

INS/영상센서 결합 항법시스템 설계

Design of INS/Image Sensor Integrated Navigation System

오 승 진*, 김 우 현, 이 장 규, 이 형 근, 박 찬 국
(Seung Jin Oh, Woo Hyun Kim, Jang Gyu Lee, Hyung Keun Lee, and Chan Gook Park)

Abstract : The errors of INS (Inertial Navigation System) are known to grow in time. To compensate the accumulated errors, measurements of external or onboard sensors are extensively utilized to form an integrated navigation system. Recently, INS/GPS integrated navigation systems have become popular since exact position and velocity information can be utilized by low cost GPS receivers. Unfortunately, this configuration cannot be trusted at all times especially when there are intentional or unexpected jammings and interruptions. To aid INS irrespectively of these cases, an INS/Image sensor integrated navigation system configuration is designed only based on the information of image sensor gimble angles. The performance of the INS/Image sensor integrated navigation system is evaluated by Monte Carlo simulation.

Keywords : integrated navigation, INS, image sensor

I. 서론

관성항법장치는 시간이 지남에 따라 항법오차가 지속적으로 누적되는 특성을 가지고 있기 때문에 장시간의 항법을 위해서는 보조센서의 정보를 이용하여 오차를 보정할 필요가 있다. 따라서 대부분의 관성항법장치는 외부 또는 내부 보조센서의 정보를 이용하여 오차를 보정하는 결합 항법시스템을 사용한다. 이러한 외부 센서에는 무선 항법 조력(radio navigation aids), 인공위성, 별 추적기(star trackers) 등이 있고, 내부 센서로는 고도계, 도플러 레이더, 속도계, 지자기 센서, 레이더 또는 전기광학 영상 시스템(electro-optical imaging system) 등이 있다. 결합 항법시스템은 관성항법시스템의 출력과 보조센서의 측정치(위치, 속도, 자세)를 비교하여 오차를 보정한다[1].

최근에는 전세계 어디서나 위치정보를 제공받을 수 있는 GPS를 이용한 INS/GPS 결합항법시스템이 주를 이루고 있다. 하지만 이러한 GPS 신호를 이용할 경우 문제점은 GPS 신호의 고의적인 차단 또는 교란 그리고 비의도적인 신호두절이 있을 경우 항법성능에 문제가 생기게 된다. 따라서 GPS 이외의 안정적인 보조 정보를 이용하는 항법시스템이 요구되고 있다.

영상센서는 항체와 위치표식과의 시선각 변화율, 피치각과 요각 등의 정보를 제공하며, 영상센서의 종류에 따라 상대속도와 거리정보도 제공될 수 있다[2,3].

이러한 영상센서의 측정치중에 본 논문에서는 각도 정보를 이용하여 관성항법시스템의 항법오차를 보정하는 INS-영상센서 관성항법시스템을 제안한다.

INS/영상센서 결합 항법시스템은 영상센서가 제공하는 2축 김블각 측정치와 알려진 위치표식의 위치정보를 이용하여 항법시스템의 오차 보정을 위한 측정식을 유도하고, 칼만필터를 사용하여 항법 오차를 보정한다. 이러한 항법시스템은 영상센서의 각도 정보를 이용하는 새로운 개념의 결합 항법시스템으로서 추가적인 하드웨어나 비용이 필요없고, 외부 신호 사용의 단점을 해결할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 INS/영상센서 결합 항법시스템의 항법성능을 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

II. INS-영상센서 결합 항법시스템 모델링

1. 관련 좌표계

항체와 영상센서의 관계를 정확히 표현하기 위해 본 논문에서 사용된 좌표계는 표 1과 같다.

영상센서가 위치표식을 발견한 시점에서 각 좌표계간의 관계를 그림 1에서 보여주고 있다. 영상센서좌표계(s-frame)에서 항법좌표계(n-frame)으로의 좌표변환행렬 C_s^n 은 다음과 같이 영상센서좌표계(s-frame)에서 동체좌표계(b-frame)로의 좌표변환행렬 C_s^b 와 동체좌표계(b-frame)에서 항법좌표계(n-frame)로의 좌표변환행렬 C_b^n 으로 분해된다.

표 1. 좌표계 설정.

Table 1. Definitions of coordinate system.

좌표계	실명
i	관성좌표계(inertial coordinate system)
n	항법좌표계(navigation coordinate system) 지역수평(local level) NED 좌표계
b	동체좌표계(body coordinate system) $x_b/y_b/z_b$: 항체의 기수/기수의 우측/수직아래방향 ϕ_b, θ_b, ψ_b : 항체의 롤, 피치, 요 자세
s	영상센서좌표계(image sensor coordinate system) $x_s/y_s/z_s$: 센서지향방향/센서의 우측/센서의 수직아래방향 θ_s, ψ_s : 영상센서 피치, 요 김블 각

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 4. 30., 채택확정 : 2006. 6. 10.

오승진, 김우현, 이장규 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부

(sky2943@snu.ac.kr/whyun77@snu.ac.kr/jgl@snu.ac.kr)

이형근 : 한국항공대학교 전자·정보통신·컴퓨터공학부

(hyknlee@hau.ac.kr)

박찬국 : 서울대학교 기계항공공학부/항공우주신기술연구소

(chanpark@snu.ac.kr)

※ 본 논문은 국방과학연구소 및 서울대학교 자동제어특화 연구센터의 연구비 지원에 의한 연구 결과임.

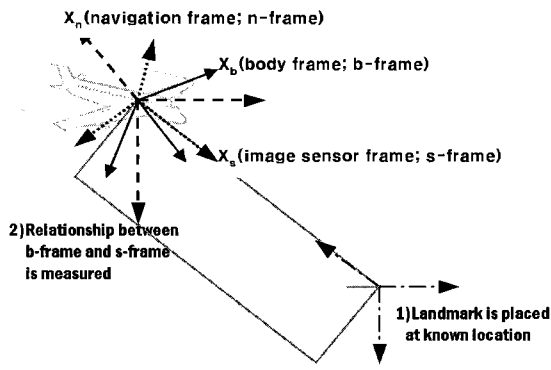


그림 1. 좌표계간의 관계.
Fig. 1. Relation of coordinate systems.

표 2. 각 좌표계간의 오일러각.
Table 2. Euler angle between coordinate systems..

좌표계 변환관계	오일러 각	비 고
n-frame → b-frame	ψ_b, θ_b, ϕ_b	자이로 측정치
b-frame → s-frame	ψ_s, θ_s, θ	영상센서 측정치

$$C_s^n = C_b^n C_s^b \quad (1)$$

각 좌표계간의 변환을 위한 오일러각은 표 2와 같다.

2. 시스템 모델

INS/영상센서 결합항법시스템은 그림 2와 같은 구조를 가지며 칼만필터의 측정치로 영상센서의 내부 알고리즘에 의해 계산된 측정치(피치각, 요각)를 이용한다.

시스템 오차모델과 오차 상태변수는 (2),(3)과 같다.

$$\delta \dot{x}(t) = F(t) \delta x(t) + G(t)w(t), \quad w(t) \sim N(0, Q)$$

$$= \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 2} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & F_{24} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 2} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & 0_{3 \times 3} & F_{35} & 0_{3 \times 2} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 2} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 2} \\ 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix} \delta x(t) + \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -C_s^n \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} \end{bmatrix} w(t) \quad (2)$$

$$\delta x = [\delta L \quad \delta l \quad \delta h \quad \delta V_N \quad \delta V_E \quad \delta V_D \quad \delta \alpha \quad \delta \beta \quad \delta \gamma \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \phi_y \quad \phi_z]^T \quad (3)$$

여기서, $[\delta \alpha \quad \delta \beta \quad \delta \gamma]^T$: 항체의 자세오차

$[\phi_y \quad \phi_z]^T$: 영상센서의 측정각 오차

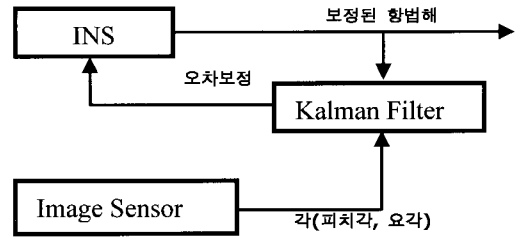


그림 2. INS/영상센서 결합시스템 구조.
Fig. 2. Configuration of INS / Image sensor integrated system.

(2)에서 F행렬의 15×15행렬은 [4]의 위치, 속도, 자세오차와 가속도, 자이로 바이어스로 되어 있는 관성항법시스템 오차모델과 같다.

3. 측정식 유도

관성항법시스템의 오차보정에 사용되는 측정치는 일반적으로 위치 및 속도와 같이 항법필터의 상태변수를 직접 측정하는 측정치와 관성항법시스템의 추정된 정보를 비교하여 얻어진다. 그 예로 INS/GPS 약결합 시스템을 들수 있는데 GPS를 이용하여 측정된 위치 또는 속도를 관성항법시스템의 위치 또는 속도와 비교하여 오차를 보정하는 방식을 사용하는 것이 일반적이다[5].

반면, 영상센서의 김블각 측정치는 관성항법시스템이 추정하는 동체좌표계와 항법좌표계사이의 자세를 직접 측정하는 것이 아니므로 위에서 설명한 방법으로는 측정식을 유도할 수 없다. 따라서 이를 해결하기위해 항체로부터 위치표식까지의 단위시선벡터 e^n 을 사용한다. 즉, e^n 을 동일한 정보로 설정하고 측정치와 상태변수를 활용한 두 개의 식을 유도한 후 이를 차분하여 관성항법시스템 오차 상태변수에 대한 관계식을 얻는다. 이때 단위시선벡터를 계산하기 위한 한 개의 식은 영상센서 김블각과 관성항법시스템이 추정한 자세정보로부터 유도하고, 나머지 한 개의 식은 위치표식의 알려진 좌표값과 관성항법시스템이 추정한 위치정보를 이용한다. 이때 추정된 두개의 단위시선벡터를 차분하여 다음과 같이 관성항법시스템의 위치오차를 추출할 수 있는 간접 측정식을 얻는다.

$$Z = \widehat{e_{landmark}^n} - \widehat{e_{gimbal}^n}$$

$$= [e_{landmark}^n + \delta e_{landmark}^n] - [e_{gimbal}^n + \delta e_{gimbal}^n]$$

$$= \delta e_{landmark}^n - \delta e_{gimbal}^n \quad (4)$$

$$= [H1_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad H3_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad H6_{3 \times 2}] \delta x + v$$

$$v \sim N(0, R)$$

여기서, e_{gimbal}^n : 영상센서 측정치와 항체의 자세로부터 유도한 단위시선벡터

$e_{landmark}^n$: 위치표식과 항체의 위치로부터 유도한 단위시선벡터

3.1 $\widehat{e_{gimbal}^n}$ 유도

먼저, 영상센서 김블각과 관성항법시스템이 추정한 자세정보로부터 단위 시선 벡터를 추정하기 위해서는 (1)을 활용한다. 이에 의하면 영상센서 김블각을 활용한 시선각 벡터는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\widehat{e}_{gimbal}^n = \widehat{C}_s^n [1 \ 0 \ 0]^T \tag{5}$$

$$\widehat{C}_s^n = \widehat{C}_b^n \widetilde{C}_s^b \tag{6}$$

여기서, $\widehat{C}_b^n = C_b^n (I - \Phi)$

$$\widetilde{C}_s^b = C_s^b (I - E)$$

Φ : 항체 자세오차로 구성된 왜대칭행렬

E : 영상센서 김블각 측정오차로 구성된 왜대칭행렬

여기에서 영상센서좌표계로부터 항법좌표계로의 추정된 좌표변환행렬 \widehat{C}_s^n 은 (6)에 의하여 다음과 같은 오차 요인을 포함한다.

$$\widehat{C}_s^n = C_s^n + \delta C_s^n$$

$$\delta C_s^n = \widehat{C}_s^n - C_s^n = C_b^n C_s^b (I - E) - C_b^n \Phi C_s^b (I - E) - C_b^n C_s^b \tag{7}$$

$$\delta C_s^n = -\widehat{C}_s^n E - \widehat{C}_b^n \Phi \widetilde{C}_s^b$$

(5), (7)을 활용하여 영상센서 김블각을 활용한 시선각 벡터의 측정치 \widehat{e}_{gimbal}^n 에 포함된 오차성분을 추출하면 다음과 같이 정리된다.

$$\widehat{e}_{gimbal}^n = e_{gimbal}^n + \delta e_{gimbal}^n$$

$$\delta e_{gimbal}^n = \delta C_s^n [1 \ 0 \ 0]^T$$

$$= -[H_{3 \times 3} \mid H_{6 \times 2}] [\delta\alpha \ \delta\beta \ \delta\gamma \mid \phi_y \ \phi_z]^T$$

$$H_3 = \begin{bmatrix} [\cos\phi_b \sin\theta_b \cos\psi_b + \sin\phi_b \sin\psi_b] & -[\cos\theta_b \cos\psi_b][\sin\theta_s] & [\sin\phi_b \sin\theta_b \cos\psi_b - \cos\phi_b \sin\psi_b] \\ [\cos\theta_s \sin\psi_s] & +[\cos\phi_b \sin\theta_b \cos\psi_b] & [\cos\theta_s \cos\psi_s] \\ +[\sin\phi_b \sin\theta_b \cos\psi_b - \cos\phi_b \sin\psi_b][\sin\theta_s] & +[\sin\phi_b \sin\psi_b][\cos\theta_s \cos\psi_s] & -[\cos\theta_b \cos\psi_b][\cos\theta_s \sin\psi_s] \end{bmatrix}$$

$$H_3 = \begin{bmatrix} [\cos\phi_b \sin\theta_b \sin\psi_b - \sin\phi_b \cos\psi_b] & -[\cos\theta_b \sin\psi_b][\sin\theta_s] & [\sin\phi_b \sin\theta_b \sin\psi_b + \cos\phi_b \cos\psi_b] \\ [\cos\theta_s \sin\psi_s] & +[\cos\phi_b \sin\theta_b \sin\psi_b - \sin\phi_b \cos\psi_b] & [\cos\theta_s \cos\psi_s] \\ +[\sin\phi_b \sin\theta_b \sin\psi_b + \cos\phi_b \cos\psi_b][\sin\theta_s] & -[\cos\theta_s \cos\psi_s] & -[\cos\theta_b \sin\psi_b][\cos\theta_s \sin\psi_s] \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} [\cos\phi_b \cos\theta_b][\cos\theta_s \sin\psi_s] & [\sin\theta_b][\sin\theta_s] & [\sin\phi_b \cos\theta_b][\cos\theta_s \cos\psi_s] \\ +[\sin\phi_b \cos\theta_b][\sin\theta_s] & -[\cos\phi_b \cos\theta_b][\cos\theta_s \cos\psi_s] & +[\sin\theta_b][\cos\theta_s \sin\psi_s] \end{bmatrix}$$

$$H_6 = \begin{bmatrix} \left(\begin{array}{l} [\cos\theta_b \cos\psi_b][\sin\theta_s \cos\psi_s] \\ - +[\sin\phi_b \sin\theta_b \cos\psi_b - \cos\phi_b \sin\psi_b][\sin\theta_s \sin\psi_s] \\ +[\cos\phi_b \sin\theta_b \cos\psi_b + \sin\phi_b \sin\psi_b][\cos\theta_s] \end{array} \right) & \left(\begin{array}{l} [\cos\theta_b \cos\psi_b][-\sin\psi_s] \\ +[\sin\phi_b \sin\theta_b \cos\psi_b - \cos\phi_b \sin\psi_b] \\ [\cos\psi_s] \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{l} [\cos\theta_b \sin\psi_b][\sin\theta_s \cos\psi_s] \\ - +[\sin\phi_b \sin\theta_b \sin\psi_b + \cos\phi_b \cos\psi_b][\sin\theta_s \sin\psi_s] \\ +[\cos\phi_b \sin\theta_b \sin\psi_b - \sin\phi_b \cos\psi_b][\cos\theta_s] \end{array} \right) & \left(\begin{array}{l} [\cos\theta_b \sin\psi_b][-\sin\psi_s] \\ +[\sin\phi_b \sin\theta_b \sin\psi_b + \cos\phi_b \cos\psi_b] \\ [\cos\psi_s] \end{array} \right) \\ - \left(\begin{array}{l} [-\sin\theta_b][\sin\theta_s \cos\psi_s] + [\sin\phi_b \cos\theta_b][\sin\theta_s \sin\psi_s] \\ +[\cos\phi_b \cos\theta_b][\cos\theta_s] \end{array} \right) & \left(\begin{array}{l} [\sin\theta_b][\sin\psi_s] + [\sin\phi_b \cos\theta_b][\cos\psi_s] \end{array} \right) \end{bmatrix}$$

3.2 $\widehat{e}_{landmark}^n$ 유도

영상센서가 탐색 후 올바른 위치표식을 인식한 위치표식은 연속적으로 추적된다. 이때 영상센서 좌표계의 X-축 방향은 항체로부터 위치가 알려진 위치표식 좌표로부터의 시선각 방향과 일치한다[6].

알려진 위치표식의 좌표와 항체의 위치를 각각 L, l, h (위도, 경도, 고도)로 나타내면 이들로부터 시선각 방향 단위 벡터 e^n 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e^n = D^n \left(\|D^n\| \right)^{-1} \tag{9}$$

$$D^n = T_L^n \Delta L \tag{10}$$

$$\Delta L = [L \ l \ h]_{landmark}^T - [L \ l \ h]_{vehicle}^T \tag{11}$$

$$T_L^n = \begin{bmatrix} R_m + h & 0 & 0 \\ 0 & (R_t + h) \cos L & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

여기서, L : 위도, l : 경도, h : 고도

R_m : 지구(earth)의 meridian 반경

R_t : 지구의 tangential 반경

위의 (10)은 항법좌표계의 NED성분으로 나타낸 위치표식과 항체의 위치 차분을, (11)은 위도, 경도, 고도 성분으로 표현된 위치표식과 항체의 위치차분을, (12)는 위치 차분을 위도, 경도, 고도성분에서 NED성분으로 변환시켜주는 변환행렬이다.

(8)

항체의 위치는 항법시스템 필터의 추정대상이 된다. 따라서, (11)에서 정확한 항체의 위치(위도,경도,고도)값을 관성항법시스템이 추정한 위치(위도,경도,고도)값으로 대체하면 다음과 같이 추정된 시선각 방향 단위 벡터 $\widehat{e}_{landmark}^n$ 를 얻을 수 있다.

$$\widehat{e}_{landmark}^n = \widehat{D}^n \left(\left\| \widehat{D}^n \right\| \right)^{-1} \quad (13)$$

$$\widehat{D}^n = T_L^n \widehat{\Delta L} \quad (14)$$

$$\widehat{\Delta L} = [L \ l \ h]_{landmark}^T - [\hat{L} \ \hat{l} \ \hat{h}]_{INS}^T \quad (15)$$

(14)에 의하면 항법 좌표계에서 (X,Y,Z) 성분으로 나타낸 위치표식과 항체의 위치차분 추정치 \widehat{D}^n 은 관성항법시스템이 추정한 위치(위도, 경도, 고도)오차 성분과 다음의 관계식을 만족한다.

$$\widehat{D}^n = T_L^n \widehat{\Delta L} = T_L^n \left([L \ l \ h]_{landmark}^T - [\hat{L} \ \hat{l} \ \hat{h}]_{INS}^T \right) \quad (16)$$

$$= T_L^n \Delta L - T_L^n [\delta L \ \delta l \ \delta h]_{INS}^T$$

$$\widehat{D}^n = D^n + \delta D^n \quad (17)$$

$$\delta D^n = -T_L^n [\delta L \ \delta l \ \delta h]_{INS}^T \quad (18)$$

$$[\delta L \ \delta l \ \delta h]_{INS}^T = [\hat{L} \ \hat{l} \ \hat{h}]_{INS}^T - [L \ l \ h]_{vehicle}^T \quad (19)$$

또한, (9)과 (13)에 대하여 섭동법을 활용하면, 시선각 방향 단위 벡터의 추정치 $\widehat{e}_{landmark}^n$ 은 다음과 같이 위치차분 추정오차 δD^n 에 의하여 다음과 같은 오차성분을 포함함을 알 수 있다.

$$\widehat{e}_{landmark}^n = e_{landmark}^n + \delta e_{landmark}^n \quad (20)$$

$$\widehat{e}_{landmark}^n = \frac{\widehat{D}^n}{\left\| \widehat{D}^n \right\|} = \frac{D^n}{\left\| D^n \right\|} + \frac{\partial}{\partial D^n} \left(\frac{\widehat{D}^n}{\left\| \widehat{D}^n \right\|} \right) \delta D^n + H.O.T. \quad (21)$$

(21)에서 고차항을 무시하면, $\delta e_{landmark}^n$ 은 다음과 같다.

$$\delta e_{landmark}^n = \frac{\partial}{\partial D^n} \left(\frac{\widehat{D}^n}{\left\| \widehat{D}^n \right\|} \right) \delta D^n \quad (22)$$

여기서,

$$\frac{\partial}{\partial D^n} \left(\frac{\widehat{D}^n}{\left\| \widehat{D}^n \right\|} \right) = \frac{\partial}{\partial D^n} \left(\frac{D^n + \delta D^n}{\left\| D^n \right\|} \right)$$

$$= \left(I + \frac{\partial}{\partial D^n} \delta D^n \right) \left(\left\| \widehat{D}^n \right\| \right)^{-1} - \left(D^n + \delta D^n \right) \frac{\partial}{\partial D^n} \left(\left\| \widehat{D}^n \right\| \right) \left(\left\| \widehat{D}^n \right\|^2 \right)^{-1}$$

$$= \left[I \left\| \widehat{D}^n \right\| - \widehat{D}^n \frac{1}{\left\| \widehat{D}^n \right\|} \widehat{D}^n{}^T \right] \left(\left\| \widehat{D}^n \right\|^2 \right)^{-1} = I_{3 \times 3} \frac{1}{\left\| \widehat{D}^n \right\|} - \frac{\widehat{D}^n \widehat{D}^n{}^T}{\left\| \widehat{D}^n \right\|^3}$$

$$\delta e_{landmark}^n = \left(I_{3 \times 3} \left(\left\| \widehat{D}^n \right\| \right)^{-1} - \widehat{D}^n \widehat{D}^n{}^T \left(\left\| \widehat{D}^n \right\|^3 \right)^{-1} \right) \delta D^n \quad (23)$$

$$= [H]_{1 \times 3} [\delta L \ \delta l \ \delta h]_{INS}^T$$

(23)와 같이 $\delta e_{landmark}^n$ 는 $\delta L, \delta l, \delta h$ 에 대해서 나타낼 수 있다.

III. 시뮬레이션

먼저, 시뮬레이션을 위해 항체가 지구 평면상에서 수평하게 운항한다고 가정하고 선형 직선 궤적, S형 궤적을 기준궤적으로 생성한다. 이때 관성항법시스템의 사양은 중급을 기준으로 하며 세부적인 센서 정보와 초기오차는 표 (3), (4)와 같다.

INS-영상센서 결합 항법시스템에 대해 생성한 궤적을 이용, 각각 100회 시뮬레이션을 실시하였으며 결과는 다음과 같다.

표 3. 항법시스템 및 영상센서 사양.

Table 3. Spec of navigation sensors and image sensor.

오차 요소		표준편차	단위
가속도계	환산계수오차	200	ppm
	비정렬오차	10	arcsec
	백색잡음오차	5	μg
	랜덤바이어스오차	100	μg
자이로	환산계수오차	20	ppm
	비정렬오차	10	arcsec
	백색잡음오차	0.01	deg/hr
	랜덤바이어스오차	0.01	deg/hr
영상센서	환산계수오차	0.04	deg
	백색잡음오차	0.17	deg

표 4. 초기 오차.

Table 4. Initial error.

오차 요소	오차값	단위	비고	
초기 위치 오차	위도(L)	40/R ₀	rad	R ₀ : 지구 반경
	경도(l)	40/R ₀	rad	
	고도(h)	40	meter	
초기 속도 오차	N방향	10	m/sec	
	E방향	10	m/sec	
	D방향	10	m/sec	
초기 자세 오차	롤(roll)	1	deg	
	피치(pitch)	1	deg	
	요(yaw)	5	deg	

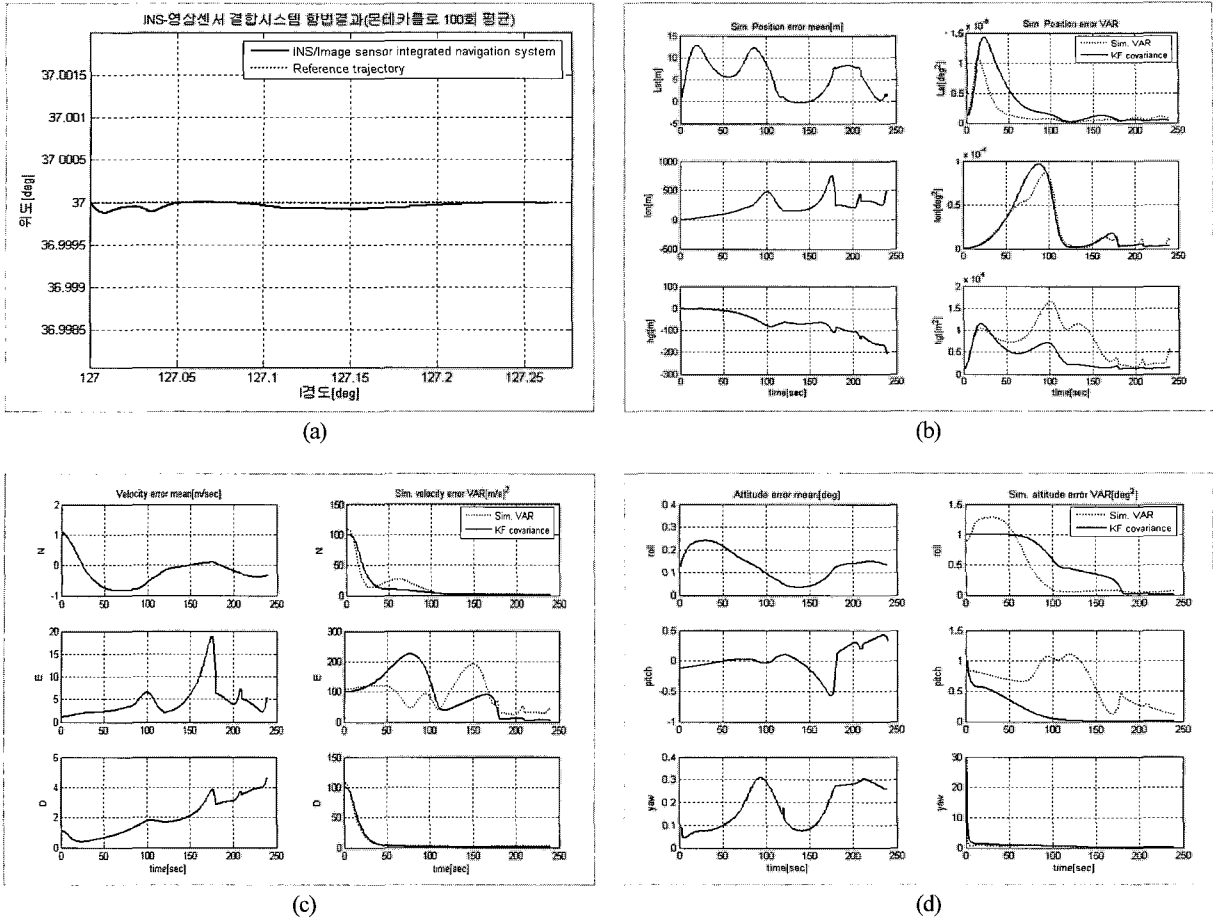


그림 3. (a) INS-영상센서 결합시스템 직선궤적 항법결과 (b) 위치오차평균/필터공분산 및 오차분산 (c) 속도 오차평균/필터공분산 및 오차분산 (d) 자세 오차평균/필터공분산 및 오차분산.

Fig. 3. (a) Result of INS-Imaging sensor integrated system(linear trajectory) (b) Position error mean/filter covariance and error variance (c) Velocity error mean/filter covariance and error variance (d) Attitude error mean/filter covariance and error variance.

1. 직선 궤적

직선궤적에서는 동쪽 방향으로 240초의 비행시간중 120초 동안은 등속으로, 그 이후에는 가속도 $2m/s^2$ 로 등가속운동을 하였다. 그림 3(a)에서 볼수 있듯이, INS-영상센서 결합 항법 시스템은 위치오차가 위도 13m 이내, 경도 약 750m 이내, 고도 200m 이내를 보이고 있다. 그림 3(b), (c), (d)는 위치, 속도, 자세에 대한 240초 동안 각각의 오차 평균값과 칼만필터의 공분산과 오차 분산을 보여주고 있다. 이 그래프는 경도 방향의 위치와 속도 그리고 자세중 피치값에 대한 오차가 다른 것에 비해서 크고, 필터 공분산과 에러 분산이 다소 흐트러진 모양을 보이지만 전체적으로 안정된 결과를 보이고 있다.

2. S형 궤적

S형궤적은 총비행시간 240초 동안 그림 4-1의 기준궤적을 따라 등속으로 수평 비행을 실시한다. S형궤적에서는 직선궤적보다 적은 오차를 보여주고 있다. 즉, 위치오차를 보면 위도방향 최대 약 100m, 경도방향 최대 약 400m, 고도축 최대 약 100m의 오차를 보이고 있다.

그림 4-2, 4-3, 4-4에서 각각 좌측은 오차평균을, 우측 그래프는 칼만필터 공분산과 오차분산을 위치, 속도, 자세에 대해 보여주고 있다. S형 궤적에서의 결과는 전체적으로 직선궤적

보다 좋은 결과를 나타내고 있다. 각각의 오차도 0 주위의 값을 보이고 있고, 칼만필터 공분산과 오차 분산이 모두 비슷한 경향을 보이고 있어 안정된 시스템임을 나타내주고 있다. 여기서 위와 같이 곡선비행이 직선비행보다 항법성능이

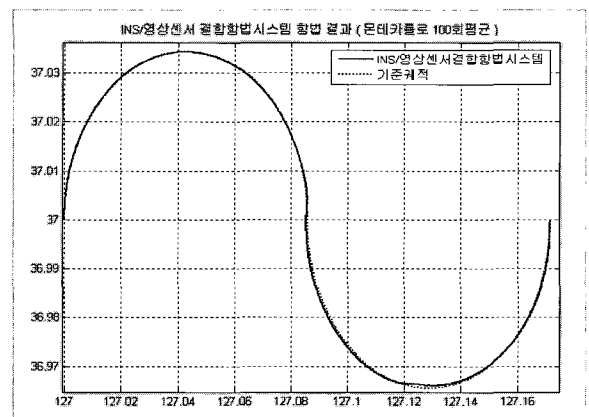


그림 4-1. INS-영상센서 결합시스템 S형궤적 항법결과.

Fig. 4-1. Result of INS-Imaging sensor integrated system(S-shaped trajectory).

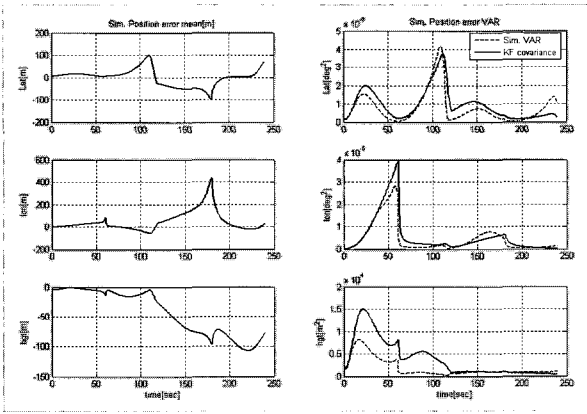


그림 4.2. 위치오차평균/필터공분산 및 오차분산.
Fig. 4-2. Position error mean/filter covariance and error variance.

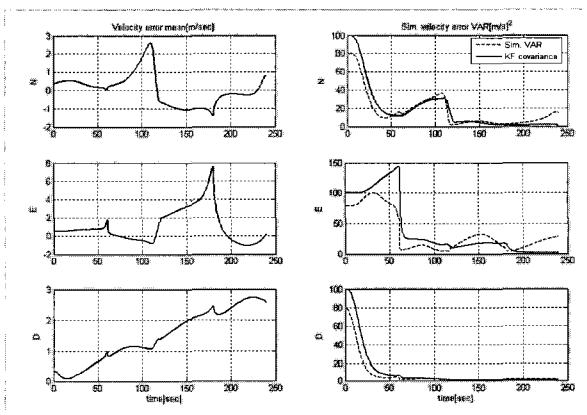


그림 4.3. 속도 오차평균/필터공분산 및 오차분산.
Fig. 4-3. Velocity error mean/filter covariance and error variance.

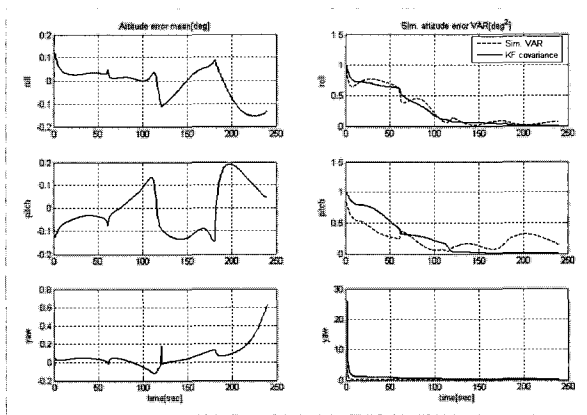


그림 4.4. 자세 오차평균/필터공분산 및 오차분산.
Fig. 4-4. Attitude error mean/filter covariance and error variance.

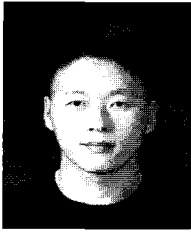
좋은 이유는 다음과 같다. 직선궤적은 자세변화가 거의 없고 시스템 입력가속도 값이 일정한 반면, S형 궤적은 지속적인 자세 변화 및 입력 가속도 변화가 이루어져 측정값과 각 상태변수 사이의 연관관계가 증대된다. 따라서 S형 궤적이 직선궤적에 비해 항법 오차보정에 보다 유리하기 때문이다[7,8]

IV. 결론

본 논문에서는 영상센서의 각도에 대한 정보를 이용하여 위치, 속도 등을 포함한 항법정보를 개선시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 즉, 2축 김블 영상센서의 김블각(피치각, 요각) 정보를 이용하여 INS-영상센서 결합항법시스템을 모델링하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 항법 성능 검증을 위해 직선궤적과 S형 궤적에 대해 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과 직선궤적과 S형궤적 모두 안정적인 항법성능을 보였고 직선궤적보다는 S형궤적이 가관측성의 증가로 인하여 더 좋은 항법성능을 보였다.

참고문헌

- [1] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, Peter Peregrinus Ltd., pp. 363-382, 1997.
- [2] B. Ekstrand, "Tracking filters and models for seeker applications," *IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, pp. 965-977, 2001.
- [3] G. M. Siouris, *Missile Guidance and Control Systems*, Springer, pp. 102-103, 2004.
- [4] 박영범, "INS/GPS/속도계 결합항법시스템의 구성 및 성능분석," 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 석사학위 논문, pp. 30-36, 2001.
- [5] "GPS를 이용한 수직채널 안정화 및 운항중 정렬 기법 연구 최종보고서," 국방과학연구소, 연구기관:서울대학교, 2004.
- [6] W.-S. Ra, I.-H. Whang, and J.-Y. Ahn, "Robust horizontal line-of-sight rate estimator for sea skimming anti-ship missile with two-axis gimballed seeker" *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, vol. 152, 2005.
- [7] 박준구, "스트랩다운 관성항법 시스템의 운항중 정렬을 위한 궤적에 따른 가관측성 분석," 서울대 전기컴퓨터 공학부 박사학위 논문, pp. 40-61, 1996.
- [8] D. Goshen-Meskin and I. Y. Bar-Itzhack, "Observability analysis of piece-wise constant systems," *IEEE*, vol. 28, no. 4, pp. 1056-1075, 1992.



오 승 진

1975년 11월 10일생. 1998년 육군사관학교 전자공학과 졸업. 2005년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사과정 재학중. 연구 관심분야는 관성항법시스템.



김 우 현

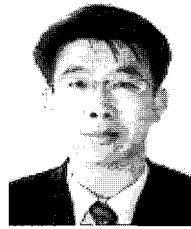
1977년 7월 12일생. 2000년 공군사관학교 물리학과 졸업. 2006년 서울대학교 대학원 졸업(석사). 2006년~현재 공군작전사령부. 관심분야는 관성항법시스템.



이 장 규

1946년 3월 28일생. 1971년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 Univ. of Pittsburgh 전기공학과 졸업(석사). 1977년 Univ. of Pittsburgh 전기공학과 졸업(공학박사). 1977년~1981년 The Analytic Sciences Corporation 연구원(Technical

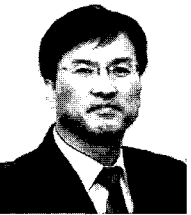
Staff). 1981년~1982년 Charles Stark Draper Laboratory 연구원(Technical Staff). 1982년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수. 1994년~현재 서울대 자동제어특화연구센터 소장. 연구 관심분야는 추정이론, 관성항법 센서 및 시스템, GPS, 무선측위 시스템.



이 형 근

1990년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1994년 동 대학원 석사. 1994년~1998년 현대우주항공(주). 2002년 동 대학원 박사. 2003년 9월~현재 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 조교수. 관심분야는 항법 및 측위 시스템, 검출

및 추정이론, LBS, ITS.



박 찬 국

1961년 9월 13일생. 1985년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박사). 1993년 서울대학교 제어계측신기술연구센터 Post Doc. 1994년~2002년 광운대학교 정보제어공학과 조

교수/부교수. 1998년 미국 UCLA 기계항공공학과 방문연구원. 1994년~2003년 서울대학교 자동제어특화연구센터 책임연구원. 2003년~현재 서울대학교 기계항공공학부 부교수/교수. 연구 관심분야는 INS/GPS 결합 알고리즘, MEMS IMU 응용 시스템 개발, 영상항법시스템, USN을 이용한 Ubiquitous Positioning, 필터링기법.