

멀티센서 융합을 이용한 자율이동로봇의 주행기록계 에러 보상에 관한 연구

송신우*, 박문수*, 홍석교**

*아주대학교 전자공학과 ** 아주대학교 전자공학부

A Study on Odometry Error Compensation
using Multisensor fusion for Mobile Robot Navigation

Sin-Woo Song*, Mun-Soo Park*, Suk-kyo Hong**

*Dept. of electronics engineering Aiou Univ.

Abstract - This paper present effective odometry error compensation using multisensor fusion for the accurate positioning of mobile robot in navigation. During obstacle avoidance and wall following of mobile robot, position estimates obtained by odometry become unrealistic and useless because of its accumulated errors. To measure the position and heading direction of mobile robot accurately, odometry sensor, a gyroscope and an azimuth sensor are mounted on mobile robot and Complementary-filter is designed and implemented in order to compensate complementary drawback of each sensor and fuse their information. The experimental results show that the multisensor fusion system is more accurate than odometry only in estimation of the position and direction of mobile robot.

1. 서 론

최근 연구 개발이 활발히 이루어지고 있는 이동로봇은 다른 종류의 산업용 로봇에 비하여 이동성과 조작성이 우수한 특징을 갖고 있을 뿐 아니라, 센서 기술 및 컴퓨터 기술의 발달에 힘입어 제조업을 비롯한 각종 산업 현장에서 사람의 역할을 대신할 수 있는 높은 잠재력을 갖고 있음이 인정되고 있다.[1,2]

이동로봇의 연구는 위치 추정(Localization), 경로계획(Path-planning), 장애물 회피(Obstacle avoidance) 등이 있고, 서로 병행되어 연구된다. 경로계획에는 정보에 따라 전역적 경로 계획방법(Global path-planning)과 국지적 경로 계획방법(Local path-planning)이 있다. 전역적 경로 계획 방법은 주위 환경에 대해 사전에 알고 있는 상황에서 이동 전에 미리 경로를 계획하는 방법이다. 국지적 경로 계획 방법은 사전에는 아무런 주위 환경에 대한 정보를 갖고 있지 않은 상태에서 이동 중에 센서로부터 얻어진 정보만으로 경로를 계획하는 방법이다. 센서로부터 얻어진 데이터 만으로 주행을 해야 하기 때문에 로봇의 위치에 대한 추정 데이터에 대한 정확성이 더욱 요구된다. 장애물 회피에서 사용되는 벽면따르기(Wall following)는 기본적으로면서도 중요한 동작이지만, 회전과 직진주행을 빈번히 행하므로써, 주행기록계(Odometry)에 오차를 유발하여 위치 추정에 정확성을 감소 시킨다.

주행기록계 즉, 엔코더는 정확한 정보를 실시간으로 얻을수 있으나 실제 값과 다른 바퀴지름과 윤거(輪車)로 인한 시스템적인 오차와 바퀴의 미끄러짐, 바퀴의 평탄치 않은 접촉면 그리고 바퀴의 지름의 변화 등과 같은 비시스템적인 오차에 의해 항법 오차를 발생한다. 그리고 자이로는 실제 동적 정보를 제공하는 독립적인 센서

이지만, 매우 작은 각속도 측정치의 오차에도 불구하고 적분을 사용하기 때문에 방위각의 오차가 누적되게 된다.

본론에서는 2.1장과 2.2장에서 이동로봇의 궤적 모델링에 대해 간략히 소개하고, 로봇의 이동을 위한 센서들의 구성과 각각의 역할에 대해 설명한다.

2.3장은 오차를 보정하기 위해 제안한 센서 퓨전 알고리즘인 Complementary filter의 개념을 설명하고, 4.2장에서는 자이로의 단점을 보완하기 위하여, 자이로와는 특성이 다른 방위각 센서와의 퓨전으로 보다 정확한 방위각을 얻고, 이 데이터를 사용하여 주행기록계의 데이터 오차를 보상한다. 실험을 통해 주행기록계만으로 위치 추정을 한 데이터와 센서 퓨전 알고리즘을 사용한 위치 추정 데이터를 비교하므로써, 성능의 우수함을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 로봇 시스템 궤적 모델링

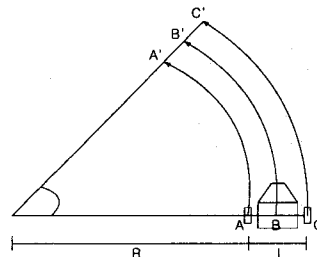


그림 1 로봇의 궤적

이동 로봇의 중심은 오른쪽 바퀴와 왼쪽 바퀴 사이의 중심에 있고 전체적인 로봇의 움직임은 축의 중심점의 움직임으로 나타낼 수 있다 그림1에 왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴의 위치를 A, C로 나타냈고, B는 로봇의 기준점(Center Point)이다. 축의 길이는 $L=AC=A'C'$ 이며 임의의 시간 Δt 동안 주행한 거리는 ΔD , 각의 변화량은 $\Delta \theta$ 이다. 그림에서 로봇은 B에서 B'로 움직인다. 이때 이동 로봇의 주행거리는 오른쪽과 왼쪽 바퀴의 움직임의 변화량 측정에 의해 계산한다.

$\Delta D_r, \Delta D_l$ 는 임의의 시간 Δt 동안 오른쪽 바퀴와 왼쪽 바퀴의 주행거리로 정의한다.

$$\Delta D_r = (L + R)\Delta \theta, \quad \Delta D_l = R\Delta \theta \quad (1)$$

식(1)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\Delta D = \frac{(\Delta D_r + \Delta D_l)}{2}, \quad \Delta \theta = \frac{(\Delta D_r - \Delta D_l)}{L} \quad (2)$$

ΔD 는 외부 원호와 내부 원호의 평균치이고, $\Delta \theta$ 는 내부원호와 외부원호의 차이의 비로 나타낼 수 있다. 2차원 공간에서 임의의 시간 n 에서 로봇은 로봇의 위치 (X_n, Y_n) 와 방향각 θ_n 으로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_n = (X_n, Y_n, \theta_n) \quad (3)$$

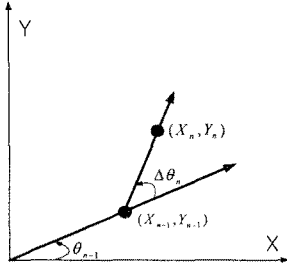


그림 2 이동로봇 좌표계

그림2는 이동 로봇이 임의의 시간 $n-1$ 에서 로봇의 위치 및 방향각과 Δt 후의 로봇의 위치 및 방향각을 나타낸다. 만일 임의의 시간 $n-1$ 에서 로봇의 위치 및 방향각을 알고 있다고 가정하면 로봇의 위치 및 방향각은 식(4)와 같다.

$$U_{n-1} = (X_{n-1}, Y_{n-1}, \theta_{n-1}) \quad (4)$$

만약 시간 n 에서 로봇의 이동거리의 변화량과 방향각의 변화량이 $\Delta D_n, \Delta \theta_n$ 으로 주어지면 새로운 방향각 θ_n 은 $\theta_{n-1} + \Delta \theta_n$ 이다. 그러나 로봇의 위치는 정확하게 알 수 없다. 시간 $n-1$ 에서 출발한 로봇이 가지는 경로는 전체 원호의 길이가 ΔD_n 이고 전체 방향은 $\Delta \theta_n$ 이다. 로봇의 위치를 결정하기 위하여 경로의 형태가 시간 n 과 $n-1$ 사이에 직선이라고 가정하면 다음과 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta X_n &\approx \Delta D_n \cos\left(\theta_{n-1} + \frac{\Delta \theta_n}{2}\right) \\ \Delta Y_n &\approx \Delta D_n \sin\left(\theta_{n-1} + \frac{\Delta \theta_n}{2}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

그러므로 임의의 시간 n 에서 로봇의 위치 및 방향각은 식(6)과 같이 근사시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} X_n &= X_{n-1} + \Delta X_n \approx x_{n-1} + \Delta D_n \cos\left(\theta_{n-1} + \frac{\Delta \theta_n}{2}\right) \\ Y_n &= Y_{n-1} + \Delta Y_n \approx y_{n-1} + \Delta D_n \sin\left(\theta_{n-1} + \frac{\Delta \theta_n}{2}\right) \\ \theta_n &= \theta_{n-1} + \Delta \theta_n \end{aligned} \quad (6)$$

그러나 경로의 형태를 원으로 가정하면 $\overline{BB'}$ 과 $\text{arc } BB'$ 사이의 관계로부터 $\Delta X, \Delta Y$ 를 구하면 다음처럼 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta X_n &= \frac{\sin(\Delta \theta_n/2)}{\Delta \theta_n/2} \Delta D_n \cos(\theta_{n-1} + \Delta \theta_n/2) \\ \Delta Y_n &= \frac{\sin(\Delta \theta_n/2)}{\Delta \theta_n/2} \Delta D_n \sin(\theta_{n-1} + \Delta \theta_n/2) \end{aligned} \quad (7)$$

결국, 임의의 시간 n 에서 로봇의 위치 및 방향각은 식(8)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} X_n &= X_{n-1} + \Delta X_n = \frac{\sin(\Delta \theta_n/2)}{\Delta \theta_n/2} \Delta D_n \cos(\theta_{n-1} + \Delta \theta_n/2) \\ Y_n &= Y_{n-1} + \Delta Y_n = \frac{\sin(\Delta \theta_n/2)}{\Delta \theta_n/2} \Delta D_n \sin(\theta_{n-1} + \Delta \theta_n/2) \\ \theta_n &= \theta_{n-1} + \Delta \theta_n \end{aligned} \quad (8)$$

2.2 센서의 구성과 역할

2.2.1 초음파 센서

지면으로부터 80cm 높이에 16개의 폴라로이드 초음파 센서 모듈이 그림3과 같이 중심으로부터 반경 15cm 위치에 방사형으로 배치되어 있다. 각각의 센서들은 2.5의 각도를 이루고 있다. 폴라로이드 센서 모듈은 41cm에서 최대 10m 까지의 거리 검출이 가능하다. 한번에 하나씩 구동을 하고 16개의 센서로부터 거리 데이터를 얻는데 1/2 초가 걸린다.

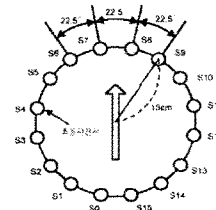


그림 3 초음파 센서 모듈 배치

2.2.2 자이로 스코프

로봇의 중심에 지면으로부터 20cm 높이에 자이로 스코프를 장착하였다. 사용된 자이로 스코프는 Sumimoto Precision 사의 SGN-100-20으로 0.025deg/sec의 분해능을 갖는 진동형 자이로 스코프, 회전속도(각속도)에 비례하는 DC 전압을 출력한다. 센서의 사양은 표 1 과 같다.

표 1 자이로 스코프 사양

특성	범위	특성	범위
Rate Range	±100 deg/sec	Bias Drift	0.3 deg/sec
Output Scale Factor	20mv/(deg/sec)	Bandwidth	10 Hz
Bias Offset	±1 deg/sec	Quiescent Noise	0.2 deg/sec
Bias var. over Temp.	±3 deg/sec	Noise under vib.	0.1 (deg/sec)/G

2.2.3 Azimuth sensor

자이로 스코프와 같이 장착된 Azimuth sensor 는 Microstrain 사의 FAS-A 이고, 실제 측정가능 범위는 1축을 사용시 360, 분해능은 0.1미만이다. 출력은 RS-232 serial 또는 analog 이다. 센서 사양은 표2와 같다.

표 2 Azimuth 센서 사양

특성	범위	특성	범위
A/D Resolution	12 bits	Angle Resolution	0.1 degrees 미만
Accuracy	±0.7 degrees typical	Temp. Drift	±0.025 %/deg.C
Repeatability	0.07 degrees	Output rate	30 Hz

2.3 멀티센서 융합알고리즘

Complementary-filter(C-filter)의 가장 기본적인 개념은 각 센서의 전달함수의 합이 1이 되도록 cutoff주파수를 정하는 것이라 할 수 있다. 아래의 그림4는 C-filter의 개념적인 블럭도이다.

Cutoff 주파수 이상의 고주파 영역에서의 자이로의 응답 특성을 이상적이라고 가정한 후 근사화 시키면 다음과 같은 추정기를 만들 수 있다.

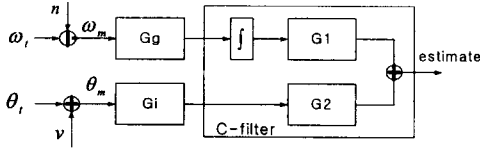


그림 4 C-filter 근사화 간략도

- 단. ω_t = True angular rate
- θ_t = true angular position
- n = noise of gyroscope
- v = noise of azimuth sensor
- ω_m = 자이로의 실제 물리적 측정값
- θ_m = 가속도계의 실제 물리적 측정값

그림4의 블럭도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$G(s)_{total} = G_1(s)G_g(s) + G_2(s)G_i(s) = 1 \quad (9)$$

그림5에서 $G_g(s)$ 는 offset을 제거하고, $G_i(s)$ 는 anti-aliasing 용을 결합할 수 있다. 각각에 대한 전달함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$G_g(s) = \frac{\omega_b}{s + \omega_b}$$

$$G_1(s) = \frac{s^2 + (\omega_1 + \omega_2 + \omega_b)s + \omega_b(\omega_1 + \omega_2)}{s^2 + (\omega_1 + \omega_2)s + \omega_1\omega_2} \quad (10)$$

$$G_i(s) = \frac{\omega_1\omega_2}{s^2 + (\omega_1 + \omega_2)s + \omega_1\omega_2}$$

$$G_2(s) = 1$$

2.4 실험 및 결과

2.4.1 실험장치 구성

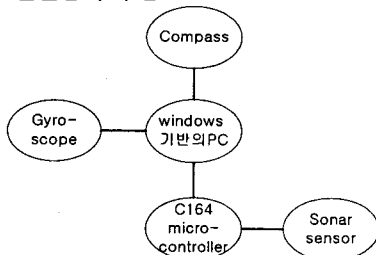


그림 5 로봇의 구성

실험장치는 PC-104 BUS Type의 PC를 탑재하고, DC Motor 2개를 사용한 차륜구동형 mobile robot과 전원부 (DC/DC converter), 센서부로 구성된다.

전체 하드웨어 구성은 그림5과 같다.

2.4.2 실험 방법

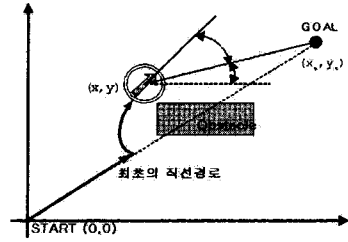


그림 6 경로발생 알고리즘

그림6과 같이 처음에는 출발지점에서 목표지점까지의 최단직선 경로를 발생시키고 발생된 경로를 추종하면서 출발한다. 직선경로를 따라서 주행하다가 장애물은 만나면 벽면따라기를 통해 장애물을 회피하게 된다. 장애물의 인지는 초음파 센서에서 측정된 거리가 일정거리 이하일 때이다. 이동로봇의 현재위치를 (x, y) , 목표지점의 위치를 (x_t, y_t) , 그리고 이동로봇의 heading이라 할 때, 이동로봇으로부터 목표지점까지의 거리 오차와 방향오차는 다음 수식에 의해서 정의된다. 식(11)에서 간단한 유클리디언 거리 (Euclidean distance)를 사용하여 현재 이동로봇과 목표지점까지의 거리를 구할 수 있다. 현재 이동로봇의 위치에서 목표지점과의 방향각 θ 는 식(12)에서와 같이 간단한 삼각함수를 써서 구할 수 있다. 이렇게 해서 최종적으로 방향오차는 식(13)에서와 같이 구할 수 있다.

$$D_{error} = \sqrt{(x_t - x)^2 + (y_t - y)^2} \quad (11)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y_t - y}{x_t - x}\right) \quad (12)$$

$$H_{error} = \text{Heading} - \theta \quad (13)$$

2.4.3 모의 실험 결과

2.4.3.1 주행기록계만 사용한 위치 추정

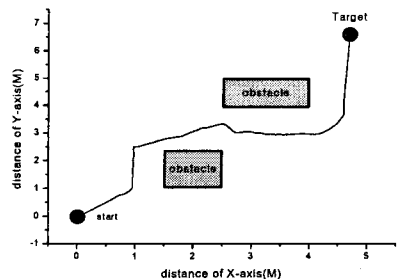


그림 7 로봇의 실제 주행경로

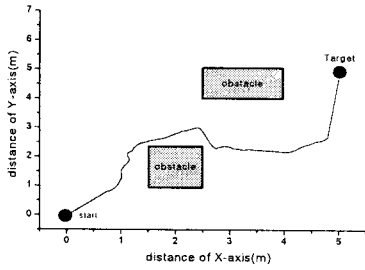


그림 8 로봇의 위치 추정경로

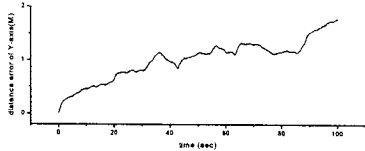


그림 9 위치 추정경로와 실제 주행경로의 오차

그림7은 실제 로봇이 주행한 경로이고, 그림8는 로봇이 추정한 경로이다. 그림9은 로봇이 추정한 경로와 실제 주행한 경로의 시간에 따른 y-방향 거리오차이다. 추정한 경로에서는 목표점(5, 5)에 도달하였지만, 실제 경로에서는 목표점은 (4.7, 6.58)로 추정값이 실제값과 큰 차이를 보이고 있다.

2.4.3.2 센서 퓨전 알고리즘을 사용한 위치 추정

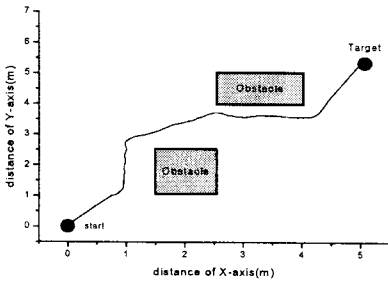


그림 10 로봇의 실제 주행경로

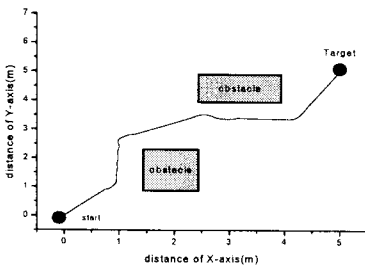


그림 11 로봇의 위치 추정경로

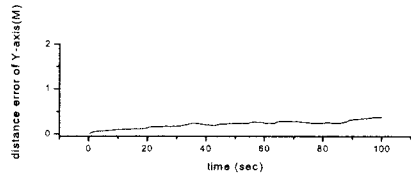


그림 12 위치 추정경로와 실제 주행경로의 오차

그림11은 퓨전 알고리즘을 사용하여 주행기록계의 오차를 보상하여 위치를 추정한 실제 로봇의 주행경로이고, 그림12는 보상한 위치 추정치와 실제 주행 경로의 오차이다. 오차 범위가 약 0.3 미터로 센서 퓨전 알고리즘을 사용하지 않은 것보다 오차가 보상됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 이동로봇에 장착된 자이로 스코프와 Azimuth 센서를 이용하여 로봇의 주행기록계의 위치와 방향의 오차를 보상하는 멀티센서 퓨전 알고리즘을 제안하였다. 자이로 스코프와 Azimuth 센서의 융합을 위해 Complementary filter를 설계하고, 여기서 얻은 각도를 가지고 주행기록계의 오차를 보상하였다. 주행기록계만을 가지고 얻은 로봇의 위치와 방향 데이터와 자이로 스코프와 Azimuth 센서를 이용한 위치와 방향 데이터를 모의실험을 통해 비교하였고, 오차 보상의 우수한 성능을 확인하였다.

방위각만의 보상으로 위치 추정에 대한 오차 보상을 하여 우수한 성능을 보였으나, 이동거리에 대한 센서와의 퓨전을 통해 확실한 좀 더 위치 추정 오차를 보상은 연구가 필요할 것으로 보인다.

(참 고 문 헌)

- [1] S.K. Tso, Y.H. fung and Y.P. cheung, "Fuzzy-logic Control for Differential-wheel-drive AGVs Using linear Opto-sensor Arrays" Proc. of the 1996 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2816-2821, 1996.
- [2] 주영훈, 우광방, 김광배, "이동로봇의 주행 위치 추정에 관한 연구", 대한 전기학회 논문지, 제 44권 pp. 372-380, 1995
- [3] S. K. ISO and Y. H. bung, "Intelligent fuzzy Switching of Control Strategies in Path Control for Autonomous vehicles", IEEE integration conference on Robotics and Automation, 1995 IEEE.
- [4] Johann Bernstein, "Experimental Evaluation of Fiber Optics Gyroscope for Improving Dead-reckoning Accuracy in Mobile Robot.", Proceedings of the 1998 IEEE international Conference on Robotics and Automation Leaven, belgium May 1998.