초음파를 이용한 위치 인식 시스템의 거리오차와 비이컨의 좌표에 의한 위치오차

황의근¢ ¡ 정규식*¡ 신동헌*

Position error due to distance error in the localization system using Ultrasonic

Ui-Kun Hwang, Kyoo-Sik Jung, Dong-Hun Shin

Key Words: Localization(위치 인식 시스템), Beacon(비이컨), Ultrasonic(초음파), Radio Frequency(무선 통신 파), Receiver(리시버)

Abstract

This paper presents position error for the robot localization system using the ultrasonic wave. The distance between the receiver and a beacon can be computed by using the difference between times of flight. The distance information measured by ultrasonic wave has errors. The position is calculated by distances, and this error is caused by distance errors. The position error is different from receiver¡s position. And the position is also calculated by beacon location. This paper calculates worst case position error within measuring area, and finds beacons location to reduce the position error.

1. 서 론

하드웨어의 발전과 통신기술의 발전은 Ubiquitous 또는 Pervasive Computing 의 중요한 부분으로 로봇분야에 급속한 발전을 가져왔다. 특히 로봇분야의 Localization 분야는 스마트 홈 환경뿐만 아니라 산업체의 상황에 맞는 서비스를 제공하는데 중요한 분야로 대두되고 있으며, 특히 지능형 로봇의 자기 위치 측정시스템(Localized Position Sensing System)분야가 다루어 지고 있다.

위치 인식 시스템은 범주 영역에 따라 실외에서와 같이 큰 영역에서 사용되는 메크로 위치 인식 시스템과 주로 실내에서 사용되는 작은 영역의 마이크로 위치 인식시스템[1]으로 나눌 수 있다.

현재까지 연구된 논문[2~5]들을 살펴보면 기본 구성은 실내에 비이컨을 설치하고, 3 개 이상의 비이컨과 리시버 사이의 거리를 초음파와 무선 통신 파의 시간차이를 이용하여 측정하고, 비이컨의 좌표로부터 로봇의 위치를 찾아내는 구조이다. 기본적으로 사용되는 위치 계산방법은 비이컨과 리시버의 두 점 사이의 거리식으로 거리를 구하고, 3 개 이상 거리정보로 부터 least square method 를 이용하여 계산한다. 또한 로봇의 제한된 환경을 이용하여 다른 계산 방법도 연구[5]되어 지고 있다.

지금까지의 연구들은 거리 정밀도를 높이거나, 위치 정보의 보정방법을 통하여 위치 정밀도를 높이는 연구[6~8]가 진행되었지만, 측정 구역 전체에 대한 위치 정밀도를 제시하지 못하였다. 또한 위치 정밀도를 높이기 위하여 비이컨의 좌표를 어떻게 설치해야 할 것인가에 대한 2 차원 공간에서의 연구[10]는 진행되어 왔었지만, 3 차원 위치인식시스템에서는 진행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 측정구역 전체에 대하여 위치정밀도를 계산하고, 위치 정밀도를 좋게 하기 위한 비이컨의 배치에 대하여 연구를 하였다.

본 연구에서는 2 장에서 거리 측정과 위치를 측정하는 방법과 초음파 거리 정보의 특성을 설명하고, 3 장에서 일반적으로 많이 사용되는 위치 인식 시스템의 예를 들어 측정지점에 따라 달라지는 위치오차를 설명하였다. 4 장에서는 3 장에서 사용한 위치 인식 시스템의 비이컨의 좌표를 다르게

¢ 황의근, 서울시립대학교
E-mail : skyground@uos.ac.kr
TEL : (02)2210-2959 FAX :
* 서울시립대학교

하면서 위치 정밀도를 알아보고, 위치 정밀도를 좋게 하기 위한 비이컨의 좌표를 고찰하였다.

2. 위치 측정

본 연구에서 사용된 시스템은 Fig.1 과 같이 리시버가 RF 통신으로 각 비이컨을 호출하고, 호출된 비이컨이 송출한 RF 와 초음파를 리시버가 수신하여, 그 도달시간차를 이용하여 각 비이컨과 리시버 사이의 거리를 계산하고, 3 개 이상의 비이컨의 위치정보와 거리정보로부터 리시버의 위치를 측정하는 시스템이다.

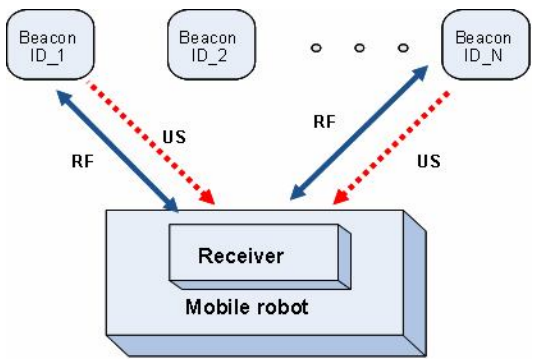


Fig. 1 Basic composition of system

2.1 거리측정

비이컨과 로봇 사이의 거리는 US 신호의 도착시간(T_{US})과 RF 신호의 도착시간(T_{RF}) 차이를 이용하여 식 (1)과 같이 계산한다. a 는 초음파 송신기와 리시버간의 초음파 신호 발생 및 신호처리과정에서 생기는 지연시간 등에 의해 발생하며 그 값은 일정하다. c_{US} 는 초음파의 속도 항으로써 온도에 따라 일정한 값을 갖는다. 또한 RF 의 속도는 빛의 속도와 같으므로 RF 의 도달시간 T_{RF} 을 0 이라고 가정할 수 있다.

$$r = c_{US}(T_{US} - T_{RF}) + \alpha_{\text{offset}} = c_{US}T_{US} + \alpha_{\text{offset}} \quad (1)$$

거리측정 시 가장 중요한 문제는 US 신호의 도착시간(T_{US})을 찾는 것이다. 일반적으로 쓰이는 thresholding 방법[9]을 사용하는 초음파의 파장의 크기로 인하여 최소 한 파장이상의 측정오차로 인하여 거리오차를 갖게 된다.

2.2 위치 측정

거리 측정을 이용하여 리시버와 비이컨 사이의 3 개 이상의 거리 정보를 알고 있으면 로봇의 위치 는 GPS 등의 위치 인식 시스템 등에서 사용되는 방법의 하나인 Least square method 를 응용하여 아래와 같은 방법으로 계산 가능하다.

2.2.1 Least-Square-Method

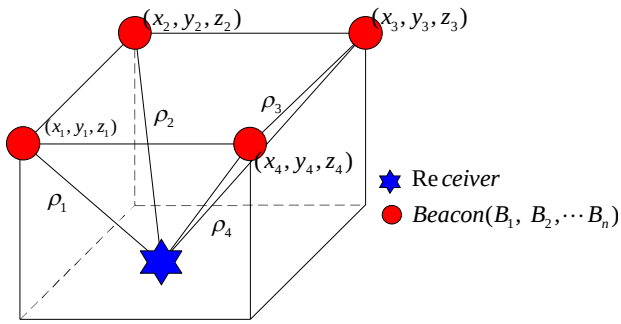


Fig. 2 location of beacon and robot

Fig.2 와 같이 각 비이컨의 위치 (x_i, y_i, z_i) 와 거리정보 ρ_i 로부터 리시버의 위치를 계산한다. 두 점 사이의 거리를 구하는 식은 식(2)와 같다.

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

각 비이컨으로부터의 거리식을 정리하면 식(3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & -2z_1 \\ -2x_2 & -2y_2 & -2z_2 \\ -2x_3 & -2y_3 & -2z_3 \\ -2x_4 & -2y_4 & -2z_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{H} \underbrace{\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix}}_{X} = \underbrace{\begin{bmatrix} \rho_1^2 - s_1 \\ \rho_2^2 - s_2 \\ \rho_3^2 - s_3 \\ \rho_4^2 - s_4 \\ \vdots \end{bmatrix}}_{R_a} + u \underbrace{\begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ \vdots \end{bmatrix}}_{R_b}$$

$$\text{(where, } s_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2,\ u = x_R^2 + y_R^2 + z_R^2\text{)} \quad \textbf{(3)}$$

$HX = R_a + uR_b$ 에 pseudo inverse matrix 인 $H^* = (H^T H)^{-1} H^T$ 을 양변에 곱해준 후 정리하면 u 를 포함한 X 를 구할 수 있다. X 를 $u = x_R^2 + y_R^2 + z_R^2$ 에 대입하면 u 의 2 차 방정식을 얻을 수 있고 u 값을 다시 대입하면 로봇의 좌표 X 를 얻을 수 있다.

3. 위치 오차

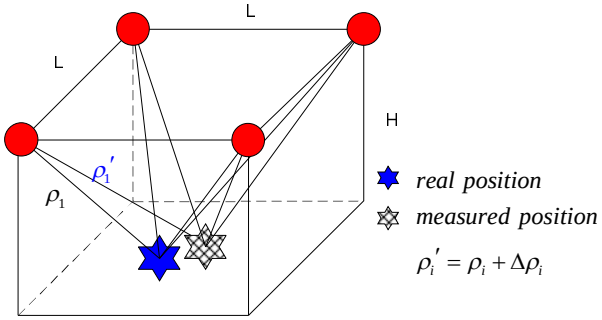


Fig. 3 Position error due to distance error

로봇의 위치를 알기 위해서는 기본적으로 앞에서 사용한 least-square-method 를 사용하게 되며, 식(3)에서 보이듯이 3 개 이상의비이컨 좌표와 거리정보로부터 로봇의 위치를 결정하게 된다. 비이컨의 좌표는 변하지 않는 값이고, 초음파를 이용한 거리정보는 오차를 포함하여 변하게 되므로 거리오차에 대한 위치오차가 발생하게 된다.

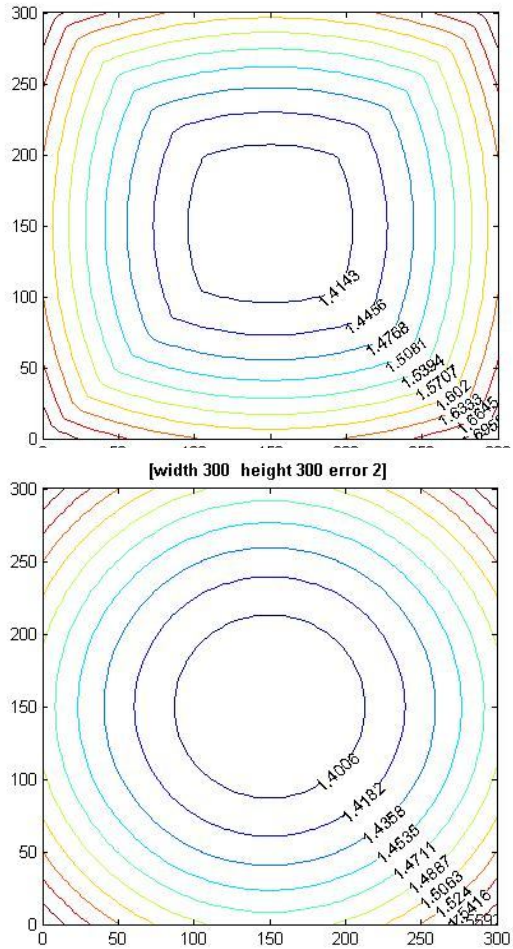
거리오차 $\Delta\rho_i$ 는 측정거리에 따라 상관없이 일정($|\Delta\rho_i| < \varepsilon$)하다고 가정하면, 최대위치오차 $(\Delta x_R, \Delta y_R, \Delta z_R)$ 는 가장 나쁜 거리오차를 가질 경우, 즉 거리오차가 최대인($\rho_i \pm \varepsilon$)일 때에 발생하게 되고, 위치오차의 범위는 리시버의 측정지점에 따라 변하게 된다.

본 절에서는 일반적으로 사용 되어 지는 Fig.4 와 같은 배치로 비이컨을 설치하고 최대 거리오차의 크기(ε)가 2cm 일 때의 위치오차의 범위를 알아보았다. 위치를 계산하기 위해서는 3 개 이상의 비이컨을 사용하게 되는데, 거리정보가 많을수록 위치오차를 줄일 수 있다. 하지만 너무 많으면 계산시간이 오래 걸리므로 4 개의 비이컨을 사용한 경우를 알아보았다. 4 개의 비이컨은 같은 높이 300cm 에 길이가 300cm 인 정사각형 모양으로 설치되어 있고, 리시버의 측정구역은 실제로 사용되어지고 있는 청소로봇이나 경비로봇과 같이 바닥을 이동하는 것으로 가정하여 z=0 인 평면을 측정구역으로 하였다.

위치오차 ΔX 의 범위, 즉 최대위치오차의 크기 E 는 RMS(Root mean square)를 적용한 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

그러나 리시버의 측정구역은 z = 0 인 평면으로 고정되어 있으므로, 실제의 $\Delta z_R = 0$ 이라고 할 수 있고 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

Fig.4 는 Matlab 을 사용하여 5cm 의 grid 간격으로 61*61 의 측정지점에 대하여 최대위치오차를 구하고, 최대값과 최소값을 12 등분하여 최소값과 최대값을 제외한 나머지 10 개의 값에 대하여 contour 곡선으로 나타낸 것이다.



(b) RMS(Δx_R, Δy_R), $\Delta z_R = 0$

Fig. 4 Worst case error contours for ¡ 2cm distance error

Fig.4 (a)는 Δx_R, Δy_R, Δz_R 의 오차를 고려한 값이고, (b)는 $\Delta z_R = 0$ 으로 가정하고 Δx_R, Δy_R 의 오차를 나타낸 것이다. Fig.4 에서 보이듯이 측정지점에 따라 위치오차 범위, 즉 최대위치오차의 크기는 다르며, 측정구역의 꼭지점 부근에서 가장 크다는 것을 알 수 있다.

$$E = \max\left(\sqrt{(x_R(\rho_i \pm \varepsilon) - x_R(\rho_i))^2 + (y_R(\rho_i \pm \varepsilon) - y_R(\rho_i))^2 + (z_R(\rho_i \pm \varepsilon) - z_R(\rho_i))^2}\right) \quad \textbf{(4)}$$

$$E = \max\left(\sqrt{(x_R(\rho_i \pm \varepsilon) - x_R(\rho_i))^2 + (y_R(\rho_i \pm \varepsilon) - y_R(\rho_i))^2}\right) \quad \textbf{(5)}$$

최대위치오차는 측정지역에서의 각 지점에서 일어날 수 있는 오차의 범위를 말해준다. 따라서 최대위치오차의 크기는 각각의 측정 지점에 위치정밀도를 나타내며, 모든 측정지점의 평균값으로 측정구역 내에서의 위치정밀도를 나타낼 수 있다. 또한 측정구역 내에서 보장할 수 있는 최대위치오차의 크기는 측정지점 중 가장 큰 값으로써 나타낼 수 있다.

4. Beacon 의 위치에 따른 최대위치오차

3 절에서는 비이컨의 위치를 L 과 H 로 고정한 상태에서 거리오차에 대한 최대위치오차를 알아보았고, 측정지점에 따라 그 크기가 다른 것을 알 수 있었다. 최대위치오차는 식(2)의 least square method 를 사용하여 계산 되어 지는데, 그 크기는 비이컨의 좌표에 의해 변하는 것을 알 수 있다.

본 절에서는 3 절의 비이컨의 위치 L 과 H 중에서, Fig.5 과 같이 x-y 평면 그래프의 범위를 같게 하여 쉽게 비교할 수 있도록 L 을 고정하고, H 를 변화시키면서 최대위치오차를 알아보았고 Table. 1 에서 측정구역의 최대위치오차와 최대값을 계산하였다.

Partial error 는 Fig.5 의 (a) ~ (f)와 Table.1 에서 보이듯이 원의 형태로써 높이에 따른 최대위치오차는 높이가 높을수록 높게 나타난다. 즉 높이가 높을수록 정밀도가 떨어지는 것을 알 수 있다.

Total error 는 Fig.5 의 (g) ~ (l)와 Table.1 에서 보이듯이 200cm 이하에서는 높이에 따라 다르지만 200cm 이상에서는 둥근 사각형의 형태로 나타남을 알 수 있다. 정밀도는 150cm 에서 가장 작으며, 150cm 이하의 구간에서는 150cm 이상의 구간보다 정밀도가 많이 떨어지는 것을 알 수 있다.

Partial error 와 Total error 가 높이에 따라 다른 이유는 ΔX, ΔY, ΔZ 의 크기 때문이다. Table.1 에서 보이듯이 높이가 늘어남에 따라 ΔZ 의 크기가 작아지는데, 150cm 이하에서는 차이가 매우 크고 150cm 이상에서는 조금씩 작아진다. 반면에 ΔX, ΔY 는 조금씩 늘어나며, 이로 인하여 높이에 따라 Partial error 와 Total error 가 달라짐을 알 수 있다.

또한 측정구역 내에서 위치정밀도가 좋은 측정지점은 높이가 100cm 이상에서는 중심부에서 가장 좋은 것을 알 수 있다. 그러나 Fig.5 의 (g), (h)를 보면 중심부의 위치오차가 contour 의 4 ~ 5 번째 부근에서보다 높은 것으로 보아 항상 중심부의 위치정밀도가 높지 않음을 알 수 있다.

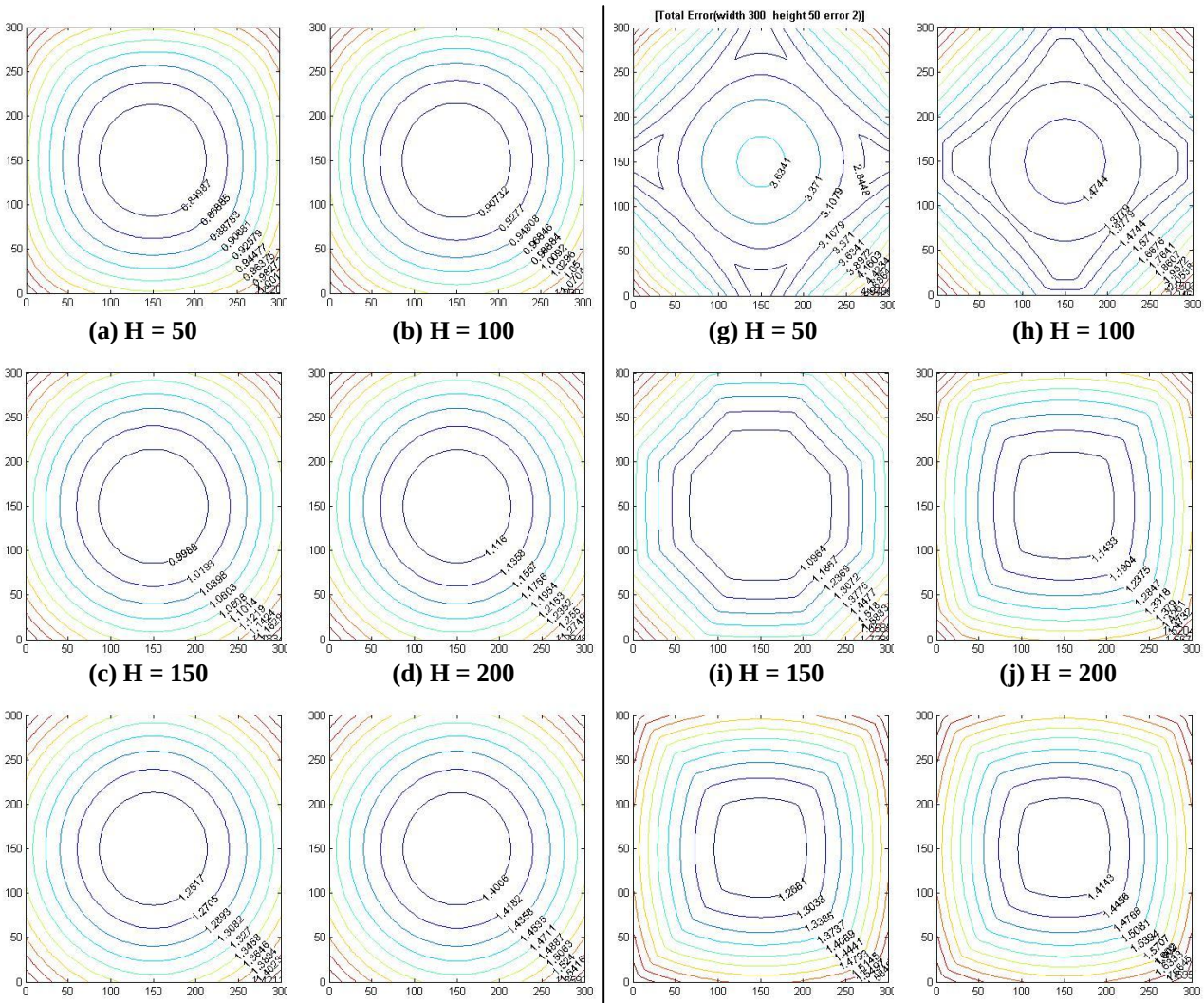
5. 결 론

초음파를 이용한 위치 인식 시스템에서 가장 중요한 문제는 3 개 이상의 초음파 거리정보로부터 위치를 계산하는 문제이다. 초음파 거리정보는 초음파 신호처리과정에서 항상 오차를 갖게 된다. 따라서 거리오차가 위치오차에 영향을 미치게 되며, 같은 거리오차가 있는 경우에도 비이컨의 좌표에 따라서 위치오차의 범위가 방향에 따라서 달라지게 된다.

본 논문에서는 초음파의 거리정보가 측정거리에 상관없이 일정한 범위를 갖는 특성을 이용하여, 최대거리오차(ε)를 ¡2cm 로 정하고, 이에 따른 위치오차의 범위를 알아보았다.

로봇의 위치를 찾는 문제는 3 개 이상의 비이컨과 리시버의 두 점 사이의 거리식을 이용하여 least-square-method 로 로봇의 위치를 찾는 알고리즘을 사용하였고, 이 방법으로 최대위치오차를 구하였다. 그리고 일반적으로 사용되는 청소 로봇이나 경비로봇의 움직임을 고려하여, ΔZ=0 일 때의 경우에 대하여 위치오차의 범위를 알아보았다.

또한 일반적으로 많이 사용되어지는 Fig.3 와 같은 경우에 비이컨의 좌표에 따라 다르게 나타나는 각각의 측정지점의 최대위치오차의 범위를 알아보았고, 측정구역에서의 위치정밀도와 최대위치오차를 비교하였을 때 비이컨의 높이가 150 ~ 200cm 일 때에 위치정밀도가 좋음을 알 수 있었다.



(a) H = 50 (b) H = 100 (g) H = 50 (h) H = 100

(c) H = 150 (d) H = 200 (i) H = 150 (j) H = 200

(e) H = 250 (f) H = 300 (k) H = 250 (l) H = 300

Partial Error RMS(Δ X, Δ Y), Δ Z=0 **Total Error RMS(Δ X, Δ Y, Δ Z)**

Fig. 5 Worst case error contours due to beacon height (¡ 2cm measurement tolerances)

Table 1 Error within area due to beacon height

Height(cm)	Δ X or Δ Y	Δ Z	Total Error(Δ X- Δ Y- Δ Z)		Partial Error(Δ X- Δ Y)	
			Average	Max	Average	Max
50	0.6394	3.2982	3.4199	5.4757	0.9043	1.0397
100	0.6816	1.2224	1.5567	2.3435	0.9639	1.1111
150	0.7468	0.6679	1.2496	1.7991	1.0561	1.2039
200	0.8288	0.5121	1.2791	1.6146	1.1721	1.3146
250	0.9228	0.4781	1.3899	1.6202	1.3051	1.4399
300	1.0259	0.4611	1.5223	1.7271	1.4508	1.5768
350	1.1354	0.4509	1.6678	1.8523	1.6057	1.7231
400	1.2498	0.4444	1.8225	1.9903	1.7675	1.8768

참고문헌

(1) Tatsuo Arai, Eiji Nakatno, ¡Development of Measuring Equipment for Location and Direction Using Ultrasonic Waves,¡ Transactions of the ASME, Vol. 105, pp. 152-156, 1983.

(2) N. Priyantha, A. Chakraborty and H. Balakrishnan., ¡The Cricket Location Support System,¡ Proc. 6 th ACM Mobicom Conf., pp 32-43 , 2000.

(3) N. B. Priyantha, Allen K. L. Miu, Seth Teller., ¡The Cricket Compass for Context Aware Mobile Applications,¡ Proc. 7 th ACM Mobicom Conf.,ACM Press, pp 1-14, 2001.

(4) J. Hightower, G. Borriello., ¡ Location Systems for Ubiquitous Computing,¡ IEEE, pp57-66, 2001

(5) R. Want et al., ¡The Active Badge Location System,¡ ACM Trans, Information System, pp91-102, 1992

(6) S.Y lee, J.H Jin., ¡Self-localization of a Mobile Robot Using Global Ultrasonic Sensor System,¡ Journal of CASE, Vol. 9, pp145-151, 2003.

(7) S.Y Kim, D.H Lee, H.T An, M.H Lee., ¡Performance Analysis of Ultrasonic Positioning System Using DGPS,¡ IECON, 2004.

(8) Fernando Figueroa, Ajay Mahajan., ¡A Robust Method to Determine the Coordinates of a Wave Source for 3-D Position Sensing,¡ Transactions of ASME, Vol. 116, pp 505-511, 1994.

(9) Billur Barshan., "Fast processing techniques for accurate ultrasonic range measurement,¡ Meas. Sci. Technol. , Vol. 11, pp 45-50, 2000.

(10) Clare. D. Mcgillem, ¡A Beacon Navigation Method for Autonomous Vehicles¡ IEEE transactions on vehiclar technology, VOL. 38. No.3 august ,1989