

特輯論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.11.997>

전기모터를 사용한 소형 무인헬리콥터에 활용될 항법장치용 자장계의 보상

이길호*, 조성범*, 김정성*, 최기영**, 기창돈***, 송용규****, 구원준*****

Compensation of Magnetometer in the Navigation System for Unmanned Helicopter using an Electric Motor

Gilho Lee*, Sungbeom Jo*, Jungsung Kim*, Keeyoung Choi**, Changdon Kee***, Yongkyu Song**** and Wheonjoon Koo*****

ABSTRACT

GNSS and ARS are the most common sensors in low-end UAVs. However, these sensors are vulnerable to built-in errors and cannot measure the body heading independently. The GNSS/INS cannot fully compensate the IMU errors in initial alignment process and rectilinear flights. For an unmanned helicopter, a magnetometer can be more useful than any other sensors to obtain heading information. However, the electric motor which drives small helicopter UAV keeps the magnetometer from reading the pure magnetotelluric vector. This paper shows the effects of electric motor on the magnetometer readings, and presents a method to compensate the effects. The results are verified with flight test data. The simulation and experimental results in this paper proves that aiding GNSS/INS with magnetometer increases observability and improves accuracy.

초 록

GNSS와 ARS는 저가의 무인 항공기를 위한 보편적인 센서로, 오차가 크며 방위각을 독립적으로 알아낼 수 없다는 단점이 있다. 또한 GNSS/INS는 초기정렬 과정과 직선비행 중에 IMU의 오차를 충분히 보상하지 못한다. 자장계는 방위각을 얻는데 효과적으로 활용되는데, 소형의 헬리콥터에 사용되는 전기모터는 정확한 방위각 산출을 방해한다. 이 논문에서는 자장계를 보상하는 방법을 제안하였으며, 비행시험으로 검증하였다. 또한 시뮬레이션 결과는 GNSS/INS에 추가된 자장계가 관측성과 정확도를 높이는 데 효과적임을 보여준다.

Key Words : Unmanned Helicopter(무인회전익항공기), INS(관성항법), Magnetometer(자장계), Electric Motor(전기모터), Magnetic Field(자기장)

1. 서 론

† 2012년 9월 3일 접수 ~ 2012년 10월 31일 심사완료

* 정회원, 인하대학교 항공우주공학과 대학원

** 정회원, 인하대학교 항공우주공학과

교신저자, E-mail : kchoi@inha.ac.kr

인천광역시 남구 인화로 100

*** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

**** 정회원, 한국항공대학교 항공기계공학과

***** 정회원, 국방과학연구소

저가의 MEMS 기술이 발전되었지만 여전히 관성항법시스템(Inertial Navigation System : 이하 INS)의 구성요소로 활용되기에는 쉽지 않다.

대학연구소에 저가의 INS를 개발하려는 노력이 진행 중이다. 나아가서 무인항공기에 적용하려는 사례를 광범위 하게 찾아 볼 수 있다.

INS 알고리즘의 특성상 각 구성요소의 바이어

스로 인해 위치, 속도, 자세 등의 정보가 발산하게 될 수밖에 없는데, 이러한 문제를 해결하기 위해서 많은 센서융합기술이 연구되고 있다. GNSS는 발산하지 않는, 꽤 정확한 위치와 속도 정보를 제공하기 때문에 INS의 보조센서로 가장 보편적으로 사용된다. 하지만 항공기가 GNSS로부터 측정된 위치와 속도 정보를 이용하여 등속 비행을 할 경우 자세에 대한 관측성이 제한된다 [1]. 그래서 보조센서로서 자장계를 탑재하는 경우가 많으며, 이를 단독으로 활용하여 방위각을 측정하거나 다른 센서와 결합한 복합항법의 일부로 사용한다.

자장계는 지구의 자기장을 읽어 탑재체의 자세를 추정해낼 수 있다. 하지만 주변에 자기장을 왜곡시키는 요소, 즉 기체의 전자장치, 철 등에서 발생하는 자기력 때문에 정확한 지구 자기장을 측정하지 못한다. 그래서 자장계는 장착오차 뿐만 아니라 주변 자기장 왜곡에 대해서도 보정을 해 주어야만 한다.

전기모터를 사용하는 무인 헬리콥터는 정비나 운용하기에 편하기 때문에 무인기로 활용하는데 이점이 있지만, 전기모터가 발생시키는 전자기장은 자장계와 거리가 가까울수록 자장계가 지구 자기장을 읽어 들이는데 방해요소로 작용한다. 그러므로 GNSS와 자장계를 융합한 INS(INS/GNSS/Mag)는 이러한 점을 충분히 고려하여야 한다.

우선 전기모터가 발생시키는 자기장의 특성을 분석하고, 유동적인 자기장 간섭을 보상하였다. 이렇게 얻은 지구자기장 정보를 활용하여 비행시 험데이터로부터 방위각 데이터를 산출하였다. 그리고 INS/GNSS/MAG를 구성하여 비선형시뮬레이션 을 통해 검증하였다.

II. 본 론

2.1 자장계 보정

2.1.1 BLDC 모터의 자기장 모델링

Fig. 1은 전기모터로 구동되는 소형 헬리콥터에 탑재된 비행제어시스템 (Flight Control System: FCS)과 전기모터, 레퍼런스로 사용될 상용 자장계(SP3004D)의 탑재위치를 보여주고 있다.

사용된 3극의 BLDC(Brushless DC) 전기모터 구조는 고정자가 전자기권선으로 구성되어 있고, 회전자가 영구자석으로 되어 있다.

Fig. 2는 고정자 코일이 모터의 중심부에 위치한 것을 보여준다. Fig. 3은 바깥쪽의 영구자석이

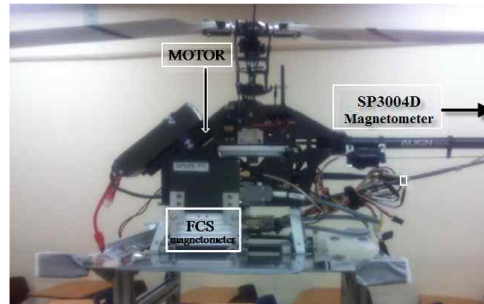


Fig. 1. Sensor Position

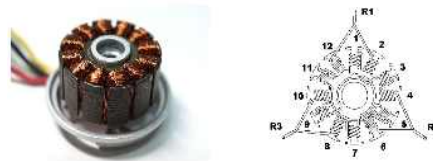


Fig. 2. BLDC Motor Construction



Fig. 3. BLDC Motor Operating Sequence

한 단계씩 움직이는 원리를 설명한다. 모터가 고정되어 있는 상태에서는 영구자석 위치에 따라 N극과 S극의 극성이 존재하게 되는데 빠른 속도로 회전한다면 모터의 극성은 사라지게 된다. 그러나 모터의 바닥에는 3개의 전자기권선이 한쪽에서 뭉쳐서 들어와 각 고정자 깃으로 나누어 들어가게 되므로 전기적인 불균일성이 존재하게 된다. 이로 인해 모터가 빠른 회전을 하더라도 모터 아래영역에서는 흐르는 전류가 커질수록 유도 자기장의 크기가 커지게 된다.

BLDC모터의 자기장 모델의 식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$B_m = B_r(RPM) + B_b(I) + B_z \quad (1)$$

- B_m: Total Magnetic Field of Motor
- B_r: Magnetic Field of permanent magnet
- B_b: Induced Magnetic Field by Current
- B_z: Magnetization of iron

전기모터에 의한 전체 자기장은 RPM에 의해 결정되는 영구자석의 자기장과 유도자기장, iron에 의한 자기장의 합으로 결정된다.

위의 식의 타당성을 검증하기 위하여 지상에

서 Trex-500 RC 헬리콥터의 구동시험을 수행하였다. 이때 FCS는 전기모터 바로 밑에 위치하며 상용 자장계 SP3004D는 전기모터에서 멀리 떨어진 테일봄에 위치하여 외부의 기준 자장계 데이터를 획득하는데 사용되었다.

Fig. 4는 모터를 구동하면서 측정된 로터의 RPM과 블레이드 피치각, 모터소비전류, 자장계 데이터이다. 전기모터와 멀리 떨어진 외부 상용 자장계의 자기장 데이터(External)는 RPM이 증가되거나 모터 구동 전류가 증가되어도 변하지 않는 반면에 내부 자장계(Inner)의 데이터는 변하는 것을 볼 수 있다.

FCS 내부로 전기모터의 자기력선이 지나가는 그림을 Fig. 5에 나타내었다. FCS와 전기모터의 위치관계 때문에 자기력선은 내부 자장계의 y축과 z축 방향으로 통과하게 된다. 이 자기력선이 외부 자장계(SP3004D)와 내부 자장계가 측정된 자기장 벡터의 차이를 만든다고 가정한다면 모터의 자기장 모델은 아래와 같다.

$$B_{diff} \cong B_{inner} - B_{external} \quad (2)$$

$$B_{motor} \cong B_{diff_x} + B_{diff_y} + B_{diff_z}$$

모터의 자기장은 전류만의 함수인 것은 Fig. 6

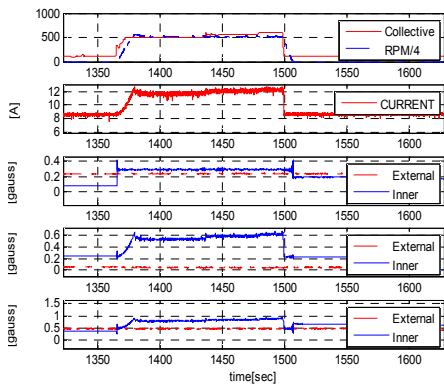


Fig. 4. Ground run-up test result

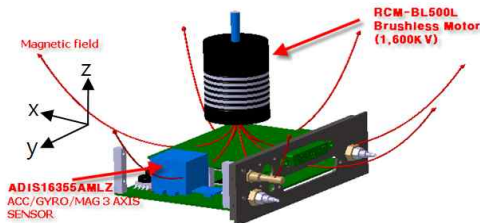


Fig. 5. The line of magnetic force of BLDC motor running

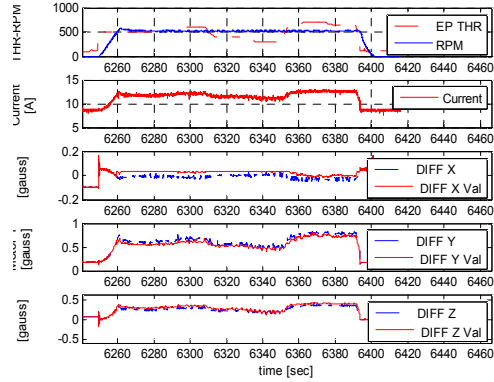


Fig. 6. Ground run-up test result

의 데이터를 통해 알 수 있다. 비행 중과 마찬가지로 RPM을 고정시킨 채 블레이드의 피치명령을 주어 모터에 부하를 변경시키면 전류의 변화가 나타나게 된다. Fig. 6은 각 X, Y, Z축의 외부의 상용자장계 내부 자장계의 차이를 보여준다.

Fig. 6의 DIFF_(X, Y, Z)는 외부 자장계와 내부자장계의 차이이고, DIFF_(X, Y, Z)_Val 은 최소자승법으로 전류와 DIFF_(X, Y, Z) 의 상관관계를 찾아 전류를 입력으로 한 함수의 결과 값이다. 즉 전기모터의 자기장 모델을 전류의 함수로 표현한 결과이고 DIFF_(X, Y, Z) 값을 흡사하게 추종함을 볼 수 있다. 식(3)에서 K_x, K_y, K_z 는 최소자승법의 계수이다.

$$B_{diff_x} = \sum_{i=1}^5 K_{xi} \cdot I^i \quad (3)$$

$$B_{diff_y} = \sum_{i=1}^5 K_{yi} \cdot I^i$$

$$B_{diff_z} = \sum_{i=1}^5 K_{zi} \cdot I^i$$

Table 1은 DIFF_(X, Y, Z)와 DIFF_(X, Y, Z)_Val의 차이, 즉 모터에 의한 자기장을 전류의 함수로 모델링한 값의 차이를 분석한 자료이다.

Fig. 7은 비행 중의 전류범위인 10[A] ~ 22[A]에서 전기모터의 자기장 모델을 각 X, Y, Z 축

Table 1. The difference of experiment and estimation

Deviation	Mean
X [gauss]	0.0188
Y [gauss]	0.0541
Z [gauss]	0.0362

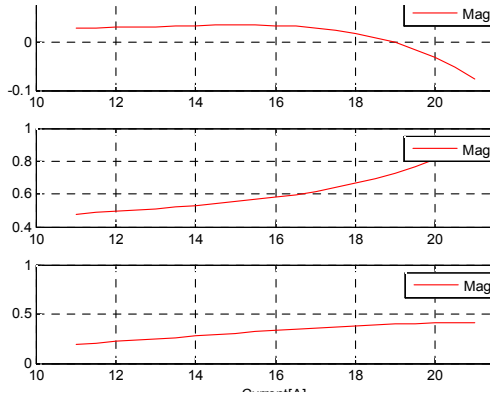


Fig. 7. Magnetic interference vector model of BLDC motor

별로 나타내었다.

모터의 위치가 실제 센서의 Y축, Z축 방향으로 영향을 크게 미치는데, Fig. 7에서도 확인할 수 있다.

2.1.2 내부 자장계 보정

지구 자기장의 세기는 약 0.5[gauss]로 매우 작다. 지구 자기장 벡터를 측정하는 것은 외부 환경에 쉽게 방해 받기 때문에 보정이 필수적이다. 자기장은 잘 알려진 대로 온도에는 민감하게 변하지 않는다. 그래서 자장계는 크게 세 가지 오차(장착오차, Hard iron distortion error, Soft iron distortion error)에 대해서 보정을 수행해야 한다. Hard iron distortion error는 전기장치나 철 성분에 의한 자기장 오차이다[2].

Soft iron distortion error는 Hard iron distortion error처럼 추가적으로 더해지는 형태가 아닌 자기장 자체가 왜곡되어 측정되는 오차를 말한다[2]. 본 연구에서는 전기모터에 의한 자기장을 제거하기 위해서 Fig. 8과 같이 일정 RPM을 유지하는 Trex-500 헬리콥터가 고정된 테이블을 회전시키면서 자기장 데이터를 측정하였다. 이 때 각 방위각 별로 테이블을 기울여 Roll, Pitch 자세 변화를 주어 3축의 지구 자기장 자세변화에 대해서도 정확하게 측정되는지 확인해 보았다.

$$MAG_{reference} = DCM_{body}^{NED} \cdot \begin{bmatrix} 0.29673 \\ -0.040952 \\ 0.41174 \end{bmatrix} \quad (4)$$

한국에서 센서의 X축이 북쪽을 향했을 때 지구 자기장 벡터는 [0.29673 -0.040952 0.41174] [gauss]인 것을 IGRF(International Geomagnetic Reference Field)로부터 확인할 수 있다. 그리고

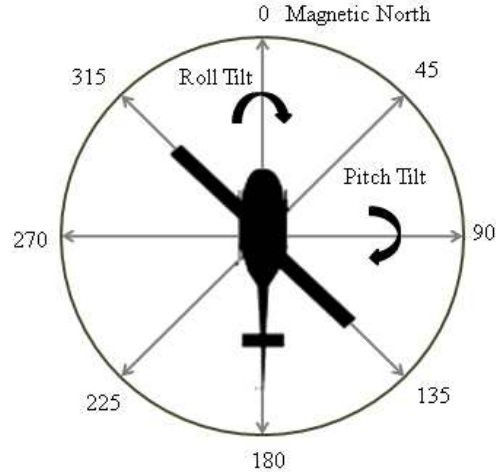


Fig. 8. Rotating table as a calibration method

각 방위각에서의 기준벡터는 오일러 각 변환식에 의해 계산할 수 있다. 그 다음 측정된 데이터와 기준 벡터와의 관계는 최소자승법의 계수로 표현할 수 있다.

Fig. 9는 위에서 계산한 보정계수를 적용한 내부 자장계 방위각 (-180 ~ 180) 시퀀스데이터이다. Fig. 10은 전기모터가 구동 중이라도 외부 자장계와 내부 자장계의 차이가 현저하게 줄어들었음을 보여준다.

2.1.3 비행시험을 이용한 검증

보정실험으로부터 얻어낸 보정계수를 적용한 외부 자장계와 내부 자장계로 실제 비행 중 방위각을 각각 계산하여 보았다. 비행모드는 위치 유지 자동비행으로 이때 방위각은 보정계수가 적용된 외부 자장계를 이용하여 측정하였다. Fig. 11

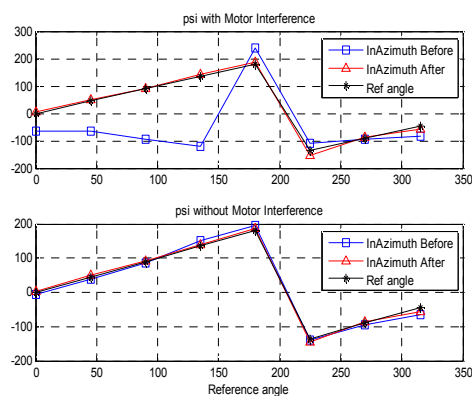


Fig. 9. Inner magnetometer Calibration

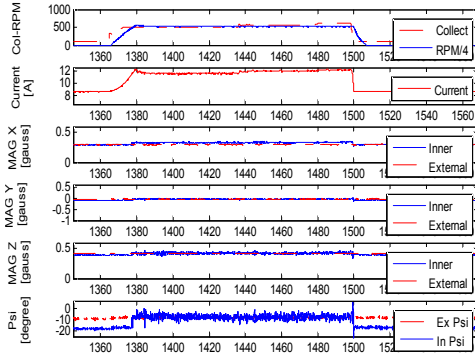


Fig. 10. Inner magnetic data compare with external after calibration

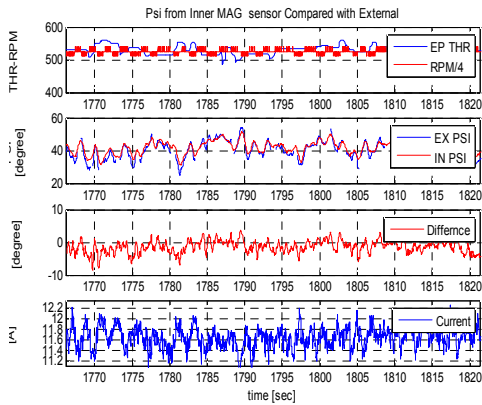


Fig. 11. Psi from Inner magnetometer Compared with External magnetometer

은 비행 중 내부 자장계로부터 산출한 방위각이 외부 자장계에 비해 -7 ~ +7 도 이내의 오차를 가지고 있음을 보여준다. 자장계를 보정하기 전에는 모터 자기장이 최대 100도로 약 30%의 방위각 오차를 가지지만 적용 후에는 최대 1.9% 정도로 오차가 줄었다.

2.2 INS/GNSS/MAG 시뮬레이션

2.2.1 칼만 필터를 이용한 MAG 벡터 통합 INS

Fig. 12는 INS/GNSS/MAG 알고리즘의 블록 다이어그램을 나타내었다. 필터는 LLA, NED 방향의 속도, 오일러 자세, 가속도센서 3축 바이어스, 각속도 센서 3축 바이어스 로 총 15개의 상태변수로 구성되었으며, Psi Angle Equation 알고리즘으로 GNSS나 자장계가 갱신될 때마다 INS를 보상한다. 아래는 칼만 필터에 적용된 INS의 선형 모델이다[1].

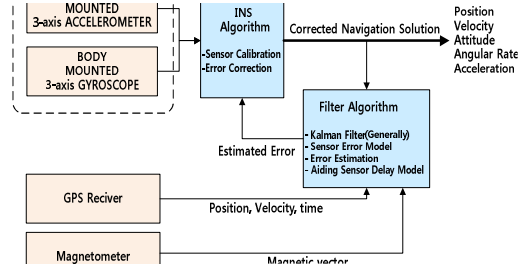


Fig. 12. Schematic diagram of INS/GNSS/MAG

$$\delta \dot{L} = \frac{\partial \dot{L}}{\partial L} \delta L + \frac{\partial \dot{L}}{\partial h} \delta h + \frac{\partial \dot{L}}{\partial v_n} \delta v_n \quad (5)$$

$$\delta \dot{l} = \frac{\partial \dot{l}}{\partial L} \delta L + \frac{\partial \dot{l}}{\partial h} \delta h + \frac{\partial \dot{l}}{\partial v_e} \delta v_e \quad (6)$$

$$\delta \dot{h} = -\delta v_d \quad (7)$$

$$\delta \dot{V}^n = (C_b^n f^b) \times \Psi - (2w_{ie}^n + w_{en}^n) \times \delta V^n + C_b^n \delta f^b + V_n \times (2\delta w_{ie}^n + \delta w_{en}^n) \quad (8)$$

$$\dot{\Psi} = -w_{en}^n \times \Psi - C_b^n \delta w_{ib}^b + \delta w_{en}^n \quad (9)$$

칼만 필터의 측정치는 GNSS와 자장계 정보이다. 두 센서의 데이터가 반드시 동기화되어 출력될 필요가 없기 때문에 각각의 센서가 갱신될 때마다 필터를 통해 추정된 15개 상태변수의 오차를 보상하는 구조로 설계되었다. GNSS는 1 ~ 5 Hz의 주기로 갱신되고 자장계는 50Hz의 주기로 갱신된다. GNSS와 자장계가 동작하지 않으면 보상없이 INS만 동작한다.

동체좌표계와 항법좌표계(NED Frame)와의 비선형 관계 때문에 자장계가 측정한 동체좌표계에서의 자기장 벡터는 아래와 같다.

$$\hat{\eta}^B = T_1(\hat{\phi}) T_2(\hat{\theta}) T_3(\hat{\psi}) \eta^N \quad (10)$$

여기서 $\hat{\phi}$, $\hat{\theta}$ 와 $\hat{\psi}$ 는 추정된 기체의 자세이다. 선형 측정식은 식 (11)와 같이 나타낼 수 있다[1].

$$Z = \hat{\eta}^B - \hat{\eta}_m^B \quad (11)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1(\hat{\phi})}{\partial \hat{\phi}} T_2(\hat{\theta}) T_3(\hat{\psi}) \eta^N \\ T_1(\hat{\phi}) \frac{\partial T_2(\hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}} T_3(\hat{\psi}) \eta^N \\ T_1(\hat{\phi}) T_2(\hat{\theta}) \frac{\partial T_3(\hat{\psi})}{\partial \hat{\psi}} \eta^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_x \\ \psi_y \\ \psi_z \end{bmatrix} + v_{mag}$$

칼만 필터의 측정 상태변수는 INS가 예측한 자기장벡터와 측정된 자장계의 자기장 벡터와의

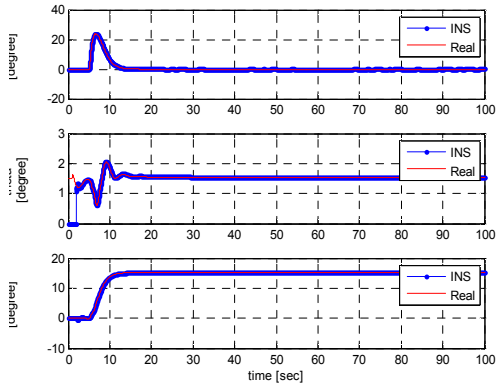


Fig. 13. Estimation Result with IMU/GPS/MAG

차이다.

모터에 의한 자기장 왜곡만을 고려한 비선형 시뮬레이션 결과를 아래 그림에 나타내었다. Fig. 13은 GNSS와 자장계 센서가 정상적으로 갱신되면서 $\hat{\phi}$, $\hat{\theta}$ 와 $\hat{\psi}$ 자세의 추정이 정상적으로 이루어지고 있음을 보여준다. Fig. 14는 IMU와 GNSS, 자장계 센서의 갱신상태와 산출된 $\hat{\psi}$ 를 보여준다.

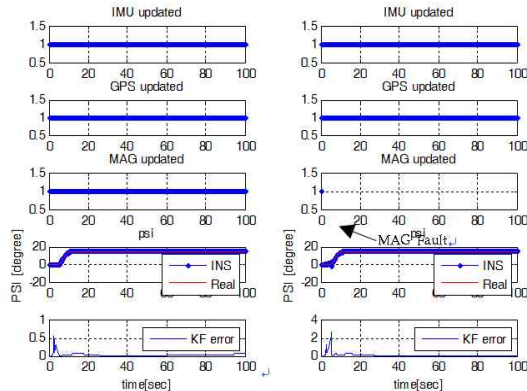
Fig. 14(a), (b), (c), (d)는 각각 자장계와 GNSS가 정상적으로 갱신되는 경우, 자장계 고장인 경우, 자장계와 GNSS 둘 다 고장인 경우, GNSS 고장인 경우의 방위각 추정결과이다. 자장계와 GNSS의 고장으로 INS만으로 자세를 추정할 때 방위각 오차가 발산함을 볼 수 있다. 반면에 Fig. 14(d)의 INS에 자장계만 추가한 경우 방위각 오차는 발산하지 않는다. 이로부터 자장계를 이용하여 INS의 방위각 추정 문제를 충분히 보상할 수 있음을 확인할 수 있다.

III. 결 론

소형의 무인 헬리콥터에서 사용하는 전기모터는 구동 시 큰 자기장을 발생한다. 자장계는 기계의 크기가 작기 때문에 전기모터 가까이에서 장착되므로 전기모터가 발생시키는 자기장을 심각하게 고려하여야 한다.

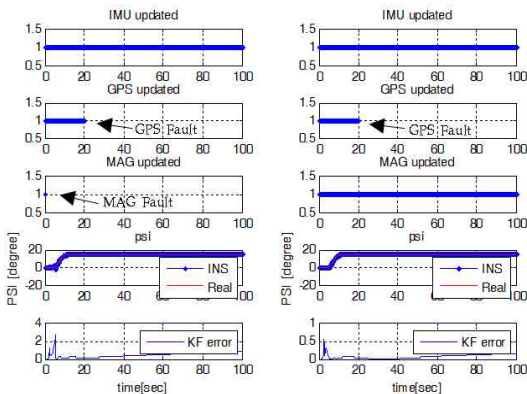
이 논문에서 제안한 모터 자기장 모델 추정 방법과 보정법을 이용하여 자장계가 지구자기장을 측정하는데 불필요한 요소를 효과적으로 제거할 수 있다는 사실을 지상시험과 비행시험을 통해 검증하였다.

또한 INS에 GNSS를 보조센서로 추가하여 칼만 필터를 통해 보상하는 기존의 보편적인 구성



(a) INS/GNSS/MAG

(b) INS/GNSS



(c) GNSS/MAG failed

(d) GNSS failed

Fig. 14. Estimation Result INS/GNSS/MAG

에 자장계를 추가하여 자세를 추정하는 방법을 제안하였고, 비선형 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다.

보다 정밀한 항법을 하기 위해서는 자장계로부터 산출한 방위각 오차를 줄일 필요가 있다. 이를 위해 자기장 모델과 보정방법을 향상 시킬 예정이다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약번호 UD100048JD)

참고문헌

- 1) Se-Ah Jang, "Calibration of Low-Cost Inertial Navigation System Using Sun Line of

Sight Vector", Master's Thesis, Inha University, 2007, pp. 19-39.

2) Hye-Tan Lee, "Calibration of Magnetometer's Hard Iron Distortion Error Using Sun LOS Vector", Master's Thesis, Inha University, 2011, pp. 11-25.

3) Grewal, Mohinder S, Kalman Filtering Theory and Practice Using MATLAB, Wiley, 2001, pp. 169-184.

4) E.H.Shin, "Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Applications", MStHesis, Univ.ofCalgary, 2001, pp. 26-64.