

## 초음파 응답 누적영상을 이용한 이동물체 추적

### Tracking of a Moving Target Using the Accumulated Ultrasonic Image

한 문 용, 한 현 수

(Moonyong Han, Hernsoo Hahn)

**Abstract** : To follow a moving target keeping a certain distance, it is essential for a mobile robot to detect the target first and to measure its pose and velocity. This paper proposes a new solution for this problem, using the accumulated ultrasonic image which is constructed by accumulating the returned ultrasonic signal along the time axis for a certain number of measurement periods. A moving target is separated by selecting the trajectory whose inclination is different from others in the image since the inclination of a trajectory represents the relative speed of the target against the mobile robot. The proposed algorithm was implemented on a mobile robot and has shown that the robot follows a moving target successfully.

**Keywords** : mobile robot, target tracking, ultrasonic sensor, ultrasonic image

#### I. 서론

지금까지 이동로봇은 일정한 공간에서 정해진 경로를 따라 반복적인 작업을 수행하는 것이 일반적인 임무였다. 하지만 이동로봇 Path-finder가 우주에서 주어진 임무를 자율적으로 수행하는 예에서 볼 수 있듯이, 임무수행에 있어서 최대한의 자율성을 갖는 이동로봇에 관한 관심이 최근 고조되고 있다. 자율적인 이동로봇에 관한 연구는 미지의 환경을 인식하여 작업환경에 관한 지도를 생성하거나 [1,2] 주어진 환경에서 충돌 없이 이동하는 [3,4] 알고리즘의 개발에 중점을 두고 진행하고 있다. 하지만 대부분의 알고리즘들은 이동로봇의 작업환경이 고정되어 있고 이동하는 물체가 없다는 가정 하에 개발되고 있기 때문에 보다 현실적이고 다양한 환경에 이동로봇이 적용하기 위해서는 이동하는 물체를 탐지하고 이를 추적할 수 있는 기능의 구현에 관한 연구가 필요하다.

이동물체의 탐지에는 많은 정보를 얻을 수 있는 이점으로 인해 일반적으로 카메라센서가 주로 사용되어 왔다. 카메라를 이용한 이동물체의 탐지는 optical flow 방법 [5]을 이용하는 것이 대부분이다. 이 방법은 현재의 카메라 영상과 전 영상에서 각 화소의 변화를 벡터로 표현하여 속도와 이동방향을 결정하는 방법이다. 따라서 현재 영상의 화소와 이전 영상의 화소 사이에 정합과정(matching)이 필요하다. 정합과정은 모든 화소에 대해 이루어지기 때문에 계산량이 많아지고 이에 따른 오차도 발생하게 된다. 또 다른 방법으로 2차원 영상의 차원 확대를 통한 이동물체를 검지하는 방법 [6]이 있다. 이 방법은 영상을 FIFO(First In First Out)에 저장하여 영상 데이터 처리를 시간축으로 확장시키는 것으로 이동물체를 주변 환경보다 밝은 하나의 점으로 한정하였기 때문에 이동로봇에 적용하기가 어렵다. 이와 같이 카메라를 사용한 방법들은 센서의 측정 범위가 넓다는 장점이 있지만 조명에 대한 민감성과 실제로 방법

을 적용하기 위한 전처리 과정이 많아 처리속도가 느려지는 단점을 갖는다.

이에 반하여 단순한 시스템과 짧은 처리시간을 장점으로 하는 초음파센서는 센서의 한정된 측정범위로 인해 이동로봇에서 주로 정지된 물체를 인식하는 목적으로 사용되어 왔다. Song [8]은 2조의 초음파센서를 이용하여 평면과의 거리 및 각도를 결정하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 물체를 평면이라 가정하고 각 센서에서 얻은 거리값의 차이로 기하학적인 도형을 만들어 평면과의 기울어진 정도와 거리를 찾아내는 방법이다. 또한 Sabatini [9]는 3조의 초음파센서를 이용하여 실린더 형태의 물체의 위치 및 크기를 알아내는 방법을 연구하였다. 이 방법은 물체가 실린더일 경우 초음파신호가 실린더의 법선 방향으로 반사되는 것을 이용하여 각기 다른 세 점에서 얻은 거리값을 이용하여 실린더의 위치 및 크기를 찾는 방법이다. Kleeman [10]은 2조의 초음파센서를 이용하여 물체의 간단한 형태 및 위치를 파악하는 연구를 하였다. 물체의 형태는 평면, 예지, 코너로 한정하였고 이 연구에서는 가상 이미지(virtual image)라는 개념을 도입하였다. 이것은 초음파신호가 물체에 반사되어 들어오는 것을 물체의 뒷편에서 직접 들어오는 것으로 가정하여 각 센서에서 얻은 거리값으로 기하학적인 도형을 만들어 도형의 형태로 물체를 구분하는 것이다. 이러한 정지물체인식에 관한 연구들은 장애물 회피에 주로 응용되었고 처리속도가 빠르다는 장점으로 카메라를 이용한 robot navigation [11]에 robot 가까이 움직이는 물체를 파악하는데 부분적으로 응용되고 있다.

본 논문에서는 초음파센서의 장점을 활용하여 빠른 시간에 이동물체를 탐지하고 이를 추적하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 초음파센서가 물체에서 반사되어오는 신호의 파형을 이용하여 물체의 위치를 결정하므로 이들 신호를 일정한 시간동안 누적하여 시간축과 측정 주기에 대한 2차원 영상(초음파 누적영상)으로 변환한 후 이동물체를 구분하는 방법을 구현하고 있다. 초음파 누적

영상에서 이동물체의 속도는 선분의 기울기로 얻어지므로 계산이 쉽고 선분의 흐름에서 이동물체의 다음 위치를 예측할 수 있어 초음파센서의 특성에서 오는 취약한 부분을 보완할 수가 있다. 또 센서에서 얻은 데이터를 FIFO에 저장하여 계산하기 때문에 매 샘플링 시간마다 물체를 탐지할 수 있어 실시간으로 작업을 수행할 수가 있다. 제안된 알고리즘은 Pan 기능을 가진 헤드에 2조의 초음파센서를 장착한 이동로봇을 이용하여 구현하였다. 이 시스템은 전체적인 환경정보를 얻기가 어렵다는 단점이 있지만 센서의 수를 최소한으로 줄임으로써 작업 수행 속도를 높일 수가 있고 헤드를 움직임으로써 초음파센서가 가지는 좁은 측정영역 문제를 해결하고 있다.

본 논문에서 이동물체는 측정공간에 한 개만 존재하고 등속도로 이동하며 이동로봇이 이동물체를 일정한 거리를 유지하며 추적하도록 하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 초음파 누적 영상 구성방법 및 이를 이용한 이동물체 탐지방법, 그리고 물체의 위치를 측정하는 방법을 설명하고, 3장에서는 이동로봇의 움직임을 모델링하여 원하는 위치로 이동하기 위한 제어기법을 설명한다. 이동물체를 추적하는 방법은 4장에서 설명하고 있으며 구현된 시스템을 이용한 실험결과는 5장에서 설명한다.

**II. 초음파 누적영상을 이용한 이동물체의 탐지**

본 논문에서 제안하는 초음파 누적 영상은 물체에서 반사되어오는 초음파신호의 시간축에 대한 파형을 일정한 시간동안 누적하여 시간축과 측정주기에 대한 2차원 영상(초음파 누적영상)으로 표현한 것이다. 초음파 누적영상에서 이동물체의 속도는 선분의 기울기로 얻어지며 선분의 꺾적에서 이동물체의 다음 위치를 예측할 수 있다.

**1. 초음파 누적영상을 이용한 이동물체의 탐지**

일 회의 측정주기동안 초음파센서에 수신된 신호를 센서의 측정범위를 감안하여 결정된 샘플링 간격  $\tau$  로  $n$  번 샘플링 한다. 샘플링되는 입력신호  $s(k)$ 는 물체의 유무를 표현하는 2진값으로 음속을  $c$ 라 하면  $k$ 번째 샘플링 순간에 측정된 물체까지의 거리  $d(k)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d(k) = \frac{c}{2} \tau s(k) \quad (k=1,2,3,\dots,n) \quad (1)$$

측정영역 안에 물체가 한 개이면  $s(k)$ 가 1이 되는  $k$ 는 특정한 한 값이 되나 여러 개 존재할 경우에는 그림 1과 같이 여러 개의 값을 갖는다. 이 경우 어느 물체가 장애물이고 어느 물체가 이동하는 물체인지는 한 번의 샘플링으로 얻은 데이터만으로는 판단할 수 없다. 초음파 누적영상은 그림 1에서 보는 바와 같이 1회의 측정주기동안 얻어지는  $n$ 개의 샘플링된 데이터 값을  $m$ 회의 측정주기동안 누적하여  $n \times m$  행렬의 영상으로 표현한 것이다. 초음파 누적영상은 매 측정주기마다 새로운 정보가 가장 먼저 측정된 정보를 밀어내는 FIFO 버퍼에 저장된다.

그림 1에서  $i$ 번째 측정주기의  $k$ 번째 샘플링된 점에 해당하는 데이터 값은  $s_i(k)$ 로 표현한다. 따라서 영상에서 검은 화소는  $s_i(k)=1$ 인 점으로 물체가 존재는 위치를 나타내고

하얀 화소는  $s_i(k)=0$  인 점으로 물체가 존재하지 않는 영역을 보여준다. 여기에서 초음파 누적영상은 이동로봇이 등속도로 직선운동을 하면서 측정하는 것으로 가정하고 있다. 실제 상황에서는 이동로봇의 속도가 가변적이고 임의의 방향으로 이동하는 경우가 발생하므로 초음파 누적영상은 가장 최근에 측정된  $s(k)$ 를 기준으로 새로운 측정주기마다 재구성한다. 즉 이전 측정주기를 기준으로 이동로봇이  $\alpha$ 만큼 회전하여 새로운 측정을 하였다면 이전에 입력된 영상들은 그 만큼 오른쪽으로 shift된다.

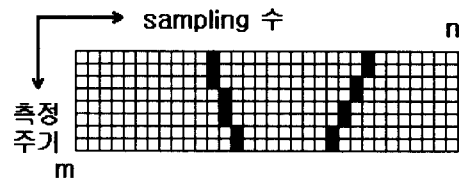


그림 1. 초음파 누적영상.  
Fig. 1. Accumulated ultrasonic image.

이와 같이 구성된 초음파 누적영상은 측정물체의 이동성 여부와 거리, 그리고 위치 등 다양한 정보를 포함한다. 물체의 이동성 여부는 초음파 누적영상에 나타나는 직선들의 기울기를 이용하여 판단할 수 있다. 따라서 초음파영상에 포함되는 선분들에 대해 (2)를 이용하여 직선들의 기울기( $\alpha_j$ )를 구한다.

$$\alpha_j = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서  $\Delta d$ 는 샘플링축의 변화율을,  $\Delta t$ 는 측정주기축의 변화율을 각각 픽셀 단위로 계산한 것이다. 즉  $\alpha_j$ 는 측정물체의 이동로봇에 대한 상대속도(단위시간당 이동거리)를 나타내며 이를 다음의 (3)을 이용하여 실제계 좌표계의 속도로 변환할 수 있다.

$$v = \frac{c}{2} \tau \frac{\alpha_j}{\sigma} = \frac{c}{2} \tau \frac{\Delta d}{\sigma \Delta t} \quad (3)$$

위의 식에서  $\tau$ 는 단위 화소를 sampling하는데 걸리는 시간이고  $\sigma$ 는 초음파 누적영상의 한 라인을 얻는데 걸리는 시간이다. 이동로봇의 속도를  $v_m$ 이라고 할 경우 물체의 실제속도  $v_o$ 는 (4)로 계산된다.

$$v_o = v + v_m \quad (4)$$

따라서 측정물체의 실제속도  $v_o$ 가 0인 것은 정지된 물체이고 그렇지 않으면 이동하는 물체로 판단한다.

**2. 초음파영상의 전처리과정**

실제로 얻어지는 초음파영상은 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 상당한 잡음이 포함되어 있고 측정면의 특성에 따라 초음파영상에서 물체의 위치가 선명하게 표현되지 못하는 경우가 존재한다. 따라서 위에서 제시한 알고리즘의 적용을 위해서는 초음파 누적영상에 대해 두 단계의 전처리 과정을 필요로 한다.

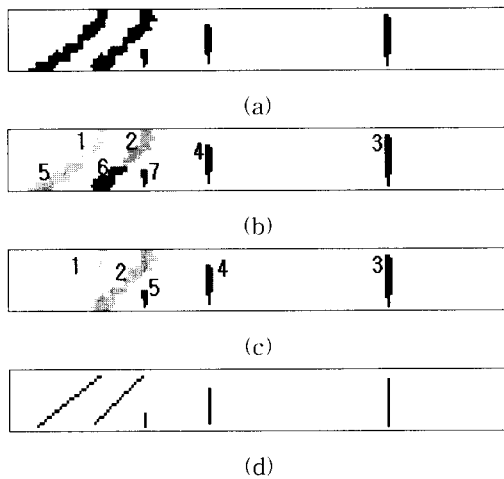


그림 2. 영역 분리 및 선분 추출. (a) 초음파 누적영상, (b) 1차 pass 결과, (c) 2차 pass 결과, (d) 각 영역별 line 검출.

Fig. 2. Region separation and extraction of line trajectory. (a) Accumulated ultrasonic image, (b) Result of the first pass, (c) Result of the second pass, (d) Detection of line trajectory.

2.1 영역 분리 단계

초음파영상에서 궤적을 이루는 영역을 구분하여 피 측정 물체를 각기 분리하기 위해 영상을 두 번 검색하는 방법(two pass 방법)을 사용한다. 이 방법은 각 화소마다 위와 왼편 두 개의 이웃하는 화소에 대해 같은 label값을 줌으로써 영역을 분리하는 방법이다. 구체적인 과정은 다음과 같다.

1) 각 화소에 대해 label을 저장하는 label array와 tag array를 만들고 이들을 초기화한다.

$$label[i,j] = 0 \ (i=1,\dots,m; j=1,\dots,n), \ t[l] = 1 \ (l=0,\dots,p-1)$$

위 식에서 p는 초음파영상에 나타날 수 있는 물체의 수로 임의의 크기 값을 갖는다.

2) 1차 pass에서 각 행에 대해 한 화소씩 이동하며 화소값이 0이면 label값은 변하지 않고 화소값이 1인 경우 label값은 위와 왼쪽 화소에 따라 다음과 같이 결정된다.

- ① if ( label[i-1,j] = label[i,j-1] = 0 ) then  
k=k+1, label[i,j] = t[k]
- ② if ( label[i-1,j] = 1 or label[i,j-1] = 1 ) then  
if ( label[i,j-1] = 1 ) then  
label[i,j] = label[i-1,j]  
if ( label[i-1,j] = 1 ) then  
label[i,j] = label[i,j-1]
- ③ if (label[i-1,j] = label[i,j-1] = 1 ) then  
if ( label[i-1,j] = label[i,j-1] ) then  
label[i,j] = label[i,j-1]  
if ( label[i-1,j] ≠ label[i,j-1] ) then  
label[i,j] = label[i,j-1], t[label[i,j-1]] = label[i-1,j]

이렇게 하면 같은 영역내의 화소들은 같은 index값을 갖거나 다른 index값을 갖더라도 그 값이 한 영역 내에 있다는 것을 알려준다.

3) 첫 번째 pass가 끝나면 tag array를 정리한다. 이는 같은 영역 내에 있는 tag값이 변경된 것들을 찾아 같은 값으로 바꾸는 것이다. 만약 t[7] = 5, t[5] = 2, t[2] = 2 라면 t[7] = t[5] = t[2]로 하는 것이다.

4) 정리된 tag array를 이용하여 label array값을 정리하여 영역을 분리한다.

$$label[i,j]=t[label[i,j]]$$

여기서 label array는 영상에서의 index값으로 같은 영역에 있는 pixel들은 같은 label값을 갖는다. 또 tag array는 2차 pass때 사용하는 값으로 1차 pass때 같은 영역 내에 다른 label값을 갖는 pixel들이 실제로 같은 label이라는 것을 표시해 주기 위해 사용하는 값이다. 그림 2(b)는 (a)의 입력영상에 대해 1차 pass를 마친 후의 label[i,j]영상을, 그림 2(c)는 2차 pass를 마친 후 영역별로 분리된 결과를 보여준다. 그림 2(b)에서의 번호는 1차 pass 후 구분된 영역을 나타낸 것이고, 그림 2(c)에서의 번호는 2차 pass 후 구분된 영역을 나타낸 것이다. 결과를 보면 1차 pass에서 연결된 영역 1과 5, 2와 6이 2차 pass 후 하나의 영역으로 나타나는 것을 볼 수 있다.

2.2 궤적 검출

초음파센서의 특성상 물체는 하나의 점으로 표시되지 않으므로 제안된 알고리즘의 적용을 위해서는 세선화작업이 필요하다. 초음파센서의 응답값은 가장 먼저 반사되는 위치를 물체의 위치로 판단하게 되므로 초음파 영상에서 거리값이 최소가 되는 점과 최대가 되는 점을 이어 기울기를 정하고 line이 끝나는 좌표를 한 점으로 하는 직선을 만든다.

1) 분리된 영역을 scanning하여 거리가 최대인 좌표 (max<sub>x</sub>, max<sub>y</sub>)와 최소인 좌표 (min<sub>x</sub>, min<sub>y</sub>), 시작점(s<sub>x</sub>, s<sub>y</sub>), 끝점(e<sub>x</sub>, e<sub>y</sub>)를 구한다.

2) 최대점과 최소점을 이용하여 영역의 근사된 기울기를 구한다.

$$m = \frac{\max_x - \min_x}{\max_y - \min_y} \tag{5}$$

3) 끝점(e<sub>x</sub>, e<sub>y</sub>)을 지나고 기울기 m을 갖는 직선의 방정식을 구해 영역을 line으로 근사화 한다.

$$y = m(x - e_x) + e_y \tag{6}$$

그림 2(c)의 영역 분리된 영상에서 검출한 궤적이 그림 2(d)에 주어졌다. 영역별로 구분된 물체들의 이동로봇에 대한 상대속도와 거리를 (1)과 (3)에 의해 구하고 각 영역의 물체들이 이동물체 여부를 판단한다.

3. 이동물체의 위치 결정

이동물체의 위치를 결정하기 위해서는 두 쌍의 초음파 센서들이 제공하는 두 개의 초음파영상에서 가장 최근의

측정값을 이용한다. 초음파 누적영상에서 이동물체로 판명되는 물체의 위치는 두 개의 거리값을 이용하여 물체를 위치를 결정한다. 이때 이동하는 물체는 일정한 형태를 가지고 있고, 그 크기가 1m×1m 이내인 물체로 제한하여 원통으로 근사화 한다.

실린더의 경우 거리가 멀어지게 되면 물체를 점으로 근사화 할 수가 있다. 그러므로 물체의 위치는 그림 3과 같이 삼각측량법에 의해 구한다[9]. 좌, 우 각각의 센서에서 얻은 거리 값  $l_1$  과  $l_2$  는 로봇의 중심 O로부터 센서까지의 거리 D와 실린더의 위치 (x, y)의 함수로 표현된다.

$$l_1^2 = (D+x)^2 + y^2 \tag{7}$$

$$l_2^2 = (D-x)^2 + y^2 \tag{8}$$

위 식을 정리하면 물체의 좌표 x, y와 각도  $\theta$ 는 다음의 식들에 의해 결정된다.

$$x = \frac{l_1^2 - l_2^2}{4D} \tag{9}$$

$$y = \sqrt{l_1^2 - (D+x)^2} = \sqrt{l_2^2 - (D-x)^2} \tag{10}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right) \tag{11}$$

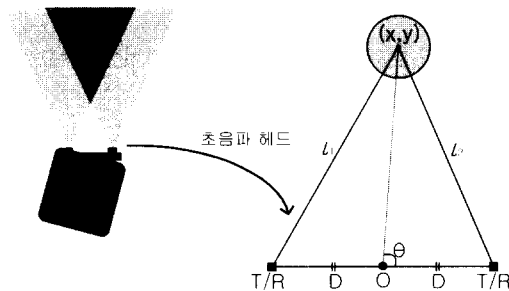


그림 3. 실린더 측정법.  
Fig. 3. Cylinder measurement method.

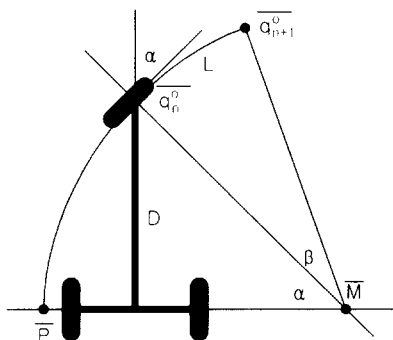


그림 4. 이동로봇의 기구학적 모델링.  
Fig. 4. Kinematic mode of the mobile robot.

이동물체를 검지하면 물체를 실린더 측정법으로 위치를

알아낸다. 이때 사용하는 센서데이터는 이동물체로 구분된 각 센서의 라인중 맨 마지막 열의 거리값이 된다.

### III. 이동로봇의 모델링

본 논문에서 사용하는 이동로봇은 그림 4와 같이 구동과 조향을 담당하는 하나의 앞쪽 바퀴와 단순한 지지역할을 담당하는 두 개의 뒤쪽 바퀴(캐스터)로 구성되어 있다. 이동로봇에는 조향하고자 하는 각도  $\alpha$ 와 이동거리 L, 혹은 이동하고자 하는 위치((x, y) 좌표)가 입력이 될 수 있으며 이에 대한 이동위치 혹은 조향각도  $\alpha$ 와 이동거리 L이 출력으로 나타난다. 다음의 그림 4는 이동로봇의 기구학적 모델을 설명한다.

#### 1. 조향각도와 거리값에 의한 이동 위치 계산

이동로봇의 움직임은 조향바퀴의 수직선분과 보조바퀴축의 연장선이 만나는 점  $\overline{M}$ 을 중심으로 원 운동을 하는 것으로 해석할 수 있다[7]. 로봇이  $\alpha$ 만큼의 조향각도를 가질 경우 회전반경 r은 (12)과 같이 표현된다.

$$r = \frac{D}{\sin \alpha} \tag{12}$$

또, 이동로봇의 회전 각도는  $\beta$ 는 (13)과 같이 얻어진다.

$$\beta = \frac{360}{2\pi r} l \tag{13}$$

그림 4에서  $\overline{q_n^0}$ 는  $\overline{M}$ 을 기준좌표계로  $\overline{P}$ 를  $\alpha$ 만큼 회전한 점이고,  $\overline{q_{n+1}^0}$ 는  $\overline{M}$ 을 기준좌표계로  $\overline{P}$ 를  $\alpha + \beta$ 만큼 회전한 점이다. 이동로봇을  $\alpha$ 만큼 회전시키는 회전행렬을  $R(\alpha)$ ,  $\alpha + \beta$ 만큼 회전시키는 회전행렬을  $R(\alpha + \beta)$ 라 할 때,  $\overline{q_n^0}$  좌표계를 중심으로 한  $\overline{q_{n+1}^0}$ 은 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\overline{q_{n+1}^0} = R(\alpha + \beta) R(\alpha)^{-1} \overline{P} \tag{14}$$

#### 2. 위치 이동을 위한 입력값 계산

로봇의 현 위치  $\overline{q_n^0}$ 과 이동할 위치  $\overline{q_{n+1}^0}$ 의 회전중심  $\overline{M}$  사이에는 (15)가 성립한다.

$$|\overline{q_n^0} - \overline{M}| = |\overline{q_{n+1}^0} - \overline{M}| = r \tag{15}$$

(15)에서 구한 r값을 (12)에 대입하여 조향각도  $\alpha$ 를 구할 수 있다.

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{D}{r} \right) \tag{16}$$

그리고 세 점  $\overline{q_n^0}$ ,  $\overline{q_{n+1}^0}$ ,  $\overline{M}$ 이 이루는 삼각형에서 (17)을 얻는다.

$$\sin \left( \frac{\beta}{2} \right) = \frac{|\overline{q_n^0} - \overline{q_{n+1}^0}|}{2r} \tag{17}$$

이  $\beta$ 값을 (13)에 대입하여 이동로봇의 이동거리 l을 구

한다.

$$l = \frac{2\pi r}{360} \beta \quad (18)$$

**IV. 이동물체의 추적 및 예측**

**1. 이동물체 추적**

이동물체를 추적하기 위해서는 추적하려는 물체가 측정 범위 안에 유지하는 것이 가장 중요한 일이다. 초음파센서는 30° 범위의 측정각을 가지고 있으며 약 3m의 측정거리를 가지고 있다고 가정하면 센서의 측정범위는 반지름이 3m이고 내각이 30° 인 부채꼴이 된다. 이동물체의 추적은 측정물체가 부채꼴의 중앙에 놓이도록 센서축의 방향을 조정한다. 즉, 초음파 센서축의 현재 각도를  $\Omega(k)$ 라 하고 측정된 물체와의 각도가  $\theta(k)$ 일 때 다음 측정을 위한 센서축의 각도  $\Omega(k+1)$ 는 다음의 (19)에 의해 결정된다.

$$\Omega(k+1) = \Omega(k) + (90 - \theta(k)) \quad (19)$$

(9)와 (10)에서 구한 이동물체의 위치는 초음파센서의 축을 기준으로 한 위치이기 때문에 실제 이동로봇을 기준으로 한 위치를 계산하기 위해서는 초음파 헤드의 각도  $\Omega(k)$ 만큼 회전하여 구한다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Omega(k) & -\sin \Omega(k) \\ \sin \Omega(k) & \cos \Omega(k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (20)$$

(20)에서  $x', y'$ 는 이동로봇을 기준으로 한 이동물체의 좌표값이고 이들은 (21), (22)에 의해 거리  $d$ 와 조향각도  $\alpha$ 로 변환된다.

$$d = \sqrt{x'^2 + y'^2} \quad (21)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{x'}{y'}\right) \quad (22)$$

(21)에서 계산된  $d$ 를 이용하여 이동로봇의 속도를 결정한다.

$$V = V_{\max} \left( \frac{d'}{d_{\max}} \right) \quad (23)$$

$$d' = \min(d, d_{\max}) \quad (24)$$

(23)에서  $v_{\max}$ 는 이동로봇의 최대 속도이고,  $d_{\max}$ 는 간격을 유지하기 위한 이동물체와 최대 거리이다. 여기서  $d$ 는 로봇과 물체사이의 실제 거리이고  $d'$ 는 일정간격을 유지하기 위한 거리이다.

이렇게 구한 로봇의 이동속도  $V$ 와 조향각도  $\alpha$  값을 로봇에 전달하여 이동물체를 추적하게 한다.

**2. 이동물체의 위치 예측**

실제로 이동물체를 추적할 때, 이동하는 물체가 측정범위 안에 놓이지 않는 경우가 존재하며 혹은 측정범위 안에 존재하더라도 초음파 신호의 거울반사 특성으로 인해 측

정이 불가능한 경우가 발생한다. 이러한 이유들로 이동물체의 위치를 예측하는데 예측하는 방법은 두 가지가 있다. 그 하나는 이동물체가 측정범위 내에 있도록 다음 위치를 예측하는 방법이고 다른 하나는 이동물체의 위치를 측정하지 못한 경우 다음 위치를 예측하여 이동물체를 다시 측정범위 안에 들어오도록 하는 것이다.

**2.1 이동물체가 측정범위 내에 있도록 하기 위한 예측**

이동하는 물체에 대해 초음파센서의 visibility를 유지하는 일은 매회 측정된 물체의 위치만 참고해서는 불가능하다. 이를 위해 이동물체의 궤적을 통해 다음 이동할 위치를 예측하는 것이 중요하다. 이동물체의 최대속도를 알고 이동물체가 급격히 변화하지 않는다고 가정할 경우 이동물체의 다음 위치를 최대속도를 반경으로 하는 부채꼴 모양의 영역을 구할 수 있다. 이렇게 구한 영역이 초음파센서의 측정 영역 안에 들어오도록 초음파센서를 미리 회전시켜 이동하는 물체가 초음파센서 측정 영역을 벗어나지 않도록 하는 것이다.

초음파센서는 지향각을 가지고 있어 부채꼴 모양의 측정영역을 가지고 있다. 물체의 위치를 측정하기 위해서는 그림 5에서 초음파 측정 영역이라고 표시된 영역처럼 2조의 초음파센서가 겹치는 영역 안에 물체가 위치해야만 한다. 그림 5와 같이 측정주기  $m$ 회 동안 측정된 이동물체의 위치를 world 좌표계로 변환 후 이동한 궤적을 방향 벡터로 표시한다. 이동물체의 최대속도를  $v_r$ 라 할 때, 이동물체의 현재 좌표  $q_k$ 에서 이동방향으로 반경  $|v_r|$ 와 일정각도  $\theta_{\max}$ 를 갖는 부채꼴을 형성한다. 그러면 이동물체의 다음 좌표  $q_{k+1}$ 은 이 부채꼴 영역 안에 있게 된다. 이동물체의 현재 좌표  $q_k$ 로부터 영역 외각까지의 최소 거리를  $d_k$ 라 할 때, 이동물체가 영역을 벗어나는 시간  $t_{esc}$ 는  $d_k/|v_r|$ 보다 작다. 이 시간  $t_{esc}$ 를 최소화하도록 초음파센서를 회전하여 이동물체가 측정 영역 내에 있도록 하는 것이다.

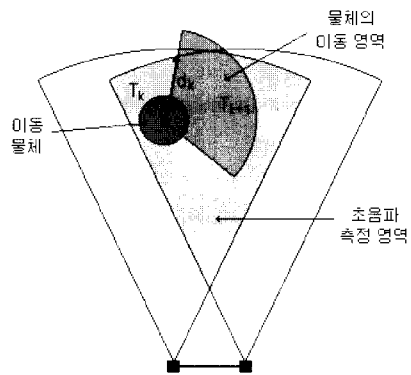


그림 5. 초음파센서의 측정 영역.  
Fig. 5. View field of a ultrasonic sensor.

**2.2 이동물체의 위치를 측정하지 못한 경우의 예측**

초음파센서에서 얻은 거리 데이터를 일정한 크기의 FIFO에 넣는다. 이 거리값들의 흐름을 통해 다음 거리값을 예측하는데 방법은 각 거리값들의 편차의 평균값을 마

지막 거리값과 합하여 얻는 방법을 사용한다. (25)에 거리값 예측을 표현하였다.

$$d^* = d_n + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \Delta d_k \quad (25)$$

(25)에서 n은 FIFO의 크기를 나타내고, d\*는 예측한 거리값이다. (25)에서 얻은 예측값을 가지고 현재 거리값을 보정하는데 현재 거리값과 예측한 값의 차이가 작으면 현재 값을 사용하고 차이가 커지면 센서신호를 얻지 못한 것으로 판단하여 예측한 값을 사용한다.

$$d = \begin{cases} d_m & |d_m - d^*| < \epsilon \\ d^* & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

(26)에서 dm은 측정된 값, ε은 허용 오차값이다.

### V. 실험

본 논문에서 제안한 초음파 누적영상을 이용하여 이동하는 물체와 장애물을 구분한 후 FIFO에 저장된 거리값으로 현재 거리값을 예측한다. 이 예측한 값과 실제 거리값을 비교하여 값 차이가 클 경우 예측한 값을 작을 경우 실제 값을 FIFO에 저장한다. 그리고 이 값으로부터 물체의 위치를 계산. 로봇을 이동하게 된다. 또 예측한 값으로 위치추정을 할 경우 에러 값을 증가시켜 한계값 이상인 경우에는 다시 처음으로 돌아가 이동물체를 구분한다.

#### 1. 알고리즘 검증을 위한 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 이동물체 검지 및 추적 기법을 먼저 모의실험을 통해 성능을 분석하였다. 이동로봇이 작업하는 환경은 다면체와 실린더로 한정한다. 작업공간은 12m×8m의 크기로 설정하였다. 이동물체는 60~90cm/s의 속도를 갖는 지름이 40cm인 실린더로, 이동로봇은 크기가 25cm×30cm이고 바퀴의 지름은 8cm인 직육면체로 설정하였고 작업환경 내에서는 이동물체는 40cm의 지름을 갖는 원으로 이동로봇은 30cm의 지름을 갖는 원으로 표현한다. 이 모의실험에서 초음파센서에서 얻는 데이터는 초음파센서의 물리적 특성을 모델링하여 얻었고[12], 주위 환경은 solid modelling 기법을 이용하여 표현하였다[13]. 모델링한 초음파센서는 40°의 지향각과 3m의 측정범위를 갖는다. 그리고 이동로봇은 100ms마다 샘플링하여 이동할 경로를 결정하게 한다.

이동로봇이 주행할 환경은 그림 6에서처럼 임의로 장애물을 만들고 물체를 임의의 궤적을 따라 이동하게 만들어 이동로봇이 이동물체 추적을 수행할 수 있게 하였다. 그리고 각 작업마다 측정된 거리오차를 그림 6(c)와 그림 6(d)에서 그래프로 나타내었다. 그림 6(a)는 작업환경을 비교적 단순화하여 실험한 결과이다. 장애물들은 형태가 직육면체로 한정하였고, 장애물 사이의 폭은 1m이다. 이러한 환경에서 이동물체의 궤적이 회전이 적고 직진 주행이 많아 오차값이 적게 나왔다. 그림 6(b)는 그림 6(a)보다 좀더 복잡한 실내 환경 내에서 실험한 결과이다. 이 환경은 직육면체 뿐 아니라 실린더까지 포함되어 있고 이동물체의

움직임이 보다 활발하다. 이 결과 추적은 가능하였지만 측정 오차가 그림 6(a)의 결과보다는 약간 크다. 여기서 계산된 오차값은 실제 이동물체의 좌표와 초음파센서로부터 계산된 좌표의 거리차를 말하고 오차의 원인은 이동물체를 점으로 근사화하는 데서 발생한 오차이다. 실린더의 위치를 보다 정확히 측정하기 위해서는 실린더의 반지름을 고려해야 하는데 실제로는 그렇지 못하기 때문이다.

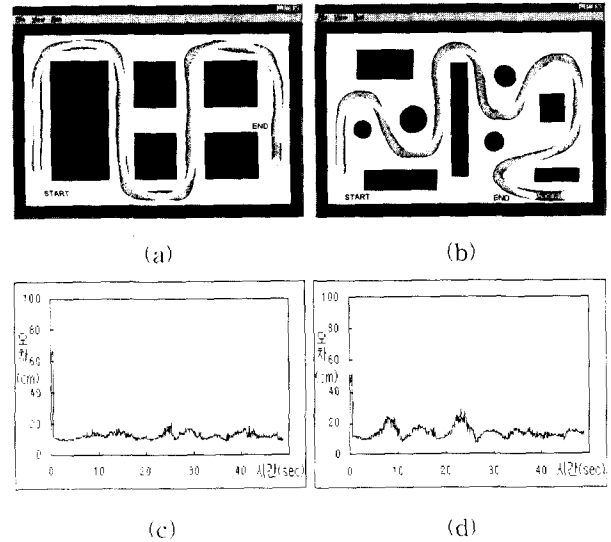


그림 6. 임의의 환경에 대한 시뮬레이션 결과. (a) 복도 환경, (b) 실내 환경, (c) (a)의 오차 그래프, (d) (b)의 오차 그래프.

Fig. 6. Simulation results performed on arbitrary environment. (a) Hallway environment, (b) Indoor environment, (c) Error graph of (a), (d) Error graph of (b).

이동로봇이 주행하다보면 장애물이 이동물체와 가까울 경우에는 충돌할 경우가 발생하게 된다. 이 경우는 이동로봇의 회전 방향에 있는 센서에서 이동물체까지의 거리와 장애물까지의 거리가 가까울 경우 조향각도를 반으로 줄여 장애물을 회피한다.

#### 2. 이동로봇의 구성

본 실험에서 사용하는 이동로봇 시스템은 그림 7(a)과 같이 초음파센서 구동 및 신호를 buffer에 저장하는 센서부, 모터구동 및 현재 이동로봇의 상태를 파악하는 모터제어부, 전체 시스템을 조정하는 주제어부로 구성되며 제작한 로봇은 그림 7(b)에 보여진다.

##### 2.1 주 제어부

주 제어부에서는 Pentium 75MHz CPU를 사용하여 구성하였고 시스템의 흐름을 총괄한다. 센서를 50ms 주기로 group씩 송신하여 센서부의 buffer에 있는 data를 받는다. 앞쪽 센서의 data는 2차원 FIFO에 저장하여 2차원 누적영상을 만들고, 양옆 센서의 data는 거리값으로 환산하여 저장한다. 앞쪽 센서에서 얻은 data는 이미지 처리를 통해 잡음 제거 및 선분 추출을 한다. 이 선분으로 이동 물체

를 검지 한 후 위치를 측정하여 모터 제어부에 이동속도 및 조향 각도, pan 각도를 전달한다.

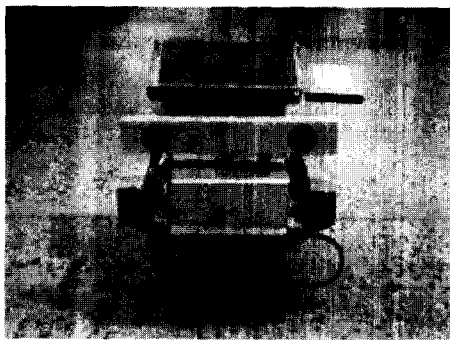
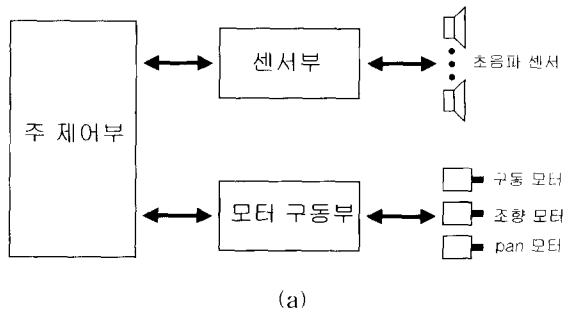


그림 7. (a) 이동로봇의 구성도, (b) 로봇의 외형.  
Fig. 7. (a) Construction of mobile robot, (b) Photo of mobile robot.

2.2 센서부

센서부에서는 총 6조의 초음파센서를 구동한다. 이동로봇 앞쪽에 부착된 초음파 센서는 하나의 센서로 송수신이 가능한 Polaroid 센서를 사용하고, 양옆에 부착된 센서는 송수신이 각각 분리되어 있는 Murata 센서를 사용한다. 초음파 신호는 crosstalk와 측정시간을 최소화하기 위하여 3조의 센서를 한 그룹으로 하여 두 번 측정하여 얻는다. 초음파 신호를 buffer에 저장하는 방식은 앞쪽 센서와 양옆 센서가 다르다. 앞쪽 센서의 신호를 저장하는 방식은 본 논문에서 제안한 알고리즘에 적용하기 위해 초음파 송신 후 20Khz의 주기로 50ms동안 buffer에 저장한다. 저장되는 데이터는 물체 검지 유무를 나타내는 1bit binary 데이터이다. 양옆에 센서에서는 단순히 벽과의 거리정보만이 필요하므로 초음파 신호를 송신한 후 물체에 반사되어 들어오는 시간만을 저장한다. 센서부의 모든 작업은 PLD칩을 사용하여 hardware로 구현하였다.

2.3 모터 제어부

모터 제어부에서는 구동 모터, 조향 모터, pan 모터를 제어하며 모든 모터는 DC 모터를 사용하였고, 속도 제어는 PWM방식을 이용하였다. 구동 모터는 전진만 하며 현재 이동로봇의 속도 및 이동거리를 측정하기 위해 encoder를 장착하였다. 조향 모터와 pan 모터는 방향전환이 가능하며 현재 조향 각도와 pan 각도를 알기 위해 potential

meter를 장착하였다. 모터 제어부에서 담당하는 역할은 주 제어부에서 이동 속도, 조향 각도, pan 각도에 대한 정보를 받아 일정 속도를 유지하고 조향과 pan을 하며 현재까지 이동한 거리와 현재 조향 각도, pan 각도를 주 제어부에 전달한다. 모터 제어부는 80c196kc Micro Controller를 이용하여 구현하였다.

3. 복도환경에서의 실험

앞 절에서 설명한 이동로봇을 이용하여 단순한 복도환경에서 2가지 형태의 실험을 수행하였다. 그림 8은 복도에 아무런 장애물이 없는 경우 이동로봇이 벽면을 장애물로 인식하고 이동물체를 추적하는 실험결과를, 그리고 그림 9는 몇 개의 장애물이 놓인 경우 이들을 고정된 물체로 인식하고 회피하면서 이동물체를 추적하는 실험결과를 보여

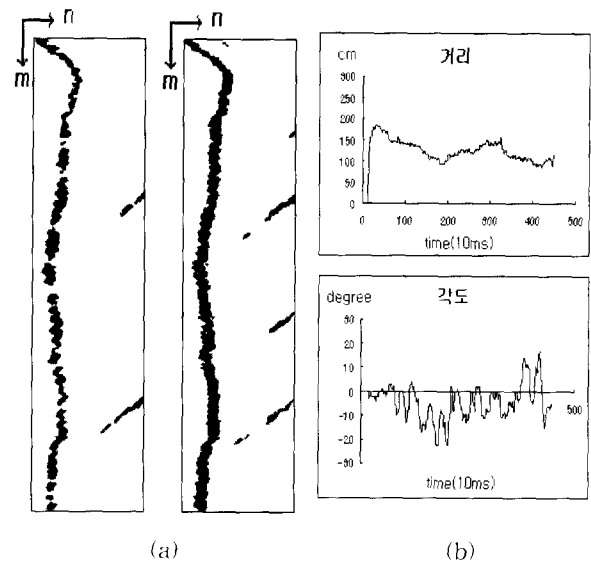


그림 8. 장애물이 없는 단순 복도에서의 이동물체 추적. (a) 좌,우측 초음파영상, (b) 이동물체의 거리 및 각도, (c) 이동물체와 이동로봇의 궤적.  
Fig. 8. Tracking of a moving target when there is no obstacles. (a) Left and right ultrasonic image, (b) Distance and angle of the moving target, (c) Trajectories of moving target and mobile robot.

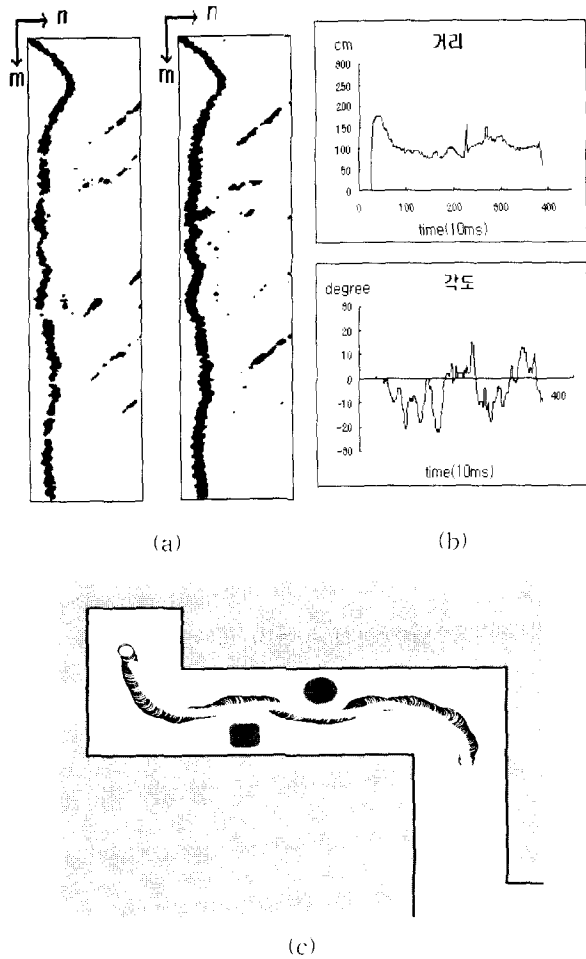


그림 9. 장애물이 놓인 복도에서 이동물체의 추적. (a) 좌,우측 초음파영상, (b) 이동물체의 거리 및 각도, (c) 이동물체와 이동로봇의 궤적.

Fig. 9. Tracking of a moving target when there are obstacles. (a) Left and right ultrasonic image, (b) Distance and angle of the moving target, (c) Trajectories of moving target and mobile robot.

준다. 각각의 그림에서 가장 왼쪽의 (a)그림은 좌우 초음파 센서에서 획득한 초음파 누적영상을 (b)그림은 초음파입력에서 20개의 sampling 데이터를 하나의 영상으로 구성하여 분석한 결과 중에서 이동물체의 이동로봇에 상대거리 및 위치의 변화를, 그리고 (c)그림은 검은 원으로 표현한 이동물체를 밝은 원으로 표현한 이동로봇이 추적하는 궤적을 보여준다.

각각의 그림 (a)에서 사선으로 나타난 부분이 고정된 물체의 영상이고 궤적을 이루는 부분이 이동물체의 영상이다. 이동물체의 영상에서 불연속 되는 점들은 순간적으로 이동물체가 센서의 측정범위를 벗어난 부부이고 이러한 부분에서 계산된 물체의 거리 및 위치는 그림 (b)에서는 순간적인 pulse 형태의 변화를 보이게 된다. 그림 (b)에서 이동물체의 위치 각도가 심하게 변하는 것은 초음파센서

가 panning하면서 측정할 값으로 매 sampling마다의 각도를 보여주기 때문이다. 실제 이동로봇에 대한 위치입력은 매 sampling 마다 주는 것이 아니라 거리와 각도를 동시에 고려하여 측정범위를 벗어나지 않는 범위에서 주고 있다.

위의 실험은 미리 정해진 궤적을 따라 이동물체를 이동시키면서 이동로봇이 추적하는 방법으로 반복적으로 수행하였다. 장애물의 경우는 이동로봇의 크기를 고려하여 다양하게 다른 위치에 놓으면서 실험을 수행하였다. 전체적으로 이동로봇이 이동물체를 놓치는 경우는 없었으며 장애물이 이동로봇의 크기에 비해 큰 경우에는 정확히 고정물체로 인식하고 피해갈 수 있음을 보였다. 단 이동물체는 난반사가 일어나지 않는 일정한 형태이어야 하고 이동속도가 일정 속도 이하로 움직여야 한다는 한계가 있다.

VI. 결론

초음파센서로부터 얻어진 정보를 이용하여 초음파 누적영상을 생성하고 이로부터 이동하는 물체와 정지한 물체를 분리하여 이동하는 물체의 방향 및 속도를 구할 수가 있었다. 그리고 실험을 통해 이동물체를 장애물과 구분하여 추적할 수 있다는 것을 보였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 계산식이 간단하여 실제 이동로봇에 구현하기가 용이하다. 하지만 초음파센서 시스템의 측정범위를 넓히고 안정성을 높이는 문제가 선결과제가 되고있다. 지금까지의 연구가 장애물회피에 중점을 두었으나 본 논문에서는 이동하는 물체의 추적을 위한 새로운 접근방법을 제시하고 있으며 초음파센서와 같이 국부적인 정보를 제공하는 센서만을 이용하여 추적이 가능함을 보였다. 아직은 이동물체가 한 개인 경우를 고려하여 시스템을 구성하였으나 추후에는 복수의 이동물체 중 원하는 하나만을 선택하여 추적하는 시스템의 개발을 계획하고 있으며 장애물을 보다 효과적으로 회피하기 위한 알고리즘의 보완이 필요하다.

참고문헌

- [1] L. Korba, "Variable aperture sonar for mobile robots", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3136-3141, 1994.
- [2] J. Leonard and H. Durrant Whyte, "Dynamic map building for an autonomous mobile robot", *IEEE Int. Jou. of Robotics Research*, vol. 11, no. 4, pp. 286-298, 1992.
- [3] Y. Koren and J. Borenstein, "The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278-288, 1991.
- [4] C. Gourley and M. Trivedi, "Sensor based obstacle avoidance and mapping for fast mobile robots", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1306-1311, 1997.
- [5] H. Ahang, Y. Gong, D. Patterson, and A. Kankanhalli, "Moving object detection, tracking and recognition", *Int. Conf. on Automation, Robotics and Computer Vision*, pp. 1990-1994, 1994.
- [6] G. Wang and R. Inigo, "Detection and tracking of



- single-pixel targets based on trajectory continuity", *Image and Vision Computing*, pp. 641-655, 1993.
- [7] Y. Wang, J. Linnett, and J. Roberts, "A unified approach to inverse and direct kinematics for four kinds of wheeled mobile robots and its applications", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3458-3465, 1996.
- [8] K. T. Song and C. Chang, "Ultrasonic sensor data fusion for environment recognition", *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems*, pp. 384-390, 1993.
- [9] A. Sabatini and O. Benedetto, "Towards a robust methodology for mobile robots localization using sonar", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3142-3147, 1994.
- [10] L. Kleeman and Roman Kuc, "Mobile robot sonar for target localization and classification", *Journal of Robotics Research*, vol. 14 no 4, pp. 295-318, 1995.
- [11] O. Akihisa, "Vision-based navigation by a mobile robot with obstacle avoidance using single-camera vision and ultrasonic sensing", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, pp. 969-978, 1998.
- [12] R. Kuc, "A physically based navigation strategy for sonar-guided vehicles", *Jour. of Robotics Research*, vol. 10 no. 2, pp. 75-87, 1991.
- [13] F. Tsuzuki and K. Sasaki, "Ultrasonic echo simulator for mobile robots", *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems*, pp. 979-985, 1993.



#### 한 문 용

1997년 숭실대 공과대학 전자공학과 졸업(공학사). 1999년 숭실대 전자공학과 졸업(공학석사). 1999년 3월 ~ 현재 숭실대학교 전자공학과 박사과정. 관심분야는 로봇제어, 로봇센서, 로봇

비전 등임

#### 한 현 수

제어·자동화·시스템공학 논문지 제1권, 제2호, 참조.