

구조화된 실내 환경에서 초음파센서를 이용한 모바일 로봇 실시간 localization 기법

Real-time Localization of Mobile Robot Using Ultrasonic Sensor in Structured Indoor Environment

이 만 희*, 조 황
(Man-Hee Lee and Whang Cho)

Abstract : In order to increase the autonomous navigation capability of a mobile robot, it is very crucial to develop a method for the robot to be able to recognize a priori known structured environmental characteristics. This paper proposes an ultrasonic sensor based real-time method for recognizing a priori known structured indoor environmental characteristics like a wall and corner. Unlike the methods reported in the literature the information obtained from the sensor can be processed in real-time by extended Kalman filter to update estimations of the position and orientation of robot with respect to known environmental characteristics.

Keywords : autonomous mobile robot, stereo ultrasonic sensor, extended Kalman filter, real-time localization

I. 서론

로봇이 자율적으로 주위환경 특징들을 인식하여 획득한 정보를 기초로 자기의 위치 및 방향 정보를 산출하는 localization 기술은 로봇의 자율주행 능력을 결정하는데 매우 중요한 역할을 하기 때문에 다양한 센서를 이용하여 주위 환경을 효과적으로 인식하는 기술 개발은 매우 중요하다. 주위환경 인식을 위해서는 접촉센서, 적외선 센서, 초음파 센서, 레이저 등이 사용되고 있으나 이들 중 측정 거리 오차가 적고 비용이 저렴한 초음파 센서를 사용한 방법들이 활발하게 연구되고 있다[1,2].

한편 실내 환경과 같이 벽면, 모퉁이, 모서리 등과 같은 기하학적 특징 요소들로 구조화가 잘 되어있는 주행환경의 경우 여러 개의 초음파 센서를 사용함으로써 환경을 인식할 수 있는 방법들이[3-6] 제안되었다. [3]에서는 한 위치에 서 다수의 초음파센서를 사용하여 cross-talk를 피해 주위 장애물 유무를 파악하는 방법을 제안하였는데 로봇주위의 장애물까지의 거리 정보만을 얻을 수 있고 따라서 장애물 유무만을 판별 할 수 있는 것이 단점이다. [4]에서는 한 쌍의 송수신 일체형 초음파 센서를 8cm 간격으로 배치하여 측정하는 방식을 사용하여 반사체의 형태 및 방향 정보를 획득할 수 있는 알고리즘을 제안하였는데 제안된 알고리즘이 센서 오차에 예민한 단점을 가지고 있다. [5]에서는 초음파 센서를 이용하여 벽면, 모퉁이, 모서리 같은 반사체와 관련된 RCD 정보를 추출하는 방법을 제안하였는데 이 방법은 로봇이 연속적으로 움직이면서 센서정보를 활용하기가 불가능하여 실용성이 떨어진다고 할 수 있다. 한편 [6]에서는 두 쌍의 초음파 송수신기를 사용하여 반사체와 관

련된 거리 및 방향 정보를 얻어내는 방법을 제안하였다. 본 논문에서 이 구조를 단순화 하여 1개의 송신기와 2개의 수신기를 송신기를 중심으로 대칭적으로 배치된 스테레오 초음파 센서 구조를 제안하고 이를 이용하여 벽면, 모퉁이, 모서리까지의 거리 및 방향을 산출할 수 있는 알고리즘을 유도하였다.

본 논문은 초음파 센서 시스템을 이용하여 운행 환경에 추가적인 장치를 부착하지 않고 로봇에 장착된 스테레오 초음파 센서만을 이용하여 실시간으로 로봇의 위치 및 방향 추정을 할 수 있는 효율적인 localization 기술을 제안한다[9]. 여기서 실시간 기술이란 음파의 전파속도의 한계를 고려하여 로봇 주행 경로를 계획함으로써, 초음파 센서 데이터를 수집하고 처리하기 위하여 로봇이 가다 서다를 반복할 필요가 없이 연속적인 운동을 방해하지 않고 on the fly로 적용이 가능한 기술을 의미한다.

제안된 초음파 시스템은 한 개의 송신기를 두 개의 수신기 사이에 설치하여 반사체에 관한 두 가지 기하학적 데이터를 산출하도록 구성되었다. 그중 하나는 반사체와 송신기와의 최단 거리이며 나머지 하나는 반사체와 초음파 센서와의 상대적 방향이다. 로봇은 정합과정을 통하여 이 두 정보를 이미 위치 및 방향이 알려진 벽면 또는 모퉁이와 같은 환경 특징들에 대응시킴으로써 주어진 환경 내에서 상대적으로 자신의 위치 및 방향을 측정할 수 있게 된다. 이렇게 측정된 로봇의 위치 및 방향정보는 확장 칼만 필터 실시간 적용에 필요한 시스템 모델과 계측모델 중 후자로 활용될 수 있으며, 전자로는 로봇 바퀴 등에 장착된 엔코더 정보를 이용하는 추측항법 모델을 이용한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서 벽면, 모퉁이, 모서리 등에 대한 스테레오 초음파센서 반사 모델을 도입하고, 3절에서는 이동로봇의 운동학적 구조에 대한 모델링을 설명하고, 4절에서 이들을 이용한 계측 모델을 유도

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 7. 5., 채택확정 : 2005. 10. 27.

이만희, 조황 : 팽운대학교 정보 제어 공학과

(tely2k@korea.com/robot@daisy.kw.ac.kr)

하며, 5절에서는 제한된 초음파 시스템을 이용한 실험 결과를 제시하고, 마지막으로 6절에서 결론을 도출한다.

II. 스테레오 초음파센서 반사 모델링

1. 스테레오 초음파센서 벽면 반사 모델

초음파 센서를 이용하여 물체와의 거리를 측정하는 방법은 초음파가 물체에 부딪혀 되돌아오는 시간, 음파 비행시간(Time of Flight, TOF)으로 거리를 계산하는 방법이다. 그러나 초음파 센서의 단점인 방향각 부정확성, 외란 민감성, 반사각 민감성 등은 초음파 센서를 사용하는데 우선적으로 고려해야 할 문제들이다[8]. 본 논문에서는 이러한 초음파 센서의 단점인 저조한 지향성 문제를 극복하고 음파의 정반사 특성을 적극적으로 이용할 수 있도록 스테레오 초음파 센서 구조를 제안하고자 한다.

본 논문에서 제안한 센서 시스템은 그림 1에서 보여지는 바와 같이 이 두 개의 수신기 R_1 과 R_2 사이에 송신기 T 가 배치한 스테레오 구조로 되어 있으며 송신기와 수신기 사이의 거리는 s 이다.

송신기 T 에서 음파를 송신하여 수신기 R_1 과 R_2 로 수신된 거리는 각각 r_1 과 r_2 이며, 송신기 T 와 벽과의 최단 거리는 d , 센서 모듈의 벽면에 대한 상대적 방향은 θ 로 구성 된다. 그림 1에서

$$r_1 = r_{11} + r_{12} = \overline{TB} + \overline{BR_1} = \overline{T'B} + \overline{BR_1} \quad (1)$$

$$r_2 = r_{21} + r_{22} = \overline{TA} + \overline{AR_2} = \overline{T'A} + \overline{AR_2} \quad (2)$$

한편 $\triangle TR_1T'$, $\triangle TR_2T'$ 에서 r_1 , r_2 를 표현하면 다음과 같다.

$$r_1^2 = (r_{11} + r_{12})^2 = s^2 + 4d^2 + 4sd \cdot \sin\theta \quad (3)$$

$$r_2^2 = (r_{21} + r_{22})^2 = s^2 + 4d^2 - 4sd \cdot \sin\theta \quad (4)$$

(3)과 (4)로부터 송신기와 벽과의 최단거리 d 와 센서 모듈의 벽면에 대한 상대적 방향 θ 는 다음과 같이 각각 얻어질 수 있다.

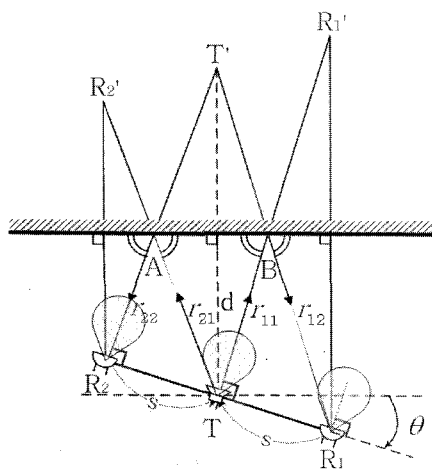


그림 1. 스테레오 초음파센서의 벽면에 대한 정반사.
Fig. 1. Specular reflection of stereo ultrasonic sensor on a wall.

$$d = \frac{1}{2} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{2} - s^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{r_1^2 - r_2^2}{8sd} \right) \quad (6)$$

위 식에서 센서의 오동작을 감지하기 위하여 (5)에서는 괄호안의 값이 양인 조건을, (6)에서는 괄호안의 값의 크기가 1보다 적은 조건을 확인해야 한다. 한편 센서 모듈의 벽면에 대한 상대적 방향 θ 의 부호는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\theta > 0 \text{ if } r_1 > r_2 \quad (7)$$

$$\theta < 0 \text{ if } r_1 < r_2 \quad (8)$$

한편 직각 모퉁이에서의 정반사 모델은 벽면의 경우와 유사한 방법으로 얻을 수 있으며, 초음파 파장보다 곡률 반경이 적은 비교적 뾰족한 모서리 경우에는 송신부를 출발한 음파가 모서리에서 산란된 후 수신부에 도달하는 과정의 모델이 요구된다[9-11].

2. 계측 모델

계측 모델은 로봇의 현재 위치 및 방향에 대한 최적 추정 값들이 주어진 상황에서 로봇에 장착된 센서가 벽, 모퉁이, 또는 모서리를 관측할 때 얻어지는 거리 및 방향 정보에 대한 수학적 모델 식을 의미한다.

그림 2는 지면에 고정된 전역좌표계 (X, Y) 상에 정의된 벽면을 극좌표 형식으로 표현한 결과를 보여 주고 있다. 여기서 P_R 은 좌표계 원점에서 벽면에 대응하는 직선까지의 최단거리를, ϕ 는 전역좌표 X 축에 대한 반사체의 방향을 나타내는 변수로서 벽면의 경우는 P_R 을 정의하는 선과 X 축과의 각도를 나타내며 모퉁이나 모서리의 경우에는 센서의 송신부와 모퉁이 또는 모서리 점을 연결하는 직선의 X 축과의 각도를 나타낸다.

한편, (x_T, y_T) 와 ϕ_T 는 각각 스테레오 초음파 센서의 전역 좌표계에 대한 위치 및 방향을 나타낸다.

그림 2에서 알 수 있듯이 반사체의 방향은 센서의 방향과 측정된 방향 정보를 이용하여 다음과 같이 얻어질 수 있으며

$$\phi = \phi_T + \theta \quad (9)$$

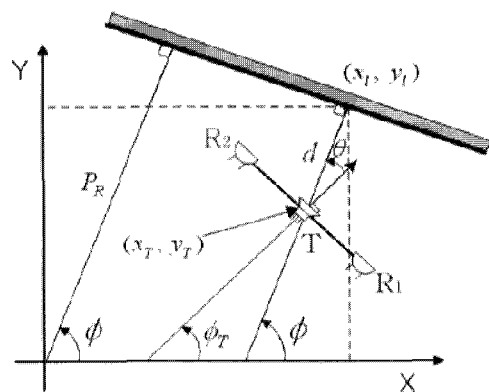


그림 2. 센서 관련 변수들의 정의.
Fig. 2. Definition of variables related with sensor.

센서의 송신부와 반사체와의 최단 거리 점의 위치(x_l, y_l)는 위 결과와 센서의 위치 및 측정된 거리정보를 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_l = x_T + d \cos \phi \tag{10}$$

$$y_l = y_T + d \sin \phi \tag{11}$$

위 결과를 벽면에 대응하는 직선방정식에 대입하고 이를 이용하여 벽면의 전역좌표계 원점으로부터의 최단 거리 P_R 을 얻어내면 다음과 같다.

$$P_R = x_l \cos \phi + y_l \sin \phi \tag{12}$$

그림 3은 로봇에 장착되어 있는 초음파 센서의 위치 및 방향 정보가 로봇 좌표계로부터 전역좌표계로 변환되는 관계를 보여주고 있는데 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$x_T(k) = \hat{x}(k) + x_T' \cos \Phi(k) - y_T' \sin \Phi(k) \tag{13}$$

$$y_T(k) = \hat{y}(k) + x_T' \sin \Phi(k) - y_T' \cos \Phi(k) \tag{14}$$

$$\phi_T(k) = \hat{\Phi}(k) + \phi_T' \tag{15}$$

여기서 ($\hat{x}(k), \hat{y}(k)$)와 $\hat{\Phi}(k)$ 는 k 번째 샘플링 스텝에서의 전역좌표계에 대한 로봇 좌표계 원점의 위치 및 방향 최적 추정치를 나타내며, (x_T', y_T')과 ϕ_T' 는 로봇 좌표계에 상대적으로 고정된 센서의 위치 및 방향을 나타낸다.

(9)와 (15)로부터 벽면의 방향에 대한 계측 모델을 구하면 다음과 같다.

$$\hat{\theta} = \phi - \hat{\Phi}(k) - \phi_T'(k) \tag{16}$$

한편 센서의 송신기와 벽면과의 최단거리에 대한 계측 모델은 그림 3을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{d} = P_v (P_R - x_T(k) \cos \phi - y_T(k) \sin \phi) \tag{17}$$

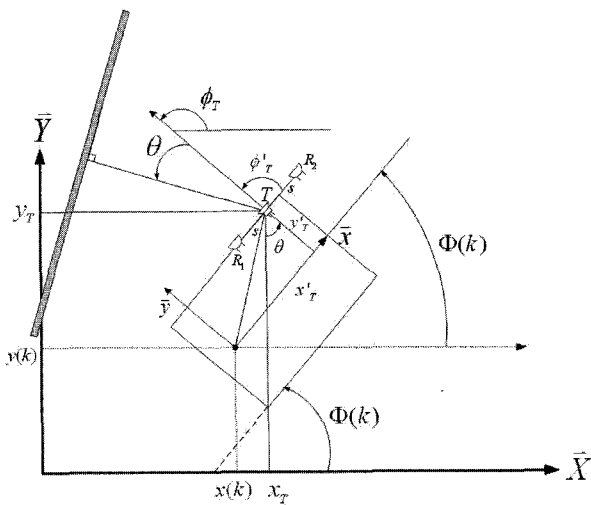


그림 3. 전역 좌표 및 로봇 좌표에 대한 센서 변수.
Fig. 3. Sensor variables w.r.t. robot and global coordinates.

여기서 $x_T(k)$ 와 $y_T(k)$ 는 각각 (13)과 (14)에 주어져 있으며, P_v 는 벽면의 가시성을 나타내는 변수로서 전역좌표계 원점에서 벽면이 보일 경우 +1, 보이지 않을 경우 -1을 갖는다.

한편 모퉁이와 모서리의 계측 모델의 경우에는 센서로부터 얻어지는 방향 정보 θ 는 의미가 없기 때문에 송신기로부터 모퉁이 또는 모서리까지의 최단 거리 정보만을 이용하여 다음과 같이 계측 모델을 구할 수 있다.

$$\hat{d}(k) = \{(x_c - x_T(k))^2 + (y_c - y_T(k))^2\}^{1/2} \tag{18}$$

$$\hat{d}(k) = \{(x_e - x_T(k))^2 + (y_e - y_T(k))^2\}^{1/2} \tag{19}$$

위 식에서 (x_c, y_c)와 (x_e, y_e)는 각각 모퉁이와 모서리의 전역좌표계에 대한 좌표를 나타낸다.

III. 로봇의 운동학적 구조

본 논문에서 실험에 사용한 이동 로봇 시스템은 케스터(caster) 구조의 조향 및 구동이 독립적으로 제어될 수 있는 바퀴 모듈을 활용하는 다륜 조향/구동 시스템이며 운동학적 관계식은 그림 4를 이용하여 아래와 같이 유도될 수 있는데 그림을 단순화하기 위하여 로봇에 장착된 여러 개의 케스터 바퀴 중 대표적으로 i 번째 케스터 바퀴만 표시되었다.

고정좌표축 (\bar{X}, \bar{Y})에 대하여 로봇의 현재 위치와 방향을 다음과 같이 U 로 정의하면

$$U = (x \ y \ \Phi)^T \tag{20}$$

로봇의 운동 벡터 \dot{U} 는 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\dot{U} = (\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\Phi})^T \tag{21}$$

로봇 운동을 이동 좌표축 (\vec{i}, \vec{j})에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{W} = (V_{ox} \ V_{oy} \ \Omega)^T \tag{22}$$

\dot{W} 과 \dot{U} 과는 다음과 같은 관계식을 만족하며

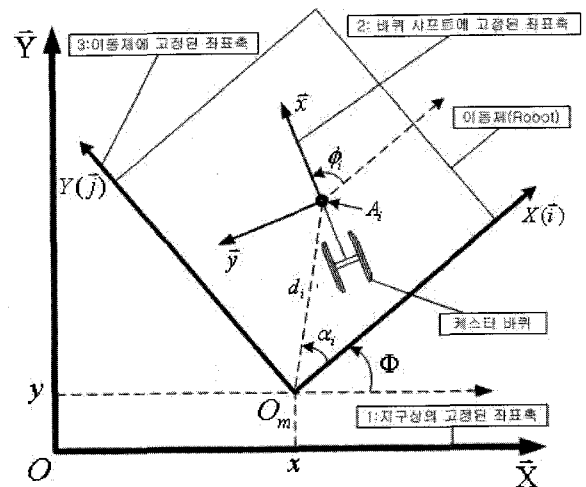


그림 4. 케스터 바퀴의 구조.
Fig. 4. Structure of caster wheel.

$$\dot{W} = R\dot{U} \quad (23)$$

위 식에서 변환행렬 R 은 다음과 같다.

$$R = \begin{pmatrix} \cos\Phi & -\sin\Phi & 0 \\ +\sin\Phi & \cos\Phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (24)$$

로봇의 운동 벡터와 i 번째 케스터 바퀴의 운동과의 관계식은 그림 5의 케스터 모델을 이용하고 케스터 바퀴가 지면과의 미끄러짐이 없다는 운동학적 구속조건으로부터 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{\theta}_i = (\dot{\theta}_i \ \dot{\phi}_i)^T = G_i \dot{W} \quad (25)$$

여기서, $G_i \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ 행렬은 로봇의 운동과 i 번째 케스터 바퀴의 운동과의 관계식을 정의하는 행렬이며 다음과 같이 표현된다.

$$G_i = \begin{pmatrix} \frac{\cos\phi_i}{r} & \frac{\sin\phi_i}{r} & \frac{d_i \sin(\phi_i - \alpha_i)}{r} \\ -\frac{\sin\phi_i}{\epsilon} & \frac{\cos\phi_i}{\epsilon} & \frac{d_i \cos(\phi_i - \alpha_i)}{\epsilon} - 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

여기서, 항상 $\epsilon > 0$ 상태여야 한다. $\epsilon = 0$ 면 케스터 바퀴 메카니즘이 아니다.

본 논문에서는 3개의 서보형 케스터 바퀴가 사용된 로봇을 실험에 사용하였는데 이 경우 이들 케스터 바퀴의 운동과 로봇의 운동과의 관계식은 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\dot{\theta} = G\dot{W} = GR\dot{U} = J\dot{U} \quad (27)$$

여기서, 확장벡터 $\dot{\theta} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ 와 확장행렬 $G \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$, 그리고 자코비안 행렬 $J \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\theta} = (\dot{\theta}_1^T \ \dot{\theta}_2^T \ \dot{\theta}_3^T)^T \quad (28)$$

$$G = [G_1^T : G_2^T : G_3^T]^T \quad (29)$$

$$J = GR \quad (30)$$

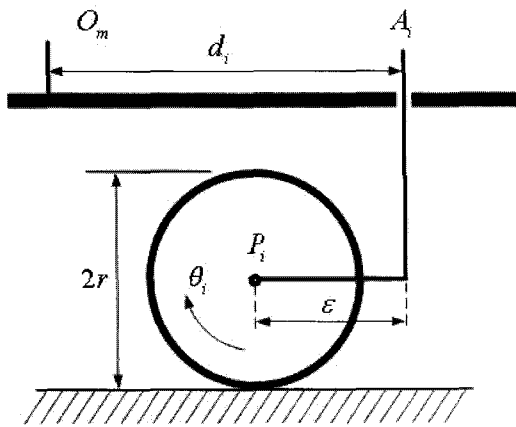


그림 5. 케스터형 능동바퀴의 구조.
Fig. 5. Structure of a castor wheel.

IV. 확장 칼만 필터 응용

1. 시스템 모델

확장칼만필터 알고리즘을 이용하기 위해 필요한 시스템 모델과 계측모델 중 먼저 앞 절에서 주어진 운동학적 모델을 이용하여 시스템 모델식을 유도하면 다음과 같다.

(29)에서 좌변의 $\dot{\theta}$ 벡터는 (27)에서 알 수 있듯이 각 케스터 바퀴의 조향과 구동 각속도들로 구성된 벡터이므로 각 바퀴에 장착된 서보 전동기의 엔코더를 이용하여 측정할 수 있다. 따라서 모든 케스터 바퀴의 조향과 구동 각속도를 같은 비중으로 고려하여 측정된 각 케스터 바퀴의 운동 정보로부터 최소 자승법을 이용 하여 로봇의 운동 벡터 \dot{U} 을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{U} = J^+ \dot{\theta} \quad (33)$$

여기서 일반화 역행렬 J^+ 는 다음과 같이 정의된다.

$$J^+ = (J^T J)^{-1} J^T \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$$

한편, (33)을 이산화 하여 $k-1$ 번째 샘플링 스텝에서의 로봇의 위치 및 방향 정보의 최적 추정치 $\hat{U}_{k-1|k-1}$ 를 이용한 k 번째 샘플링 스텝에서의 로봇의 위치와 방향의 예측치 (a priori estimate) $\hat{U}_{k|k-1}$ 를 추측방법을 적용하여 얻어내면 다음과 같다.

$$\hat{U}_{k|k-1} = \hat{U}_{k-1|k-1} + J^+ \Delta \theta_{k-1} \quad (34)$$

(34)에서 $\Delta \theta_k$ 는 샘플링 구간 동안 θ 벡터의 증가량을 나타내며 엔코더로부터 얻어 질 수 있다.

한편 (34)와 관련된 공분산을 얻기 위하여 일반적으로 사용될 수 있는 방법은 (34)에서 센서 정보 $\Delta \theta_{k-1}$ 가 평균이 0 이고 시불변 공분산 행렬 Q_k 를 갖는 백색 가우스 잡음 벡터 η_k 에 가산적으로 오염된다고 가정하는 것이다. 그러나 이 가정은 바퀴들의 바닥과의 미끄러짐이나 백래쉬와 같은 기계적 불확실성을 효과적으로 모델하기에는 불충분하다.

본 논문에서는 이러한 점을 고려하여 공분산 행렬 Q_k 을 각 스텝 마다 얻어지는 센서 정보들의 함수로 설정하는 방법을 이용하고자 한다. 이를 위해 (34)에서와 같이 센서 정보 $\dot{\theta}$ 를 최소자승 필터를 통과 시켜 현재 로봇의 운동에 관한 정보 \dot{U} 을 얻을 때 발생하는 필터링 오차가 바퀴의 미끄러짐이나 기어의 백래쉬 등에서 기인한 불확실성에 비례한다고 가정하였다. 이 가정을 수식으로 구하기 위하여 (33)을 (29)에 역으로 대입하여 필터링 오차 벡터 e 을 구하면 다음과 같다.

$$e = (I - JJ^+) \dot{\theta} \quad (35)$$

(35)는 최소 자승 필터로 발생된 오차를 나타내고 이 오차 벡터 크기 즉, $\|e\|_2$ 는 최소자승 필터의 신뢰성을 나타내는 척도가 된다. $\|e\|_2$ 가 크면 필터링 결과는 그만큼 큰 불확실성을 내포하게 되고, 적으면 그만큼 신뢰성이 높다. 따라서 본 논문에서는 $\|e\|_2$ 크기에 비례하도록 오

차 η_k 의 공분산 Q_k 를 다음과 같이 모델링 하였다.

$$Q_k = Q_k(\dot{\theta}) = Q_k(e) = \lambda \|e\|_2 I \quad (36)$$

여기서, λ 는 상수이며 $I \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 는 단위행렬이며 실험에서는 $\lambda = 0.005$ 를 사용하였다. 한편, 상태변수와 관련된 공분산(a priori covariance) 행렬 예측치 $P_{k|k-1}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$P_{k|k-1} = P_{k-1|k-1} + \lambda \|e\|_2 J^+ Q (J^+)^T \quad (37)$$

2. 계측모델

초음파 센서를 이용하여 로봇 자율주행에 필요한 로봇의 위치 및 방향 정보를 얻기 위해서는 센서로부터 얻어진 정보를 미리 주어진 주변 환경 정보에 대응시켜 현재 센서가 관측하고 있는 대상이 무엇인지를 확인하는 정합(matching) 과정이 아래와 같이 수행되게 된다.

- 단계 1 : 먼저 (15)를 (9)에 대입하여 현재 스텝 k 에서 로봇의 위치 및 방향의 최적 추정치($\hat{x}(k), \hat{y}(k)$)와 $\hat{\Phi}(k)$ 가 주어진 상황에서 반사체 방향의 예측치 $\hat{\phi}_{target}$ 을 얻어 내면 다음과 같다.

$$\hat{\phi}_{target} = \hat{\Phi}(k) + \phi_T' + \theta \quad (38)$$

(13), (14), (38)을 (10)과 (11)에 대입하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\hat{x}_{target} = x_T(k) + d \cos \hat{\phi}_{target} \quad (39)$$

$$\hat{y}_{target} = y_T(k) + d \sin \hat{\phi}_{target} \quad (40)$$

여기서 ($\hat{x}_{target}, \hat{y}_{target}$)는 현재 로봇의 위치 및 방향의 추정치와 센서 출력(d, θ)를 이용하여 얻어진 반사체의 좌표인데, 벽면의 경우 센서의 송신부로부터 벽면과의 최단 거리 점의 좌표 예측치를, 모퉁이(모서리)의 경우에는 모퉁이(모서리) 점의 좌표의 예측치를 나타낸다. 위 결과를 이용하여 정합과정은 다음과 같이 구성될 수 있다.

- 단계 2 : 모퉁이 및 모서리 정합

먼저 (39)와 (40)을 이용하여 센서에 관측된 반사체의 좌표를 구하고 이를 미리 주어진 환경 지도상의 모퉁이 또는 모서리 좌표 (x, y)들과 비교하여 최대 거리 오차 최소기준 ϵ_1 을 만족하면서 최소 거리 오차 m_1 을 갖는 모퉁이 또는 모서리를 찾는다.

$$m_1 = \{(\hat{x}_{target} - x)^2 + (\hat{y}_{target} - y)^2\}^{1/2} \leq \epsilon_1 \quad (41)$$

위 과정을 통해 정합되는 모퉁이 또는 모서리가 발견되지 않을 경우 벽면 정합 알고리즘을 다음과 같이 수행한다.

- 단계 3 : 벽면 정합

벽면 정합 알고리즘을 효과적으로 수행하기 위해서 다음의 두 과정을 수행한다. 먼저 (38)을 이용하여 얻어진 반사체의 방향 예측치와 비교하여 방향 오차가 적절한 범위 ϵ_2

보다 적은 벽면들을 골라낸다.

$$|\hat{\phi}_{target} - \phi| \leq \epsilon_2 \quad (42)$$

다음은 위 조건을 만족하는 벽면들 중 (19)에 정의된 벽과의 최단거리 예측치 \hat{d} 와 센서 측정치 d 와의 차이 m_2 가 최소인 벽면을 선택한다.

$$m_2 = |\hat{d} - d| \quad (43)$$

(41)과 (42)에서 ϵ_1 과 ϵ_2 는 초음파 센서의 특성과 로봇의 위치 및 방향 추정 알고리즘의 성능을 고려하여 설정하게 되는데 실험에서는 $\epsilon_1 = 0.1m$, $\epsilon_2 = 10^\circ$ 가 사용되었다.

거리 d 와 각 θ 에 대한 개선치 공분산을 구하면 다음과 식과 같다.

$$S_d(k) = \nabla d P_{k|k-1} \nabla d^T + R_d(k) \quad (44)$$

$$S_\theta(k) = \nabla \theta P_{k|k-1} \nabla \theta^T + R_\theta(k) \quad (45)$$

여기서, R_d 와 R_θ 는 초음파 센서를 이용한 측정과정에 포함된 불확실성을 나타내는 백색가우스 잡음의 공분산을 나타내며, ∇d 와 $\nabla \theta$ 는 거리와 각에 대한 자코비안 행렬로 아래와 같이 얻어진다.

$$\nabla d = \begin{bmatrix} \frac{\partial d(k)}{\partial x(k)} & \frac{\partial d(k)}{\partial y(k)} & \frac{\partial d(k)}{\partial \Phi(k)} \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$= \begin{bmatrix} -\cos P_\theta & -\sin P_\theta \\ x_T' \sin(\hat{\Phi}(kk-1) - P_\theta) - y_T' \cos(\hat{\Phi}(kk-1) - P_\theta) \end{bmatrix}^T$$

$$\nabla \theta = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta(k)}{\partial x(k)} & \frac{\partial \theta(k)}{\partial y(k)} & \frac{\partial \theta(k)}{\partial \Phi(k)} \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

위와 같이 정합과정을 거친 후 대응되는 벽면, 모퉁이, 또는 모서리가 얻어진 경우에는 최종적으로 개선치들의 신뢰성을 검증하는 비준과정이 다음과 같이 수행된다. 먼저 대응되는 반사체에 대한 개선치 공분산 $S_d(k+1)$ 값을 구한다. 다음은 개선치 $V(k)$ 를 다음과 같이 구한다.

$$V(k) = [Z(k) - \hat{Z}(k)] \quad (48)$$

여기서 Z 는 d 또는 θ 를 의미하며, 이를 이용하여 다음 조건식을 확인한다.

$$V^T(k) S(k)^{-1} V(k) \leq g \quad (49)$$

(49)에서 g 는 적절하게 선정되는 상수이며 (실험에서는 정합과정을 통과한 모든 개선치들을 칼만 필터링에 사용할 수 있도록 $g = \infty$ 를 사용하였다.) 좌변의 Mahalanobis 거리가 g 보다 작은 경우 개선치의 신뢰성이 인정됨을 의미한다. (44) 또는 (45)에서 알 수 있듯이 현재 로봇의 위치와 방향의 예측치 $\hat{U}_{k|k-1}$ 에 대한 불확실성이 커지면 $P_{k|k-1}$ 이

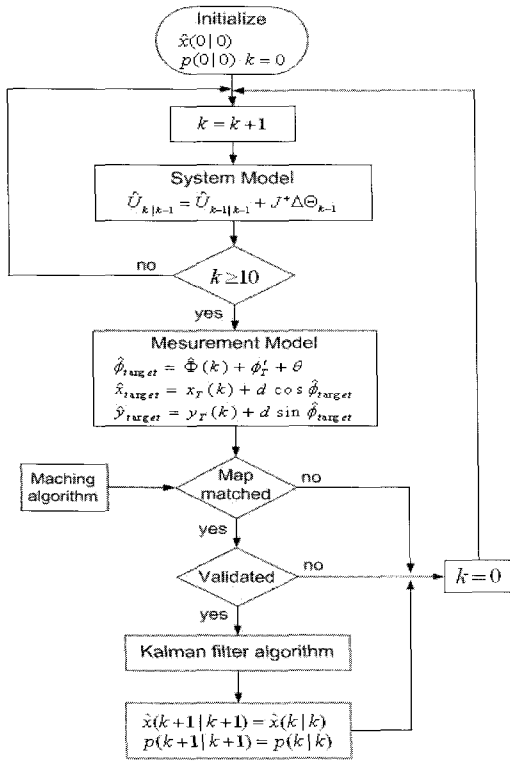


그림 6. 칼만필터 알고리즘.
Fig. 6. Kalman filter algorithm.

커지고 또 이에 비례하는 개선치 공분산 $S(k)^{-1}$ 도 커지게 되어 상대적으로 큰 값의 개선치들도 비준 과정을 통과할 수 있음을 알 수 있다.

그림 6은 칼만 필터 알고리즘을 보여주고 있다. 칼만 필터는 각 초음파 센서들로부터 얻어진 데이터들 중 정합과정과 비준과정을 통과한 데이터만을 이용하여 순차적으로 수행되게 된다. 먼저 칼만 이득은 다음과 같이 얻어진다.

$$W(k) = P_{k|k-1} \nabla h^T S^{-1}(k) \quad (50)$$

여기서 ∇h 는 ∇d 또는 $\nabla \theta$ 이며, 칼만 이득을 이용하여 로봇의 위치 및 방향의 최적 추정치 $\hat{U}_{k|k}$ 와 예측치 공분산 $P_{k|k}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\hat{U}_{k|k} = U_{k|k-1} + W(k) V(k) \quad (51)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - W(k) S(k) W^T(k) \quad (52)$$

V. 실험 및 고찰

그림 7은 제작된 스테레오 초음파센서를 보여주고 있다. 센서 중앙의 송신 모듈과 좌우측에 대칭으로 배치된 수신 모듈은 모두 Murata 제품을 사용하였으며 제어기는 ATMEGA 8535를 사용하였다.

초음파 센서에 사용된 센서 송신부의 공진주파수가 40kHz이며 물체 감지 거리는 0.2~5m이다. 실험에 사용된 스테레오 초음파 센서는 송신부와 수신부사이의 간격이 작을수록 크기가 작은 물체를 감지할 수 있지만 반사체 방향

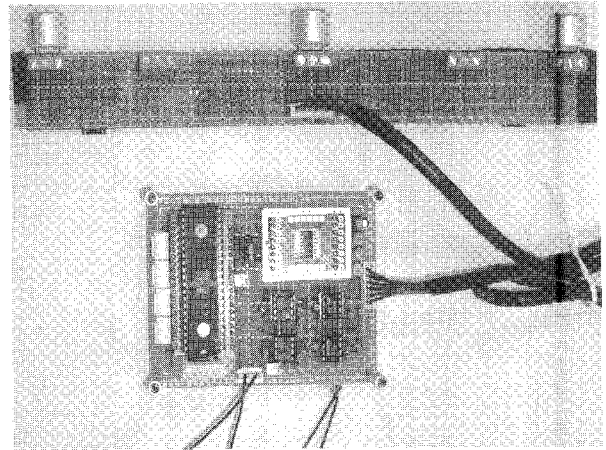


그림 7. 스테레오 초음파 센서부.
Fig. 7. Stereo ultrasonic sensor.

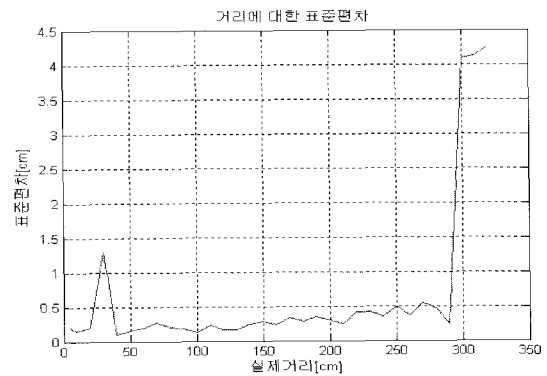


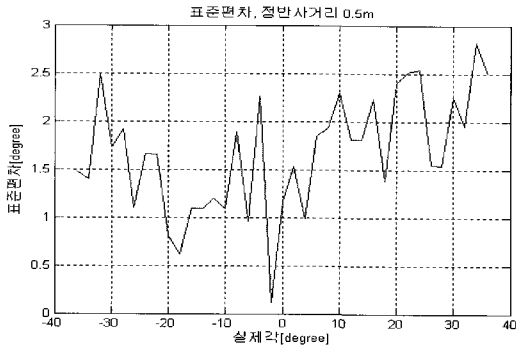
그림 8. 거리에 대한 표준편차.
Fig. 8. Standard deviation of distance.

오차는 증가하는 특성을 보이는데, 본 연구에서는 센서의 장착 공간을 고려하여 0.2m로 설계하였다.

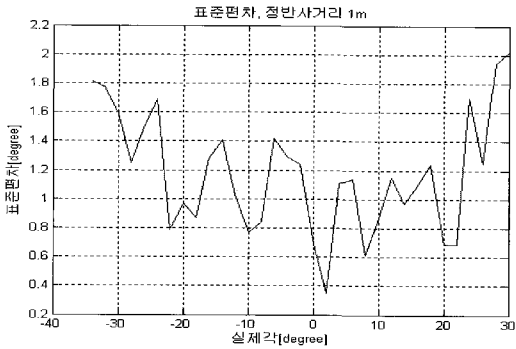
또한 오류를 포함한 센서 데이터는 에러 처리 알고리즘에서 1차적으로 걸리지며 2차적으로는 정합과정에서 제외되게 된다. 제작된 초음파 센서는 반사체의 센서로부터의 최단 거리 정보 d 와 방향 정보 θ 에 있어서 비교적 안정적인 결과를 제공하였는데, 특히 거리 정보는 그림 8 에서와 같이 2m 내에 있는 벽의 경우 1cm 이내의 작은 오차를 보였다.

한편 벽면의 센서에 대한 상대적 방향 정보 θ 는 그림 9 에서와 같이 센서와 벽면과의 거리에 따라 다소 특성의 변화를 보였지만 센서와 벽면과의 수직거리가 1m 내외이고 센서와 벽면과의 상대적 방향이 $\pm 20^\circ$ 내에 있을 경우에는 수 도 내의 매우 정확한 방향 정보를 제공하였다.

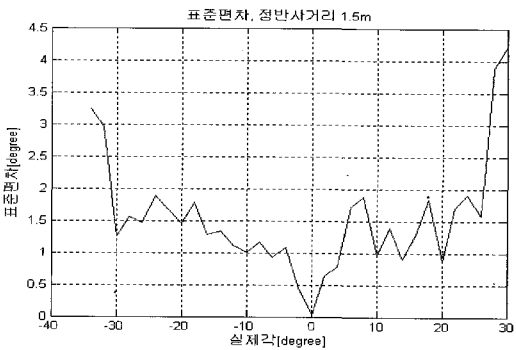
그림 10은 제안된 초음파 센서 모듈을 이용한 자율주행 성능을 실험하기 위해서 사용된 모바일 로봇을 보여주고 있다. 모바일 로봇은 3개의 서보형 케스터 바퀴로 구동되며 각 케스터 바퀴는 2개의 서보 전동기에 의해 구동된다. 로봇의 주제어기로는 Pentium III 700MHz 가 사용되었으며 추측항법 알고리즘 적용 주기로는 1ms, 초음파 센서를 이용한 확장 칼만 필터 적용 주기로는 40ms를 사용하였다.



(a) Standard deviation of degree at 0.5m



(b) Standard deviation of degree at 1m



(c) Standard deviation of degree at 1.5m

그림 9. 측정거리에 대한 각의 표준편차.

Fig. 9. Standard deviation of angle for measurement distance.

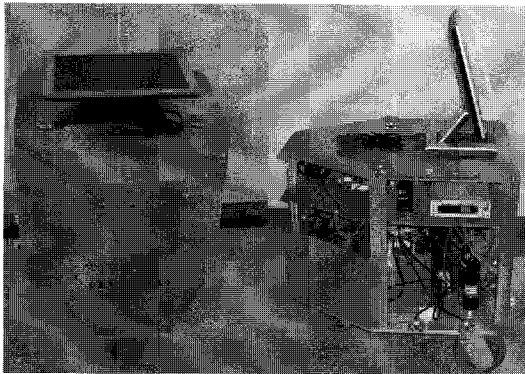


그림 10. 스테레오 초음파 센서가 장착된 자율주행 로봇.

Fig. 10. Mobile robot with stereo ultrasonic sensor.

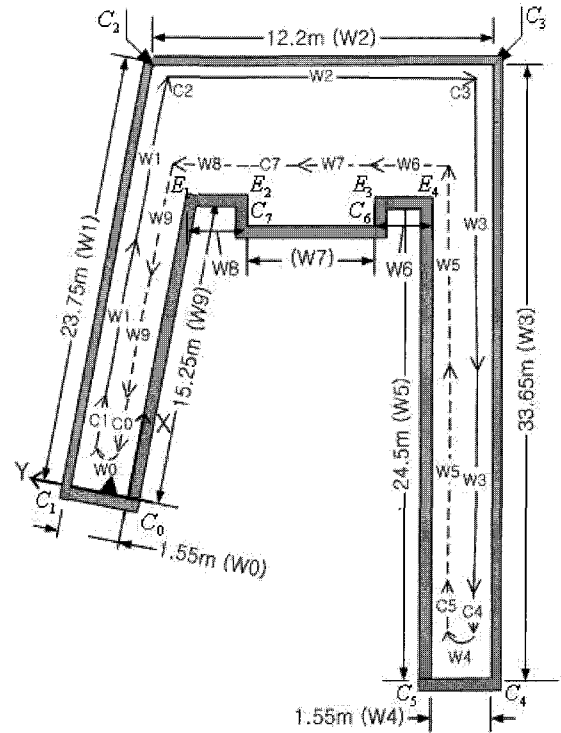


그림 11. 실내 환경의 평면도.

Fig. 11. Layout of indoor environment.

표 1. 전역좌표계에서 벽면 모델링과 모퉁이 좌표.

Table 1. Wall modeling and corner coordinate from global coordinates.

벽면번호	최단 거리	X축에서 P_R 의 각	가시성	모퉁이 번호	모퉁이 좌표
Plane No.	P_R [m]	ϕ [$^\circ$]	P_V	corner No.	(X_c, Y_c)
W0	0	0	1	C0	(0, 0)
W1	1.55	90	1	C1	(0, 1.55)
W2	22.5	11	1	C2	(23.75, 1.55)
W3	15.3	281	1	C3	(23.75, -10.6)
W4	9.5	191	1	C4	(-10, -15.3)
W5	13.8	281	-1	C5	(-10, -13.75)
W6	14.8	11	-1	C6	(14.88, -9.54)
W7	14.5	11	-1	C7	(14.84, -1.4)
W8	14.9	11	-1		
W9	0	0	1		

그림 11은 실험에 사용된 실내 환경의 평면도를 간략하게 보여주고 있으며 로봇의 우측 센서를 이용하였을 때의 그림이다. 표 1은 실내 환경을 구성하고 있는 벽면, 모퉁이 등의 위치 및 방향 정보가 포함되어 작성한 환경 지도모형을 보여주고 있다.

그림 12는 다른 로봇 운행 실험 장소를 나타낸 것이다. 로봇 좌측에 장착된 한 개의 스테레오 초음파 센서만을 이용하여 수행되었는데 로봇이 진행하는 방향을 x축으로 하고 중심원점을 step6으로 잡았다. 로봇의 주행 진행 단계는 다음과 같다.

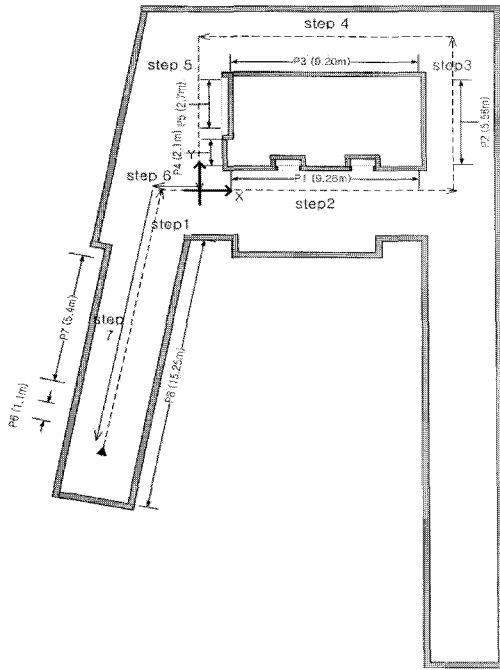


그림 12. 로봇 위치에 대한 불확실성의 변화.
 Fig. 12. Change of uncertainties in robot location.

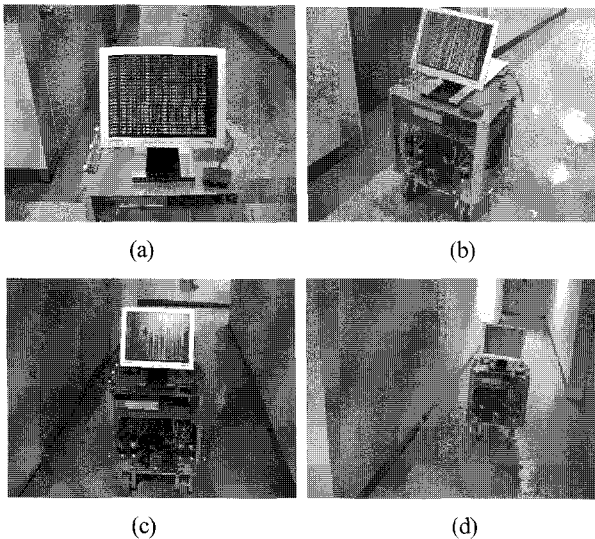


그림 13. 실제 복도 주행 예. (a) 벽을 인식하기전, (b) 1번 벽 인식 후 주행, (c) 2번 벽 주행, (d) 3번 벽 주행.
 Fig. 13. Navigation experiment. (a) before detecting wall, (b) navigation after detecting wall No.1, (c) following wall No.2, (d) following wall No.3.

- Step 1 : 벽면 6과 7을 초음파 센서로 인식하여 x축에 대한 위치 보정 효과는 있으나 y축에 대한 오차는 커진다.
- Step 2(4) : 벽면 1과 3에서는 y축 위치를 보정하고, x축의 예측치 공분산 값이 계속 증가하게 된다.
- Step 3(5) : 벽면 2와 4, 5를 센서로 인식하여 x축 위치를 보정하고, y축의 예측치 공분산 값이 계속 증가한다.
- Step 6 : 초음파센서로 인식할 수 있는 벽면이 존재하지 않아 모든 예측치 공분산 값이 계속 증가한다.

• Step 7 : 벽면 8을 센서로 인식하여 x축 위치 보정 효과는 있으나 y축 위치 보정효과는 없다.

주어진 실내 환경을 추측항법만으로 주행할 경우 운행 시간이 늘어날수록 로봇의 위치 및 방향 정보에 대한 불확실성이 비례적으로 계속 증가하는데 반해 초음파 센서를 사용한 확장 칼만 필터 알고리즘을 적용하여 현재 위치를 보상 하므로 로봇의 위치 및 방향 오차가 운행 시간에 관계없이 한정된 범위 내에 존재하는 결과를 보여주었다.

그림 13은 제안된 알고리즘을 이용하여 구조화된 실내 환경을 성공적으로 주행 중인 로봇을 보여주고 있다. 이 실험에서 로봇은 약 0.3m/s로 주행하도록 하였는데 알고리즘의 실시간성을 높이기 위하여 초음파 센서와 관련된 TOF 크기를 최대 12ms로 제안하였다. 따라서 최대 TOF 동안 로봇의 주행으로 발생될 수 있는 거리 오차는 이론적으로 6mm 이하가 되며 이는 초음파 센서로 측정된 거리 값에 포함된 오차의 크기에 준하는 값이 된다. TOF 크기를 최대 12ms로 제안하기 위하여 본 실험에서는 로봇 주행경로를 로봇과 가장 근접한 벽과의 거리가 가능한 2m를 초과하지 않도록 설계하였으며, 이를 초과한 TOF를 산출한 데이터는 무시하였다. 여기서 본 논문에서 제안된 기술의 한계와 관련하여 언급할 수 있는 점은 로봇의 운행 속도가 빨라질수록 초음파 센서로부터 얻어진 데이터의 정확성 및 실시간성은 감소한다는 사실이다. 이는 음파의 속도의 한계로 인한 불가피한 결과이지만, 로봇이 초당 수 미터 정도의 상당히 빠른 속도로 운행되는 경우에도 제안된 시스템은 추측항법으로 누적될 수 있는 localization 오차를 적절한 범위 내에 유지시키는데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

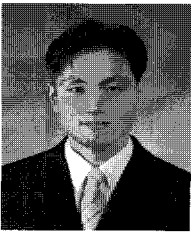
VI. 결론

본 논문에서는 실내 로봇 주행 환경 내에서 위치 및 방향 정보가 미리 알려져 있는 벽과 모퉁이 같은 환경 특징들을 초음파 센서를 이용하여 실시간적으로 인식하는 방법을 제안하고 이를 확장 칼만 필터 알고리즘을 통하여 실제 모바일 로봇 자율 주행에 적용함으로써 그 효과를 실험으로 확인하였다. 제안된 초음파 센서는 한 개의 초음파 송신기와 이에 좌우 대칭적으로 위치한 두 개의 초음파 수신기로 구성된 구조를 가지고 있으며 기존 초음파 기술을 이용한 환경 인식 방법들의 단점을 개선하여 실시간적 환경 인식이 가능하도록 구성된 특징을 갖는다. 따라서 제안된 초음파 센서 및 응용기술은 운행 환경을 변화 시키지 않고 로봇 스스로 환경을 인식하여 자신의 위치 및 방향을 추정할 수 있는 저가형 환경 인식 시스템으로서 실용성을 입증하였다.

차후 연구 과제로는 다수의 스테레오 초음파 센서를 로봇의 전후좌우에 장착하여 순차적으로 주변 환경을 인식함으로써 보다 효율적인 로봇 운행 시스템으로 발전시키거나 한 개의 스테레오 초음파 센서를 서보 모터에 장착하여 레이다 시스템 같이 로봇의 방향에 관계없이 특정한 물체를 연속적으로 추적할 수 있는 시스템으로 개발하여 제안된 시스템의 실용성을 한층 더 높이는 연구 등을 들 수 있다.

참고문헌

- [1] L. Kleeman and R. Kuc, "An optimal sonar array for target localization and classification," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 4, pp 3130-3135, 1994.
- [2] M. Yang, S. L. Hill, and J. O. Gray "Localization of plane reflector using a wide-beamwidth ultrasound transducer arrangement," *IEEE Trans. instrumentation and Measurement*, vol. 46, no. 3, pp. 711-715, June 1997.
- [3] 범희락, 조형석, "Mobile robot map making using ultrasonic sensor array," 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 121-122, 1993.
- [4] B. Barshan and R. Kuc, "Differentiating sonar reflections from corners and planes by employing an intelligent sensor," *IEEE Trans. Pattern Anal Machine Int.*, vol. 12, no. 6, pp. 560-560, June 1990.
- [5] J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte, "Directed sonar sensing for mobile robot navigation," *Kluwer Academic Pub.*, 1992.
- [6] Y. J. Han, H. S. Hahn, "Localization and classification of target surfaces using two pairs of ultrasonic sensors," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 637-643, May 1999.
- [7] 진재호, 이수영, "실내용 이동로봇의 자기 위치 추정을 위한 전역 초음파 시스템," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2521-2423, 2002.
- [8] Z. Shiler and S. Dubowski, "Time optimal paths and acceleration lines of robotic manipulators," *Proc. of the 26th Conf. Decision and Control*, pp. 98-99, 1987.
- [9] 이만희, 조황, "실내 자율주행 로봇을 위한 벽과 모퉁이 인식 방법," 정보 및 제어 학술대회 논문집, pp. 529-531.
- [10] 이만희, 조황, "실내 자율주행 로봇을 위한 실내 환경 인식방법," 대한전기학회 논문지, 제54권 제6호, D 권, pp. 366-371, 6. 2005.
- [11] 이만희, 조황, "초음파 센서를 이용한 실내 환경 실시간 계측 모델," 한국통신학회 논문지, 제30권 6호 A 권 pp. 481-487, 6. 2005.



이 만 희

1992년 광운대학교 제어계측학과 졸업. 1994년 동 대학원 제어계측학과 공학 석사. 2005년 동 대학원 공학박사. 관심분야는 메카트로닉스 및 자동화 시스템, 서비스 로봇, 강인제어, 칼만 필터 응용.



조 황

1985년 텍사스 주립대(어스틴) 기계공학과 석사. 1989년 박사. 1990년~현재 광운대학교 정보제어공학과 교수. 연구 관심분야는 지능 로봇 시스템, 의료용 및 서비스 로봇, 자동화 시스템 설계 및 제어.