

전역 초음파 센서 시스템을 이용한 이동 로봇의 자기 위치 추정

Self-localization of a Mobile Robot Using Global Ultrasonic Sensor System

이 수 영, 진 재 호

(Soo-Yeong Yi and Jae-Ho Jin)

Abstract : A global ultrasonic sensor system for self-localization of a mobile robot is proposed in this paper. The global ultrasonic sensor system consists of three or more ultrasonic transmitters fixed at some positions in the world coordinate and receivers in the moving coordinate of a mobile robot. In this global sensor system, it is easy to get state vector of the mobile robot in the world coordinate from the distance information between each ultrasonic transmitter and receiver. An extended kalman filter algorithm is used to process the noisy ultrasonic signal and to estimate the state vector. In case of using several independent ultrasonic transmitters, it is necessary to avoid the cross talk among the ultrasonic waves and to synchronize between each ultrasonic transmitter and receiver. The small sized radio frequency modules are adopted to solve the cross talk and the synchronization problem. Computer simulation and experiments are carried out to verify the effectiveness of the proposed ultrasonic sensor system.

Keywords : global ultrasonic sensor system, self-localization, radio frequency module, extended kalman filter

I. 서론

이동 로봇의 자기 위치 추정이란 운동 공간상에서 로봇 자신이 어디에 놓여있는지, 그리고 어느 방향을 향하고 있는지를 알아내는 것을 말한다. 자기 위치 추정 기능은 주변 환경 인식과 경로 계획 및 주행 제어의 기반이 되므로, 이동 로봇의 자율 주행에 있어 가장 기본적인 요소라 할 수 있다[1]. 자기 위치 추정을 위해서는 로봇 자신과 주변 물체들 사이의 거리를 측정하는 거리 센서가 필요한데, 이러한 거리 센서로는 카메라 비전이나 레이저, 혹은 초음파 센서 등이 사용되고 있다[2]. 이들 중 특히 초음파 센서는 경제적이고, 비교적 측정 정밀도가 높으며, 신호 처리에 필요한 주변 회로가 간단하므로 근래 들어 많이 사용되고 있다[3].

초음파 거리 센서 신호 처리를 통한 이동 로봇 자기 위치 추정 방식은 다음과 같이 크게 두 부류로 나눌 수 있다:

(1) 반사파 패턴을 미리 알고 있는 물체(음향 표식점)를 전역 좌표계상의 몇 개 지점에 설치하고, 이동 로봇의 초음파 송수신 센서에 의해 이들이 감지되면 물체와 로봇과의 상대 거리를 측정하고, 이로부터 로봇의 절대 위치를 추정하는 방식[4][5].

(2) 정해진 표식점들을 미리 설치하지 않고 모서리, 벽, 원기둥등 주변 환경을 구성하는 일반 물체에 의한 초음파 센서 신호 패턴에 따라 로봇 주변의 국부 지도를 작성하고, 전역 좌표계상의 물체 배치 지도 데이터베이스와의 정합(matching)을 통하여 로봇의 절대 위치를 추정하는 방식[7][8].

첫 번째 방식을 위한 음향 표식점으로서 각기 지름이 다른 원기둥 형태의 물체를 이용하는 방식이 제안된 바 있으며[4][5], 보다 적극적으로 초음파 수신기를 사용하는 방식이 제안되기도 하였다[6]. 두 번째 방식은 로봇 주변의 환경에 미리 인위적인 조장을 가할 필요가 없이 그대로 유지, 이용한다는 점에서 첫 번째 것에 비해 진보된 방식이기는 하지만, 로봇 주변 국부 지도 작성과 전역 지도 데이터베이스와의 정합 과정에서 많은 계산 시간을 필요로 하며, 따라서 심각한 경우 주변 정보 획득을 위해 이동 로봇이 일시 정지해야 한다는 문제점이 있다.

한편, [9]에서는 기하학적 음향 표식점 대신에 초음파 발생기를 이동 공간에 설치하는 능동 초음파 방식이 제안되었는데, 반사파를 처리하는 다른 방식들과는 달리 초음파 발생기로부터 방사되는 직접파를 처리하므로 잡음에 강하고, 또한 국부 지도 작성이나 전역 지도 데이터베이스와의 정합 과정을 필요로 하지 않으므로 빠른 계산이 가능한 매우 실용적인 방식이다. 그러나 위에서 설명한 첫 번째 방식과 같이 각 초음파 발생기들과 이들과 연결된 제어기를 이동 로봇의 활동 공간에 설치하는데 따르는 부담이 있고, 이동 로봇에서는 초음파를 수신하기만 하므로 상황에 따라 각 초음파 발생기들을 제어할 수 없다는 문제점이 있다. 또한 초음파 발생기와 수신 센서 사이의 동기화가 단지 각각에 내제된 타이머에만 의존하므로 이것이 또 다른 오차 누적의 원인이 될 수 있다.

본 논문에서는 전술한 능동 초음파 센서 시스템에서의 문제점들을 보완하기 위해 간단한 라디오 주파수(RF: Radio Frequency) 무선 송, 수신 모듈이 부가된 초음파 센서와 이를 이용한 GPS(Global Positioning System) 구조의 전역 초음파 센서 시스템을 제안한다. 이동 로봇은 RF 송신 모듈을 통해 초음파 신호 발생 시점과 순서를 제어할 수 있으며,

논문접수 : 2002. 7. 15., 채택확정 : 2003. 1. 17.

이수영 : 전북대학교 전자정보공학부, 메카트로닉스 연구센터
(suylee@moak.chonbuk.ac.kr)

진재호 : 전북대학교 제어계측공학과(micro97@hanmail.net)

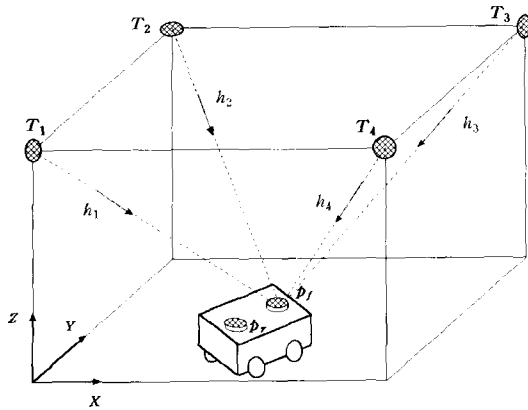


그림 1. 전역 초음파 센서 시스템.
Fig. 1. The global ultrasonic sensor system.

또한 초음파 송, 수신 센서간을 동기화할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 II장에서는 제안하는 전역 초음파 센서 시스템의 구성에 대해서 설명하고, III장에서는 본 시스템하에서 이동 로봇의 자기 위치 추정을 위한 확장 칼만 필터 알고리즘에 대해서 설명한다. 그리고 IV장에서 본 시스템의 효율성을 검증하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험 결과를 제시하고 V장에서 결론을 맺는다.

II. 전역 초음파 센서 시스템

1. 시스템 구성

다음 그림 1은 제안하는 전역 초음파 센서 시스템을 도식화한 것이다. 이동 로봇 운동 공간내의 정해진 위치에 초음파 발생기가 설치되어 있다. 초음파 발생기의 수는 최소 3개 이상이며, 초음파의 방향성과 도달 영역을 고려하여 필요에 따라 늘릴 수 있다. 여기서는 일단 그림과 같이 실내 공간의 천장 모서리에 4개의 초음파 발생기가 설치되어 있다고 가정한다. 그림에서 $T_i = [x_i, y_i, z_i]^T, i = 1, \dots, 4$ 는 초음파 발생기의 위치 벡터를 의미한다.

이동 로봇 상에는 그림 2와 같이 위치 및 방향 추정을 위해 두 개의 초음파 수신 센서를 이동 로봇 방향 직선 상의 위치, p_r 와 p_f 에 설치한다. 그림에서 θ 는 이동 로봇의 방향각을 의미하며, l 은 이동 로봇의 중심점과 초음파 수신 센서들 사이의 거리를 나타낸다. 위치 벡터, $p_f = [x_f, y_f, z_c]^T$ 와 $p_r = [x_r, y_r, z_c]^T$ 는 다음과 같이 주어진다:

$$p_f = \begin{bmatrix} x + l \cos \theta \\ y + l \sin \theta \\ z_c \end{bmatrix}, \quad p_r = \begin{bmatrix} x - l \cos \theta \\ y - l \sin \theta \\ z_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 이동 로봇의 운동 공간은 평면이라고 가정한다. 따라서 수신 초음파 센서 위치 벡터의 수직 성분, z_c 는 상수이다.

그림 1에서 알 수 있듯이 각 초음파 발생기의 위치, T_i 와 두 수신 센서의 위치, p_f 및 p_r 사이의 거리, $h_i, i = 1, \dots, 4$ 와 $h_i, 5, \dots, 8$ 를 안다면, 이들 데이터

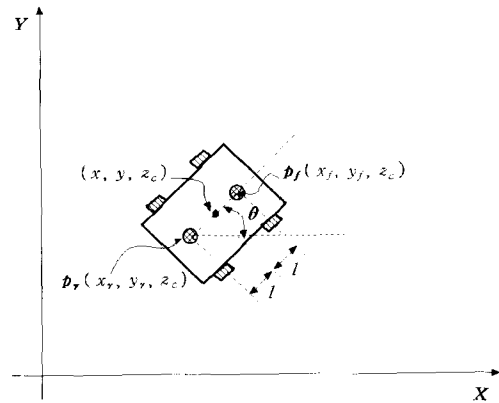


그림 2. 이동 로봇상의 초음파 수신 센서.
Fig. 2. Ultrasonic receivers on a mobile robot.

로부터 초음파 수신 센서들의 전역 위치값을 알 수 있고, 이로부터 또한 이동 로봇 위치 및 방향을 구할 수 있다. 그러나 위와 같이 한 시스템 내에서 여러 개의 초음파 발생기를 사용할 때에는 다음과 같은 문제들을 고려해야 한다:

- (1) 초음파 신호들 간의 혼신
- (2) 초음파 수신부에서 각 초음파 신호 식별
- (3) 초음파 채공 시간(TOF: Time-Of-Flight)을 측정하기 위한 초음파 송수신 센서간의 동기화

초음파 수신부에서 각 신호들을 식별하기 위해서는 초음파 발생기들의 구동 주파수를 다르게 사용하는 방법도 생각해 볼 수 있지만, 일반적으로 구동 주파수가 다른 초음파 송수신 센서는 가격이 매우 비싸고 신호 처리도 복잡하므로 효율적이지 못하다. 본 논문에서는 위와 같은 문제들을 해결하기 위하여 다음절에서 설명하는 바와 같이 각 초음파 발생기에 간단한 RF 수신 모듈을 부가하고, 이동 로봇에서 RF 송신 모듈을 이용하여 각 초음파 발생기들을 순차적으로 호출하는 방식을 구현한다.

2. 무선 RF 송수신 장치가 부가된 초음파 센서

RF 송수신 모듈은 각 초음파 발생기의 신호 발생 시점을 순차화하므로써 혼신을 막고, 또한 초음파 송수신기를 동기화 하기 위한 것이다. 그림 3에서 각각의 초음파 발생기는 RF 수신기, $RX_i, i = 1, \dots, 4$ 에 의해 구동되며, 이동

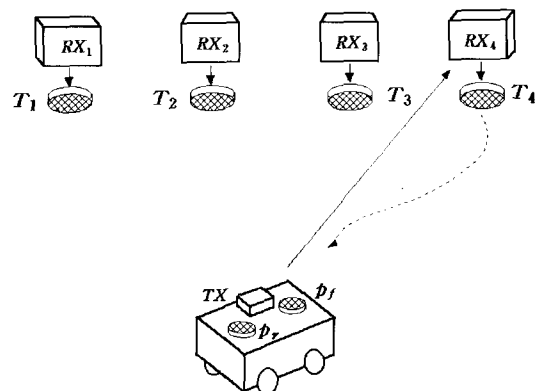


그림 3. RF 송수신 장치를 갖는 초음파 센서.
Fig. 3. Ultrasonic sensors with RF transmitter/receiver module.

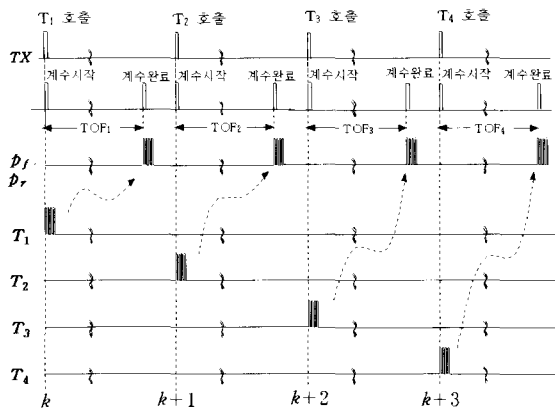


그림 4. 타이밍도.
Fig. 4. Timing diagram.

로봇상의 초음파 수신 센서에는 각 RF 수신기들을 호출할 수 있는 RF 송신기, TX가 부가되어 있다. 이동 공간에 설치되어 있는 각 초음파 발생기들은 한 순간에 이동 로봇의 RF 송신기에 의해 호출된 것만 초음파 신호를 발생시킨다.

RF 신호 전송 시간은 무시할 수 있으므로 이동 로봇에서 RF 신호를 전송하는 시점과 해당 초음파 발생기에서의 초음파 발생 시점을 같게 놓으면 초음파 송수신기간의 동기화 문제를 해결할 수 있다. 다음 그림은 본 시스템 내에서 각 초음파 송수신기의 타이밍 관계를 나타낸다.

윗 그림에서 계수 시작과 계수 완료는 각 초음파 신호의 제공 시간을 계수하기 위한 트리거 신호를 의미하며, TX는 이동 로봇에 설치된 RF 전송 모듈의 신호, T1~T4는 초음파 발생기에서의 신호, 그리고 rf와 dr은 초음파 수신 센서에서의 신호를 나타낸다.

III. 확장 칼만 필터를 이용한 자기 위치 추정

측정된 신호에 잡음이 실려있는 경우, 신호의 잡음을 추정하기 위해서 칼만 필터를 사용할 수 있다[10]. 본 논문에서 제안하는 전역 초음파 시스템에서 측정 거리 신호와 이동 로봇의 전역 좌표값 사이에는 비선형 관계가 있으므로 여기서는 비선형 시스템을 위한 확장 칼만 필터를 적용한다.

이동 로봇의 상태 벡터, r은 2차 평면상에서의 위치 (x, y)와 방향각 θ로 이루어지며, 상태 방정식은 잘 알려진 점 모델(point model)[7]로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$r_{k+1} = f(r_k, u_k, w_k) = \begin{bmatrix} x_k + T_k \cos \theta_k + w_{1,k} \\ y_k + T_k \sin \theta_k + w_{2,k} \\ \theta_k + \Delta \theta_k + w_{3,k} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $r = [x, y, \theta]^t$ 은 상태 벡터, $u = [T, \Delta \theta]^t$ 는 제어 입력, 그리고 $w_k = [w_{1,k}, w_{2,k}, w_{3,k}]^t$ 는 평균값, 0과 분산, Q를 갖는 가우시안 잡음, 즉, $w_k \sim N(0, Q)$ 이며, 아래 첨자 k는 시간을 의미한다.

이제 초음파 수신 센서의 위치, p_f 와 p_r 에서의 초음파 관측 방정식은 다음과 같이 주어진다:

$$z_k = h(r_k, \nu_k) \quad (3)$$

여기서 관측 잡음, $\nu_k = [\nu_{1,k}, \nu_{2,k}]^t$ 는 가우시안, 즉 $\nu_k \sim N(0, G)$ 이며, 함수, $h(r_k, \nu_k)$ 는 다음과 같이 주어진다:

$$h(r_k, \nu_k) = \begin{bmatrix} \{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2 + (z_f - z_i)^2\}^{1/2} + \nu_{1,k} \\ \{(x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2 + (z_r - z_i)^2\}^{1/2} + \nu_{2,k} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(4)에서 아래 첨자, i는 k 시간에 이동 로봇에 의해 호출된 초음파 발생기를 나타낸다.

이제, (2)과 (4)로 이루어지는 상태 방정식 및 관측 방정식에서 이동 로봇의 상태 벡터를 추정하기 위한 확장 칼만 필터 알고리즘은 다음과 같이 기술할 수 있다:

$$\hat{r}_{k+1} = f(\hat{r}_k, u_k, 0) \\ P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^t + Q \quad (5)$$

$$K_k = P_k^- H_k^t (H_k P_k^- H_k^t + G)^{-1} \\ \hat{r}_k = \hat{r}_k^- + K_k (z_k - h(\hat{r}_k^-, 0)) \\ P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (6)$$

여기서 \hat{r}_k^- 와 \hat{r}_k 는 각각 이동 로봇의 상태 벡터, r의 칼만 필터에 의한 보정 전(a priori)과 보정 후(a posteriori) 추정 값이고, P_k^- 와 P_k 는 다음 식으로 정의되는 오차 공분산(error covariance) 행렬이다.

$$P_k^- = E[(r_k - \hat{r}_k^-)(r_k - \hat{r}_k^-)^t] \quad (7) \\ P_k = E[(r_k - \hat{r}_k)(r_k - \hat{r}_k)^t]$$

또한 K_k 는 칼만 필터의 이득이며, 행렬 A_k 와 H_k 는 각각 비선형 함수, $f(\cdot)$ 과 $h(\cdot)$ 의 상태 벡터, r에 대한 자코비안 행렬로서 다음 식으로 주어진다:

$$A_k = \frac{\partial f}{\partial r}(\hat{r}_k, u_k, 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -T_k \sin \theta_k \\ 0 & 1 & T_k \cos \theta_k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial r}(\hat{r}_k, 0) = \begin{bmatrix} \frac{x_f - x_i}{D_{f,i}} & \frac{y_f - y_i}{D_{f,i}} & \frac{C_{f,i}}{D_{f,i}} \\ \frac{x_r - x_i}{D_{r,i}} & \frac{y_r - y_i}{D_{r,i}} & \frac{C_{r,i}}{D_{r,i}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 $C_{f,i}$, $C_{r,i}$ 와 $D_{f,i}$, $D_{r,i}$ 는 각각 다음과 같다:

$$\begin{aligned}
 C_{f,i} &= -(x_f - x_i) l \sin \theta + (y_f - y_i) l \cos \theta \\
 C_{r,i} &= (x_r - x_i) l \sin \theta - (y_r - y_i) l \cos \theta \\
 D_{f,i} &= \{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2\}^{\frac{1}{2}} \\
 D_{r,i} &= \{(x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)
 \end{aligned}$$

위 식에서는 편의를 위하여 각 변수들의 시간에 관한 첨자, k 를 생략하였다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험

1. 컴퓨터 시뮬레이션

위에서 제안한 전역 초음파 센서 시스템과 확장 칼만 필터를 이용한 이동 자기 위치 추정 알고리즘을 검증하기 위하여 우선 컴퓨터 시뮬레이션을 행한다. 높이, 길이, 폭이 각각 1,300 mm, 1,500 mm, 1,500 mm인 직사각형 공간의 천장 4 꼭지점 부근에 초음파 송신 센서를 설치하였으며, 그 위치 벡터는 다음과 같다:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= [50.0, 64.0, 1190.0]', & (11) \\
 T_2 &= [1450.0, 50.0, 1190.0]', \\
 T_3 &= [1446.0, 1450.0, 1190.0]', \\
 T_4 &= [64.0, 1450.0, 1190.0]'
 \end{aligned}$$

위에서 길이의 단위는 mm이며, 앞으로는 특별한 언급이 없는 한 mm를 길이의 기본 단위로 한다. 위 (11)의 위치는 다음절에서 기술할 실험 상황에 맞춘 것이다. (1)과 (2)로 표현되는 상태 방정식에 대해서, 제어 입력, u_k 를 단순히 다음 식과 같이 생성하였다:

$$\begin{aligned}
 T_k &= v_c(\text{상수}) \\
 \Delta \theta_k &= \frac{2\pi}{P}, \quad P = \text{주기} \quad (12)
 \end{aligned}$$

(2)에서 알 수 있듯이 T_k 는 이동 로봇의 샘플 구간의 이동 거리를 의미하며, $\Delta \theta_k$ 는 방향각의 변화량을 의미한다. 그러므로 (12)에 의한 이동 로봇의 궤적은 상태 변수 잡음이 없을 경우, P 시간 동안 일정한 선속력으로 방향각이 $-\pi$ 로부터, π 까지 변하는 궤적, 즉 원 궤적이 된다. 이동 로봇 상의 앞 초음파 수신 센서 위치, p_f 와 각 초음파 발생기 위치, T_i 까지의 거리 데이터를 그림 5에 나타내었다. 뒤 초음파 수신 센서 위치, p_r 에서 T_i 까지의 거리 데이터도 그림 5와 유사한 형태를 갖는다. 여기서 한가지 주의해야 할 것은 이동 로봇이 한 순간에 하나의 초음파 발생기만 호출하므로 거리 데이터, $h_1 \sim h_4$ 중에서 k 시간에 하나의 데이터만 관측 (4)에서 사용된다는 것이다. 본 시뮬레이션에서는 초음파 발생기 호출 순서를 단순히 123412...로 하였다. 그러나 실제 상황에서는 로봇의 주변 물체나 하나의 초음파 신호가 다다른 영역의 크기등을 고려하여 필요에 따라 호출 순서를 정할 수 있다.

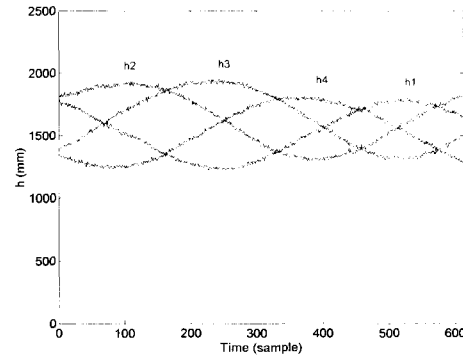


그림 5. p_f 에서 $T_i, i = 1, \dots, 4$ 까지의 거리.

Fig. 5 Distances to $T_i, i = 1, \dots, 4$ from p_f .

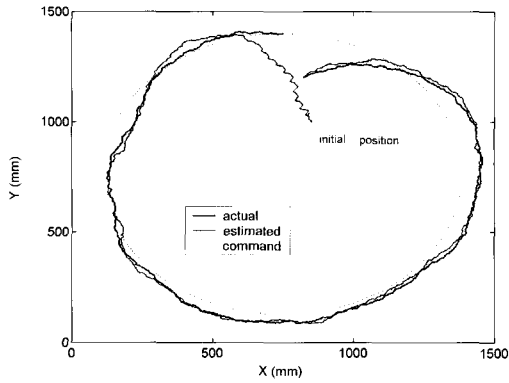
상태 벡터 잡음과 관측 잡음의 분산 값은 다음과 같이 설정하였다:

$$\begin{aligned}
 Q &= \text{diag}[2.0^2, 2.0^2, (2\pi/360.0)^2], & (13) \\
 G &= \text{diag}[23.66^2, 23.66^2]
 \end{aligned}$$

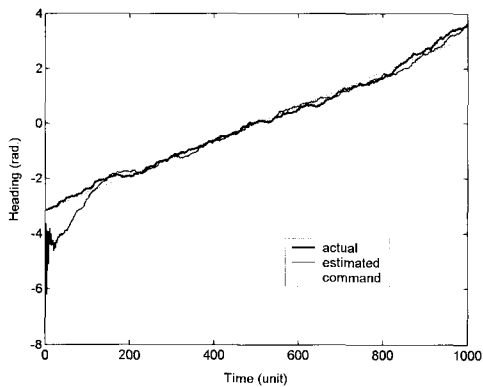
여기서 $\text{diag}[\cdot]$ 는 대각 행렬을 의미한다. 분산, G 의 값은 다음절에서 설명하는 바와 같이 초음파 센서 거리 측정 실험으로부터 구하였다. 확장 칼만 필터에 의한 이동 로봇 상태 변수 추정 결과를 그림 6에 나타내었다. 이때 상태 벡터 초기값은 $r_0 = [850, 832, -3.16]'$ 이다. 제어 입력식 (12)는 궤환 제어 방식이 아니므로 상태 변수 잡음, w 에 의한 영향 때문에 이동 로봇의 실제 상태 궤적은 정해진 원 궤적을 따르지 못한다. 그러나 이러한 경우에도 본 상태 추정 알고리즘은 로봇의 실제 상태 벡터를 잘 추정함을 볼 수 있다. 정상 상태에서 상태 추정 오차는 x, y 위치에 대해서 20.0 mm 이내, 그리고 방향각, θ 에 대해서 0.005 radian이었다.

2. 시스템 구성 및 실험

실험을 통해 본 시스템의 성능을 검증하기 위해서 그림 7과 같이 높이, 길이, 폭이 각각 1,300 mm, 1,500 mm, 1,500 mm인 직사각형 형태의 간단한 실험 장치를 제작하였다. 초음파 발생기는 (11)의 위치에 설치되어 있으며, 이동 로봇 상에 초음파 수신 센서가 장착되어 있다. 초음파 센서로는 영국 Robot Electronics사의 SRF04 초음파 센서 모듈을 사용하였다. SRF04 초음파 센서 모듈은 초음파 송신부와 수신부가 하나의 구동 모듈에 같이 있으나, 본 실험에서는 이를 수정, 분리하여 사용하였다. 본 초음파 센서는 최대 감지 거리 3 m, 동작 주파수 40 kHz이며 0 °C~40 °C에서 동작한다. 일반적으로 초음파의 전송 속도는 주변 매질의 온도에 영향을 받는다. 그러므로 정확한 데이터 추출을 위해서는 주변 공기 온도의 영향을 반영해야 한다. 다음 그림 8은 초음파 송, 수신 센서의 거리 측정 매개변수 조정을 위하여 현 실험 조건에서 거리에 따른 초음파 채공 시간 데이터를 측정된 결과이다. 측정 결과에 대한 최소 제곱 오차법



(a) $x-y$ 평면에서의 위치



(b) 방향각

그림 6. 상태 벡터 추정 결과.

Fig. 6. Estimation results for the state vector.

에 따른 직선식은 다음과 같다.

$$T = 2.90611 \cdot d + 314.16601 \quad (14)$$

여기서 $d(mm)$ 는 초음파 송, 수신 센서 사이의 거리를 나타내며, $T(\mu sec)$ 은 초음파 채공 시간을 나타낸다. 이로부터 현 실험 조건에서 초음파의 전파 속도는 근사적으로 $344.10 m/sec$ 임을 알 수 있으며, 이때 얻어진 분산 값은 다음과 같다.

$$\sigma = 23.66 mm \quad (15)$$

전술한 RF 송수신을 위하여 Radiometrix사의 TX, RX 송수신 모듈을 사용하였으며, PIC16F873 마이크로프로세서를 이용하여 구동기를 제작하였다. 그림 9는 앞의 시뮬레이션 상황과 같은 원 궤적 상에서 이동 로봇 앞 초음파 수신 센서 위치, p_i 에서 관측한 거리 데이터이다. 초음파 발생기의 위치는 (11)과 같다. 시뮬레이션에서 나타난 것처럼, 상태 벡터 잡음, w 때문에 이동 로봇이 정해진 원 궤적을 정확히 따라가도록 제어하는 것이 매우 어려우며, 또한 잡음의 분산, Q 를 구하는 것도 어렵다. 본 실험에서는 문제를 단순화하기 위해 이동 로봇을 제어하는 대신에 정해진

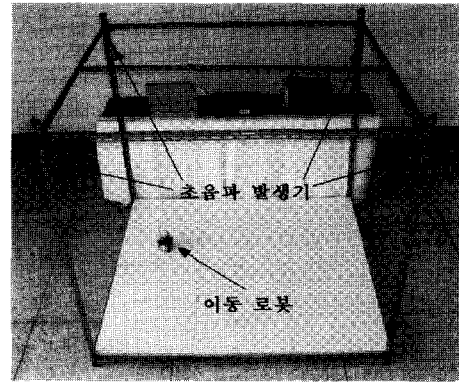


그림 7. 실험 장치.

Fig. 7. Experimental setup.

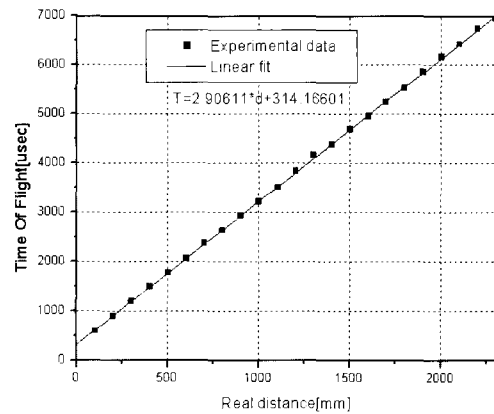


그림 8. 실거리 대 초음파 채공시간.

Fig. 8. Real distance vs ultrasonic time of flight.

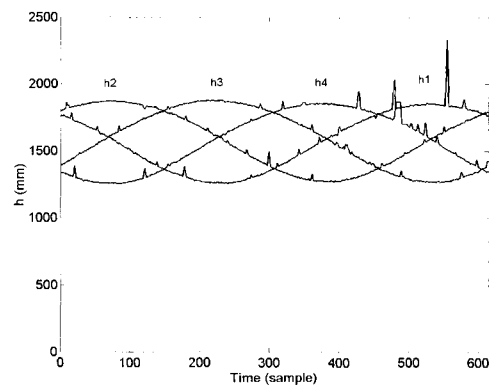
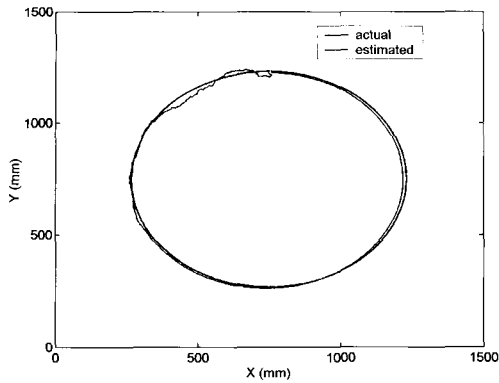


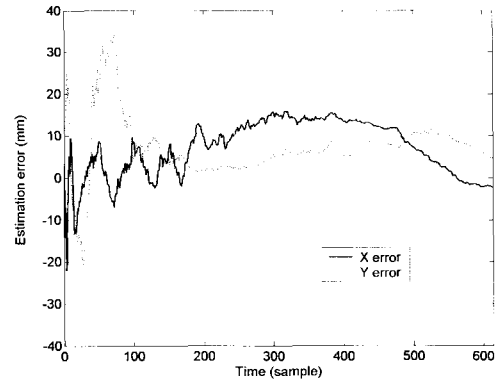
그림 9. 관측 데이터: p_i 와 T_i , $i = 1, \dots, 4$ 사이의 거리.

Fig. 9 Measurement data : Distances between p_i and T_i , $i = 1, \dots, 4$.

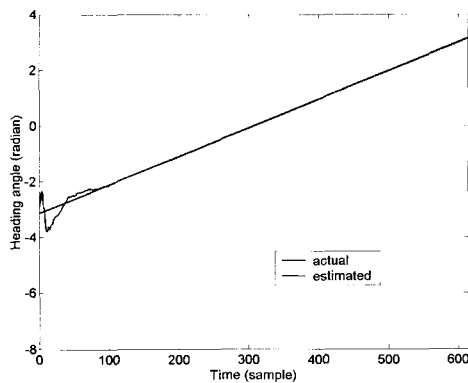
원 궤적 상에서 한 점씩 옮겨가면서 초음파 거리 데이터를 측정하였다. 그러므로 상태 벡터 잡음의 분산 값은 $Q = 0$ 이다. 본 상황에서 상태 벡터 추정 결과와 추정 오차를 그림 10과 그림 11에 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 추정 알고리즘의 정상 상태에서 x 및 y 위치 추정 오차가 $10.0 mm$, 그리고 방향각 오차가 $0.02 radian$ 이내이다.



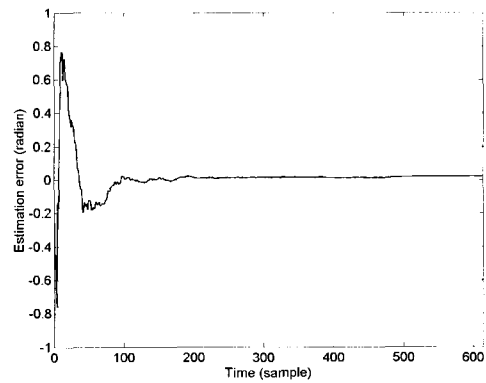
(a) $x - y$ 평면에서의 위치



(a) x, y 위치 추정 오차



(b) 방향각, θ



(b) 방향각 추정 오차, θ

그림 10. 확장 칼만 필터에 의한 상태 벡터 추정 결과.

Fig. 10. Estimation results for the state vector by the extended kalman filter.

그림 11. 상태 벡터 추정 오차.

Fig. 11. Estimation errors.

본 실험에서는 이동 로봇의 주변 작업 공간에 장애물이 없는 이상적인 상황을 가정하였다. 그러나 일반적으로 주변 장애물이 있는 작업 공간에서 초음파를 사용하는 경우, 다중 경로 오차나 음영 지역 문제점이 있을 수 있다. 이러한 문제점들은 다음과 같은 방식으로 해결할 수 있다:

1. 다중 경로 오차 : 다중 경로 오차는 초음파가 장애물 등에 의해 반사되어 여러 경로를 거치면서 수신기에 도달하는 현상이다. 그러므로 수신기에는 한 샘플링 구간 동안에 발생기로부터 직접 도달하는 직접파를 포함하여 여러 개의 간접 초음파 신호가 검출될 수 있다. 일반적으로 직접파는 간접파에 비해 빨리 도달하므로 이러한 문제는 첫 번째 도달하는 초음파만을 처리하고 이후의 초음파 수신 신호는 무시하는 방법으로 해결할 수 있다. 상용화된 초음파 센서 구동기들은 일반적으로 이러한 방식을 채택하고 있다. 문제는 직접파가 도달하지 못하고 첫 번째 도달하는 초음파가 간접파일 경우, 거리 측정 오차가 있을 수 있다는 것이다. 그러나 본 논문에서 구현한 자기 위치 추정 칼만 필터 알고리즘은 한 샘플링 구간의 데이터만 처리하는 것이 아니라 연속적인 데이터를 처리하여 점근적으로 추정하는 것이므로 한 샘플링 구간에서의 거리 오차가 전체적인 자기 위치 추정에 큰 영향을 주지는 않는다.

2. 음영 지역 : 주변 장애물 때문에 초음파가 도달하지 못하는 음영 지역 있는 경우는 작업 공간에 설치하는 초음파 발생기의 수를 확장하고, 초음파 발생기를 선택적으로 활성화하는 방법으로 해결할 수 있다. 본 실험에서는 단순히 4개의 초음파 발생기와 순차적인 활성화 방법만 구현했지만 선택적 활성화 방법은 초음파 발생기를 몇 개 더 설치하고, 추정된 이동 로봇의 위치에 따라 가려지지 않을 만한 초음파 발생기만 활성화하는 방법이다. 이는 구현중에 있다.

V. 결론

본 논문에서는 이동 로봇 운동 공간내 몇 군데 고정 지점에 초음파 발생기를 설치하고, 이들과 이동 로봇상의 초음파 송신 센서와의 거리를 측정함으로써 이동 로봇의 위치 및 방향 정보를 구하기 위한 새로운 전역 초음파 센서 시스템을 제안하였다. 또한 각 초음파들의 혼신을 막고, 초음파 송수신 센서를 동기화시키기 위해서 초음파 발생기에 간단한 RF 송수신 모듈을 부가한 초음파 송수신 센서를 개발하였다. 따라서 초음파 발생기들을 설치하는 것이 용이하고, 또한 RF 채널에 의해 이동 로봇이 초음파 발생 순서 및 발생 시점을 제어할 수 있게 하였다. 본 시스템은 초음파 센서를 이용한 기존의 자기 위치 추정 방식에 필요한 국부 지도 작성과 전역 지도 데이터베이스와의 정합 과정을 피할

수 있으므로 계산이 매우 효율적이며, 또한 초음파 반사파 대신에 직접파를 처리하므로 신호 잡음에 대해 매우 강인하다.

초음파 신호 처리와 이동 로봇 상태 벡터 추정을 위해 확장 칼만 필터 알고리즘을 적용하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 본 시스템의 성능을 검증하였다.

참고문헌

[1] S. Singh and P. Keller, "Obstacle detection for high speed autonomous navigation", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2798 - 2805, 1991

[2] R. A. Jarvis, "A perspective on range finding techniques for computer vision", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 5, No. 2, pp. 122-139, 1983

[3] Roman Kuc and M. W. Siegel, "Physically based simulation model for acoustic sensor robot navigation", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 9, No. 6, pp.766-777, 1987

[4] 범 희락, 조 형석, "Mobile Robot Map Making using Ultrasonic Sensor Array", 한국자동제어학술회의논문집, pp. 121-122, 1993

[5] J. Leonard and H. Durrant-Whyte, "Mobile robot localization by tracking geometric beacons", *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3, pp. 376-382, 1991

[6] C. Duriev, H. Clergeot, and F. Monteil, "Localization of a mobile robot with beacons taking erroneous data into account", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1062-1068, 1989

[7] J. Leonard and Durrant-Whyte, *Directed Sonar sensing for mobile robot navigation*, Kluwer Academic Publishers, 1992

[8] J. Ko, W. Kim, and M. Chung, "A Method of Acoustic Landmark Extraction for Mobile Robot Navigation", *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 6, pp. 478-485, 1996

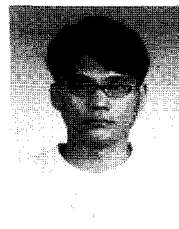
[9] L. Kleeman, "Optimal estimation of position and heading for mobile robots using ultrasonic beacons and Dead-reckoning", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2582-2587, 1992

[10] R. Brown and P. Hwang, *Introduction to random signals and applied kalman filtering*, John Wiley and Sons, 1992



이수영

1964년 10월 2일 생. 1988년 2월 연세대 전자공학과 졸업. 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월~1999년 8월 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 선임연구원. 1997년 2월~1998년 2월 Univ. of SouthernCalifornia, Dept. of CS, Post Doc. 1999년 9월-현재 국립전북대 전자정보공학부 조교수.



진재호

1974년 4월 29일 생. 2001년 국립전북대 제어계측공학과 졸업. 2003년 2월 동대학원 석사졸업예정.