

# 실내형 이동로봇을 위한 레이저 스캐너를 이용한 위치 인식과 장애물 추적

## Location Estimation and Obstacle tracking using Laser Scanner for Indoor Mobile Robots

최배훈 · 김범성 · 김은태

Baehoon Choi, Beomseong Kim and Euntai Kim

연세대학교 전기전자공학과

### 요 약

본 논문은 실내형 이동로봇에 적용하기 위한 위치인식과 장애물 추적 방법을 제안한다. 제안된 방법을 구현하기 위해 레이저 스캐너가 사용되었으며 로봇이 운행되는 공간의 지도정보를 미리 알고 있다고 가정한다. 레이저 스캐너의 측정치를 지도정보와 매칭해가며 Sequential Monte Carlo (SMC) 방법을 이용하여 로봇의 위치를 파악하고 파악된 위치에서 주변 장애물의 위치를 인식하고 다중 물체 추적 알고리즘을 이용함으로써 장애물과의 충돌 위험성 등을 미리 파악할 수 있다. 마지막으로, 본 논문에서 제안한 방법을 실험을 통해 검증한다.

**키워드** : 위치 인식, 장애물 인식, 장애물 추적, 실내형 이동 로봇

### Abstract

This paper presents the method for location estimation with obstacle tracking method. A laser scanner is used to implement the system, and we assume that the map information is known. We matches the measurement of the laser scanner to estimate the location of the robot by using sequential monte carlo (SMC) method. After estimating the robot's location, the pose of obstacles are detected and tracked, hence, we can predict the collision risk of them. Finally, we present the experiment results to verify the proposed method.

**Key Words** : Location Estimation, Obstacle Detection, Obstacle Tracking, Indoor Mobile Robot

## 1. 서 론

로봇이 점점 인간의 삶에 가까이 다가옴에 따라 그에 필요한 요소 기술 개발의 중요성도 거듭 커지고 있다. 그 중에서 로봇의 위치를 파악하고, 장애물을 인지하는 기술은 매우 중요한 기술이다. 이를 위해 다양한 방법들이 적용되어 왔다.

위치 인식은 실내에서 쓰이는 센서와 실외에서 쓰이는 센서에 차이가 있게 된다. 실내위치 인식에 쓰이는 RF센서는[1], 이는 비교적 거리정확도가 떨어진다. 또한 맵 매칭을 통한 위치 인식 방법[2]이 있는데, 이는 구현에 있어서 복잡도가 크다는 단점이 있다. 장애물을 인식하는 데에는 비전 등의 센서가 이용된다. 비전센서를 이용하게 될 경우 [3] 환경에 영향을 많이 받게 된다. 레이저 센서의 신호의 세기를 이용하여 장애물을 인식하는 연구도 있는데[4] 신

호의 세기가 반사되는 물질에 따라 달라서 학습을 하는데 어려움이 있게 된다. 본 논문에서는 레이저 스캔 센서를 이용한다.

본 논문에 앞서 적외선 센서를 이용한 위치 인식과 레이저 스캐너를 이용한 장애물 인식을 제안한 바 있다[5]. 본 논문에서는 적외선 센서를 사용하는 대신 문제가 되었던 레이저 스캐너의 시간복잡도 문제를 해결하고 장애물의 인식에 더해 추적 (tracking) 알고리즘을 적용함으로써 로봇의 기능을 확장시켰다. 레이저 스캐너를 이용하여 로봇의 주변을 스캔한 후 주변의 지도와 매칭을 통해 현재의 위치를 추정한다. 그리고 인식된 위치와 로봇이 가지고 있는 지도 정보를 토대로 한 확률 계산을 통해 레이저 스캐너의 측정값이 벽으로부터 측정되었는지 혹은 장애물로부터 측정되었는지 구분해낸다. 여기에 장애물로부터 측정된 값들의 집합에 클러스터링 알고리즘으로 장애물의 위치 등의 정보를 파악하고 다물체 추적 알고리즘을 적용하면 장애물의 움직임을 파악하여 이동 로봇의 충돌 위험을 사전에 방지할 수 있게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 시스템에 사용된 두 가지 알고리즘인 SMC방법과 JPDA 필터가 소개된다. 3장에서는 이동형 로봇에 적용된 센서에 대해 간략하게 소개하고, 4장에서는 레이저 스캐너를 사용한 위치인식과 장애물 추적 방법에 대해 제안한다. 5장에서는 실

접수일자 : 2011년 3월 19일

완료일자 : 2011년 4월 30일

본 논문은 본 학회 2011년도 춘계 학술대회에서 선정된 우수논문입니다

본 연구는 지식경제부 광역경제권 연계협력사업-시장친화형 지능형 탐승로봇 상용화 요소기술 개발-에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

험을 통해 제안한 알고리즘을 검증하고, 6장에서 결론으로 글을 맺는다.

## 2. SMC방법과 JPDA 필터

### 2.1 SMC방법

SMC(Sequential Monte Carlo)방법은 연속적으로 들어오는 데이터의 확률분포를 예측하는 기법으로 파티클 필터(Particle Filter)라는 이름으로도 불린다.

SMC방법은 시간  $t$ 일 때, 데이터  $x_t$ 의 확률분포를  $N$ 개의 샘플을 이용하여 다음과 같이 표현한다.

$$p(x_t|z_{1:t}) \approx \sum_{i=1}^N w_t^i \delta(x_t - x_t^i) \quad (1)$$

이 때  $z_{1:t}$ 는 시간 1부터 시간  $t$ 까지 누적된 측정값,  $x_t^i$ 는 시간  $t$ 일 때  $i$ 번째 샘플을,  $w_t^i$ 는 시간  $t$ 일 때  $i$ 번째 샘플의 가중치를 의미한다. 큰 수의 범칙에 따라 샘플의 개수가 많으면 많을수록 실제 분포에 가까워진다. 여기서 필요한 각 샘플의 가중치는 베이저언의 범칙으로부터 다음과 같이 유도된다[6].

$$w_t^i \propto w_{t-1}^i \frac{p(z_t|x_t^i)p(x_t^i|x_{t-1}^i)}{q(x_t^i|x_{t-1}^i, z_t)} \quad (2)$$

이를 유사코드로 표현하면 표 1과 같다.

표 1. SMC방법의 유사코드

Table 1. Pseudo code of SMC method

```

[ $\{x_t^i, w_t^i | i=1 \dots N\}$ ]=SMC[ $\{x_{t-1}^i, w_{t-1}^i | i=1 \dots N\}, z_t$ ]
For  $i=1:N$ ,
 $x_t^i \sim q(x_t^i|x_{t-1}^i, z_t)$ 
 $w_t^i \propto w_{t-1}^i \frac{p(z_t|x_t^i)p(x_t^i|x_{t-1}^i)}{q(x_t^i|x_{t-1}^i, z_t)}$ 
end
resampling
return  $\{x_t^i, w_t^i | i=1 \dots N\}$ 
    
```

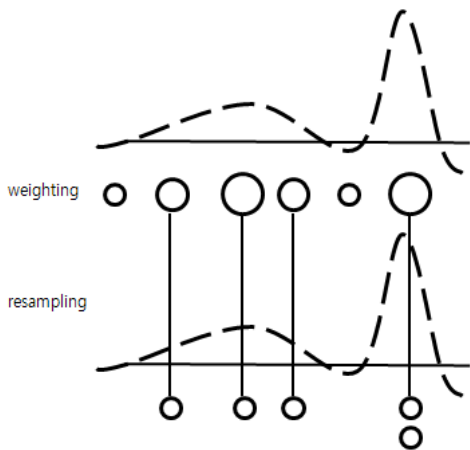


그림 1. SMC방법

Fig. 1. SMC method

SMC방법을 구현할 때 고려할 사항으로는 샘플의 개수를 정해주는 일과 샘플의 다양성을 유지해주는 일이다. 샘플의 개수를 고려해야 하는 이유는 샘플의 수가 너무 많으면 알고리즘의 시간복잡도가 커지고 또한, 너무 적은 수의 샘플로는 분포를 정확하게 예측할 수 없기 때문이다. 샘플의 다양성을 유지해야 하는 이유는 특정 샘플에 가중치가 몰리게 되면 알고리즘이 제대로 동작하지 못하기 때문이다. 이를 위해 그림 1과 같은 resampling 단계를 거치게 된다.

본 논문에서는 로봇의 위치를 인식하는데 SMC방법이 사용되었다.

### 2.2 JPDA 필터[7]

JPDA(Joint Probabilistic Data Association)필터는 다중 장애물을 추적하기 위한 필터의 한 종류이다. 기존의 Multiple Hypothesis Tracker (MHT)[8]의 방법은 실시간으로 동작하기가 어렵기 때문에 JPDA 필터가 흔히 쓰인다.

JPDA 필터는 그림 2에 나타난 것 과 같은 validation matrix라고 불리는 행렬을 통해 장애물과 데이터 사이의 관계를 몇 가지 경우의 수로 나타내어 MHT에 비해 시간복잡도를 크게 줄일 수 있었다.

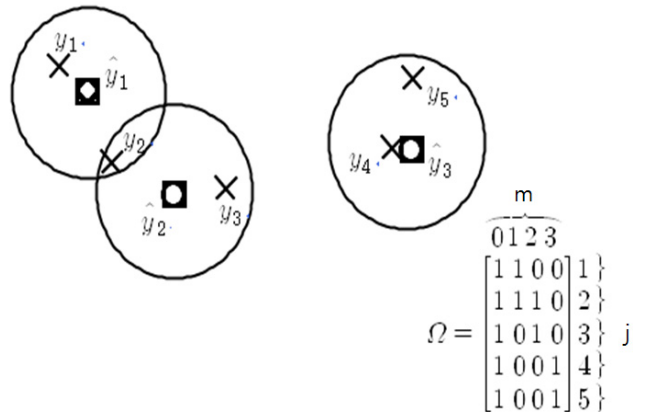


그림 2. JPDA 필터의 validation matrix

Fig. 2. The validation matrix of JPDA filter

먼저 측정값과 다중 장애물들 간의 관계를 결정하기 위해 validation matrix( $\Omega$ )를 다음과 같이 정의한다.

$$\Omega = [\omega_{jm}], j=1, \dots, J, m=0, 1, \dots, M \quad (3)$$

여기서  $J$ 는 측정값의 수,  $M$ 은 장애물의 수이다.  $\omega_{jm}$ 의 값은  $j$ 번째 측정값이  $m$ 번째 장애물로부터 발생했을 가능성이 있는 후보면 1, 아니면 0으로 결정한다. 0번째 장애물은 잡음을 의미한다.

다음으로 validation matrix로부터 발생 가능한 이벤트  $\chi$ 를 다음과 같은 규칙으로 생성한다.

- 1) 한 장애물로부터 하나의 측정값만 생성된다.
- 2) 한 측정값은 한 장애물로부터만 생성된다.

앞서 생성한 각 사건이 발생할 수 있는 사후확률은 다음과 같이 표현된다.

$$P(\chi|z_t) = P(\chi|J, z_{t-1})P(\widetilde{z}_{t,1}|\chi, J, z_{t-1})/c \quad (4)$$

(4)식 우변의 두 분포 중 두 번째 분포는 다음과 같이  $J$ 개의 측정값이 독립적인 가우시안의 분포라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\widetilde{z}_{t,1}|\chi, J, z_{t-1}) = \prod_{j=1}^J p(\widetilde{z}_{t,j}|\chi_{j,t_j}, z_{t-1}) \quad (5)$$

이 때

$$p(\widetilde{z}_{t,j}|\chi_{j,m_j}, z_{t-1}) = \begin{cases} \mathcal{N}(\widetilde{z}_{t,j}; 0, S_t) & m_j \neq 0 \\ V^{-1} & m_j = 0 \end{cases} \quad (6)$$

(4)식 우변의 두 분포 중 첫 번째 분포는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p(\chi|J, z_{t-1}) = \frac{\phi!}{J!} \prod P_D^m \prod (1 - P_D^m) \frac{e^{-CV}(CV)^\phi}{\phi!} \quad (7)$$

여기서  $\phi$ 는 장애물로부터 발생한 측정값의 수,  $P_D^m$ 는 장애물  $m$ 의 탐지확률,  $CV$ 는 포아송 분포의 매개변수로,  $C$ 는 잡음의 밀도,  $V$ 는 측정 가능한 영역의 넓이를 의미한다.

(6), (7)의 식을 (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 사후확률로 장애물의 상태가 표현된다[7].

$$P(\chi|z_t) = \frac{C^\phi}{c} \prod_{j:\tau_j=1} \frac{\exp(-\widetilde{z}_{t,j}' S_t^{-1} \widetilde{z}_{t,j} / 2)}{(2\pi)^{M/2} |S_t|^{1/2}} \prod_{m:\delta_m=1} P_D^m \prod_{m:\delta_m=0} (1 - P_D^m) \quad (8)$$

이 확률을 바탕으로  $j$ 번째 측정값이 장애물  $m$ 으로부터 발생하였을 확률  $\beta_{j,m}$ 을 다음과 같이 구한다.

$$\beta_{j,m} = \sum_{\chi} p(\chi|z_t) \omega_{jm}(\chi) \quad j = 1, \dots, J \quad (9)$$

$$m = 0, 1, \dots, M$$

$$\beta_{0,m} = 1 - \sum_{j=1}^J \beta_{j,m} \quad m = 0, 1, \dots, M \quad (10)$$

장애물  $m$ 의 상태는 확률  $\beta$ 의 가중 합을 통해 예측된다.

JPDA 필터는 기본적으로 선형-가우시안의 시스템에서만 사용할 수 있다는 단점이 있지만 시간복잡도나 정확도 등의 측면에서 좋은 성능을 보인다.

본 논문에서는 이동형 로봇의 주변 장애물을 추적하는데에 JPDA 필터가 사용되었다.

### 3. URG-04LX 레이저스캐너

본 논문의 작성을 위해 사용된 이동형 로봇은 HOKUYO사의 URG-04LX 레이저 스캐너를 장착하였다. URG-04LX 센서는 최대 5m 정도의 측정 범위를 갖는 레이저 스캐너이다. 실내형 이동로봇은 그 속도가 빠르지 않기 때문에 측정 범위가 넓을 필요가 없다. 또한 URG-04LX는 약 240° 정도의 넓은 시야각을 가지고 있어 실내형 이동 로봇에 사용되기에 적절하다. 센서는 그림 3에서 볼 수 있다.



그림 3. 레이저 스캐너  
Fig. 3. Laser scanner

## 4. 레이저스캐너를 이용한 위치인식과 장애물 추적

### 4.1 레이저 스캐너를 이용한 위치인식

레이저 스캐너는 한 번에 들어오는 측정치의 수가 매우 많고, 이에 따른 시간복잡도가 매우 크기 때문에 효율적으로 지도정보와 비교하는 일이 매우 중요하다. 본 논문에서는 지도정보를 grid의 형태로 표현한 뒤, SMC방법을 이용하여 시간복잡도의 문제를 해결하였다. 즉, 연속된 공간과 로봇의 위치를 각각 grid와 샘플의 형태로 나타내고 이들의 관계를 계산함으로써 로봇의 위치를 확률 분포로 표현하였다.

먼저 시간  $t-1$ 일 때, 로봇의 위치를 기준으로 시간  $t$ 에 로봇이 위치할 것으로 여겨지는 지역으로 샘플링을 하고, 그리고 각 샘플에서 지도 정보와 비교를 통해 측정값이 발생할 수 있는 지역과 실제 측정값이 발생한 지역을 비교하여 우도를 계산한다.

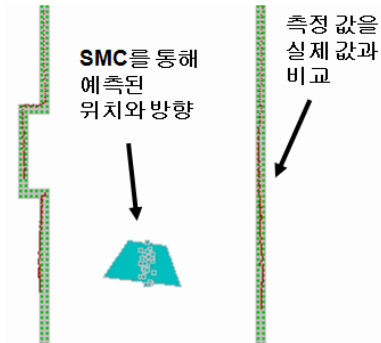


그림 4. 레이저 스캐너를 이용한 위치 인식  
Fig. 4. Location estimation using laser scanner

$$p(z_t|x_n) = \prod_{i=1}^{|z_t|} p(z_{t,i}|x_n) \quad (11)$$

그렇게 하면 이는 (2)의 식에서 각 샘플의 가중치를 계산하는데 사용되어 로봇의 위치를 예측하는 데 이용된다. 레이저 스캐너를 이용한 위치 인식 방법은 그림 4에 잘 나타나 있다.

### 4.2 레이저 스캐너를 이용한 장애물 추적

앞의 과정을 거쳐 로봇의 위치가 추정되었다면 지도상에 로봇의 위치를 나타내고 이를 바탕으로 레이저 스캐너의 측정값이 벽에 의해 발생하였는지 또는 장애물에 의해 발생하였는지 구분한다. 장애물에 의해 발생한 측정값의 집합은

다음과 같이 표현한다.

$$z_t^{(obstacle)} = z_t - z_t^{(wall)} \quad (12)$$

여기서  $z_t$ 는 시간  $t$ 에 발생한 측정값의 집합,  $z_t^{(wall)}$ 은 시간  $t$ 에 벽으로부터 발생한 측정값의 집합, 그리고  $z_t^{(obstacle)}$ 은 시간  $t$ 에 장애물로부터 발생한 측정값의 집합이다.

장애물로부터 발생한 측정값들만을 모아 KNN (K-Nearest Neighbor) 클러스터링을 적용하면 장애물의 위치를 결정한다. 여기서 구한 장애물의 추정위치를 JPDA 필터의 측정값으로 적용시키면 장애물과 이동 로봇의 상대적인 위치와 속도를 얻는다.

### 5. 실험 및 결과 고찰

5장에서는 제안한 위치 인식 및 장애물 추적 방법의 성능을 평가하고자 실제 이동 로봇에 레이저 스캐너를 장착하여 실험을 하였다. 이동 로봇 주변으로 돌아다니는 사람의 움직임을 추적했다. 실험은 로봇으로부터 먼 곳에서 다가오는 장애물부터 가까운 곳에서 점점 멀어지는 장애물까지 몇 가지 시나리오로 진행되었다.

#### 5.1 레이저 스캐너를 이용한 위치 인식

레이저 스캐너를 이용한 위치 인식 방법의 성능은 표2와 같이 나타났다. 시작 위치에서 어느 정도 시간 동안 자유롭게 돌아다니다가 다시 시작 위치로 다시 돌아왔을 때 로봇이 인식하고 있는 위치와 실제 위치의 차이를 반복하여 기록하였다. 이전[5]에 적외선 센서를 이용했던 위치 인식과 비교하여 연산시간이 약간 증가했지만 정확도에서는 더 나은 성능을 보였다.

표 2. 위치 인식 오차 비교

Table 2. Localization error comparison

$\Delta D$	인코더 정보	위치 인식 오차
평균	49.77cm	18.79cm
최소	38.50cm	5.33cm
최대	67.97cm	34.17cm

#### 5.2 레이저 스캐너를 이용한 장애물 추적

본 장에서는 레이저 스캐너를 이용한 장애물 추적의 성능을 검증하기 위한 실험을 진행하였다..

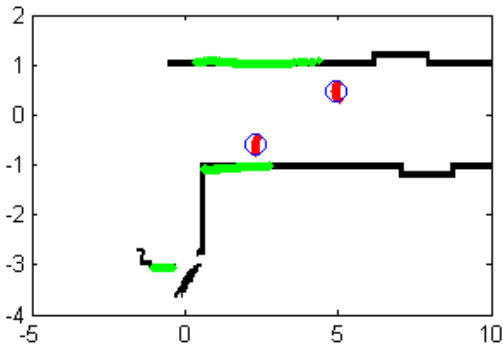


그림 5. 레이저 스캐너를 이용한 장애물의 인식  
Fig. 5. Obstacle detection using laser scanner

그림 6에서는 이동 로봇 주변에 움직이는 두 장애물에 대한 추적이 이루어졌다.  $\Delta$ 모양은 로봇의 현재 위치와 방향을 나타내고  $\circ$ 모양으로 장애물의 궤적이 표시되어 있다. 시간이 흐름에 따라 그림 6-(a)에서 그림 6-(b)로 변화하는 모습을 나타내고 있는데, 로봇을 기준으로 좌측 장애물은 로봇에 가까운 방향으로, 우측 장애물은 로봇에서 먼 방향으로 이동하는 모습을 보여준다.

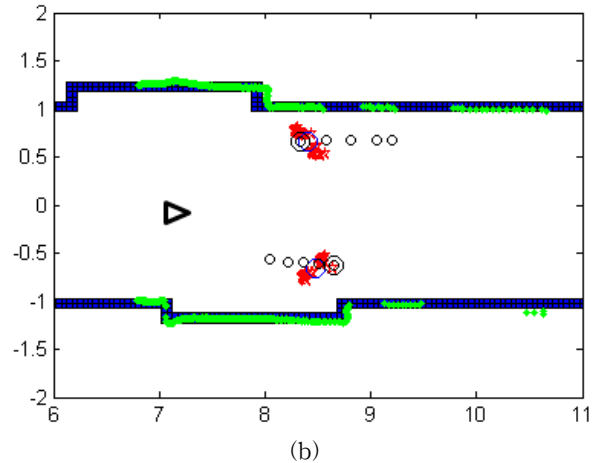
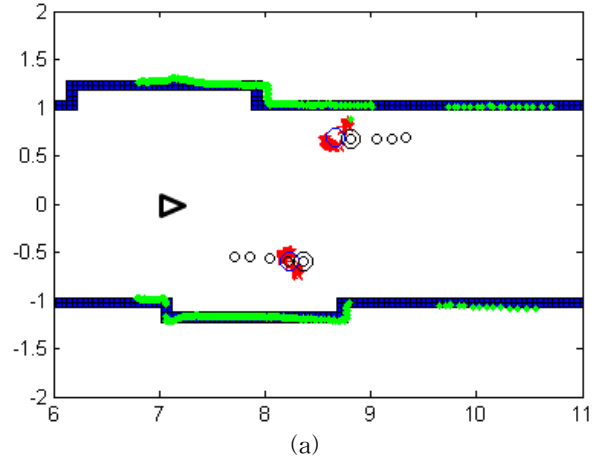


그림 6. 다중 장애물의 추적 실험  
Fig. 6. Multiple obstacle tracking experiments

장애물의 추적은 그림 7과 같은 상황에서 로봇이 빠른 시간 안에 효율적으로 목적지까지 도달하는 데 이용될 수 있다.

그림 7은 장애물이 인식되는 시점에 로봇의 전방에 장애물이 있어 계속 진행할 경우 충돌위험이 있는 상황에 대한 실험이다. 장애물의 인식기능만 있는 로봇의 경우 위와 같은 상황에 감속 및 정지 혹은 주행계획의 변경이 요구된다. 하지만 장애물의 움직임 추적을 통해 로봇이 장애물이 있는 위치에 도달할 즈음에는 이미 장애물이 주변으로 이동하여 이동 로봇과 충돌하지 않을 것을 예측하고 계속적인 주행을 하는 모습을 보였다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 실내형 이동로봇을 위한 레이저 스캐너를

이용한 위치 인식 및 장애물 추적 방법을 제안하였다. 먼저 SMC방법을 이용하여 레이저 스캐너의 측정값과 지도를 매칭하여 로봇의 위치를 인식하였고, 이를 바탕으로 장애물과 벽으로부터 측정된 값을 분류하였다. 장애물로부터 발생되었다고 추정되는 측정값들은 또 다시 JPDA필터를 통해 운동상태를 파악하였다. 실험을 통해 확인한 결과, 제안된 방법을 통해 인식된 로봇의 위치는 20cm이내의 적은 오차를 나타내었고, 다중 장애물의 운동 상태 추적도 좋은 성능을 보였다.

### 참 고 문 헌

- [1] Bahl, P., Padmanabhan, V.N., "RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system," In *Proc. of INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol.2 pp. 775-784, 2000.
- [2] Dongheui Lee, Woojin Chung, Munsang Kim, "A reliable position estimation method of the service robot by map matching," In *Proc. of Robotics and Automation, ICRA '03. IEEE International Conference*, vol.2, pp. 2830-2835, 2003.
- [3] Labayrade, R., Aubert, D., Tarel, J.-P., "Real time obstacle detection in stereovision on non flat road geometry through "v-disparity" representation," In *Proc. of Intelligent Vehicle Symposium. IEEE*, vol.2, pp. 646-651, 2002.
- [4] Hancock, J., Hebert, M., Thorpe, C., "Laser intensity-based obstacle detection," In *Proc. of Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on*, vol.3, pp. 1541-1546, 1998.
- [5] 최배훈, 김범성, 김은태, "실내형 이동로봇을 위한 적외선 센서를 이용한 위치인식과 레이저 스캐너를 이용한 장애물 인식," *한국 지능시스템 학회 2011년도 춘계학술대회 학술발표 논문집*, 제21권, 1호, pp. 51-52, 경기도, 2011년 4월.
- [6] M. S. Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon, T. Clapp, "A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian bayesian tracking," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 2, pp. 174-188, February 2002.
- [7] T. E. Fortmann, Y. Bar-shalom, M.Scheffe, "Sonar Tracking of Multiple Targets Using Joint Probabilistic Data Association," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 173-184, July 1983.
- [8] D. B. Reid, "An algorithm for tracking multiple targets," *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 24, no. 6, pp. 843-854, December 1979.

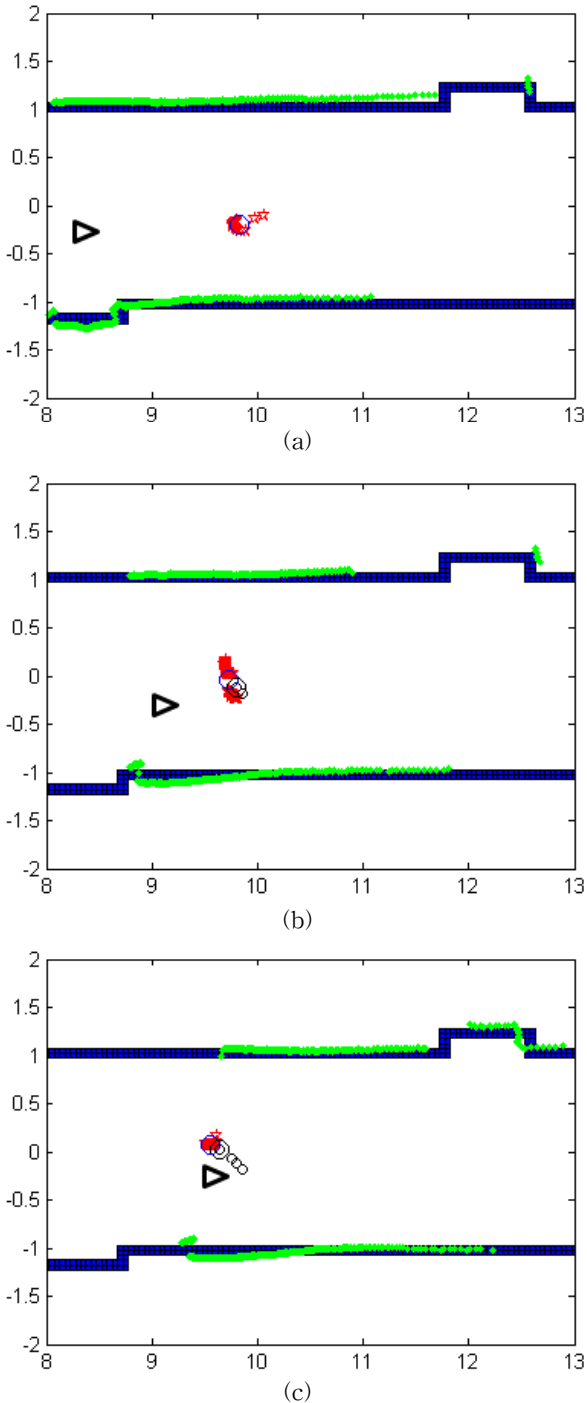


그림 7. 충돌 위험이 있는 장애물의 추적 실험

Fig. 7. Obstacle tracking experiment with collision risk

저 자 소 개



**최배훈(Baehoon Choi)**  
2010년 : 연세대학교 전기전자공학부 졸업 (공학사)  
2010년~현재 : 동 대학원 전기전자공학과 석박사통합과정

관심분야 : State Estimation, Computational Intelligence, Machine Learning, Intelligent vehicle system.  
E-mail : choibae@yonsei.ac.kr



**김범성(Beomseong Kim)**  
2009년 : 연세대학교 전기전자공학부 졸업 (공학사)  
2009년~현재 : 동 대학원 전기전자공학과 석박사통합과정

관심분야: Computational Intelligence, Intelligent vehicle system  
E-mail : battlebs@yonsei.ac.kr



**김은태 (Euntai Kim)**  
1992년 : 연세대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
1994년 : 연세대학교 전자공학과 석사과정 졸업(공학석사)  
1999년 : 연세대학교 전자공학과 박사과정 졸업(공학박사)  
1999년 3월~2002년 2월 : 국립한경대학교 제어계측공학과 조교수

2002년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 교수  
2003년 : University of Alberta, visiting researcher  
1998년~현재 : IEEE TFS, IEEE T SMC, IEEE T CAS, FSS 등에서 심의위원 활동 중  
2003년 : 대한 전자공학회 해동상 수상

관심분야 : Computational Intelligence, 지능형 로봇  
Phone : +82-2-2123-7729  
E-mail : etkim@yonsei.ac.kr