

# 전역 초음파 시스템을 이용한 이동 로봇의 자율 주행

## Autonomous Navigation of Mobile Robot Using Global Ultrasonic System

황병훈, 이수영\*

(Byung-Hoon Hwang and Soo-Yeong Yi)

**Abstract :** Autonomous navigation of an indoor mobile robot using the global ultrasonic system is presented in this paper. Since the trajectory error of the dead-reckoning navigation grows with time and distance, the autonomous navigation of a mobile robot requires to localize the current position of the robot, so that to compensate the trajectory error. The global ultrasonic system consisting of four ultrasonic generators fixed at *a priori* known positions in the work space and two receivers on the mobile robot has the similar structure with the well-known satellite GPS(Global Positioning System), and it is useful for the self-localization of an indoor mobile robot. The EKF(Extended Kalman Filter) algorithm for the self-localization is proposed and the autonomous navigation based on the self-localization is verified by experiments.

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

### I 서론

근래 들어 로봇 개발 방향이 단독적이고, 단순 반복적인 작업을 주로 하던 기존의 산업용 로봇에서, 사람과 같은 환경을 공유하며 인간 친화적인 지능형 로봇으로 바뀌면서 그 일환으로 홈서비스 로봇 개발이 활발히 이루어지고 있다. 홈서비스 로봇은 네트워크 기능, 인공 지능에 의한 인식 기능, 흡오토메이션 기능 등과 함께 이동성을 큰 특징으로 하고 있다. 로봇의 이동성은 작업 영역을 확장한다는 의미가 있다. 이동 로봇이 작업 공간상에서 자율적으로 이동하기 위해서는 현재 자신이 어디에 놓여 있는지를 알아내는 자기 위치 추정 기능과 어디로 어떻게 움직여야하는지를 결정하는 경로 계획 및 제어 기능이 필요하다[1].

일반적으로 이동 로봇의 자율 주행을 위해 사용되는 센서는 내부 센서(internal sensor)와 외부 센서(external sensor)의 두 종류로 나누어지는데, 내부 센서는 구동 모터의 엔코더와 같이 구동기 수준에서 회전수나 각도를 제어하는데 사용되며 외부 센서는 이동 로봇과 주변 환경과의 거리 관계로부터 이동 로봇의 위치를 계산하는데 사용된다. 이동 로봇 구동 바퀴의 미끄러짐이나 동력학 모델 오차, 모터 제어 오차 때문에 내부 센서만으로는 작업 공간상에서 로봇의 위치를 결정하기 어려우므로 이동 로봇이 시작점으로부터 주어진 목표점까지 자율 주행하기 위해서는 외부 센서를 통해 항상 자기 위치를 파악할 수 있어야 한다.

자기 위치 추정 방법은 다음과 같이 크게 국부적인 방법과 전역적인 방법으로 나눌 수 있다: 1) 국부적인 방법은 이

동 로봇이 카메라 비전이나 레이저 센서, 혹은 초음파 센서와 같은 거리 센서를 통해 주변 물체들과의 상대 거리를 계산하고, 미리 알고 있는 이를 주변 물체들의 전역 좌표 값을 기반으로 이동 로봇 자신의 전역 위치를 계산하는 방법이다. 2) 한편 전역적인 방법은 작업 공간 주변 물체들과의 상대 거리 데이터에 의존하지 않고 전역 공간상에 설치된 거리 센서를 통해 이동 로봇의 전역 위치를 계산하는 것으로 대표적으로 차량이나 선박용으로 사용되는 GPS가 있다. 첫 번째 방법은 이동 로봇에 설치된 거리 센서를 통해 자기 위치 추정뿐만 아니라 이동 장애물 회피 및 충돌 방지 기능으로 확장할 수 있으며, 또한 변경된 주변 환경의 물체 지도를 다시 작성하는 것도 가능하다는 장점이 있지만, 자기 위치 추정을 위해서 실시간으로 로봇의 주변 환경 물체 국부 지도를 작성하고 이를 전역 지도와 정합(matching)하는 과정에 매우 많은 계산 부담이 따른다는 문제점이 있다[2,3]. 전역 지도와 국부 지도 정합 과정의 문제점을 피하기 위해 모양이나 특징이 주변 물체와 구별되는 인공 표식점들을 전역 공간상의 미리 알려진 위치에 설치하는 방식이 제안된 바도 있다[4,5]. 두 번째 방법에서는 이동 로봇 주변 물체들과의 상대 거리 데이터를 획득하지 않으므로 장애물 감지 기능이나 주변 물체 지도 작성으로 확장할 수는 없지만, 국부 지도 작성 및 전역 지도와의 정합 과정을 피하고 직접 전역 공간에서의 좌표 값을 얻을 수 있으므로 자기 위치 추정 계산이 매우 간편하고 빠르다는 장점이 있다. 전역적 위치 추정 방법으로서 대표적으로 사용되는 GPS는 3개 이상의 위성에서 전송되는 신호로부터 각 위성과 이동체의 거리를 계산하고 삼각법에 의해 이동체의 좌표 값을 얻어내는 방식이다[6]. 최근에 위성 전송 신호에 의도적으로 부가되었던 잡음 신호를 제거하므로써 수 cm 이하의 정밀도로 이동체의 전역 좌표값을 얻어내는 것이 가능해졌으나, 아직 범용으로 사용하기에는 매우 비싸고, 또한 홈 서비스용 이동 로봇과 같은 실내 환경에는 적용하기 어려운 문제점이 있다.

\* 책임 저자(Corresponding Author)

논문 접수 : 2003. 8. 28., 채택 확정 : 2004. 3. 11.

황병훈 : 전북대학교 대학원 메카트로닉스공학과(irobot3@hot mail.com)

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

\* 이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-203-003-D00126).

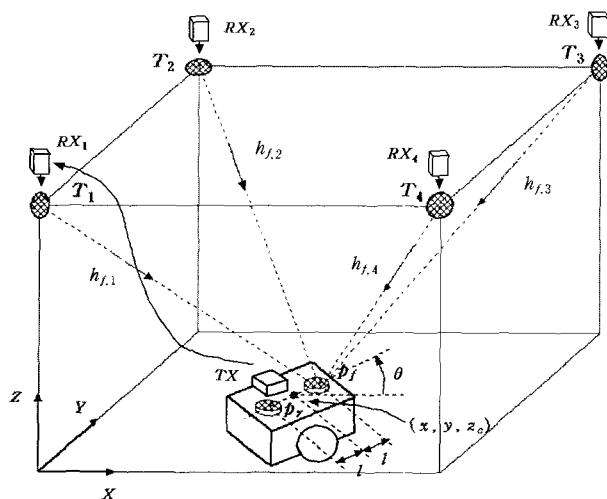


그림 1. 전역 초음파 센서 시스템.

Fig. 1. The global ultrasonic system.

한편 [7]에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 전역 초음파 시스템(Global Ultrasonic System)이 제안되었는데, 이는 전역 공간상에 미리 설치된 몇 개의 초음파 발생기를 이동 로봇상에서 RF(Radio Frequency) 모듈을 이용하여 순차적으로 호출하고 초음파 센서 쌍으로 수신하여 거리를 계산하므로써 이동 로봇의 전역 위치 및 방향을 알아내는 방법이다. 일반적으로 초음파를 이용한 거리 감지 시스템은 비교적 측정 정밀도가 높고, 신호 처리가 간단하며 경제적이므로 범용으로 사용하기에 용이하다[8]. 전역 초음파 시스템은 주변 물체 지도 작성과 전역 지도와의 정합 과정을 필요로 하지 않으므로 전역 공간에서 자기 위치 추정을 위한 계산이 매우 효율적이며, 또한 이동 로봇상에서 초음파를 발생하고 주변 물체에서 반사되는 간접파를 수신하여 처리하는 기존의 방식에 비해서, 초음파 신호를 직접 수신하므로 잡음에 강하다는 장점이 있다[9].

본 논문에서는 [7]에서 제안된 전역 초음파 시스템을 확장하여 새로운 칼만 필터 알고리즘을 제안하고 자기 위치 추정에 기반한 자율 주행 성능을 실험을 통해 검증하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다: 먼저 2장에서 전역 초음파 시스템을 간략히 설명하고, 3장에서 자기 위치 추정을 위한 확장 칼만 필터 알고리즘과 주행 제어 알고리즘에 대해서 서술하며, 4장에서 실험 결과를 제시한 후, 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 전역 초음파 시스템

전역 초음파 시스템은 그림 1에서 보이는 바와 같이 작업 공간내 정해진 몇 개 위치에 미리 설치된 초음파 발생기,  $T_1 \sim T_4$ 로부터 발생되는 초음파를 이동 로봇상에 설치된 초음파 센서,  $P_f$ 와  $P_r$ 에서 수신하여 거리를 측정하는 방식이다. 한 시스템내에 여러 개의 초음파 발생기가 함께 사용될 때에는 초음파 신호들간의 혼신(mixed signal) 문제와 초음파 수신기에서 각 초음파 신호 식별 문제, 그리고 초음파 체공 시간(TOF: Time-Of-Flight)을 측정하기 위한 초음파

송, 수신 센서간의 동기화 문제가 있을 수 있다. 이와 같은 문제들을 해결하기 위해서 전역 초음파 시스템에서는 초음파 송, 수신 센서와 RF 모듈을 조합하여 사용한다. 즉, 이동 로봇은 RF 송신기  $TX$ 와 각각의 초음파 발생기에 부착되어 있는 RF 수신기  $RX_1 \sim RX_4$ 를 통해 순차적으로 초음파 발생을 제어하여 혼신을 방지하며, 동시에 초음파 발생기와 수신 센서를 동기화하여 이동 로봇 자신의 위치를 측정한다. 그림 1에서  $h_{f,1} \sim h_{f,4}$ 는  $T_1 \sim T_4$ 과  $P_f$ 까지 거리를 나타내며, 그림에 표시하지는 않았지만 앞으로  $T_1 \sim T_4$ 과  $P_r$ 까지 거리는  $h_{r,1} \sim h_{r,4}$ 로 나타낸다. 본 논문에서는 초음파 발생기의 개수를 4개로 하였지만 작업 공간의 크기나 형태를 고려하여 필요에 따라 임의로 확장할 수 있다. 이동 로봇의 중심점을  $P = [x, y, z_c]^t$ 라 할 때, 초음파 수신 센서의 위치,  $P_f = [x_f, y_f, z_c]^t$ 과  $P_r = [x_r, y_r, z_c]^t$ 는 다음과 같다:

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

여기서  $l$ 은 이동 로봇 중심점  $P$ 와 초음파 센서들 사이의 거리를 의미하며,  $\theta$ 는 이동 로봇의 방향각을 나타낸다. 앞으로 이동 로봇의 운동 공간은 평면으로 가정하고, 위치 벡터에 있어서  $z$  성분은 생략하기로 한다.

## III. 이동 로봇의 자기 위치 추정을 위한 확장 칼만

### 필터 알고리즘 및 주행 제어 알고리즘

칼만 필터는 관측 방정식을 이용하여 시스템의 상태변수를 추정하는데 사용되는 대표적인 최적 추정 알고리즘입니다. 확장 칼만 필터는 칼만 필터를 비선형 시스템에 적용한 것입니다. 본 논문에서는 초음파 수신센서를 통해 받아들인 거리정보로부터 이동 로봇의 위치를 추정하기 위하여 확장 칼만 필터를 사용하였습니다. 그리고 본 논문에서는 차동 구동 바퀴를 갖는 이동 로봇을 대상으로 한다. 이산 시간 영역에서 차동형 로봇의 위치  $r = [x, y]^t$  및 방향각  $\theta$ 을 포함하는 이동 로봇 자세의 운동 기구학은 다음과 같이 표현된다[10]:

여기서 아래 첨자  $k$ 는 시간을 의미하며,  $T$ 는 샘플링 간격,  $v_k$ 와  $w_k$ 는 구동 입력으로서 각각 선속도와 회전 각

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_k + T v_k C\theta_k \\ y_k + T v_k S\theta_k \end{bmatrix} & \text{if } w_k = 0 \\ \begin{bmatrix} x_k + \rho_k C\theta_k S(T w_k) \\ -\rho_k S\theta_k (1 - C(T w_k)) \end{bmatrix} & \text{if } w_k \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + T w_k$$

속도, 그리고  $\rho_k = \frac{v_k}{w_k}$ 는 회전반경을 나타낸다. 차동형

이동 로봇의 경우, 좌우 구동 바퀴의 회전 각속도  $\omega_{r,k}$ ,  $\omega_{l,k}$ 와 (2)의 구동 입력  $v_k$ ,  $w_k$  사이의 관계식은 다음과 같다[11]:

$$\begin{aligned} v_k &= \frac{R}{2}(\omega_{r,k} + \omega_{l,k}) \\ w_k &= \frac{R}{w_b}(\omega_{r,k} - \omega_{l,k}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $R$ 은 좌우 바퀴의 반지름이며,  $w_b$ 는 양 바퀴 사이의 간격이다.

(1)과 (2)로부터 다음과 같이 이동 로봇 상에 놓여있는 두 초음파 수신 센서 위치의 운동 방정식을 얻을 수 있다:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{f,k+1} &= f_f(\mathbf{r}_{f,k}, \mathbf{u}_k, \mathbf{q}_k) \\ &= \begin{cases} \begin{bmatrix} x_{f,k} + T v_k C\theta_k + q_{1,k} \\ y_{f,k} + T v_k S\theta_k + q_{2,k} \end{bmatrix} & \text{if } w_k = 0 \\ \begin{bmatrix} x_{f,k} - (lC\theta_k + \rho_k S\theta_k)(1 - C(T w_k)) \\ + (-lS\theta_k + \rho_k C\theta_k)S(T w_k) + q_{1,k} \\ y_{f,k} + (-lS\theta_k + \rho_k C\theta_k)(1 - C(T w_k)) \\ + (lC\theta_k + \rho_k S\theta_k)S(T w_k) + q_{2,k} \end{bmatrix} & \text{if } w_k \neq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{r,k+1} &= f_r(\mathbf{r}_{r,k}, \mathbf{u}_k, \mathbf{q}_k) \\ &= \begin{cases} \begin{bmatrix} x_{r,k} + T v_k C\theta_k + q_{1,k} \\ y_{r,k} + T v_k S\theta_k + q_{2,k} \end{bmatrix} & \text{if } w_k = 0 \\ \begin{bmatrix} x_{r,k} - (lC\theta_k + \rho_k S\theta_k)(1 - C(T w_k)) \\ + (-lS\theta_k + \rho_k C\theta_k)S(T w_k) + q_{1,k} \\ y_{r,k} + (-lS\theta_k + \rho_k C\theta_k)(1 - C(T w_k)) \\ + (lC\theta_k + \rho_k S\theta_k)S(T w_k) + q_{2,k} \end{bmatrix} & \text{if } w_k \neq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4b)$$

여기서  $\mathbf{r}_f = [x_f, y_f]^t$  와  $\mathbf{r}_r = [x_r, y_r]^t$ 는 각각 전, 후 초음파 센서의  $x-y$  평면상 위치를 나타내며,  $\mathbf{u}_k = [v_k, w_k]^t$ 는 제어입력을 의미하고,  $\mathbf{q}_k = [q_{1,k}, q_{2,k}]^t$ 는 평균값 0과 분산  $\mathbf{Q}$ 를 갖는 가우시안 잡음, 즉,  $\mathbf{q}_k \sim N(0, \mathbf{Q})$ 이다.

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

$$\begin{aligned} z_{f,k} &= h_f(\mathbf{r}_{f,k}, v_k) \\ &= \{(x_{f,k} - x_i)^2 + (y_{f,k} - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2\}^{1/2} + \nu_k \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} z_{r,k} &= h_r(\mathbf{r}_{r,k}, v_k) \\ &= \{(x_{r,k} - x_i)^2 + (y_{r,k} - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2\}^{1/2} + \nu_k \end{aligned} \quad (5b)$$

여기서 관측 잡음  $\nu_k$ 는 가우시안, 즉  $\nu_k \sim N(0, G)$ 이며, 아래 첨자  $i$ 는 초음파 발생기  $T_1 \sim T_4$ 들 중에서  $k$  시점에 이동 로봇에 의해서 호출된 것을 나타낸다.

이제, (4a)과 (5b)로 이루어지는 앞쪽 초음파 센서 위치에 관한 운동 방정식 및 관측 방정식에서 위치를 추정하기 위한 확장 칼만 필터 알고리즘은 다음과 같이 기술할 수 있다:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{r}}_{f,k+1} &= f_f(\hat{\mathbf{r}}_{f,k}, \mathbf{u}_k, 0) \\ \hat{\mathbf{V}}_{f,k+1} &= A_{f,k} \mathbf{V}_{f,k} A_{f,k}^t + \mathbf{Q} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K_{f,k} &= \mathbf{V}_{f,k}^{-1} (\mathbf{H}_{f,k} \mathbf{V}_{f,k}^{-1} \mathbf{H}_{f,k}^t + G)^{-1} \\ \mathbf{V}_{f,k} &= (I - K_{f,k} \mathbf{H}_{f,k}) \mathbf{V}_{f,k} \\ \hat{\mathbf{r}}_{f,k} &= \hat{\mathbf{r}}_{f,k} + K_{f,k} (z_{f,k} - h_f(\hat{\mathbf{r}}_{f,k}, 0)) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\hat{\mathbf{r}}_{f,k}$  와  $\hat{\mathbf{V}}_{f,k}$ 는 각각  $\mathbf{r}_{f,k}$ 의 칼만 필터 보정 전(a priori)과 보정 후(a posteriori) 추정 값이고,  $\mathbf{V}_{f,k}$  와  $\mathbf{V}_{f,k}^{-1}$ 는 다음 식으로 정의되는 오차 공분산(error covariance) 행렬이다.

$$\mathbf{V}_{f,k} = E[(\mathbf{r}_{f,k} - \hat{\mathbf{r}}_{f,k})(\mathbf{r}_{f,k} - \hat{\mathbf{r}}_{f,k})^t] \quad (8)$$

$$\mathbf{V}_{f,k}^{-1} = E[(\mathbf{r}_{f,k} - \hat{\mathbf{r}}_{f,k})(\mathbf{r}_{f,k} - \hat{\mathbf{r}}_{f,k})^t]$$

또한  $K_{f,k}$ 는 칼만 필터의 이득이며, 행렬  $A_{f,k}$ 와  $\mathbf{H}_{f,k}$ 는 각각 비선형 함수  $f_f(\cdot)$ 과  $h_f(\cdot)$ 의 상태 벡터  $\mathbf{r}_f$ 에 대한 자코비안 행렬로서 다음 식으로 주어진다:

$$\begin{aligned} A_{f,k} &= \frac{\partial f_f(\hat{\mathbf{r}}_{f,k}, \mathbf{u}_k, 0)}{\partial \mathbf{r}_f} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{f,k} &= \frac{\partial h_f(\hat{\mathbf{r}}_{f,k}, 0)}{\partial \mathbf{r}_f} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{x_{f,k} - x_i}{D_{f,i}} & \frac{y_{f,k} - y_i}{D_{f,i}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

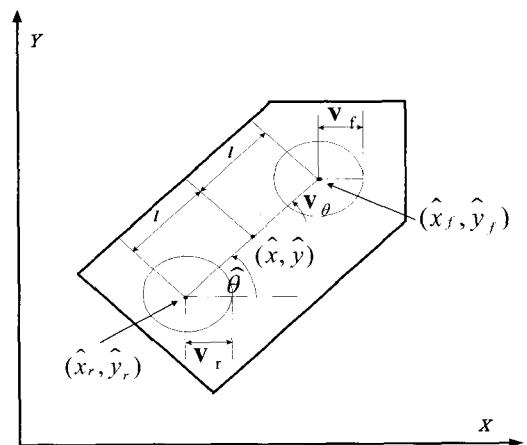


그림 2. 위치 및 방향각 추정 오차.

Fig. 2. Estimation error of position and heading angle.

여기서  $D_{f,i}$ 는 다음과 같다:

$$D_{f,i} = \{(x_{f,k} - x_i)^2 + (y_{f,k} - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

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

이제 앞에서 얻어진  $\hat{r}_{f,k}$ 와  $\hat{r}_{r,k}$ 를 기반으로 이동 로봇 중심점의 위치는 (12a)식으로 얻을 수 있으며 방향각은 두 개의 수신 센서에서 얻은 값을 가지고 (12b)식에서 보이는 바와 같이 추정할 수 있다:

$$\hat{x}_k = \frac{\hat{x}_{f,k} + \hat{x}_{r,k}}{2} \quad (12a)$$

$$\hat{y}_k = \frac{\hat{y}_{f,k} + \hat{y}_{r,k}}{2}$$

$$\theta_k = \tan^{-1} \frac{\hat{y}_{f,k} - \hat{y}_{r,k}}{\hat{x}_{f,k} - \hat{x}_{r,k}} \quad (12b)$$

앞쪽 초음파 센서와 뒤쪽 초음파 센서 위치 추정 오차 공분산의 크기가 같다고 할 때, 이동 로봇 중심점의 위치 및 방향각 추정 오차의 공분산은 그림 2에서 알 수 있듯이 다음과 같다:

$$\begin{aligned} V_k &= E[(r_k - \hat{r}_k)(r_k - \hat{r}_k)^t] \\ &= V_{f,k} (= V_{r,k}) \\ V_{\theta,k} &= E[(\theta_k - \vartheta_k)^2] \\ &\approx \tan^{-1} \frac{V_{f,k}}{l} \end{aligned} \quad (13)$$

이는  $l$ , 즉 이동 로봇 중심점으로부터 초음파 수신 센서까지의 간격이 클수록 방향각 추정이 보다 정확해질 수 있음을 의미한다.

이제 (12-1)과 (12-2)에 의해 얻어진 자세 추정 결과를 기반으로 주어진 목표점  $r_g = [x_g, y_g]^t$ 에 이르기 위한 제어

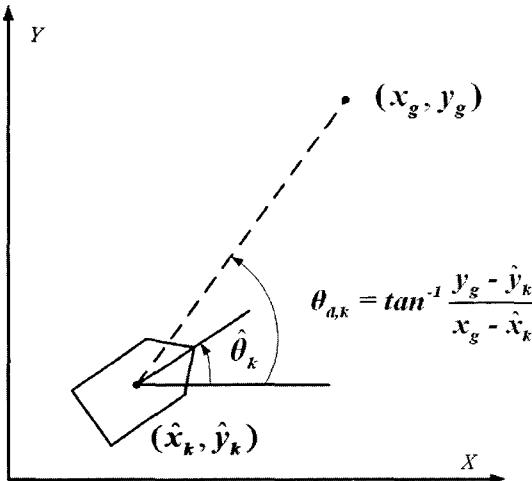


그림 3. 주행 제어 알고리즘.

Fig. 3. Navigation control algorithm.

입력을 다음과 같이 간단히 설정한다:

$$\begin{aligned} v_k &= c \\ w_k &= k_\theta (\theta_{d,k} - \theta_k) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $c$ 와  $k_\theta$ 는 양의 상수이며,  $\theta_{d,k}$ 는 주어진 목표

점 위치에 대해  $\theta_{d,k} = \tan^{-1} \frac{y_g - \hat{y}_k}{x_g - \hat{x}_k}$ 이다. (14)는 그림

3에 보이듯이 이동 로봇의 속력은 일정하게 유지하고 단지 방향에 대한 오차에 대해서 양 바퀴의 속도차를 이용하여 로봇의 방향이 목표점을 향하도록 하는 접근하는 주행 방식이다[11].

#### IV. 실험 및 고찰

본 논문에서 제안한 전역 초음파 시스템을 검증하기 위하여 다음 그림 4에 보이는 높이, 길이, 폭이 각각 2,500 mm, 1,500 mm, 1,500 mm인 실험 장치를 제작하였다.

이동 로봇 운동 공간의 천장에 보이는 4개의 꼭지점 부근의 좌표값인 (15)의 위치에 그림 4에서 보이는 RF 모듈이 결합된 초음파 발생기를 설치하였다.

$$\begin{aligned} T_1 &= [10.0, 10.0, 2360.0]^t \\ T_2 &= [1427.0, 5.0, 2370.0]^t \\ T_3 &= [1423.0, 1445.0, 2357.0]^t \\ T_4 &= [0.0, 1380.0, 2370.0]^t \end{aligned} \quad (15)$$

초음파 발생기로는 Polaroid 600 센서와 Polaroid 6500 드라이버를 사용하였으며, PIC16F873 마이크로프로세서를 이용하여 RF 송수신용 TX, RX 모듈과 결합하였다. Polaroid 600

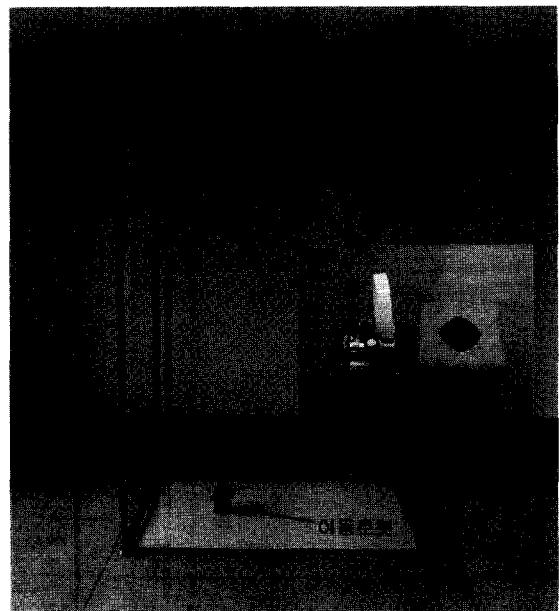


그림 4. 실험 장치.

Fig. 4. Experimental setup.

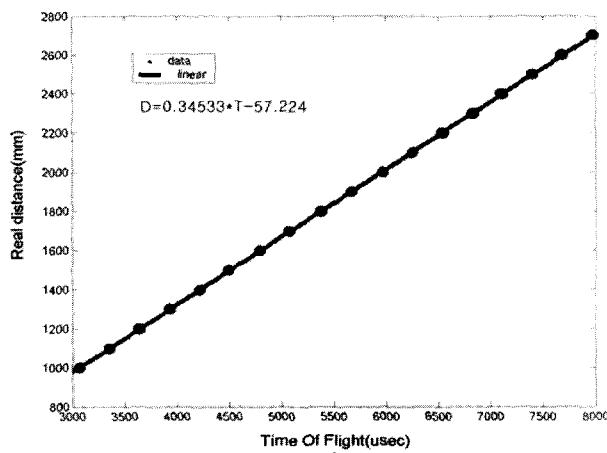


그림 5. 실제 거리 대 초음파 체공 시간.

Fig. 5. Real distance vs. ultrasonic time of flight.

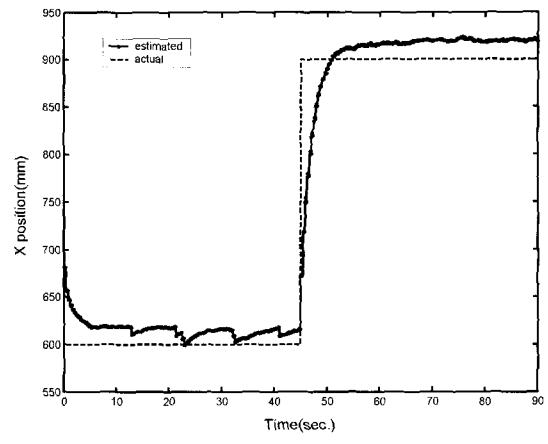
초음파 센서는 동작 주파수가  $50\text{ kHz}$ 이며 최대감지거리가  $10\text{ m}$ 에 이르므로 산업용 거리 측정기에 많이 사용된다.

초음파는 온도나 주위 환경 요인에 따라 변화가 일어나며 같은 공간, 같은 조건하에서도 약간의 오차를 가지기 때문에 사용한 초음파 발생기의 data sheet의 정보외에 최소한의 오차를 가진 정확한 실험을 하기 위하여 거리에 따른 초음파 체공시간을 측정하여 직선 식을 구하고 분산 값을 구하였다. 다음 그림은 초음파 체공시간에 따른 실제 거리 값 산정을 위한 사전 실험 데이터이다.

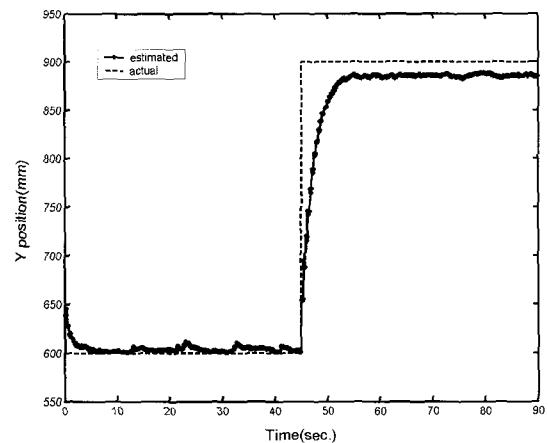
다음 그림 6은 위에서 설명한 전역 초음파 시스템의 자세 추정 성능을 검증하기 위한 실험 결과이다. 이동 로봇을 초기 위치,  $(x, y) = (600, 600)$ 에  $0\text{ rad}$ .의 방향 각으로 놓고, 45초가 지난 시점에 위치와 방향각을 각각

$(900, 900)$ 과  $\frac{\pi}{2}$ 로 변경하고 자세 추정 결과를 관측하였다. 여기서 길이와 각도의 단위는 각각  $\text{mm}$ 와  $\text{radian}$ 이다. 자세 추정의 초기 값은 임의로  $(650.0, 650.0)$ 과  $0\text{ rad}$ .로 설정하였다. 그림에서 보듯이 정상 상태에서 위치 오차는 대략  $25\text{ mm}$  정도가 되었다. 이동 로봇의 중심점에서 초음파 수신 센서까지의 간격을  $l = 75\text{ mm}$ 로 하였으므로 방향각 추정 오차의 크기는 그림 6 (c)에서와 같이 근사적으로  $\tan^{-1} \frac{25}{75} \approx 0.32\text{ rad}$ .가 되었다. 확장 칼만 필터

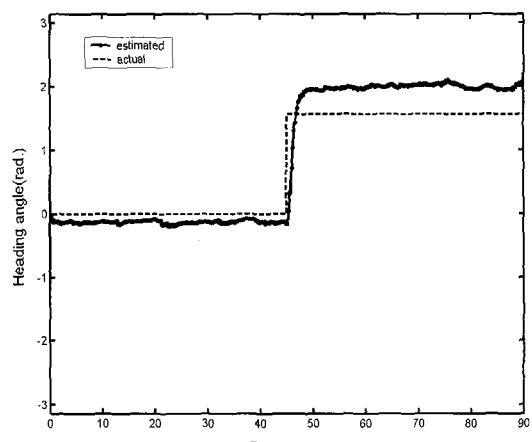
자세 추정 알고리즘에서 상태 잡음의 크기  $Q$ 와 측정 잡음의 크기  $G$ 는 각각에 대한 상대적인 신뢰성의 의미를 가진다. 즉  $\|Q\| > G$ 인 경우, 이는 (5-1), (5-2)에 의한 외부 센서 측정 데이터가 (4-1), (4-2)로 주어지는 운동 방정식과 내부 센서 데이터 보다 신뢰도가 큼을 의미한다. 일반적으로 외부 센서 측정 잡음의 크기는 앞서 서술한 (17)과 같이 사전 실험을 통해 얻을 수 있지만, 구동 모터의 엔코더나 미끄럼등에 의한 상태 잡음의 크기는 얻기가 매우 어렵다. 본 실험에서는 전역 초음파 시스템에 의한 자세 추정에 보다 높은 신뢰성을 주기 위해,  $G = 1.80$ , 그리고  $Q$ 는 임의로  $Q = [100.0, 100.0]'$ 로 설정하였다.



(a) x 축 위치 추정



(b) y 축 위치 추정



(c) 방향각 추정

그림 6. 이동 로봇의 자세 추정.

Fig. 6. Posture estimation of mobile robot.

다음은 전역 초음파 시스템에 의한 자세 추정을 기반으로 이동 로봇 자율 주행 성능을 실험하였다. 로봇의 초기 위치

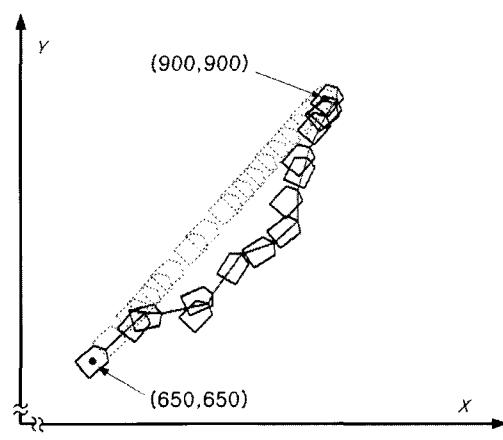
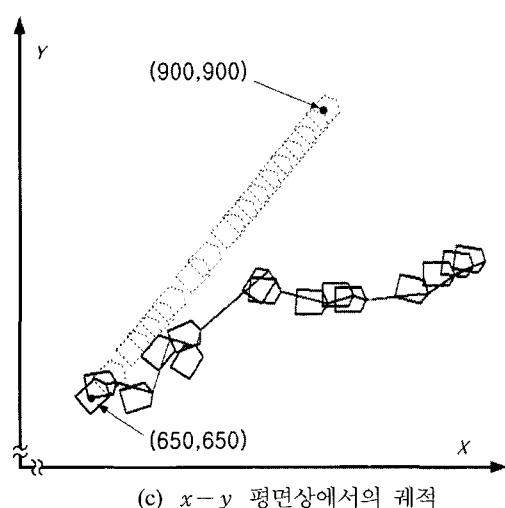
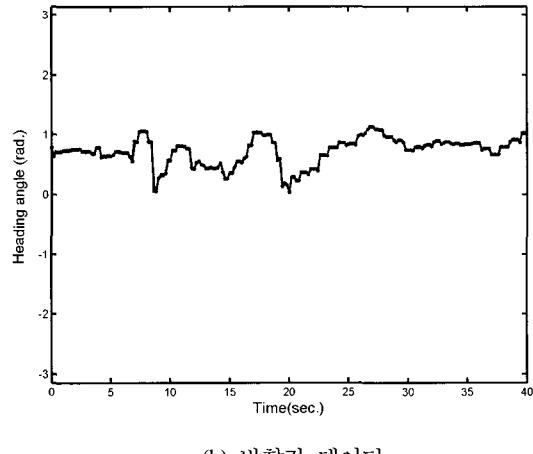
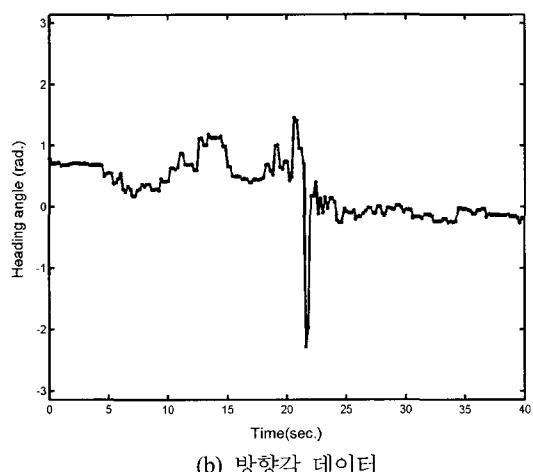
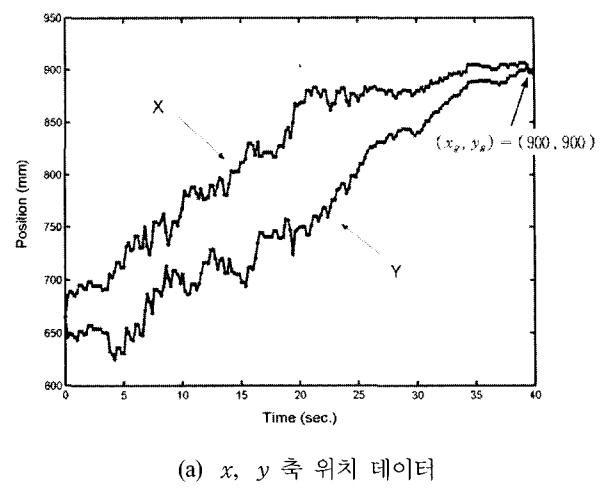
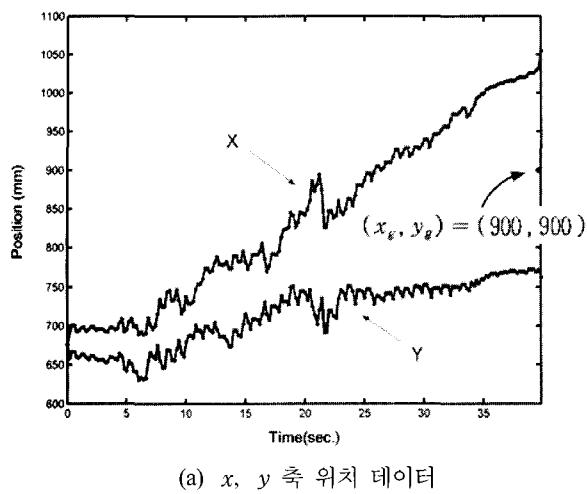


그림 7. 전역 초음파 시스템을 사용하지 않은 주행.

Fig. 7. Navigation without global ultrasonic system.

및 방향각을  $(x, y) = (650, 650)$ ,  $\theta = \frac{\pi}{4}$  에 두고, 목표 점,  $(x_g, y_g) = (900, 900)$ 에 이르도록 하였다. 이는 단순히 점,  $(650, 650)$ 과 점,  $(900, 900)$ 을 잇는 직선상

그림 8. 전역 초음파 시스템을 사용한 주행.

Fig. 8. Navigation with global ultrasonic system.

을 일정한 방향각,  $\frac{\pi}{4}$ 로 직선 주행하는 것을 의미한다.

이상적인 경우 외부 센서의 도움없이 이동 로봇 좌우 구동 바퀴의 회전 각속도,  $\omega_{r,k}$ 와  $\omega_{l,k}$ 를 일정하게 유지시키면 목표점에 도달할 수 있다. 다음 그림 7은 좌우 양 바퀴의 회전 각속도,  $\omega_{r,k}$ 와  $\omega_{l,k}$ 를 일정하게 유지시킨 주행

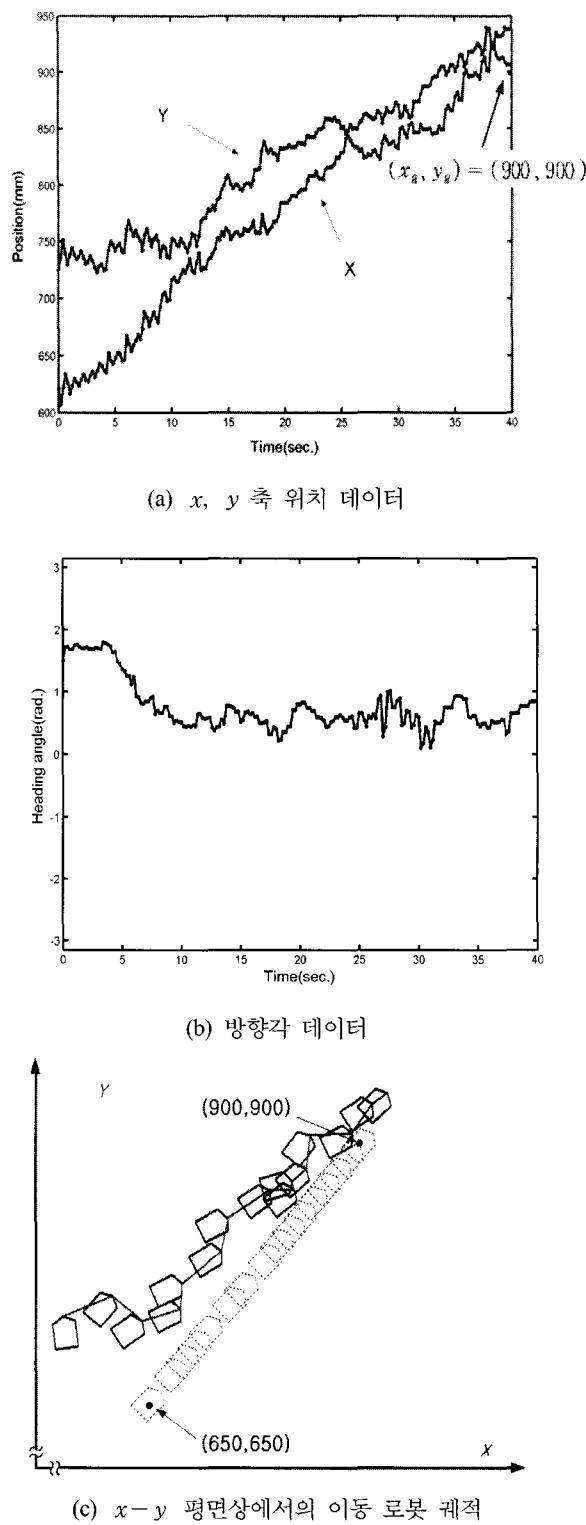


그림 9. 임의의 위치에서의 이동로봇의 위치 추정.

Fig. 9. Position estimation in any position.

결과이다. 여기서 궤적 데이터는 전역 초음파 시스템에 의해 획득하였다. 좌우 바퀴 크기의 불균형이나 지면과의 미끄러짐 등의 모델링 오차 때문에 좌우 바퀴의 회전 각속도를 일정하게 유지시키더라도 그림에서 볼 수 있는 것처럼 직선상의 정해진 목표점에 도달하지 못하였다. 아래 그림에서의 점

선으로 표시된 것은 명령 궤적을 의미하며, 굵은 선으로 표시된 궤적 데이터는 전역 초음파 시스템에 의해 획득한 것이다. 물론 전역 초음파 시스템에 의한 자세 추정은 약간의 오차를 가지므로 실제 움직인 궤적은 그래프 결과와 다를 수 있다.

위 그림 8은 동일하게 주어진 시작점과 목표점에 대해서 전역 초음파 시스템에 의한 실시간 자세 추정을 기반으로 (14)와 같이 제어 입력을 생성한 주행 실험 결과이다.

그림에서 볼 수 있는 것처럼 중간에서 오차를 극복하고 주어진 목표점에 도달하였으며 목표점에서의 방향각도 근사적으로  $\frac{\pi}{4}$  가 되었음을 볼 수 있다.

다음 그림 9는 이동 로봇의 초기 방향각을 목표점과 어긋나도록 두고 목표점 추종 성능을 실험한 결과이다.

위에서 초기 위치와 방향각은  $(x, y) = (600, 750)$ ,  $\theta = \frac{\pi}{2}$  로 하였으며, 목표점을  $(x_g, y_g) = (900, 900)$ 로 하였다. (14)의 주행 제어 입력식에 의해서 이동 로봇의 방향각은 근사적으로 시작점과 목표점을 잇는 직선의 방향각이 되므로 목표점에서  $\theta_g \approx \tan^{-1}(\frac{900 - 750}{900 - 600}) \approx 0.46 \text{ rad.}$  가 되어야 한다.

위 그림에서 볼 수 있는 것처럼 50 mm 이하의 오차 한계 내에서 이동 로봇이 목표점에 이르렀음을 알 수 있다.

본 실험 과정을 통하여 초음파 발생기 범폭의 한계 때문에 초음파 도달 영역이 한정되는 문제점이 관찰되었다. 상용화된 일반적인 초음파 센서들의 경우는 거리를 측정하고자 하는 쪽에서 초음파 발생과 반사파 수신을 같이 처리하므로 거리 측정의 정밀도를 높이기 위해 범폭이 좁을수록 좋은 성능을 갖는다고 할 수 있다. 그러나 본 전역 초음파 시스템의 경우는 초음파 발생과 수신이 서로 분리된 부분에서 처리되므로 초음파 수신 가능 영역을 넓히기 위해 보다 초음파 범폭이 넓을수록 바람직하다.

## V. 결론

본 논문에서는 전역 초음파 시스템에서 확장 칼만 필터를 이용한 새로운 이동 로봇 자세 추정 알고리즘을 제안하고 이를 기반으로 하는 자율 주행 성능을 실험을 통해 검증하였다. 전역 초음파 시스템은 이동 로봇 작업 공간의 몇 개 고정 지점에 설치된 초음파 발생기와 이동 로봇상의 초음파 수신 센서, 그리고 초음파 발생을 제어하기 위한 RF 송, 수신 모듈을 포함한다. 이동 로봇이 RF 송신 모듈을 통하여 초음파 발생을 순차적으로 동기 제어하므로써 초음파 수신 센서와 초음파 발생기 사이의 거리를 능동적으로 측정할 수 있고, 측정된 거리 데이터에 따라 이동 로봇 자신의 위치 및 방향각을 실시간으로 추정하는 것이다. 이동 로봇은 전역 초음파 시스템에 의한 실시간 자세 추정 값을 기반으로 운동 방정식 모델의 불확실성이나 지면과의 미끄러짐에 의한 궤적 추종 오차를 보정하고 주어진 목표점까지 자율 주행할 수 있다. 실험을 통하여 위치 추정 오차 및 방향각 추정 오차가 각각 약 25 mm이하, 0.32 rad. 이하임을 확인하였으며, 주어진 목표점에 도달하기 위한 자율 주행 성능이

전역 초음파 시스템을 사용하지 않고, 내부 센서에만 의존하는 경우에 비해 매우 우수함을 확인하였다. 방향각 추정 오차는 이동 로봇에 설치된 두 초음파 수신 센서간의 간격에 반비례하므로 설치 간격을 크게 함으로써 오차의 크기를 조정할 수 있다.

또한 문제를 간단히 하기 위하여 이동 로봇의 주행 공간에 장애물이 없는 이상적인 상황을 가정하였다. 그러나 주변 장애물이 있는 경우는 초음파가 도달하지 않는 음영 지역이 생길 수 있으며 장애물에 의한 초음파 다중 경로 오차가 발생할 수 있다. 본 실험에서는 초음파 발생기의 개수를 4개로 하였으나 장애물이 있는 경우에 음영 지역의 해소와 같은 필요에 따라 초음파 발생기의 개수를 확장하므로써 주변 물체가 있는 복잡한 환경에서의 문제를 해결할 수 있을 것이다. 그리고 RF를 이용하여 초음파 발생기를 제어하기 때문에 초음파나 적외선과 달리 같은 공간 안에서 이동 물체가 움직이든 경우에도 통신장애 문제를 해결할 수 있다.

#### 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 H. Durrant-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] 범희락, 조형석, "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] S. Haihang, G. Muhe, H. Kezhong "An integrated GPS/CEPS position estimation system for outdoor mobile robot", *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Intelligent Processing Systems*, pp. 28-31, 1997.
- [7] 이수영, 진재호, "전역 초음파 센서 시스템을 이용한 이동 로봇의 자기 위치 추정", 제어자동화시스템공학회 논문집, 제9권, 제2호, pp.145-151, 2003.
- [8] Roman Kuc and M. W. Siegel, "Physically based simulation model for acoustic sensor robot navigation", *IEEE Tr. on Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 9, no. 6, pp.766-777, 1987.
- [9] 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.
- [10] D. Fox, W. Burgard and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, March, pp. 23-33, 1997.
- [11] P. Turennout, G. Honderd and L. Schelven, "Wall-following control of a Mobile Robot" *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 280-285, 1992.

#### 황병훈



1975년 8월 25일생, 2002년 2월 전북대학교 전자정보공학부 졸업(공학사), 2004년 2월 동대학원 메카트로닉스공학과 대학원 졸업, 관심분야는 자동화 시스템, 시스템설계, 이동 로봇.

#### 이수영

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. 1999년 9월-현재 국립전북대학교 전자정보공학부 조교수, 관심분야는 인간형 로봇, 이동 로봇, 지능 제어.

