

2 차원 PSD 를 이용한 이동로보트의 위치 보정에 관한 연구

노영식,[°]이기현
울산대학교 전기공학과

A Study on the Position Compensation of a Mobile Robot Using 2D Position Sensitive Detector

Young - Shick Ro, Ki - Hyun Lee
Dept. of Electrical Eng. UI - San Univ.

Abstract

The Position Sensitive Detector(PSD) is an useful which can be used to measurement the position of an incidence light in detail and in real-time. In this paper, light sources, to be predefined positions, are used as landmarks and the 2-D PSD signals are used to compensate the position of a running mobile robot. To induce the position compensation algorithm, first , we inspect the error factor, make the error model, and evaluate the error covariance matrix between the real position and estimated position in dead reckoning system. Next we obtain an optimal position compensation algorithm to update the estimated position using extended Kalman filter by the relation of the external light position and it's PSD signal. Through the simulation of navigating a robot the effectiveness of the proposed method is confirmed.

1. 서론

이동 로보트의 목적지 및 주행경로는 공간좌표로 주어지므로 현재의 이동로보트의 공간상의 위치를 정확하게 측정하는 것이 매우 중요하다. 특히 주행중에 있는 이동 로보트의 위치 측정은 실시간으로 처리되어야 한다. 위치 측정에 있어 기본적으로 채택되고 있는 방법으로는 바퀴의 회전량을 퀼 엔코더로 측정하여 이동 로보트의 위치를 계산하는 방법(Dead-Reckoning System)이 있다. 이 방법은 초기 위치오차가 거의 없고 주행량이 적은 경우에는 유용하나 주행량이 증가하면 바퀴의 미끄러짐 등의 원인으로 오차가 발생하고 이 오차가 누적되어 사전에 계획된 경로를 따라가기 어려워 진다. 따라서 로보트의 공간상의 위치를 직접 측정할 수 있는 외계 인식센서가 필요하고 이에 대한 연구가 이루어지고 있다.

외계 인식 센서에 의한 이동 로보트의 위치 측정은 주위의 자연환경 중에 알려진 위치에 있는 특정 물체에 대한 검출을 이용하는 방법과 인위적인 표식의 검출을 이용하는 방법으로 크게 나뉜다. 자연물을 이용하는 실질적인 방법으로 거리 감지 센서를 이용하여 통로의 벽, 모퉁이, 등을 검출하여 위치를 보정하는 방법들이 제시되었고 [1-2], 거리감지센서에 의해 측정된 2 차원 맵의 매칭을 이용한 방법들이 개발되었다 [3]. 그러나 이러한 방법들은 주위물체가 비교적 단순한 형태 (직선, 성

분으로 이루어진 형태)인 경우에 가능하고 주위의 상황이 변화하거나 검출할 적절한 물체가 없는 경우 (예를들어 사람이 많이 있는 넓은 로비의 경우)에는 적용이 불가능하다. 이러한 문제는 인위적인 표식을 주행경로 주위에 설치하고 이를 센서로 검출하는 방식으로 해결할 수 있다. 현재 실용화된 방법중의 하나는 레이저스캐너에 의해 주위에 설치된 반사물체를 검출하는 방식[4]이 있으나 이는 주행평면상의 경로주위에 인위적인 표식을 설치해야 하므로 적용에 한계가 있다. 이러한 문제는 비전센서를 이용하는 방법[5-6]으로 어느정도 해결할 수 있으나 비전센서는 주위조명의 영향을 많이 받고 실시간 처리에 어려움이 있으며 정밀성이 떨어지므로 실용적이지 못하다. 한편 최근에 주목받고 있는 PSD(Position Sensitive Detector)는 특정 파장의 입사된 광의 위치를 아날로그방식으로 매우정밀하게 검출할 수 있는 소자로 이를 이동로보트의 위치보정용으로 사용하는 경우 표식이 광원이므로 에너지가 필요한 단점은 있으나 주위조명에 거의 영향을 받지않고 실시간으로 정보를 제공하며 특히 설치의 제한이 거의 없는(천장, 벽 등 어디든 가능하고 높이도 수 m에서 수십 m까지 자유롭게 설치가능함)장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이동로보트의 위치보정용 센서로 PSD를 채택하였고 이를 이용하여 주행중에 있는 이동로보트의 위치를 실시간으로 보정하는 방법에 대하여 다루었다. 먼저 이동로보트의 운동에 대한 기하학적 모델로부터 근사화된 모델을 유도하고 이에 필요한 조건을 제시한다. 근사화된 모델과 바퀴의 이동량측정을 이용하여 이동로보트의 위치를 계산하고 이에 위치측정오차의 원인분석 및 오차에 대한 모델링을 통하여 오차분산 행렬을 구한다. 다음으로 알려진 광의 위치와 PSD 센서의 측정신호의 기하학적 관계식을 유도하고 확장된 Kalman filter에 기초한 위치보정알고리즘을 유도한다. 제안된 방법의 유용성을 검증하기 위하여 TRC 사의 LABMATE 를 이용하여 주행실험을 실시하고 특성을 분석하였다.

2. 이동로보트의 위치계산

2-1 이동로보트 위치의 기하학적 모델

그림 1 과 같이 샘플링 시간 τ 동안 이동 토보트의 좌표계가

Kc에서 K+lc로 변화하였을 때 양 바퀴 중심의 이동량을 각각 \dot{u}_l, \dot{u}_r 이라 하고 다음과 같이 가정하면.

가정 1. 샘플링 시간 동안 회전속도가 일정하다.

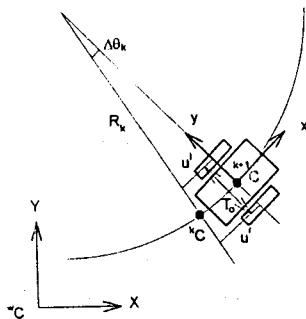


그림 1. 이동로보트의 기하학적 모델

$$\Delta\theta_t = \frac{\dot{u}_l - \dot{u}_r}{T_s}, \quad R_t = \frac{\dot{u}_l + \dot{u}_r}{2\Delta\theta_t} \quad (2-1)$$

이고,

$$x_{t+1} = x_t + 2R_t \cos(\theta_t + \frac{\Delta\theta_t}{2}) \sin \frac{\Delta\theta_t}{2} \quad (2-2)$$

$$y_{t+1} = y_t + 2R_t \sin(\theta_t + \frac{\Delta\theta_t}{2}) \sin \frac{\Delta\theta_t}{2} \quad (2-2)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \Delta\theta_t$$

이다. 또한 다음과 같이 가정하면.

가정 2. 샘플링 시간 동안 회전량은 매우 적다.
식 (2-2)는 다음과 같이 근사화 된다.

$$x_{t+1} \approx x_t + \frac{\dot{u}_l + \dot{u}_r}{2} \cos(\theta_t)$$

$$y_{t+1} \approx y_t + \frac{\dot{u}_l + \dot{u}_r}{2} \sin(\theta_t) \quad (2-3)$$

$$\theta_{t+1} \approx \theta_t + \frac{\dot{u}_l - \dot{u}_r}{T_s}$$

식 (2-3)을 상태변수 표현법을 이용하여 다시쓰면,

$$x_{t+1} = f_t(x_t, u_t) + w_t$$

$$x_t = \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{pmatrix} \quad (2-4)$$

$$u_t = \begin{pmatrix} \dot{u}_l \\ \dot{u}_r \end{pmatrix}$$

여기서 w_t 는 근사화 오차 및 기타 모델링 되지 않은 효과를 나타낸다.

2.2 휠엔코더 측정에 의한 위치계산 및 오차분석

바퀴 중심의 이동거리는 휠 엔코더를 이용하여 바퀴의 회전

량을 측정하므로써 구할 수 있으므로 이동 로보트의 위치는 식 (2-4)로 부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{x}_{t+1} = f_t(\hat{x}_t, \hat{u}_t)$$

$$\hat{u}_t = \frac{2\pi R_0}{C_0} Z_t \quad (2-5)$$

여기서

Zk: 휠엔코더의 증분

Co: 바퀴 1회전당 펄스 수

Ro: 바퀴의 반경

그러나 실제 바퀴 중심축의 이동거리와 측정된 거리는 다음의 원인으로 인하여 오차가 발생하며 이러한 오차는 누적되어 위치 측정에 커다란 오차를 발생시킨다.

- 1) 휠 엔코더의 양자화 오차
- 2) 파라미터의 부정확성 혹은 변화
- 3) 바퀴의 미끄러짐

1)에 의한 오차는 저속 운행시 위치측정 오차의 주요 원인이 되고 이동량과 판계없이 발생된다. 한편 2) 및 3)은 이동량에 비례하여 오차를 증가시키므로 고속운행시 위치 오차의 주요 원인이 된다. 휠 엔코더를 이용한 이동 로보트의 위치측정에 있어서 오차 정도를 계산하기 위하여 바퀴 중심의 이동량을 다음과 같이 모델링 한다.

$$u_t = \hat{u}_t + v_t$$

$$v_t = \begin{pmatrix} \tilde{u}_t s'_t + q'_t \\ \tilde{u}_t s'_t + q'_t \end{pmatrix} \quad (2-6)$$

여기서 q는 휠 엔코더의 양자화 오차로 분산은

$$\sigma_q^2 = \frac{1}{12} (\frac{2\pi R_0}{C_0})^2$$

이다. 또한 s는 이동량에 비례하는 2), 3)의 원인에 의한 오차를 표시한다. 식 (2-4)를 식 (2-5)에 대하여 선형화 하면,

$$\begin{aligned} \Delta x_t &= \frac{\partial f_t(\hat{x}_t, \hat{u}_t)}{\partial \hat{x}_t} \Delta x_t + \frac{\partial f_t(\hat{x}_t, \hat{u}_t)}{\partial \hat{u}_t} v_t + w_t \\ &= A_t \Delta x_t + B_t v_t + w_t \end{aligned} \quad (2-7)$$

$$A_t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\Delta \hat{l}_t \sin \hat{\theta}_t \\ 0 & 1 & \Delta \hat{l}_t \cos \hat{\theta}_t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \Delta \hat{l}_t = \frac{\tilde{u}_t + \tilde{u}'_t}{2} \quad (2-8)$$

$$B_t = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \cos \hat{\theta}_t & \frac{1}{2} \cos \hat{\theta}_t \\ \frac{1}{2} \sin \hat{\theta}_t & \frac{1}{2} \sin \hat{\theta}_t \\ \frac{1}{T_s} & -\frac{1}{T_s} \end{pmatrix} \quad (2-9)$$

이다. 그러므로 휠 엔코더에 의한 위치 계산은 다음과 같은 오차 분산 행렬을 갖는다.

$$P_{t+1} = A_t P_t A_t^T + B_t V_t B_t^T + W_t \quad (2-10)$$

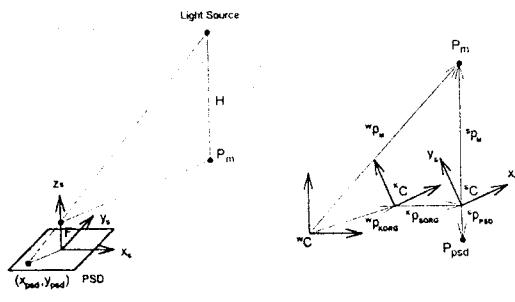
이상의 방법과 같이 이동 로보트의 상태 변화량을 측정하여 위치를 계산하는 방법을 Dead Reckoning system이라 하며 이러한 방법은 식 (2-10)에서 보는 바와 같이 시간이 경과할 수록 혹

은 주행량이 증가할 수록 계속적으로 오차를 증가시키는 경향이 있다. 따라서 오차를 일정한 범위내로 제한하기 위하여 외부 상태를 감지하여 위치 오차를 보정해 주는 방법이 필요하다.

3. PSD 를 이용한 이동로보트의 위치보정

3.1 광원 위치의 기하학적 모델

PSD 는 광원의 위치를 검출하기 위한 반도체 소자이다. 본 논문에서는 알려진 위치에 놓여진 광원의 위치 검출을 통하여 평면상의 이동 로보트의 위치를 감지하기 위하여 2 차원 PSD 를 사용하였다. 장애물에 의한 간섭을 피하기 위하여 광원은 이동 로보트 주행 공간상의 상부에 위치시켰다. 또한 PSD 는 주행 평면과 평행하고 이동로보트의 좌표계와 방향이 일치하도록 이동 로보트에 부착시켰다. 그림 2.a) 와 같이 렌즈의 촛점거리를 F, 광원의 높이를 H, PSD 상에 맷힌 광원위치를 (X_{psd}, Y_{psd})라 할 때, 광원의 주행 평면상의 위치와 검출된 위치의 관계는 그림 2.b)로 부터 식 (3-1)과 같이 구할 수 있다.



a) 광원과 PSD 좌표계 b) 주행평면으로의 투영

그림 2. PSD 센서 시스템

$${}^sP_M = {}^wR({}^wP_M - {}^wP_{KORG}) - {}^kP_{SORG} = \frac{1}{\alpha} {}^sP_{PSD} \quad (3-1)$$

여기서 $\alpha = F/H$ 이고,

$${}^wR = \begin{pmatrix} \cos\theta_k & \sin\theta_k \\ -\sin\theta_k & \cos\theta_k \end{pmatrix}$$

$${}^wP_M = \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \end{pmatrix}, \quad {}^wP_{KORG} = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \end{pmatrix}$$

$${}^kP_{SORG} = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \end{pmatrix}, \quad {}^sP_{PSD} = \begin{pmatrix} x_{psd} \\ y_{psd} \end{pmatrix}$$

이다. 식(3-1)을 PSD 상에 입사된 광원의 위치에 대해 풀어 쓰면,

$$\begin{aligned} x_{psd} &= \alpha \{(x_k - x_m) \cos\theta_k + (y_k - y_m) \sin\theta_k + X_s\} \\ y_{psd} &= \alpha \{-(x_k - x_m) \sin\theta_k + (y_k - y_m) \cos\theta_k + Y_s\} \end{aligned} \quad (3-2)$$

이를 벡터식으로 나타내면 다음과 같다.

$${}^sP_{PSD} = g(x_k)$$

$$\text{where } x_k = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \end{pmatrix}$$

3-2 광원 위치측정 오차분석

PSD 센서 출력신호에서 검출된 광원의 위치는 다음과 같은 벡터식으로 나타낼 수 있다.

$$y = g(x_k) + e \quad (3-3)$$

$$y = \begin{pmatrix} \hat{x}_{psd} \\ \hat{y}_{psd} \end{pmatrix}$$

여기서 e 는 PSD 센서에 의하여 검출된 광원의 위치와 실제 위치와의 오차를 표시한다. 이러한 측정오차는 단순히 PSD 센서의 측정 정밀도 및 신호의 측정 잡음뿐만 아니라 주행면의 상태에 따라 다르게 발생하는 이동로보트의 진동 및 흔들림에 의한 복합적인 요인에 의해 발생된다.

3-3 광원 위치측정에 의한 이동로보트 위치보정

PSD 센서에 의하여 검출된 위치정보를 이용하여 휠엔코더로 계산된 위치를 보정하기 위하여 식(3-3)을 식(2-8)에 의해 계산된 위치에 대하여 선형화하면,

$$\begin{aligned} y - g(\hat{x}_k) &= \frac{\partial g(\hat{x}_k)}{\partial \hat{x}_k} (x_k - \hat{x}_k) + e \\ &= C_k (x_k - \hat{x}_k) + e \\ C_k &= \alpha \begin{pmatrix} \cos\hat{\theta}_k & \sin\hat{\theta}_k & (\hat{x}_m - \hat{x}_k) \sin\hat{\theta}_k - (\hat{y}_m - \hat{y}_k) \cos\hat{\theta}_k \\ -\sin\hat{\theta}_k & \cos\hat{\theta}_k & (\hat{x}_m - \hat{x}_k) \cos\hat{\theta}_k + (\hat{y}_m - \hat{y}_k) \sin\hat{\theta}_k \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3-4)$$

이다. 이때 모든 오차항을 기대값이 영인 가우시안 백색잡음으로 가정하면 다음과 같이 확장된 칼만 필터(exended Kalman filter)를 이용하여 최적 위치를 측정할 수 있다.

$$\hat{x}_k (+) = \hat{x}_k (-) + K_k [y - g(\hat{x}_k (-))]$$

$$P_k (+) = P_k (-) - K_k C_k P_k (-) \quad (3-5)$$

$$K_k = P_k (-) C_k^T [C_k P_k (-) C_k^T + E_k]^{-1}$$

여기서 (-)는 보상전 값을, (+)는 보상후 값을 나타낸다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션 및 주행실험

4.1 직선 경로 주행 시뮬레이션

제안된 알고리즘의 유용성을 보이고 광원의 위치에 따른 특성을 분석하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 주행 실험을 수행하였다. 실험시 사용한 분산 행렬은 다음과 같다.

$$W_k = 0$$

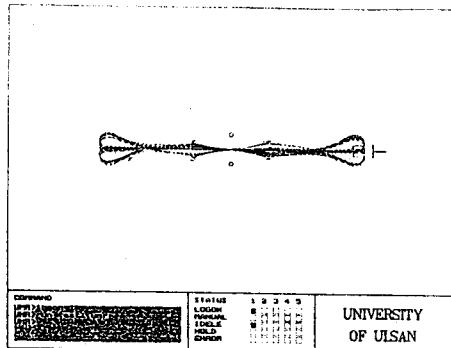
$$V_k = \begin{pmatrix} (0.05 \hat{u}_k + 4.5 * 10^{-5})^2 & 0 \\ 0 & (0.05 \hat{u}_k + 4.5 * 10^{-5})^2 \end{pmatrix}$$

$$E_k = \begin{pmatrix} (1 * 10^{-5})^2 & 0 \\ 0 & (1 * 10^{-5})^2 \end{pmatrix}$$

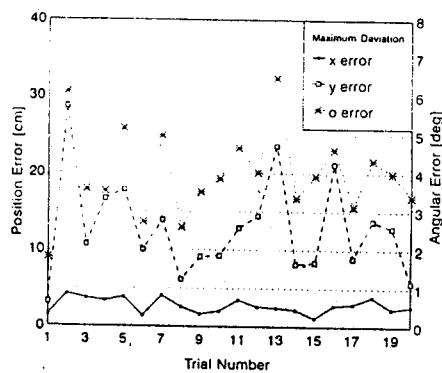
주행 공간상의 광원은 PSD 센서의 렌즈로 부터 3 m 높이에 설치된 것으로 간주하였고 이때 PSD 센서에서 광원을 감지할 수 있는 주행 평면상의 반경은 약 1.4 m 이다.

그림 3 의 a)는 이동로보트가 X 축 길이 10 m 의 직선 경로를 20 회 왕복주행한 결과를 보여주며 b)는 각 횟수마다의 최대

측정 오차를 보여 준다. 이 경우는 주행 경로의 각 방향으로 두개의 광원을 배치하여 주행 중 두개의 광원을 동시에 검출할 수 있도록 한 경우로 위치 및 방향 보정이 정확하게 이루어져 측정 오차가 일정한 범위내로 제한됨을 볼 수 있다.



a) 주행 시뮬레이션 결과



b) 왕복 횟수에 따른 최대 측정 오차

그림 3. 직선 경로의 주행 시뮬레이션 결과

4.2 주행 실험

제작된 PSD 센서를 이동로보트의 중심부에 부착하고 광원을 실험실 천정에 설치하여 주행실험을 실시하였다. 이때 주행경로의 거리는 3m로 하고, 광원은 PSD 센서로부터 약 2m의 높이에 위치시켰으며 주행경로의 중심부에 감지영역이 서로 겹치도록 두 개의 광원을 배치하였다. 그림 4는 왕복 주행시 경로의 중심부를 통과할 때 경로로 부터의 이탈거리를 측정한 결과이다. Dead - Reckoning 의 경우는 주행횟수가 증가할수록 각종 내부원인에 의한 위치계산 오차에 의하여 경로와의 이탈거리가 증가됨을 볼 수 있다. 그러나 PSD에 의한 보정을 수행한 경우에는 주행횟수에 관계없이 적은량으로 유지되고 있다.

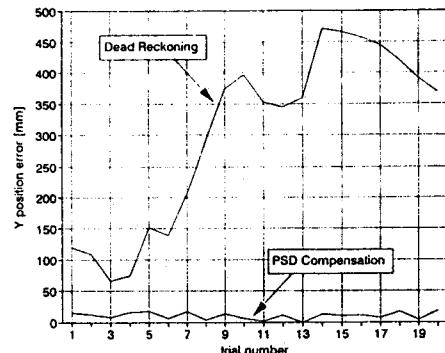


그림 4. 직선 경로의 주행실험 결과(경로 이탈거리 비교)

5. 결론

본 논문에서는 바퀴의 이동량 측정을 통한 이동 로보트의 위치 계산시 실제 위치와의 오차가 발생되는 원인을 분석하고 이에 대한 모델을 제시하여 확률적 오차 진행 과정을 유도하였다. 또한, 알려진 위치에 설치된 광원을 PSD로 검출하여 검출 신호와 이동 로보트의 실제 위치와의 관계식을 구하고 확장된 칼만 필터를 이용한 최적 위치보정 알고리즘을 개발하였다. 제안된 방법은 위치 보정용 광원을 자유롭게 배치(수 m에서 수십 m에 이르기 까지) 할 수 있고 주위 환경에 의해 제약을 거의 받지 않으므로 산업용 이동 로보트(무인 운반차)의 주행 유도뿐 아니라 일반 서비스용에서도 폭넓게 이용 가능하다. 향후 보다 적극적인 위치 보정을 위하여 불확실한 파라미터의 자동 보정에 대한 연구, 보다 응용 영역을 넓히기 위해 3 차원 상에서 움직이는 로보트의 위치 측정에 대한 연구 등이 필요하다.

참고 문헌

- [1] K. Komoriya, E. Oyama and K. Tani, "Planning of landmark measurement for the navigation of a mobile robot", Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp 1476-1481, 1992.
- [2] Y. Watanabe and S. Yuta, "Position estimation of mobile robots with internal and external sensors using uncertainty evaluation technique", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 2011-2016, 1990.
- [3] I.J. Cox, "Blanche - an experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 7, No.2, pp. 193-204, 1991.
- [4] T. Tsumura, and M. Hashimoto, "Positioning and guidance of ground vehicle by use of laser and corner cubes", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1986.
- [5] F. Chenavier and J. L. Crowley, "Position estimation for a mobile robot using vision and odometry", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2588-2593, 1989.
- [6] 홍문성, 이상용, 및 한민용, "이동로보트의 궤도판제기법", pp. 226-229, 1989.
한국 자동제어 학술회 pp. 226-229, 1989.