

# 혼합 비주얼 서보 제어 기법을 이용한 이동로봇의 목표물 추종

논 문
60-6-26

## Target Tracking of the Wheeled Mobile Robot using the Combined Visual Servo Control Method

이 호 원\* · 권 지 옥\*\* · 홍 석 교\*\*\* · 좌 동 경†

(Howon Lee · Ji-Wook Kwon · Suk-Kyo Hong · Dongkyoung Chwa)

**Abstract** - This paper proposes a target tracking algorithm for wheeled mobile robots using in various fields. For the stable tracking, we apply a vision system to a mobile robot which can extract targets through image processing algorithms. Furthermore, this paper presents an algorithm to position the mobile robot at the desired location from the target by estimating its relative position and attitude. We show the problem in the tracking method using the Position-Based Visual Servo(PBVS) control, and propose a tracking method, which can achieve the stable tracking performance by combining the PBVS control with Image-Based Visual Servo(IBVS) control. When the target is located around the outskirts of the camera image, the target can disappear from the field of view. Thus the proposed algorithm combines the control inputs with of the hyperbolic form the switching function to solve this problem. Through both simulations and experiments for the mobile robot we have confirmed that the proposed visual servo control method is able to enhance the stability compared to of the method using only either PBVS or IBVS control method.

**Key Words** : Wheeled mobile robot, Target tracking, Position-based visual servo control, Image-based visual servo control, Combined visual servo control

### 1. 서 론

최근 다양한 목적의 지능형 이동로봇에 대한 관심이 증대되고 있으며 관련 산업도 빠르게 성장하고 있다. 현장 모니터링, 감시 및 정찰과 같은 다양한 분야의 수요로 인하여 특정 목표물을 추종하는 이동로봇 제어 기술의 필요성이 증대되고 있다. 이러한 목표물을 추종하는 기법에서는 목표물과 이동로봇의 상대적 위치 및 자세에 대한 정보가 상당히 중요한 요소이므로 다양한 방법을 사용하여 이 정보를 추출하고 있다. 그 중 비전시스템은 많은 정보를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있고 설치 및 유지 보수가 간편하여 자주 사용된다 [1].

비전 시스템을 이용한 이동로봇의 목표물 추종 기법은 크게 위치기반 비주얼 서보 제어 방식(PBVS, Position Based Visual Servoing)과 영상기반 비주얼 서보 제어방식(IBVS, Image Based Visual Servoing)으로 나뉘어 연구되었다 [2]. 위치기반 제어는 3차원 공간에서 상대적 위치에 대한 오차를 정의함으로써 이를 최소화 하는 제어 방법이다.

이를 위해 비전카메라의 교정정보(Calibration)가 사용되는데 이 교정정보가 명확하고, 불확실성을 정확히 보상할 수

있다면 제어 방식에 따라 상당히 좋은 성능을 보일 수 있다. 하지만 교정정보 추정 오차에 의한 성능 저하가 크다 [3]. 또한 비전카메라의 시야각(FOV, Field Of View) 이탈로 인하여 제어가 불가능한 경우가 발생할 수 있다는 단점을 가지고 있다 [4]. 반면에 영상기반 제어는 3차원 공간에서 이동로봇의 위치 및 자세에 대한 추정 정보를 이용하지 않고 사영된 2차원 평면의 영상에서 목표 영상을 기반으로 동작하는 방법이다 [2]. 입력영상의 특징점 좌표의 오차를 이용하여 제어하기 때문에 표적에 대한 3차원 모델이 요구되지 않으며 비전카메라의 교정정보에 상대적으로 둔감하다는 장점이 있다. 하지만 알고리즘 연산과정에서 특이성(Singularity)문제[4]가 발생 할 수 있으며, 이동로봇 자체의 3차원 모델이 사용되지 않기 때문에 국소 최소값(Local minimum)[5]과 같은 비정상적인 동작의 발생 확률이 존재한다는 단점을 가지고 있다.

최근에는 이 두 가지 기법을 융합하여 사용하는 연구가 많이 진행되고 있다. 융합 기법은 위치기반 제어 및 영상기반 제어가 동시에 진행되는 형태[6]와 두 가지 제어 방식을 스위칭[7-8]하여 사용하는 등의 다양한 방법이 제시되었다. 두 가지 제어방식이 동시에 진행되는 형태는 보통 위치기반 제어를 통하여 이동로봇을 구동하고 시야각 문제를 해결하기 위하여 패닝(Panning)과 틸팅(Tilting)이 가능한 비전카메라를 사용하여 영상기반 제어를 통해 표적이 항상 영상의 중앙에 위치하도록 제어하는 방법이다. 스위칭 방법은 영상 내부의 특징점 좌표에 따라 위치기반 제어와 영상기반 제어를 선택하여 제어한다. 하지만 동시 진행형의 경우에는 이동로봇의 제어에 독립적인 형태의 팬, 틸트 모듈을 필요로

\* 준 회원 : 아주대 전자공학과 석사과정

\*\* 정 회원 : 아주대 전자공학과 박사과정

\*\*\* 정 회원 : 아주대 전자공학과 교수

† 교신저자, 정회원 : 아주대 전자공학과 부교수

E-mail : dkchwa@ajou.ac.kr

접수일자 : 2010년 12월 10일

최종완료 : 2011년 4월 20일

한다는 단점을 가지고 있고, 스위칭 방법은 스위칭 경계에서 제어 입력이 급격히 변할 수 있다는 문제점을 안고 있기 때문에 위와 같은 문제를 해결 할 수 있는 다른 방식의 연구가 필요하다.

본 논문에서는 이동로봇의 목표물 추종을 위한 혼합 비주얼 서보 제어 기법을 제안한다. 이를 위하여 목표물의 후면에 증강현실[9]을 비롯한 다양한 분야에서 주로 사용되는 Fiducial 방식[10]을 단순화시킨 형태의 표적을 설치하고 비전카메라의 영상으로부터 해당 표적을 검출하는 알고리즘을 제시한다. 영상처리 알고리즘을 이용하여 표적의 정보로부터 이동로봇과의 상대적 위치 및 자세를 추정한 후 표적까지의 진입 각도를 고려하여 추종한다. 기존에 제시된 위치 기반 제어의 단점인 비전카메라의 시야각 문제를 해결하기 위하여 영상기반 제어를 혼합 사용하는 방법을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 위치 및 영상기반 제어 기법의 제어 입력을 동시에 입력받아 영상에서 표적의 위치에 따라 변하는 가중치를 곱하는 방법으로 두 제어 기법을 혼합한다. 이는 시야각 이탈 문제 및 특이성, 국소최소화 문제를 발생시키지 않기 때문에 목표물을 안정적으로 추종할 수 있다. 그리고 모의실험으로부터 혼합제어의 안정성과 타당성을 보이며 타 방식과의 비교를 통해 적용 가능성을 검증한다. 이동로봇 적용 실험을 통해 제안된 알고리즘의 유효성을 확인한다.

## 2. 비전 시스템 영상 처리

### 2.1 표적 검출 및 인식

본 논문에서는 비전시스템을 이용하여 단일 표적의 상대적 위치 및 자세를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 비전시스템에서 카메라를 통해 입력된 영상은 많은 정보를 포함하고 있다. 다양한 기법들로 이 정보들을 가공하여 표적에 대한 정보 및 주변 환경의 영향 등의 실제 시스템에 필요한 정보로 변환이 가능하다. 비전 카메라를 통해 입력된 영상에서 단순화된 단일 표적을 검출하고 해당 픽셀 좌표를 추출한 후 위치 및 자세 추정 알고리즘을 적용하였다. 이동로봇의 추종 대상이 되는 표적은 그림 1과 같은 형태로 정의하였다.

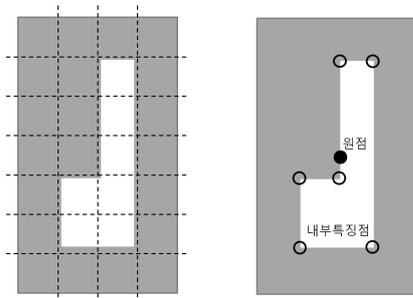


그림 1 추종 대상 표적 정의  
Fig. 1 Target tracking marker

그림 1의 표적은 4x7의 격자로 구성되어 있으며 내부의 2x5 격자를 이용하여 개체를 구분한다. 내부 격자의 조

건은 좌측과 우측의 1x5 격자에 최소 1개 이상의 흰색 격자가 포함되고, 끊어짐이 없는 상태를 가정하여 특징점이 6개 또는 8개가 되도록 설정하였다. 본 논문에서는 영상에서 그림 1과 같은 형태의 표적을 검출하기 위하여 레이블링 (Labeling) 기법을 사용하는 표적 검출 알고리즘을 개발하였다.

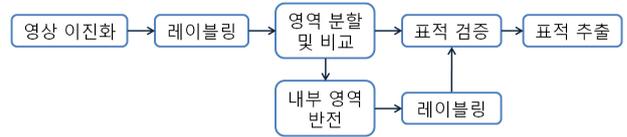


그림 2 표적 검출 알고리즘  
Fig. 2 Target extraction algorithm

표적 검출 알고리즘은 그림 2와 같이 원본 영상을 이진화하고 레이블링을 적용하여 1차 표적 후보군을 추출한다. 그 후 영상을 반전하여 검은색 테두리 안쪽의 흰색 사각형을 다시 레이블링 기법으로 검출하여 일정 비율 이상의 흰색 사각형이 검출될 경우 표적으로 선정한다. 표적으로 선정된 영상은 다수의 특징점을 가지고 있다. 추출 결과물의 특징점 픽셀의 좌표를 레이블링 결과로부터 직접 추출할 수 있지만 이는 표적의 자세에 따라 상대적으로 오차가 커질 가능성이 존재하기 때문에 이진 영상의 특징점을 검출하는 방법 중 하나인 해리스 코너 검출(Harris corner detection) 기법을 적용하여 특징점의 픽셀 좌표를 추출하였다.

### 2.2 위치 및 자세 추정 [14]

본 논문에서는 비전시스템의 교정(Calibration) 기법을 이용하여 카메라의 내부 및 외부 매개변수를 추정하고[11], 또한 자세 추정 알고리즘[12]을 사용하여 이동로봇의 위치 및 이동 방향을 추정한다. 목표물에 설치된 표적의 특징점 정보를 이용하여 목표물과 이동로봇의 상대적 관계를 정의하기 위한 좌표계를 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

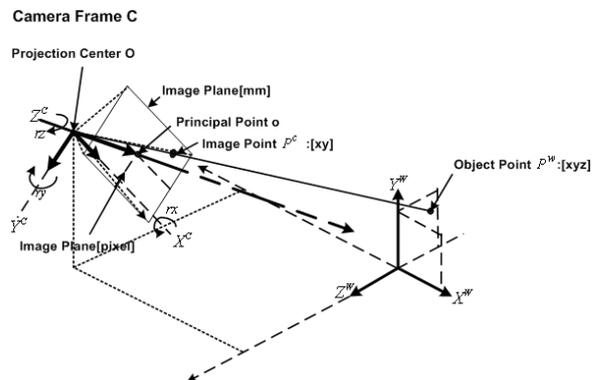


그림 3 비전 카메라 좌표계 정의  
Fig. 3 Vision camera coordinate

그림 3과 같이 3차원 공간의 좌표를  $[X \ Y \ Z]$ , 비전카메라의 촬상면에 사영된 2차원 영상의 표적 픽셀의 좌표를  $[x$

$y$ )라고 할 때 3차원 공간상의 임의의 점  $P^W$  및 카메라에 투영된 이미지를  $P^C$ 라고 하면 각각  $P^W = [X^W, Y^W, Z^W]^T$ ,  $P^C = [x, y]^T$ 로 쓸 수 있다. 이 두 좌표계의 변환 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} X^W \\ Y^W \\ Z^W \\ 1 \end{bmatrix} = PM \begin{bmatrix} X^W \\ Y^W \\ Z^W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P = \begin{bmatrix} Asp \times f & s & x & 0 \\ 0 & f & y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

식 (1)에서  $F$ 는 투영 변환(perspective transformation) 행렬이며 카메라의 내부 매개변수들을 포함하고 있다.  $Asp$ 는 CCD센서의 종횡비,  $f$ 는 초점거리를 나타내며  $s$ 는 가로축에 대한 세로축의 비틀림(skew)요소이며 일반적인 경우에는 0으로 가정할 수 있다. 식 (2)의  $R_x, R_y, R_z$ 는  $x, y, z$  각 축의 회전성분이며 3차원 좌표계의 회전 변환(Rotation matrix)은  $R = R_z \times R_y \times R_x$ 로 표현되는  $3 \times 3$ 행렬이다. 또한  $T$ 는  $3 \times 1$ 의 병진변환 행렬(Translation matrix)로서  $T = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 이다. 여기서 회전변환 행렬  $R$ 을 미리 알고 있다면 아래의 식 (3)과 같이 역기구학(Inverse kinematic)에 의해  $x, y, z$ 축을 기준으로 한 오일러 각(Euler angle)  $rx, ry, rz$ 를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} rx &= atan2\left(-\frac{r_{32}}{\cos(r_y)}, \frac{r_{33}}{\cos(r_y)}\right) \\ ry &= \sin^{-1}(r_{31}) \\ rz &= atan2\left(-\frac{r_{21}}{\cos(r_y)}, \frac{r_{11}}{\cos(r_y)}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

비전카메라의 교정기법을 통해 구해진 내부, 외부 매개변수로부터 3차원 공간상의 물체와 2차원 영상과의 회전 및 병진변환에 대한 관계를 이용하여 표적의 자세를 추정할 수 있다. 자세 추정 알고리즘은 두 좌표계의 관계를 표현하는데 사용되던 Lowe의 알고리즘[13]을 기반으로 하였으며, 이를 개선한 전사영 기법(Fully Projective Solution[14])을 적용하여 표적과 이동로봇의 상대적 자세를 추정하였다. 개발된 영상처리 알고리즘의 연산시간은 표 1과 같다.

표 1 영상처리 알고리즘의 연산시간

Table 1 Computing time of image processing

	영상 입력	표적 추출 및 인식				
		전처리	레이블링	위치 추정	표적 인식	합계
연산 시간	34.6 ms	2 ms	25.7 ms	11 ms	2 ms	40.7 ms
연산 속도	29 fps	24.5 fps				

표 1의 영상입력 항목은 비전 카메라로부터 640x480해상도의 8bit RGB 영상을 입력받는데 소모되는 시간이다. 이것을 초당 프레임 수(fps)로 환산할 경우 약 29fps이며 이것은 본 논문에서 사용되는 비전 카메라의 평균적인 성능이다. 표적 검출은 입력된 영상에 대한 전처리 과정 및 이진화, 2

회의 레이블링을 비롯한 영상 정보 처리 과정이 포함된다. 표적 인식은 검출된 표적 영역을 별도로 분리하여 각 특징점의 좌표를 추출하고 원점과의 거리를 계산하는 작업이다. 전체 알고리즘의 동작은 영상을 입력받는 34.6ms동안 이전 영상을 이용하여 표적을 검출하는 작업이 병렬로 진행되므로 실제 알고리즘의 동작은 약 40ms정도이며 이는 약 24.5fps의 처리속도를 갖는다. 본 논문에 사용되는 이동로봇의 실효 선속도는 약 2m/s이내, 실효 각속도는 0.5rad/s이내 이므로 실제 자율 주행 이동로봇에 충분히 적용가능하다.

### 3. 혼합 제어 기법을 이용한 이동로봇 제어

#### 3.1 위치기반 제어

본 논문에서는 비전 카메라를 통한 영상 정보에서 표적과의 상대적 위치 및 자세를 추정한 후 표적까지의 진입 각도를 고려하여 추종하는 위치기반 제어 알고리즘[15]을 적용하였다. 위치기반 제어를 위해서는 영상 정보를 통해 표적의 3차원 정보를 추정해야 한다. 영상에서 추출한 표적의 2차원 정보와 실제 표적의 3차원 정보, 그리고 비전 카메라의 내부 매개변수들을 이용하여 비전 카메라의 외부 매개변수, 즉 회전 행렬과 병진 행렬을 구하여 이동로봇과 표적에 대한 상대적 위치와 방향을 추정한다. 본 논문에서 사용한 표적은 2차원 평면 형태이므로 실제 3차원 공간 좌표계에서  $z_w = 0$ 이 되어  $P_w = [x_w, y_w, 0]^T$ 이 된다. 여기서  $3 \times 3$  형태의 회전 행렬을 Rodrigues 변환을 통해  $3 \times 1$  회전 벡터 형태로 변환하게 되면 카메라의 각 축 회전 성분  $[pitch, yaw, roll]^T$ 가 된다. 본 논문에서는 다음의 그림 4와 같은 기구학 모델을 갖는 표적 추종 로봇 시스템을 가정하였다.

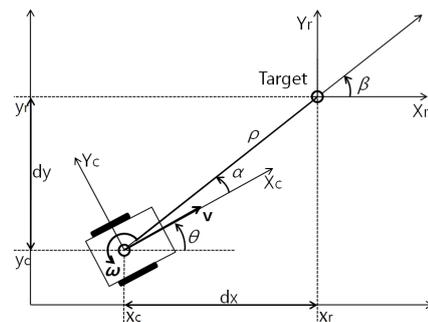


그림 4 이동로봇 기구학 모델

Fig. 4 Kinematic model of wheeled mobile robot

그림 4의  $\alpha$ 는 표적과 이동로봇 진행 방향 사이의 각도이며,  $\beta$ 는 표적에 대한 진입 각도 정보가 포함된다. 그리고  $\rho$ 는 표적과 이동로봇 사이의 거리이며,  $dx = x_r - x_c$ ,  $dy = y_r - y_c$ 로 각 축에 대한 거리 정보이며 이것은 다음의 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{dx^2 + dy^2} \\ \alpha &= -\theta_c - atan2(dy, dx) \\ \beta &= \theta_r - \theta_c - \alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 그림 4와 같은 기구학 모델을 갖는 이동로봇 시스템에서 이동로봇의 위치를 원점으로 하는 극 좌표계를 정의한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha & 0 \\ \frac{\sin \alpha}{\rho} & -1 \\ -\frac{\sin \alpha}{\rho} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (5)$$

식 (5)에서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각  $-\pi \leq \alpha \leq \pi$ ,  $-\pi \leq \beta \leq \pi$ 의 범위를 갖는다. 여기서, 원하는 속도 및 방향으로 목표지점에 도달하기 위하여 다음 식과 같이  $v$ 와  $\omega$ 의 제어 입력을 결정한다.

$$\begin{aligned} v_c &= k_\rho \rho \\ \omega_c &= k_\alpha \alpha + k_\beta \beta. \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)의  $k_\rho$ ,  $k_\alpha$ ,  $k_\beta$ 는 선속도 계수와 이동로봇의 이동방향, 그리고 표적의 자세각에 대한 계수이다. 식 (6)을 식 (5)에 대입하면 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_\rho \cos \alpha \\ k_\rho \sin \alpha - k_\alpha \alpha - k_\beta \beta \\ -k_\rho \sin \alpha \end{bmatrix}. \quad (7)$$

이 식의 안정성을 판별하기 위하여 평형점 부근에서 선형화 ( $\cos \alpha = 1$ ,  $\sin \alpha = \alpha$ ) 하면

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_\rho & 0 & 0 \\ 0 & -(k_\alpha - k_\rho) - k_\beta & 0 \\ 0 & -k_\rho & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

이며, 여기서 식 (8)의 행렬이 음한정일 경우, 즉 고유값이 모두 음수일 경우에 안정하게 된다. 따라서  $k_\rho > 0$ ,  $k_\beta < 0$ ,  $k_\alpha - k_\rho > 0$ 의 세 조건을 만족하는 계수를 설정하게 되면 위의 시스템은 안정하다.

### 3.2 영상기반 제어

이동로봇에 장착된 비전 카메라의 좌표를  $P = [x, y, z]^T$ , 이동로봇의 각속도를  $\Omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ , 그리고 이동로봇의 선속도를  $T = [T_x, T_y, T_z]^T$ 라고 할 때 이동로봇 좌표의 변화에 대해  $\dot{P} = \Omega \times P + T$ 의 관계식이 성립된다. 여기서 각속도 벡터  $\Omega$ 와 좌표 벡터  $P$ 의 외적 연산을 위하여 교대대칭 행렬(Skew symmetric matrix)  $S$ 를 다음과 같이 도입한다.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

이때  $\dot{P} = -S\Omega + T$  이므로  $\dot{P}$ 의 각 행을 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= z\omega_y - y\omega_z + T_x \\ \dot{y} &= x\omega_z - z\omega_x + T_y \\ \dot{z} &= y\omega_x - x\omega_y + T_z. \end{aligned} \quad (10)$$

비전 카메라의 촬상면에 사영된 2차원 영상의 좌표를  $f = [u, v]$ 라고 하면 식 (11)과 같이 3차원 좌표계와의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$f = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{\alpha}{z} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (11)$$

식 (11)에서  $\alpha$ 는 비전 카메라의 초점 거리이다. 위의 관계식을  $x$ 와  $y$ 를 기준으로 정리하여 식 (10)에 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{x} &= z\omega_y - \frac{vz}{\alpha}\omega_z + T_x \\ \dot{y} &= \frac{uz}{\alpha}\omega_z - z\omega_x + T_y \\ \dot{z} &= \frac{z}{\alpha}(v\omega_x - u\omega_y) + T_z \end{aligned} \quad (12)$$

이다. 영상에서 표적의 좌표의 변화량을 계산하기 위하여 식 (11)을 미분하게 되면

$$\dot{f} = [\dot{u} \ \dot{v}]^T = \begin{bmatrix} \alpha \frac{z\dot{x} - x\dot{z}}{z^2} & \alpha \frac{z\dot{y} - y\dot{z}}{z^2} \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

이며, 여기에 식 (12)를 대입해 풀어보면 다음과 같다.

$$\dot{f} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{z} & 0 & -\frac{u}{z} & -\frac{uv}{\alpha} & \frac{\alpha^2 + u^2}{\alpha} & -v \\ 0 & \frac{\alpha}{z} & -\frac{v}{z} & -\frac{\alpha^2 - v^2}{\alpha} & \frac{uv}{\alpha} & u \end{bmatrix} U. \quad (14)$$

여기서  $U = [v_x \ v_y \ v_z \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ 이며  $\dot{f}$ 와  $U$ 의 관계행렬을 영상 자코비안  $J$ 로 표기한다. 위의 영상 자코비안 행렬은  $x, y, z$  3축의 선속도와 각속도의 6자유도를 갖는 시스템에 적용 가능하다. 본 논문에서 사용한 이동로봇은 z축 선속도  $v$ 와 y축 각속도  $\omega$ 만을 이용하기 때문에 식 (14)를 다음과 같이 간소화할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{u}{z} & \frac{\alpha^2 + u^2}{\alpha} \\ -\frac{v}{z} & \frac{uv}{\alpha} \end{bmatrix} U_r \quad (15)$$

여기서  $U_r = [v \ w]^T$ 이며 각각 이동로봇의 선속도와 각속도이다. 여기서 표적의 특징점이 다수이므로 식 (15)는  $i$ 개로 확장되며  $f$ 는  $iu, iv$ 가 하나의 쌍이므로  $2i \times 1$ 의 벡터로 표현되고  $J$ 는  $2 \times i$ 의 행렬로 표현된다.  $\dot{f}$ 로부터  $U_r$ 을 얻기 위해서는 영상 자코비안 행렬의 역행렬이 필요하지만 위와 같은 경우에는  $J$ 의 역행렬이 존재하지 않는다. 따라서 Moore-Penrose 유사역행렬[4]을 통해  $J$ 의 역행렬을 구하고 이를 이용하여 표적 영상의 목표 픽셀 좌표와 현재 표적의 픽셀 좌표의 오차가 0으로 수렴하도록 제어한다.

$$f_e = f_d - f_c \quad (16)$$

$f_c$ 는 현재 위치에서 비전카메라에 사영된 표적의 픽셀 좌표이며  $f_d$ 는 목표 위치에서의 표적 픽셀 좌표, 그리고  $f_e$ 는 그 둘 사이의 오차가 된다.  $f_e$ 의 미분형을  $\dot{f}_e = -K \cdot f_e$ , ( $K > 0$ ) 이라 하고 식 (14)를 다시 써보면

$$\dot{f}_e = J \cdot U_r = \dot{f}_d + K(f_d - f_c) \quad (17)$$

이다. 표적에 대한 이동로봇의 목표 픽셀 좌표인  $f_d$ 가 변화하지 않는 정해진 값이라고 가정하게 되면  $\dot{f}_d = 0$ 이고, 유사역행렬을 이용하여 식 (17)을 다시 표현하면 아래와 같다.

$$U_r = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = J^+ \cdot K \cdot f_e \quad (18)$$

### 3.3 영상기반 제어

표적이 비전카메라의 영상에 포함 될 경우 위치기반 제어를 이용하여 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있다. 하지만 시야각을 벗어나 영상에 표적의 특징점이 포함되지 않을 경우에는 위치기반 제어를 적용할 수 없기 때문에 시야각 문제를 해결하기 위하여 영상기반 제어를 동시에 진행하며 영상의 일부 구간에서 두 제어 입력을 혼합하였다. 본 논문에서 제안한 혼합 제어 알고리즘은 다음의 그림 5와 같은 형태로 동작한다.

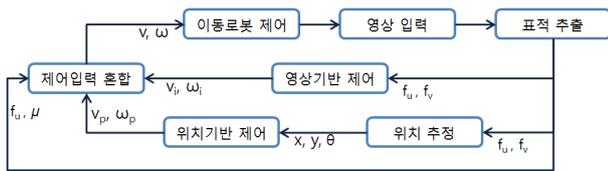


그림 5 혼합 제어 알고리즘  
Fig. 5 Combined visual servo control algorithm

그림 5의 알고리즘은 입력된 영상으로부터 표적을 추출하고 이동로봇과 표적의 상대 위치 및 자세를 추정 한 후 그 정보를 이용한 위치 기반 제어와, 추출된 표적의 영상 좌표 정보를 직접 이용한 영상기반 제어가 동시에 이루어지는 것을 나타내고 있다. 여기서 혼합 함수에 의하여 두가지 제어 기법으로부터 계산된 제어 입력이 혼합 된다. 본 논문에서 제안한 제어 기법의 혼합 함수는 다음의 식 (19)와 같이 표현된다.

$$\mu(f_x, d) = \frac{1}{2} \left\{ \tanh\left(\frac{f_x - I_s}{d} \cdot \pi\right) + \tanh\left(\frac{f_w - I_s - f_x}{d} \cdot \pi\right) \right\} \quad (19)$$

식 (19)에서  $f_x$ 는 영상에서 표적의  $x$ 축 좌표이며  $f_w$ 는 영상의  $x$ 축 최대값인 가로 해상도이다.  $I_s$ 는 영상기반 제어와 위치기반 제어를 분할하는 구간이며 시야각 이탈을 방지하기 위하여 영상의 좌우 측면에 존재한다.  $d$ 는  $I_s$ 의 주변에서 두 제어 기법이 혼합되는 범위를 나타낸 것이다. 식 (19)의 혼합 함수  $\mu$ 는 그림 6과 같이 표현 가능하다.

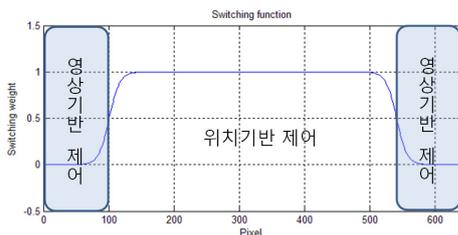


그림 6 혼합 함수  $\mu$  그래프  
Fig. 6 Combine function  $\mu$  graph

그림 6에서  $x$ 축의 좌측과 우측 100픽셀 지점이 구분선이 되며 50픽셀의 범위를 갖는다. 함수  $\mu$ 의 결과값이 0이면, 즉 표적이 그림 6의 짙은 색 영역에 존재 할 경우 영상기반 제어만을 사용하는 것이고 함수  $\mu$ 의 값이 1이면 위치기반 제어만을 사용한다. 표적의 좌표가 경계선 근처일 경우에는 함수  $\mu$ 의 하이퍼볼릭 탄젠트 값에 따라 적절히 조절된다.

$$\begin{aligned} v &= (1 - \mu) \cdot v_i + \mu \cdot v_p \\ \omega &= (1 - \mu) \cdot \omega_i + \mu \cdot \omega_p \end{aligned} \quad (20)$$

제한하는 기법의 제어 입력은 식 (20)이며 혼합 함수  $\mu$ 를 이용하여 위치기반과 영상기반 제어입력에 그림 6과 같은 가중치가 부여된다. 여기서 제어입력인 이동로봇의 선속도  $v$ 와 각속도  $\omega$ 는 혼합 함수  $\mu$ 와 영상기반 제어입력  $v_i, \omega_i$  그리고 위치기반 제어입력  $v_p, \omega_p$ 로 표현된다.

### 4. 모의실험

모의실험에서는 위치기반 제어 기법만을 사용할 때 시야각 이탈 문제가 발생하는 것을 보인 후 동일한 조건에서 제안된 혼합제어 기법을 사용하여 시야각 이탈 문제를 해결하는 것을 검증하였다. 그리고 단순 스위칭 기법과 비교하여 더욱 안정적인 성능을 확인하였다.

#### 4.1 혼합 제어 기법

위치기반 제어를 이용한 목표물 추종 주행에는 시야각 이탈 문제가 발생한다. 초기 위치  $(x, y) = (6m, 2m)$ 에서  $(x, y) = (0.5m, 0m)$ 에 진입 각도  $0rad$ 로 주행하는 경우의 시야각 변화를 그림 7에 표시하였다.

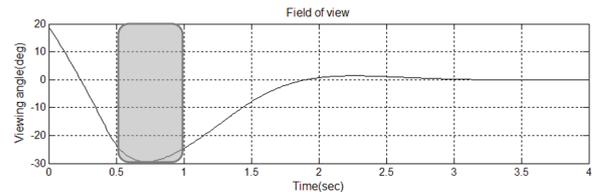


그림 7 위치기반 제어의 비전카메라 시야각 변화  
Fig. 7 Changing of the vision camera FOV to the position based control

그림 7은 시야각 이탈을 확인하기 위하여 표적이 영상 밖으로 나갔을 때도 주행 가능한 것으로 가정한 상태에서의 시야각 변화를 나타내고 있다. 일반적인 비전 카메라의 시야각은 약 50deg정도로 좌우 25deg의 범위를 갖는다. 따라서 그림 7의 5초부터 10초 사이의 구간에서는 시야각을 벗어나게 되어 제어가 불가능한 상태가 된다.

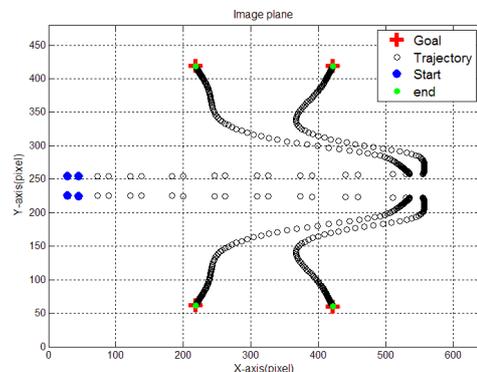


그림 8 혼합 제어 기법의 비전카메라 영상  
Fig. 8 Vision camera image of the combined control method

그림 8은 혼합 제어 기법을 이용한 이동로봇 주행의 비전 카메라 영상을 나타내는 것으로 가로 640, 세로 480픽셀의 영상에서 시간에 따라 표적의 외부 특징점이 변화하는 모습을 보여준다. 좌측의 채워진 원이 출발 지점에서의 특징점이며 검은색 원이 이동로봇의 주행에 따른 특징점의 변화이다. 그리고 십자모양으로 표시된 지점이 도착지점에서의 특징점 좌표이다. 표적이 100픽셀과 540픽셀의 범위 밖으로 벗어났을 때 영상기반 제어를 사용하는 혼합 알고리즘의 결과는 표적이 비전카메라의 시야에서 벗어나지 않고 정상적으로 추종하는 것을 볼 수 있다.

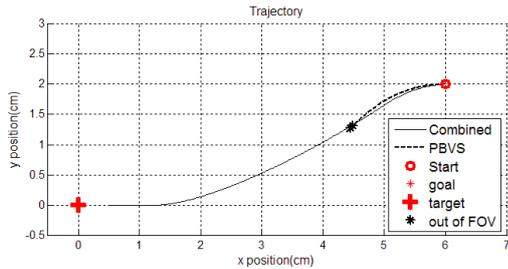


그림 9 혼합 제어의 주행 궤적  
Fig. 9 Trajectory of the combined control method

그림 9는 위치기반 제어와 혼합 제어기법을 이용한 이동로봇의 주행 궤적을 나타내고 있다. 위치기반 제어는 시야각 이탈 문제로 인하여 주행이 완료되지 못하지만 혼합제어 기법을 이용했을 때는 정상적으로 목표지점에 도달하는 것을 볼 수 있다. 제안된 제어 기법을 이용한 이동로봇 주행에서의 혼합 함수는 다음과 같이 결정된다.

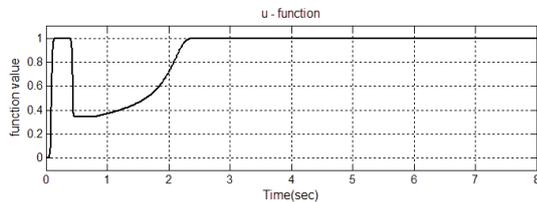


그림 10 혼합 제어의  $\mu$  함수  
Fig. 10  $\mu$  function of the combined control method.

그림 10의 혼합 함수  $\mu$ 의 값이 0에 가까울수록 영상기반 제어의 가중치가 높아지는 것이며 1에 가까울수록 위치기반 제어의 가중치가 높아지는 것이다. 위의 그래프에서 약 0.5초부터 표적 영상이 두 제어방식의 경계선에 근접하여 혼합 함수의 값이 0.4 미만으로 감소하며 영상기반 제어의 가중치가 높아진다. 그리고 2.4초 경과 후에는 혼합 경계의 안쪽으로 진입하게 되어 위치기반 제어의 가중치가 1에 가까워지도록 변환된다.

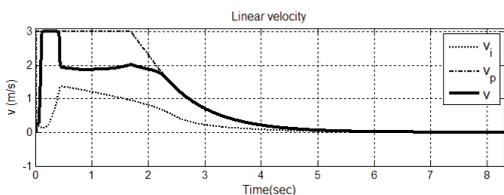


그림 11 이동로봇의 선속도  
Fig. 11 Linear velocity of mobile robot.

그림 11은 위치기반 제어와 영상기반 제어의 이동로봇 선속도  $v_p$ ,  $v_i$ 와 혼합 함수를 통해 구해진  $v$ 의 그래프이다. 최대 선속도는  $3m/s$ 로 설정하였으며 혼합 제어 기법의 선속도  $v$ 는 두 가지 방식을 혼용하다가 2.4초 이후에 표적이 영상의 중앙부로 접근하게 되어 위치기반 제어로 변환되는 모습을 보여주고 있다.

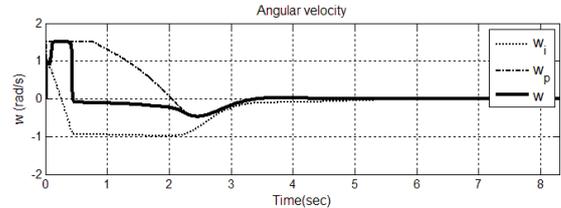
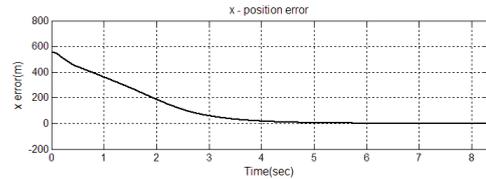
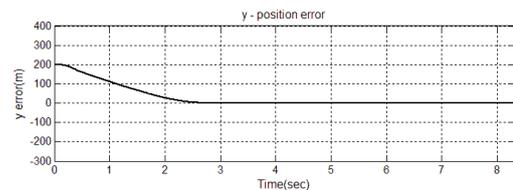


그림 12 이동로봇의 각속도  
Fig. 12 Angular velocity of mobile robot.

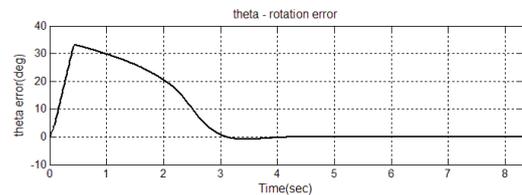
그림 12는 이동로봇의 각속도  $w$ 의 그래프이다. 마찬가지로 위치기반 제어와 영상기반 제어가 혼용되며 그 시점은 그림 10과 동일하고, 최대 각속도는  $\pm 1.5 rad/s$ 로 가정하였다. 목표 위치에 대한 추종 오차는 다음의 그림 13과 같다.



(a) 이동로봇의 x축 오차



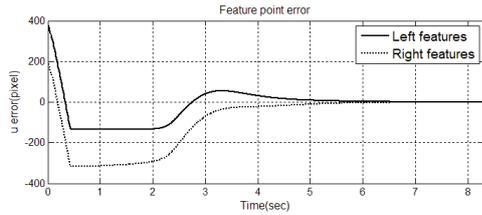
(b) 이동로봇의 y축 오차



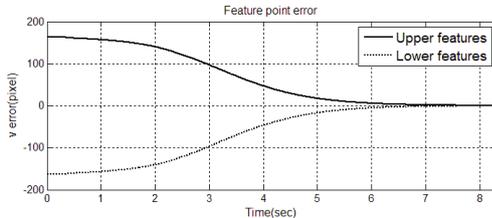
(c) 이동로봇의 진행방향 오차

그림 13 위치 및 자세 오차  
Fig. 13 Position and posture errors.

그림 13은 직교좌표계에서 목표지점의 위치 및 자세에 대한 이동로봇의  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  오차를 그래프로 나타낸 것이며 모든 오차가 0으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 2차원 영상의 특징점에 대한 오차 그래프는 다음과 같다.



(a) u축 특징점 오차



(b) v축 특징점 오차

그림 14 영상의 특징점 오차

Fig. 14 Feature point error of image.

그림 14(a)는 2차원 영상에서 가로 방향, u축의 오차 그래프이다. 목표 영상의 특징점 위치와 비전카메라에 입력된 영상의 특징점 위치 사이의 오차를 나타낸 것이다. 4개의 특징점을 비교하였기 때문에 4개의 그래프로 나타나야 하지만 본 논문에서는 영상의 왜곡이 보정된 상태로 특징점 추출의 오차가 없는 것으로 가정하였으며, 이동로봇의 3차원 움직임 및 카메라의 롤(Roll), 피치(Pitch)회전과 같은 불가능한 움직임이 없는 것으로 가정하였기 때문에 2개의 특징점으로 표시되었다. 그림 14(b)는 세로 v축의 오차 그래프이다. 그림 14의 결과는 모두 오차가 0에 가까워져 이동로봇이 목표지점에 정해진 각도로 도달한다는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.2 타 방식과의 비교

본 논문에서는 이동로봇이 비전시스템을 이용하여 표적을 인식하고 표적에 대한 목표 위치에 도달하는 알고리즘을 개발하였다. 여기서 위치기반 제어와 영상기반 제어의 제어입력을 동시에 사용하였으며 두 제어입력에 가중치를 부가한 형태로 동작한다. 다른 연구[7]에서는 영상의 특정 지점에 표적이 위치할 경우 다른 방식으로 전환하는 방식으로 제어했지만 이는 제어입력의 변화가 크기 때문에 실제 적용에 문제가 발생할 확률이 높다. 다음의 그림 15는 단순한 스위칭 기법을 이용한 이동로봇 주행에서 비전카메라에 입력된 영상의 변화를 나타낸 것이다. 이동로봇의 초기위치  $(x, y) = (6m, 2m)$ 에서 표적으로부터  $0.5m$  떨어진 곳에 수직으로 진입하는 상태를 가정하였다. 그림 8과 비교해보면 두 가지 방법 모두 목표 위치에 도달하는 것을 볼 수 있지만 단순 스위칭 알고리즘의 경우에는 위치기반 제어와 영상기반 제어의 경계부분에서 제어 기법의 변화가 이루어지기 때문에 520픽셀에서 570픽셀 사이에서 상당히 심한 진동이 발생 하는 것을 알 수 있다.

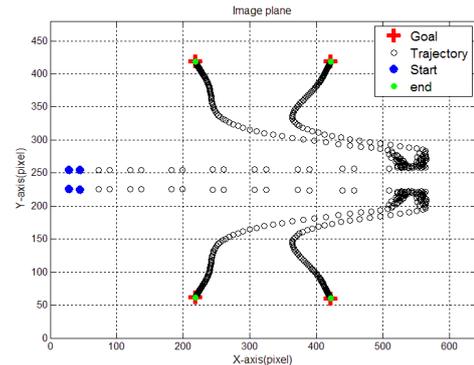
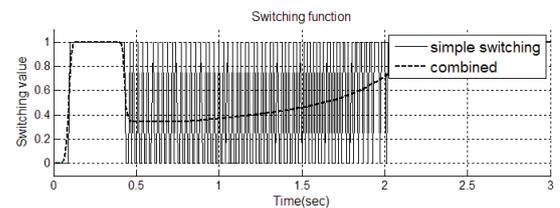
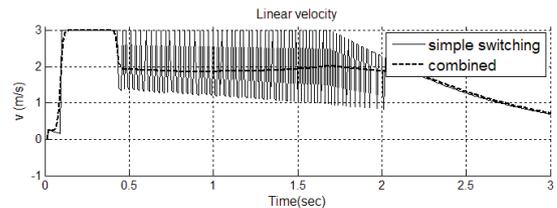


그림 15 단순 스위칭 방식의 비전카메라 영상

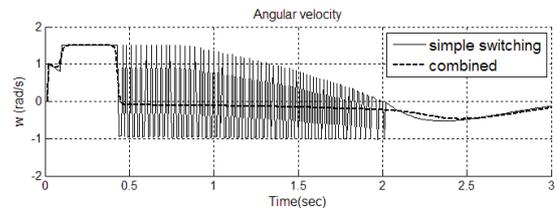
Fig. 15 Vision camera image of simple switching method.



(a) v축 특징점 오차



(a) v축 특징점 오차



(a) v축 특징점 오차

그림 16 단순 스위칭 알고리즘과 혼합제어 비교

Fig. 16 Compare with combined control method and simple switching method.

그림 16은 위부터 혼합 함수  $\mu$ , 이동로봇의 선속도  $v$ , 각속도  $w$ 의 그래프이다. 실선은 단순 스위칭 기법, 파선은 본 논문에서 제안한 혼합제어 기법의 그래프이며 실제 혼합되는 시점인 0.5초에서 종료 시점인 3초 구간을 확대하여 표시하였다. 파선으로 표현된 혼합제어 기법의 제어 입력과 비교해 보면, 스위칭 기법의 제어입력은 스위칭 경계 부분에서 진동 현상이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 실제적으로 불가능한 움직임이라 볼 수 있으며 예상하지 못한 결과를 불러올 수 있기 때문에 본 논문에서 제안한 혼합제어 기법보다 불안정한 것으로 볼 수 있다.

5. 실험결과

모의실험과 유사한 조건을 위하여 이동로봇의 초기 위치를 약 1/2 비율로 축소한 지점으로 설정하고 실험하였다. 따라서 이동로봇의 초기 위치는  $(x, y) = (3m, 1.7m)$ 이며 혼합제어 알고리즘을 사용한 이동로봇 주행의 시야각 변화는 다음의 그림 17과 같다.

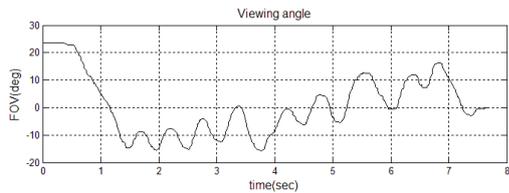


그림 17 이동로봇 시야각 변화  
Fig. 17 Changing of mobile robot FOV.

초기 위치에서의 시야각이 24deg이고 주행이 시작된 이후 빠르게 감소하여 -15deg에서 +17deg사이의 시야각을 유지하며, 항상 표적이 영상 내부에 존재하는 것을 나타내고 있다. 이동로봇의 제어 입력 변화는 다음의 그림 18과 같다.

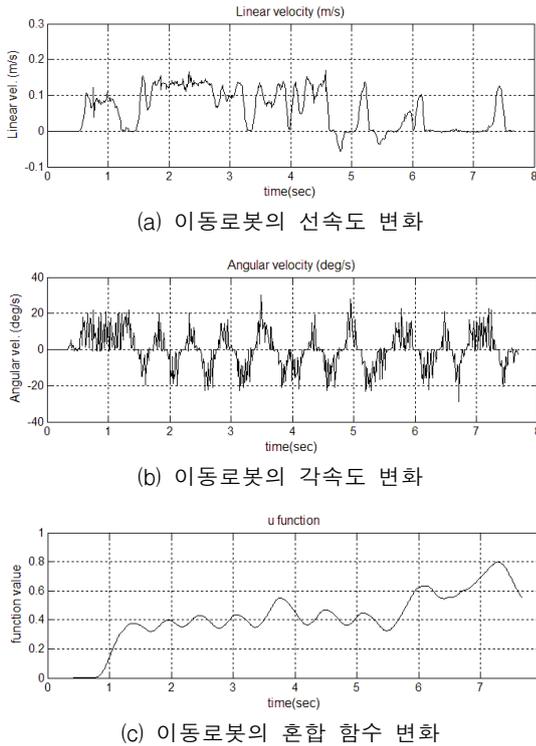
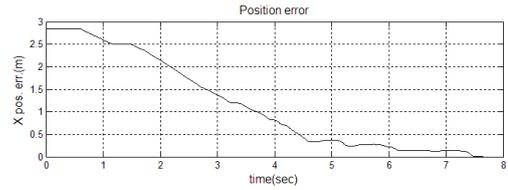
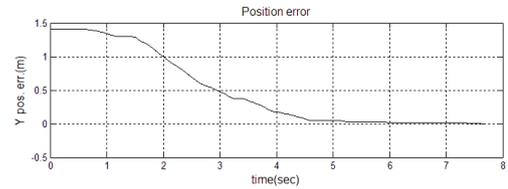


그림 18 제어 입력 및 혼합함수  
Fig. 18 Control input and combine function

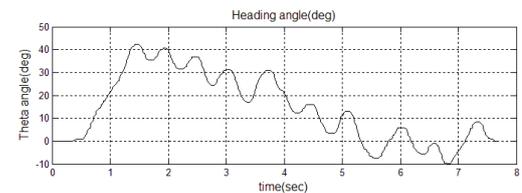
그림 18은 이동로봇의 제어입력인 선속도 및 각속도, 그리고 제어 기법에 대한 혼합 함수  $\mu$ 를 나타내고 있다. 이동로봇의 위치와 진행 방향의 오차는 다음과 같다.



(a) 이동로봇의 x축 위치 오차



(b) 이동로봇의 y축 위치 오차



(c) 이동로봇의 진행방향 오차

그림 19 위치 및 진행방향 오차  
Fig. 19 Position and heading angle errors.

위의 그림 19는 이동로봇의 움직임에 대한 오차를 나타내는 것으로 각각  $x$ 축,  $y$ 축 위치 오차, 그리고 이동로봇의 진행 방향  $\theta$ 의 오차를 보여준다. 그림 18과 그림 19의 결과를 살펴보면 모의실험과 달리 혼합 함수의 변화가 크며 이동로봇의 진행 방향에 대한 흔들림이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이것은 실험에 사용된 이동로봇의 기구부에 대한 특성으로 인하여 빠른 반응속도를 보이지 못하기 때문에 영상 내부의 표적 좌표가 혼합 경계 영역 부근에서 움직이는 동작이 이루어 졌기 때문에 발생한 것이다. 이것은 모의실험의 표적 영상 변화와 실제 실험의 표적 영상 변화를 살펴보면 알 수 있다. 영상에서 표적의 좌표가 그림 8과 같은 형태로 움직일 때 경계선 부근에서 위치기반 제어와 영상기반 제어의 혼합 함수 값에 의해 일정한 각도를 유지하는 구간이 존재한다. 이 구간으로 인하여 실제 실험에서는 이동로봇의 진행 방향각이 진동하는 것처럼 나타나게 된다. 실제 실험의 영상에서 표적의 좌표 변화는 다음과 같다.

그림 20은 실험에서 이동로봇의 비전카메라에 입력된 표적의 위치 변화를 보여주고 있다. 그림 8과 유사한 형태이며 초기 위치에서는 시야의 좌측에 위치한 특징점이 우측으로 이동하며 위치기반과 영상기반 제어 기법이 혼합되어 제어되는 것을 볼 수 있다.

그림 21은 혼합제어 기법을 이용하여 주행하는 이동로봇의 모습을 단계적으로 나타낸 것이다. 좌측 상단의 초기 위치에서는 표적이 영상의 가장자리에 들어오게 되므로 영상기반으로 동작하여 시야각 이탈을 방지 하고 위치제어가 이루어진다. 다시 좌측 하단의 위치에서는 표적이 영상 오른쪽의 경계에 근접하게 되면서 혼합제어가 이루어지며 마지막으로 우측 하단과 같이 안정적으로 목표 위치에 도달하게 된다.

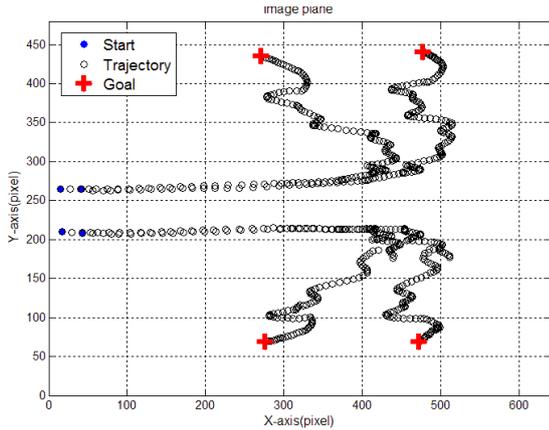


그림 20 영상의 특징점 변화  
 Fig. 20 Changing of feature point of the image



그림 21 혼합제어 기법을 이용한 주행 실험  
 Fig. 21 Experiment using combined control method.

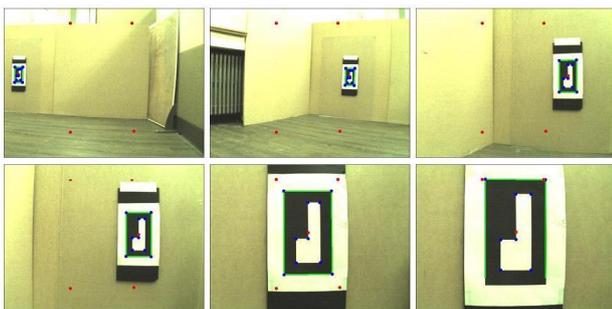


그림 22 혼합제어 기법 실험 영상  
 Fig. 22 Experiment image of combined control method.

그림 22는 이동로봇의 주행에 따른 실제 비전카메라의 영상이다. 좌측 상단의 초기 위치에서 시작하여 우측 하단의 마지막 위치에 도달한 것을 보여준다. 위의 그림 22에서 각 영상마다 존재하는 4개의 점이 영상기반 제어에 사용되는 목표 위치에서의 특징점 좌표이며, 표적의 외부 특징점과 일치하게 되는 우측 하단의 그림이 미리 설정된 진입각을 유지하며 목표 위치에 도달한 것을 나타내고 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 이동로봇의 목표물 추종을 위한 혼합 비주얼 서보 제어 기법을 제안하였다. 목표물 추종에 필요한 상대적 위치 및 자세 정보 획득을 위하여 목표물에 부착된 표적을 추출하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 검출된 목표물의 표적 정보를 이용하여 목표물을 안정적으로 추종하는 제어 기법을 제시하였다. 기존 추종 알고리즘의 한계였던 위치기반 제어기법의 시야각 이탈 문제를 해결하기 위하여 영상기반 제어를 혼합하여 적용하였다. 불가능한 움직임의 제어 입력이 생성되는 단순 변환 기법이 아닌 두 가지 방식을 혼합 함수에 따라 가중치를 부여하는 방식으로 보다 안정적이며 실제 적용에 문제가 없는 알고리즘을 개발하였다. 이동로봇의 모의실험과 실험을 통해 제안한 영상처리 알고리즘의 실시간 적용 가능성을 보였다. 그리고 제안한 혼합제어 기법을 통해 이동로봇 주행시 시야각 이탈 문제를 해결하였으며, 현실적으로 불가능한 움직임의 제어 입력이 생성되지 않아 안정성이 향상되는 것을 입증하였다.

## 감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2009-0069742)

## 참 고 문 헌

- [1] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer, and C. J. Taylor, "A vision-based formation control framework," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, 2002.
- [2] S. Hutchinson, G. Hager, and P. Corke, "A tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 12, pp. 651-670, 1996.
- [3] E. Malis, "Visual servoing invariant to changes in camera intrinsic parameters," *IEEE Int. Conf. Computer Vision*, pp. 704-709, Canada, 2001.
- [4] P. I. Corke and S. A. Hutchinson, "A new hybrid image-based visual servo control scheme," *IEEE Conf. Decision and Control*, vol. 3, pp. 2521-2526, Australia, 2000.
- [5] D. Fioravanti, B. Allotta, and A. Rindi, "Image based visual servoing for robot positioning tasks," *Meccanica*, vol. 43, no. 3, 291-305, 2008.
- [6] L. Freda and G. Oriolo, "Vision-based interception of a moving target with a nonholonomic mobile robot," *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 6, pp. 419-432, 2007.
- [7] S. Kim, S. Oh, "Hybrid Position Based Visual Servoing for mobile robots," *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 18, pp. 73 - 82, 2007.
- [8] J.M. Toibero, C.M. Soria, F. Roberti, R. Carelli, P.

Carelli, "Switching visual servoing approach for stable corridor navigation," Int. Conf. Advanced Robotics, 2009.

- [9] H. Kato and M. Billinghurst. "Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system," In Proc. the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, pp. 85-94, 1999.
- [10] M. Fiala, "ARTag, A Fiducial Marker System using Digital Techniques," IEEE Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 2, pp. 590-596, 2005.
- [11] Z. Zhang, "a flexible new technique for camera calibration," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 23, no. 10, pp. 1330-1334, 2000.
- [12] J. Heikkilä, "Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 10, pp. 1066-1077, 2000
- [13] M.M.Y. Chang and K.H. Wong, "Model reconstruction and pose acquisition using extended Lowe's method," IEEE Trans. Multimedia, vol. 7, no. 2, pp. 253-260, 2005.
- [14] H. Araujo, R.J. Carceroni, and C.M. Brown, "A fully projective formulation to improve the accuracy of lowe's pose-estimation algorithm," Computer Vision and Image Understanding, vol. 70, no. 2, pp. 227-238, 1998.
- [15] R. Siegwart and I. R. Nourbakhsh, Autonomous Mobile Robot, The MIT Press, 2004.



**홍석교 (洪錫敎)**

1948년 8월 23일생. 1971년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 석사. 1981년 동 대학원 박사. 1976년~현재 아주대학교 전자공학부 교수.

Tel : 031-219-2478  
Fax : 031-212-9531  
E-mail : skhong@ajou.ac.kr

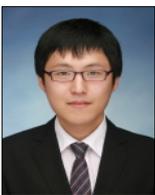


**좌동경 (左東京)**

1971년 12월 23일생. 1995년 서울대 제어계측공학과 졸업. 2001년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공박). 2005년~현재 아주대 전자공학부 부교수.

Tel : 031-219-1815  
Fax : 031-212-9531  
E-mail : dkchwa@ajou.ac.kr

저 자 소 개



**이호원 (李浩元)**

1982년 11월 25일생. 2009년 아주대 전자공학부 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정.

Tel : 031-219-2489  
Fax : 031-212-9531  
E-mail : 251bin@gmail.com



**권지욱 (權志昱)**

1980년 2월 24일생. 2005년 아주대 전자공학부 졸업. 2005년~현재 동 대학원 박사수료.

Tel : 031-219-2489  
Fax : 031-212-9531  
E-mail : bluemichael@ajou.ac.kr