

# 이동로봇에 장착된 능동 카메라를 이용한 이동물체의 추적과 포획

## Tracking and Capturing a Moving Object Using Active Camera Mounted on a Mobile Robot

박진우, 박재한, 윤경식, 이장명

(Jin-Woo Park, Jae-Han Park, Kyoung-Sik Yun, and Jang-Myung Lee)

**Abstract :** In this paper, we propose a method of tracking and capturing a moving object by a mobile robot. The position of the moving object is acquired from the relation through color-based image information from a 2-DOF active camera mounted on the mobile robot. The direction and rotational angular velocity of the moving object are estimated using a state estimator. A Kalman filter is used as the state estimator for taking characteristics of robustness against noises and uncertainties included in the input data. After estimating the trajectory of the moving object, we decide on the optimal trajectory and plan the motion of the mobile robot to capture the target object within the shortest distance and time. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by the simulations and experiments.

**Keywords :** autonomous mobile robot, kalman filter, tracking & capturing, active camera

### I. 서론

로봇 성능은 컴퓨터 기술, 센서 기술, 구동기 관련 기술 등 로봇 관련 기술의 전반적인 발전으로 꾸준히 향상되어 왔다. 이에 따라 로봇이 수행할 수 있는 작업 영역이 확대되어 생산 공정뿐만 아니라 여러 분야에서 로봇의 사용량이 증대되어 감은 물론 그 사용 범위와 사용 방법도 매우 다양해지고 있다. 또한 산업체들의 공장 자동화와 FMS(Flexible Manufacturing System)화 추세에 따라 로봇이 보다 더 다양한 작업 환경에서 유연한 작업을 할 수 있도록 능력이 요구되고 있다.

이동로봇은 최근 산업계의 자동화, 무인화 추세와 더불어 산업현장의 무인창고 시스템이나 몰자 운반용으로, 그리고 서비스 로봇으로 청소용이나 경비용, 안내용으로 각 분야에서 그 활용성과 필요성이 높아지고 있다. 또한 고정된 작업공간을 갖는 고정 매니플레이터에 비해 이동로봇은 작업영역이 자유로우므로 이동능력에 작업능력을 부여하여 응용할 수 있는 분야는 매우 다양하다. 원자로 내부와 같은 극한 작업환경에서의 검사, 고장수리작업이나 해저, 달, 혹성 탐사 등의 작업과 같이 위험한 환경에서의 작업이나 사람이 작업하기 어려운 극한 상황에서 사람을 대신하여 로봇이 작업을 수행하는 경우에 이는 더욱 유용할 것이다[1].

자율이동로봇은 공장, 원자력 발전소, 우주 탐사 및 기타 인간이 작업하기에 위험한 지역에서 이동하면서 주어진 작업을 수행하는 지각, 지능 및 작업 능력을 가진 로봇이다. 로봇이 불확실한 환경에 지능적으로 대처하면서 빠른 응답특성을 가지기 위해서는 지각을 위한 센서정보와 방향 인지와 자세 및 속도제어를 위한 정보로부터 궤적 및 동작

계획의 추론과정과 그 출력이 실시간으로 이루어져야 한다. 즉 로봇의 입력정보처리, 계획, 출력의 상호관계를 명확히 정의하고 이들의 체계적 관리를 위한 제어구조에 대한 연구가 필요하다[2][3]. 또한 기존의 이동로봇의 제어에 대한 연구는 고정된 목표지점에 대하여 안전하게 도착하도록 하는 것이 대부분이다. 그러나 수중이나 우주공간의 작업환경에서는 작업대상물체가 고정되지 않고 공간상에서 자유운동 하므로 이러한 상황에서는 로봇이 이동물체에 대해서도 대처할 수 있는 능력이 필요하다[4].

따라서 본 논문에서는 이동하는 작업대상에 대해서도 작업할 수 있도록 이동물체를 추적하여 포획하는 방법을 제시한다. 로봇에 부착된 2자유도의 능동 카메라에 의해 입력되는 영상데이터와 능동카메라의 기구학적 관계를 이용하여 이동물체의 공간상의 위치를 구하며, 상태추정기에 의해 물체의 선형속도와 회전 각속도를 추정한다. 여기에서 입력 데이터에 부가된 잡음과 불확실성에 대해 강인한 특성을 나타내기 위해 상태추정기로 칼만필터를 사용한다. 칼만필터로 추정된 물체의 선형속도와 회전 각속도로부터 이동물체의 궤적을 예측하여 이를 단시간에 포획하기 위한 로봇의 최적의 경로 및 동작을 결정한다. 제안한 알고리즘은 시뮬레이션 및 실험을 통하여 유효성을 검증하였다.

논문의 구성은 2장에서 2 자유도의 능동 카메라 시스템에 대해서 알아보고, 3장 및 4장에서는 이동물체의 모델링과 칼만필터를 이용한 이동물체의 추적 알고리즘을 제안하고, 추적대상 이동 물체를 포획하기 위한 이동 로봇의 동작 계획에 대해서 알아본다. 5장에서는 제안된 방법을 시뮬레이션 및 이동로봇에 적용한 실험을 통하여 타당성을 조사하며, 6장에서 결론을 맺는다.

### II. 능동 카메라 시스템

이동물체의 궤적을 추정하여 추적하기 위해서는 이미지

접수일자 : 2001. 6. 10., 수정완료 : 2001. 8. 10.

박진우, 윤경식, 이장명 : 부산대학교 전자공학과(jwpark@home.pusan.ac.kr/shadow@hyowon.pusan.ac.kr/jmlee@hyowon.ac.kr)

박재한 : 신성전자(hans1024@shin-sung.com)

정보에 목표물이 존재해야 한다. 카메라가 로봇에 고정된 경우의 시각영역은 로봇의 자세에 종속되므로 불규칙적으로 움직이는 물체를 연속적으로 추적하기가 매우 어려우며 따라서 로봇의 자세와 무관하게 시각영역을 제어할 수 있는 능동 시각 시스템이 필요하다[5]-[7].

1. 능동 카메라 시스템의 기구학 해석

본 논문에서 사용한 능동카메라는 그림 1과 같다. 기구부는 2 자유도의 pan, tilt 동작이 가능하도록 구성되었다. 기구부 해석을 위하여 그림 1(a)와 같이 D-H(Denavit-Hartenberg)법에 의해 좌표축을 설정하면 (1)의 동차행렬식과 표 1의 링크 파라미터를 얻을 수 있다.

$${}^0H_4 = {}^0H_1 \cdot {}^1H_2 \cdot {}^2H_3 \cdot {}^3H_4 \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\alpha)\cos(\beta) & -\cos(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\alpha) & l_2 \sin(\alpha) + l_3 \cos(\alpha)\cos(\beta) \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 & l_3 \sin(\beta) \\ -\sin(\alpha)\cos(\beta) & \sin(\alpha)\sin(\beta) & \cos(\alpha) & l_1 + l_2 \cos(\alpha) - l_3 \sin(\alpha)\cos(\beta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

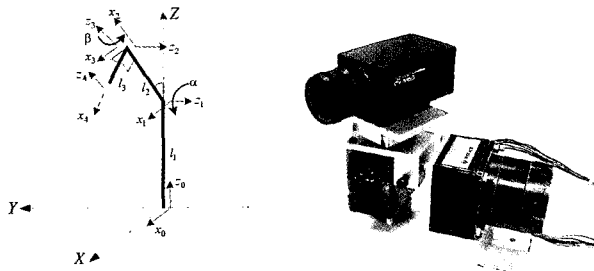
동차행렬에 의해 기구부 관절  $\alpha, \beta$ 에 대한 카메라의 위치는 (2)-(4)로 나타낸다.

$$x_{ccd} = l_2 \sin(\alpha) + l_3 \cos(\alpha)\cos(\beta) \quad (2)$$

$$y_{ccd} = l_3 \sin(\beta) \quad (3)$$

$$z_{ccd} = l_1 + l_2 \cos(\alpha) - l_3 \sin(\alpha)\cos(\beta) \quad (4)$$

또한 동차행렬의 자세벡터는 기준 좌표계에 대한 카메라의 Roll, Pitch, Yaw 각에 대한 동차행렬의 회전 변환 행



(a) 기구부의 좌표계 (b) 능동카메라 시스템  
(a) Coordinates of the actuator (b) Active camera system

그림 1. 2자유도 능동 카메라 시스템.  
Fig. 1. 2-DOF active camera system.

표 1. D-H 링크 파라미터.  
Table 1. D-H link parameter.

link	$\theta$	$d$	$a$	$\alpha$
1	0	$l_1$	0	$-90^\circ$
2	$90^\circ - \alpha$	0	$l_2$	0
3	$90^\circ$	0	0	$90^\circ$
4	$\beta$	0	$l_3$	0

렬이며, 각 방향성분에 대해서 카메라의 tilt각  $\theta_R$ , pan각  $\theta_P$ , 회전각  $\theta_Y$ 은 (5)-(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_R = \tan^{-1} \left( \frac{\sin(\alpha)\sin(\beta)}{\sqrt{\cos^2(\alpha)\sin^2(\beta) + \cos^2(\beta)}} \right) \quad (5)$$

$$\theta_P = \tan^{-1} \left( \frac{\sin(\alpha)\cos(\beta)}{\sqrt{\cos^2(\alpha)\cos^2(\beta) + \sin^2(\beta)}} \right) \quad (6)$$

$$\theta_Y = \beta \quad (7)$$

2. 영상 정보와 실제 좌표의 변환 관계

영상정보로부터 공간상의 거리정보를 계산하기 위해서는 같은 지점을 다른 두 위치에서 관측한 정보가 필요하다. 일반적으로 스테레오 카메라가 많이 사용되어 거리 정보를 얻게 되는데 정합문제에 대한 많은 처리와 계산시간이 요구되어 아직 실시간 처리에는 어려움이 많으므로 본 논문에서는 획득한 영상이 동일한 평면상의 정보라는 제약 조건 하에서는 하나의 영상정보만으로도 공간상의 거리를 추정하는 방법을 이용하였다. 즉, 이동 로봇이 영상정보로부터 장애물 및 바닥의 물체를 인식하여 거리를 계산할 때 얻고자 하는 거리정보는 바닥이라는 동일한 평면에서의 정보가 된다. 따라서 하나의 카메라로부터 로봇의 작업에 필요한 장애물 및 물체에 대한 거리정보를 얻을 수 있으며 이에 능동카메라 기구부의 위치와 자세정보가 함께 요구된다.

그림 2와 같은 핀 홀(Pin hole) 카메라 모델로부터 기하학적으로 영상정보와 실제 환경의 맵핑(Mapping) 관계를 구하여 실제 거리를 추정한다. 능동카메라 자세에서 영상정보와 실제환경의 관계를 그림 3(a)와 나타낼 수 있다. 그림 3(b)에서  $\theta_{rx}$ 는 카메라의 X방향에 대한 시각영역의 각이며  $\theta_{ry}$ 는 Y방향에 대한 각을 나타낸다. 그림 3(c)는 (b)의 상황에서 카메라에 입력된 영상이며  $P_x, P_y$ 는 카메라의 X,Y 방향 Pixel수  $j, k$ 는 거리를 추정하고자 하는 Pixel의 x,y방향의 좌표이다. 능동카메라의 자세에 의해 실제 영상은 (5)의 Roll 각에 의해  $\theta_R$ 만큼 회전된 영상이므로 (8)과 회전 변환하여 (9)과 같이 공간상 거리  $\hat{r}_o$ 와 방향  $\hat{\theta}_o$ 를 추정할 수 있다. 여기에서 기저 좌표계에 대한 x방향에 대한 위치는 (10)로 y방향은 (11)로 추정할 수 있다[8].

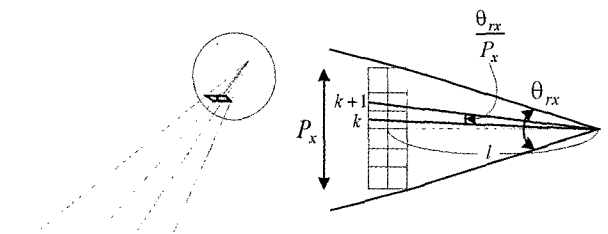


그림 2. 핀 홀 카메라 모델.  
Fig. 2. Pin-Hole camera model.

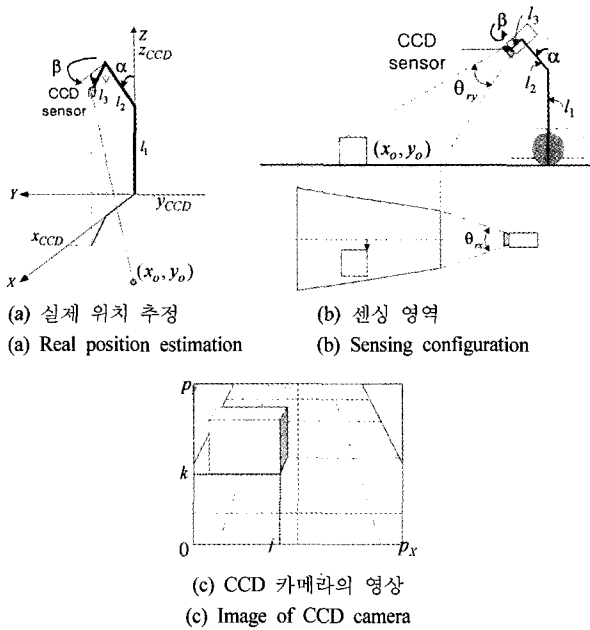


그림 3. CCD 영상에서 위치 정보 추정.  
Fig. 3. Estimation of position information from CCD image.

$$\begin{bmatrix} j' \\ k' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_R) & -\sin(\theta_R) \\ \sin(\theta_R) & \cos(\theta_R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j - \frac{P_x}{2} \\ k - \frac{P_y}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\hat{r}_0 = z_{ccd} \cdot \cot(\theta_p - \frac{k'}{P_y} \theta_{ry}), \quad \hat{\theta}_0 = \frac{j'}{P_x} \theta_{rx} \quad (9)$$

$$x_0 = r_{ccd} \cdot \cos(\theta_r) + \hat{r}_0 \cdot \cos(\theta_r + \hat{\theta}_0) \quad (10)$$

$$y_0 = r_{ccd} \cdot \sin(\theta_r) + \hat{r}_0 \cdot \sin(\theta_r + \hat{\theta}_0) \left( r_{ccd} = \sqrt{x_{ccd}^2 + y_{ccd}^2} \right) \quad (11)$$

영상정보에서 추적물을 인식하여 이미지상에서 위치를 구하면 (8)-(11)의 변환관계식에 의해 실제환경에서의 위치를 추정할 수 있다.

3. 원하는 위치에 영상의 중심을 두기 위한 역기구학

카메라가 추적물체를 잃어버리지 않기 위해서는 가능한 이미지의 중앙에 물체가 나타나도록 해야된다. 따라서 물체의 다음 위치를 예측하여 그 지점을 바라보도록 카메라의 자세를 취하면 능동적으로 물체를 이미지의 중앙에 위치시키며 추적할 수 있다. 능동적으로 특정한 영역의 영상정보를 얻기 위해서는 그 영역을 바라보기 위한 카메라 기구부의 자세를 나타내는 역기구학이 필요하다. 영상정보와 실제환경의 관계로부터 이미지의 중심을 원하는 좌표로 향하기 위한 기구부의 역기구학에서 Tilt 각은 (12)로 Pan 각은 (13)으로 구해진다.

$$\alpha_d = \cos^{-1} \left( \frac{-l_1 l_2 + \sqrt{l_1^2 l_2^2 - (l_1^2 + r_d^2)(l_1^2 - r_d^2)}}{(l_1^2 + r_d^2)} \right) \left( \frac{1}{\sin(\beta_d)} \right) \quad (12)$$

표 2. 능동카메라 시스템의 파라미터.  
Table 2. Parameters for active camera system.

$l_1$	40cm	$l_2$	7.5cm
$l_3$	4cm		
$P_x$	320pixel	$P_y$	240pixel
$\theta_{rx}$	50°	$\theta_{ry}$	40°

$$\beta_d = \tan^{-1} \left( \frac{y_d}{x_d} \right) \quad (13)$$

여기서,  $\alpha_d$ 와  $\beta_d$ 는 카메라 기구부의 자세를 나타내며,  $x_d$ 와  $y_d$ 는 원하는 영역의 좌표,  $r_d$ 는  $\sqrt{x_d^2 + y_d^2}$ 다.

본 논문에서는 사용된 능동 카메라 높이, 각도 등의 파라미터는 표 2와 같다.

III. 이동물체의 궤적 추적

1. 이동물체의 모델링

직교좌표 공간상에서 운동하는 일반적인 물체에 대하여 각 방향의 속도 및 가속도를 추정할 수 있으면 물체의 예측되는 다음 위치( $P_x, P_y, P_z$ )는 (14)-(16)과 같이 나타낼 수 있다[9].

$$\hat{P}_{x+\delta t} = \hat{P}_x + \hat{V}_x \delta t + \frac{1}{2} \hat{A}_x \delta t^2 \quad (14)$$

$$\hat{P}_{y+\delta t} = \hat{P}_y + \hat{V}_y \delta t + \frac{1}{2} \hat{A}_y \delta t^2 \quad (15)$$

$$\hat{P}_{z+\delta t} = \hat{P}_z + \hat{V}_z \delta t + \frac{1}{2} \hat{A}_z \delta t^2 \quad (16)$$

여기서,  $\delta t$ 는 샘플링 시간이며, ( $P_x, P_y$ ), ( $V_x, V_y$ ), ( $A_x, A_y$ )는 이동물체의 위치, 속도 및 가속도의 추정치를 나타낸다. xy-평면상에서 이동하는 물체의 움직임은 진행속도 성분  $v_k$ 과 각속도 성분  $w_k$ 로 분해하여 (17)-(19)의 이산형 시변 방정식으로 나타낼 수 있다[10]. 이동물체의 운동을 일으키는  $v_k$ 와  $w_k$ 의 변화는 (20)-(21)와 같이 랜덤한 운동으로 정의한다.

$$\delta x_{k+\delta t, k} = v_k \delta t \cos(\theta_k + \frac{1}{2} \omega_k \delta t) \approx v_k \cos(\theta_k) \delta t - \frac{1}{2} \omega_k v_k \sin(\theta_k) \delta t^2 \quad (17)$$

$$\delta y_{k+\delta t, k} = v_k \delta t \sin(\theta_k + \frac{1}{2} \omega_k \delta t) \approx v_k \sin(\theta_k) \delta t + \frac{1}{2} \omega_k v_k \cos(\theta_k) \delta t^2 \quad (18)$$

$$\delta \theta_{k+\delta t, k} = \omega_k \delta t \quad (19)$$

$$\delta v_{k+\delta t, k} = \xi_v \quad (20)$$

$$\delta \omega_{k+\delta t, k} = \xi_w \quad (21)$$

여기서  $\xi_v, \xi_w$ 는 가우시안 랜덤변수이다.

이동물체의 모델을 칼만필터에 적용하기 위해서는 (22)의 이산시간 상태천이 모델이 필요하다. 이동물체의 이산형 시변 방정식으로부터 (23)의 이동물체 상태 천이 모델과 (24)의 관측 모델을 얻는다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \Phi_{k,k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \\ \mathbf{z}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \\ v_k \\ \omega_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta t \cos(\theta_{k-1}) & -\frac{1}{2} v_{k-1} \delta t^2 \sin(\theta_{k-1}) \\ 0 & 1 & 0 & \delta t \sin(\theta_{k-1}) & \frac{1}{2} v_{k-1} \delta t^2 \cos(\theta_{k-1}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \\ \theta_{k-1} \\ v_{k-1} \\ \omega_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \xi_v \\ \xi_\omega \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \\ v_k \\ \omega_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_x \\ \gamma_y \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서  $\mathbf{z}_k$ 는 측정벡터,  $\Phi_k$ 는 상태천이 행렬,  $\mathbf{H}_k$ 는 상태벡터와 측정벡터 사이의 관측행렬이며,  $\mathbf{w}_k$ 는 상태천이 자체의 불규칙 성분이며  $\mathbf{v}_k$ 는 측정잡음,  $\delta t$ 는 샘플링 시간을 나타낸다.

2. 칼만 필터에 의한 이동물체의 상태 추정

입력정보, 즉 영상정보는 처리과정 가운데 불확실성 및 잡음을 포함하고 있으며 상태천이 자체도 불규칙한 성분이 존재하므로 이에 대해 강인하게 상태를 추정하는 관측기로는 칼만필터가 적합하다[11]-[14]. 칼만필터는 추정값과 측정값의 오차에 필터이득을 곱하여 상태천이 모델에 수정함으로써 추정오차를 최소화하는 처리과정이다. 이동물체의 상태추정 문제에서 칼만필터의 측정벡터는 이미지에서 구한 이동물체의 x,y평면공간상 위치이며, 이로부터 상태변수로 설정한 이동물체의 x,y위치, 방향, 진행속도, 회전각속도를 추정한다.

필터이득을 구하기 위하여 추정오차의 공분산 행렬이 필요하며 이는 (25)로 이전과정의 공분산행렬의 상태천이에 시스템잡음의 공분산 행렬  $Q_{k-1}$ 이 부가된 형태로 추정된다.

$$P'_k = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + Q_{k-1} \quad (25)$$

추정오차의 공분산 행렬  $P'_k$ 와 관측 행렬  $H_k$ , 측정잡음의 공분산 행렬  $R_k$ 로 추정오차를 최소로 하는 최적의 필터이득  $K_k$ 을 구하며 이는 (26)의 형태이다.

$$K_k = P'_k H_k^T [H_k P'_k H_k^T + R_k]^{-1} \quad (26)$$

다음은 상태를 추정하는 과정으로 (27)과 같이 추정벡터의 상태천이 모델에 이전단계의 추정벡터와 측정벡터  $\mathbf{z}_k$  간의 오차에 필터이득을 곱한 이노베이션(innovation)항이 부

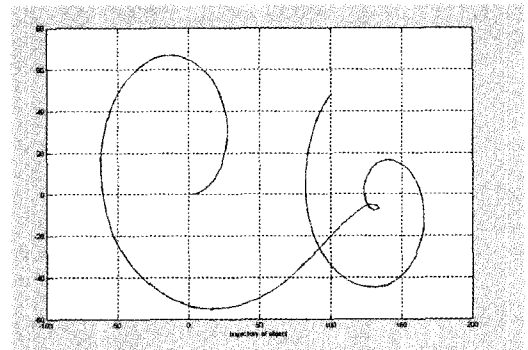
가 되어 최적의 상태를 추정한다

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + K_k [z_k - H_k \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}] \quad (27)$$

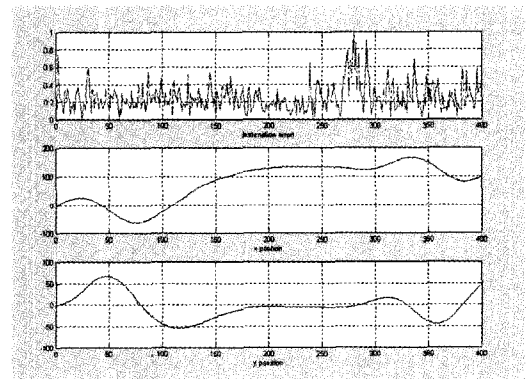
최종적으로 (28)의 추정오차의 공분산 행렬을 수정하는 과정을 거치고 다시 (25)의 과정으로 순환한다[15][16].

$$P_k = P'_k - K_k H_k P'_k \quad (28)$$

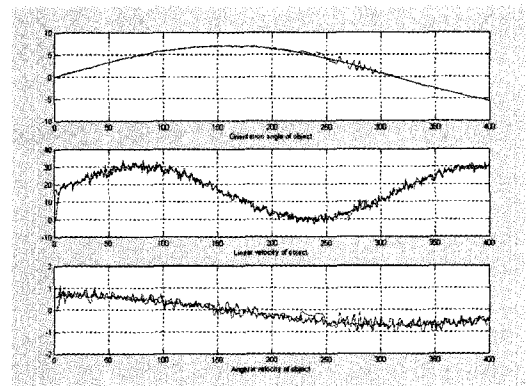
그림 4는 (a)의 궤적으로 이동하는 물체에 대하여 칼만 필터를 이용하여 추정한 상태 벡터를 그림 (b)와 (c)에 나타



(a) 이동물체의 궤적  
(a) Trajectory of a moving object



(b) 추정 오차와 물체의 x,y 좌표 예측  
(b) Estimation error and Estimation of X, Y coordinates of a object



(c) 물체의 방향, 속도 및 각속도 예측  
(c) Estimation of direction, velocity and angular velocity of a object

그림 4. 칼만필터를 이용한 상태 예측.  
Fig. 4. State estimation using a Kalman filter.

내었다. 물체의 진행방향 속도와 회전 각속도는 (29)과 같으며 측정단계에서는 분산의 크기가 2의 가우시안 잡음을 인가하였으며, 이동물체의 동작을 나타내기 위한 입력 단계에서 회전 속도와 회전 각속도에는 분산 3, 0.1의 가우시안 잡음을 각각 인가하여 시뮬레이션을 수행하였다. 결과 그림 4(b)(c)에서처럼 칼만필터를 사용하여 잡음이 존재하는 환경에서도 강인하게 각 상태들을 추정함을 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_k &= 15 * (\sin(0.02 * k) + 1) + \xi_v \quad [\text{cm/sec}] \\ \omega_k &= 0.7 * \cos(0.01 * k) + \xi_\omega \quad [\text{rad/sec}] \end{aligned} \quad (29)$$

### 3. 이동 물체의 궤적 예측

이동물체의 상태전이 모델에서 초기상태와 입력이 주어지면 물체의 상태를 예측할 수 있다. 칼만필터를 사용한 상태 추정기로부터 이동물체의 입력에 해당되는 진행 속도와 회전 각속도를 추정하고 근사함수로 모델링하여 이후의 입력을 예측한다. 본 논문에서는 진행속도와 진행 가속도 성분, 회전 각속도와 회전 각가속도 성분을 구하여 (30)-(31)의 일차식으로 근사화한다.

$$v_{k+n} = \hat{v}_k + \hat{a}_{lk} nT \quad (30)$$

$$\omega_{k+n} = \hat{\omega}_k + \hat{a}_{\omega k} nT \quad (31)$$

그림 4(b) 결과와 같이 칼만필터로 추정하여도 잡음이 존재하는 동적시스템이므로 출력에 잡음이 나타난다. 따라서 이전의  $m$ 개의 데이터로부터 (32)의 최소제곱 추정법을 사용하여 진행속도, 진행 가속도, 회전 각속도, 회전 각가속도 성분이 잡음에 둔감한 특성을 나타내도록 하였다[17].

$$\hat{E} = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (32)$$

$$E = \begin{bmatrix} \hat{v}_k & \omega_k \\ \hat{a}_{lk} & a_{\omega k} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & -T \\ 1 & -2T \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -mT \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} v_{k-1} & \omega_{k-1} \\ v_{k-2} & \omega_{k-2} \\ \vdots & \vdots \\ v_{k-m} & \omega_{k-m} \end{bmatrix}$$

예측된 입력과 상태전이 모델인 차분방정식으로 (33)과 같이 이동물체의 이후의 궤적을 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+m} &= x_k \sum_{h=0}^{m-1} \nu(h) \cos[\theta(h)T], \quad \hat{y}_{k+m} = y_k + \sum_{h=0}^{m-1} \nu(h) \sin[\theta(h)T] \\ \nu(h) &= \hat{v}_k + \hat{a}_{lk} hT, \quad \theta(h) = \hat{\omega}_k hT + \frac{1}{2} \hat{a}_{\omega k} h^2 T^2 \end{aligned} \quad (33)$$

### IV. 포획을 위한 동작 계획

이동물체를 포획하는 문제에 있어서 목표물이 계속 이동하므로 목표물의 미래 위치와 로봇의 미래 위치를 고려하여 최적의 로봇궤적을 계획하고 로봇을 동작시켜야 한다. 그림 5과 같이 이동물체의 1~M 샘플링 시간후의 위치를 예측하고, 그 중 물체와 거리가 가장 가까워지는 M 샘플링 시간후의 이동물체의 위치를 로봇의 목표점으로 설정하여 이동함으로써 최단시간내 포획할 수 있도록 한다.

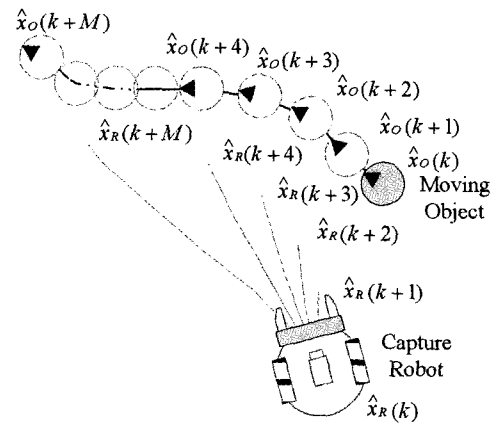


그림 5. 포획을 위한 궤적 예측.  
Fig. 5. Prediction of trajectory for capturing.

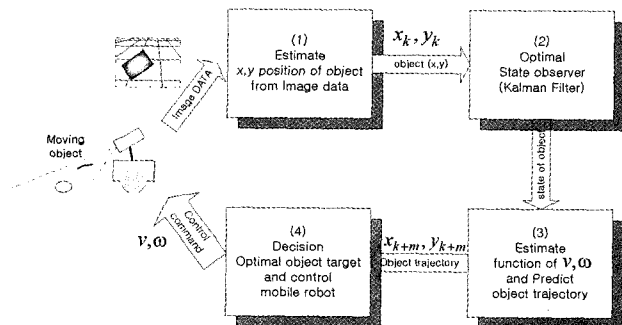


그림 6. 추적과 포획을 위한 이동로봇의 제어.  
Fig. 6. Control of a mobile robot for tracking and capturing.

$k$ 시점에서 로봇의 목표점은  $M$  샘플링 이후의 예측된 이동물체의 위치 중 (34)를 만족하는  $\hat{x}_R(k+m)$ 으로 설정한다.

$$\hat{x}_R(k+m_{opt}) = \min_{m=1-R} \| \hat{x}_O(k+m) - \hat{x}_R(k+m) \| \quad (34)$$

여기서  $\hat{x}_R(k+m)$ 은 이동로봇이  $\hat{x}_O(k+m)$ 을 목표점으로 설정하여  $M$  샘플링 시간동안 이동한 이후의 위치를 나타낸다. 그림 6는 이동물체 포획을 위한 이동로봇의 전체 알고리즘을 나타낸다. 먼저 능동카메라로 이동물체를 화면에 위치시키고 기구학적 관계를 이용하여 이미지에서의 물체 좌표를 실제좌표로 변환하여 이동물체의 위치를 구한다. 다음으로 칼만필터를 이용하여 물체의 상태를 추정하고, 상태벡터에서 물체의 진행방향 속도와 회전 각속도를 함수로 근사화하여 이후의 값을 예측한다. 마지막으로 물체의 예측위치 중 최적의 목표지점을 구하여 이동로봇을 움직인다.

### V. 실험 및 결과

논문에서 제시한 방법으로 이동물체를 포획하는 시뮬레이션을 수행하였다. 물체의 위치를 관측하는 벡터에 분산 1의 가우시안 백색 잡음을 인가하여 관측시 불확실성을 가지게 하였으며 이동물체의 입력에도 잡음을 인가하여 불규칙 운동을 하도록 설정하였다. 이동물체의 초기위치는 (-50 [cm], -50[cm])으로 로봇은 (-250[cm], 300[cm])으로 설정하

였으며, 로봇의 최고속도는 30[cm/sec]로 제한하였고 물체는 25~35[cm/sec]의 운동을 한다고 가정한다. 그림 6은 이동물체의 입력으로 (35)를 주었을 때의 시뮬레이션 결과이다. 여기서 진행방향은 분산 2, 회전각속도는 분산 0.1의 가우시안 랜덤변수이다.

$$v_k = 30(\cos(0.01k) + 1) + \xi, [cm/sec]$$

$$\omega_k = 0.7\sin(0.03k + \frac{\pi}{1.5}) + \xi_{\omega} [rad/sec] \quad (35)$$

그림 7(a)는 이동물체의 궤적과 로봇의 궤적, 예측한 궤적을 나타낸 것으로서 이동물체가 방향을 전환할 때 더 빨리 포획할 수 있는 방향으로 로봇이 이동했음을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 이동물체와 로봇의 거리, 이동물체의 실제 진행속도와 칼만필터로 추정된 진행속도, 그리고 실제 회전 각속도와 추정된 각속도를 나타낸다. 처음에는 추정된 정보에 오차가 크게 나타나지만 이는 곧 수렴되며 실제 값에 근사하게 상태가 추정됨을 알 수 있다.

그림 8과 같이 제안된 방법을 부산대학교 지능로봇 실험실에서 제작한 ZIRO-II에 적용하여, 이동 물체의 추적에 관한 실험과 물체 포획에 관한 실험을 수행하였다.

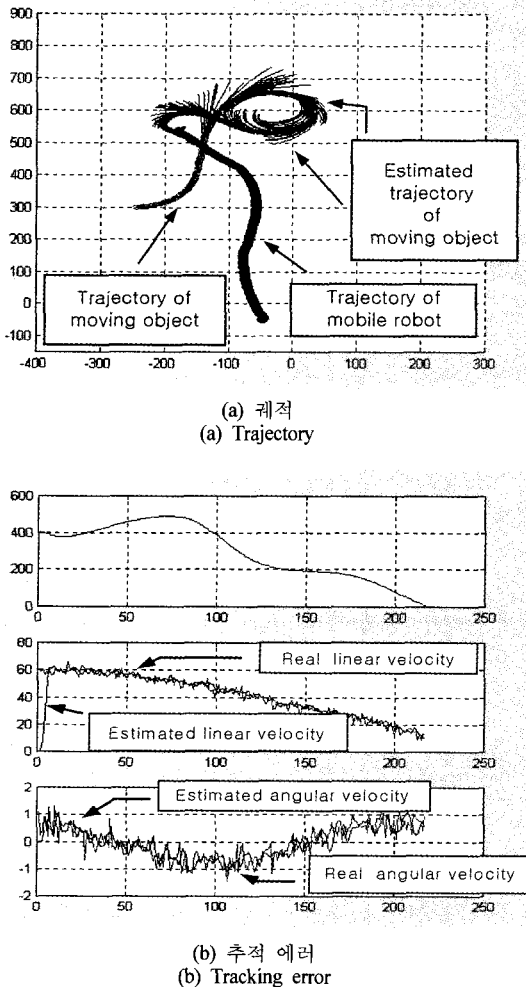


그림 7. 시뮬레이션 결과.  
Fig. 7. Simulation result.

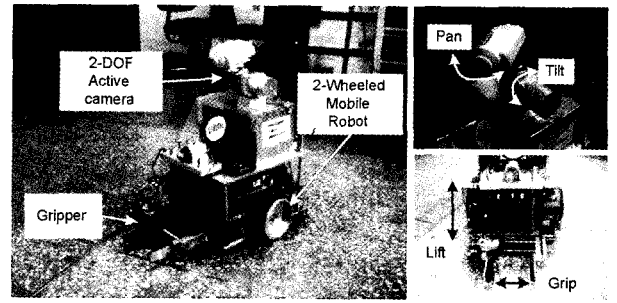


그림 8. 이동로봇 ZIRO-II.  
Fig. 8. The mobile robot ZIRO-II.

실험에 사용된 이동로봇 ZIRO는 공간상의 물체를 로봇이 인식하고 물체가 있는 곳으로 이동하여 포획하고 목적 지점으로 옮기는 작업에 대하여 수행하도록 하였으며 이에 따라 로봇은 공간상에서 이동할 수 있는 기구부와 능동적으로 물체를 찾거나 시각영역을 제어할 수 있는 2-자유도의 능동카메라, 그리고 대상 물체를 목적지점으로 옮기는 작업을 수행할 수 있는 그리퍼(Gripper)로 구성되어 있다. 로봇의 이동 기구부는 두 구동륜에 의해 이동과 방향 전환이 이루어지는 구조로 설계하였으며 작업대상 인식은 카메라로 하며 물체를 능동적으로 탐색하거나 추적할 수 있도록 Pan/Tilt 2-자유도의 능동 구조로 카메라 기구부를 설계하였다.

로봇의 시스템 구성에서는 각 관절의 제어와 카메라 기구부 제어에 관련된 많은 작업들을 실시간으로 제어하기 위하여 다수개의 제어기들이 네트워크를 통하여 제어를 수행하는 분산제어방식을 채택하였으며, 이를 위해 CAN(Controller Area Network) 방식을 로봇시스템에 도입하여 주 제어기가 5개의 하위제어기에 네트워크를 통하여 명령을 내리며 하위제어기는 주어진 자세 및 속도명령에 대하여 분산적으로 제어를 수행한다. 또한 본 논문에서는 능동카메라의 자세와 영상의 물체위치로부터 대상물체의 공간상 위치를 추정하는 방법을 제안하여 매 100msec마다 카메라 정보에서 물체의 위치를 계산하도록 구현하였으며, 이동 로봇은 물체의 위치를 계산하여 포획하기 위한 최적의 동작을 계획하여 각 하위제어기에 명령을 내리며 하위제어기는 10msec마다 PID 제어기를 이용하여 속도 및 자세제어를 수행한다. 전체적인 이동로봇 ZIRO의 구성도는 그림 9와 같다.

능동카메라를 이용하여 물체를 추적하면서, 대상물체와 이동로봇 ZIRO의 이동 궤적을 예측한 값 중 최소 거리에 해당되는 궤적을 이동로봇의 궤적으로 주행하여, 이동물체가 그리퍼(Gripper) 내에 들어오면 그리퍼 내에 센서로 이동물체를 감지하여 포획 동작을 수행하게 된다. 이동물체의 추적 및 포획에 관하여 그림 10, 11과 같이 두가지의 실험을 수행하였다. 그림 10은 이동 물체에 대한 추적 실험의 결과 예이다. 실험에 사용한 이동물체는 2개의 DC 모터로 구동되는 8×6[cm] 크기의 미니 이동 로봇이며 제어입력은 양 바퀴 DC 모터에 불규칙한 입력(속도 25~35 [cm/sec] 이내)을 주었다. 이동로봇에 부착된 능동 카메라에서의 이동 물체 검출은 입력된 영상에서 획득한 특정 물체

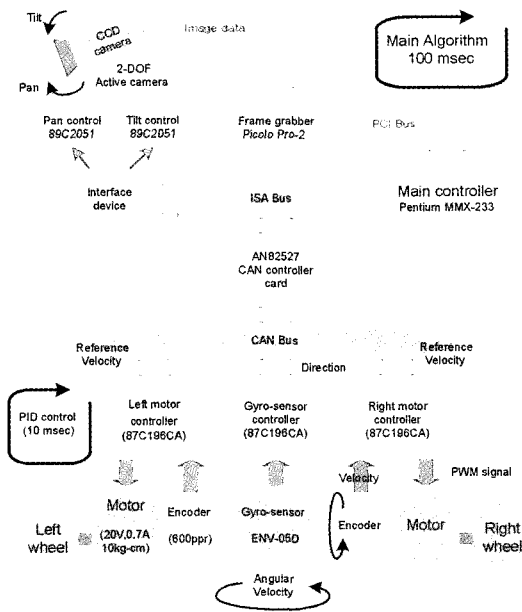


그림 9. 이동로봇 ZIRO의 전체 구성도.  
Fig. 9. Overall diagram for the mobile robot ZIRO.

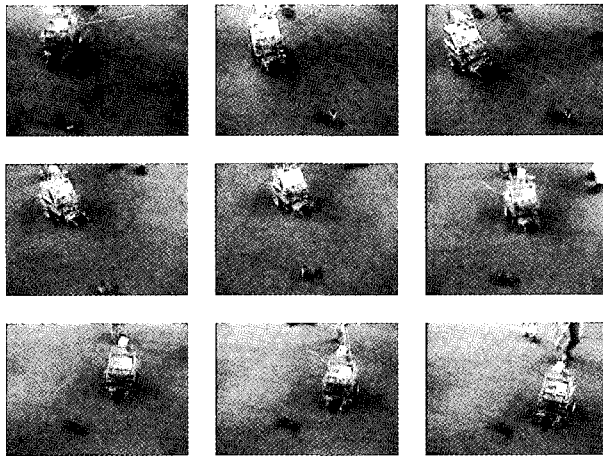


그림 10. 이동물체 추적에 관한 실험 결과.  
Fig. 10. Experimental result for tracking a moving object.

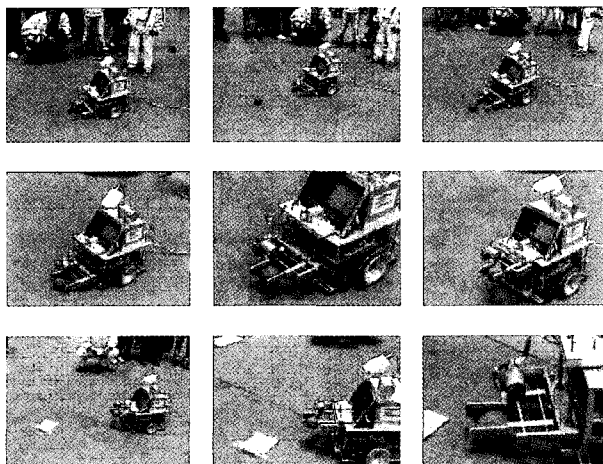


그림 11. 물체 포획에 관한 실험 결과.  
Fig. 11. Experimental result for capturing an object.

의 칼라(색) 정보를 추출하여 카메라가 장착된 능동 모듈의 기구학을 통해 해당 물체의 거리 정보를 계산한다(식 1-11 참조).

그림 11은 이동로봇이 능동 카메라를 이용하여, 빨간색의 목표 물체(공)를 찾은 후, 포획하여 10×10[cm] 크기의 목표지점(녹색)으로 공을 옮기는 예를 보인 것이다.

### VI. 결론

본 논문에서는 동적 작업에 대한 로봇의 작업능력에 관한 연구로서 로봇이 랜덤하게 이동하는 물체들을 포획하여 목적지점에 운반하는 것을 목표로 하여, 연구를 수행하였으며, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다. 이동물체의 추적 및 포획을 위해 제안된 방법은 크게 다음과 같이 구분된다.

1. 능동카메라의 기구학적 관계를 고려한 추적물체의 위치 추정 알고리즘
2. 칼만 필터를 이용한 이동물체의 운동 상태 추정과 이후의 움직임을 예측하는 방법
3. 예측된 궤적에서 최단시간 내에 물체를 포획하기 위한 로봇 동작계획에 대한 방법

시뮬레이션 및 실험을 통하여, 제안된 방법은 이동물체 추적과 포획에 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다. 향후 연구 방향은 영상정보에서 잡음 및 조명의 영향에 강인한 영상 처리에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

### 참고문헌

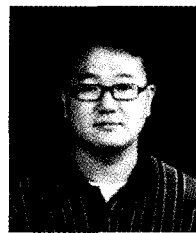
- [1] I. Nakutani, H. Saito, T. Kubot, et al., "Micro scanning laser range sensor for planetary exploration," *Proc. of Int. Conf. on Integrated Micro/Nanotechnology for Space Application*, vol. 1, pp. 232-236, 1995.
- [2] R. A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," *IEEE J. of Robotics and Automation*, vol. RA-2, no. 1, pp. 14-23, April, 1986.
- [3] R. E. Fayek, R. Liscano, and G. M. Karam, "A system architecture for a mobile robot based on activities and a blackboard control unit," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 267-274, 1993.
- [4] T. Komatsu, M. Uenohara, S. Iikura, H. Miura, and I. Shimoyama: "Capture of free-flying payloads with flexible space manipulators," *NASA Conference on Space Telerobotics*, pp. 35-44, 1989.
- [5] K. Daniilidis and C. Krauss, "Real-time tracking of moving objects with an active camera," *Real-time imaging*, Academic Press Limited, 1998.
- [6] N. Ayache. *Artificial Vision for Mobile Robots: Stereo Vision and Multisensory Perception*. MIT Press, Cambridge MA, 1991.
- [7] P. M. Sharkey, D. W. Murray, S. Vandevelde, I. D. Reid, and P. F. McLauchlan, "A modular head/eye platform for real-time reactive vision," *Mechtronics* vol. 3, pp. 517-535, 1993.
- [8] Jin-Woo Park, Jae-Han Park, and Jang-Myung Lee, "Intelligent control of a mobile robot using fuzzy logic,"

- Proc. of ITC-CSCC '99*, vol. 1, no. 585-588, 1999.
- [9] Russell F. Berg, "Estimation and prediction for maneuvering target trajectories," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. AC-38, no. 3, Mar., 1983.
- [10] Steven M. Lavalle and Rajeev Sharma, "On motion planning in changing partially predictable environments," *The International Journal of Robotics Research*, vol 16, no. 6, pp. 705-805, December, 1997.
- [11] J. T. Feddema and C. S. G. Lee, "Adaptive image feature prediction and control for visual tracking with a hand-eye coordinated camera," *IEEE Trans. Syst. Man Cybernet.* vol. 20, pp. 1172-1183, 1990.
- [12] K. Hashimoto, T. Kimoto, T. Ebine, and H. Kimura, "Manipulator control with image-based visual servo," *IEEE International Conference On Robotics and Automation*, pp. 2267-2272, 1991.
- [13] P. K. Allen, A. Timcenko, B. Yoshimi, and P. Michelman, "Trajectory filtering and prediction for automated tracking and grasping of a moving object," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1850-1856, 1992.
- [14] Yi Ma, J. Kosecka, and S. S. Sastry, "Vision guided navigation for a nonholonomic mobile robot," *IEEE Transaction on Robotics and automation*, vol. 15, no. 3, pp. 521-536, June 1999.
- [15] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Trans. ASME, J. Basic Eng, Series 82D*, pp. 35-45, Mar. 1960.
- [16] H. W. Sorenson, "Kalman filtering techniques," *Advances in Control Systems Theory and Applications*, vol. 3, pp. 219-292, 1966.
- [17] J. Jang, C. Sun, and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice-Hall, in. 1997.



**박진우**

1996년 동의대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1998년 동의대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 1999년 부산대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 관심분야는 이동로봇, 인터넷 기반 제어, DSP 응용 시스템 등.



**윤경식**

1999년 부산대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2001년 부산대학교 공과대학 전자공학과 졸업(석사). 2001년부터 현재 부산대학교 공과대학 전자공학과 박사과정. 관심분야는 이동로봇, 원격제어, 비전응용시스템 등.



**박재한**

1998년 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2000년 부산대학교 전자공학과 석사(공학석사). 2000년~신성전자 부설연구소 근무. 관심분야는 이동로봇, 인공지능, 실시간 운영체제 등.



**이장명**

현재 부산대학교 공과대학 전자공학과 교수. 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신 연구소 소장. 제어·자동화·시스템공학 논문지 제5권, 제1호, 참조.