

## 자이로스코프와 차동 엔코더를 사용한 이동로봇의 추측항법 시스템

### Dead Reckoning Navigation System for Autonomous Mobile Robot Using a Gyroscope and a Differential Encoder

°박 규철\*, 정 학영\*\*, 이 장규\*

\*자동차계 특화연구센터, 서울대학교 FAX: 02-885-4459, PHONE: 02-880-7317, EMAIL: pkc@asrignc1.snu.ac.kr

\*\*서울산업대학교 제어계측공학과 FAX: 02-949-2654, PHONE: 02-970-6543, EMAIL: chy@duck.snpu.ac.kr.

**Abstract** A dead reckoning navigation system is developed for autonomous mobile robot localization. The navigation system was implemented by novel sensor fusion using a Kalman filter. A differential encoder and the gyroscope error models are developed for the filter. An indirect Kalman filter scheme is adopted to reduce the computational burden and to enhance the navigation system reliability. The filter mutually compensates the encoder errors and the gyroscope errors. The experimental results show that the proposed mobile robot navigation algorithm provides the reliable position and heading angle of the mobile robot without any help of the external positioning systems.

**Keywords** Mobile robot, Navigation, Gyroscope, Encoder, Kalman filter

#### 1. 서론

추측항법 (Dead Reckoning 항법, 이하 DR)은 내부주행기 또는 관성 센서를 이용하여 기준 위치와 방향으로부터의 변이를 측정하여 현재의 위치를 계산하는 방법이다. 이 방법은 외부의 도움 없이도 항상 실시간으로 위치 추정이 가능하다는 장점이 있는 반면 내부주행기는 이동 거리와 주행 표면에 따라, 관성 센서는 작업 시간에 따라 오차가 누적된다는 단점이 있다. DR은 구성이 간단하고 실시간 계산이 가능하며 사용되는 센서가 저렴하다는 장점이 있지만 위치 오차의 증가를 피할 수 없다는 단점이 있다. 이동로봇에서 사용되는 DR 센서로는 내부주행기(엔코더), 가속도계 또는 자이로스코프(자이로)가 있다. 엔코더는 보통 모터에 부착되어 이동 거리를 측정하며 차동 엔코더를 사용하면 위치 뿐만 아니라 자세까지도 계산할 수 있다.

엔코더오차는 규정 오차(systematic errors)와 비규정 오차(non-systematic errors)가 있다. 자이로오차는 규칙 오차(deterministic errors)와 불규칙 오차(stochastic errors)가 있다[1,2,3]. 규칙오차는 적당한 함수를 선정하여 보정할 수 있지만 불규칙 오차는 필터를 통해서 보정해야 한다. 이동로봇에서 사용되는 필터는 대부분 확장 칼만 필터(extended Kalman filter)를 사용했고 규칙적인 오차를 보정하도록 설계되었다[4-7]. 따라서 본 논문에서는 차동 엔코더와 자이로의 규칙오차는 적당한 함수를 사용하여 보정하고 불규칙 오차는 필터를 통하여 보정하는 방법을 제시하고 실험을 통하여 구성된 DR 항법시스템의 성능을 알아본다.

이전의 연구에서는 엔코더의 규정 오차와 자이로의 불규칙 오차를 명시적으로 보정하지 않았고 이동로봇의 항법시스템에 사용된 필터는 이동로봇의 위치와 자세를 직접 추정하는 방식을 사용했다. 따라서 필터의 공분산이 발산하는 경우 등에 의해 필터가 오동작 하는 경우에는 위치와 자세를 추정할 수 없게 되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완 하기 위해 본 논문에서 제안된 이동로봇의 항법시스템은 이동로봇의 위치를 직접 추정하지 않고 위치오차, 자세오차, 엔코더 오차, 자이로 오차를 필터를 통해 추정하고, 이 오차를 위치 계산부분에 되먹임하여 오차를 보정하는 방법을 사용한다. 따라서 필터가 오동작 하더라도 오차가 보정 되지 않은 위치와 자세를 알아낼 수 있다. 또한 필터에서는 엔코더와 자이로의 불규칙 오차를 명시적으로 모델링하여 오차를 추정하도록 구성되어 있다.

2 장에서는 DR 을 이용한 이동로봇의 위치결정기법, 엔코더와 자이로의 오차를 분석하고 3 장에서는 칼만필터를 이용한 이동로봇의 항법시스템 구성에 대해서 설명한다. 4 장에서는

구성된 항법시스템의 성능을 실험을 통해 알아보고 5 장에서 결론을 맺는다.

#### 2. 추측항법을 이용한 위치 결정기법

추측항법을 이용한 위치 결정 방법은 DR(Dead Reckoning) 이라고 하며 내부주행기 또는 관성 센서를 이용하여 기준 위치와 방향으로부터의 변이를 측정하여 현재의 위치를 계산하는 방법이다. 이 방법은 외부의 도움 없이도 항상 실시간으로 위치 추정이 가능하다는 장점이 있는 반면 내부주행기는 이동 거리와 주행 표면에 따라, 관성 센서는 작업 시간에 따라 오차가 누적된다는 단점이 있다. 가속도계는 이동로봇의 가속도를 측정하며 측정된 가속도를 두 번 적분하면 이동한 거리를 알 수 있다. 보통 측정된 가속도는 벡터 성분이기 때문에 현재 위치를 알아내기 위해서는 방향이 필요하며 방향을 알아내기 위해서 자이로를 많이 사용한다. 자이로는 회전축을 중심으로 각속도를 측정할 수 있으며 측정된 각속도를 적분하면 현재 자세를 얻을 수 있다. 가속도계 또는 자이로를 사용하여 위치와 자세를 결정하는 경우에는 노이즈에 매우 민감하게 된다. 현재 위치를 계산하기 위해서 센서의 출력을 적분하게 되는데 이때 센서의 작은 오차는 적분 과정을 통해 위치 오차를 크게 증가시키게 된다. 본 논문에서는 DR 을 주 위치 결정 시스템으로 사용하여 외부의 도움 없이 항상 위치 추정이 가능하도록 하며 누적되는 위치 오차를 필터를 사용하여 개선 방법을 제안한다.

##### 2.1 엔코더를 이용한 추측 항법

엔코더는 보통 모터에 부착되어 이동 거리를 측정한다. 그림 1의 차동 엔코더를 사용하면 위치 뿐만 아니라 자세까지도 계산할 수 있다. 그러나 엔코더의 오차는 주행거리에 비례해서 증가하는 특성이 있다.

그림 2와 같이 2 차원 공간에서 차동 구동 방식의 이동로봇이 주행한다고 하면 현재 위치와 자세는 식 (1)과 같이 계산된다.

OXY 좌표계는 항법 좌표계이고, oxy 는 원점이 이동로봇의 중심, 진행방향이 x 축, 왼쪽으로 직각 방향이 y 축인 동체 좌표계이다. 이동로봇의 자세는 항법 좌표계와 동체 좌표계의 각 차이로 정의한다. 이동로봇의 위치와 자세는 차동 엔코더를 사용하여 계산할 수 있다. 여기서 RINC(또는 R), LINC(또는 L)는 각각 오른쪽 엔코더, 왼쪽 엔코더의 증가분을 나타내고 D는 오른쪽 바퀴와 왼쪽 바퀴 사이의 거리(축간 거리)를 나타낸다.

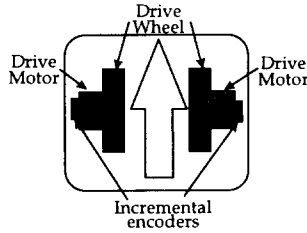


그림 1 차동 엔코더를 사용하는 이동로봇.  
Fig. 1. The autonomous mobile robot using a differential encoder

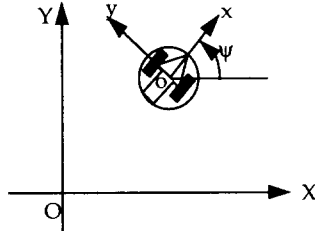


그림 2 이동로봇 좌표계.  
Fig. 2. A coordinate of the AMR

$$\begin{aligned} X(k+1) &= X(k) + \sin \psi(k) \times \text{INC} \\ Y(k+1) &= Y(k) + \cos \psi(k) \times \text{INC} \\ \psi(k+1) &= \psi(k) + \frac{\text{RINC} - \text{LINC}}{D} \\ \text{INC} &= \frac{\text{RINC} + \text{LINC}}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

엔코더 오차는 엔코더 환산계수 오차, 왼쪽, 오른쪽 바퀴 사이의 거리 오차 등 규칙적인 오차와 고르지 못한 평면을 주행하여 발생 하는 환산계수 오차, 바퀴의 미끄러짐 때문에 발생하는 오차 등 불규칙 오차가 있다. 규칙적인 오차는 모델링을 통하여 보상 할 수 있으므로 필터를 통하여 보정하는 방법을 제시한다[1,2,3].

$$\begin{aligned} \hat{X}(k+1) &= \hat{X}(k) + \sin \hat{\psi}(k) \left( \frac{R + S_R(k)R + L + S_L(k)L}{2} \right) \\ \hat{Y}(k+1) &= \hat{Y}(k) + \cos \hat{\psi}(k) \left( \frac{R + S_R(k)R + L + S_L(k)L}{2} \right) \\ \hat{\psi}(k+1) &= \hat{\psi}(k) + \frac{(R + S_R(k)R) - (L + S_L(k)L)}{D + \delta D(k)} \\ \hat{X}(k) &= X(k) + \delta X(k) \\ \hat{Y}(k) &= Y(k) + \delta Y(k) \\ \hat{\psi}(k) &= \psi(k) + \delta \psi(k) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)는 엔코더의 규칙 오차를 포함하여 이동로봇의 위치와 자세를 계산하는 식이다. 여기서  $\hat{X}(k), \hat{Y}(k), \hat{\psi}(k)$ 는 이동로봇의 계산된 위치와 자세이고,  $X(k), Y(k), \psi(k)$ 는 참값을 나타낸다.  $\delta X(k), \delta Y(k), \delta \psi(k), \delta D(k)$ 는 각각 XY 축 위치오차, 자세오차, 윤거 거리 오차를 나타낸다.  $S_R(k), S_L(k)$ 는 각각 오른쪽 왼쪽 엔코더의 환산계수 오차를 표시한다. 식 (2)에서 참값을 빼면 식 (3)과 같이 위치와 자세에 대한 항법 오차식을 구성 할 수 있다[11,12].

$$\begin{aligned} \delta X(k+1) &= \delta X(k) + \sin \psi(k) \frac{R}{2} S_R(k) + \sin \psi(k) \frac{L}{2} S_L(k) + \cos \psi(k) \frac{R+L}{2} \delta \psi(k) \\ \delta Y(k+1) &= \delta Y(k) + \cos \psi(k) \frac{R}{2} S_R(k) + \cos \psi(k) \frac{L}{2} S_L(k) - \sin \psi(k) \frac{R+L}{2} \delta \psi(k) \\ \delta \psi(k+1) &= \delta \psi(k) + \frac{R}{D} S_R(k) - \frac{L}{D} S_L(k) + \frac{L-R}{D^2} \delta D(k) \end{aligned} \quad (3)$$

$\sin \delta \psi(k) \approx \delta \psi(k)$ ,  $\delta \psi(k) \delta S_R(k) \approx 0$ ,  $\cos \delta \psi(k) \approx 1$ ,  $D(k) \gg \delta D(k)$   $\delta \psi(k) \delta S_L(k) \approx 0$ 을 가정 하였다. 식 (3)은 엔코더의 오차에 의한 위치와 자세오차 전파를 표현하고 있다. 따라서 엔코더 오차를 모델링하여 표현하여야 한다.

$$\begin{aligned} S_R(k+1) &= S_R(k) \\ S_L(k+1) &= S_L(k) \\ \delta D(k+1) &= \delta D(k) \end{aligned} \quad (4)$$

엔코더의 오차는 환산계수와 바퀴간 거리로 구성되는데 각각은 식 (4)와 같이 랜덤 상수로 모델링 할 수 있다[11,12].

## 2.2 자이로스코프를 이용한 자세계산

자이로스코프는 각속도를 측정하는 센서로서 장시간 동안 정확한 각속도를 제공 할 수 있다. 그러나, 자세를 계산하기 위해서는 측정된 각속도를 적분하여야 하는데 측정값에 섞인 오차는 적분 과정을 통해서 큰 자세오차를 유발하는 원인이 된다. 따라서 주기적으로 자세오차를 보정해야 된다. 식 (5)는 자이로스코프를 사용해서 자세를 계산 할 때 사용되는 식이다.

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(k+1) &= \hat{\phi}(k) + \hat{B}_s(k)\Omega + \hat{B}_{\omega}(k) \\ \hat{B}_s(k) &= B_s + \delta B_s(k) \\ \hat{B}_{\omega}(k) &= B_{\omega}(k) + \delta B_{\omega}(k) \\ \hat{\phi}(k) &= \phi(k) + \delta \phi(k) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $\phi$ 는 자이로를 이용하여 계산된 자세이고,  $\Omega$ 는 측정된 각속도 (단위 : volt),  $B_s$ 는 환산계수 (단위 : %/sec/volt),  $B_{\omega}$ 는 불규칙 바이어스 이다. 자이로의 주요오차는 불규칙 바이어스 오차와 환산계수 오차이다. 일반적으로 자이로의 측정값은 외부 입력이 없는 경우에는 영의 출력을 나타내야 하지만, 지구 자전을 고려해도 실제 출력은 영이 되지 않는다. 이것을 자이로 바이어스라고 하고 자이로오차의 주요한 부분이다. 환산계수는 측정된 전압 또는 전류를 각속도로 바꾸어주는 상수이지만 실제 상황에서는 상수가 되지 않고 온도나 외부 환경에 따라 변하게 된다. 자이로스코프의 오차는 불규칙적인 특성을 가지고 있기 때문에 모델링을 통한 오차보정이 필요하다. 식 (6)은 자이로의 오차를 포함하여 자세를 계산하는 식이다 [11,12,13].

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(k+1) &= \hat{\phi}(k) + \hat{B}_s(k)\Omega + \hat{B}_{\omega}(k) \\ \hat{B}_s(k) &= B_s + \delta B_s(k) \\ \hat{B}_{\omega}(k) &= B_{\omega}(k) + \delta B_{\omega}(k) \\ \hat{\phi}(k) &= \phi(k) + \delta \phi(k) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\hat{\phi}(k)$ 는 계산된 자세,  $\phi(k)$ 는 참 값,  $\Omega$ 는 측정된 각속도 (단위 : volt),  $\hat{B}_s(k)$ 오차를 포함한 환산 계수 (단위 : %/sec/volt),  $B_s$ 는 환산 계수,  $\hat{B}_{\omega}(k)$ 는 불규칙 바이어스,  $B_{\omega}$ 는 정규 바이어스,  $\delta \phi$ 는 자이로 자세오차,  $\delta B_s$ 는 환산계수 오차,  $\delta B_{\omega}$ 는 자이로의 불규칙 바이어스 오차이다.

$$\begin{aligned} \delta \phi(k+1) &= \delta \phi(k) + \Omega \delta B_s(k) + \delta B_{\omega}(k) \\ \delta B_s(k+1) &= \delta B_s(k) \\ \delta B_{\omega}(k+1) &= \delta B_{\omega}(k) \end{aligned} \quad (7)$$

자이로의 정규 오차를 보상하고 나서 참값을 빼면 식 (7)과 같이 자이로에 의한 자세오차를 모델링 할 수 있다. 여기서 자이로의 환산계수와 바이어스는 랜덤상수로 모델링 하였다 [8,9,10].

## 3 칼만필터를 이용한 항법 시스템 구성

항법 시스템에 칼만필터를 사용하는 경우에는 두 가지 방법이 있다. 첫번째로 필터에서 속도, 위치, 자세 등 항법 정보를 직접 추정하는 방법이 있고, 둘째로 필터에서는 속도 오차, 위치 오차, 자세 오차 등 항법 오차를 추정하고 이를 사용하여 항법 시스템의 오차를 교정하는 방법이 있다. 첫 번째 방법을 직접 추정 항법 시스템이라고 하고 두 번째 방법을 간접 추정 항법 시스템이라고 한다.

그림 3은 직접 추정 항법 시스템을 사용하여 이동로봇의 항법 시스템을 구성한 경우이다. 이 방법의 단점은 필터가 항

법 루프 안에 있기 때문에 센서 오차를 제거하기 위해서는 매우 정확한 센서 모델링을 필요로 한다는 것이다. 또한 이 방법은 이동로봇의 정확한 동적 모델링을 요구한다[4,5,6,7]. 이러한 단점은 간접 추정 항법 시스템을 사용하면 해결 할 수 있다. 이 방법은 센서 출력을 바로 사용하여 이동로봇의 위치와 자세를 계산한다. 따라서 이동로봇의 정확한 동적 모델링이 필요하지 않고, 이동로봇의 움직임에 따라서 위치와 자세를 바로 계산 할 수 있는 장점이 있다.

필터는 센서 데이터를 비교하여 위치, 자세 오차를 추정한다. 추정된 오차를 사용하는 방법에 따라 앞먹임 간접 추정 항법 시스템과 되먹임 간접 추정 항법 시스템이 있다. 그림 4 는 앞먹임을 이용한 간접 추정 항법 시스템이다. 이 방법에서 엔코더를 이용한 항법 시스템은 필터의 도움 없이 위치와 자세를 계속해서 추정하고 있는 것으로 볼 수 있다. 즉 자이로에서 얻어진 측정값을 사용해서 엔코더 항법 시스템의 오차를 보정하는 것이다. 이 방법은 필터에서 사용하는 오차식의 선형성과 정확성에 비례해서 성능을 나타낸다. 필터에 사용된 오차식은 작은 오차를 가정하여 구성 되었기 때문에 작은 오차를 유지하여야만 항법 시스템의 성능을 향상 시킬 수 있으나 실제상황에서는 오차가 쉽게 증가한다. 따라서 본 연구에서는 그림 5 와 같은 되먹임을 이용한 간접 추정 항법 시스템을 사용한다 [11,12,13].

엔코더를 이용한 항법 시스템의 오차는 주행거리에 따라 계속해서 증가하므로 작은 오차를 유지 할 수 없다. 그러나 필터를 이용해서 추정된 오차를 되먹임하면 엔코더의 오차를 작게 유지 할 수 있다. 이러한 방법을 사용하면 센서의 오차 특성을 선형으로 유지 할 수 있는 장점이 있어 필터의 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 이 방법은 필터 공분산의 갑작스러운 증가로 인해 필터가 오동작을 하더라도 계속해서 필터링 되지 않는 위치와 자세를 제공 할 수 있다. 그림 6은 엔코더와 자이로를 사용하여 이동로봇의 되먹임 간접 추정 항법 시스템을 구성한 것이다. 이 항법 시스템은 엔코더의 정규 오차와 자이로의 랜덤 오차를 필터를 통해서 보상한다. 또한 엔코더와 자이로는 필터를 통해 상호 보완적인 역할을 할 수 있다. 따라서 항법 시스템의 성능을 향상 시킬 수 있다. 필터에 사용된 식은 (8), (9)와 같다.

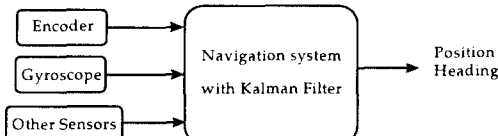


그림.3 직접 추정 항법 시스템  
Fig. 3. A navigation system with a direct Kalman Filter

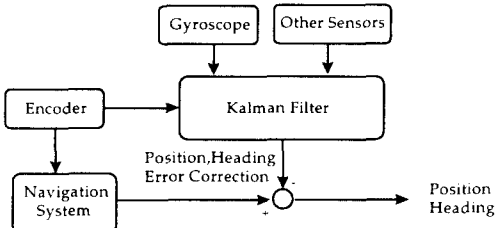


그림 4 앞먹임을 이용한 간접 추정 항법 시스템  
Fig. 4. Navigation system with an indirect feedforward Kalman Filter

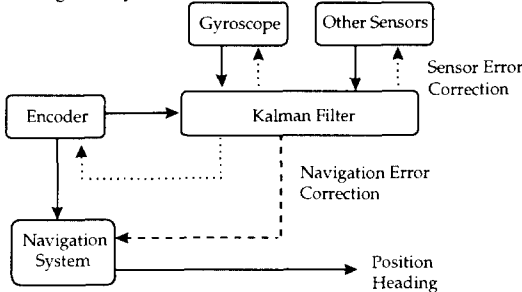


그림.5 되먹임을 이용한 간접 추정 항법 시스템  
Fig. 5. Navigation system with an indirect feedback Kalman Filter

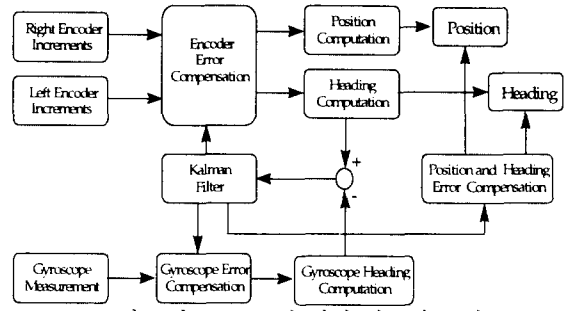


그림. 6 이동로봇의 항법 시스템 구성도  
Fig. 6. Mobile robot navigation system block diagram

$$\begin{bmatrix} \delta X(k+1) \\ \delta Y(k+1) \\ \delta \psi(k+1) \\ S_x(k+1) \\ S_y(k+1) \\ \delta D(k+1) \\ \delta \phi(k+1) \\ \delta B_x(k+1) \\ \delta B_y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cos \psi(k) \frac{R+L}{2} & \sin \psi(k) \frac{L}{2} & \sin \psi(k) \frac{R}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\sin \psi(k) \frac{R+L}{2} & \cos \psi(k) \frac{L}{2} & \cos \psi(k) \frac{R}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{R}{D} & -\frac{L}{D} & \frac{L-R}{D^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Omega & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta X(k) \\ \delta Y(k) \\ \delta \psi(k) \\ S_x(k) \\ S_y(k) \\ \delta D(k) \\ \delta \phi(k) \\ \delta B_x(k) \\ \delta B_y(k) \end{bmatrix} + w \quad (8)$$

$$Z = \hat{\psi} - \hat{\phi} = \delta \psi - \delta \phi$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \psi \\ \delta \phi \end{bmatrix} + v \quad (9)$$

여기서  $w$  는 공정 잡음이고,  $\hat{\psi}$  는 엔코더에서 계산된 자세,  $\hat{\phi}$  는 자이로에서 계산된 자세,  $v$  는 측정잡음이다. 구성된 시스템은 선형 시변 시스템이다. 식 (8), (9)를 사용해서 필터는 엔코더와 자이로의 센서 오차를 추정하고 이동로봇의 위치와 자세 오차를 추정한다. 추정된 오차를 다시 각각의 센서에 되먹임하여 센서오차 및 위치 자세 오차를 교정한다. 필터의 입력으로 엔코더와 자이로에서 계산된 자세각의 차이를 사용하므로 필터를 통해서 엔코더와 자이로의 오차를 보상 할 수 있는 효과가 있다. 또한 구성된 시스템은 자이로의 랜덤 오차 성분을 자이로 오차 모델링을 통해서 고려하고 있는 특징이 있다.

#### 4. 실험 결과

실험에 사용된 이동로봇은 TRC Labmate® 이고 각속도를 측정하기 위해 사용된 자이로는 AUTOGYRO® 이다. AUTOGYRO 는 Sagnac 효과를 이용한 광섬유 자이로이다. AUTOGYRO 의 특성은 표 1 에 나타나 있다.

표 1. AUTOGYRO 특성  
Table 1. Characteristics of AUTOGYRO

Description	Specification
Input Rotation Rate	± 100 %/sec
Bias Drift Fixed Temperature	18 %/hour
Scale Factor Linearity Constant Temp	< 0.5 %

실험 환경은 바닥이 고른 실내에서 하였다. 실험 1 에서 이동로봇은 20 분 동안 약 490 미터를 주행하고 실험 2 에서는 약 20 분 동안 550 미터를 주행 하였다. 주행 평균 속도는 약 400 mm/sec 이다. 제안된 방법과 엔코더 만을 사용해서 주행한 결과를 비교 하였다. 궤적 A 는 제안된 방법을 사용해서 주행한 결과이고, 궤적 B 는 엔코더만 사용해서 주행한 결과이다. 실험 1 에서 이동로봇은 'o'로 표시된 좌표 (0, 0, 0°)에서 출발하여 사각형 궤적을 약 20 분 동안 주행하고 출발점으로 되돌아 오도록 하였다. 제안된 방법의 최종 위치는 '\*'로 표시되어 있고 좌표는 (0.1202m, 0.8691m, -2.6°)이다. 반면에 엔코더만 사용해서 주행한 결과, 최종 위치는 'x'로 표시되어 있고 좌표는

(1.0480m, 11.1423m, -81.1°)이다. 실험결과에서 알 수 있듯이 엔코더만 사용하여 주행 할 때는 약 20 미터를 주행한 후 부터 잘못된 위치와 자세를 나타내고 있다.

실험 2 에서도 실험 1 과 같이 'o'로 표시된 (0, 0, 0°)에서 출발하여 약 20 분 주행후 (0, 0, 180°)로 돌아오도록 하였다. 제안된 방법을 사용하여 주행한 결과 최종위치는 '\*'로 표시되어 있고 좌표는 (0.7810m, -0.2413m, 182.4759°)이다. 엔코더만을 사용하여 주행한 결과는 'x'로 표시되어 있고 좌표는 (0.0533m, 7.0155m, 88.4714°)이다. 제안된 방법을 사용하여 주행하면 주행 거리의 약 0.5% 이내의 오차를 보임을 알 수 있다.

실험결과에서 알 수 있듯이 제안된 방법을 사용하면 엔코더만 사용한 항법 시스템보다 더 정확한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 자세 오차는 누적되어 큰 위치 오차를 일으키는 원인이 된다. 그러나 제안된 방법은 엔코더와 자이로의 정보를 효과적으로 사용하여 좋은 위치와 자세 정보를 제공할 수 있다. 따라서 각 정보에서는 엔코더보다 자이로에 많이 의존하고 거리 정보는 엔코더를 이용하므로 효과적인 항법 시스템이 구성 될 수 있다. 또한 주행하면서 엔코더의 오차와 자이로의 오차를 보상하므로 센서오차를 계속해서 보정 할 수 있는 장점이 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 차등 엔코더와 자이로스코프를 이용한 이동로봇의 항법 시스템에 대해서 설명하였다. 개발된 항법 시스템은 엔코더를 주 항법 시스템으로 하고 자이로를 이용하여 엔코더의 오차를 보정하도록 구성되어 있다. 엔코더의 규칙오차와 자이로의 랜덤 오차도 모델링 하였다. 엔코더와 자이로의 오차 모델은 필터에서 사용되어 위치오차와 자세오차를 보정하고, 또한 엔코더와 자이로의 오차를 보정 하도록 구성되었다. 직접 추정 항법 시스템 대신 제안된 간접 추정 항법 시스템을 사용하여 계산량을 줄일 수 있으며 공분산의 증가와 같은 요인으로 필터가 오동작을 하더라도 항법 시스템은 필터링 되지 않은 위치와 자세를 제공할 수 있다. 개발된 항법 시스템의 장점은 엔코더의 오차와 자이로의 오차를 필터링을 통해 상호적으로 보정 할 수 있다는 것이다.

실험 결과 개발된 항법 시스템은 약 20 분 동안 외부 도움 없이 이동로봇의 정확한 위치와 자세를 제공함을 확인하였다. 구성된 항법 시스템은 기본적으로 추측 항법이므로 위치나 자세 오차가 계속 증가하는 성질을 가지고 있다. 따라서 일정한 시간이 지난 후 또는 일정 거리를 주행한 후에는 절대 위치 보정 방법을 사용하여 위치와 자세 오차를 보정하는 방법을 사용해야 할 것이다.

### References

[1] Borenstein, J. and Feng, L. 1995c, *Where am I ? Sensors and Methods for Autonomous Mobile Robot Positioning - 1995 Edition*

[2] Borenstein, J. and Feng, L. 1995, "Correction of Systematic Dead-reckoning Errors in Mobile Robots," *1995 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95)*, Pittsburgh, PA, Aug. 5-9, pp.569-574.

[3] Borenstein, J. and Feng, L. 1995, "UMBmark : A Method for Measuring, Comparing, and Correcting Dead-reckoning Errors in Mobile Robots," Technical report UM-MEAM-94-22, University of Michigan

[4] Barshan, B. and Durrant-Whyte, H. F., 1994, "Orientation Estimate for Mobile Robots Using Gyroscopic Information," *1994 International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS '94)*, Munich, Germany, Sept. 12-16, pp. 2243-2248.

[5] Barshan, B. and Durrant-Whyte, H. F., 1995, "Inertial Navigation Systems Mobile Robots," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 3, June, pp. 328-342.

[6] Komoriya, K. and Oyama, E., 1994, "Position Estimation of a Mobile Robot Using Optical Fiber Gyroscope(OFG)," *1994 International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS '94)*. Munich, Germany, Sept. 12-16, pp. 143-

149.

[7] Vaganay, J., Aldon, M. J., and Fourinier, A., 1993, "Mobile Robot Attitude Estimation by Fusion of Inertial Data," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, GA, May 2-7, pp. 3243-3248.

[8] Maybeck, P. S. *Stochastic models, estimation, and control Volume 1*, Academic Press. 1979

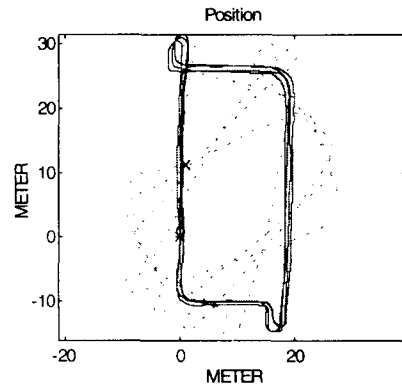
[9] Lawrence, A., *Modern Inertial Technology - Navigation, Guidance, and Control*, Springer-Verlang. 1993

[10] Siouris G. M. *Aerospace Avionics Systems - A Modern Synthesis*, Academic Press 1993.

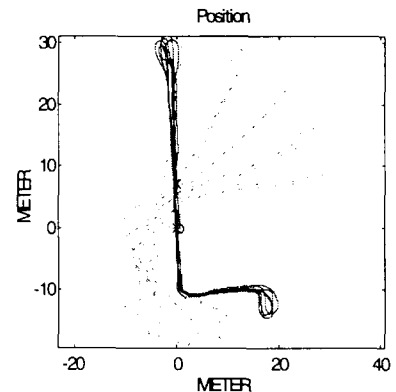
[11] KyuCheol Park, Dohyung Chung, Hakyoung Chung and Jang Gyu Lee, 1996, "Dead Reckoning Navigation of a Mobile Robot Using the Indirect Kalman Filter," *International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Washington D.C. USA, Dec. 8-11.

[12] KyuCheol Park, Jinwon Kim, Chansik Park and Jang Gyu Lee, 1996, "Car Navigation System Using DGPS and Fiber Optical Gyroscope," *3rd GPS Workshop Proceeding*, Seoul, Korea, Nov. 21-23.

[13] KyuCheol Park, Hakyoung Chung and Jang Gyu Lee, 1997, "Dead Reckoning Navigation for an Autonomous Mobile Robot Using a Differential Encoder and a Gyroscope," *8th International Conference on Advanced Robotics*, Monterey, California, USA, July 7-9.



실험.1 이동로봇의 궤적 A(실선), 궤적 B(점선)



실험.2 이동로봇의 궤적 A(실선), 궤적 B(점선)