

# 이동로봇의 위치 추정을 위한 약결합 방식의 INS/GPS 구현에 관한 연구

## A study on INS/GPS implementation of loosely coupled method for localization of mobile robot.

박 명 훈\*, 홍 승 홍\*  
Myung-Hoon Park\*, Seung-Hong Hong\*

**Abstract** - In this paper, shows a research in accordance with the design the implementation of the localization system for mobile robot using INS(Inertial Navigation System) and GPS(Global Positioning System). First, a Strapdown Inertial Navigation System : SDINS is designed and implemented for low speed walking robot, by modifying Inertial Navigation System which is widely used for rocket, airplane, ship and so on. In addition, thesis proposes the localization of robot with the method of loosely coupled method by using Kalman Filter with INS/GPS integrated system to utilize assumed position and speed data from GPS.

**Key Words** : INS, GPS, Loosely-coupled Method, Kalman Filter.

### 1. 장 서 론

인류가 수송기계를 발명한 이래 최근 100년 동안 엄청난 발전을 거듭하고 있으며, 자동차, 선박, 항공기, 로봇 등을 이용한 물류의 이동 및 여객의 이동은 경제 사회 등의 모든 분야의 활동력을 제공하는 에너지원으로 작용하고 있다. 이와 같이 수송기계를 조종하여 출발지로부터 원하는 목적지까지 안전하게 이동하기 위해서 필요한 기능 중의 하나가 항법(Navigation) 기능이다. 항법이란 현재의 위치로부터 원하는 위치에 정확히 도달하도록 하는 기술이다. 이를 위해 주위의 지형지물을 보고 자신의 위치를 짐작하기도 하고, 하늘에 있는 별의 고도와 각도, 관측시간 등을 고려하여 위치를 구하기도 하며, 방향과 거리를 측정하여 지도상에 자신의 움직임을 표시하여 현재의 위치를 추측하기도 하였다.

본 논문에서는 가속도계와 각속도계로부터 관성정보를 이용하여 외부의 도움 없이 로봇의 위치, 속도 및 자세를 결정하는 INS(관성항법시스템)와 위성으로부터 수신되는 신호의 전달시간으로부터 구하는 의사거리(Pseudorange)와 의사거리율(Pseudorange Rate)을 이용하여 로봇의 위치 및 속도를 제공하는 GPS를 이용하여 이동로봇의 자기 위치 추정 시스템의 구현에 관한 연구를 수행하였다. INS는 짧은 시간 동안 매우 정확한 항법해를 제공하지만 시간이 지남에 따라 센서의 바이어스 오차, 환산계수오차, 초기정렬오차 등의 여러 가지 요인에 의해서 항법오차가 급격히 증가한다[1]. 반면 GPS는 시간 경과에 따른 오차 누적이 없으므로 장시간동안 정확

한 항법해를 제공하지만 가시 위성수에 따라 항법해를 구할 수 없는 경우가 발생하기도 하고 외부 교란신호(Jamming)에 의하여 정상 동작이 불가능한 경우도 종종 발생한다[2]. 이와 같이 INS와 GPS는 상호 보완적인 오차특성으로 INS의 시간에 따른 항법 오차의 해결책으로 INS의 보조항법시스템인 GPS를 결합한다. 그리고 INS/GPS 결합시스템으로 칼만 필터를 이용하여 GPS에서 추정된 위치 및 속도 정보를 사용하여 약결합(loosely-coupled)방식을 이용하여 로봇의 위치 추정을 본 논문에서 제안하였다.

### 2. 장 INS 항법 방정식

INS에서는 동체 좌표계에서 측정된 선형 가속도  $f^n$ 와 자 세계산 알고리즘으로 계산된 좌표변환 행렬  $C_n^e$ 을 이용하여 항법 좌표계에서의 선형 가속도  $f^e$ 으로 변환시킨 다음 항법 컴퓨터에서 항법 방정식을 계산하여 로봇의 위치와 속도를 얻는다. 이때 속도를 계산하기 위한 항법 방정식은 다음과 같은 미분 방정식으로 나타난다[3].

$$\dot{v}^n = C_n^f f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_m^n) \times v^n + g^n \quad (1)$$

여기서  $v^n = [v_N \ v_E \ v_D]^T$ 는 항법 좌표계에서 표현된 속도 성분이고,  $C_n^e$ 는 동체 좌표계에서 항법 좌표계로의 좌표변환 행렬이다.  $\omega_{ie}^n$ 와  $\omega_m^n$ 은 각각 항법 좌표계에서 표현된 항법 좌표계의 관성 좌표계에 대한 각속도와 지구 고정 좌표계의 관성좌표계에 대한 각속도를 나타내며  $g^n$ 은 항법 좌표계에서의 중력 성분을 나타낸다. 식(1)에서 속도 및 위치를 구하는 과정은  $C_n^f$ 항에서 로봇의 운동으로 인해 발생하는 Coriolis항 및 중력항을 보정한 후 적분과정을 통해 이루어진다.  $\omega_{ie}^n$ 와

저자 소개

\* 박 명 훈 : 仁荷大學 電子工學科 碩士課程

\*\* 홍 승 홍 : 仁荷大學 電子工學科 正教授 · 工博

$\omega_{en}^n$ 은 다음과 같이 위도( $L$ ), 경도( $\lambda$ ), 고도( $h$ )를 이용하여 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega_e^n &= [\Omega \cos L \ 0 \ -\Omega \sin L]^T \\ \omega_{en}^n &= [\rho_N \ \rho_E \ \rho_D]^T = [\cos L \ -L \ -\sin L]^T \\ &= \begin{bmatrix} \frac{v_E}{R_i+h} & \frac{v_N}{R_m+h} & \frac{v_E \tan L}{R_i+h} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $R_0$ 는 지구타원체의 적도 반경,  $e_n$ 는 지구이심율을 나타낸다. 식(1)에서 구해진 속도  $v^n$ 을 이용하여 로봇의 위치인 위도( $L$ ), 경도( $\lambda$ ), 고도( $h$ )를 다음과 같이 계산하여 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} L &= \int_0^t \frac{v_N}{(R_m+h)} dt + L(0) \\ \lambda &= \int_0^t \frac{v_E}{(R_i+h) \cos L} dt + \lambda(0) \\ h &= \int_0^t (-v_D) dt + h(0) \end{aligned} \quad (3)$$

### 3. 장 INS/GPS 결합 시스템

#### 3.1 절 오차 모델

오차의 추정과 보정을 위한 칼만 필터를 구성하기 위해서는 먼저 항법 오차모델과 관성센서 오차모델의 설정이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 칼만 필터 구성을 위한 INS 오차 모델로서 항법오차모델은 비선형인 INS 항법방정식을 섭동방법(perturbation method)을 이용하여 유도하였다. 지구반경 모델과 식(3)식을 이용하여 INS 위치오차 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta L &= \frac{R_m \rho_E}{R_m+h} \delta L + \frac{\rho_E}{R_m+h} \delta h + \frac{\partial v_N}{R_m+h} \\ \delta \lambda &= \frac{\rho_N}{\cos L} \left( \tan L - \frac{R_g}{R_i+h} \right) \delta L - \frac{\rho_N \sec L}{R_i+h} \delta h + \frac{\sec L}{R_i+h} \delta v_E \\ \delta h &= -\delta v_D \end{aligned} \quad (4)$$

INS의 속도 오차 방정식을 유도하기 위해 항법 좌표계에서 속도를 계산하기 위한 항법 방정식인 식(1)에 대해 섭동방법을 이용하면 다음과 같다.

$$\delta \dot{v}^n = [C_{\lambda}^n]^T \times \phi - [2\omega_e^n + \omega_{en}^n] \times \delta v^n + C_{\lambda}^n \delta f^b + v^n \times (\delta \omega_e^n + \delta \omega_{en}^n) \quad (5)$$

여기서  $\delta \omega_e^n$ 은 항법좌표계에서의 속도 오차이고  $\phi$ 는 계산 좌표계와 항법좌표계사이의 미소 비틀림각(tilt angle)이다.

#### 3.2 절 약결합 방식의 칼만 필터 구성

약결합 방식의 INS/GPS 결합 시스템은 그림1과 같은 구조를 가지며 칼만 필터의 측정치로 GPS 수신기의 내부 알고리즘에 의해 계산된 위치와 속도 정보를 이용하는 방법으로 칼만 필터의 시스템 오차모델은 3.1절에서 유도한 INS 오차 모델을 이용하여 다음과 같은 상태 방정식으로 나타낼 수 있다.

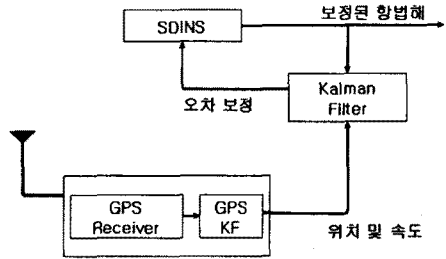


그림 1. 약결합 방식의 INS/GPS 결합시스템

다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_{INS}(t) &= F_{INS}(t) \hat{x}_{INS}(t) + \omega_{LC}(t), \quad \omega_{LC} \sim \mathcal{N}(0, Q_{LC}) \\ &= \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & F_{24} & 0_{3 \times 3} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & 0_{3 \times 3} & F_{35} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \hat{x}_{INS}(t) + \omega_{LC}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 오차 상태 변수  $x_{INS}$ 는 다음과 같이 구성 된다.

$$\begin{aligned} x_{INS} &= [x_f^T \ x_d^T]^T \\ x_f &= [\delta L \ \delta \lambda \ \delta h \ \delta v_N \ \delta v_E \ \delta v_D \ \phi_N \ \phi_E \ \phi_D]^T \end{aligned} \quad (7)$$

$$x_d = [\nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z \ \epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z]^T$$

또한 공정잡음  $\omega_{LC}(t)$ 는 평균이 0이고 공분산이  $Q_{LC}$ 이며 가속도계와 자이로의 백색잡음으로 다음과 같다.

$$\omega_{LC}(t) = [0 \ 0 \ 0 \ \omega_{aN} \ \omega_{aE} \ \omega_{aD} \ \omega_{a\phi N} \ \omega_{a\phi E} \ \omega_{a\phi D} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (8)$$

그리고 약결합 방식은 GPS의 위치와 속도정보를 측정치로 사용하므로 측정 오차 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} z &= \begin{bmatrix} P_{INS} \\ V_{INS} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{GPS} \\ V_{GPS} \end{bmatrix} \\ &= H_{LC} x_{INS} + v_{LC}, \quad v_{LC} \sim \mathcal{N}(0, R_{LC}) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 INS와 GPS의 위치는 위도, 경도, 고도로 표현된 위치이고 속도는 항법좌표계에서 표현된 속도이며 측정행렬  $H_{LC}$ 는 다음과 같다.

$$H_{LC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

#### 3.3 절 이동 로봇 시스템

INS/GPS 결합 시스템을 적용한 이동로봇은 시각장애인 유도로봇으로 시각장애인이 원하는 목적지까지 안전하게 이동할 수 있도록 하기 위한 로봇이다. 아래 그림은 이동로봇인 시각장애인 유도로봇의 실제 모습과 전체 시스템 구성도이다.

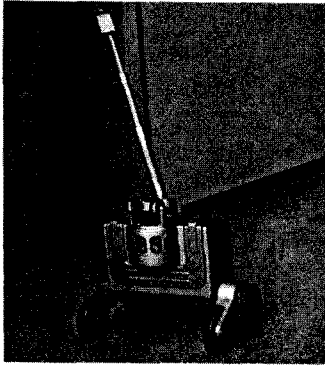


그림 2. 이동로봇의 실제모습

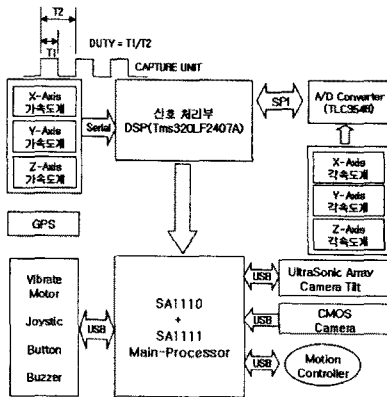


그림 3. 이동로봇의 시스템 구성도

그림3에서 회색부분은 이동로봇의 위치 추정을 위해 구성된 시스템의 한 부분으로 각각의 3축으로  $x, y, z$ 축으로 이루어진 각속도계와 가속도계를 이용하여 신호처리부와 INS의 오차 보정으로 시스템 성능을 향상시키기 위한 보조항법시스템인 GPS로 구성하였다.

#### 4. 장 실험 결과

본 실험은 실제 로봇 주행에서 실외에서 이동하였을 경우 이동한 위치를 추정하기 위해 INS/GPS 결합시스템을 설계 및 구현하여 측정 하였다. 실내 이동시 INS을 이용한 순수 항법시스템을 이용한 주행 실험을 수행하였다.

아래 그림4는 이동 로봇인 시각장애인 유도로봇에 INS/GPS 결합 시스템을 탑재하여 인하대학교 2·4호관 건물 외곽으로 로봇 주행한 결과이다. 그리고 Matlab 6.0을 이용하여 실제 로봇 주행 실험 결과를 확인하였다. 이동 로봇의 실외 이동결과 평균 2.2581m의 오차를 보였다. 실내 이동결과 10m 주행 시 50cm오차를 보였고, 굽어진 복도에서의 90도 회전 시 약 2도의 오차를 가졌다. 그래서 로봇의 실내

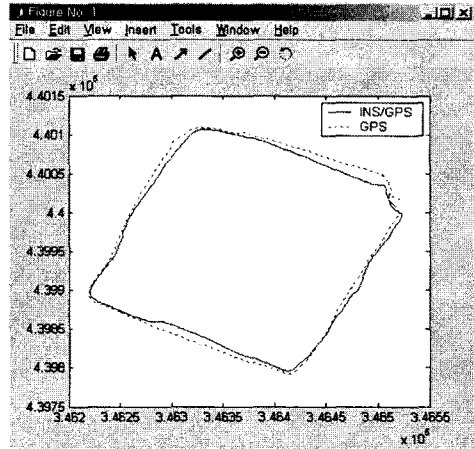


그림 4. 로봇 주행 실험 결과

주행은 장거리 이동시 누적오차로 인해 오차가 커질 수 있지만, 짧은 거리를 이동하고자 할 때 정확한 정보를 얻을 수 있었다.

#### 5. 장 결론

로봇의 주행이 도심에서 장시간 통합 시스템을 운용할 경우에는 가시위성을 충분히 확보할 수 없기 때문에 시간이 지남에 따라 항법 정확도는 감소하게 된다. 이 경우에 정밀한 지도 데이터를 가지고 다양한 알고리즘을 이용한 Map matching 기법을 본 연구에 적용할 경우 좀 더 정확한 항법 성능을 얻을 수 있을 것이다. 또한 민간용에서 사용이 가능한 C/A(Coarse/Acquisition)코드를 이용한 수신기에는 SA(Selective Availability)에 의한 고의적인 오차가 포함되어 있으므로 이를 제거할 수 있는 DGPS(Differential GPS)를 이용할 경우 통합 시스템의 항법 성능을 크게 향상 시킬 수 있다.

아울러 INS/GPS 통합시스템은 모든 이동로봇뿐만 아니라 각종 재할 복지 시스템 및 군사훈련시스템, UAV 등등에서 중요한 기술이라 할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] D. H. Titterton, J. L. Weston, Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Peregrinus, United Kingdom, 1997.
- [2] R. L. Greenspan, "GPS and Inertial Integration," in Global Positioning System : Theory and Applications II, AIAA, Washington DC, 1996, pp. 187-220.
- [3] K. R. Britting, Inertial Navigation Systems Analysis, Wiley & Sons, 1971.