

초음파와 무선통신파를 이용한 로봇 측위 기술의 위치 정확도 평가

Evaluation of Robot Localization by Ultrasonic and Radio Frequency

*이양재¹, #신동현²

*Y. J. Lee¹, #D. H. Shin(Shin@uos.ac.kr)²

¹ 서울시립대학교 기계정보공학과, ² 서울시립대학교 기계정보공학과

Key words : GPS, Localization System, US, Distance error

1. 서론

자율주행 로봇의 자기위치 인식 기술은 로봇이 사용되기 위한 가장 핵심적인 기술에 속한다. [1] 특히, 실내환경에서의 위치 인식을 위해서는 주변환경을 감지 하기 위한 센서로 2 차원 기반의 대상과의 거리를 측정하는 초음파 센서와 레이저 센서가 있으며 3 차원 정보 수집을 목적으로 하는 비전 센서 등이 있다. 이중 레이저 센서와 비전 센서는 데이터를 처리 시간 문제로 실시간 인식에 문제가 있으며 큰 비용 상승을 초래한다. 따라서 본 논문에서는 처리과정이 간단하여 실시간 인식에 용이하며 경제적인 초음파(US) 센서와 무선 통신파(RF) 센서를 사용한다. 사용되는 센서는 고정좌표를 부여하여 절대 위치를 측정하는 방법[2]으로 논문을 작성하였다.

일반적으로 US 와 RF 를 이용한 센서 기반의 위치 인식 기술은 실내에 배치된 다수의 비컨 그룹 중에 3 개 이상의 비컨을 선택하여 수신되는 US 와 RF 의 시간차를 이용해 리시버와 비컨간의 거리를 측정하고, 초기에 주어진 비컨의 절대 좌표를 바탕으로 리시버의 위치를 계산하는 방식이었다[2]. 또한 정확도를 높이기 위한 방안으로 센서 자체의 성능향상이나 필터링 기술을 연구하였다[3]. 논문에서는 위치정보의 오차 발생 원인에 대해서 고정 좌표의 센서로부터 얻어지는 거리정보만이 리시버의 위치를 결정한다는 점과 초음파 신호의 수신 방식에 의해 일정 범위내의 오차를 포함하는 것에 착안하여 실험 없이 이를 통해 위치정밀도를 구하는 방법을 제시하고 평가하기 위해 2 절에서 거리정보를 통한 초기 리시버의 위치측정하고 3 절에서는 발생 가능한 최대 위치오차를 구하는 방법과 민감도를 정의하고, 4 절에서는 이론적으로 구해진 값과 실험을 통한 값을 비교 평가하였다.

2. 초기 위치 계산

논문에서 사용된 위치 인식 시스템은 Fig.1 과 같이 작성된 비컨 리스트를 토대로 리시버에서 순차적으로 비컨에 US 와 RF 신호를 보고 비컨에서는 수신된 신호의 시간차를 이용하여 거리를 계산하여 그 값을 리시버에 보내고, 수집된 3 개 이상의 거리정보를 통해 리시버의 위치를 계산하게 된다.

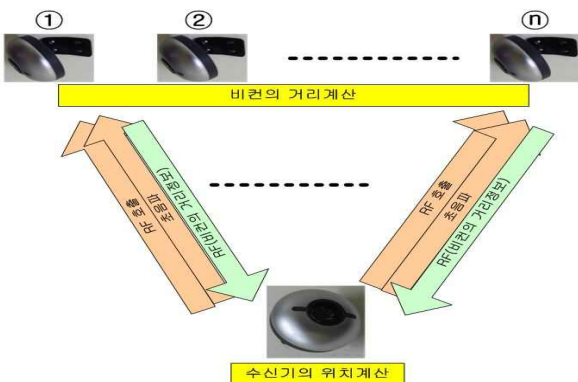


Fig.1 Localization System Using US and RF

리시버의 위치 측정을 위해서는 3 개 이상의 비컨으로

부터의 거리 정보가 필요하다. 리시버의 위치는 거리정보를 토대로 GPS 에서의 위치를 검출하는 방법을 통해 계산할 수 있다[4].

비컨과 리시버 사이의 거리 ρ_i 는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

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

비컨에서 얻어진 거리 식 (2)를 식(3)과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \rho_1^2 - s_1 \\ \rho_2^2 - s_2 \\ \rho_3^2 - s_3 \\ \rho_4^2 - s_4 \\ \vdots \end{bmatrix} + u \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & -2z_1 \\ -2x_2 & -2y_2 & -2z_2 \\ -2x_3 & -2y_3 & -2z_3 \\ -2x_4 & -2y_4 & -2z_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} \quad (3)$$

(where, $s_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$, $u = x_R^2 + y_R^2 + z_R^2$)

식(3) $HX=C+uD$ 에 pseudo-inverse matrix $H^*=(H^T H)^{-1} H^T$ 를 양변에 곱해주면 u 를 포함한 X 를 $X=H^*C+uH^*D$ 와 같이 나타낼 수 있고 이는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} + u \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $H^*C = m$, $H^*D = n$

X 의 각 성분을 u 에 대입하여 얻은 2 차식을 계산해 이를 다시 식(6)에 적용하여 로봇의 좌표 X 를 구한다.

3. 위치 정확도와 민감도

거리 오차에 따른 리시버의 위치오차 범위는 Taylor Expansion 을 이용해 구할 수 있다. Fig.2 와 같이 실제 리시버의 좌표 $(\tilde{x}_R, \tilde{y}_R, \tilde{z}_R)$ 와 센서 특성에 의한 오차로부터 계산된 리시버의 위치 (x_R, y_R, z_R) 를 식(5)와 같이 두 개의 식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{(x_i - x_R)^2 + (y_i - y_R)^2 + (z_i - z_R)^2} = f(x_R, y_R, z_R) \\ \tilde{\rho} &= \sqrt{(x_i - \tilde{x}_R)^2 + (y_i - \tilde{y}_R)^2 + (z_i - \tilde{z}_R)^2} = f(\tilde{x}_R, \tilde{y}_R, \tilde{z}_R) \end{aligned} \quad (5)$$

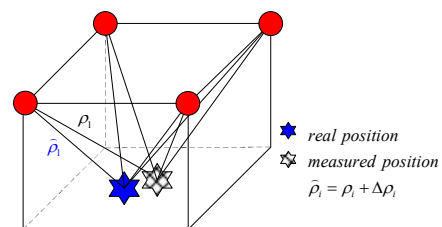


Fig.2 Position error due to distance error

식 (5)는 $f(x_R, y_R, z_R) = f(\tilde{x}_R + \Delta x_R, \tilde{y}_R + \Delta y_R, \tilde{z}_R + \Delta z_R)$ 인 관계를 이용해 Taylor series 를 이용하면 식(6)을 얻는다.

$$f(x_R, y_R, z_R) = f(\tilde{x}_R, \tilde{y}_R, \tilde{z}_R) + \frac{\partial f(\tilde{x}_R, \tilde{y}_R, \tilde{z}_R)}{\partial \tilde{x}_R} \Delta x_R + \frac{\partial f(\tilde{x}_R, \tilde{y}_R, \tilde{z}_R)}{\partial \tilde{y}_R} \Delta y_R + \frac{\partial f(\tilde{x}_R, \tilde{y}_R, \tilde{z}_R)}{\partial \tilde{z}_R} \Delta z_R + \dots \quad (6)$$

식(6)을 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta \rho_i = \frac{x_i - \tilde{x}_R}{\tilde{\rho}_i} \Delta x_R + \frac{y_i - \tilde{y}_R}{\tilde{\rho}_i} \Delta y_R + \frac{z_i - \tilde{z}_R}{\tilde{\rho}_i} \Delta z_R \quad (7)$$

여기서 $\Delta \rho_i = \tilde{\rho}_i - \rho_i$ 이고, $x_i, \tilde{x}_R, \tilde{\rho}_i$ 는 각각 비컨의 좌표와 초기 리시버의 위치를 통해 얻어진다. 여기서 식(7)의 각 성분을 행렬로 나타내고 오차성분의 계수를 행렬로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \rho = A \Delta R \quad (8)$$

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

ΔR 의 값을 구하기 위해 행렬 A 를 SVD 를 통해 분해하면 다음 식(9)를 구할 수 있다.

$$\Delta R = V \Sigma^+ U^T \Delta \rho \quad (9)$$

A 가 $m \times n$ 행렬 일 때, U 는 $m \times m$ 직교행렬이고, V 는 $n \times n$ 직교행렬이다. U 의 column 은 AA^T 의 고유벡터이고, V 의 column 은 $A^T A$ 의 고유벡터이다. U 와 V 는 직교 행렬이므로 $\det U U^T = 1, \det V V^T = 1$ 이다. 따라서 A 의 singular value ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)로부터 모든 거리오차에 대한 위치오차 범위에 대한 식 (10)과 민감도(Sb)식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\|\Delta R\|_{\max} = \|\Delta \rho\| / \sigma_3 \quad (10)$$

$$\frac{1 / \|R\|}{\sigma_1 / \|\rho\|} \leq S_b \leq \frac{1 / \|R\|}{\sigma_3 / \|\rho\|} \quad (11)$$

4. 평가 및 결론

알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 비컨을 300cm 간격의 사각형 형태로 배치하고 높이에 변화를 주어 측정하였다.

Table 1 Position error due to distance error

Height (cm)	ΔR_{\max}	$\ \Delta R\ _{\max}$
50	4.557	4.359
100	2.368	2.345
150	1.739	1.732
200	1.944	1.944
250	2.186	2.186
300	2.450	2.750
350	2.729	2.729
400	3.019	3.019

Table 2 Position sensitivity due to distance error

Height (cm)	Max	Min
Case1 50	4.478	1.493
Case2 100	2.593	1.729
Case3 150	2.121	2.121
Case4 200	2.671	2.004
Case5 250	3.378	2.027
Case6 300	4.243	2.121
Case7 350	5.264	2.256
Case8 400	6.443	2.416

ΔR_{\max} 는 각 성분의 오차값이 최대일 경우의 위치오차를 나타낸다. Table1 과 Table2 를 토대로 거리오차에 따른 위치오차와 최대 거리오차에 따른 위치오차는 높이가 증가할수록 작아짐을 알 수 있고, 민감도 값의 경우 특정 높이를 기준으로 높이가 증가하거나 감소할 경우 민감도의 폭이 커짐을 알 수 있다. 이를 통해 상대적으로 민감도의 폭이 작고 위치 정확도를 기대할 수 있는 최적화 된 높이를 선정할 수 있다.

위치 인식 시스템에 있어서 가장 주요한 이슈는 위치 정확도에 대한 사항이다. 위치 정밀도를 높이기 위해서는 측정 센서의 수를 늘려서 거리정보에 대한 데이터를 늘리도록 하거나, 센서 특성에 따른 오차정보를 추출하여 처리해 위치오차를 줄여야 한다. 거리오차에 의한 위치오차의 크기는 본 논문에서 볼 수 있듯이 비컨의 좌표에 따르게 된다. 따라서 비컨의 좌표가 정해져 있을 경우, 최대 위치 오차를 각각의 거리정보가 최대오차를 가질 경우에 대하여 각각 계산 후 가장 큰 위치오차로써 구하였다. 그리고 Taylor series 를 이용하여 거리정보에 대한 위치오차의 Sensitivity 를 구하였고, 비컨의 배치에 있어서 위치 정밀도와 민감도를 계산 결과를 통해 향상된 데이터를 얻을 수 있는 비컨의 배치에 대해 고찰하였다.

후기

본 논문에서는 US 와 RF 의 도착시간차를 이용해 거리를 계산하고, 위치를 계산할 때 발생할 수 있는 오차와 그에 따른 거리와 위치의 정밀도와 민감도를 정의하였으며, 최대 오차 및 민감도를 구하는 방법을 제시하였다. 향후 센서의 특성에 의한 오차가 아닌 센서의 결합에 의한 오차 발생시 문제상황을 판단하여 검출해내고, 보상할 수 있는 연구가 필요한 것으로 예상된다.

참고문헌

1. R. A. Brooks, "A Robust Layered Control system for a Mobile Robot", IEEE j. of Robotics and Automation, Vol. RA-2, NO.1, pp. 14-23, 1986.
2. Roy Want, Andy Hopper, Veronica Falcão and Jonathan Gibbons, "The Active Badge Location System", ACM Trans, Information System, pp. 91-102, 1992.
3. 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.
4. 정병목 외 3 인, "GPS 정보를 이용한 지능형 차량의 자율 경로추적 제어", 정밀공학회지 제 25 권 10 호 PP. 58-66, 2008.