자율주행 모바일 역진자의 비주얼서보잉에 대한 연구

A Study on the Visual Servoing of Autonomous Mobile Inverted Pendulum

이 준 민, 이 장 명*
 (Junmin Lee¹ and Jang-Myung Lee¹)
¹Pusan National University

Abstract: This paper proposes an optimal three-dimensional coordinate implementation of the vision sensor using two CCD cameras. The PBVS (Position based visual servoing) is implemented using the positional information obtained from images. Stereo vision by PBVS method that has enhanced every frame using calibration parameters is effective in the distance calculation. The IBVS (Image based visual servoing) is also implemented using the difference between reference and obtained images. Stereo vision by IBVS method calculates the distance using rotation angle of motors that correspond eyes and neck without enhanced images. The PBVS method is compared with the IBVS method in terms of advantages, disadvantages, computing time, and performances. Finally, the IBVS method is applied for the dual arm manipulator on the mobile inverted pendulum. The autonomous mobile inverted pendulum is successfully demonstrated using the center of the manipulator's mass.

Keywords: visual servoing, computer vision, stereo vision, segway, mobile inverted pendulum, dual arm manipulator

I. 서론

사람의 감각 기관 중 가장 중요한 부분을 차지하는 눈은 물체를 감지하여 크기를 판별하고 색을 분별하며 사물과의 거리를 짐작할 수 있도록 한다. 로봇 제어 시스템은 센서 융합 기반의 기술로 발전되어 왔으며 최근에는 카메라 영상처리를 통한 시각 센서 연구에 큰 관심을 보이고 있다. 지능형 로봇을 개발하는데 있어서 시각 센서 기술은 변화하는 주위 환경에 능동적으로 적응하여 필요한 정보를 제공할 수 있는 중추적인 역할을 한다. 그 예로 사람의 얼굴 또는 지문을 인식하는 기술과 거리측정 기술, 장애물 감지 기술, 두 개의 카메라를 이용해 3차원 영상 정보를 추출하는 기술 등 많은 연구가 진행 되어왔다.

카메라를 이용하여 사물과의 거리를 측정하기 위한 방법에는 단일 카메라를 이용해 물체의 크기 또는 초점의 변화에 따라 거리를 계산하는 측정법, 사물에 레이저를 투사한 후 정보를 검출하여 거리를 측정하는 구조화 조명법, 듀얼 카메라를 이용한 삼각 측량법 등이 있다. 특히 로봇과 물체간의 상대적인 3차원 좌표를 얻기 위해 스테레오 카메라의 삼각 측량을 이용한 스테레오 비전 분야는 많은 발전을 이루어 왔지만 특수한 환경에서 사용하기에는 아직까지 많은 취약점과 제약을 갖고 있다. 그래서 보다 정밀하고 주위 환경에 적합하게 활용 가능한 최적의 시각센서를 구현하기 위해 본 논문에서는 사람이 사물을 응시할 때 동공과 목의 움직임에 착안한 이미지 기반의 스테레오 비전 기법을 제안하였고, 현재 많은 상용화가 이루어진 위치 기반의 스테레오 비전과 성능

을 비교하였다. 그리고 제안한 비전 시스템을 양팔 매니퓰레이터에 결합하고 센서 융합 알고리즘을 사용한 모바일 역진자 위에 탑재하여 물체까지의 자율 주행에 대한 협조제어 연구를 수행하였다.

본 논문은 II 장 1절에서 CAMShift 알고리즘과 스테레오 비전 시스템의 구성에 대해 설명하고, 2절과 3절에서 PBVS 방식과 IBVS 방식의 스테레오 비전에 대해 설명하며, 4절에서 카메라의 PAN/TILT 시스템을 통한 물체와 로봇 사이의 상대좌표 추정에 대해 설명한다. 그리고 III 장 1절에서는 모바일 역진자의 질량중심에 대해 설명하고, 2절에서 카메라와 모바일 매니퓰레이터의 협조제어에 대해 설명하며, 3절에서 자율주행 기법에 대해 설명한다. 이 시스템의 실험결과를 IV 장에서 보여주고, 최종적으로 V 장에서 결론을 맺는다.

II. 비주얼서보잉

1. 시스템 구성

물체를 추적하기 위해 CAMShift (Continuously Adaptive Mean Shift) 알고리즘을 사용한다[8,9]. CAMShift 알고리즘은 초기에 물체를 선택하면 물체의 RGB값을 그림 1의 HSV컬러 모델로 변환하여 색상을 나타내는 Hue값으로 히스토그램화 하게 되고, 이는 추적 모델로 사용되며 물체의 경계를 결정하는 요인이 된다. 관심영역의 선택을 통해 설정된 탐색

그림 1. HSV 컬러 모델.
 Fig. 1. HSV color model.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 12. 7., 수정: 2013. 1. 4., 채택확정: 2013. 1. 16.

이준민, 이장명: 부산대학교 전자전기공학부

(jmlee718@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

그림 2. 스테레오 비전의 구성.

Fig. 2. Construction of stereo vision.

표 1. 스테레오 비전의 종류와 특성.

Table 1. Kinds and characteristics of stereo vision.

Stereo Vision with Position Based Visual Servoing (PBVS)	Stereo Vision with Image Based Visual Servoing (IBVS)
광축 평행	광축 교차
픽셀에 의한 좌표측정	회전각에 의한 좌표측정
캘리브레이션 필요	캘리브레이션 불필요
보정오차가 항상 존재	각도측정 가능한 모터 필요

원도우는 이 경계에 수렴할 때까지 위치와 크기를 변화하여 물체를 추적한다.

두 카메라에 맺힌 하나의 물체를 마우스 드래그로 선택하면 물체의 테두리를 경계로 하는 원 모양의 초기 설정 원도우가 형성된다. 이때 카메라에 투영된 이미지를 픽셀 단위의 좌표평면으로 설정하고, 이미지의 정 중앙을 원점이라 하였을 때 원점과 원도우 중심까지의 x축과 y축 픽셀로 좌표를 얻는다. 좌측 카메라의 좌표를 x_L 과 y_L 이라 하고, 우측 카메라의 좌표를 x_R 과 y_R 이라 할 때, 두 좌표는 PC에서 LM3S-8962 컨트롤러로 블루투스를 통해 전송된다.

스테레오 비전의 구성은 그림 2와 같이 각 카메라가 독립적으로 회전하는 시스템과 두 카메라의 PAN/TILT시스템으로 구성 되어 있어 카메라 화면을 좌표 평면으로 보았을 때 x축과 y축 좌표를 입력으로 하여 PAN/TILT시스템의 y축과 z축의 회전 운동을 제어한다. 표 1에서 두 종류의 스테레오 비전에 대한 실험은 카메라의 독립적인 회전을 동작시킬 때와 동작시키지 않을 때로 나뉘어 진다.

2. PBVS 방식 스테레오 비전

PBVS는 카메라 상에 맺힌 물체의 위치 정보를 획득하여 제어하는 방식으로, 현재 사용되는 대부분의 스테레오 비전은 이 기법을 사용한다[3]. 우선 그림 3과 같이 두 카메라의 광축이 평행하도록 모터를 고정시켜 시스템을 구성한다. 두 카메라 사이의 거리는 160 mm로 일정하며, 물체추적이 시작되면 x축 좌표 x_L 과 x_R 을 픽셀에서 길이단위로 변환하여 카메라의 초점거리(focal length)와 함께 삼각측량법으로 식 (1)과 식 (2)를 얻는다.

$$\frac{x_L}{f} = \frac{a}{l} \quad (1)$$

$$\frac{x_R}{f} = \frac{a - 160}{l} = \frac{a}{l} - \frac{160}{l} \quad (2)$$

그림 3. PBVS 삼각 측량법 (윗면).

Fig. 3. PBVS triangulation method (top view).

그림 4. 카메라 왜곡.

Fig. 4. Camera distortion.

두 식을 연립하면 식 (3)과 같이 물체의 x축 좌표에 대한 카메라와 물체 사이의 거리 l 의 관계식이 성립한다[15].

$$l = 160 \times \frac{f}{|x_L - x_R|} \quad (3)$$

이러한 방법은 그림 3과 같이 두 카메라가 상하 좌우로 대칭을 이루어야 하며, 투영된 이미지가 선형적인 구조일 때 가능하다. 그림 4와 같이 카메라 렌즈의 특성상 비선형 구조로 이루어진 투영 이미지는 중심에서 외곽으로 갈수록 왜곡(distortion)이 커지기 때문에 정확한 거리 계산을 하려면 두 카메라를 보정(calibration)하여 왜곡을 제거(undistortion)한 후, 스테레오 보정(stereo calibration)으로 동기화(synchronization)를 이루어야 한다.

우선 체스 판으로 두 카메라의 내부 행렬(intrinsic matrix)과 왜곡 계수(distortion coefficients)를 구한 뒤, 실시간으로 교정

그림 5. 체스판을 이용한 대응점 찾기.

Fig. 5. Find the corresponding points using the chessboard.

그림 6. 보정 성능 검사.

Fig. 6. Verify the performance of calibration.

(rectification)하여 왜곡을 제거한다. 그리고 그림 5와 같이 다시 체스 판으로 왼쪽 카메라와 오른쪽 카메라에서 바라본 각각의 대응점(corresponding point)들을 찾는다. 이 대응점들로 두 카메라의 기본 행렬(fundamental matrix)을 계산하게 되며, Bouguet 알고리즘으로 두 기본 행렬이 서로 반씩 회전하여 평행과 대칭을 이루도록 하는 회전 행렬(rotation matrix)을 구한다. 이 회전 행렬을 이용해 두 카메라에 들어오는 매 프레임마다 실시간으로 스테레오 교정(stereo rectification)을 진행한다.

그림 6과 같이 스테레오 보정을 통해 회전된 두 영상을 하나의 공통 영상에 수평 정렬 시키고, 최종적으로 에피폴라 직선(epipolar line)상에 두 영상의 대응점들이 정확히 일치하는지 보정의 성능을 검사한다.

보정 성능을 확인 한 후, CAMShift 알고리즘에 의한 물체의 추적 상태를 비교해보면 그림 7의 상단 두 영상은 보정을 하지 않은 원본 상태의 추적 과정으로 두 영상 간에 물체의 높낮이가 서로 일치 하지 않기 때문에 TILT시스템의 입력이 되는 y축 좌표는 두 좌표의 중간이 되는 지점으로 한다. 그림 7의 아래 두 영상은 보정된 상태의 추적 과정으로 두 영상이 각각 회전되어 y축 좌표가 서로 일치하는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 스테레오 보정을 이용하면 두 카메라의 위치적인 차이를 최소화 하여 정밀한 3차원 좌표를 얻어낼 수 있지만 과정이 복잡하고, 시야 각이 제한적이며, 실시간 교정 작

그림 7. 무보정 영상 (상)과 보정된 영상 (하) 비교.

Fig. 7. Compare between non-calibrated images (top) and calibrated images (bottom).

업으로 연산속도가 느려지는 단점이 있다. 또한 뛰어난 성능의 보정결과로 거리를 측정 하더라도 일정 거리 이상 멀어질 수록 관심영역의 픽셀 수가 적어지기 때문에 분해능이 떨어져 오차가 커지게 된다.

3. IBVS 방식 스테레오 비전

IBVS는 추적하고자 하는 물체에 대한 기준 이미지와 관측 이미지의 차이를 이용하여 제어하는 방식으로 본 논문에서는 이것을 적용한 스테레오 비전 시스템을 제안하였다. 사람이 물체를 바라볼 때 두 동공이 한 점에 물리는 것에 착안하여 그림 8과 같이 두 카메라의 광축을 모터 회전으로 교차시키고, 그 회전각을 이용해 거리를 측정한다.

카메라의 광축이 평행한 PBVS 방식과 다르게 광축이 독립적으로 움직이기 때문에 시야 각이 제한적이지 않다. 마찬가지로 두 카메라 사이의 거리는 160 mm로 일정하며, 회전 각 θ_L 과 θ_R 이 예각일 경우의 관계식은 다음과 같다.

$$\tan \theta_L = \frac{l}{80 + a} \quad (4)$$

$$\tan \theta_R = \frac{l}{80 - a} \quad (5)$$

삼각함수 기법으로 얻은 식 (4)와 식 (5)를 연립하여 두 카메라 사이의 간격에서 80 mm 지점을 원점으로 할 때, 원점에서 물체와 수직이 되는 지점인 a 의 길이 대한 식을 구할 수 있다. 두 회전각 중 하나가 둔각 또는 90도가 될 경우에는 계산과정이 달라지게 되며, 각 범위에 따른 a 의 관계식

그림 8. IBVS 삼각 측량법 (윗면).

Fig. 8. IBVS triangulation method (top view).

표 2. 범위에 따른 a 의 관계식.

Table 2. Formula of a with angle ranges.

$\theta_L > 90^\circ, \theta_R < 90^\circ$	$80 \times \frac{\tan(180^\circ - \theta_L) + \tan \theta_R}{-\tan(180^\circ - \theta_L) + \tan \theta_R}$
$\theta_L = 90^\circ, \theta_R < 90^\circ$	-80
$\theta_L < 90^\circ, \theta_R < 90^\circ$	$80 \times \frac{-\tan \theta_L + \tan \theta_R}{\tan \theta_L + \tan \theta_R}$
$\theta_L < 90^\circ, \theta_R = 90^\circ$	80
$\theta_L < 90^\circ, \theta_R > 90^\circ$	$80 \times \frac{-\tan \theta_L - \tan(180^\circ - \theta_R)}{\tan \theta_L - \tan(180^\circ - \theta_R)}$

표 3. 범위에 따른 l 의 관계식.Table 3. Formula of l with angle ranges.

$\theta_L > 90^\circ, \theta_R < 90^\circ$	$(-80 - a) \tan(180^\circ - \theta_L)$ or $(80 - a) \tan \theta_R$
$\theta_L = 90^\circ, \theta_R < 90^\circ$	$160 \times \tan \theta_L$
$\theta_L < 90^\circ, \theta_R < 90^\circ$	$(80 + a) \tan \theta_L$ or $(80 - a) \tan \theta_R$
$\theta_L < 90^\circ, \theta_R = 90^\circ$	$160 \times \tan \theta_R$
$\theta_L < 90^\circ, \theta_R > 90^\circ$	$(80 + a) \tan \theta_L$ or $(-80 + a) \tan(180^\circ - \theta_R)$

은 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 이 식으로 얻은 a 는 물체가 원점에 수직으로 위치하도록 PAN시스템의 z 축을 회전시키는 입력이 되고, 그 회전각은 θ_s 로 표현하여 로봇의 자율주행에서 방향을 결정하는데 사용된다.

카메라 회전각의 범위에 따른 a 의 길이가 구해지면 마찬가지로 각 범위에 따른 카메라와 물체 사이의 거리 l 의 관계식을 표 3과 같이 얻을 수 있다.

4. PAN/TILT 시스템

카메라와 물체 사이의 거리가 구해지면 그림 9와 같이 물체의 y 축 좌표 y_L, y_R 이 원점에 오도록 TILT시스템의 y 축을 회전시키고, 이 회전각 θ_N 의 범위에 따라 실제 거리에 대한 관계식을 구한다.

PBVS 방식과 IBVS 방식으로 얻은 카메라와 물체 사이의 거리 l 은 두 방식의 성능을 평가하는 기준이 되며, 실제 거리 d 에 큰 영향을 미친다. 그림 2에서 h_N 의 길이는 항상 일정 하고, 그림 9와 같이 θ_N 이 예각일 경우, 실제 거리 d 는 TILT시스템이 y 축 방향으로 $90^\circ - \theta_N$ 만큼 회전했을 때의 x 축 좌표 길이만큼 줄어든다. 반대로 θ_N 이 둔각일 경우, 실제 거리 d 는 TILT시스템이 y 축 방향으로 $\theta_N - 90^\circ$ 만큼 회전했을 때의 x 축 좌표 길이만큼 늘어난다. 따라서 실제거리 d 가 TILT시스템에 의해 생기는 오차에 영향을 받지 않는 관계식을 각 범위에 따라 표 4와 같이 나타낼 수 있다.

지금까지 삼각 측량법을 이용한 각각의 시각 정보를 구하는 방법과 원리에 대해 설명하였고, 최종적으로 구해야 할

표 4. 범위에 따른 d 의 관계식.Table 4. Formula of d with angle ranges.

$\theta_N < 90^\circ$	$l \times \sin \theta_N + h_N \cdot \sin(90^\circ - \theta_N)$
$\theta_N = 90^\circ$	l
$\theta_N > 90^\circ$	$l \times \cos(\theta_N - 90^\circ) - h_N \cdot \sin(\theta_N - 90^\circ)$

그림 10. 로봇 좌표계.

Fig. 10. Coordinate system.

상대좌표 Q' 는 그림 10과 같이 3차원 공간 상에 물체의 초기 좌표를 $Q(l, 0, h_N)$ 라고 했을 때, z 축 회전각 θ_s 와 y 축 회전각 θ_N 의 회전 행렬을 이용하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q' \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix} = Q \cdot R_z(\theta_s) \cdot R_y(\theta_N)$$

$$= \begin{bmatrix} l & 0 & h_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & 0 \\ \sin \theta_s & \cos \theta_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_N & 0 & \sin \theta_N \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_N & 0 & \cos \theta_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x = l \cos \theta_s \cos \theta_N - h_N \sin \theta_N \\ y = -l \sin \theta_s \\ z = l \cos \theta_s \sin \theta_N + h_N \cos \theta_N \end{cases}$$

위 식으로 얻은 좌표 Q' 는 센서 융합 알고리즘을 사용한 Segway 형태의 모바일 역진자로 전송되어 물체와 이동로봇의 상대적인 방향과 거리를 감지하는 시각센서의 역할을 수행한다.

III. 자율주행 모바일 역진자

1. 질량중심

모바일 역진자가 평형을 이루기 위해 양팔 매니퓰레이터의 질량중심을 구한다. 그림 11과 같이 10자유도 양팔 매니퓰레이터는 모바일 역진자와 결합하여 12자유도가 되며, 따라서 전체 시스템은 12개의 좌표계를 가진다. 이것은 Denavit-Hartenberg Model을 이용하여 식 (7)과 식 (8)과 같이 원점 s에서부터 왼쪽과 오른쪽 각각의 End Effector까지의 좌표를 변환행렬로 나타낼 수 있다.

그림 9. 삼각 측량법 (옆면).

Fig. 9. Triangulation method (side view).

그림 13. 주행 중에 생기는 좌표계 오차.

Fig. 13. Coordinate system error in the act of running.

그림 14. 좌표계 변환.

Fig. 14. Translation of coordinate system.

각이 0에 가까워 질 수록 좌표는 본래의 형태로 돌아오지만 주행 중에 생기는 이 오차를 무시할 수는 없다.

따라서 주행 중에 생기는 좌표의 변형을 보완하기 위해 그림 14와 같이 3차원 좌표의 원점을 목에서 바퀴로 바꿔 주행한다.

식 (6)에서 얻은 3차원 좌표에 z축으로 몸체의 길이 h_B 만큼 빼주고, 로봇이 기울어 질 때 생기는 기울임 각 θ_c 만큼 y축 회전행렬을 곱하여 바퀴가 원점이 되는 좌표 식 (13)을 구한다.

$$\begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z - h_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_c & 0 & \sin \theta_c \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_c & 0 & \cos \theta_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{cases} x_2 = \cos \theta_c (l \cos \theta_s \cos \theta_N - h_N \sin \theta_N) \\ \quad - \sin \theta_c (l \cos \theta_s \sin \theta_N + h_N \cos \theta_N - h_B) \\ y_2 = -l \sin \theta_s \\ z_2 = \sin \theta_c (l \cos \theta_s \cos \theta_N - h_N \sin \theta_N) \\ \quad + \cos \theta_c (l \cos \theta_s \sin \theta_N + h_N \cos \theta_N - h_B) \end{cases}$$

IV. 실험결과

실험에서 사용된 각 부위별 모터 사양은 표 5와 같다. 컨트롤러는 ARM의 LM3S-8962를 사용하였고, 로봇의 기울어진 각도를 측정하기 위해 NTREX의 NT-ARSv1 자이로 센서를 사용하였다. 추적에 사용된 물체는 지름 20 cm의 빨간색 고무공이며, 영상 처리를 위해 640x480의 해상도를 가진 CCD 카메라 2개와 NTSC방식의 카메라 영상을 실시간으로

표 5. 모터 사양.

Table 5. Motor spec.

	모델명	규격
눈(2개)	HS-7955TG	Servo motor 24Kg/cm at 6V
목(2개)	Maxon W01 HEDL-5540(Encoder)	DC motor 24V, 20W 500Count/turn
어깨(4개)	Maxon W10 HEDL-5540	DC motor 24V, 150W 500Count/turn
팔꿈치(4개)	Maxon W06 HEDL-5540	DC motor 24V, 70W 500Count/turn
손목(2개)	Maxon W01 HEDL-5540	DC motor 24V, 20W 500Count/turn
손(6개)	HSR-5995TG	Servo motor 30.0Kg/cm at 7.4V
바퀴(2개)	DA3A-30B (엔코더 내장)	DC motor 24V, 300W 512Count/turn

그림 15. 1 m와 2.5 m 상에 위치한 물체의 거리 오차 비교.

Fig. 15. Compare the distance error (1 m & 2.5 m).

컴퓨터 메모리 공간에 전달해주는 myVision USB, 그리고 Windows7 운영체제에 Intel Core i7-2670QM CPU, 4GB ddr3 RAM, GeForce GT520MX 사양의 노트북을 사용하였다.

프레임 속도는 스테레오 교정을 계속적으로 수행하는 PBVS 방식이 약 20FPS로, 기본 속도 30FPS를 유지하는 IBVS에 비해 약 33% 감소된다.

물체와의 거리를 측정하였을 때 두 방식의 오차는 그림 15와 같다. 물체가 멀어질수록 두 방식 모두 오차가 커지며, 특히 PBVS 방식의 오차가 IBVS 방식에 비해 더 크다. 결과적으로 IBVS 방식이 더 안정적임을 알 수 있다.

카메라가 물체를 추적 중인 상태에서 PAN/TILT시스템은 오차가 거의 없고 정착시간도 빠르지만, 초기에 물체를 선택할 때 회전되어야 할 각이 클 경우 PAN시스템은 정착시간이 최대 4초 정도 걸리는 것을 그림 16에서 볼 수 있다.

TILT시스템은 그림 17과 같이 정착시간이 약 1초 정도로 매우 빠르며 이후에 생기는 약간의 진동은 CAMShift의 픽셀 오차와 고개를 숙였을 때 카메라의 무게에 의해 생기는 외란으로 TILT시스템이 갖는 최대 진동이다.

그림 16. PAN시스템의 최대 오차.

Fig. 16. Maximum error of PAN system.

그림 17. TILT시스템의 최대 오차.

Fig. 17. Maximum error of TILT system.

그림 18. 주행하는 동안 물체의 거리와 방향 변화.

Fig. 18. Changes of distance and direction of the object while driving.

그림 18은 로봇의 좌측 1.5 m, 전방 5 m 지점에 위치한 물체의 3차원 좌표에서 주행하는 동안 얻은 거리와 방향의 변화이다. 물체와의 거리가 1 m 일 때 로봇은 정지를 하고, 방향은 0에 수렴할수록 물체와 정면에 위치한다.

V. 결론

본 논문은 스테레오 카메라의 3차원 좌표 측정 기법을 바탕으로 모바일 로봇의 자율주행에 가장 적합한 시각센서를 제안하였다. PBVS 방식의 스테레오 비전은 픽셀에만 의존하여 좌표를 측정하기 때문에 본 논문에서 제안한 모터의 회전 각으로 측정하는 IBVS 방식의 스테레오 비전보다 더 좋은 성능을 내지 못하였다. 시중에 판매되는 값비싼 스테레오 카메라를 이용한다면 본 논문의 실험 데이터 보다 더욱 좋은 성능을 낼 것이 분명하지만, 저렴한 가격으로 좋은 성능을 낼 수 있는 IBVS 방식이 더 실용적이다. 뿐만 아니라 PBVS 방식은 좁은 시야 각 때문에 물체가 카메라를 조금만 벗어나도 측정오차가 매우 커지며, 흔들림이 큰 모바일 로봇의 경우, 보정 과정에서 오류가 발생할 확률이 높기 때문에 유용성이 있는 환경에서 사용하기에 적절하지 않다.

연산속도와 정밀성을 비교해 보았을 때 IBVS 방식이 더 빠르고 정확한 것을 확인할 수 있었지만, 하드웨어 구성에 따른 어려움이 있다. 카메라의 초점을 축으로 회전하는 IBVS 방식은 초점이 모터의 축에 놓여있어야 한다. 그러나 초점은 눈에 보이는 것이 아니기 때문에 그 위치를 가늠하기 매우 까다로우며 초점의 위치를 찾더라도 카메라의 초점은 항상 고정되어 있어야만 하는 단점이 있다.

IBVS 방식의 스테레오 비전 시스템이 구성되면 추적 알고리즘은 언제든지 변동이 가능하다. 본 논문에서 사용된 CAMShift 알고리즘은 추적하고자 하는 물체를 사용자가 직접 선택하기 위한 목적이었고, 주위 환경에 따라 Template Matching, SIFT, Motion Detecting 등의 추적 알고리즘들을 적절히 사용하면 보다 다양하고 정밀한 시각 센서를 구현 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] S. H. Lee, "A derivation of the equilibrium point for a controller of a wheeled inverted pendulum with changing its center of gravity," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 5, pp. 496-501, May 2012.
- [2] H. J. Lee and S. Jung, "Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot using sensor fusion of low cost sensors," *Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 95, Feb. 2012.
- [3] K. Y. Lee and J. W. Lee, "Stereo-vision based road slope estimation and free space detection on road," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 3, pp. 199-288, Mar. 2011.
- [4] T. D. Viet, P. T. Doan, N. Hung, H. K. Kim, and S. B. Kim, "Tracking control of a three-wheeled omnidirectional mobile manipulator system with disturbance and friction," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no. 7, pp. 2197-2211, Jul. 2012.
- [5] S. N. Yu, C. H. Choi, S. Y. Lee, J. Y. Lee, and C. S. Han, "Development of an articulated mine-detecting manipulator system for mobile robots," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 25, no. 4, pp. 1051-1060, Apr. 2011.
- [6] A. Dietrich, T. Wimbock, A. Albu-Schaffer, and G. Hirzinger, "Reactive whole-body control: dynamic mobile manipulation using a large number of actuated degrees of freedom," *Robotics & Automation Magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 20-33, Jun. 2012.

- [7] W. Gang, J. M. Lee, and J. M. Lee, "Centroid model of a 10DOF dual arms mobile manipulator based on segway," *Proc. of ICROS Annual Conference 2012 (in Korean)*, Seoul, Korea, pp. 266-267, Apr. 2012.
- [8] H. Chu, S. Ye, Q. Guo, and X. Liu, "Object tracking algorithm based on camshift algorithm combining with difference in frame," *Proc. of IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Jinan, China, pp. 51-55, Aug. 2007.
- [9] O.-D. Nouar, G. Ali, and C. Raphael, "Improved object tracking with camshift algorithm," *Proc. of IEEE International Conference on ICASSP 2006*, Toulouse, France, vol. 2, pp. 2, May. 2006.
- [10] Intel Corporation, *Open Source Computer Vision Library Reference Manual*, 2005.
- [11] B. K. P. Horn, *Robot Vision*, MIT Press, 1986.
- [12] G. Xu and Z. Zhang, *Epipolar Geometry in Stereo Motion and Object Recognition*, Kluwer Academic Publishers, 2010.
- [13] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, 2000.
- [14] P. Hillman, *White Paper: Camera Calibration and Stereo Vision*, Oct. 2005.
- [15] G. R. Bradski and A. Kaehler, *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*, O'Reilly, 2008.

이 준 민

2011년 경성대학교 전기공학과 졸업.
2011년~현재 부산대학교 대학원 전자전
기공학과 석사과정 재학중. 관심분야는
제어 시스템 설계, 모바일 비전 센서.

이 장 명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업.
1982년 동 대학원 석사. 1990년 USC 공
학박사. 1992년~현재 부산대학교 전자전
기공학부 정교수. 관심분야는 지능로봇
시스템 설계 및 제어, 마이크로 프로세
서 응용, 센서융합, Navigation/Localization.