

논문 2004-41SC-1-1

GPS/INS 통합시스템의 측정치 시간지연오차 보상 (Measurement Delay Error Compensation for GPS/INS Integrated System)

유 준*, 임 유 철**

(Joon Lyou and You-Chol Lim)

요 약

INS는 위치, 속도 및 자세정보를 고속으로 제공하며 스스로 항법정보를 제공하는 장점이 있으나 오차가 시간에 따라 증가하는 단점이 있다. 반면에 GPS는 데이터를 저속으로 제공하며 재밍(Jamming)에 영향을 쉽게 받으나 오차가 시간에 상관없이 일정하다는 장점이 있다. 따라서 상호보완적인 특성을 가지는 INS와 GPS를 통합하였을 때 더욱더 정확한 항법해를 제공할 수 있다. 그러나 INS와 GPS를 통합하는 과정에서 INS정보와 GPS정보의 정확한 시각적 동기가 어려우며, 시각적 비동기에 의한 오차는 일정한 측정오차를 유발하며 고속으로 운항하는 경우에는 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구는 GPS/INS 통합항법 시스템에서 측정치 시간지연에 의해 유발되는 오차를 효과적으로 줄이기 위해 바이어스 분리형 칼만필터를 이용한 시간지연 오차 보상기법을 강결합 방식과 약결합 방식에 대하여 각각 제안하였다. 각각의 통합모델에서 위치와 속도보정의 측정방정식을 지연시간에 관하여 선형화하였고 지연 상태변수를 기존의 선형 오차방정식에 추가하고 바이어스 분리형 칼만필터를 적용하여 시간지연을 초기에 추정하여 보상하도록 구성하였으며 시뮬레이션을 통하여 성능을 검증하였다.

Abstract

The INS(Inertial Navigation System) provides high rate position, velocity and attitude data with good short-term stability while the GPS(Global Position System) provides position and velocity data with long-term stability. By integrating the INS with GPS, a navigation system can be achieved to provide highly accurate navigation performance. For the best performance, time synchronization of GPS and INS data is very important in GPS/INS integrated system. But, it is impossible to synchronize them exactly due to the communication and computation time-delay. In this paper, to reduce the error caused by the measurement time-delay in GPS/INS integrated systems, error compensation methods using separate bias Kalman filter are suggested for both the loosely-coupled and the tightly-coupled GPS/INS integration systems. Linearized error models for the position and velocity matching GPS/INS integrated systems are first derived by linearizing with respect to its time-delay and augmenting the delay-state into the conventional state equations for each case. And then separate bias Kalman filter is introduced to estimate the time-delay during only initial navigation stage. The simulation results show that the present method is effective enough resulting in considerably less position error.

Keywords: GPS, INS, Delay Error, Bias, Kalman Filter

I. 서 론

INS는 외부장치의 도움 없이 수 Hz부터 수백 kHz의 높은 데이터 전송률로 비교적 정확한 항체의 위치, 속

도 및 자세 정보를 제공하지만, 가속도를 적분하여 사용하기 때문에 시간이 지남에 따라 오차가 증가하는 단점이 있다. 반면 GPS는 오차의 누적이나 증가가 없어 장시간 동안 안정도를 가진다는 장점이 있으나, 수 Hz대의 낮은 데이터 전송률을 가지므로 항공기와 같이 빠른 동특성을 가지는 환경하에서는 독립적으로 사용하기 어려우며, 환경이나 전파 방해 등에 의해 영향을 받는 단점이 있다. 그러므로 INS와 GPS를 결합하는

* 정희원, 충남대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Eng. Chungnam National Univ.)

** 정희원, 한국항공우주연구원
(Korea Aerospace Research Institute)

접수일자 : 2003년3월19일, 수정완료일 : 2003년12월26일

통합항법시스템으로 서로의 장단점을 보완해서 더욱더 정확한 항법해를 얻을 수 있다. GPS/INS 통합시스템은 GPS 수신기에서 추정된 위치와 속도 정보를 이용하는 약결합 방식(Loosely coupled approach)과 GPS의 의사거리와 의사거리 변화율을 이용하는 강결합 방식(Tightly coupled approach)이 있다. 강결합 방식은 약결합 방식보다 정확한 항법해를 얻을 수 있지만 구현이 복잡하다는 단점이 있다.^[1]

GPS/INS 통합시스템은 칼만필터를 이용하여 GPS 데이터의 출력주기에 맞추어 INS 오차를 추정 보상하므로 GPS와 INS가 동일한 시간에 측정되어야 한다. 그러나 GPS의 항법데이터는 수신기에서 계산되어진 후, 직렬통신 등을 이용하여 항법컴퓨터로 전송되므로 계산지연과 전송지연이 발생한다. 따라서 이와 같은 통합항법시스템의 실시간 구현에 있어서 GPS 측정치가 INS 정보에 정확한 시각동기가 이루어 제공되지 않게 되고 결국 일정한 측정오차를 가지게 되어 고속으로 운항하는 경우에는 큰 오차를 유발하게 된다.

GPS 측정치의 시간지연이 GPS/INS 통합항법시스템의 성능에 미치는 영향은 최근에 몇몇 논문^[2,3,4]을 통해 소개되었으며 약결합 방식에 국한하여 외삽법을 이용한 측정치 시간지연의 영향을 보상하는 방법^[3]도 언급되었다. 하지만 시간지연을 계산하는 과정에 시간지연에 의한 측정오차를 알아야 하는데 이는 현실적으로 계산하기 어려워 적용하는데 어려움이 있다.

이에 본 연구는 GPS/INS 통합항법 시스템에서 측정치 시간지연에 의해 유발되는 오차를 효과적으로 줄이기 위해 바이어스 분리형 칼만필터를 이용한 시간지연 오차 보상기법을 강결합 방식과 약결합 방식에 대하여 각각 제안한다. 우선 각각의 통합모델에서 위치와 속도 보정의 측정방정식을 지연시간에 관하여 선형화 하여 지연 상태변수를 기존의 선형 오차방정식에 추가하고 바이어스 분리형 칼만필터를 적용하여 시간지연을 초기에 추정하여 보상하도록 구성한다. 그리고 성능검증을 위해 시뮬레이션을 수행한다.

II. 칼만필터 모델

그림 1은 각각 약결합 방식과 강결합 방식의 GPS/INS 통합시스템 구조를 보여준다.^[5] 약결합 방식은 GPS 수신기가 제공하는 위치, 속도 정보와 INS의 위치, 속도 정보를 결합하여 오차보정 칼만필터의 측정

치로 사용하며, 강결합 방식은 GPS의 의사거리와 의사거리 변화율 정보를 측정치로 사용한다.

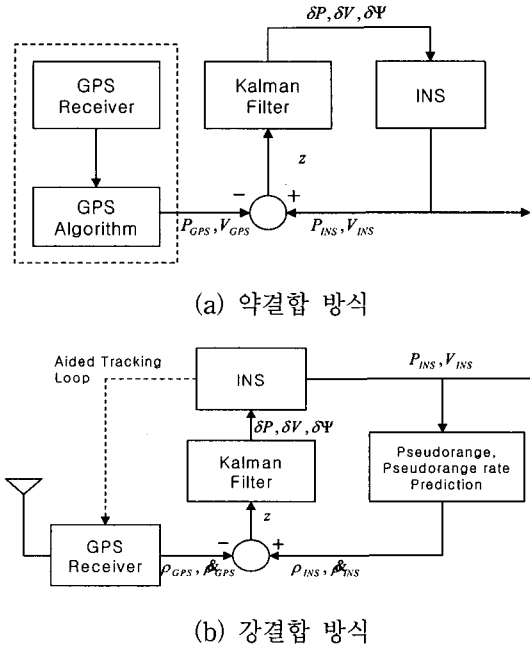


그림 1. GPS/INS 통합시스템 구조
Fig. 1. Structure of GPS/INS integration system

칼만필터 모델로는 psi angle 방식을 이용한 INS 오차모델을 사용하였으며, 위치, 속도 및 자세에 대한 오차방정식은 다음과 같다.

$$\delta R^n = -\hat{\omega}_{en}^n \times \delta R^n + \delta V^n \tag{1}$$

$$\delta V^n = \Omega_s \delta R^n - (2\hat{\omega}_{in}^n + \hat{\omega}_{en}^n) \times \delta V^n - \delta \phi^n \times f^n + \mathcal{C}_b^n \delta f^b \tag{2}$$

$$\delta \phi^n = -\hat{\omega}_{in}^n \times \delta \phi^n - \mathcal{C}_b^n \delta \omega^b \tag{3}$$

여기서 δR , δV , $\delta \phi$ 은 각각 위치오차, 속도오차, 자세오차를 나타내며, $\hat{\omega}_{ie}^n$, $\hat{\omega}_{en}^n$, $\hat{\omega}_{in}^n$ 은 각각 계산된 지구자전각속도, 지구고정좌표계에 대한 항법좌표계의 각속도, 관성좌표계에 대한 항법좌표계의 각속도를 의미하며, δf^n , $\delta \omega^n$ 은 각각 가속도계와 자이로의 오차성분을 나타낸다. 그리고 Ω_s 는 $diag(\Omega_s) = [\omega_s, \omega_s, 2\omega_s]$ 인 대각 행렬이며 ω_s 는 슬러주파수를 의미한다.

오차모델을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

- 약결합방식 칼만필터 모델 :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{nav} \\ \dot{x}_{sensor} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ 0_{6 \times 9} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{nav} \\ x_{sensor} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{nav} \\ w_{sensor} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$z = [H_{loose} \ 0_{6 \times 6}] \begin{bmatrix} x_{nav} \\ x_{sensor} \end{bmatrix} + v \quad (5)$$

• 강결합방식 칼만필터 모델 :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{nav} \\ \dot{x}_{sensor} \\ \dot{x}_{clock} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0_{9 \times 2} \\ 0_{6 \times 9} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 2} \\ 0_{2 \times 9} & 0_{2 \times 6} & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{nav} \\ x_{sensor} \\ x_{clock} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{nav} \\ w_{sensor} \\ w_{clock} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$z_i = [H_{tight} \ 0_{2 \times 6} \ I_{2 \times 2}] \begin{bmatrix} x_{nav} \\ x_{sensor} \\ x_{clock} \end{bmatrix} + v_i \quad (7)$$

$$x_{nav} = [\delta R_N \ \delta R_E \ \delta R_D \ \delta V_N \ \delta V_E \ \delta V_D \ \delta \psi_N \ \delta \psi_E \ \delta \psi_D]^T \quad (8)$$

$$x_{sensor} = [\delta f_x \ \delta f_y \ \delta f_z \ \delta \omega_x \ \delta \omega_y \ \delta \omega_z]^T \quad (9)$$

$$x_{clock} = [\delta b_c \ \delta d_c]^T \quad (10)$$

$$F_{12} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ \mathcal{C}_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -\mathcal{C}_b^n \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$H_{loose} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$H_{tight} = \begin{bmatrix} -I_i^T & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} & -I_i^T & 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$l_i = \begin{bmatrix} \frac{x_i - \hat{x}_u}{\sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2}} \\ \frac{y_i - \hat{y}_u}{\sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2}} \\ \frac{z_i - \hat{z}_u}{\sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

III. 시간지연 상태병합

시간지연이 측정치에 미치는 영향을 줄이기 위해 시간지연 상태병합을 통한 보상방법을 제안한다. 먼저 시간지연 Δ 를 상태변수로 도입하기 위해 다음과 같은 가정을 설정한다.

[가정 1] Δ 동안 항체 속도변화는 무시할 만큼 작다.

[가정 2] Δ 의 크기변화는 없다.

$$z(t_k) = \begin{bmatrix} P_{INS}(t_k) - P_{GPS}(t_k - \Delta) \\ V_{INS}(t_k) - V_{GPS}(t_k - \Delta) \end{bmatrix} \quad (16)$$

(16)의 $P_{INS}(t_k)$ 와 $V_{INS}(t_k)$ 은 [가정 1]에 의해 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$P_{INS}(t_k) = P_{INS}(t_k - \Delta) + P_{INS}(t_k)\Delta \quad (17)$$

$$V_{INS}(t_k) = V_{INS}(t_k - \Delta) + V_{INS}(t_k)\Delta \quad (18)$$

3.1. 약결합 방식의 시간지연 상태병합

약결합 방식에서 시간지연을 상태병합하기 위해 Δ 만큼 지연된 GPS의 위치, 속도정보를 고려하여 칼만필터의 잔여치를 표현하면 아래와 같다.

따라서 다시 (17)과 (18)을 (16)에 대입정리하면 약결합 방식의 경우 Δ 에 관한 선형화된 측정방정식이 아래와 같이 간단하게 유도된다.

$$F_{11} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{v_E \tan L}{R_i + h} & \frac{v_N}{R_m + h} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_E \tan L}{R_i + h} & 0 & \frac{v_E}{R_i + h} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_N}{R_m + h} & -\frac{v_E}{R_i + h} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{g_n}{R_0 + h} & 0 & 0 & 0 & -2\Omega \sin L - \frac{v_E \tan L}{R_i + h} & \frac{v_N}{R_m + h} & 0 & -f_D & f_E \\ 0 & \frac{g_n}{R_0 + h} & 0 & 2\Omega \sin L + \frac{v_E \tan L}{R_i + h} & 0 & 2\Omega \cos L + \frac{v_E}{R_i + h} & f_D & 0 & -f_N \\ 0 & 0 & \frac{2g_n}{R_0 + h} & -\frac{v_N}{R_m + h} & -2\Omega \cos L - \frac{v_E}{R_i + h} & 0 & -f_E & f_N & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega \sin L - \frac{v_E \tan L}{R_i + h} & \frac{v_N}{R_m + h} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Omega \sin L + \frac{v_E \tan L}{R_i + h} & 0 & \Omega \cos L + \frac{v_E}{R_i + h} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{v_N}{R_m + h} & -\Omega \cos L - \frac{v_E}{R_i + h} & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$z = [H_{loose} \ 0_{6 \times 6} \ D_{loose}] \begin{bmatrix} x_{nav} \\ x_{sensor} \\ \Delta \end{bmatrix} + v \quad (19)$$

여기서

$$D_{loose} = \begin{bmatrix} V_{INS} \\ V_{INS} \end{bmatrix} \quad (20)$$

3.2. 강결합 방식의 시간지연 상태병합

강결합 방식의 시간지연 상태병합의 경우는 약결합 방식의 경우와 달리 측정방정식이 Δ 에 대해 비선형 특성을 갖고 있어 상대적으로 선형화 과정이 복잡하다. 우선 Δ 만큼 지연된 GPS의 의사거리, 의사거리변화율 정보를 고려하여 칼만필터의 잔여치를 표현하면 다음과 같다.

$$z_i(t_k) = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_{i,INS}(t_k) - \rho_{i,GPS}(t_k - \Delta) \\ \hat{\rho}_{i,INS}(t_k) - \rho_{i,GPS}(t_k - \Delta) \end{bmatrix} \quad (21)$$

(21)에서 $\hat{\rho}_{i,INS}(t_k)$ 는 위성의 위치정보와 INS의 위치 정보를 이용하여 (22)와 같이 계산된다.

$$\hat{\rho}_{i,INS}(t_k) = \sqrt{\frac{(x_i - \hat{x}_{u,t_k})^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k})^2}{(x_i - \hat{x}_{u,t_k})^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k})^2 + (z_i - \hat{z}_{u,t_k})^2}} + c\tau \quad (22)$$

따라서 (22)의 $\hat{\rho}_{i,INS}$ 를 GPS의 측정시간으로 맞추기 위해 우선 [가정 1]을 이용하여 t_k 에서 INS 위치정보를 $t_k - \Delta$ 에서 위치정보에 Δ 동안의 위치변화량의 합으로 표현한다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_{u,t_k} &= \hat{x}_{u,t_k - \Delta} + \hat{x}_{u,t_k} \Delta \\ \hat{y}_{u,t_k} &= \hat{y}_{u,t_k - \Delta} + \hat{y}_{u,t_k} \Delta \\ \hat{z}_{u,t_k} &= \hat{z}_{u,t_k - \Delta} + \hat{z}_{u,t_k} \Delta \end{aligned} \quad (23)$$

그리고 (23)을 (22)에 대입하여 정리한 후

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_{i,INS}(t_k) &= \sqrt{\frac{(x_i - \hat{x}_{u,t_k - \Delta} - \hat{x}_{u,t_k} \Delta)^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k - \Delta} - \hat{y}_{u,t_k} \Delta)^2 + (z_i - \hat{z}_{u,t_k - \Delta} - \hat{z}_{u,t_k} \Delta)^2}{(x_i - \hat{x}_{u,t_k - \Delta} - \hat{x}_{u,t_k} \Delta)^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k - \Delta} - \hat{y}_{u,t_k} \Delta)^2 + (z_i - \hat{z}_{u,t_k - \Delta} - \hat{z}_{u,t_k} \Delta)^2}} + c\tau \\ &\approx \sqrt{\frac{(x_i - \hat{x}_{u,t_k - \Delta})^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k - \Delta})^2 + (z_i - \hat{z}_{u,t_k - \Delta})^2 - 2(x_i - \hat{x}_{u,t_k}) \hat{x}_{u,t_k} \Delta - 2(y_i - \hat{y}_{u,t_k}) \hat{y}_{u,t_k} \Delta - 2(z_i - \hat{z}_{u,t_k}) \hat{z}_{u,t_k} \Delta}{(x_i - \hat{x}_{u,t_k - \Delta})^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k - \Delta})^2 + (z_i - \hat{z}_{u,t_k - \Delta})^2}} + c\tau \quad \Delta = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

테일러급수(Taylor series)를 이용하여 (24)의 제곱근항을 전개하여 근사화하면 $\hat{\rho}_{i,INS}(t_k)$ 를 $\hat{\rho}_{i,INS}(t_k - \Delta)$ 와 Δ 에 의한 영향의 합으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_{i,INS}(t_k) &\approx \sqrt{\frac{(x_i - \hat{x}_{u,t_k - \Delta})^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k - \Delta})^2 + (z_i - \hat{z}_{u,t_k - \Delta})^2}{(x_i - \hat{x}_{u,t_k - \Delta})^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k - \Delta})^2 + (z_i - \hat{z}_{u,t_k - \Delta})^2}} + c\tau \\ &+ \frac{(x_i - \hat{x}_{u,t_k}) \hat{x}_{u,t_k} + (y_i - \hat{y}_{u,t_k}) \hat{y}_{u,t_k} + (z_i - \hat{z}_{u,t_k}) \hat{z}_{u,t_k}}{\sqrt{(x_i - \hat{x}_{u,t_k})^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k})^2 + (z_i - \hat{z}_{u,t_k})^2}} \Delta \\ &= \hat{\rho}_{i,INS}(t_k - \Delta) + \\ &\frac{(x_i - \hat{x}_{u,t_k}) \hat{x}_{u,t_k} + (y_i - \hat{y}_{u,t_k}) \hat{y}_{u,t_k} + (z_i - \hat{z}_{u,t_k}) \hat{z}_{u,t_k}}{\sqrt{(x_i - \hat{x}_{u,t_k})^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k})^2 + (z_i - \hat{z}_{u,t_k})^2}} \Delta \end{aligned} \quad (25)$$

동일한 방법으로 의사거리변화율 $\hat{\rho}_{i,INS}(t_k)$ 도 Δ 에 관하여 선형화하여 전개하면

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_{i,INS}(t_k) &\approx \hat{\rho}_{i,INS}(t_k - \Delta) \\ &+ \frac{(x_i - \hat{x}_{u,t_k}) \hat{x}_{u,t_k} + (y_i - \hat{y}_{u,t_k}) \hat{y}_{u,t_k} + (z_i - \hat{z}_{u,t_k}) \hat{z}_{u,t_k}}{\sqrt{(x_i - \hat{x}_{u,t_k})^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k})^2 + (z_i - \hat{z}_{u,t_k})^2}} \Delta \end{aligned} \quad (26)$$

최종 시간지연이 선형화되어 병합된 강결합 방식의 측정방정식은 다음과 같다.

$$z_i = [H_{tight} \ 0_{2 \times 6} \ I_{2 \times 2} \ D_{tight}] \begin{bmatrix} x_{nav} \\ x_{sensor} \\ x_{clock} \\ \Delta \end{bmatrix} + v_i \quad (27)$$

여기서

$$D_{tight} = \begin{bmatrix} \frac{(x_i - \hat{x}_{u,t_k}) \hat{x}_{u,t_k} + (y_i - \hat{y}_{u,t_k}) \hat{y}_{u,t_k} + (z_i - \hat{z}_{u,t_k}) \hat{z}_{u,t_k}}{\sqrt{(x_i - \hat{x}_{u,t_k})^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k})^2 + (z_i - \hat{z}_{u,t_k})^2}} \\ \frac{(x_i - \hat{x}_{u,t_k}) \hat{x}_{u,t_k} + (y_i - \hat{y}_{u,t_k}) \hat{y}_{u,t_k} + (z_i - \hat{z}_{u,t_k}) \hat{z}_{u,t_k}}{\sqrt{(x_i - \hat{x}_{u,t_k})^2 + (y_i - \hat{y}_{u,t_k})^2 + (z_i - \hat{z}_{u,t_k})^2}} \end{bmatrix} \quad (28)$$

따라서 측정방정식 (19), (27)과 함께 Δ 를 [가정 2]에 의해 (29)와 같이 랜덤상수로 표현하고, (4), (6)에 병합하면 최종 시간지연이 상태병합된 약결합과 강결합 방식의 칼만필터 모델을 얻을 수 있다.

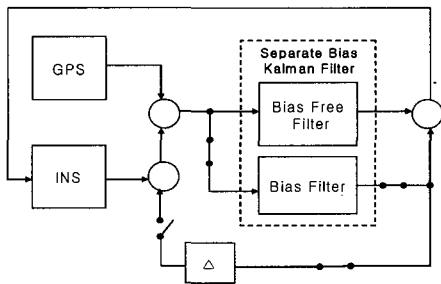
IV. 바이어스 분리형 칼만필터 적용

최종 시간지연이 병합된 모델은 (30), (31)과 같고 시간지연오차를 효과적으로 보상하기 위해 Δ 가 칼만필터를 통해 잘 추정되어야 한다.

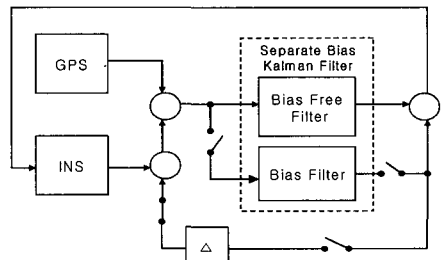
$$\begin{bmatrix} x_k \\ \Delta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_k & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ \Delta_{k-1} \end{bmatrix} + w_k \quad (30)$$

$$z_k = [H_k \ D_k] \begin{bmatrix} x_k \\ \Delta_k \end{bmatrix} + v_k \quad (31)$$

따라서 Δ 에 대한 가관측성을 판별해야한다. 그런데 (30), (31)은 시변 시스템이므로 가관측성 분석이 용이하지 않으나, 최근 INS와 같은 시변시스템에 대한 가관측성 분석기법으로 많이 이용되는 PWCS (piece-wise constant system)기법^[8]을 지연상태 가관측성에 분석에 적용한 결과 항체의 가속이 존재하는 경우 Δ 가 추정가능함을 확인하였다. 일반적으로 초기 운항시 가속이 존재하므로 초기에 Δ 가 추정가능하며, [가정 2]에 의해 Δ 가 쉽게 변하지 않는다는 사실을 바탕으로 본 연구에서 2단 칼만필터 구조인 바이어스 분리형 칼만필터^[6,7]를 적용하여 시간지연을 바이어스 필터를 이용하여 추정 보상하는 기법을 제안한다. 그림 2는 바이어스 분리형 칼만필터를 이용한 시간지연오차보상의 개념을 보여준다.



(a) 시간지연 Δ 추정 전



(b) 시간지연 Δ 추정 후

그림 2. 바이어스 분리형 칼만필터를 이용한 시간지연 보상 개념도

Fig. 2. Delay-error compensation scheme using the separate bias Kalman filter

가속이 존재하는 초기 운항시간 동안 그림 2-(a)에서 보듯이 Δ 는 바이어스 필터에 의해 추정된다. 그리고 나서 항체가 순항시 그림 2-(b)와 같이 스위칭됨으로써 추정된 시간지연 Δ 는 시간지연오차 보상에 이용된다. 여기서 사용된 바이어스 분리형 칼만필터 관계식은 다음과 같다.

• Bias Free Filter

$$\tilde{x}_k^- = F_k \tilde{x}_{k-1} \quad (32)$$

$$P_x^-(k) = F_k P_x(k-1) F_k^T + Q_x(k) \quad (33)$$

$$K_x(k) = P_x^-(k) H_k^T [H_k P_x^-(k) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (34)$$

$$P_x(k) = [I - K_x(k) H_k] P_x^-(k) \quad (35)$$

$$\tilde{x}_k = \tilde{x}_k^- + K(k) [z_k - H_k \tilde{x}_k^-] \quad (36)$$

• Bias Filter

$$\mathcal{Z}_k^- = \mathcal{Z}_{k-1} \quad (37)$$

$$P_\Delta^-(k) = P_\Delta(k-1) + Q_\Delta(k) \quad (38)$$

$$K_\Delta(k) = P_\Delta^-(k) S_k^T [S_k P_\Delta^-(k) S_k^T + H_k P_x^-(k) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (39)$$

$$P_\Delta(k) = [I - K_\Delta(k) S_k] P_\Delta^-(k) \quad (40)$$

$$\mathcal{Z}_k = \mathcal{Z}_k^- + K_\Delta(k) [z_k - H_k \tilde{x}_k^- - S_k \mathcal{Z}_k^-] \quad (41)$$

$$U_k = F_k V_{k-1} \quad (42)$$

$$S_k = H_k U_k + D_k \quad (43)$$

$$V_k = U_k - K_x(k) S_k \quad (44)$$

V. 시뮬레이션 결과

본 연구에 제안한 보상기법의 성능 검증을 위해 GPS/INS 통합시스템의 전산 시뮬레이션을 그림 3과 같이 구성하였다.

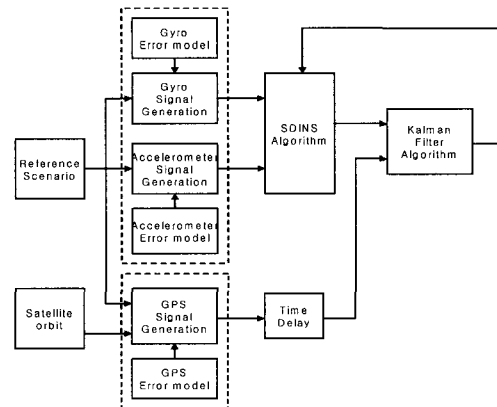


그림 3. 전산 시뮬레이션 구성도
Fig. 3. Computer Simulation Diagram

시물레이션에 사용된 INS와 GPS의 사양은 표 1과 같고 총 운항 시간은 2000초이며 180초에서 200초 사이에 170m/sec로 속도가 증가하는 비행체로 가정하였다. 그리고 운항 궤적은 그림 4와 같다. 일반적으로 9600bps의 비동기통신으로 구성된 GPS/INS 통합시스템에서 시간지연은 대략 0.3초 정도 발생할 수 있는 것으로 알려져 있어 본 연구에서도 시간지연을 0.3초로 가정하였다.

표 1. 센서오차 사양
Table 1. Specification of sensor error elements

	오차요인	크기 (1σ)
INS	initial position error	40 m
	initial velocity error	1 m/sec
	initial horizontal attitude error	1 mrad
	initial vertical attitude error	5 mrad
	accelerometer bias	1000 μg
	accelerometer noise	10 μg sec ^{1/2}
	gyro bias	1 deg/hr
	gyro noise	0.001 deg/hr ^{1/2}
	scale factor error	200 ppm
	GPS	clock bias
clock bias noise		100 m
clock drift		1 m/sec
clock drift noise		0.1 m/sec
pseudorange error		10 m
scale factor error		200 ppm

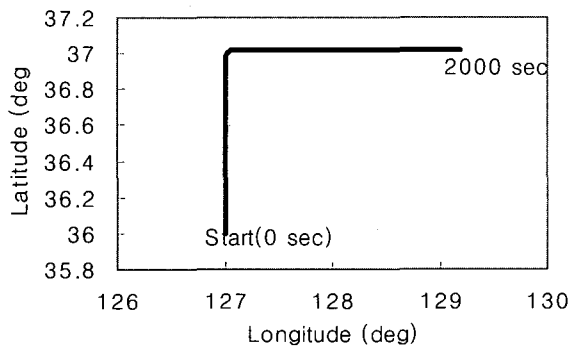
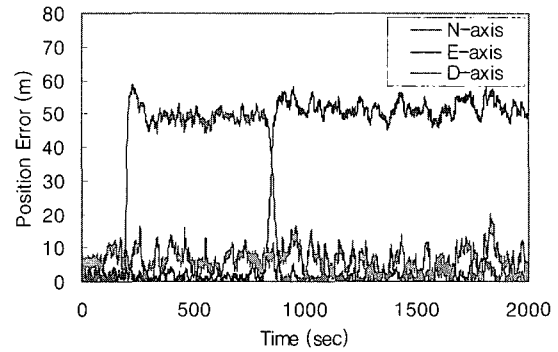


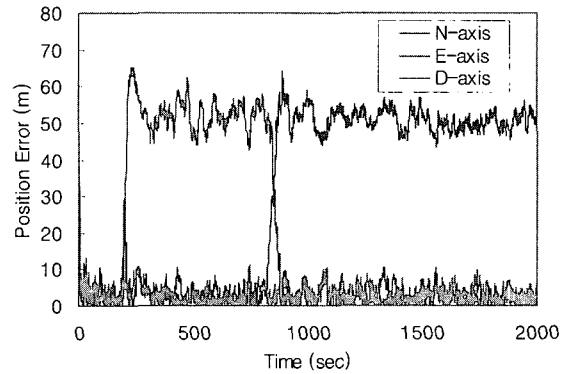
그림 4. 운항 궤적
Fig. 4. Vehicle Trajectory

그림 5는 보상 전의 결과로 0.3초의 시간지연에 의한 위치오차를 보여준다. 약결합 방식과 강결합 방식 모두 유사한 결과를 보이는데, 그림 4와 같은 운항 궤적에

의해 초기에 N축의 위치오차가 유발되다가 800초에 선회하는 지점에서 E축의 위치오차가 발생함을 확인할 수 있다.



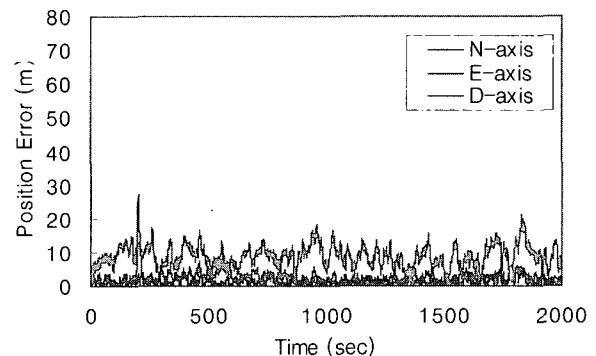
(a) 약결합 방식



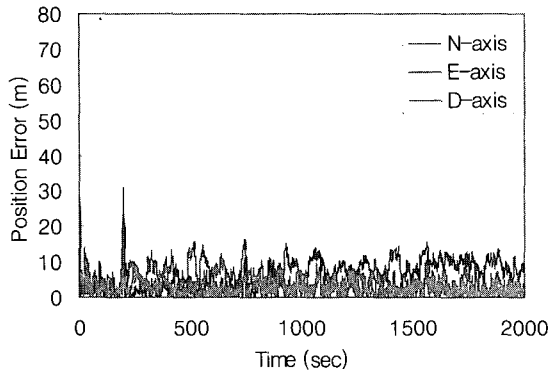
(b) 강결합 방식

그림 5. 보상전 통합시스템의 위치오차
Fig. 5. Position error of the integration system without compensation

그림 6은 동일한 조건에서 본 연구에서 제안한 보상 기법을 적용한 것으로 그림 5와 비교하여 시간지연에 의한 오차가 효과적으로 배제되었음을 알 수 있다.



(a) 약결합 방식



(b) 강결합 방식

그림 6. 보상후 통합시스템의 위치오차
Fig. 6. Position error of the integration system with compensation

VI. 결론

본 연구는 GPS/INS 통합항법 시스템에서 측정치 시간지연에 의해 유발되는 오차를 효과적으로 줄이기 위해 바이어스 분리형 칼만필터를 이용한 시간지연오차 보상기법을 강결합 방식과 약결합 방식에 대하여 각각 제안하였으며 이 과정에서 각각의 통합모델에서 위치와 속도보정의 측정방정식을 지연시간에 관하여 선형화하고 지연 상태변수를 기존의 선형 오차방정식에 추가하여 시간지연 상태병합 모델을 새롭게 유도하였다. 또한 바이어스 분리형 칼만필터를 적용하여 시간지연을 초기에 추정 보상하도록 구성하였으며 시뮬레이션을 수행하여 제시한 보상기법의 성능을 검증하였다.

참고 문헌

[1] J. Farrell and M. Barth, The Global Positioning System and Inertial Navigation, McGraw-Hill, 1999.
[2] 이형근 외 5명, "시각동기오차가 GPS/SDINS 복합 항법에 미치는 영향", '99 한국자동제어학술회의, pp. C.1-C.4, 1999. 8.

[3] 박찬국 외 2명, "칼만필터를 사용하는 INS/GPS 결합시스템에서 측정치 지연에 의한 오차분석 및 보상" 제어·자동화·시스템 공학회지, 제 6권 제 11호, pp. 1039-1043, 2000.
[4] H. K. Lee and J. G. Lee, " Calibration of Measurement Delay in Global Positioning System /Strapdown Inertial Navigation System", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 25, no. 2, 2002.
[5] 노정호 외 4명, "INS/GPS 결합방식에 따른 성능 분석 및 시험", 2000 한국자동제어학술회의, CD-ROM, 2000. 10.
[6] M. B. Ignagni., "Separate-bias Kalman Estimator with Bias State Noise," IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 35, no. 3, pp.338-341, 1990.
[7] C. S. Hsieh and F. C. Chen., "Optimal Solution of the Two-state Kalman Estimator," IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 44, np. 1, pp. 194-199, 1999.
[8] D. Goshen-Mesckin and I. Y. Bar-Itzhack., "Observability Analysis of Piece-wise Constant System - Part II : Applications," IEEE Trans. on AES., vol. 28, no. 4, pp. 1056-1067, 1992.

기 호 설 명

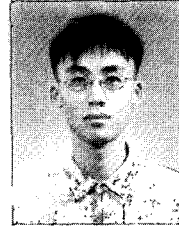
- | | |
|--|----------------------------|
| i : 관성좌표계 | e : 지구고정좌표계 |
| n : 항법좌표계 | δR : 위치오차 |
| δV : 속도오차 | $\delta \psi$: 자세오차 |
| δf^n : 가속도계 오차 | $\delta \omega^n$: 자이로 오차 |
| ω_s : 슬러주파수 | |
| ω_{ie}^n : 관성좌표계에 대한 지구고정좌표계의 각속도 | |
| ω_{en}^n : 지구고정좌표계에 대한 항법좌표계의 각속도 | |
| ω_{in}^n : 관성좌표계에 대한 항법좌표계의 각속도 | |
| Ω : ω 의 왜대칭 행렬 | F : f 의 왜대칭 행렬 |
| $(\hat{\cdot})$: 계산된 값을 표현하는 기호 | |

 저 자 소 개



유 준(정회원)

1978년 서울대 전자공학과 졸업. 한국과학기술원 전기 및 전자공학 박사(1984). 1984년~현재 충남대학교 정보통신공학부 교수. <주관심분야 : 산업 공정에의 제어응용, 센서 신호처리, 식별 및 추정기법, 고장검출 및 진단 등임.> .



임 유 철(정회원)

1998년 충남대 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(2000). 동대학원 박사(2003). 2003년~현재 한국항공우주연구원 선임연구원. <주관심분야 : 강인제어/필터, 추정이론 및 관성항법 장치.>