

# 칼만필터를 사용하는 INS/GPS 결합시스템에서 측정치 지연에 의한 오차 분석 및 보상

## Error Analysis and Compensation of Measurement Delay in INS/GPS Integrated Systems with Kalman Filtering

박찬국, 조성윤, 진용  
(Chan Gook Park, Seong Yun Cho, and Yong Jin)

**Abstract** : In this paper, the error caused by the measurement delay in INS/GPS integrated systems with Kalman filtering is defined and analyzed through the analytical method and the simulation. It is proved that the error of measurement delay causes not only the position error but also the estimate error of the x-axis accelerometer bias when a vehicle turns. And the estimation method of the delay time and the compensation method using an extrapolation method are presented. The performance of the compensation method is shown by the analytic method and the simulation.

**Keywords** : INS/GPS, Kalman filter, x-axis accelerometer bias error, extrapolation

### I. 서론

관성항법장치(INS : Inertial Navigation System)가 제공하는 항법 정보는 짧은 시간 안에는 정확하지만 시간이 지남에 따라 관성센서의 바이어스 오차 및 초기 자세 오차 등이 누적되어 발산하게 된다[2]. 그러므로 관성센서를 단독으로 사용하기 보다 비관성 센서와의 결합을 통하여 오차를 일정 수준으로 유지시켜주는 복합항법시스템을 구성하게 된다. 최근에는 위치와 속도 정보를 제공하는 위성항법 시스템인 GPS(Global Positioning System)를 보조센서로 많이 사용한다. GPS는 이온층, 대류권 지연 및 다중경로 등에 의한 오차를 포함하나 시간에 따라 오차가 발산하지 않는 장점이 있다[3]. 서로 상호 보완적인 특성을 가진 INS와 GPS의 결합을 통하여 항법시스템의 성능을 향상시키기 위한 연구가 많이 진행되어 지고 있다. 여기서 특성이 서로 다른 두 시스템의 결합은 주로 최적의 오차 추정자인 칼만필터(Kalman filter)를 사용한다[4]. INS/GPS 결합시스템에서 칼만필터는 GPS 데이터의 출력 주기에 맞추어 INS 오차를 추정 보상한다. 이때 INS와 GPS의 데이터는 동일시간에 측정되어야 한다. 그러나 GPS의 항법 데이터는 수신기에서 계산되어진 후, 직렬통신 등을 이용하여 항법 컴퓨터로 전송되므로 계산 지연과 전송 지연이 생기게 된다[1][5]. 이러한 지연된 GPS 데이터는 항체가 저속으로 이동할 때는 큰 영향이 없으나 고속으로 운항하는 경우에는 큰 오차를 유발 한다.

본 논문에서는 먼저 GPS 데이터의 지연에 의한 오차를 정의하고, 이 오차에 의하여 INS의 위치 오차와 동체

좌표계의 x축 가속도계 바이어스 추정 오차에 영향을 미치는 것을 해석적인 방법과 시뮬레이션을 통하여 분석한다. 그리고 GPS 데이터의 시간 지연에 의하여 측정치에

나타나는 위치오차는 백색잡음이 아니라 시간적 연계성을 가지고 나타나므로 칼만필터의 측정치 오차 공분산 행렬의 크기 변화만으로는 지연오차를 해결할 수 없음을 증명한다. 오차의 특성을 이용하여 운항초기에 지연 시간을 추정하고, 지연된 GPS 데이터를 외삽법(extrapolation)을 이용하여 보상하는 방법을 제시한다.

### II. 오차 분석

#### 1. 오차 정의

칼만필터를 사용하여 INS와 GPS를 결합하는 경우 일반적으로 INS의 오차를 칼만필터의 상태변수로 하는 간접방식이 사용되며 결합 시스템의 구성은 칼만필터의 구성 방식에 따라 간접 되먹임(indirect feedback) 방식과 간접 앞먹임(indirect feedforward) 방식으로 나뉜다[4]. 본 논문에서는 GPS 데이터 지연 오차의 해석적인 전개와 지연시간의 추정을 위하여 간접 앞먹임 방식을 사용하였다. INS/GPS 결합 시스템의 구성도는 그림 1과 같다. 이때 칼만필터의 측정치는 INS와 GPS의 위치 데이터의 차가 된다.

그림 2에서  $\Delta$ 는 GPS 데이터가 항법컴퓨터에서 사용되기까지 지연된 시간이다. 이상적인 경우는  $\Delta$ 가 0이 되어 (1)과 같이 동기화된 데이터로 측정치를 구성해야 한다.

$$z(t_k) = p_{INS}(t_k) - p_{GPS}(t_k) \quad (1)$$

여기서  $P_{INS}$ 는 INS의 위치정보이고  $P_{GPS}$ 는 GPS의 위치 정보이다. 그러나 INS/GPS 결합의 실제구현에서는 GPS 데이터의 처리 및 항법 컴퓨터로의 전송 등에 의하여  $\Delta$ 가 반드시 존재하게 된다. 이를 다시 설명하면, 그림 2에서  $t_k$ ,  $t_{k1}$ 시점에서 GPS 수신기는 GPS 위성으로부터 데이터를 받는다.  $t_k$ 시점에서 받은 데이터는  $t_{k1} - t_k$  시간동안 항법 정보로 계산된 후,  $t_{k2} - t_{k1}$  시간동안 비동기 직렬통신으로 항법 컴퓨터로 전송된다. 이렇게 전송되어진 GPS의 데이터는  $t_{k2}$ 시점부터 칼만필터의 갱신식을 위한

접수일자 : 2000. 3. 13., 수정완료 : 2000. 6. 20.

박찬국, 조성윤, 진용 : 광운대학교 제어계측공학과

\* 본 논문은 국방과학연구소 및 서울대 자동제어특화연구센터의 연구비 지원에 의한 결과입니다.

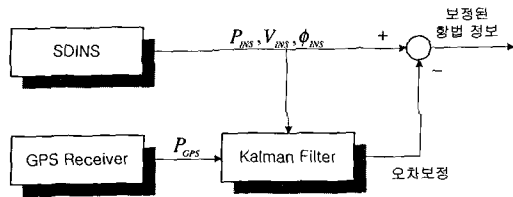


그림 1. INS/GPS 결합 시스템의 구성도.  
Fig. 1. Block diagram of the INS/GPS integrated system.

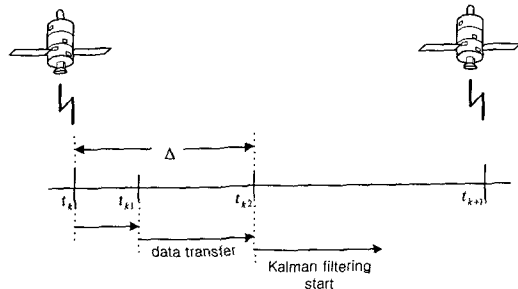


그림 2. INS/GPS 결합 시스템의 타이밍도.  
Fig. 2. Timing of the INS/GPS integrated system.

측정치로 사용된다. 이때 GPS의 데이터는  $t_k$ 시점에서의 데이터이고 INS의 데이터는 지연시간  $\Delta$ 후의  $t_{k2}$ 시점에서의 데이터이다.

따라서 칼만필터의 측정치에 측정치 지연 오차가 포함 되고 측정치 지연이 존재하는 칼만필터의 측정식은 (2)와 같이 정리된다.

$$z(t_{k2}) = P_{INS}(t_{k2}) - P_{GPS}(t_k) \quad (2)$$

여기서  $t_k, t_{k2}$ 는 그림 2에서 정의한 시각이다.

### 2. 오차 분석

GPS 데이터의 지연 오차가 고려된 INS/GPS 결합시스템의 칼만필터 측정식은 (3)과 같이 테일러 급수 전개에 의하여 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} z(t_{k2}) &= P_{INS}(t_{k2}) - P_{GPS}(t_k) \\ &= [P_{TRUE}(t_{k2}) + \delta P_{INS}(t_{k2})] \\ &\quad - [P_{TRUE}(t_k) + \delta P_{GPS}(t_k)] \\ &= \delta P_{INS}(t_{k2}) - \delta P_{GPS}(t_k) \\ &\quad + V_{TRUE}(t_k)\Delta \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $P_{TRUE}$ 는 오차가 없는 실제 위치이며,  $\delta P_{INS}$ 와  $\delta P_{GPS}$ 는 각각 INS의 위치오차와 GPS의 위치오차를 나타낸 것이다. 따라서 GPS 데이터의 시간지연에 의하여 칼만필터의 측정치에  $V_{TRUE}(t_k)\Delta$  만큼의 오차가 포함됨을 알 수 있다.

칼만필터는 연속적인 측정치를 통하여 정상상태(steady state)에 도달하는 특성을 가지고 있다[4]. 칼만필터가 정상상태에 도달한다는 것은 상태변수의 추정치 변화량이 거의 0으로 수렴한다는 것을 의미하며 정상상태에 도달한 칼만필터의 측정치가 0이 되도록 오차가 추정됨을 뜻한다. 그러므로 정상상태에 도달한 후 (3)은 다음과 같이 나타낼

수 있다.

$$\delta P_{INS}(t_{k2}) = \delta P_{GPS}(t_k) - V_{TRUE}(t_k)\Delta \quad (4)$$

이 식은 INS 오차모델과 결합하여 GPS 데이터 지연 오차의 특성을 나타내게 된다. 식의 해석적 전개를 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

가정 1: GPS 측정치 지연오차에 의한 영향만을 분석하기 위하여 GPS 측정치에는 바이어스 오차는 없다고 가정한다. 따라서 (4)는 다음과 같이 된다.

$$\delta P_{INS}(t_{k2}) = -V_{TRUE}(t_k)\Delta \quad (5)$$

가정 2: 오차모델에서 코리올리(coriolis)의 영향은 상대적으로 작으므로 무시한다.

가정 3: 항체는 다음과 같은 원형궤적을 운항한다.

$$\begin{aligned} V^n(t) &= [V_0 \cos \theta(t) \quad V_0 \sin \theta(t) \quad 0]^T \\ f^b &= [0 \quad V_0 \omega_0 \quad -g]^T \\ \omega_{nb}^b &= [0 \quad 0 \quad \omega_0]^T \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\theta$ 는 기수각,  $V_0$ 는 선속도 그리고  $\omega_0$ 는 회전 각속도이며 기수각의 변화율로 나타낸다.

가정 2에 의하여 속도오차모델은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta \dot{V}^n = (C_{nb}^n)^{\phi} \times \phi + C_{nb}^n \nabla \quad (7)$$

그리고 자세오차모델은 (8)과 같다.

$$\dot{\phi} = -\omega_{in}^n \times \phi - C_{bn}^n \epsilon \quad (8)$$

여기서 자세오차를 나타내는  $\phi = [\phi_N \quad \phi_E \quad \phi_D]^T$ 는 실제 좌표계(true frame)에 대한 항법 좌표계(navigation frame)의 미소 비틀림각(tilt angle)을 의미한다. 그리고  $\nabla \equiv [\nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z]^T$ 와  $\epsilon \equiv [\epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \epsilon_z]^T$ 은 각각 동체 좌표계(body frame)에서의 가속도계 바이어스와 자이로 바이어스를 나타내며,  $\omega_{in}^n$ 은 (9)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \omega_{in}^n &= \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n \\ &\equiv [\Omega_N \quad \Omega_E \quad \Omega_D]^T + [\rho_N \quad \rho_E \quad \rho_D]^T \end{aligned} \quad (9)$$

(5)를 시간에 대하여 두 번 미분하여 (7)과 결합하면 다음과 같다.

$$(C_{nb}^n)^{\phi} \times \phi + C_{nb}^n \nabla = -\ddot{V} \Delta \quad (10)$$

이 식은 자세오차모델과 결합하기 위하여 한 번 미분하고 그 식에 (8)을 대입하면 (11)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} (C_{nb}^n)^{\phi} \times \phi + (C_{nb}^n)^{\phi} \times (-\omega_{in}^n \times \phi - C_{bn}^n \epsilon) \\ + C_{nb}^n \nabla = -V^{(3)} \Delta \end{aligned}$$

이 식으로부터 GPS 데이터 지연 오차가 관성센서 바이어스 오차와 자세 오차에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 여기서 GPS 데이터 지연 오차는  $V^{(3)}\Delta$ 만큼의 크기로 항법오차 모델과 결합하는 것을 알 수 있다. 이 경우 (6)과 (9)를 (11)에 대입하고 그 결과를 각각의 오차 항에 영향을 주는 column 단위로 분리하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{array}{c} -g(\Omega_D + \rho_D) + \rho_E V_0 \omega_0 \cos \theta(t) \\ \rho_E V_0 \omega_0 \sin \theta(t) \\ V_0 \omega_0^2 \sin \theta(t) + (\Omega_D + \rho_D) V_0 \omega_0 \sin \theta(t) \end{array} \right] \phi_N \\
 + & \left[ \begin{array}{c} -(\Omega_N + \rho_N) V_0 \omega_0 \cos \theta(t) \\ -g(\Omega_D + \rho_D) - (\Omega_N + \rho_N) V_0 \omega_0 \sin \theta(t) \\ -V_0 \omega_0^2 \cos \theta(t) - (\Omega_D + \rho_D) V_0 \omega_0 \cos \theta(t) \end{array} \right] \phi_E \\
 + & \left[ \begin{array}{c} -V_0 \omega_0^2 \sin \theta(t) + g(\Omega_N + \rho_N) \\ V_0 \omega_0^2 \cos \theta(t) + g \rho_E \\ \rho_E V_0 \omega_0 \cos \theta(t) - (\Omega_N + \rho_N) V_0 \omega_0 \sin \theta(t) \end{array} \right] \phi_D \quad (12) \\
 + & \left[ \begin{array}{c} -g \sin \theta(t) \\ g \cos \theta(t) \\ V_0 \omega_0 \end{array} \right] \varepsilon_x - \omega_0 \left[ \begin{array}{c} \sin \theta(t) \\ -\cos \theta(t) \\ 0 \end{array} \right] (\nabla_x - V_0 \omega_0^2 \Delta) \\
 - & \omega_0 \left[ \begin{array}{c} \cos \theta(t) \\ \sin \theta(t) \\ 0 \end{array} \right] (\nabla_y + \frac{g}{\omega_0} \varepsilon_y + V_0 \varepsilon_z) = 0
 \end{aligned}$$

정의한 원형 궤적을 따라 운항하면서 정상상태에 도달했을 때 궤적의 위치에 관계없이 모든  $\theta(t)$ 에서 (12)가 성립하기 위해서는 다음 식을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned}
 \phi_N &= \phi_E = \phi_D = 0 \\
 \varepsilon_x &= 0 \\
 \nabla_x &= V_0 \omega_0^2 \Delta \\
 \nabla_y + \frac{g}{\omega_0} \varepsilon_y + V_0 \varepsilon_z &= 0
 \end{aligned} \quad (13)$$

위의 결과를 통하여 항체가 회전하는 경우, GPS 데이터 지연 오차는 x축 가속도계 바이어스 오차 추정에 영향을 미침을 알 수 있고, 그 크기는 운항궤적의 선속도와 회전 각속도, 그리고 지연 시간에 따라 달라진다.

3. 시뮬레이션

INS/GPS 결합시스템에서 GPS 데이터 지연에 의한 영향을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. INS 오차모델을 이용하여 시스템을 구성하였으며, 구성된 칼만필터의 상태 변수는 위치, 속도, 자세오차 및 가속도계와 자이로 바이어스 오차의 12차로 구성하였다.

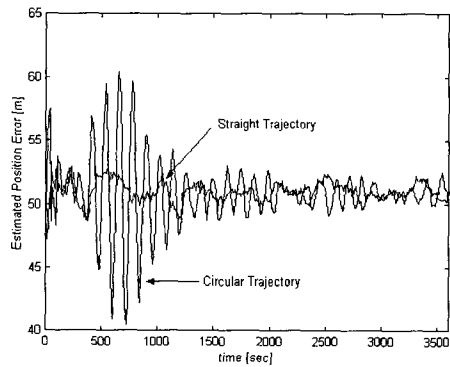
$$\begin{aligned}
 x(t+1) &= F(t)x(t) + w(t), \quad w(t) \sim N(0, Q) \\
 z(t) &= Hx(t) + v(t), \quad v(t) \sim N(0, R) \\
 x &= [\delta P_L \quad \delta P_L \quad \delta V_N \quad \delta V_E \quad \phi_x \quad \phi_y \\
 & \quad \phi_z \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z]^T
 \end{aligned} \quad (14)$$

시뮬레이션에 사용한 IMU는 중급 정도의 성능을 나타내도록 가속도계 바이어스는 1mg, 자이로 바이어스는 1°/h로 가정하여 초기오차 공분산 및 공정잡음, 측정잡음 공분산 행렬은 다음과 같이 설정하였다.

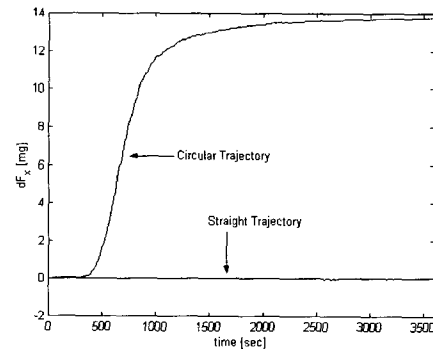
$$\begin{aligned}
 P(0) &= \text{diag}\{(4.5e-3^\circ)^2, (5.6e-3^\circ)^2, \\
 & (1m/s)^2, (1m/s)^2, (1^\circ)^2, (1^\circ)^2, \\
 & (1^\circ)^2, (1mg)^2, (1mg)^2, \\
 & (1^\circ/h)^2, (1^\circ/h)^2, (1^\circ/h)^2\} \\
 Q &= \text{diag}\{0, 0, (100\mu g)^2, (100\mu g)^2, \\
 & (0.1^\circ/h)^2, (0.1^\circ/h)^2, (0.1^\circ/h)^2, \\
 & 0, 0, 0, 0\} \\
 R &= \text{diag}\{(1.35e-4^\circ)^2, (1.69e-4^\circ)^2\}
 \end{aligned}$$

운항 궤적은 성능비교를 위하여 직선 궤적과 원형 궤적을 사용하며 총 운항시간은 3600초이다. 궤적의 선속도는 170[m/s]로 하였으며 원형궤적인 경우 회전 각속도는 3[°/s]로 하였다. 그리고 측정지연 시간은 GPS의 데이터의 전송이 9600bps의 비동기 통신으로 이루어지는 경우 약 0.3초가 된다.

170[m/s]의 선속도로 운항하는 경우 0.3초의 GPS 데이터 지연에 의하여 칼만필터의 추정식은 약 51[m]의 위치 오차를 포함하게 된다. 이 오차는 그림 3(a)에서 알 수 있듯이 INS의 위치오차로 나타나게 된다. 그림 3(b)의 x축 가속도계 바이어스 추정오차는 직선궤적에서는 거의 0으로 나오지만 원형궤적에서는 13.786 [mg]의 크기로 나타남을 알 수 있다. 이것은 항체가 회전을 하는 경우에 GPS 데이터 지연에 의하여 x축 가속도계 바이어스 추정오차에  $V_0 \omega_0^2 \Delta$ 의 크기인 14.252 [mg] 정도의 오차가 나타나는 (13)의 결과와 유사함을 알 수 있다. 표 1에서 항체의 동적 움직임의 변화에 따라 다르게 나타나는 x축 가속도계 바이어스 추정 오차의 해석적인 결과와 시뮬레이션의 결과를 비교하였다. 시뮬레이션에 의한 수치는 3600초간 운항 후 결과를 나타낸 것이다. 표 1에 의하여 해석적인 결과 (13)과 항체의 움직임을 시뮬레이션 한 결과가 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있다.



(a) 위치 오차



(b) x축 가속도계 바이어스 오차

그림 3. 궤적에 따른 칼만필터의 추정 오차.

Fig. 3. Estimation error of the Kalman filter according to trajectory.

III. 오차 보상

INS/GPS 결합시스템에서 GPS 데이터의 지연에 의하여 INS의 위치오차와 x축 가속도계 바이어스 오차 추정에 영향을 미친다. 그리고 GPS 데이터 지연 오차는 높은 정

밀도의 항법 정보를 필요로 하고, 동적 움직임이 큰 시스템일수록 많은 영향을 준다. 따라서 본 논문에서는 오차의 특성을 분석하고 이 특성을 이용하여 지연 시간을 추정한다. 그리고 외삽법(extrapolation)을 이용한 오차 보상 방법을 제시한다.

1. 오차 특성

GPS 데이터 지연에 의하여 먼저 칼만필터의 측정치에 위치오차로 포함된다. 테일러 급수 전개 후 고차항은 작은 값이므로 무시하고 (3)으로부터 다음과 같이 측정치를 나타낼 수 있다.

$$z(t_{k2}) = \delta P_{INS}(t_{k2}) - \delta P_{GPS}(t_k) + V_{TRUE}(t_k)\Delta = Hx(t_{k2}) + v(t_{k2}) \quad (15)$$

여기서 GPS의 오차를 가정 1에 의하여 무시하면 칼만필터의 측정오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(t_{k2}) = V(t_k)\Delta \quad (16)$$

(16)의 양변을 시간에 대하여 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{v}(t_{k2}) = \dot{V}(t_k)\Delta \quad (17)$$

(16)에서  $V(t_k) \in R^{2 \times 1}$ 이므로 지연시간은 다음과 같이 의사역함수(pseudo inverse)를 이용하여 나타낼 수 있다.

표 1. 해석적인 방법과 시뮬레이션의 비교.

Table 1. Comparison between the analytic method and the simulation.

		해석적인 방법	시뮬레이션
I [m/s]	100	8.383	8.228
	170	14.252	13.786
	240	20.121	18.982
II [deg/s]	1	1.583	1.446
	2	6.334	6.160
	3	14.252	13.786
	4	25.338	23.983
	5	39.590	35.908
III [sec]	0.3	14.252	13.786
	0.4	19.003	18.347
	0.5	23.754	22.956

I : 속도에 따른 결과 ( $\omega_0=3$ [deg/s],  $\Delta=0.3$ [sec])

II : 회전각속도에 따른 결과 ( $V_0=170$ [m/s],  $\Delta=0.3$ [sec])

III : 지연시간에 따른 결과 ( $V_0=170$ [m/s],  $\omega_0=3$ [deg/s])

$$\Delta = (V^T(t_k)V(t_k))^{-1}V^T(t_k)v(t_{k2}) \quad (18)$$

(18)를 (17)에 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{v}(t_{k2}) = \dot{V}(t_k)(V^T(t_k)V(t_k))^{-1}V^T(t_k)v(t_{k2}) \equiv \psi(t_{k2})v(t_{k2}) \quad (19)$$

따라서 GPS 측정치 지연에 의한 위치오차는 백색잡음(white noise)이 아니라 시간적 연계성(time correlation)을

가지고 있음을 알 수 있다. 그러므로 이 오차는 단순히 칼만필터의 측정오차로 간주하고 측정오차의 백색잡음 공분산 행렬의 크기를 변화시키는 것으로 해결할 수 없다.

2. 오차 보상

INS/GPS 결합 시스템이 구성되면 GPS 데이터의 지연 시간은 일정하게 유지된다. 지연 시간은 (18)을 통하여 추정할 수 있다. 여기서 칼만필터의 측정오차  $v(t_{k2})$ 는 GPS 데이터의 지연에 의하여 위치 오차로 나타난다. INS는 짧은 시간 안에는 매우 정확한 항법 해를 제공하고, 간접 앞 먹임 방식으로 구성된 칼만필터는 GPS 데이터의 지연에 의한 오차를 그대로 측정오차에 나타내므로 지연 시간은 운항 초기에 추정할 수 있다.

GPS 데이터의 선형 조합을 통하여 측정치의 지연 오차를 보상하는 방법으로  $t_k$  및  $t_{k-1}$ 시점의 GPS 데이터와 추정된 지연 시간을 이용하여  $t_k$ 와  $t_{k2}$ 시점 사이에 발생한 지연 오차를 다음과 같이 보상한다.

$$\hat{P}_{GPS}(t_{k2}) = P_{GPS}(t_k) + \frac{P_{GPS}(t_k) - P_{GPS}(t_{k-1})}{T} \Delta \quad (20)$$

여기서  $T$ 는 GPS 데이터 샘플링 주기를 나타내며 일반적으로 1초가 사용된다. 따라서 (20)은 테일러 급수 전개에 의하여 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{P}_{GPS}(t_{k2}) &= P_{TRUE}(t_k) + \delta P_{GPS}(t_k) \\ &\quad + (P_{TRUE}(t_k) + \delta P_{GPS}(t_k))\Delta \\ &\quad - (P_{TRUE}(t_{k-1}) + \delta P_{GPS}(t_{k-1}))\Delta \\ &= P_{TRUE}(t_k) + \delta P_{GPS}(t_k) \\ &\quad + (V_{TRUE}(t_{k-1}) + \delta P_{GPS}(t_k) \\ &\quad - \delta P_{GPS}(t_{k-1}))\Delta \end{aligned} \quad (21)$$

(21)은  $\Delta$ 의 시간 관계에 의한 테일러 급수 전개에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{P}_{GPS}(t_{k2}) = P_{TRUE}(t_{k2}) - \delta P_{GPS}(t_k) - (V_{TRUE}(t_k) - V_{TRUE}(t_{k-1}))\Delta - (\delta P_{GPS}(t_k) - \delta P_{GPS}(t_{k-1}))\Delta \quad (22)$$

그리고 칼만필터의 측정치 식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \hat{z}(t_{k2}) &= P_{INS}(t_{k2}) - \hat{P}_{GPS}(t_{k2}) \\ &= \delta P_{INS}(t_{k2}) + \delta P_{GPS}(t_k) \\ &\quad + (V_{TRUE}(t_k) - V_{TRUE}(t_{k-1}))\Delta \\ &\quad + (\delta P_{GPS}(t_k) - \delta P_{GPS}(t_{k-1}))\Delta \end{aligned} \quad (23)$$

외삽법에 의한 보상은 (23)을 통하여 GPS의 오차에 더 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그러나 1초 사이의 두 위치오차의 차 ( $\delta P_{GPS}(t_k) - \delta P_{GPS}(t_{k-1})$ )는 작은 값을 나타내며 지연시간과의 곱은 오차의 제공항과 같으므로 무시하고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{z}(t_{k2}) = \delta P_{INS}(t_{k2}) + \delta P_{GPS}(t_k) + (V_{TRUE}(t_k) - V_{TRUE}(t_{k-1}))\Delta \quad (24)$$

여기서  $(V_{TRUE}(t_k) - V_{TRUE}(t_{k-1}))\Delta$ 은 항체가 선형 등속으로 운항하는 경우에는 완전히 제거되지만 항체가 회전을 하는 경우에는 크기는 작지만 남아있게 된다. 그리고 항체의 동적 움직임(dynamics)이 커질수록 이 오차 또한 커지게 된다. 그러나 측정치 지연에 의한 오차에 비하여

그 크기가 상대적으로 매우 작으므로 외삽법에 의한 오차의 보상은 충분히 잘 이루어짐을 알 수 있다.

3. 시뮬레이션

제시한 보상 방법의 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 II장 3절에서 수행한 것과 같은 조건으로 수행하였으며 운항 궤적은 원형궤적을 사용하였다. 170[m/s]의 선속도에 3[deg/s]의 회전각속도로

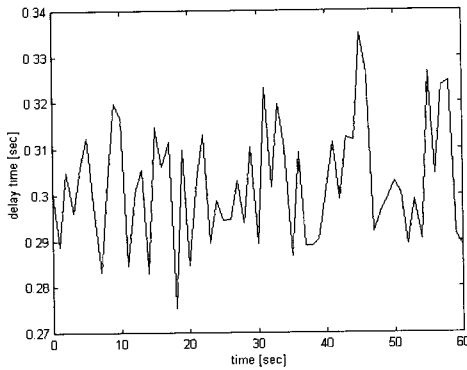
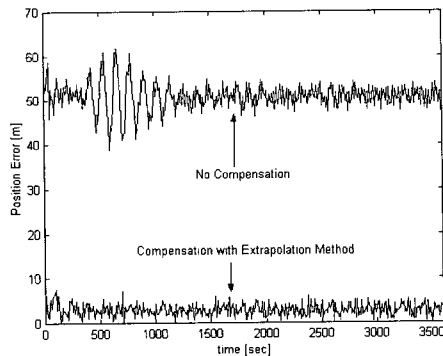
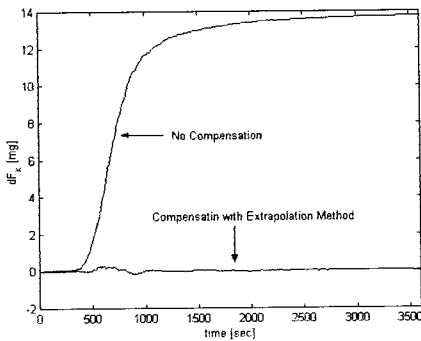


그림 4. 추정된 지연 시간.  
Fig. 4. Estimated delay time.



(a) 위치 오차



(b) x축 가속도계 바이어스 오차

그림 5. 보상 전후 추정 오차.  
Fig. 5. Estimation error w/o compensation.

운항하는 경우 0.3초의 지연시간에 의하여 약 51[m]의 위

치오차와 14.252[ mg]의 x축 가속도계 바이어스 추정 오차가 나타남을 알 수 있었다. 이 오차는 앞에서 제시한 지연시간 추정과 외삽법을 통하여 충분히 보상되어짐을 그림 4, 5를 통하여 확인할 수 있다. 운항 초기 60초 동안 (18)을 통하여 계산한 지연시간의 평균으로 0.3004초의 정확한 지연시간을 추정할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 지연시간 동안에 움직인 항체의 거리 변화량을 GPS 데이터의 선형 조합에 의하여 보상함으로써 측정치 지연에 의한 오차를 보상할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 칼만필터를 이용한 INS/GPS 결합시스템의 실제 구현에서 발생하는 GPS 데이터 지연에 의한 오차를 정의하고 그 영향을 분석했으며 보상 방법을 제시하고 성능을 확인하였다.

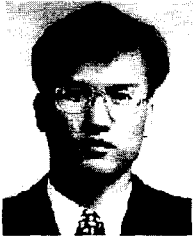
측정치 지연 오차는 INS/GPS 결합 시스템의 실제 구현에서 반드시 발생하는 오차이다. GPS 데이터의 수신기 내부에서의 계산과 항법컴퓨터로의 전송 등에 의하여 발생하는 이 오차는 INS 데이터와의 비동기 현상을 발생시킨다. 그 결과 칼만필터의 상태변수 추정에 영향을 미치고 오차가 발생하게 된다. 본 논문에서는 이 오차로 인하여 위치오차 및 항체가 회전을 하는 경우 x축 가속도계 바이어스 추정에 오차가 발생함을 해석적 방법과 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 그리고 시간 지연 오차는 항체의 동적 움직임이 커 질수록 증가함을 확인하였다.

GPS 데이터의 지연에 의한 위치오차는 시간에 연계성을 가지고 나타나므로 칼만필터의 백색 측정잡음 공분산 행렬의 크기 변화만으로는 해결할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 항체의 운항 초기에 지연시간을 추정하고 외삽법을 이용하여 보상하는 방법을 제시하였다. 그리고 제시한 보상 방법의 성능을 수식과 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

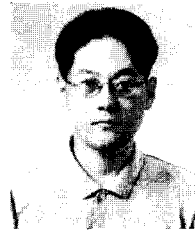
본 논문의 결과는 동적 움직임이 큰 발사체나 미사일 또는 항공기와 같은 시스템에서 INS/GPS 결합시스템을 구성하는 경우 발생하는 데이터 비동기현상을 보상할 때 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

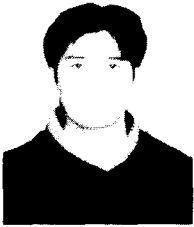
- [1] I. Y. Bar-Itzhack and Y. Vitek, "The enigma of false bias detection in a strapdown system during transfer alignment," *J. Guidance*, vol.8, no.2, 1985.
- [2] George M. Siouris, *Aerospace Avionics Systems*, Academic Press, 1993.
- [3] Bradford W. Parkinson, James J. Spilker Jr., et al., *Global Positioning System: Theory and Applications*, vol. 1, AIAA, 1996.
- [4] Robert Grover Brown, Patrick Y. C. Hwang, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman filtering*, John Wiley & Sons, 1985.
- [5] H. K. Lee, J. G. Lee, and G. I. Jee, "Effect of GPS measurement delay on SDINS," *Proceeding of 2000 IEEE PLANS*, Mar 13-16, 2000

**박 찬 국**

1961년 9월 13일생. 1985년 서울대 공대 제어계측공학과 졸업. 1987년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공학박사). 1993년 서울대 제어계측신기술연구센터 박사후 연구원. 현재 광운대학교 제어계측공학과 부교수. 연구관심분야는 관성항법시스템, 칼만필터링, 대형시스템.

**조 성 운**

1974년 6월 11일생. 1998년 광운대학교 제어계측공학과 졸업. 2000년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 제어계측공학과 박사과정. 연구관심분야는 항법시스템.

**진 용**

1973년 7월 11일생. 1996년 광운대학교 제어계측공학과 졸업. 1998년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 제어계측공학과 박사과정. 연구관심분야는 항법시스템.