# 초음파와 무선 통신파 기반 위치 인식 시스템의 위치 오차와 민감도 평가

신 동 헌<sup>\*†</sup>•이 양 재<sup>\*</sup> \* 서울시립대학교 기계정보공학과

# Evaluation of Position Error and Sensitivity for Ultrasonic Wave and Radio Frequency Based Localization System

Dong Hun Shin<sup>\*†</sup> and Yang Jae Lee<sup>\*</sup> \* Dept. of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul

(Received September 28, 2009; Revised January 6, 2010; Accepted January 8, 2010)

# Key Words: Localization System(위치인식 시스템), GPS, Ultrasonic Wave(초음파), Position Error(위 치오차), Sensitivity(민감도)

**초록**: 위치인식시스템은 이동로봇이 실내에서 주행하는데 가장 중요한 기술의 하나인데 본 논문에서 연구된 시스템은 GPS 시스템과 유사하게 3 개이상의 위성 비이컨에서 초음파와 무선통신파를 발사하고 로봇에 부착된 리시버는 초음파와 무선통신파의 수신되는 시간차를 계산하여 각 비컨까지의 거리를 구하고 또한 이로부터 로봇의 위치를 계산한다. 일반적으로 거리정보는 초음파의 한 파장 이내의 오차를 가지게 되는데 본 논문에서는 이에 따른 위치오차를 테일러 확장과 SVD(Singular Value Decomposition)를 이용하여 구하였다. 또한 본 논문에서는 거리오차에 따른 위치오차의 정확도를 잴 수 있는 값으로 민감도를 제시하였다

Abstract: A localization system for indoor robots is an important technology for robot navigation in a building. Our localization system imports the GPS system and consists of more than 3 satellite beacons and a receiver. Each beacon emits both an ultrasonic wave and radio frequency. The receiver in the robot computes the distance from it to the beacon by measuring the flying time difference between ultrasonic wave and radio frequency. It then computes its position with the distance information from more than 3 beacons whose positions are known. However, the distance information includes errors caused from the ultrasonic sensors; we found it to be limited to within one period of a wave ( $\pm 2$  cm tolerance). This paper presents a method for predicting the maximum position error due to distance information errors by using Taylor expansion and singular value decomposition (SVD). The paper also proposes a measuring parameter such as sensitivity to represent the accuracy of the indoor robot localization system in determining the robot's position with regards to the distance error.

- 기호설명 -

- ρ : 비컨과 리시버 사이의 거리
   X<sub>i</sub> : 비컨의 좌표(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub>)
   X : 로봇의 좌표(x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>, z<sub>p</sub>)
- S<sub>b</sub> : 거리정보에 의한 위치좌표의 민감도

1. 서 론

이동로봇의 자기위치 인식 기술은 로봇이 사용 되기 위한 가장 중요한 기술 중에 하나이다.<sup>(1)</sup> 특

† Corresponding Author, shin@uos.ac.kr

히 실내 환경에서의 위치 인식을 위해 주변환경을 감지 하기 위한 센서로 초음파 센서와 비전 센서 가 있다. 이중 비전 센서는 관련 데이터를 처리하 는 과정에 소비되는 시간이 커서 위치의 실시간 인식이 어려울 뿐 아니라 비용이 많이 드는 편이 다. 본 논문에서는 데이터 처리 과정이 간단하여 실시간 위치 인식이 가능하며 경제적인 초음파 센 서와 무선 통신파 센서를 사용하는 위치인식시스 템에 관한 연구를 하였다. 한편, 이러한 로봇의 자 기위치 인식 시스템은 주변 사물과의 상대적인 위 치를 파악하는 상대위치 측정법과 하나의 좌표계 에 대한 좌표를 측정하는 절대 위치 측정법으로 분류되는데,<sup>(2)</sup> 본 논문에서는 절대 위치 측정법을 사용하여 로봇의 위치를 측정하였다.

본 논문에서 사용하는 절대 위치 인식 시스템은 실내에 설치된 다수의 위성 비컨(Satellite Beacon) 중에서 3 개 이상의 비컨으로부터 발사되는 초음 파와 고주파가 로봇에 설치된 리시버에 수신되는 시간차를 이용하여 각 비컨으로부터 리시버까지의 거리를 측정하고, 또한 각 비컨의 좌표를 이미 알 고 있으므로 그로부터의 거리정보를 이용하여 로 봇의 위치를 계산하는 방식이다.<sup>(3,4)</sup> 이전의 연구들 은 거리정보의 정확도를 높이거나, 위치계산의 정 확도를 높이는 연구를 하였으며 이를 실험을 통해 평가하였다. (5,6) 그런데 리시버의 위치계산 정확도 는 거리정보의 오차에 크게 영향을 받는다. 한편, 거리정보의 오차는 초음파 센서의 특성상 거리에 관계없이 일정한 오차 이내 즉 한 파장거리로 발 생한다. 본 논문에서는 이러한 거리 오차만을 이 용하여 위치의 정확도를 평가할 수 있는 방법을 제시하였으며, 거리정보의 오차에 대한 위치오차 의 민감도를 제시하고 그 예를 보였다.

본 논문의 2 장에서는 사용된 위치 인식 시스템 과 그 위치계산 방법을 간단히 설명하고, 3 장에서 는 발생 가능한 최대 위치 오차를 구하는 방법과 위치 민감도를 정의하여 제시했고,4 장에서는 3 장 에서 유도된 방법에 의해 구해진 값을 실제의 오 차 값과 비교하여 검증하였다. 5 장에서는 평가와 향후 개발 사항에 대하여 기술하였다.

## 2. 위치인식 시스템

본 논문에서 사용된 위치인식 시스템은 Fig. 1 에서 배치된 것과 같이 우선, 리시버가 무선 통신 파(RF)로 주변 비컨을 호출하고, 호출된 주변 비 컨은 초음파(US)와 RF 를 송신하여 리시버에 수신 되는 두 신호의 시간차를 이용하여 리시버와 비컨 사이의 거리를 계산하고, 이러한 방식으로 3 개 이 상의 비컨으로부터의 거리정보와 비컨 좌표위치정 보를 이용하여 리시버의 좌표상의 위치를 계산한 다.

시스템에 사용된 리시버는 US 수신부, RF 송·수 신부 그리고 온도 센서로 구성되어 있고, 비컨은 US 송·수신부, RF 송·수신부 그리고 온도 센서로 구성된다. 온도센서를 통한 정보는 US 의 속도를 보정하는데 쓰인다.

#### 2.1 거리 측정

리시버가 장착되어있는 로봇과 비컨 사이의 거리 측정은 US 의 도착시간(Tus)과 RF 의 도착시간



Fig. 1 Localization system using US and RF



Fig. 2 Localization system using US and RF

(T<sub>RF</sub>) 사이의 차이를 이용하여 계산한다. 이때, RF 의 속도는 빛의 속도와 같으므로 RF 의 도착 시간은 0으로 근사한다.

한편, US 신호의 도착시간(T<sub>US</sub>)은 정확한 측정 이 어렵다. 일반적으로 threshold 방법을 통하여 구하는데 수신되는 초음파 신호의 파장의 크기가 어떤 일정한 값보다 커질 때를 도착으로 간주하 는 방법이다.<sup>(7)</sup>

2.2 위치 계산

로봇의 위치 측정을 위해서는 3 개 이상의 비컨 이 필요하다. 즉,3개 이상의 거리정보를 이용하여 GPS 등의 위치 인식 시스템에 쓰이는 방법으로 계산할 수 있다.<sup>(9)</sup>

리시버의 좌표를 구하기 위해서는 Fig. 2 와 같 이 좌표가 고정된 비컨에서 보내지는 US 와 RF 신호를 리시버에서 수신하고 두 신호간의 시간차 를 측정해서 리시버와 비컨 사이의 거리  $\rho_i$ 를 계 산할 수 있는데, 두 점 사이의 거리는 식 (1)과

184

같다.

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_R)^2 + (y_i - y_R)^2 + (z_i - z_R)^2}$$
(1)

각 비컨으로부터의 거리 식 (1)을 제곱해 전개 하면 거리와 위치 정보에 대한 식 (2)를 구할 수 있다.

$$\rho_{i}^{2} = x_{i}^{2} - 2x_{i}x_{R} + x_{R}^{2} + y_{i}^{2} - 2y_{i}y_{R} + y_{R}^{2} + z_{i}^{2} - 2z_{i}z_{R} - z_{R}^{2}$$

$$\rho_{i}^{2} - x_{i}^{2} - y_{i}^{2} - z_{i}^{2} - x_{R}^{2} - y_{R}^{2} - z_{R}^{2} = -2(x_{i}x_{R} + y_{i}y_{R} + z_{i}z_{R})$$
(where  $s_{i} = x_{i}^{2} + y_{i}^{2} + z_{i}^{2}$ ,  $u = x_{R}^{2} + y_{R}^{2} + z_{R}^{2}$ ) (2)

두 점 사이의 거리관계에서 우리가 얻고자 하는 리시버의 좌표 (x<sub>R</sub>, y<sub>R</sub>, z<sub>R</sub>) 를 구하기 위해 식 (2)의 우 변을 좌표 성분의 계수행렬과 미지수행렬 부분으로 분해하고 좌변도 행렬화하면 식 (3)과 같은 Matrix 형태의 Vector 방정식을 얻을 수 있다.<sup>(8)</sup>

식 (3) HX=C+uD 에 pseudo-inverse matrix H<sup>\*</sup>=(H<sup>T</sup>H)<sup>-1</sup>H<sup>T</sup> 를 양변에 곱해주면 u 를 포함한 X 를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

#### X=H<sup>\*</sup>C+uH<sup>\*</sup>D

위 식에서 H<sup>\*</sup>C 를 m 으로, H<sup>\*</sup>D 를 n 으로 하여 Matrix 로 나타내면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_{R} \\ y_{R} \\ z_{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1} \\ m_{2} \\ m_{3} \end{bmatrix} + u \begin{bmatrix} n_{1} \\ n_{2} \\ n_{3} \end{bmatrix}$$
(5)

여기서  $H^*C = m$ ,  $H^*D = n$ 

한편, X의 각 성분을  $u = x_R^2 + y_R^2 + z_R^2$ 에 대입하 면 u 의 2 차식 (6)을 얻을 수 있으며, 이를 풀어 서 얻어진 u 값을 식 (5)에 적용하면 로봇의 좌표 X를 구할 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$u = (m_1 + un_1)^2 + (m_2 + un_2)^2 + (m_3 + un_3)^2$$
(6)



Fig. 3 Ultrasonic wave at the receiver



Fig. 4 Position error due to distance error

## 3. 위치 정밀도와 민감도

식 (3)에서와 같이 거리오차의 발생은 직접적으 로 로봇의 위치 계산 오차로 연결된다.

#### 3.1 거리 오차

(4)

거리를 계산하기 위한 US 의 도달 시간을 측정 하기 위하여 가장 많이 쓰이는 Threshold 방법은 수신기에서 US 값이 기준이 되는 Threshold 값을 넘어가는 시점을 US 의 도달 시간으로 측정하는 방법으로 Fig. 3 에서 같이 실제 도달시간과 US 사 이에 최대 1 파장 이내의 오차가 발생한다.<sup>(8)</sup> 본 논문에서 사용한 초음파는 25khz 이며, US 의 속도 는 상온에서 약 340m/s 로 1 파장의 크기에 해당 하는 약 1.36cm 의 오차 범위를 갖는다.

3.2 위치 오차

Fig. 4 에서와 같이 거리 오차에 따라 로봇의 위 치 오차가 발생되는데 측정된 거리 *p* 와 실제거리 *p* 는 식 (7)에서와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho = \sqrt{(x_i - x_R)^2 + (y_i - y_R)^2 + (z_i - z_R)^2} = f(x_R, y_R, z_R)$$
  

$$\tilde{\rho} = \sqrt{(x_i - \tilde{x}_R)^2 + (y_i - \tilde{y}_R)^2 + (z_i - \tilde{z}_R)^2} = f(\tilde{x}_R, \tilde{y}_R, \tilde{z}_R)$$
(7)

여기에서  $(x_R, y_R, z_R)$ 는 측정거리로 계산된 로봇의 위치이고  $(\tilde{x}_R, \tilde{y}_R, \tilde{z}_R)$ 는 실제의 로봇의 위치이다. 식 (7)의 두 식의 관계는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\mathbf{x}_{R}, \mathbf{y}_{R}, \mathbf{z}_{R}) = f(\tilde{\mathbf{x}}_{R} + \Delta \mathbf{x}_{R}, \tilde{\mathbf{y}}_{R} + \Delta \mathbf{y}_{R}, \tilde{\mathbf{z}}_{R} + \Delta \mathbf{z}_{R})$$
(8)

그런데 식 (8)에 Taylor Expansion 을 이용하면 식 (9)와 같이 된다.

$$f(x_{R}, y_{R}, z_{R})$$

$$= f(\tilde{x}_{R}, \tilde{y}_{R}, \tilde{z}_{R}) + \frac{\partial f(\tilde{x}_{R}, \tilde{y}_{R}, \tilde{z}_{R})}{\partial \tilde{x}_{R}} \Delta x_{R}$$

$$+ \frac{\partial f(\tilde{x}_{R}, \tilde{y}_{R}, \tilde{z}_{R})}{\partial \tilde{y}_{R}} \Delta y_{R} + \frac{\partial f(\tilde{x}_{R}, \tilde{y}_{R}, \tilde{z}_{R})}{\partial \tilde{z}_{R}} \Delta z_{R} + \cdots$$
(9)

식 (9)에서 각 성분의 1 차 미분계수 값은 식 (10) 과 같다.

$$\frac{\partial f(\tilde{x}_{R}, \tilde{y}_{R}, \tilde{z}_{R})}{\partial \tilde{x}_{R}} = \frac{\partial \left\{ (x_{i} - \tilde{x}_{R})^{2} + (y_{i} - \tilde{y}_{R})^{2} + (z_{i} - \tilde{z}_{R})^{2} \right\}^{\overline{z}}}{\partial \tilde{x}_{R}}$$

$$= \frac{1}{2} (-2x_{i} + 2\tilde{x}_{R}) \left\{ (x_{i} - \tilde{x}_{R})^{2} + (y_{i} - \tilde{y}_{R})^{2} + (z_{i} - \tilde{z}_{R})^{2} \right\}^{-\frac{1}{2}}$$

$$= -\frac{x_{i} - \tilde{x}_{R}}{\tilde{\rho}_{i}}$$

$$\frac{\partial f(\tilde{x}_{R}, \tilde{y}_{R}, \tilde{z}_{R})}{\partial \tilde{y}_{R}} = -\frac{y_{i} - \tilde{y}_{R}}{\tilde{\rho}_{i}},$$

$$\frac{\partial f(\tilde{x}_{R}, \tilde{y}_{R}, \tilde{z}_{R})}{\partial \tilde{z}_{R}} = -\frac{z_{i} - \tilde{z}_{R}}{\tilde{\rho}_{i}}$$
(10)

그런데 Δρ<sub>i</sub> = ρ̃<sub>i</sub> - ρ<sub>i</sub> 이므로 식 (10)을 정리하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \rho_i = \frac{x_i - \tilde{x}_R}{\tilde{\rho}_i} \Delta x_R + \frac{y_i - \tilde{y}_R}{\tilde{\rho}_i} \Delta y_R + \frac{z_i - \tilde{z}_R}{\tilde{\rho}_i} \Delta z_R$$
(11)

식 (11)에서 계수를 식 (12)와 같이 표시하면 식 (11)은 식 (13)과 같이 정리 할 수 있다.

$$a_{xi} = \frac{x_i - \tilde{x}_R}{\tilde{\rho}_i}, a_{yi} = \frac{y_i - \tilde{y}_R}{\tilde{\rho}_i}, a_{zi} = \frac{z_i - \tilde{z}_R}{\tilde{\rho}_i}$$
(12)

$$\Delta \rho_i = a_{xi} \Delta x_R + a_{yi} \Delta y_R + a_{zi} \Delta z_R \tag{13}$$

식 (13)을 여러 비컨으로부터 얻는데 이를 matrix 로 표현하면 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \rho = A \ \Delta R \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Delta} \rho &= \begin{bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \Delta \rho_3 \\ \Delta \rho_4 \\ \vdots \end{bmatrix}, \ A = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} \\ a_{x4} & a_{y4} & a_{z4} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \ \Delta R = \begin{bmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta z_R \end{bmatrix} \end{aligned}$$

식 (14)에서 우변의 Δ*R* 값을 구하기 위해 SVD(Singular Value Decomposition)를 적용하면 행 렬 A 는 식 (15)와 같다.

\_

$$A = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} \\ a_{x4} & a_{y4} & a_{4} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \sigma_{1} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{3} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} V^{T} \quad (15)$$

여기에서  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  이고 U, V 는 직교 (orthogonal)한다

식 (15)를 식 (14)에 대입하면 거리오차에 대한 위치 오차 식 (16)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{R} \\ \Delta y_{R} \\ \Delta z_{R} \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{3}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} U^{T} \begin{bmatrix} \Delta \rho_{1} \\ \Delta \rho_{2} \\ \Delta \rho_{3} \\ \Delta \rho_{4} \\ \vdots \end{bmatrix}$$
$$\Delta R = V \sum^{+} U^{T} \Delta \rho \tag{16}$$

여기서 A 가 m×n 행렬 일 때, U 는 m×m 직교 행렬이고, V 는 n×n 직교행렬이다. U 의 column 은  $AA^{T}$  의 고유벡터이고, V 의 column 은  $A^{T}A$  의 고유벡터이다. U 와 V 는 orthogonal matrix 이므로 detUU<sup>T</sup>=1, detVV<sup>T</sup>=1 이다. 따라서 A 의 singular value ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )로부터 모든 거리오차에 대한 위 치오차의 범위를 식 (17)과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{\sigma_1} \le \frac{\left\|\Delta R\right\|}{\left\|\Delta \rho\right\|} \le \frac{1}{\sigma_3} \tag{17}$$

*186* 

또한 식 (17)로부터 거리오차로부터 발생하는 최대 위치 오차의 크기는 식 (18)과 같이 구할 수 있다.

$$\left\|\Delta R\right\|_{\rm max} = \left\|\Delta \rho\right\| / \sigma_3 \tag{18}$$

#### 3.3 거리오차에 대한 위치 민감도

일반적인 민감도(S<sub>b</sub>)의 정의는 시스템의 특정 변수 파라미터의 변화율 Δρ/ρ 에 대해 함수가 변화되는 비율 ΔR/R 의 비를 나타내는 것으로 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{b} = \frac{\left\|\Delta R\right\| / \left\|R\right\|}{\left\|\Delta \rho\right\| / \left\|\rho\right\|}$$
(19)

따라서 위치 민감도는 식 (17)로부터 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1 / \|\boldsymbol{R}\|}{\sigma_1 / \|\boldsymbol{\rho}\|} \le S_b \le \frac{1 / \|\boldsymbol{R}\|}{\sigma_3 / \|\boldsymbol{\rho}\|}$$
(20)

#### 4. Case Study

본 연구에서는 3 장에서 제시한 방법의 유효성 을 검토하기 위해 Fig.5 와 같은 경우에 대하여 3.2 절에서 제시한 방법으로 거리 오차에 의한 최 대 위치 오차(  $||\Delta R||_{max}$  )를 구하였다. 한편, 거리 오 차가 플러스 마이너스의 최대로 각 비컨에 대하여 발생하는 모든 경우에 대하여 위치 오차를 구하고 그 중의 최대값(△R<sub>max</sub>)과  $||\Delta R||_{max}$ 를 비교하였다.

Fig. 5 와 같이 4 개의 비컨이 한 변의 길이가 300cm 인 정사각형의 꼭지점부분에 설치되어 있 고, 로봇이 각각의 비컨으로부터 동일한 거리를 갖는 측정 지점에 위치하고 있다. 최대 거리오차 의 크기는 ±1cm 로 가정하였다. 한편, 비컨의 z 축 좌표인 높이(h)를 변화시키면서 거리 오차에 의한 위치 오차와 민감도를 비교하였다.

#### 4.1 거리 오차에 따른 최대 위치 오차 평가

△R<sub>max</sub> 는 거리 오차가 최대일 경우로부터 구한 것으로 측정 범위 내에서 오차의 범위가 일정 ([Δρ<sub>i</sub>] < ε)하다고 가정하면, 최대 거리오차가 발생 하는 경우는 거리정보가 식 (21)과 같이 발생할 2 가지 예로 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\rho}_i = \rho_i + \varepsilon \text{ or } \tilde{\rho}_i = \rho_i - \varepsilon \tag{21}$$

 Table 1 Worst case due to distance error from 4 beacons

Case(i)	$ ilde{ ho}_1$	$ ilde{ ho}_2$	$ ilde{ ho}_3$	$ ilde{ ho}_4$
1	$\rho_{\rm l}$ + $\varepsilon$	$\rho_2 + \varepsilon$	$\rho_3 + \varepsilon$	$ ho_4 + \varepsilon$
2	$\rho_1 + \varepsilon$	$\rho_2 + \varepsilon$	$\rho_3 + \varepsilon$	$ ho_4 - arepsilon$
•	•	•	•••	•
15	$\rho_1 + \varepsilon$	$\rho_2 - \varepsilon$	$\rho_3 - \varepsilon$	$\rho_4 + \varepsilon$
16	$\rho_1 - \varepsilon$	$\rho_2 - \varepsilon$	$\rho_3 - \varepsilon$	$ ho_4 - \varepsilon$



Fig. 5 Localization system with 4 beacons and a receiver

4 개의 비컨이 설치되어 있을 때 각각의 비컨과 리시버 사이에 최대 거리 오차가 발생하는 예는 Table1과 같이 2<sup>4</sup>가지의 형태로 나타난다.

한편, 거리 오차에 의한 위치 오차는 모든 경우 에 대해 2.2 절에서 제시한 Direct-Inverse-Method 를 이용하여 계산한 값 중 가장 큰 값으로 식 (22)와 같이 구하였다.

$$\Delta R_{\rm nax} = \sqrt{\{x_R(\rho_i \pm \varepsilon) - x_R\rho_i\}^2 + \{y_R(\rho_i \pm \varepsilon) - y_R\rho_i\}^2 + \{z_R(\rho_i \pm \varepsilon) - z_R\rho_i\}^2}$$
(22)

거리의 최대값과 최소값을 통한 위치 오차의 범 위 추정은 비록 로봇 좌표 위치오차의 최대값을 항상 나타내는 것은 아니지만, 위치오차의 최대값 에 근사할 것이므로 3 장에서 제시한 방법에 의한 값의 비교 대상으로는 충분할 것으로 생각된다.

 Table2 의 ||ΔR||<sub>max</sub> 는 3.2 절의 식 (19)의 거리 오

 차에 따른 최대 위치오차이고, △R<sub>max</sub> 는 위의 식

 (22)를 이용해 구한 최대 거리 오차에 의한 위치

 오차이다.

 Table 2 Position error due to distance error

Height(cm)	$\triangle R_{max}$	$\  \Delta R \ _{max}$
50	4.5565	4.3589
100	2.3683	2.3452
150	1.7388	1.7321
200	1.9437	1.9437
250	2.1858	2.1858
300	2.4495	2.4495
350	2.7285	2.7285
400	3.0185	3.0185

우선, Table 2 에서와 같이 3.2 절의 식 (19)에 의 한 ∥ΔR∥<sub>max</sub> 는 (22)에 의한 △R<sub>max</sub> 는와 매우 근사 한 값이며 비컨의 좌표 높이(h)의 증가에 따른 오 차값의 변화도 매우 정확하게 일치함을 볼 수 있 어서 본 연구에서 제시한 방식의 유효성을 알 수 있다. 한편, 높이가 증가할수록 △R<sub>max</sub> 와 ∥ΔR∥<sub>max</sub> 의 차이는 무시할만한 수준으로 작아지는데 이는 비컨과 로봇이 이루는 격자가 고정된 가로와 세로 의 길이에 맞추어 높이가 증가하여 격자 형태가 정육면체에 가까워짐에 따라 두 값이 가까워진 것 으로 보이며, 오차도 정육면체를 이루는 높이 150cm 에서 가장 작은 값을 보이고 높이가 증가할 수록 오차도 증가한다.

#### 4.2 거리 오차에 의한 위치 민감도 평가

거리 오차에 따르는 위치 오차의 민감도는 Δρ/ρ에 대한 ΔR/R의 값으로서 Fig 5 에서의 경 우에 식 (20)에 따라 계산하여 그 결과를 Table 3 에 나타내었다. 민감도는 최소민감도와 최대민감 도 사이로 발생할 것이므로 최대민감도가 중요한 값으로 볼 수 있다.

최대민감도는 높이가 증가함에 따라 감소하다가 비컨과 로봇이 이루는 격자가 정육면체를 이룰 때 (150cm)에 가장 적으며 이후 높이가 더 증가하면 서 민감도가 크게 증가함을 보여준다. 이 것은 4.1 절의 최대 위치오차와 일치하는 경향인데, Fig. 5 의 경우에 거리오차(Δρ)가 일정하다면 Δρ/ρ가 약간만 변화하므로(ρ의 변화에 따라서), ΔR/R는 민감도에 따라서 변화하고 최대오차(ΔR)도 그에 따라서 변화하기 때문이다. 한편, 민감도가 클 경 우에는 거리오차가 발생할 때 위치정확도가 민감 하게 영향을 받아 많이 오차가 발생할 수 있으므

Height(cm)		Minimum Sensitivity	Maximum Sensitivity
case1	50	1.4928	4.4783
case2	100	1.7285	2.5927
case3	150	2.1213	2.1213
case4	200	2.0035	2.6713
case5	250	2.0270	3.3784
case6	300	2.1213	4.2426
case7	350	2.2560	5.2640
case8	400	2.4159	6.4425

Table 3 Position sensitivity due to distance error

로 이에 대한 대책을 마련하는 것이 필요할 것이 다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 초음파와 무선 통신파의 도착시 간차를 이용해 거리와 위치를 계산할 때 발생할 수 있는 오차 관계에 대하여 연구하였다. 첫째, 거 리측정 오차는 사용되는 초음파의 한 파장만큼 발 생할 수 있다는 것을 이용하여 거리를 이용하여 위치를 계산하는 경우에 발생하는 오차의 범위를 구하는 방법을 제시하였다. 둘째, 거리오차에 대한 민감도를 정의하고, 이를 구하는 방 위치오차의 법을 제시하였다. 한편, 제시된 방법의 검증을 위 하여 4 개의 초음파센서를 격자구조로 사용하는 경우에 제시된 방법으로 위치오차를 구한 값과 최 대 거리오차인 경우의 위치오차값과 비교하여 제 시된 계산방법의 유효성을 입증하였으며, 이 경우 의 위치 민감도 값을 구한 결과 비컨과 로봇이 정 육면체에 가까운 격자구조를 이루는 경우에 가장 적은 오차와 민감도를 보였다. 향후, 민감도가 큰 경우에 이에 대한 대책연구가 필요할 것으로 사료 된다.

#### 후 기

이 논문은 2007 년도 서울시립대학교 학술연구 조성비에 의하여 지원연구되었습니다.

#### 참고문헌

(1) Brooks, R. A., 1986, "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot," *IEEE J. of Robotics and* 

Automation, Vol. RA-2, No.1, pp. 14~23.

- (2) Clare. D. Mcgillem, 1989, "A Beacon Navigation Method for Autonomous Vehicles," *IEEE transactions* on vehicles technology, Vol. 38, NO. 3, pp. 132~139.
- (3) Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, and hari Balakrishnan, 2000, "The Cricket Location-Support System," Proc. 6<sup>th</sup> ACM Mobicom Conf., pp. 32~43.
- (4) Roy Want, Andy Hopper, Veronica Falcão and Jonathan Gibbons, 1992, "The Active Badge Location System," ACM Trans, Information System, pp. 91~102.
- (5) Lee, S. Y. and Jin, J.H., 2003, "Self-localization of a Mobile Robot Using Global Ultrasonic Sensor System," *Journal of CASE*, Vol. 9, pp. 145~151.
- (6) Fernando Figueroa, Ajay Mahajan, 1994, "A Robust

Method to Determine the Coordinates of a Wave Source for 3-D Position Sensing," *Transactions of ASME*, Vol. 116, pp. 505~511.

- (7) Billur Barshan, 2000, "Fast Processing Techniques for Acurate Ultrasonic Range Measurement," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, pp. 45~50.
- (8) Jeong Yong Yun, Dong Hun Shin, 2005, "Robot Localization and Calibration Using Ultrasonic and Ratio Frequency," *Journal of the Industrial Technology*, Vol. 13, pp. 58~62.
- (9) Jong Hwan Lim, Chul Ung Kang, 2002, "Grid-Based Localization of a Mobile Robot Using Sonar Sensors," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 3, pp. 302~309.