

이동 로봇의 위치 인식을 위한 삼변 측량 확장 칼만 필터 설계

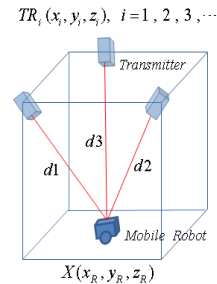
유제연*, 김진환**, 허욱열*
 인하대학교*, 인하공업전문대학**

The design of trilateration Extended Kalman Filter for localization of mobile robot

Je-yeon Yoo*, Jin-Hwan Kim**, Uk-Youl Huh*
 Inha University*, Inha Technical College**

Abstract - This paper presents an accurate indoor localization method of a mobile robot using ultrasonic sensors. The coordinates of mobile robot are calculated by using trilateration which is using the distance between the transmitter and receiver. At this time, the distances can't be accurately calculated by containing noise. We propose Extended Kalman Filter(EKF) to improve estimation accuracy. The performance of proposed EKF is evaluated by simulation program. As a result, we confirm that the errors in estimate of mobile robot's position are eliminated from measured distance.

신기의 좌표를 나타낸다.



〈그림 1〉 이동 로봇의 위치 인식 시스템

1. 서 론

최근 이동 로봇의 자기 위치 인식에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이동 로봇의 자기 위치 인식 능력은 어떠한 주어진 환경에서 경로 계획과 자율 주행 등에 매우 중요하다[1]. 이동 로봇의 자기 위치 인식은 다시 절대 위치 인식과 상대 위치 인식으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 실내 공간에서 자율 주행 중인 이동 로봇이 초음파 센서를 이용하여 센서의 좌표와 로봇의 좌표만을 이용하여 스스로 자신의 절대 위치를 인식할 수 있도록 계산해 주는 삼변측량 알고리즘을 확장 칼만 필터에 적용하여 보다 정밀한 위치 인식을 할 수 있는 방법을 제안한다.

로봇 위에 설치되어 있는 수신기의 높이를 기준($z_R = 0$)으로 송신기가 같은 높이 ($z_1 = z_2 = z_3$)에 설치되어 있을 경우 식 (3)은 수학적 과정을 거쳐 다음과 같이 나타낼 수 있다.

2. 본 론

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \end{bmatrix} = (A'A)^{-1}A'B \quad (4)$$

2.1 이동 로봇의 절대 위치 측정

이동 로봇의 절대 위치를 측정하기 위하여 특정한 위치에 고정되어 있는 송신기 사이에서 이동 로봇 사이의 거리를 측정하고 이를 기반으로 이동 로봇의 절대 위치 정보를 측정하게 된다.

이때

$$A = 2 \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \\ (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) \\ (x_3 - x_2) & (y_3 - y_2) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_2^2 - x_1^2 - y_1^2 + x_2^2 + y_2^2 \\ d_1^2 - d_3^2 - x_1^2 - y_1^2 + x_3^2 + y_3^2 \\ d_2^2 - d_3^2 - x_2^2 - y_2^2 + x_3^2 + y_3^2 \end{bmatrix}$$

2.1.1 초음파 센서를 이용한 거리 측정

본 논문에서는 초음파 센서를 이용하여 송·수신기 사이의 거리를 계산하였다. 송신기에서 전송된 초음파는 이동 로봇에 장착되어 있는 수신기까지 이동하게 되고 이는 초음파의 이동시간 TOF(time of flight)로 표현할 수 있다[2].

을 나타낸다. 이렇게 삼변 측량법을 이용하면 송신기의 위치와 송·수신기 사이의 거리만을 이용하여 이동 로봇이 어디에 놓여 있는지 상관없이 절대 위치 좌표를 측정할 수 있다.

$$TOF = T_r - T_t \quad (1)$$

이때, T_r 와 T_t 는 각각 초음파 신호의 수신된 시각과 전송된 시각을 나타내고 이 두 시각의 차로 초음파의 이동시간 TOF가 정의된다. 그리고 송·수신기 사이의 거리는 식 (2)와 같이 나타낸다.

2.2 확장 칼만 필터 알고리즘

이동 로봇의 위치는 잡음이 섞인 측정값을 이용하므로 정확한 위치를 추정하는데 어려움이 발생한다. 이러한 잡음을 확률변수로 취급하여 잡음을 제거하는 방법을 칼만 필터라고 한다. 본 논문에서는 보다 정밀한 이동 로봇의 절대 위치를 측정하기 위하여 비선형 시스템을 위한 확장 칼만 필터를 적용하였다[3].

$$d = c \times TOF \quad (2)$$

여기서 c 는 초음파의 전달 속도를 의미하며 약 $340m/s$ 의 값을 갖는다.

칼만 필터에 적용하기 위한 모델링은 식 (5)와 같이 각각 시스템 방정식과 관측 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{x}_k &= f_{k-1}(\vec{x}_{k-1}) + w_{k-1} \\ z_k &= h_k(x_k) + q_{k-1} \end{aligned} \quad (5)$$

2.1.2 삼변 측량에 의한 이동 로봇의 위치 좌표

이동 로봇의 위치 좌표는 <그림 1>과 같이 각각의 송신기의 좌표 $TR_i(x_i, y_i, z_i)$ 과 송·수신기 사이의 거리 d_i 를 이용하여 삼변 측량법에 의해 계산할 수 있다. 두 점 사이의 거리에 의해 송·수신기 사이의 거리를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(x_R - x_i)^2 + (y_R - y_i)^2 + (z_R - z_i)^2 = d_i^2, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

여기서 (x_R, y_R, z_R) 는 이동 로봇의 위치 좌표, (x_i, y_i, z_i) 는 송

여기서 \vec{x} 는 최적화하고자 하는 시스템 상태변수, 즉 로봇의 위치 좌표를 의미하고 시스템 방정식에서 $f(x)$ 는 이전 상태와 현재 상태를 변환시켜주는 함수를 나타낸다. 그리고 관측 방정식에서 z 는 관측된 값이고, 상태 변수와 비선형 함수 $h(x)$ 에 의해 표현되며, w, q 는 영 평균값을 갖고 가우시안 형태로 정규분포 값을 갖는 노이즈를 의미한다.

이동 로봇의 위치 좌표 x, y 는 로봇의 기구학(Kinematics)에 의해 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} = f(\vec{x}_{k-1}) = \begin{bmatrix} x_{k-1} + Tv_k \cos(\theta_k) \\ y_{k-1} + Tv_k \sin(\theta_k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 x_k, x_{k-1} 는 각각 로봇의 나중 위치와 현재 위치를 나타내고 T는 샘플링 타임, v_k 는 로봇의 이동 속도, θ_k 는 로봇의 진행 각도를 나타낸다. 관측 방정식은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_k = h_k(\vec{x}_k) + q_{k-1} = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_R - z_i)^2} + q_{k-1} \quad (7)$$

여기서 아래첨자 i 는 송신기의 수를 의미한다. 이러한 모델링은 칼만 필터에 적용된다. 칼만 필터는 예측 방정식을 계산하게 되고 이는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_k(-) &= f_{k-1}(\hat{x}_{k-1}(+)) \\ \hat{z}_k &= h_k(\hat{x}_k(-)) \end{aligned} \quad (8)$$

k번째 상태 $\hat{x}_k(-)$ 을 측정하기 위해, k-1번째 예측된 상태 $\hat{x}_{k+1}(+)$ 을 비선형 함수 f 를 통해 구한다. 측정할 관측값은 k번째 측정할 상태 예측값 $\hat{x}_k(-)$ 을 이용하고, 비선형 방정식을 선형화하기 위한 Jacobian 매트릭스를 구하면 식 (9)를 이용한다.

$$\begin{aligned} \Phi_{k-1}^{[1]} &\approx \frac{\partial f_{k-1}}{\partial x} \Big|_{x=\hat{x}_{k-1}(-)} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ H_k^{[1]} &\approx \frac{\partial h_k}{\partial x} \Big|_{x=\hat{x}_{k-1}(-)} \approx \begin{bmatrix} x_k - x_i & y_k - y_i \\ d_i & d_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

이를 칼만 이득을 구하기 위해 리카티 방정식에 적용하면 식 (10)과 같다.

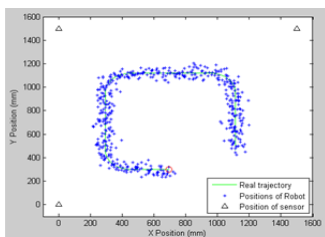
$$\begin{aligned} P_k(-) &= \Phi_{k-1}^{[1]} P_{k-1}(+) \Phi_{k-1}^{[1]T} + Q_{k-1} \\ \bar{K}_k &= P_k(-) H_k^{[1]T} [H_k^{[1]} P_k(-) H_k^{[1]T} + R_k]^{-1} \\ P_k(+) &= I - \bar{K}_k H_k^{[1]} P_k(-) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 \bar{K}_k 는 칼만 이득을 $P_k(-)$ 과 $P_k(+)$ 는 갱신 전후의 에러 공분산을 의미한다. 그리고 $Q_k = E[ww^T]$, $R_k = E[qq^T]$ 인 공분산 값을 의미한다. 이렇게 구해진 칼만 이득을 이용하여 추정된 값은 식 (11)로 구하여 갱신된다.

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + \bar{K}_k(z_k - \hat{z}_k) \quad (11)$$

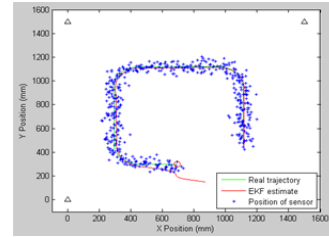
2.3 시뮬레이션 결과

위에서 설계된 확장 칼만 필터를 시뮬레이션 프로그램인 matlab을 이용하여 구현하였다. 고정된 위치, 즉 좌표 값을 알고 있는 위치에 설치되어 있는 초음파 센서의 측정 범위 내에서 이동 로봇이 실내 공간에서 자율 주행 중이라고 가정하였다. 이동 로봇의 위치 좌표를 시뮬레이션한 결과 그림 2와 같이 나타났다.



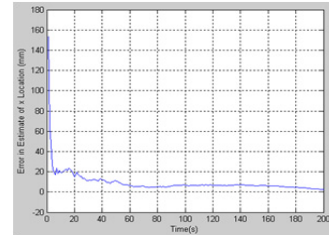
<그림 2>이동 로봇의 절대 위치 측정

그림 2에서 연두색 선은 직선과 곡선으로 구성된 이동 로봇의 주행 궤적을 의미한다. 이때 로봇은 빨간색 원으로 표시 되어 있는 지점에서 출발하여 반시계 방향으로 일정한 속도로 이동한다고 가정하였다. 그리고 삼각형은 3개의 초음파 센서인 송신기를 의미하고 파란색 점은 측정된 이동 로봇의 위치 좌표를 나타낸다. 이때 송·수신기 사이의 거리에는 잡음이 섞여 있기 때문에 이동 로봇의 정확한 위치 측정이 어려워짐을 알 수 있다. 이러한 잡음은 설계된 확장 칼만 필터에 적용하여 해결할 수 있는데 이는 그림 3에서 확인할 수 있다. 빨간색으로 표현된 선은 추정된 이동 로봇의 위치 좌표를 나타낸다. 그림 2에서와 동일한 궤적을 따라 로봇이 이동하고 같은 크기의 잡음을 갖게 설정을 해주었다.

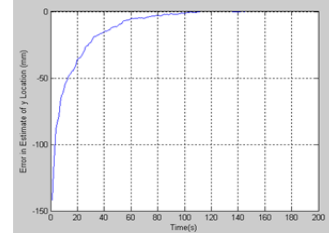


<그림 3>확장 칼만 필터를 적용한 이동 로봇의 절대 위치 측정

그림 3에서 나타난 것처럼 초기 추정치에 의해 실제 이동 로봇의 궤적과 추정된 이동 로봇의 궤적이 일치 하지 않는다. 그러나 시간이 지남에 따라 점차적으로 일치해가고 있음을 알 수 있다. 이러한 이동 로봇의 x, y 위치에 대한 오차는 그림 4와 그림 5를 통해 확인할 수 있다.



<그림 4>이동 로봇의 x 좌표 추정에서의 오차



<그림 5>이동 로봇의 y좌표 추정에서의 오차

그림 4는 이동 로봇의 x 좌표 추정에서의 오차를 의미한다. 처음 실제 x 좌표와 약 150mm의 오차가 나타났으나 60초 이후 오차가 0에 가까워지고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 이동 로봇의 y좌표 추정에서의 오차를 나타낸다. 처음 이동 로봇의 y 좌표는 실제 y좌표와 약 -150mm의 오차를 갖지만 약 10초 후 오차는 절반 정도로 줄었고 80초 이후 0에 수렴하는 것으로 보아 잡음이 완전히 제거 되어 이동 로봇의 절대 위치 측정이 정밀하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 실내에서 자율 주행 중인 이동 로봇의 정밀한 절대 위치 측정을 위한 삼변측량 확장 칼만 필터를 제안하였다. 이동 로봇의 절대 위치 좌표는 고정된 위치에 설치되어 있는 초음파 센서를 이용하여 송·수신기 사이의 거리를 계산한다. 이때 송·수신기 사이의 거리에는 잡음이 포함되어 있기 때문에 정확한 위치 좌표를 측정하는데 어려움이 따른다. 이러한 잡음은 제안된 확장 칼만 필터를 통하여 제거할 수 있다. 제안된 확장 칼만 필터의 성능을 시뮬레이션을 통해 확인한 결과 약 150mm의 오차가 제거되어 실제 로봇의 이동 궤적 거의 일치하는 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다. 향후 연구과제는 실제 환경에서 성능을 실험 할 수 있도록 시스템을 구현하여 이동 로봇의 위치 인식이 가능하도록 하는 것이다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 한국과학기술단 특정 기초연구사업(2008-0056386)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. Fukao, H. Nakagawa, and N. Adachi, "Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot," IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 16, no. 5, pp. 609-615, Oct. 2000.
- [2] D.Bank and T.Kampke, "High-resolution ultrasonic environment imaging," IEEE Trans.Robot, vol. 23, no.2, pp. 307-381, Apr. 2007
- [3] Mohinder S. Grewal, "Kalman Filtering Theory and Practice Using Matlab", Wiley-Interscience, pp. 169-201, 2001