

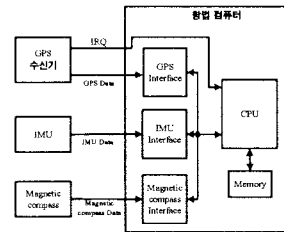
## GPS/INS/Magnetic compass 통합 항법 시스템의 동기 방법

정호철\*, 박슬기\*, 김정원\*, 황동환\*\*, 이상정\*\*  
 \*충남대학교 전자공학과, \*\*충남대학교 전기정보통신공학부

### Synchronization Method of GPS/INS/Magnetic Compass Integration Navigation System

Ho Cheol Jeong\*, Sul Gee Park\*, Jeong Won Kim\*, Dong-Hwan Hwang\*\* and Sang Jeong Lee\*\*  
 \*Department of Electronics Engineering, Chungnam National University,  
 \*\*School of Electrical and Computer Engineering, Chungnam National University

**Abstract** - 통합 항법 시스템 구현시 각 센서 측정치의 동기를 맞추어 칼만 필터의 상태변수를 갱신을 해야 하지만, 상용 센서를 사용할 경우 각 센서 측정치의 출력 동기를 맞추기 어려울 뿐만 아니라, 통합 항법 컴퓨터까지의 전송 과정에서 지연시간이 생기므로 특히 고기동 항체에서는 센서 측정치 비동기로 인하여 항법 성능이 저하가 커진다. 본 논문에서는 GPS/INS/Magnetic compass 통합 항법 시스템의 동기 방법을 제안한다. 이 방법은 센서 하드웨어의 변경이 필요 없이 동기를 맞출 수 있어 상용 센서를 사용하여 항법 시스템을 개발할 때 유용하게 사용할 수 있다. 이 방법의 성능을 검증하기 위해 고속 항체의 시나리오 구성하고 모의실험을 통해 유효성을 확인 할 수 있었다.



〈그림 1〉 GPS/INS/Magnetic compass 통합 항법 시스템의 하드웨어 구조

#### 1. 서 론

그동안 GPS/INS 통합 항법 시스템은 항법 성능을 향상시키기 위해 많은 연구가 진행 되어왔고, 그 결과 많은 상용 제품이 출시되었다. 최근에는 INS의 보조센서로 GPS 외에 Magnetic compass, 기압계, 속도계, 카메라(Camera) 등 여러 가지 센서를 추가적으로 결합한 다중 센서 기반 통합 항법 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다[1][2].

여러 가지 센서 통합 기법이 있지만, 일반적으로 통합 항법 시스템은 주로 짧은 시간의 시스템의 동적 특성을 잘 나타낼 수 있는 INS를 주 센서로 사용하고 오차의 누적이 없는 비관성 센서를 보조 센서로 사용하여 INS의 오차를 칼만 필터(Kalman filter)로 추정하여 보상하는 기법을 사용한다. 통합 항법 시스템에서 칼만 필터는 보조 센서의 데이터 출력 주기에 맞추어 상태변수를 갱신한다. 이 때 서로 비교되어지는 INS와 보조 센서의 측정치는 시각 동기가 이루어져야 한다. 그러나 GPS 수신기 등의 보조 센서에서는 내부 처리 과정과 항법 컴퓨터까지 전송 과정 중에 시간 지연이 발생하고 지연된 보조 센서의 측정치를 보상없이 사용하는 경우 고기동 항체에서는 센서간 측정치 비동기로 인하여 항법 성능이 저하될 수 있다[3].

미 국방성(DoD, Department of Defense)에서는 GPS 수신기와 IMU간의 동기를 위하여 수신기의 1 PPS(Pulse Per Second) 신호를 기준으로 IMU의 Sampling rate을 조절하는 방법을 제시하였다[4]. 이 방법은 다른 것에 비하여 비교적 정확하게 센서간 동기를 맞출 수 있지만, IMU의 하드웨어를 수정하여야 한다. 센서간 동기 오차를 칼만 필터에서 추정하여 보상하는 방법도 제시되었다[5]. 이 방법은 하드웨어의 수정 없이 소프트웨어만으로 가능하지만, 항체의 운동에 따라 비동기 오차 추정 정확도가 달라진다. GPS 수신기와 IMU의 비동기 오차를 Time tag를 이용하여 보상하는 방법도 제시되었다[6][7]. 이 방법은 상용(COTS, Commercial Off The Shelf) 센서를 이용하고 센서의 하드웨어를 변경할 수 없을 경우 적당한 방법이다. 이 방법에서는 센서간 동기를 맞추기 위하여 센서 출력데이터의 Time tag의 오차를 계산할 수 있는 하드웨어를 추가적으로 이용하였다.

본 논문에서는 다중 센서 기반 통합 항법 시스템의 한 종류인 GPS/INS/Magnetic compass 통합 항법 시스템의 동기 방법을 제안한다. 서로 다른 출력률을 가지는 GPS 수신기, IMU와 Magnetic compass의 측정치간 동기를 맞추기 위하여 수신기가 제공하는 1 PPS 신호를 기준으로 각 센서의 시각 비동기 오차를 추정한 후 이것으로 인하여 발생하는 측정치의 오차를 보상하도록 한다. 이 방법은 센서 하드웨어를 변경할 필요가 없으므로 상용 센서를 이용하여 통합 항법 시스템을 개발할 때 유용할 뿐만 아니라, 시각 비동기 오차를 추정하기 위하여 수신기의 1 PPS 신호와 항법 컴퓨터 CPU 내부의 타이머(Timer)만을 이용하므로 하드웨어의 추가가 필요없는 장점을 가진다.

2절에서 제안하는 동기 방법을 기술하고, 3절에서 평가 결과를 제시하고 자 하고 마지막으로 결론과 후속 연구 과제를 제시 하였다.

#### 2. GPS/INS/Magnetic compass 통합 항법 시스템의 동기

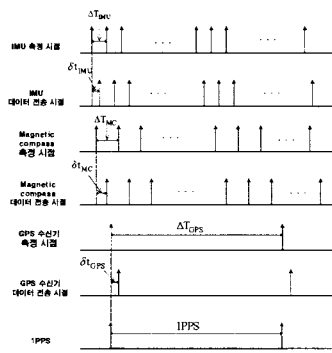
##### 2.1 동기 위한 하드웨어

GPS 수신기, IMU와 Magnetic compass의 측정치간 동기를 맞추기 위한 하드웨어 구조는 그림 1과 같다.

하드웨어는 GPS 수신기, IMU, Magnetic compass와 항법 컴퓨터로 구성되며, 일반적인 상용 센서 기반 통합 항법 시스템의 하드웨어 구조와 차이가 없다. GPS 수신기, IMU, Magnetic compass는 독립적인 모듈이며 서로 다른 출력률을 가진다. 측정된 데이터는 SDLC(Synchronous Data Link Control) 또는 UART(Universal Asynchronous Receiver Transmitter)와 같은 직렬 통신 방식으로 항법 컴퓨터로 전송한다. 항법 컴퓨터의 CPU는 통합 알고리즘을 구동하기에 충분한 계산량을 가져야 하며, 내부에 타이머가 내장된 것을 사용한다. CPU마다 타이머가 동작 주기가 다르지만 센서의 측정치간 동기 오차를 추정하는데 사용하기 위해서는 동작 주기가 짧은 것을 사용하도록 한다. CPU의 IRQ(Interrupt ReQuest)핀 중 하나를 GPS 수신기의 1 PPS 신호에 할당한다.

##### 2.2 센서 측정치간 동기 방법

센서 출력의 타이밍 도를 그림 2에 나타내었다.



〈그림 2〉 센서 출력 타이밍도

GPS 수신기, IMU와 Magnetic compass의 데이터 출력 간격은 각각  $\Delta T_{GPS}$ ,  $\Delta T_{IMU}$ ,  $\Delta T_{MC}$ 이고 IMU가 가장 빠르게 데이터를 출력하며, Magnetic compass, GPS 수신기 순으로 빠르게 출력된다. 각 센서에서 매 측정된 시점의 데이터는 센서 내부의 처리 과정과 전송 지연으로 인하여 항법 컴퓨터에서는 지연된 측정치를 수신한다. 항법 컴퓨터에서 수신한 IMU, GPS 수신기, Magnetic compass의 측정치는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

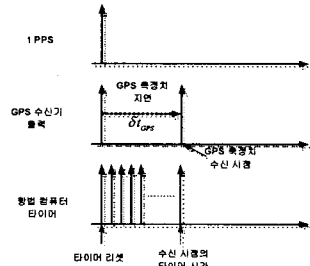
$$IMU(t_i(k)) = IMU(t_i(k) - \delta t_{IMU}) \quad (1-a)$$

$$GPS(t_g(k)) = GPS(t_g(k) - \delta t_{GPS}) \quad (1-b)$$

$$MC(t_m(k)) = MC(t_m(k) - \delta t_{MC}) \quad (1-c)$$

여기서,  $IMU$ ,  $GPS$ ,  $MC$ 는 각각 IMU, GPS 수신기, Magnetic compass가 제공하는 측정치를 나타내고,  $t_i(k)$ 는 IMU의 가속도계와 자이로가 측정된 데이터를 샘플링한 시점으로  $t_i(k) - t_i(k-1)$ 는  $\Delta T_{IMU}$ 이다.  $t_g(k)$ 는 수신

기가 위성으로부터 신호를 수신하여 위치, 속도를 계산한 시간이고 기준 신호인 1PPS와 동기되어 있으며  $t_g(k) - t_g(k-1)$ 는  $\Delta T_{GPS}$ 이다. 마찬가지로  $t_m(k)$ 는 Magnetic compass가 지구 자기장을 측정된 시점이며, 시간 간격은  $\Delta T_{MC}$ 이다.  $\delta t_{IMU}$ ,  $\delta t_{GPS}$ 와  $\delta t_{MC}$ 는 각각 IMU, GPS 수신기, Magnetic compass의 내부 처리 과정과 전송 과정 중에 발생하는 지연 시간이다. 이 지연 시간을 보상하기 위하여 GPS 수신기에서 제공하는 1PPS 신호를 기준 시간으로 이용하였다. 1PPS는 수신기에서 1초 간격으로 제공되는 신호로 100ns ~ 1 us 정도의 정확도를 가진다. 수신기에서 1 PPS 신호가 발생하면 항법 컴퓨터에서는 CPU 타이머를 리셋(Reset)한 후 다음 1 PPS 신호가 발생할 때 까지 타이머를 증가시킨다. 타이머 증가 간격을  $\Delta T_{timer}$ 라 하고, 임의의 센서 측정치 출력 시점 k의 카운터 값을  $C(k)$ 라고 하면, CPU 내부 타이머가 가진 값은  $t_{timer}(k) = C(k) \Delta T_{timer}$ 가 되고 이 시간은 1 PPS 신호에 동기 되어 있으므로 타이머의 시간을 비동기 오차를 보정하기 위한 기준 시간으로 사용할 수 있다. 물론 CPU의 기준 클럭 오차에 의하여 CPU 타이머의 오차가 시간에 따라 증가할 수 있지만 1 PPS 신호가 발생할 때 마다 타이머를 리셋하므로 이 오차는 무시할 수 있다. 먼저 GPS 수신기에서 제공되는 측정치의 지연 오차는 그림 3과 같이 GPS 측정치를 수신한 시점의 현재 타이머의 값이 된다.

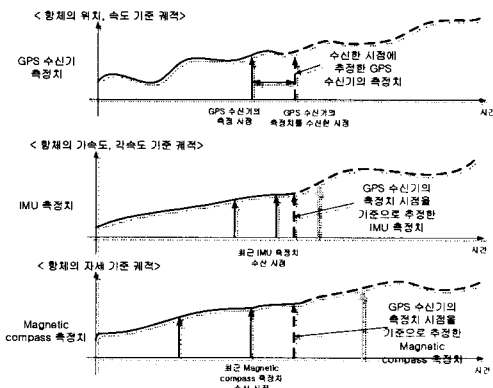


〈그림 3〉 GPS 수신기의 측정치 지연

현재 타이머의 시간이 GPS 수신기의 측정치 지연 시간을 나타내므로 식 (2)와 같이 수신기의 지연 오차를 외삽법(Extrapolation)을 이용하여 보정한 측정치를 계산할 수 있다.

$$\widehat{GPS}(t_g(k)) = GPS(t_g(k)) + \frac{GPS(t_g(k)) - GPS(t_g(k-1))}{t_{timer}(t_g(k)) - t_{timer}(t_g(k-1))} \times t_{timer}(t_g(k)) \quad (2)$$

여기서,  $\widehat{GPS}$ 는  $t_g(k)$  시점에 추정된 GPS 수신기의 측정치이다. 센서간 측정치의 비동기 오차를 제거하기 위해서는 IMU와 Magnetic compass의 측정치도  $t_g(k)$  시점의 측정치를 이용하여 항법을 수행하여야 한다.  $t_g(k)$  시점의 IMU와 Magnetic compass의 측정치는 그림 4와 식 (3)과 (4)에 나타낸 것과 같이 추정할 수 있다.



〈그림 4〉 IMU, Magnetic compass 측정치의 비동기 오차 보상

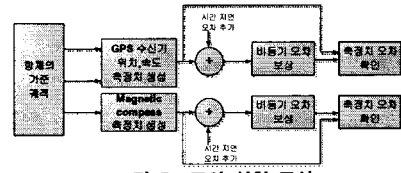
$$\widehat{IMU}(t_i(k)) = IMU(t_i(k)) + \frac{IMU(t_i(k)) - IMU(t_i(k-1))}{t_{timer}(t_i(k)) - t_{timer}(t_i(k-1))} \times (t_{timer}(t_g(k)) - t_{timer}(t_i(k))) \quad (3)$$

$$\widehat{MC}(t_m(k)) = MC(t_m(k)) + \frac{MC(t_m(k)) - MC(t_m(k-1))}{t_{timer}(t_m(k)) - t_{timer}(t_m(k-1))} \times (t_{timer}(t_g(k)) - t_{timer}(t_m(k))) \quad (4)$$

이와 같이 IMU, GPS 수신기, Magnetic compass의 측정치를 같은 시점에서 수신한 측정치로 추정할 수 있으며, 이를 이용하여 통합 항법을 수행하면 센서간 비동기에 의하여 발생하는 오차를 제거할 수 있다.

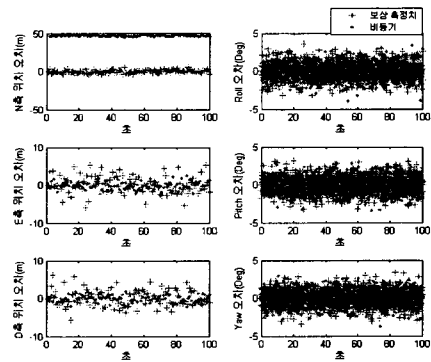
### 3. 성능 검증

제안한 방법의 성능을 검증하기 위하여 모의 실험을 수행하였다. 그림 5는 모의 실험 구성을 나타낸 것이다. 통합 항법 시스템에서 보조 센서로 사용되는 GPS 수신기의 위치, 속도 측정치와 Magnetic compass의 자세 측정치를 생성하였으며 시간 지연 오차는 각각 0.99초, 0.09초가 발생하도록 하였다. 항체의 시나리오는 N축으로 속도 50m/s으로 이동하는 시나리오를 구성하였다.



〈그림 5〉 모의 실험 구성

성능 검증은 실제 궤적과 제안한 방법으로 비동기 오차 보정한 측정치와의 차이를 확인하여 수행하였고 결과를 그림 6에 나타내었다.



〈그림 6〉 비동기 오차 보정 여부에 따른 측정치 오차

결과에서 N축 위치 오차와 같이 항체의 운동이 급격하게 변하는 경우에 비동기 오차를 보정하면 측정치 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다. E축, D축 위치 오차 및 자세 오차와 같은 경우는 비동기에 오차가 존재하지만 모의 실험의 항체 운동 시나리오가 E축, D축 위치 변화와 자세변화가 작기 때문에 오차가 상대적으로 적음을 알 수 있다.

### 4. 결론 및 추후 연구 과제

본 논문에서는 GPS/INS/Magnetic compass 통합 항법 시스템의 동기 방법을 제안하였다. 통합 항법 시스템을 구성하는 GPS 수신기, IMU, Magnetic compass의 측정치 간에 비동기가 발생하는 경우 고기동 항체에서는 항법 오차가 증가할 수 있으므로 센서간 동기 방법이 필요하다. 제안하는 동기 방법은 센서 하드웨어 변경이 필요 없고 항법 컴퓨터에도 추가적인 하드웨어가 필요 없으므로 상용 센서 기반으로 통합 항법 시스템을 개발할 때 유용하게 사용될 수 있으며, 다른 센서를 이용할 때에도 이 방법을 사용할 수 있을 것이다. 추후 연구로 항체의 운동 특성에 따라 센서간 비동기가 통합 항법 결과에 미치는 영향을 확인하고, 고속으로 운동하는 항체에 대한 실험을 통하여 성능 평가를 수행할 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] S. Godha, M. G. Petovello, and G. Lachapelle, "Performance analysis of MEMS IMU/HSGPS/Magnetic Sensor Integrated System in Urban Canyons", ION GNSS 2005, Sep., 2005
- [2] T. Bak, "Vision-GPS Fusion for Guidance of an Autonomous Vehicle in Row Crops", ION GPS 2001, pp.423-429, Sep., 2005
- [3] I. Y. Bar-Itzhack, and Y. Vitek, "The Enigma of False Bias Detection in A Strapdown System during Transfer Alignment", *Journal of Guidance and Control*, Vol. 8, No. 2, pp.175-180, 1985
- [4] Department of Defense, "Interface Control Document", 2002
- [5] H. K. Lee, J. G. Lee, and G. I. Jee, "Calibration of Measurement Delay in GPS/SDINS Hybrid Navigation", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 25, No. 2, pp.240-247, 2002
- [6] W. Ding, J. Wang, Y. Li, P. Mumford, and C. Rizos, "Time Synchronization Error and Calibration in Integrated GPS/INS Systems", *ETRI Journal*, Vol. 30, pp.59-67, 2008
- [7] B. Li, C. Rizos, H. K. Lee and H. K. Lee "A GPS-slaved Time Synchronization System for Hybrid Navigation", *GPS Solutions*, Vol. 10, p.p.207-217, 2006