

GPS/INS/지자기 컴퍼스 통합 항법 시스템에서의 지자기 컴퍼스 이상 검출 방법

박슬기*, 정호철*, 비탈카르 키쇼르*, 김정원**, 황동환***
 충남대학교 전자공학과*
 한국항공우주연구원**
 충남대학교 전기정보통신공학부 ***

A Magnetic Compass Fault Detection Method on The GPS/INS/Magnetic Compass Integrated Navigation System

Sul Gee Park*, Ho Cheol Jeong*, Vitalkar kishor*, Jeong Won Kim**, Dong-Hwan Hwang***

*Department of Electronics Engineering, Chungnam National University,

**Korea Aerospace Research Institute,

***School of Electrical and Computer Engineering, Chungnam National University

Abstract - GPS/INS/지자기 컴퍼스 통합 항법 시스템에서 지자기 컴퍼스의 이상 검출 방법을 제안하였다. 지자기 컴퍼스의 이상은 Hard iron과 Soft iron 효과에 의하여 발생하므로 이와 관련된 값을 통합 필터 측정치의 시퀀스 통계치로 이용하여 검출하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 효용성을 모의 실험과 차량 실험을 통하여 검증하였다.

에 대해서 기술하였고, 3절에서 지자기 컴퍼스의 이상 및 이상검출 방법에 대하여 설명하였다. 4절에서 모의실험과 차량 실험을 결과에 대하여 설명하고 마지막으로 결론 및 추후과제를 제시하였다.

2. GPS/INS/지자기 컴퍼스 통합 항법 시스템

GPS/INS/지자기 컴퍼스 통합 항법 시스템의 구조는 간접 되먹임 (Indirect feedback) 방식이며, 그림 1과 같다.

1. 서 론

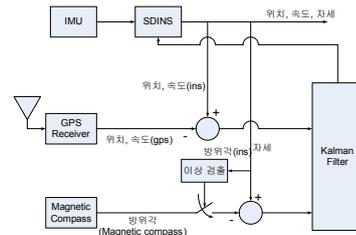
최근 위험한 지역에서의 작업 등을 사람을 대신하여 효율적으로 수행할 수 있는 자율 이동 로봇, 무인 항체 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 자율적으로 효과적인 임무를 수행하기 위해서는 인식 (Perception), 항법(Navigation), 계획(Panning), 통신(Communication), 인간과 로봇 연동(Human robot interface) 기술 등이 필요하다. 특히 연속적이고 정확한 위치, 속도, 자세 정보를 제공하는 항법 기술은 로봇의 자율 주행을 가능하게 하는 가장 중요한 기술 중의 하나로 알려져 있다.

연속적이고 정확한 항법 정보를 제공하기 위하여 여러 가지 센서를 결합한 통합 항법 시스템이 연구되고 있는데, 대표적인 것으로 GPS/INS 통합 항법 시스템을 들 수 있다. 최근에 무인 항체 또는 무인 로봇에서 항법 시스템의 성능에 대한 요구 조건이 높아짐에 따라 GPS와 INS 외에 지자기 컴퍼스(Magnetic compass), 기압계, 속도계, 영상센서, 초음파 센서 등 다른 센서를 추가하여 통합 시스템을 구성하는 연구가 진행되고 있다[1][2]. 특히, 정확한 자세 정보를 요구하는 무인 로봇, 항공기 등에서는 자세 정확도를 향상 시키기 위하여 자세 정보를 제공할 수 있는 보조 센서를 사용하고 있다. INS와 결합할 수 있는 자세 측정용 GPS 수신기는 여러개의 안테나를 사용하여 자세를 계산할 수 있어, 통합 항법 시스템에서는 위치, 속도 외에 자세 측정치를 이용하여 자세 정확도를 향상시킬 수 있지만, 자세 측정용 GPS 수신기는 여러 개의 안테나와 RF 초단부(Front-end)로 구성되며, 자세를 계산하기 위해서는 미지정수 결정과 같은 복잡한 알고리즘이 필요하다[3]. Ohio 주립 대학에서는 지자기 컴퍼스를 결합한 GPS/INS/지자기 컴퍼스 통합 항법 시스템을 개발하여 자율 이동 로봇의 항법 시스템으로 사용하였다. 지자기 컴퍼스는 지구 자기장을 측정하여 자세를 계산하는 센서로 알고리즘이 비교적 간단하며, 저가인 장점이 있다. 그렇지만 외부 환경에 민감하므로 이에 의하여 발생하는 이상을 검출할 수 있는 방법이 필요하다.

Vincent는 보행자용 통합 항법 시스템에서 지자기 컴퍼스의 이상을 검출하는 방법을 제안하였다[4]. 실내에서 주변의 금속 물질이나 전기 장치 등에 의하여 발생하는 컴퍼스의 급격한 오차를 검출하기 위한 것으로, 컴퍼스의 방위각 변화율과 자이로의 각속도 출력을 비교하여 이상을 검출한다. 이 방법은 컴퍼스에 발생한 이상을 손쉽게 검출할 수 있지만, 주변에 이상을 유발시키는 원인이 유지되는 경우에는 효과적으로 이상을 검출하기 어렵다.

본 논문에서는 GPS/INS/지자기 컴퍼스 통합 항법 시스템에서 지자기 컴퍼스의 이상을 검출하는 방법을 제안하고자 한다. 지자기 컴퍼스의 이상은 Hard iron과 Soft iron 효과에 의한 왜곡에 의하여 발생하며, 이상이 없는 통합 필터의 자세 측정치는 평균이 0인 분포를 가진다고, Hard iron과 Soft iron 효과가 발생하면, 측정치 분포의 평균이 변한다고 하면 통합 필터 자세 측정치의 임계치 초과 여부를 검사하여 컴퍼스의 이상을 검출 할 수 있다. 제안한 방법을 사용하면 Hard iron과 Soft iron 효과가 유지되는 상황에서도 컴퍼스의 이상을 검출 할 수 있다. 제안한 방법의 검증은 모의 실험과 차량 실험을 통하여 수행하였다.

논문의 구성은 2절에서 GPS/INS/지자기 컴퍼스 통합 항법 시스템 구조



<그림 1> GPS/INS/지자기 컴퍼스 통합 항법 시스템

GPS 수신기에서 출력되는 위치, 속도 정보와 컴퍼스에서 출력되는 방위각으로부터 통합 필터에서 INS 오차를 추정하여 보상하는 구조이다. 통합 칼만 필터는 15차로 구성되며, 상태 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\mathbf{x}(k+1) = \Phi(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (1)$$

여기서, 상태변수는 $\delta\mathbf{x} = [\delta\mathbf{P} \ \delta\mathbf{V} \ \delta\mathbf{E} \ \mathbf{B}_x \ \mathbf{B}_y \ \mathbf{B}_z]^T$ 이며 각각 위치 오차, 속도 오차, 자세오차, 가속도계 바이어스, 자이로스코프의 바이어스를 나타낸다. $\mathbf{w}(k)$ 공정 잡음으로 오차 공분산은 $\text{cov}\{\mathbf{w}(k)\} = \mathbf{Q}(k)$ 이다. 통합 필터의 측정 방정식은 식 (2)와 같다.

$$\mathbf{z}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{INS} - \mathbf{P}_{GPS} \\ \mathbf{V}_{INS} - \mathbf{V}_{GPS} \\ \Psi_{INS} - \Psi_{MC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{33} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\mathbf{P} \\ \delta\mathbf{V} \\ \mathbf{B}_x \\ \mathbf{B}_y \\ \mathbf{B}_z \end{bmatrix} + \mathbf{v}(k) \quad (2)$$

여기서, 아래 첨자 INS는 INS의 출력, GPS는 GPS 수신기 출력, MC는 지자기 컴퍼스 출력을 나타내고 $\mathbf{P}, \mathbf{V}, \Psi$ 는 각각 위치, 속도, 방위각을 나타낸다. 지자기 컴퍼스의 자세는 오일러 각이고 INS 오차 모델에서 정의한 자세 오차는 회전 벡터 오차이므로 둘 사이의 관계는 식 3과 같다.

$$H_{33} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\tan\theta \cos\psi & -\tan\theta \sin\psi & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, θ 는 피치(Pitch)각, ψ 는 요(Yaw)각을 나타낸다.

3. 지자기 컴퍼스 이상 검출 방법

3.1 지자기 컴퍼스 이상 원인

지자기 컴퍼스는 주변에 지구자기장 외에 또 다른 자기장을 발생시킬 수 있는 물질로 인해서 방위각 계산에서 큰 오차를 발생시킬 수 있다. 지구 자기장은 상대적으로 세기가 적으므로 컴퍼스 주변의 자성체로 인해서 쉽게 변형될 수 있다. 이와 같이 지구자기장 외에 다른 자기장을 발생하는 물체에 의한 효과를 Hard iron 효과라 한다. Soft iron은 지구 자기장의 자연적인 경로를 바꾸는 물질에 의해 발생하는 현상이다. 자연적인 경로는 지구 자기장이 공기 중을 통과하는 경로를 의미하는데 이 경로상에 공기와 다른 투과성을 갖는 물질이 있으면 자기장 방향이 변하여 컴퍼스에서 자세 오차가 발생한다[5].

3.2 지자기 컴퍼스 이상 검출 방법

GPS/INS/지자기 컴퍼스 통합 항법 시스템에서 통합 필터의 잔차(Residual)는 식 (4)과 같다.

$$\gamma_k = z_k - H \hat{x}_k^- \quad (4)$$

여기서, 측정치 z_k 는 식 (2)에 나타난 것과 같으며, 간접 되먹임 구조의 통합 항법 시스템에서는 이전 시점에 추정된 INS 오차 상태를 보상하였으므로 상태 변수 추정치에 대한 시간 갱신이 생략되고 식 (5)와 같이 잔차를 나타낼 수 있다.

$$\gamma_k = z_k \quad (5)$$

모든 센서가 정상 동작인 경우 잔차 평균 0, 공분산 V_k 를 갖는 가우시안 분포를 가진다고 하면, 공분산 V_k 는 식 6과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_k = H_k P_k^- H_k^T + R_k \quad (6)$$

여기서, H_k 는 상태변수의 오차 공분산 행렬, R_k 는 측정 잡음 공분산 행렬을 나타낸다. 모든 상태변수에 대한 잔차 중 컴퍼스의 측정치를 사용하는 방위각에 대한 변수만 보면 다음 식 7과 같이 나타낼 수 있다.

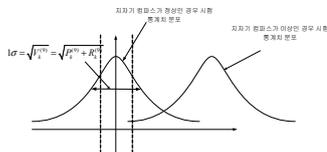
$$\begin{aligned} \gamma_k^{(9)} &= z_k^{(9)} = \hat{\psi}_{INS,k} - \hat{\psi}_{MC,k} \\ &= \psi_k + \delta\hat{\psi}_{INS,k} - (\psi_k + \delta\hat{\psi}_{MC,k}) \\ &= \delta\hat{\psi}_{INS,k} + \delta\hat{\psi}_{MC,k} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, 위첨자(9)는 상태 변수 벡터 중 방위각에 해당하는 9번째 요소를 나타내고, $\hat{\psi}_{INS}$ 는 INS의 방위각, $\hat{\psi}_{MC}$ 는 컴퍼스의 방위각을 나타낸다. $\delta\hat{\psi}_{INS}$, $\delta\hat{\psi}_{MC}$ 는 각각 INS 방위각과 컴퍼스의 방위각의 오차를 나타낸다. 정상인 경우 $\gamma_k^{(9)}$ 의 평균은 0 이고, 분산은 식 8과 같은 가우시안 분포를 가진다고 치자.

$$V_k^{(9)} = P_k^{(9)} + R_k^{(9)} \quad (8)$$

여기서, $P_k^{(9)}$ 오차 공분산 행렬 중 방위각과 관계있는 9번째 대각 성분 $R_k^{(9)}$ 는 지자기 컴퍼스 방위각 측정치의 오차의 분산이다. 정상적인 경우 시험 통계치는 아래 그림 2와 같이 평균이 0인 분포를 가진다. Hard iron 또는 Soft iron 효과가 발생하면 분포가 변한다. 이 때 시험 통계치가 식 9와 같이 임계치를 초과하면 이상이 발생한 것으로 판단하여 통합 필터에서 지자기 컴퍼스를 사용하지 않도록 하여 GPS/INS 모드로만 동작시킨다.

$$|l_k| \leq th. \quad (9)$$



〈그림 2〉 정상인 경우와 비정상인 경우의 시험 통계치의 분포

임계치는 주어진 오보 확률 또는 미 검출 확률을 만족하도록 결정한다. 주어진 오보 확률을 만족하기 위해서는 임계치를 식 (10)과 같이 결정하며, 미 검출 확률을 만족하도록 하기 위해서는 식(11)과 같이 임계치를 결정한다.

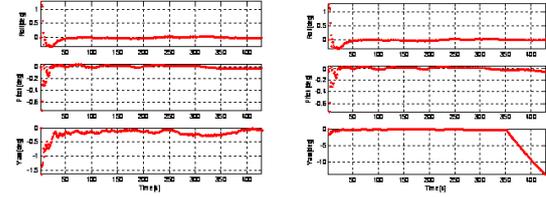
$$\Pr(|l_k| > th. | \mu = 0) < \Pr(\text{False alarm}) \quad (10)$$

$$\Pr(|l_k| < th. | \mu \neq 0) < \Pr(\text{Missed detection}) \quad (11)$$

여기서, 평균 $\mu = 0$ 은 이상이 발생하지 않은 경우를 $\mu \neq 0$ 은 이상이 발생한 경우를 나타낸다. 임계치를 결정하기 위해서는 먼저, 오보 확률 또는 미 검출 확률을 결정하여야 하고, 사용하는 센서의 잡음 특성을 알아야 한다.

4. 성능 검증

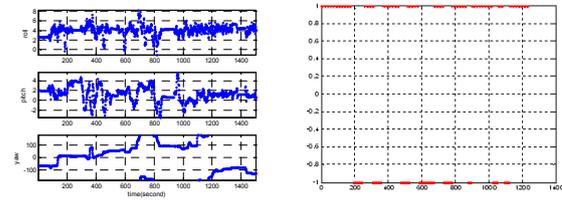
제안한 방법의 효용성을 확인하기 위해 컴퍼스 측정치에 임의의 오차를 추가한 후 제안한 이상 검출 방법의 성능을 평가하였다. 미 검출 확률이 5%보다 작도록 임계치를 결정하였다. 그림 3은 제안한 이상 검출 기법을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 자세 오차를 나타내고 있다.



(a) 이상검출기법 적용 시 자세오차 (b) 이상검출기법 미적용 시 자세오차

〈그림 3〉 통합 항법 시스템의 자세오차

이상 검출 기법을 적용하지 않고 지자기 컴퍼스 측정치를 사용한 경우에는 컴퍼스의 이상이 발생하고 350초 후에 자세 오차, 특히 방위각 오차가 증가하는 것을 알 수 있고 이상 검출 기법을 적용한 경우에는 정확한 항법 정보를 제공하는 것을 알 수 있다. 그림 4는 Novatel사의 GPS 수신기, Honeywell사의 HG1700 IMU와 HMR3500 지자기 컴퍼스를 이용하여 통합 항법을 수행한 차량 실험 결과이다.



(a) 자세 결과 (b) 통합 항법 모드

〈그림 4〉 통합 항법 결과

그림 4의 (a)는 통합 시스템의 자세 결과를 (b)는 통합 항법 모드를 나타낸 것이다. 통합 항법 모드에서 1은 GPS/INS/지자기 컴퍼스 모드를 -1은 GPS/INS 모드를 나타내는데 이로부터 실험 구간에서는 도로 주변 환경에 의하여 지자기 컴퍼스의 방위각 측정치에 8회의 이상을 검출하였음을 알 수 있다.

5. 결론 및 추후 연구 과제

본 논문에서는 GPS/INS/지자기 컴퍼스 통합 항법 시스템에서의 지자기 컴퍼스 이상 검출 방법을 제안하였다. GPS/INS/지자기 컴퍼스 통합 항법 시스템에서는 GPS와 INS보다 상대적으로 컴퍼스에 이상이 발생할 가능성이 높으므로 컴퍼스의 측정치만에 대한 검사를 통하여 이상을 검출하였다. 제안한 방법을 적용하면 이상이 발생하여도 양호한 항법결과를 제공할 수 있음을 확인하였고, 차량실험을 통하여 고장 검출을 실시간으로 확인하였다. 추후로는 지자기 컴퍼스의 이상 외에도 GPS와 INS에 발생하는 이상을 검출하는 방법에 대하여 연구할 계획이다

[참 고 문 헌]

- [1] S. Godha, M. G. Petovello, and G. Lachapelle, "Performance analysis of MEMS IMU/HSGPS/Magnetic Sensor Integrated System in Urban Canyons", *Proceedings of ION GNSS 2005*, pp 1021-1029, 2005
- [2] T. Bak, "Vision-GPS Fusion for Guidance of an Autonomous Vehicle in Row Crops", *Proceedings of ION GPS 2001*, pp.423-429, 2001.
- [3] D.-H. Hwang, S. H. Oh, S. J. Lee, C. Park, and C. Rizos "Design of a low-cost attitude determination GPS/INS integrated navigation system," *GPS SOLUTIONS*, 9/4, pp.294-311, 2005.
- [4] Vincent GABAGLIO, *GPS/INS Integration for Pedestrian Navigation*, Ph.D Thesis, University of Lausanne of Polytechnical, 2003.
- [5] M. J. Caruso, "Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems," *Proceedings of IEEE Sensors and Actuators 1997*, pp. 15-21, 1997.