

속도오차 초기화를 이용한 관성항법장치 교정기법의 구현

An Implementation of INS Calibration Technique Using the Velocity Initialization

박정화, 김천중, 박홍원, 신용진

국방과학연구소 (Tel: 821-4497; Fax: 821-2224)

Abstracts In this paper a linear Kalman filter for calibration of gimballed inertial navigation system (GINS) is designed and its performance is analyzed through the simulation with a real navigation data. Simulation results show that the proposed Kalman filter gives a good performance to calibrate the sensor errors.

Keywords GINS, Calibration, Kalman Filter, Error Model, Implementation

< 기호설명 >

- $\hat{\cdot}$: 추정값
- (n, e, d) : 항법 좌표계
- (x, y, z) : 플랫폼 좌표계
- C_n^p : 좌표변환행렬
- $\delta L, \delta l, \delta h$: 위도, 경도, 고도 오차
- $\delta V_n, \delta V_e, \delta V_a$: 속도오차
- ϵ : 오일러각 자세오차 $[\delta\phi \ \delta\theta \ \delta\psi]^T$
- w_{ω}^n, Ω_n^n : 지구회전 각속도, 왜대칭 행렬
- w_{ω}^p : 자이로 출력 $[w_x \ w_y \ w_z]^T$
- f^p : 가속도계 출력 $[f_x \ f_y \ f_z]^T$
- δw^p : 자이로 오차 $[\delta w_x \ \delta w_y \ \delta w_z]^T$
- δf^p : 가속도계 오차 $[\delta f_x \ \delta f_y \ \delta f_z]^T$
- w_{dx}, w_{dy}, w_{dz} : 자이로 바이어스 오차
- $w_{mdx}, w_{mdy}, w_{mdz}, w_{mz}$: 자이로 질량불균형 오차
- B_x, B_y : 가속도계 바이어스 오차
- K_x, K_y : 가속도계 척도계수 오차

1. 서 론

관성항법장치(INS: Inertial Navigation System)는 자이로와 가속도계를 이용하여 항체의 각속도 및 가속도를 측정하여 현재위치를 계산하도록 되어있다. 그러므로 자이로와 가속도계 정밀도가 INS의 항법성능에 중요한 역할을 하며 특히 각속도와 가속도를 적분하기 때문에 약간의 센서 오차도 장시간에 누적되어 항법오차를 크게 유발시키므로 가능한 정밀한 센서가 요구된다. 그러나 센서의 정밀도에는 한계가 있기 때문에 이러한 다양한 오차요소를 내포하고 있는 센서를 관성항법장치에 직접 사용할 경우 관성항법장치 성능저하의 주요 원인이 되므로 이러한 센서 오차요소는 다양한 식별방법을 이용하여 추정된 후 보상하는 기법이 필요하다. 또한 관성항법장치에 장착되어

있는 센서들은 시간이 경과함에 따라 센서의 오차특성의 변화에 따른 성능저하를 막기 위하여 정기적으로 센서 오차요소를 식별하여 교정하는 작업이 필요하다. 그러나 지금까지 주로 사용된 교정기법은 스트랩다운 관성측정기인 경우에 대해서 다우치 시험과 레이트 시험에 의한 교정기법[1,2]이 알려져 있다. 그러나 이 기법은 레이트 데이터를 이용하여 교정을 수행하기 때문에 많은 외부장비들이 필요하며, 김벌형 관성항법장치(GINS: gimballed inertial navigation system)의 경우에는 선형 칼만필터 및 확장형 칼만필터를 이용하여 교정하는 기법이 제시되었다[5,6]. 이 기법은 정지상태에서 임의로 관성항법장치의 수평축의 한 방향으로 초기 속도오차 $V(0)$ 를 가함으로서 관성항법장치의 자세변화를 강제적으로 유발시킨 후 측정된 위치 및 속도와 같은 조건에서 항법 알고리즘을 계산하여 얻은 속도 및 위치와의 차를 칼만필터의 측정치로 사용하여 정지상태에서 칼만필터에 의해 추정이 불가능한 수평축 척도계수 오차, 자이로 질량불균형 오차와 같은 g sensitive 오차 성분을 추정할 수 있었다. 이 기법은 항법컴퓨터에 직접 구현하기 않고 GINS에서 위치 및 속도 성분만을 실시간으로 측정하는 입출력 프로그램이 실행되고 있는 PC에서 구현할 수 있으며 또한 칼만필터의 시스템 행렬은 기준시스템에서 출력되는 값을 이용하여 매 실행 시간마다 실행되므로 구현하는데 항법컴퓨터의 성능에 크게 영향을 받지 않으며 만약 칼만필터의 실행시간을 좀더 빠르게 하기 위해서는 입출력 프로그램이 실행되고 있는 PC를 성능이 좋은 것으로 교체하면 된다.

본 논문은 초기 속도오차를 이용한 GINS의 교정기법을 구현하였다. 먼저 실시간으로 GINS에서 위치 및 속도 데이터를 받아 칼만필터의 초기 공분산 값을 적절히 선정한 후 실제 GINS의 교정에 적용하여 그 성능을 확인하였다. 본 논문의 구성을 살펴보면 2장에서는 구현된 칼만필터의 수식을 살펴보고 3장에서는 실험방법 및 구현된 칼만필터의 성능을 확인하였고 4장에서 본 논문의 결론을 맺었다.

2. 칼만필터의 구현

항법시스템 레벨에서의 관성측정기 오차계수 추정을 위한 칼만필터는 항법정보인 위치, 속도, 자세를 포함하는 자이로 및 가속도계 오차요소를 상태변수로 하며 기준 측정치는 초기

속도오차만이 존재한다고 가정하여 순수 항법알고리즘을 계산하여 얻은 위치, 속도로 정하였다. 따라서 칼만필터를 포함한 시스템을 그림1.과 같이 가정하였다.

구성된 시스템을 살펴보면 정지상태에서 GINS에 초기속도 $V(0)$ 을 관성항법장치의 수평축인 E, N축 중 임의의 한축에 인가한다. 동시에 센서오차가 전혀 없다고 가정한 True Model에도 같은 크기의 초기 속도오차를 인가한다. 이와 같이 인가된

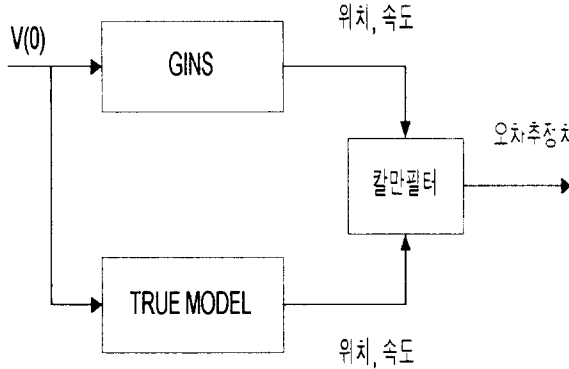


그림 1. GINS 교정시험을 위한 시스템 구성도
Fig 1. System Structure for GINS Calibration

속도오차는 두 시스템의 위치 및 속도의 변화를 유발하며 이 값들은 모두 칼만필터에서 사용된다. True Model에서 계산된 위치 및 속도는 칼만필터의 시스템 행렬 계산시 기준 측정치로 사용되며 GINS에서 출력되는 위치 및 속도는 True Model에서 출력되는 위치 및 속도와 비교되어 칼만필터의 측정치로 사용된다. 위에서 구한 시스템 행렬과 측정치를 사용하여 칼만필터는 속도오차와 위치오차, 자세오차, 그리고 자이로 및 가속도계의 오차요소에 관한 오차계수(바이어스, 척도계수, 질량불균형)를 추정한다. 이러한 칼만필터 설계는 상태방정식을 다음과 같이 기본 항법오차 방정식(위치오차, 속도오차, 자세오차)에 자이로와 가속도계 오차계수를 상태변수에 포함시켜 사용하였다. 여기서 항법방정식은 식(1) ~ (4)와 같이 인용되었으며[3,4] 특히 방향 코사인을 이용한 자세방정식인 식 (4)는 정지상태에서 초기속도오차에 의해 유발된 GINS의 자세변환을 나타내는 식으로서 속도방정식에서 자세변환에 따른 가속도계의 측정치를 계산할 때 사용된다. 식 (3)과 (4)의 f^p 와 w_{ip}^p 는 가속도계 오차와 자이로 오차를 포함하고 있는 항으로서 식 (5), (6)과 같이 나타낼수 있다.

$$\dot{L} = \frac{V_N}{(R_m + h)} \quad (1)$$

$$\dot{l} = \frac{V_E}{(R_e + h) \times \cos L} \quad (2)$$

$$\dot{V}^n = C_p^n f^p + (2w_{ie}^n + w_{en}^n) \times V^n + g \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{C}_p^n &= C_p^n \Omega_{np}^p \\ &= C_p^n \Omega_{ip}^p - \Omega_{in}^n C_p^n \end{aligned} \quad (4)$$

$$f^p = f^n + \delta f^p \quad (5)$$

$$w_{ip}^p = w_{in}^n + \delta w_{ip}^p \quad (6)$$

GINS의 속도 오차방정식은 식 (3)에 섭동기법(perturbation method)을 적용하여 유도하면 (7)과 같다. 이 방정식은 자세오차 및 센서 오차등에 의해 유발되는 속도오차의 전과특성을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \delta \dot{V}^n &= [\delta C_p^n f^p + (2\delta w_{ie}^n + \delta w_{en}^n) \times V^n - (2w_{ie}^n + w_{en}^n) \times \delta V^n \\ &+ C_p^n \delta f^p + \delta g] \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 δC_p^n 은 자세오차와 속도오차와의 연관성을 나타내주는 수식으로서 오일러 각을 이용한 자세 오차방정식을 사용할 경우 식 (8)와 같이 유도된다.

$$\delta C_p^n = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\psi & \delta\theta \\ \delta\psi & 0 & -\delta\phi \\ -\delta\theta & \delta\phi & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)에 대한 자세오차 미분방정식은 식(9)와 같다. 이 미분방정식은 자이로 측정치에 포함되어 있는 오차 등에 의해 유발되는 자세오차의 전과특성을 나타낸다.

$$\dot{\varepsilon} = -w_{in}^n \varepsilon + C_p^n \delta w_{ip}^p - \delta w_{in}^n \quad (9)$$

GINS의 위치 및 자세 오차방정식의 자세한 유도과정[4]은 지면상 생략하였다. 본 논문에서 사용한 GINS의 오차방정식은 초기 속도오차에 의해 유발된 자세변환의 영향을 감안하여 C_p^n 행렬을 오차방정식에 포함시켰으며, 상태방정식으로 표현하면 식 (10)과 같다. 식 (10)의 상태변수로는 위치와 속도의 수직축 성분은 칼만필터의 추정치가 발산할 경우를 대비하여 제외시켰으며 오일러 각을 이용한 자세오차 방정식의 경우 총 7개를 상태변수로 삼았다. 이것을 식으로 나타내면 식 (11)와 같다. 식 (10)에서 F_{11} , F_{12} 는 각각 시스템 상태방정식과 센서오차 모델을 나타내는 행렬로서 상세한 식은 지면상 생략하였다. 그리고 $w(t)$ 는 평균이 영이고 공분산이 Q인 백색 공정잡음이다.

$$\dot{x}_1(t) = F_{11}(t)x_1(t) + F_{12}(t)x_2(t) + w(t) \quad (10)$$

$$x_1 = [\delta L \quad \delta l \quad \delta V_n \quad \delta V_e \quad \delta\phi \quad \delta\theta \quad \delta\psi] \quad (11)$$

식(10)에서 $x_2(t)$ 는 자이로 및 가속도계의 오차성분을 나타내는 상태벡터이다. 본 논문에서는 센서의 오차성분은 랜덤상수라 가정하였으며 수식으로 표현하면 식 (12)과 같다.

$$\begin{aligned} x_g(t) &= [w_{dx} \quad w_{dy} \quad w_{dz} \quad w_{mdx} \quad w_{max} \quad w_{mdy} \quad w_{may}] \\ x_a(t) &= [B_x \quad B_y \quad K_x \quad K_y] \\ x_2(t) &= [x_g(t) \quad x_a(t)] \\ \dot{x}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)의 상태방정식은 센서의 오차 성분을 나타내는 $x_2(t)$ 를 상태변수로 확장하여 새로운 상태방정식을 유도하면 식 (13)와 같다.

$$x(t) = [x_1^T(t) \quad x_2^T(t)]$$

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gw(t) \quad (13)$$

식 (13)를 구성하는 시스템 행렬 F_{12} 의 유도과정을 상세히 기술하면 다음과 같다.

$$F_{12}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ F_g(t) & 0 \\ 0 & F_a(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (14)의 행렬에서 $F_g(t), F_a(t)$ 는 관성항법장치의 센서오차와 관련된 시스템 행렬로서 오일러각을 이용한 자세 오차방정식의 경우 식 (15)과 같이 유도된다.

$$F_g(t) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta w_x \\ \delta w_y \\ \delta w_z \end{bmatrix} = C_p^g \delta w^t, \quad F_a(t) = C_p^a \delta f^p \quad (15)$$

$$\delta w = [\delta w_x \quad \delta w_y \quad \delta w_z]^T = F_{gs}(t) \times x_g(t)^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & f_x & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & f_y & f_x \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times [w_{dx} \ w_{dy} \ w_{dz} \ w_{max} \ w_{mox} \ w_{mdy} \ w_{may}]^T$$

$$\delta f = [\delta f_x \quad \delta f_y \quad 0]^T = F_{aa}(t) \times x_a(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & f_x & 0 \\ 0 & 1 & 0 & f_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times [B_x \ B_y \ K_x \ K_y]^T$$

그리고 칼만필터의 추정치는 True Model에서 출력되는 위치 및 속도를 기준 정보로하여 GINS에서 출력된 위치 및 속도의 차로 간주하여 측정방정식을 유도하면 식 (16)과 같다.

$$z = Hx + v \quad (16)$$

$$z = [\delta L \ \delta l \ \delta V_N \ \delta V_E]$$

식 (16)에서 v 는 평균이 영이고 공분산이 R인 백색 측정잡음이고, 측정행렬 H 는 4×4 의 단위행렬 H_0 와 4×14 의 영향행렬 H_2 로 다시 나타내면 식 (21)과 같다.

$$H = [H_0 \ H_2] \quad (21)$$

상기 상태방정식과 측정방정식으로 부터 설계되는 칼만필터는 항법시작과 동시에 1초에 한번씩 수행된다.

3. 칼만필터의 성능분석

항법시스템 레벨에서의 GINS 오차계수 추정을 위한 칼만필터는 아무런 외부장비의 도움없이 자체적으로 수행된다. 초기에 GINS는 정지상태에서 초기정렬을 수행한 후 항법모우드로 진입하며, 이때 GINS의 방위각은 항법모우드 진입직전에 영으로 정렬된다. 그리고 정렬이 끝난 후 남아있는 초기정렬오차는 실험에 사용된 관성항법장치의 성능규격을 참조하였다. 그리고 GINS에서 출력되는 속도 정보에는 $[-0.075, 0.075]$ 사이에서 일정한 분포를 갖는 양자화 오차가 포함되어 있으므로 속도오차에 해당하는 상태변수의 초기 공분산 값은 0.043으로 선정하였다.

정렬이 끝난후 항법모우드 진입직전에 방위각이 영으로 정렬

된 상태에서 east축에 초기속도오차를 GINS에 가했을 경우에 GINS는 각운동을 한다. 이때 출력되는 위치 및 속도값에, 같은 조건에서 true model을 시뮬레이션하여 얻은 위치 및 속도값의 차를 측정치로 사용하고 오일러 각을 이용한 자세 오차 방정식을 이용하여 자이로 및 가속도계의 오차요소를 선형 칼만필터로 추정된 결과 north축, down축 자이로 바이어스의 경우 추정이 비교적 잘 이루어 졌고, 자이로 질량불균형 오차는 north 축의 회전축 방향성분과 east축의 입력축 방향만이 추정되었으며 가속도계 오차요소의 경우 east 축 성분만이 비교적 잘 추상되는 것으로 시뮬레이션 결과 나타났다[5,6]. 이를 실험을 통하여 확인하기 위하여 본 논문에서는 시뮬레이션과 같은 초기조건을 실험용 GINS에 가하여 얻은 위치, 속도 측정치와 true model을 시뮬레이션하여 얻은 위치, 속도의 차를 측정치로 사용하여 실험을 수행한 결과 시뮬레이션과 거의 같은 결과를 얻을 수 있었다. 칼만필터의 초기 공분산은 실험용 GINS의 성능규격을 참조하여 선정하였고 칼만필터의 계산주기는 1초로 선정하였다. 실험구상도를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다. 칼만필터는 항법컴퓨터에 탑재되지 않고 입출력 프로그램이 실행되고 있는 PC에서 실시간으로 실험용 GINS에서 출력되는 항법데이터를 받아 1초마다 실행된다. 칼만필터의 추정성능은 칼만필터에 의해 추정된 센서오차 향을 그림 1의 GINS 모델에 대입하여 얻은 속도를 true model을 시뮬레이션하여 얻은 속도와의 차와 칼만필터의 속도 측정치와의 차를 구한 후 칼만필터의 속도 측정치와 비교하여 그 값이 작은가를 확인한다. 실험은 3번에 걸쳐서 수행하였으며 3번 모두 칼만필터의 오차 추정치가 거의 유사한 값을 유지하였으며 추정경향 모두 유사하였다.

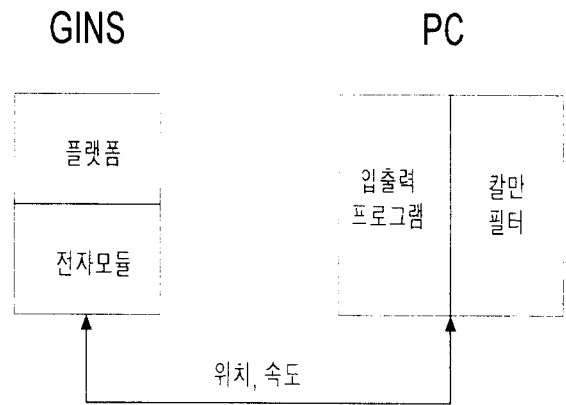


그림 2. GINS 교정시험을 위한 시험 구성도
Fig. 2. Test Structure for GINS calibration

칼만필터의 센서오차 추정성능 및 추정경향을 그림으로 나타내면 다음과 같다. 먼저 north 축, down 축 자이로 바이어스에 대한 추정성능을 살펴보면 그림 3., 4와 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 자이로 바이어스의 추정경향이 서서히 일정한 값으로 수렴하는 것을 나타낸다. 그림 5는 자이로 질량불균형 오차에 대한 칼만필터의 추정성능을 나타내고 있다. 이 그림은 시뮬레이션에서 나타난 바와 같이 north 축 회전축 방향과 east 축 입력축 방향의 오차성분만이 추정되는 것으로 나타났다. 그림 6., 7.은 가속도계 바이어스 및 척도계수 오차에 대한 칼만필터의 추정경향을 보여주고 있으며 대체적으로 잘 수렴하는 것으로 나타났으나 척도계수 오차의 경우 초기에 수렴하지 않고 추정값이 커지는 현상이 나타나고 있지만 시간이 경과함에 따라 수렴하는 것으로 나타났으며 이는 수렴속도의 문제로 판단되며 칼만필터의 초기 공분산 값을 적절히 튜닝하면 사라질 것으로 예상된다.

그림 8은 칼만필터의 추정성능을 보여주고 있다. 이 그림은 칼만필터에서 east 축 속도와 관련되어 추정된 센서오차를 그림 1.의 GINS 모델에 입력하여 속도오차를 구하였고 이렇게 구해진 속도오차는 실험용 GINS에서 얻은 속도 측정치에 보상되어 새로운 속도측정치가 구해지고 보상된 속도측정치는 실제 GINS에서 얻은 속도 측정치와 비교하였을 때 보상된 속도측정치가 작음을 나타내주고 있다. 이는 칼만필터에서 구한 센서오차의 추정치가 센서에 포함된 오차값을 제대로 추정하는 것을 나타내주고 있다.

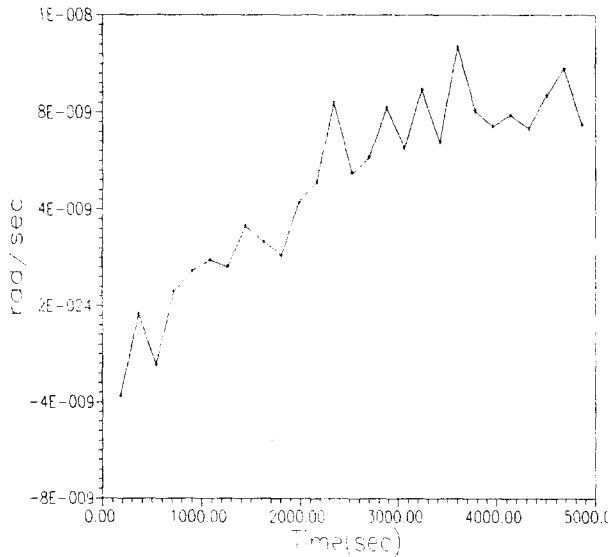


그림 3. north축 자이로 바이어스 오차
Fig. 3. N-axis Gyro Bias Error

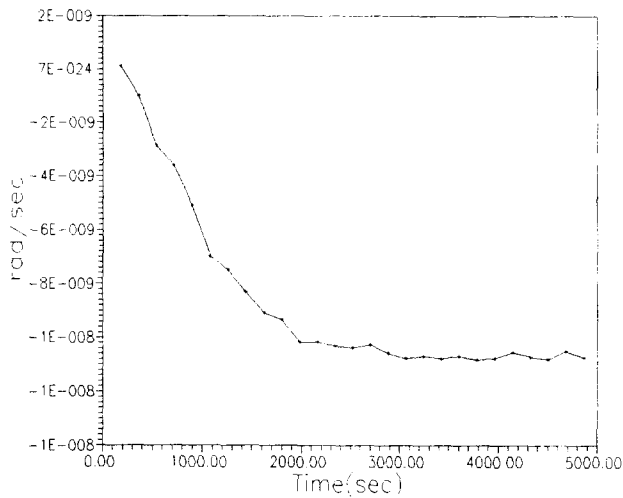


그림 4. down 축 자이로 바이어스 오차
Fig. 4. D-axis Gyro Bias Error

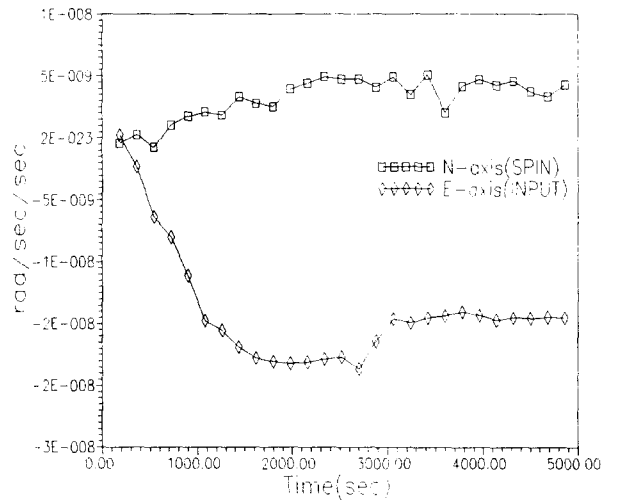


그림 5. 자이로 질량불균형 오차
Fig. 5. Gyro Mass-unbalance Error

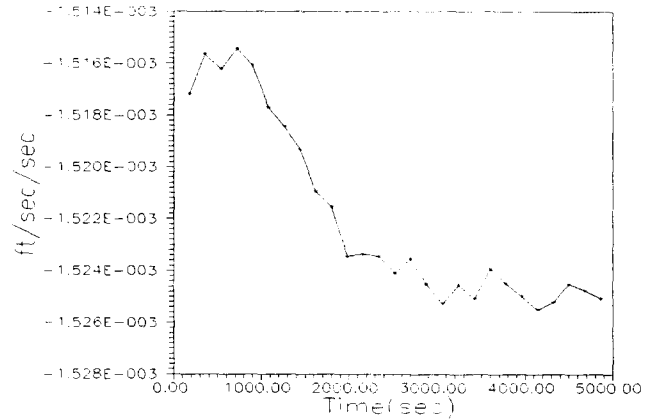


그림 6. 가속도계 바이어스 오차
Fig. 6. E-axis Accel. Bias Error

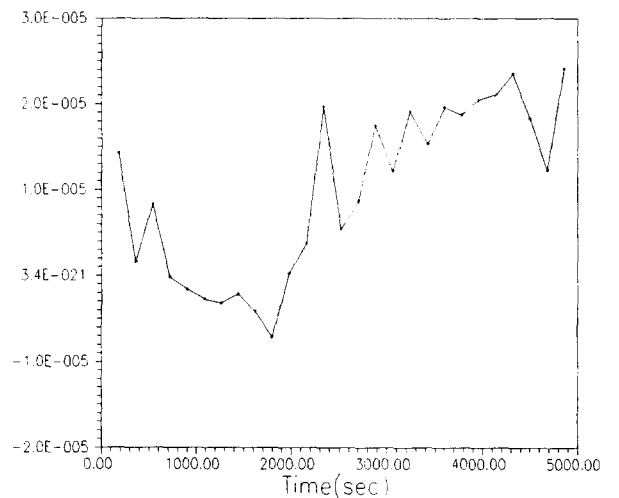


그림 7. 가속도계 척도계수 오차
Fig. 7. E-axis Accel. Scale Factor Error

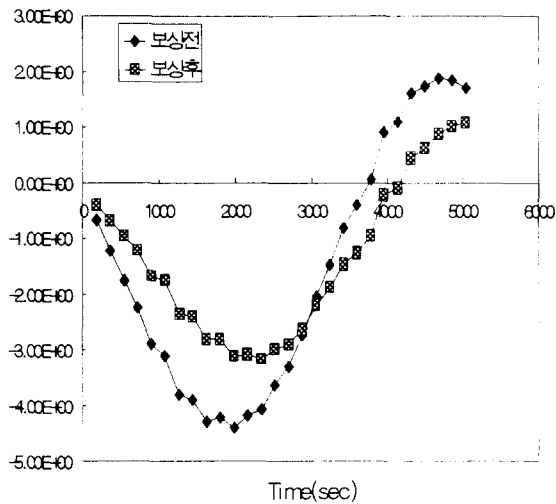


그림 8. 속도오차
Fig. 8. Velocity Error

4. 결 론

속도오차 초기화를 이용한 관성항법장치의 항법 시스템 레벨에서의 교정기법을 실험용 GINS를 적용하여 실험을 수행하였다. 실험을 수행한 결과 칼만필터에 의해 추정된 센서의 오차 추정치를 보상하여 속도오차 측정치를 구한결과 속도오차 측정치가 감소하였음을 확인할 수 있었고 이러한 결과를 통하여 칼만필터가 센서 오차값을 제대로 추정하는 것으로 판단할 수 있었다.

본 논문에서는 3번에 걸쳐 실험을 수행하였으나 좀더많은 실험을 수행하여 칼만필터의 추정성능을 평가하여야 하며 칼만필터의 초기 공분산값을 정밀하게 튜닝을 할 경우 좀더 좋은 추정성능을 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

참고문헌

- [1] U. Krogmann, " Identification Procedures for Strapdown Sensor Parameter by Laboratory Testing," DGON-Symposium Gyro Technology, Bochum, Germany, 1978.
- [2] L. Camberlein and F. Mazzanti, " Calibration Technique for Laser Gyro Strapdown Inertial Navigation Systems," SAGEM, France.
- [3] K. R. Britting, Inertial Navigation Systems Analysis, John Wiley & Sons Inc., 1971.
- [4] G. M. Siouris, Aerospace Avionics Systems. Academic Press Inc., 1993.
- [5] 김천중, 최상욱, 박홍원, 유 준, " 칼만필터를 이용한 김블형 관성항법시스템의 교정기법," '95 한국자동제어학술회의 논문집, Oct., 1995.
- [6] 김천중, 박정화, 유명중, 박홍원, " 속도오차 초기화를 이용한 김블형 관성항법시스템의 교정기법," '96 한국자동제어학술회의 논문집, Oct., 1996.