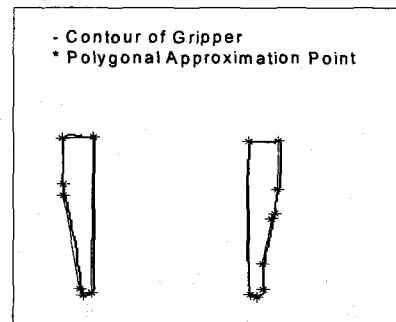


Fig. 6 The polygonal image of the gripper

그림 7은 그리퍼에서 추출된 특징점을 통해 최종 목표위치까지 그리퍼의 이동상태를 관절공간에 나타냈으며, 그림 8,9는 각각 1,2번 카메라의 영상공간상의 그리퍼 패적을 나타내었다.

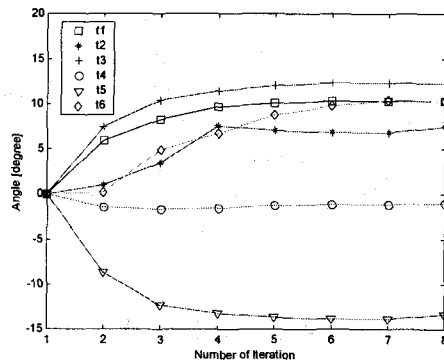


Fig. 7 Joint space trajectory

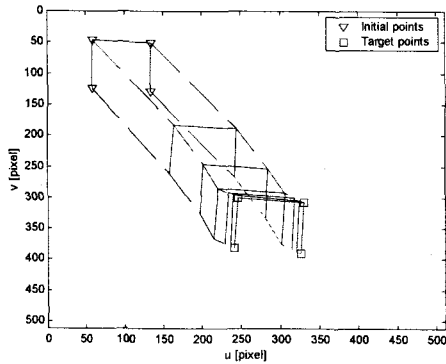


Fig. 8 1st camera image space trajectory

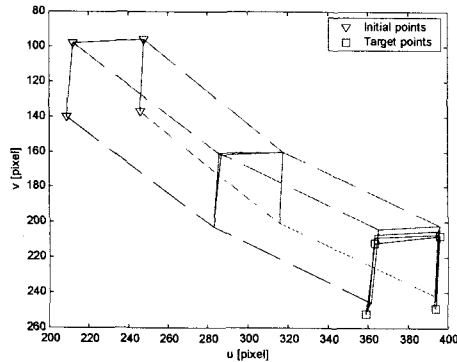


Fig. 9 2nd camera image space trajectory

표 1 은 그리퍼의 각 단계별 이동에 따른 위치와, 목표위치에 대한 오차를 보여준다.

Table. 1 Error and position in each step

단계	그리퍼 끝점 위치 (mm)			$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ (mm)
	x	y	z	
초기	500	0	830	137.48
1	515.97	51.06	783.83	68.54
2	531.42	74.75	763.98	34.33
3	554.24	92.86	755.10	9.75
4	550.10	96.57	751.78	3.86
5	548.53	98.40	750.34	2.20
목표	550	100	750	0

## 6. 결론

본 연구에서는 다각 근사화된 그리퍼의 형상에서 특징점을 추출하여 이를 로봇의 위치제어에 이용할 수 있음을 보였다. 조명에 의한 밝기 의존성 문제를 최소화하기 위해 HSI 컬러모델에 의해 그

리퍼 영역만을 추출하였다. 세그먼트 크기를 커브의 국소적 특성에 기초하여 외곽선 상의 각 점들에서 독립적으로 결정하고 각 점의 세그먼트 크기에 해당하는 곡률을 사용하여 국소적으로 최대 곡률을 가지는 코너 후보점을 추출한 후, 다각형 근사화를 통하여 불필요한 코너 후보점을 제거함으로써 코너점을 검출하고 이를 이용하여 카메라 모델로부터 카메라 파라미터를 추정하고 비선형 자승 오차법에 의해 로봇의 위치를 정렬하였다. 영상내 오차의 발생은 카메라 모델과 다각 근사화시에 발생하는 그리퍼의 특징점에서의 오차로 생각되며 보다 견고한 영상점을 추출하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] P. I. Corke, 1996, "Visual control of robot manipulators - a review", in K.Hashimoto, editor, Visual Servoing, page 1-32. World Scientific.
- [2] E. J. Gonzalez-Galvan, April 1997, Steven B. Skaar, U. A. Korde and W. Chen. "Application of a Precision-Enhancing Measure in 3D Rigid-Body Positioning Using Camera-Space Manipulation", The Internat. Journal of Robotics Research, vol. 16, No. 2, pp. 240-257.
- [3] Radu Horaud, Fadi Dornaika, August 1998, Christian Bard, and Bernard Espiau, "Visually Guided Object Grasping", IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. NO. 4.
- [4] W. S. Jang and J. K Jang, 1997, "A Study on the Determination of the Object Position based on the Computer Vision System", 대한 기계학회 호남지부 학술대회 논문집, 109-115.
- [5] P. Corke and M. Good, May 1992. Controller design for high-performance visual servoing. In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pages 1838-1843, Nice.
- [6] 유성태, 1995, "Polygonal Approximation 을 이용한 코너점 검출 방법," 경북대학교.
- [7] C. H. Teh and R. T. Chin, 1989, "On the detection of dominant points on digital curves", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 11(8), pp. 859-872.
- [8] Jenelle Armstrong Piepmeier, Gary V. Mc Murray, and Harvey Lipkin, April 1998, "Tracking a Moving Target with Model Independent Visual Servoing A Predictive Estimation Approach", Papers Robotics 98, Albuquerque, NM, 26-30.