전역 초음파 시스템의 선택적 활성화

Selective Activation for Global Ultrasonic System

김 진 원, 이 수 영*, 김 용 태, 황 병 호
(Jinwon Kim, Sooyeong Yi, Yongtae Kim, and Samuel B. Hwang)

Abstract : The global ultrasonic system for the self-localization of a mobile robot consists of several ultrasonic transmitters fixed at some reference positions in the global coordinates of robot environment. By activating the ultrasonic transmitters, the mobile robot is able to get the distance to the ultrasonic transmitters and compute its own position in the global coordinate. Due to the limitation on the ultrasonic signal strength and beam width as well as the environmental obstacles however, the ultrasonic signals from some generator may not be transmitted to the robot. Thus, instead of activating the all ultrasonic transmitters, it is necessary to select some ultrasonic generators to activate based on the current robot position. In this paper, we propose a selective activation algorithm for self-localization with the global ultrasonic system. The selective activation algorithm gets the meaningful ultrasonic data at every sampling instants, which results in the faster and more accurate response of the self-localization than the conventional sequential activation. Through the self-localization and path following control, we verify the effectiveness of the proposed selective activation algorithm.

Keywords : autonomous navigation, global ultrasonic system, radio frequency module, extended kalman filter, selective activation

I. 서론

이동 로봇이 자율적으로 운동하기 위해서는 로봇의 현재 위치를 알아내는 자기 위치 추정 기능과 어디로 어떻게 움직여야하는지를 결정하는 경로 계획 및 제어 기능이 필요하다[1]. 이동체 자기위치 추정 방법에는 크게 지역적인 방법과 전역적인 방법이 있다. 지역적인 방법은 실시간으로 이동체의 주변 환경 물체에 대한 국부 지도를 만들고, 이를 전역 지도와 정합하므로써 전역지도 상에서의 이동체 위치를 알아내는 것으로서, 국부지도 작성과 전역지도와의 정합 과정에 매우 많은 계산 부담이 따른다는 문제점이 있다[2, 3]. 한편, 전역적 위치 추정 방법의 한 예로서, 자동차나 선박등의 위치추정에 대표적으로 사용되는 전역 위치시스템(Global Positioning System)은 3개 이상의 위성에서 전송되는 신호로부터 각 위성과 이동체의 거리를 계산하고 삼각법에 의해 이동체의 좌표 값을 얻어내는 방식이다[4]. 위성 GPS는 차폐효과 때문에 실내에서는 적용할 수 없으므로, 이 방식을 원용하여 실내용 이동로봇에 적용할 수 있는 초음파 방식의 의사위성(pseudo-lite) 위치추적 시스템이 제안되기도 하였다. 이러한 방식의 대표적인 예로서 [5]에서는 주변환경에 설치된 몇 개의 초음파 발신기 신호를 이용하여 발신기까지의 거리를 계산하고, 이로부터 칼만필터를 이용하여 이동로봇의 위치를 계산하였다. 그러나 여기에서 제안된 시스템은 주변환경에 설치된 초음파 발신기들 사이의 유선 연결과 초음파 발생을 제어하는 별도의 제어기가 필요하다는 부담이 있고, 이동로봇은 초음파 신호를 받기만 하므로 초음파 신호 발생에 있어서 자율성이 없다는 문제점이 있다. 또한 [6]에서는 유비쿼터스 계산 환경을 위하여 사람이나 이동체에서 발신되는 초음파 신호를 주변환경에 미리 설치된 몇 개의 초음파 센서를 통해 수신하므로써 이동체의 위치를 알아내는 시스템이 제안되었다. 그러나 이 방식은 이동체가 자신의 위치를 파악하는 것이 아니라 주변 환경의 장치가 이동체의 위치를 추정하는 것이므로 이동로봇의 자기위치추정에 적용하기에는 무리가 있다.

한편 [7-9]에서 제안된 전역 초음파 시스템은 몇 개의 독립된 초음파 발신기를 이동로봇 주변 환경에 미리 설치해 놓고, 이동로봇이 RF 발신기를 이용하여 순차적으로 초음파 발신기들을 호출하고, 이를 수신하므로써 자기위치를 추정하는 방식이다. 본 방식에서는 이동 로봇이 초음파 발생을 직접 제어할 수 있고, 또한 로봇 자신이 위치를 직접 추정하므로 자율성을 확보할 수 있다는 장점이 있다.

초음파 신호는 신호 강도와 빔 폭의 크기에 따라 수신 가능 거리와 영역에 제한이 있다. 그러므로 전역 초음파 시스템에서 이동로봇의 운동 범위가 크고, 주변 환경에 장애물이 많을수록 더 많은 개수의 초음파 발신기가 필요하다. 주변 환경에 설치된 초음파 발신기의 개수가 많을 때, 이들의 호출 순서가 또한 이동로봇의 위치추정에 큰 영향을 줄 수 있다. 예로서 [7,8]에서 사용된 방식에서는 단순히 모든 초음파 발신기를 순차적으로 호출, 활성화하므로 어떤 시점에는 로봇이 수신하기가 불가능한 초음파 발신기를 호출하게 될 수 있다. 이러한 경우, 호출된 초음파 발신기 데이터는 무효 신호가 된다. 따라서 단순 순차호출 방식에서는 정해진 시간 동안 이동 로봇이 수신할 수 있는 유효 초음파

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2006. 5. 2., 채택확정 : 2006. 6. 10.
김진원, 김용태 : 전북대학교 제어계측공학과
(mwstar@hanmail.net/unjang@chonbuk.ac.kr)
이수영 : 전북대학교 전자정보공학부(suylee@chonbuk.ac.kr)
황병호 : Think Life, Inc. (Palo Alto, CA)
(Samuel.B.Hwang@gmail.com)
※ 본 논문의 그림 및 수식 일부는 이미 참고문헌의 논문에 게재되었으나, 본 논문의 전반적인 서술을 위하여 인용하였음.

신호의 개수가 적고, 이에 따라 이동로봇 위치 추정에 오차가 발생할 수 있다. 그러므로 이동로봇의 현재 위치나 초음파 신호의 빔폭을 고려하여 수신 가능한 초음파 발신기만을 선택적으로 호출하므로써 단위시간당 유효 초음파 신호의 수를 늘리고, 위치 추정 오차를 없애기 위한 선택적 활성화 방식이 필요하다.

본 논문에서는 [7,8]에서 제안된 전역 초음파 시스템의 순차적 호출방식을 개선한 새로운 선택적 활성화 방식을 제안하고, 이를 이동로봇 자율주행 실험을 통해 검증하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 [7,8]에서 제안된 전역 초음파 시스템을 간략히 설명하고, 3장에서 본 논문에서 제안하는 선택적 활성화 알고리즘을 설명한다. 4장에서는 확장 칼만 필터 위치추정 알고리즘에 대해 서술하며, 5장에서 실험 결과를 제시한 후, 6장에서 결론을 맺는다.

II. 전역 초음파 시스템

본 장에서는 전체적인 서술을 위하여 [7,8]에서 제안된 전역초음파 시스템에 대해 간략히 소개한다. 전역 초음파 시스템은 그림 1에서 보이는 바와 같이 작업 공간 내의 정해진 몇 개 위치에 미리 설치된 초음파 발생기, $T_1 \sim T_n$의 신호를 이동 로봇 상에 설치된 두 개 초음파 센서, P_f와 P_r에서 수신하여 거리를 측정하는 방식이다. 여기서 아래첨자 n은 초음파 발생기 번호를 나타낸다. 이동 로봇은 RF 송신기 TX와 각각의 초음파 발생기에 부착되어 있는 RF 수신기 $RX_1 \sim RX_n$을 통해 초음파 발생을 제어하며, 동시에 초음파 발생기와 수신 센서를 동기화하여 이동로봇 자신과 초음파 발생기 사이의 거리를 측정한다. 이동로봇 중심점을 $P = [x, y, z_c]^t$라 할 때, 초음파 수신 센서 위치, $P_f = [x_f, y_f, z_c]^t$와 $P_r = [x_r, y_r, z_c]^t$는 다음과 같다.

$$P_f = \begin{bmatrix} x + lC\theta \\ y + lS\theta \\ z_c \end{bmatrix}, \quad P_r = \begin{bmatrix} x - lC\theta \\ y - lS\theta \\ z_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

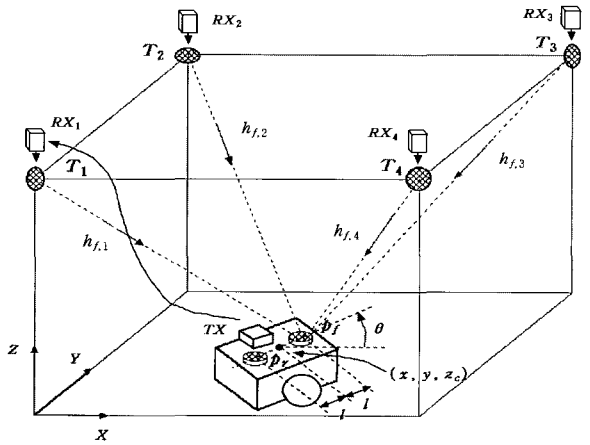


그림 1. 전역 초음파 센서 시스템[8].
Fig. 1. The global ultrasonic system[8].

여기서 l은 이동 로봇 중심점 P와 초음파 센서들 사이의 거리를 의미하며, θ는 이동 로봇의 방향각을 나타낸다. 그리고 $C\theta$와 $S\theta$는 각각 $\cos\theta$와 $\sin\theta$를 의미한다. 이동 로봇의 운동 공간을 평면으로 가정하면, 위치 벡터에 있어서 z 성분, z_c는 상수다.

이동로봇상 초음파 수신센서와 주변환경의 초음파 발생기들의 개별 위치 측정 데이터를 융합하여 전역좌표계상에서 이동로봇의 실시간 위치를 구할 수 있다. 가장 간단한 데이터 융합 방법은 위성 GPS 수신기에서 하는 것과 같은 삼각법이다. 그러나 구동모터 엔코더와 같은 이동 로봇의 내부 센서 데이터와 외부의 거리 센서 데이터와 같이 이종 데이터 간의 융합을 위해서는 칼만필터를 사용하는 것이 효과적이다[5].

III. 선택적 활성화 알고리즘

초음파 신호는 신호의 세기 및 빔 폭의 크기에 따라 수신가능 영역에 제한이 있으므로, 이동로봇 주변 공간의 크기에 따라 여러 개의 초음파 발신기가 필요하게 된다. 초음파 발신기 수가 여러 개일 때, 이동로봇과의 거리 및 초음파 신호의 빔폭에 따라 선택적으로 활성화할 필요가 있다. 본 장에서는 거리 및 빔 폭에 따른 초음파 발신기 선택적 활성화에 대해 설명한다.

1. 거리에 따른 선택적 활성화

초음파 신호는 거리에 따라 신호강도가 급격히 약해지므로 일정거리 이상에서는 수신이 어렵게 된다. 그러므로 로봇과의 거리에 따른 초음파 발신기 선택 기준은 간단히 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_{dist} = \{\, T_i \mid \| T_i - \hat{p} \| < R_{th},\ i = 1, 2, \ldots, n \,\} \tag{2}$$

여기서 R_{th}는 초음파 센서 사양으로부터 주어지는 임계거리를 의미하며, $\hat{p}$는 현재 시점에서의 로봇 위치 추정 값이다. 또한 $\| \cdot \|$는 공간거리를 의미한다. 본 논문에서 사용한 SRF04 초음파 센서의 경우 R_{th}는 대략 3m이다. (2)는 일정 시점에서 로봇 위치 추정 값을 기반으로 일정거리 이내에 있는 초음파 발신기 집합을 의미하며, 이들 중에서 선택하여 활성화한다. 물론 로봇의 위치 좌표와 로봇상의 초음파 수신 센서의 위치좌표는 (1)에서 보인 바와 같이 l에 따른 거리차이가 있다. 그러나 일반적으로 초음파 도달거리에 비하여 그 차이는 크지 않으므로 앞으로는 로봇의 위치를 단순히 초음파 수신센서의 위치로 대신한다.

본 논문에서는 거리에 따른 선택을 단순화하기 위해 로봇 운동공간을 설치된 초음파 발신기에 따라 몇 개의 블록으로 미리 나누고, 현재 시점에서 로봇이 위치한 블록에 포함되는 초음파 발신기만을 선택적으로 활성화하는 방법을 택하였다. 즉, 예로서 그림 2와 같은 경우 블록 1과 블록 2에 속하는 초음파 발신기는 각각

$$\begin{aligned} T_{dist,1} &= \{\, dT_1,\ T_2,\ T_5,\ T_6 \,\} \\ T_{dist,2} &= \{\, T_2,\ T_3,\ T_4,\ T_5 \,\} \\ &\cdots \end{aligned} \tag{3}$$

이다.

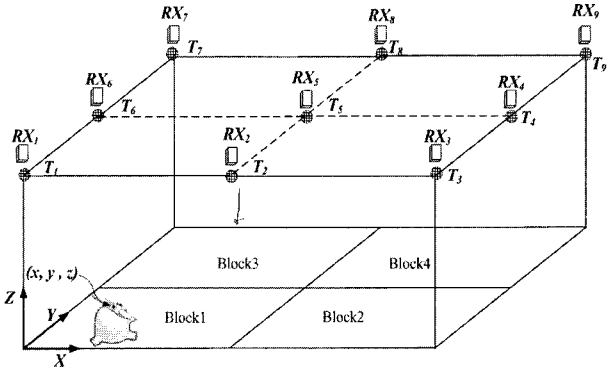


그림 2. 거리에 따른 선택적 활성화를 위한 블록 구분.

Fig. 2. Block divisions for the selective activation based on distance.

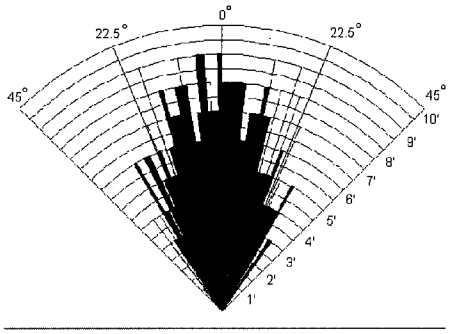


그림 3. SRF04 초음파 센서의 빔 폭.

Fig. 3. Beam width of SRF04 ultrasonic sensor.

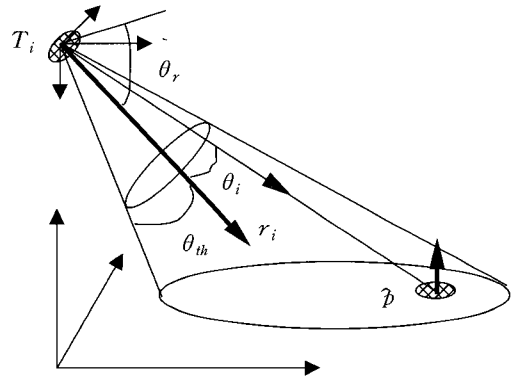


그림 4. 빔 폭에 따른 선택.

Fig. 4. Selection based on beam width.

2. 빔 폭에 따른 선택적 활성화

초음파 신호는 빔 폭에 제한이 있으므로 거리가 가깝다고 하더라도 신호를 수신할 수 없는 영역이 있을 수 있다. 다음 그림 3은 본 논문에서 선택한 SRF04 초음파 센서 신호의 빔 폭을 보여준다[10].

본 논문에서 이동로봇은 평면상에서 움직이므로 이동로봇 상에 설치된 초음파 수신기는 항상 수직 방향을 향하고 있다고 가정한다. 또한 초음파 발신기의 설치 각은 θ_r이다. 다음 그림 4에서 초음파 발신기와 수신기를 연결하는 방향벡터와 설치 각에 따른 초음파 발신기면의 법선 벡터와의 사이 각, θ_i는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_i = \cos^{-1}\left(\frac{T_i - p}{\| T_i - p \|} \cdot r_i\right) \tag{4}$$

여기서 r_i는 초음파 발생기의 단위 법선 벡터를 의미하며, " · "은 벡터의 내적을 나타낸다. (4)에 의해 구한 사이각에 따라 빔폭을 고려한 초음파 발신기 선택 기준은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_{angle} = \{\ T_i \mid \| \theta_i \| < \theta_{th},\ i = 1, 2, \ldots, n \} \tag{5}$$

여기서 θ_{th}는 초음파 발생기의 사양으로부터 주어지는 빔 폭의 임계값이다. 그림 3에서 보듯이 SRF04 초음파 센서의 경우, θ_{th}는 대략 23°임을 알 수 있다.

IV. 이동 로봇의 자기 위치 추정을 위한 확장 칼만 필터 알고리즘

초음파 수신센서를 통해 받은 거리정보와 이동로봇 구동 모터의 엔코더 센서를 융합하여 이동 로봇의 전역 위치를 추정하기 위하여 칼만 필터를 사용할 수 있다[5]. 이동 로봇 위치 추정에 필요한 초음파 거리 방정식은 비선형 방정식이므로 여기는 확장 칼만 필터를 사용한다.

본 논문에서 대상으로 하는 이동 로봇을 그림 5에 보인다. 각 바퀴로 축에 수직한 방향뿐만 아니라 임의의 방향으로 움직일 수 있는 전방향 바퀴(omni-wheel)을 채택하여 이동로봇이 전방향 이동성을 갖도록 하였다. 본 이동 로봇의 위치, $p = [x, y]^t$ 및 방향각, θ를 포함하는 운동 기구학은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ \theta_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \end{bmatrix} + \frac{TR}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \\ \frac{1}{L} & \frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{1,k} \\ \omega_{2,k} \\ \omega_{3,k} \end{bmatrix} \tag{6}$$

여기서 아래 첨자 k는 시간을 의미하며, T는 샘플링 간격, 그리고 $\omega_{1,k}$ $\omega_{2,k}$, $\omega_{3,k}$는 각각 세 개 구동 바퀴의 회전 각속도를 나타낸다. 또한 L과 R은 이동로봇 몸체의 반지름과 각 바퀴의 반지름을 의미한다.

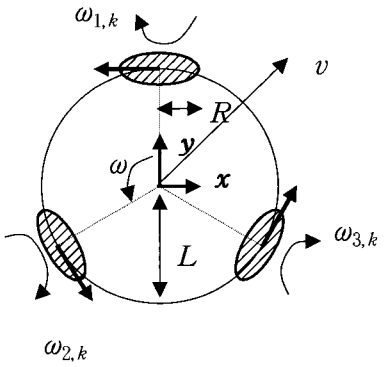


그림 5. 3개의 전방향 바퀴를 갖는 이동로봇.

Fig. 5. Mobile robot with 3 omnidirectional wheels.

(1)과 (6)로부터 다음과 같이 이동 로봇 상에 놓여있는 두 초음파 수신 센서 위치의 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$p_{f,k+1} = f_f(p_{f,k}, u_k, q_k) \tag{7-1}$$

$$= \begin{bmatrix} x_{f,k} + \frac{TR}{3}(-2w_{1,k} + w_{2,k} + w_{3,k}) \\ + l\cos\left\{\theta_k + \frac{TR}{3L}(w_{1,k} + w_{2,k} + w_{3,k})\right\} \\ - l\cos\theta_k + q_{1,k} \\ y_{f,k} + \frac{TR}{3}(-\sqrt{3}w_{2,k} + \sqrt{3}w_{3,k}) \\ + l\sin\left\{\theta_k + \frac{TR}{3L}(w_{1,k} + w_{2,k} + w_{3,k})\right\} \\ - l\sin\theta_k + q_{2,k} \end{bmatrix}$$

$$p_{r,k+1} = f_r(p_{r,k}, u_k, q_k) \tag{7-2}$$

$$= \begin{bmatrix} x_{r,k} + \frac{TR}{3}(-2w_{1,k} + w_{2,k} + w_{3,k}) \\ - l\cos\left\{\theta_k + \frac{TR}{3L}(w_{1,k} + w_{2,k} + w_{3,k})\right\} \\ + l\cos\theta_k + q_{1,k} \\ y_{r,k} + \frac{TR}{3}(-\sqrt{3}w_{2,k} + \sqrt{3}w_{3,k}) \\ - l\sin\left\{\theta_k + \frac{TR}{3L}(w_{1,k} + w_{2,k} + w_{3,k})\right\} \\ + l\sin\theta_k + q_{2,k} \end{bmatrix}$$

여기서 $p_f = [x_f, y_f]^t$와 $p_r = [x_r, y_r]^t$는 각각 전, 후 초음파 센서의 $x-y$ 평면상 위치를 나타내며, $u_k = [\omega_{k,1}, \omega_{k,2}, \omega_{k,3}]^t$는 제어입력을 의미하고, $q_k = [q_{1,k}, q_{2,k}]^t$는 평균값 0과 분산 Q를 갖는 가우시안 잡음, 즉, $q_k \sim N(0, Q)$이다.

이제 이동 로봇상의 초음파 수신 센서에서 초음파 관측 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$z_{f,k} = h_f(p_{f,k}, \nu_k) \tag{8-1}$$
$$= \{(x_{f,k} - x_i)^2 + (y_{f,k} - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2\}^{1/2} + \nu_k$$
$$z_{r,k} = h_r(p_{r,k}, \nu_k) \tag{8-2}$$
$$= \{(x_{r,k} - x_i)^2 + (y_{r,k} - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2\}^{1/2} + \nu_k$$

여기서 초음파 i는 다음의 초음파 발생기 집합 중에서 차례로 선택된 것으로 한다.

$$T_{sel} = \{T_i \mid T_i \in T_{dist} \cap T_{angle},\ i = 1, \ldots, n\} \tag{9}$$

(7-1)과 (8-1)로 이루어지는 앞쪽 초음파 센서 위치에 관한 운동 방정식 및 관측 방정식에서, 위치추정을 위한 확장 칼만 필터 알고리즘은 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{p}_{f,k+1}^- &= f_f(\hat{p}_{f,k}, u_k, 0) \\ V_{f,k+1}^- &= A_{f,k} V_{f,k} A_{f,k}^t + Q \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} K_{f,k} &= V_{f,k}^- H_{f,k}^t (H_{f,k} V_{f,k}^- H_{f,k}^t + G)^{-1} \\ V_{f,k} &= (I - K_{f,k} H_{f,k}) V_{f,k}^- \\ \hat{p}_{f,k} &= \hat{p}_{f,k}^- + K_{f,k}(z_{f,k} - h_f(\hat{p}_{f,k}^-, 0)) \end{aligned} \tag{11}$$

여기서 $\hat{p}_{f,k}^-$와 $\hat{p}_{f,k}$는 각각 $p_{f,k}$의 칼만 필터 보정 전(a priori)과 보정 후(a posteriori) 추정 값이고, $V_{f,k}^-$와 $V_{f,k}$는 다음 식으로 정의되는 오차 공분산(error covariance) 행렬이다.

$$\begin{aligned} V_{f,k}^- &= E[(p_{f,k} - \hat{p}_{f,k}^-)(p_{f,k} - \hat{p}_{f,k}^-)^t] \\ V_{f,k} &= E[(p_{f,k} - \hat{p}_{f,k})(p_{f,k} - \hat{p}_{f,k})^t] \end{aligned} \tag{12}$$

또한 $K_{f,k}$는 칼만 필터 이득이며, 행렬 $A_{f,k}$와 $H_{f,k}$는 각각 함수 $f_f(\cdot)$와 $h_f(\cdot)$의 상태 벡터 p_f에 대한 자코비안 행렬로서 다음 식으로 주어진다.

$$A_{f,k} = \frac{\partial f_f(\hat{p}_{f,k}, u_k, 0)}{\partial p_f} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$H_{f,k} = \frac{\partial h_f(\hat{p}_{f,k}, 0)}{\partial p_f} = \begin{bmatrix} \frac{x_{f,k} - x_i}{D_{f,i}} & \frac{y_{f,k} - y_i}{D_{f,i}} \end{bmatrix} \tag{14}$$

여기서 $D_{f,i}$는 다음과 같다.

$$D_{f,i} = \{(x_{f,k} - x_i)^2 + (y_{f,k} - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2\}^{\frac{1}{2}} \tag{15}$$

같은 방법으로 뒤쪽 초음파 센서에 대한 칼만 필터 추정식 $\hat{p}_{r,k}$도 얻을 수 있다.

이제 앞에서 얻어진 $\hat{p}_{f,k}$와 $\hat{p}_{r,k}$를 기반으로 이동 로봇 중심점의 위치는 (16-1)으로 얻을 수 있으며, 방향각은 두 개의 수신 센서에서 얻은 값을 이용하여, (16-2)에서 보이는 바와 같이 추정할 수 있다.

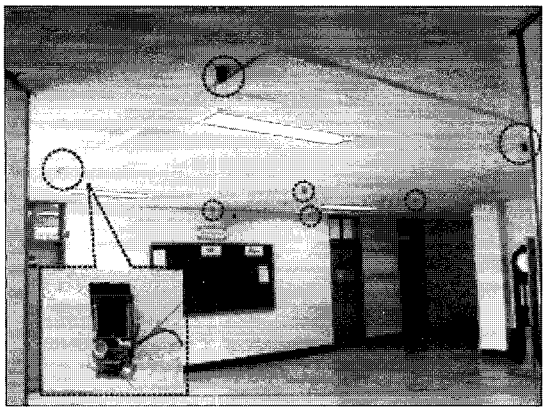
$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \frac{\hat{x}_{f,k} + \hat{x}_{r,k}}{2} \\ \hat{y}_k &= \frac{\hat{y}_{f,k} + \hat{y}_{r,k}}{2} \end{aligned} \tag{16-1}$$

$$\theta_k = \tan^{-1}\frac{\hat{y}_{f,k} - \hat{y}_{r,k}}{\hat{x}_{f,k} - \hat{x}_{r,k}} \tag{16-2}$$

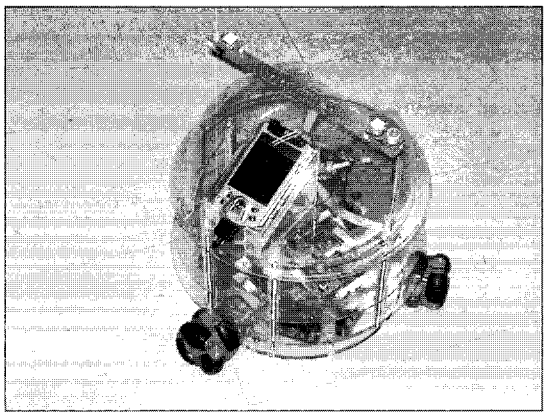
V. 실험 및 고찰

본 논문에서 제안한 전역 초음파 시스템의 선택적 활성화 알고리즘을 검증하기 위하여 다음 그림 6(a)에 보이는 바와 같이 높이, 길이, 폭이 각각 2,600mm, 5,200mm, 5,400mm인 공간에 실험 장치를 설치하였으며, 그림 6(b)와 같은 크기, 36cm, 높이 38.6cm의 전방향 이동로봇을 제작하였다. 이동 로봇의 중심점에서 초음파 수신 센서까지 간격은 l=133mm이다. 그림 6(c)는 실험공간 상의 초음파 발신기 배치를 보여준다.

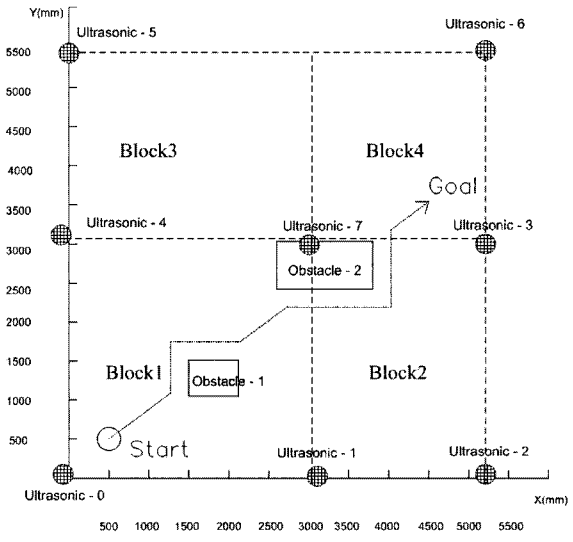
이동 로봇 운동 공간 천장의 8개 지점에 초음파 발생기를 설치하였으며, 거리에 따른 선택적 활성화를 위한 블록을 그림 6(c)와 같이 구분하였다. 초음파 발생기로는 SRF04 초음파 모듈을 사용하였으며, PIC16F873 마이크로프로세서



(a) Experimental setup



(b) Omnidirectional mobile robot



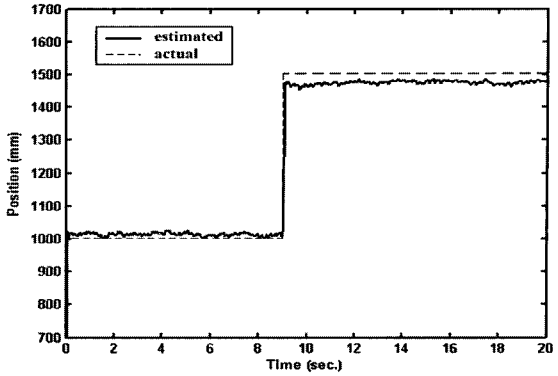
(c) Layout of ultrasonic transmitters

그림 6. 실험 장치.

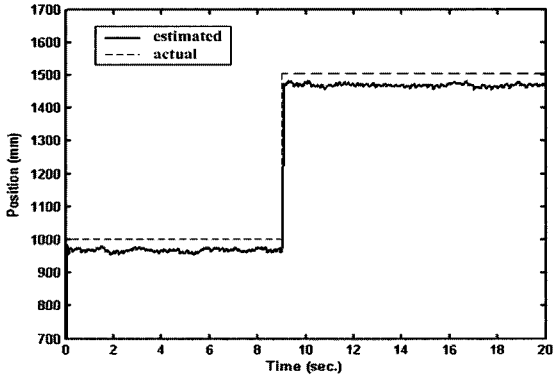
Fig. 6. Experimental setup.

를 이용하여 RF 송수신용 TX, RX 모듈과 결합하였다. SRF04 초음파 센서는 동작 주파수가 40 *kHz*, 최대감지거리가 3m이며, 초음파 신호의 지향성은 그림 3에 보인 사양과 같다.

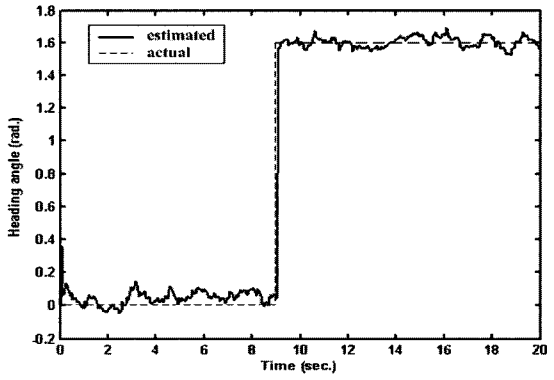
먼저 이동로봇을 고정된 위치에 두고, 위치추정 성능을



(a) Position estimation in x axis



(b) Position estimation in y axis

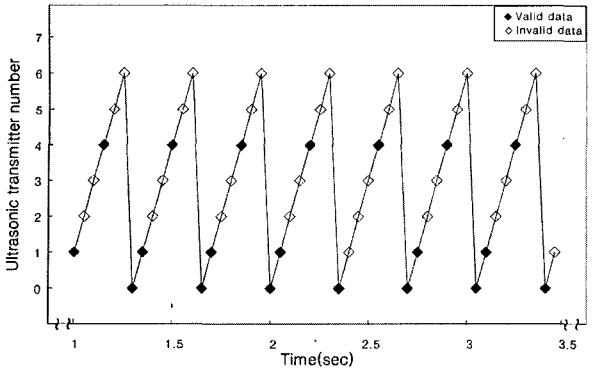


(c) Estimation in heading angle

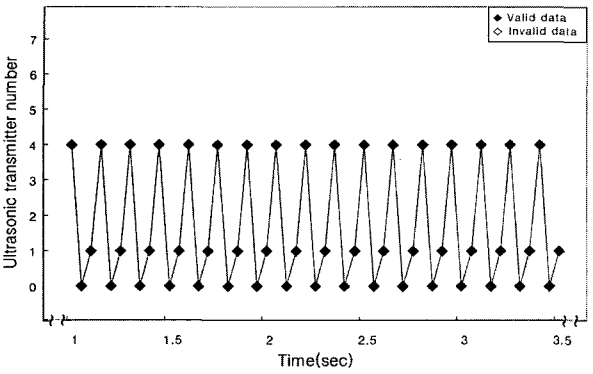
그림 7. 자기위치 추정 결과.

Fig. 7. Result of self-localization.

확인하였다. 순차적 활성화 방법이 로봇의 현재 위치에 상관없이 모든 초음파 발생기를 순차적으로 호출하므로 정해진 샘플링 순간에 무의미한 초음파 데이터가 감지될 가능성이 큰 반면에, 선택적 활성화는 매 샘플링 순간에 항상 의미있는 초음파 데이터가 감지되므로 상대적으로 유효한 데이터의 수가 많을 것이다. 다음 그림 7은 전역 초음파 시스템의 위치 추정 성능을 검증하기 위한 실험 결과이다. 이동로봇의 초기 위치는 알고 있다고 가정하였으며, 이동 로봇을 초기 위치, $(x, y) = (1000, 1000)$에 0*rad.*의 방향각으로 놓고, $t = 9.5$sec가 지난 시점에 위치와 방향각을 각각 $(1500, 1500)$과 $\frac{\pi}{2}$로 변경하고 자세 추정 결과를 관측하



(a) Sequential activation



(b) Selective activation

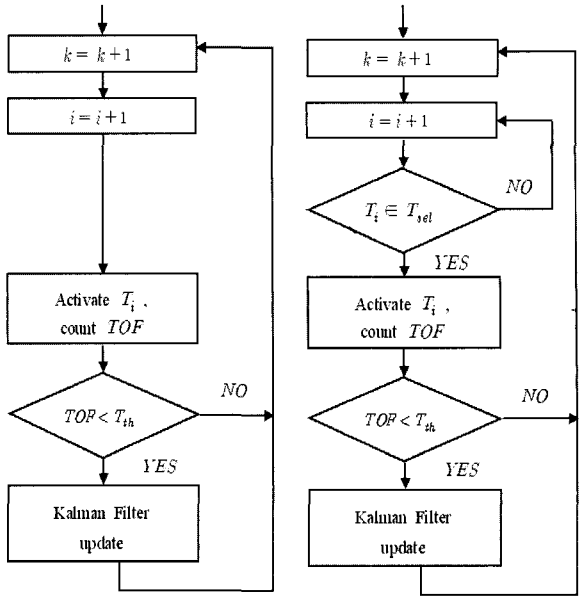
그림 8. 유효 초음파 데이터 비교.

Fig. 8. Comparison for the valid ultrasonic data.

였다. 자세 추정의 초기 값은 임의로 $(\hat{x}, \hat{y}) = (500, 500)$과 $\theta = 0\ rad.$로 설정하였다. 그림에서 보듯이 정상 상태에서 위치 오차는 대략 $30\ mm$정도가 되었으며, 방향각 오차는 대략 $0.221\ rad.$가 되었다. 방향각 오차는 이동로봇 초음파 수신센서 사이의 거리, $2l$에 따라 달라질 수 있다[9].

그림 8은 순차적 활성화 방법과 선택적 활성화 방법에 있어서 정해진 시간 구간동안의 유효 초음파 데이터를 보인 것이다. 그림에서 y축은 호출되는 초음파 발생기 번호를 나타내며, 검은 점은 유효한 데이터, 흰색으로 표시된 점은 그 샘플구간에서 무효가 된 초음파 데이터를 나타낸다. 그림 8(a)에서 보듯이 순차적 활성화의 경우 모든 초음파 발생기가 순차적으로 호출되지만 유효한 데이터는 일부에 불과하며, 그림 8(b)는 선택적 활성화 알고리즘에 의해 이동로봇 위치에서 수신 가능한 초음파 발생기만 호출되었음을 보여준다. 선택적 활성화 방법이 순차적 활성화 방법에 비해 일정 시간 구간 동안 대략 2배 정도의 유효 초음파 샘플 데이터를 가짐을 볼 수 있다.

그림 9는 기존의 순차적 활성화 방법과 선택적 활성화 방법의 흐름도를 보여준다. 그림에서 보듯이 한 샘플링 구간에서 초음파 데이터의 유·무효성은 초음파 수신 마이크로프로세서 시스템의 TOF 측정 카운터 값에 대해서 미리 설정된 문턱 값(Threshold)을 기준으로 판별하였으며, 선택 가능한 초음파 발생기 집합, T_{sel}은 (9)에서 서술한 바와 같다. 문턱 값, T_{th}는 초음파 센서의 사양에 따라 최대 측



(a) Sequential activation (b) Selective activation

그림 9. 알고리즘 흐름도.

Fig. 9. Algorithm flow chart.

정가능거리를 마이크로프로세서의 카운터값으로 환산한 값으로 설정하였으며, 유효하다고 판정된 측정데이터만 이후 확장 칼만필터의 입력 데이터로 활용되었다.

VI. 결론

전역 초음파 시스템은 이동로봇 운동공간상의 몇 지점에 초음파 발신기를 설치해 두고, 이동로봇이 이들을 활성화하여 거리를 측정하므로써, 자율적으로 전역좌표 공간상에서의 자기위치를 추정하기 위한 것이다. 그러나 초음파 신호의 세기나 빔폭의 크기, 주변 장애물 때문에 임의의 위치에서 모든 초음파 발신기 신호를 측정할 수는 없다. 따라서 모든 초음파 발신기를 활성화하기 보다는 이동로봇의 현재 위치에 따라 수신 가능한 것들만을 선택적으로 활성화할 필요가 있다.

본 논문에서는 전역 초음파 시스템에서 모든 초음파 발신기를 순차적으로 활성화하는 기존의 방법 대신에 이동로봇의 현재 추정위치를 기반으로 선택적으로 활성화하는 방법을 제시하고 이의 효율성을 검증하였다. 순차적 활성화 방법에서는 임의의 샘플링 구간에서 수신 불가능한 초음파 발신기도 호출되므로 의미 없는 초음파 데이터가 많이 발생하는 반면에, 본 선택적 활성화 방법에서는 항상 유효한 데이터가 사용되고, 따라서 위치추정 알고리즘의 응답속도가 빠르다는 장점이 있다. 실험을 통하여 정해진 시간 구간 동안의 유효 측정 데이터 수를 비교하므로써 선택적 활성화 방법을 통한 자기위치 추정방법이 훨씬 효율적임을 입증하였다.

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] J. Leonard and D. Whyte, *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation*, Kluwer Academic Publishers, 1992.

[3] 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.

[4] S. Haihang, G. Muhe, and H. Kezhong "An integrated GPS/CEPS position estimation system for outdoor mobile robot," *Prof. of IEEE Int'l Conf. on Intelligent Processing Systems*, pp. 28-31. 1997.

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

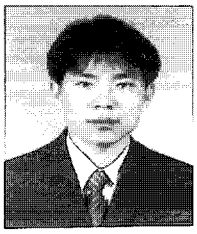
[6] M. Hazas and A. Ward, "A novel broadband ultrasonic location system," *Proc of 4th International Conf. on Ubiquitous Computing*, LNCS 2498, pp. 264-280, 2002.

[7] 진재호, 이수영, "실내용 이동 로봇의 자기 위치 추정을 위한 전역 초음파 시스템," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 제주, pp. 2421-2423, 2002.

[8] S. Yi, "Global ultrasonic system for self-localization of mobile robot," *IEICE Trans. on Communication*, vol. E86-B, no. 7, pp. 2171-2177, 2003.

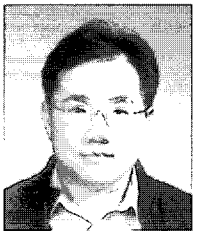
[9] 이수영, "이동 로봇의 자기위치 추정 기술," 한국로봇공학회지, 제2권, 제1호, pp. 37-50, 2005.

[10] http://www.acroname.com/robotics/parts/R93-SRF04.html



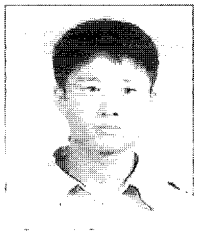
김 진 원

1978년 3월 25일생. 2003년 8월 전북대학교 제어계측공학과 졸업(공학사). 2006년 2월 동 대학원 제어계측공학과 졸업. 관심분야는 시스템설계, 이동 로봇.



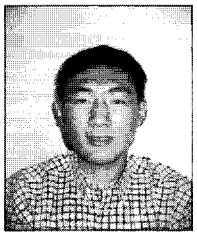
이 수 영

1964년 10월 2일생. 1988년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월~1999년 8월 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 선임연구원. 1997년 2월~1998년 2월 Univ. of Southern California, Dept. of CS, Post Doc. 2006년 6월~현재 국립전북대학교 전자정보공학부 부교수. 관심분야는 인간형 로봇, 이동 로봇, 지능 제어.



김 용 태

1979년 3월 3일생. 2005년 2월 전북대학교 생물산업기계공학과 졸업(공학사). 2006년 6월 전북대학교 제어계측공학과 대학원 재학중. 관심분야는 자동화 시스템, 공장 자동화, 이동 로봇.



황 병 호

Think Life Robotics, Inc.에서 Technical Staff로 로봇 및 인터넷에 관한 연구. Cafedvd.com에서는 e-commerce에 인공지능 응용연구. 관심분야는 로봇공학, 인공 지능, 자연어 처리, 가상 캐릭터 개발 및 인터넷.