

칼만필터를 이용한 스트랩다운 관성측정기의 교정기법

° 김천중*, 송기원*, 유준**

* 국방과학연구소, ** 충남대학교 전자공학과

Calibration Technique of Strapdown Inertial Measurement Unit Using Kalman Filter

° Cheon-Joong Kim*, Ki-Won Song*, Joon Lyou**

* Agency for Defence Development

** Dept. of Electronics Eng., Chungnam National Univ.

Abstract

In this paper, we formulate Kalman filter for calibration of strapdown inertial measurement unit(SDIMU) on navigation system level and analyze its performance by covariance simulation method. It has been shown that the calibration method suggested in this paper is not largely influenced by accuracy of a mounting axis alignment required in calibration of SDIMU on IMU level.

< 기호설명 >

| | |
|--|---|
| | : 오차포함 또는 계산값 |
| (N, E, D) | : 항법 좌표계 n |
| (X, Y, Z) | : 동체 좌표계 b |
| C_n^b | : 좌표변환행렬 |
| $\delta L, \delta l, \delta h$ | : 위도, 경도, 고도 오차 |
| $\delta V_N, \delta V_E, \delta V_D$ | : 속도오차 |
| ϵ^n | : 자세오차 [$\delta\theta \ \delta\phi \ \delta\psi$] ^T |
| W_{ie}^n, Q_{ie}^n | : 지구회전 각속도, 왜대칭 행렬 |
| f^n, F^n | : 지구중력 가속도, 왜대칭 행렬 |
| W_{ib}^b | : 자이로 출력 [w_x, w_y, w_z] ^T |
| f^b | : 가속도계 출력 [f_x, f_y, f_z] ^T |
| δW^b | : 자이로 오차 [$\delta w_x \ \delta w_y \ \delta w_z$] ^T |
| δf^b | : 가속도계 오차 [$\delta f_x \ \delta f_y \ \delta f_z$] ^T |
| $W_{dx1} \ W_{dy1} \ W_{dz1}$ | : 자이로 바이어스 오차 |
| $T_{sx} \ T_{sy} \ T_{sz}$ | : 자이로 척도계수 오차 |
| ϕ_{ij} | : 자이로 비정렬 오차각으로 i축을 j축 중심으로 회전시킨 각 |
| $W_{mdx} \ W_{mxy} \ W_{mdz}$ $W_{mqx} \ W_{mqz}$ | : 자이로 질량불균형 오차 |
| $B_{x1} \ B_{y1} \ B_{z1}$ | : 가속도계 바이어스 오차 |
| $K_x \ K_y \ K_z$ | : 가속도계 척도계수 오차 |
| θ_{ij} | : 가속도계 비정렬 오차각으로 i축을 j축 중심으로 회전시킨 각 |

1. 서 론

관성항법장치(INS: Inertial Navigation System)는 자이로와 가속도를 이용하여 항체의 각속도 및 가속도를 측정하여 현재위치를 계산하도록 되어있다. 그러므로 자이로와 가속도계 정밀도가 INS의 항법성능에 중요한 역할을 하며 특히 스트랩다운 관성항법장치(SDINS)에는 각속도와 가속도를 적분하기 때문에 작은오차도 장시간에 누적되어 항법오차를 유발시켜 가능한 정밀한 센서가 요구된다.

스트랩다운 관성측정기(SDIMU)의 자이로와 가속도계 출력에는 오차가 존재하므로 그중 고정오차를 식별하여 항법수행시 SDIMU 출력정보를 보상함으로써 항법성능을 향상시킬 수 있음과 동시에 적절한 성능시험 평가를 수행할 수 있다. 그런데 동조자이로인 경우에 대해서 다위치 시험과 레이트 시험에 의한 센서 측정치로부터 오차계수를 추정하는 방법이 알려져 있다[1][2]. 이와같은 방법은 지구회전 각속도와 지구중력의 항법좌표계에 정렬된 SDIMU 출력정보를 기준으로 하고 있으므로 자이로와 가속도계의 오차계수를 추정하기 위하여 시험장비인 레이트 테이블에 SDIMU를 장착할 때 SDIMU에 부착된 정렬핀으로 정의되는 좌표축과 레이트 테이블 회전축간의 불일치에 의한 장착비정렬은 오차계수의 추정성능을 저하시킬 수 있다. 따라서 관성측정기 레벨에서 다위치 및 레이트 시험에 의해 수집된 SDIMU 출력정보를 이용한 방법은 소기의 오차계수 추정성능을 만족시키기 위해 높은 장착 정밀도를 요구하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 이러한 높은 장착정밀도는 실험실에서 광학적 치구로 해결되고 있어 관성측정기 레벨에서의 교정기법이 상용되고 있다.

본 논문은 시험준비에 높은 SDIMU의 장착정밀도 요구하지 않는 것으로 추측되는 항법시스템 레벨에서의 SDIMU 오차계수 추정기법을 칼만필터로 구성 제시하고 실제 적용 가능성을 시뮬레이션으로 검토하였다. 칼만필터를 이용한 추정기법은 관성측정기 레벨의 교정기법이 SDIMU의 자이로 및 가속도계

측정치만을 이용하는데 비하여 항법시스템의 위치, 속도, 자세오차의 전파상태를 추가로 이용함으로써 시험장비의 정확도 또는 장착정밀도 저하에 의한 영향을 감소시킬 수 있다. 칼만필터에 의한 항법시스템 레벨에서의 시험계획은 SDIMU 오차요소가 추정되도록 가측성 확보가 용이한 것으로 추측되는 다위치 정지상태를 가정 하였으며 사용된 시험계획은 SAGEM사의 SDIMU 시험평가를 위해서 알려진 순서를 인용하였다[3].

2. 칼만필터 설계

항법시스템 레벨에서의 관성측정기 오차계수 추정을 위한 칼만필터는 항법정보인 위치, 속도, 자세를 포함하는 지이로 및 가속도계 오차요소를 상태변수로 하며 기준 측정치는 영속도와 레이트 테이블 정지위치, 그리고 정지상태의 지구회전 각속도 및 중력가속도로 정할 수 있다. 따라서 칼만필터를 포함한 시스템을 그림2.1과 같이 가정하였다.

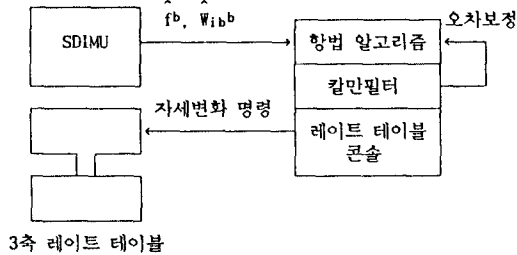


그림2.1 SDIMU 교정시험을 위한 시스템 구성도
Fig.2.1 System Structure for SDIMU Calibration

구성된 시스템을 살펴보면 SDIMU는 3축 레이트 테이블에 장착되어져 레이트 테이블 각운동과 정지상태의 지구회전 각속도와 중력가속도에 의해 그 출력이 정해지며 동시에 각 오차요소들이 포함된다. SDINS 알고리즘은 자세계산, 속도계산, 위치계산을 위한 기능을 갖추고 있다. 칼만필터는 속도오차와 위치오차, 자세오차, 그리고 지이로 및 가속도계의 오차요소에 관한 오차계수(바이어스, 척도계수, 비정렬, 질량불균형)를 추정한다. 그리고 추정된 상태변수들은 SDINS 와 SDIMU로 궤환되어 보상된다. 이러한 칼만필터 설계는 상태방정식을 식(1)(2)과 같이 기본 항법오차 방정식(위치오차, 속도오차, 자세오차)에 지이로와 가속도계 오차계수를 상태변수에 포함시켜 사용하였다. 여기서 항법 오차방정식과 동조자이로 및 가속도계 오차모델은 식(3),(4)와 같이 인용되었으며[4][5] 특히 F_{11} , F_{12} 는 각각 시스템 상태방정식과 센서오차 모델을 나타내는 행렬로서 상세한 식은 지면상 삭제하였다.

$$x_1 = [\delta L \ \delta l \ \delta h \ \delta V_N \ \delta V_E \ \delta V_D \ \delta \phi \ \delta \theta \ \delta \psi]^T$$

$$x_1(t) = F_{11}(t)x_1(t) + F_{12}(t)x_2(t) + w_s(t) \quad (1)$$

$$x_2 = [W_{dx1} \ W_{dy1} \ W_{dz1} \ T_{sx} \ T_{sy} \ T_{sz} \ \phi_{xy} \ \phi_{xz} \\ \phi_{yx} \ \phi_{yz} \ \phi_{zx} \ \phi_{zy} \ W_{mdx} \ W_{mqx} \ W_{mdy} \ W_{mqy} \\ W_{mdz} \ W_{mqz} \ B_{x1} \ B_{y1} \ B_{z1} \ K_x \ K_y \ K_z \ \theta_{xy} \\ \theta_{xz} \ \theta_{yx} \ \theta_{yz} \ \theta_{zx} \ \theta_{zy}]^T$$

$$x_2 = 0 \quad (2)$$

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

$$F = \left[\begin{array}{c|c} F_{11} & F_{12} \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right]$$

$$[\delta W_x \ \delta W_y \ \delta W_z]^T =$$

$$\left[\begin{array}{cccccccccccccccc} 1 & 0 & 0 & W_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -W_y & 0 & W_z & f_x & f_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & W_y & 0 & 0 & 0 & W_x & 0 & 0 & -W_z & 0 & 0 & 0 & f_y & f_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & W_z & -W_x & 0 & 0 & W_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_z & f_y \end{array} \right]$$

$$* [W_{dx1} \ W_{dy1} \ W_{dz1} \ T_{sx} \ T_{sy} \ T_{sz} \ \phi_{xy} \ \phi_{xz} \ \phi_{yx} \\ \phi_{yz} \ \phi_{zx} \ \phi_{zy} \ W_{mdx} \ W_{mqx} \ W_{mdy} \ W_{mqy} \ W_{mdz} \ W_{mqz}]^T \quad (3)$$

$$[\delta f_x \ \delta f_y \ \delta f_z]^T =$$

$$\left[\begin{array}{cccccccccccc} 1 & 0 & 0 & f_x & 0 & 0 & -f_z & f_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & f_y & 0 & 0 & 0 & f_z & -f_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & f_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -f_y & f_x & 0 \end{array} \right] \quad (4)$$

$$* [B_{x1} \ B_{y1} \ B_{z1} \ K_x \ K_y \ K_z \\ \theta_{xy} \ \theta_{xz} \ \theta_{yx} \ \theta_{yz} \ \theta_{zx} \ \theta_{zy}]^T$$

그리고 칼만필터의 측정치는 일반적으로 알려진 정지위치와 영속도를 기준 정보로하고 정지상태의 지구회전 각속도 와 중력가속도를 추가적인 기준정보로 이용하여 SDIMU 자세오차가 포함되는 측정방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$Z_p = [\delta L \ \delta l \ \delta h]^T \quad (5)$$

$$Z_v = [\delta V_N \ \delta V_E \ \delta V_D]^T \quad (6)$$

$$Z_w = -C_n^b W_i^n + \hat{W}_{ib}^b \\ = C_n^b Q_i^n \varepsilon^n + \delta W^b \quad (7)$$

$$Z_f = -C_n^b f^n + \hat{f}^b \\ = C_n^b F^n \varepsilon^n + \delta f^b \quad (8)$$

상기 상태방정식과 측정방정식으로 부터 설계되는 칼만필터는 항법시작과 동시에 1초에 한번씩 수행되며 자세변화를 위한 레이트 테이블의 각운동시에는 Z_w 의 기준측정치가 변하므로 칼만필터는 상태변수 추정을 중지하고 필터의 공분산 전이(propagation)만 수행한다.

3. 칼만필터의 성능분석

항법시스템 레벨에서의 관성측정기 오차계수 추정을 위한 칼만필터는 SDIMU를 기준좌표계에 정밀하게 맞추어 장착하지

않아도 된다. 따라서 칼만필터의 성능분석은 이점에 대하여 수행되었다. 초기 SDIMU 자세정밀도는 수평축 정렬을 수행하는 것으로 가정하여 1mrad(1 σ)으로 정하였으며 방위각 오차의 경우 항법좌표계에 대한 장착오차를 최대 3도로 가정하여 20mrad(1 σ)으로 정하였다. 성능분석 방법으로는 공분산 시뮬레이션을 이용하였으며 이때의 true 모델은 정지상태 단축 각운동이므로 자이로와 가속도계 오차요소중 표3.2와 같이 SDIMU 성능규격과 같은 정적요소만 고려하여 필터모델과 동일하게 사용하였다. 그리고 장시간 소요되는 시험에서 SDIMU 동작중 발생 가능한 오차요소의 온도에 따르는 부유(drift)특성은 주변온도가 일정하게 유지된다고 가정하여 무시하였다.

(1) 시험계획과 SDIMU 오차규격

시험계획은 오차계수 추정을 위한 기관측성을 확보하기에 용이한 것으로 추측되는 18 다위치 정지상태가 되도록 하였으며 그 순서는 표 3.1과 같이 정하였다[3]. 그리고 정지상태 유지시간은 100초, 자세변화시의 레이트 테이블 각운동은 평균 2도/초로 회전하도록 하였다. 또한 SDIMU 동체좌표와 레이트 테이블 회전축 간의 장착비정렬은 각각 1도, 2도, 3도로 가정하여 자이로와 가속도계 출력을 발생시켰다. 따라서 SDIMU 초기 수평자세는 수평축 정렬을 가정하였으므로 장착비정렬에 맞추어 정하였으며 초기 방위각의 경우 모두 0도로 입력되었다. 대상 SDIMU 성능규격은 중급성능으로 표3.2와 같이 가정하였다.

표3.1 레이트 테이블 다위치 순서

Table 3.1 Multiposition Sequence of Rate Table

| 차레 | 기준 회전축 | IMU축의 방향 | 회전방향 | 회전각 |
|----|--------|----------|------|------|
| | | X Y Z | | |
| 0 | | N E D | 0 | 0° |
| 1 | Y | U E N | ccw | 90° |
| 2 | Y | D E S | ccw | 180° |
| 3 | Y | U E N | ccw | 180° |
| 4 | Z | E D N | ccw | 90° |
| 5 | Z | W U N | ccw | 180° |
| 6 | Z | E D N | ccw | 180° |
| 7 | X | E N U | ccw | 90° |
| 8 | X | E S D | ccw | 180° |
| 9 | X | E N U | ccw | 180° |
| 10 | X | E U S | ccw | 90° |
| 11 | X | E S D | ccw | 90° |
| 12 | X | E D N | ccw | 90° |
| 13 | Z | D W N | ccw | 90° |
| 14 | Z | W U N | ccw | 90° |
| 15 | Z | U E N | ccw | 90° |
| 16 | Y | S E U | ccw | 90° |
| 17 | Y | D E S | ccw | 90° |
| 18 | Y | N E D | ccw | 90° |

N(north), E(east), W(west), S(south), D(down), U(up) ccw(conterclockwise)

표3.2 SDIMU 성능규격(1 σ)

Table 3.2 Performance of SDIMU

| 오차요소 | 자 이 로 | 가 속 도 계 |
|-------|------------|-------------|
| 바이어스 | 1 °/hr | 150 μ g |
| 척도계수 | 150 ppm | 150 ppm |
| 비정렬 | 1.0 arcmin | 1.0 arcmin |
| 질량불균형 | 1.0 °/hr/g | - |
| 백색잡음 | 0.1 °/hr | 10 μ g |

(2) 성능분석 결과

성능분석은 장착비정렬의 정도에 따라 수행되었으며 이러한 장착비정렬은 SDIMU에 인가되는 운동계획을 변화시킴으로서 칼만 필터 추정성능 결과에 어떻게 영향을 미치는가를 살펴보았다. 성능분석 결과 주어진 시험계획에 따라 최종 자세위치에서의 자이로 및 가속도계 오차계수 추정오차는 표3.3과 같으며 여기서 각축의 최종 추정오차는 다소의 차이는 있으나 가장 큰값을 표기 하였다. 그리고 대표적으로 자이로 척도계수와 비정렬, 그리고 가속도계 바이어스 추정추이는 그림3.1과 같다.

표3.3 칼만필터의 추정오차(1 σ)

Table 3.3 Estimation Error of Kalman Filter

| 오차요소 | 자 이 로 | | | 가 속 도 계 | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 1도 | 2도 | 3도 | 1도 | 2도 | 3도 |
| 바이어스 | .016 (°/hr) | .016 (°/hr) | .016 (°/hr) | 3.02 μ g | 2.98 μ g | 2.93 μ g |
| 척도계수 (ppm) | 5.85 | 5.86 | 5.86 | 4.29 | 4.28 | 4.27 |
| 비정렬 (arcmin) | .050 | .043 | .040 | .028 | .028 | .028 |
| 질량불균형 (°/hr/g) | .029 | .029 | .029 | - | - | - |

자이로 및 가속도계 오차계수 추정추이는 전반적으로 다위치 시험순서중 초기오차 크기를 그대로 유지하다가 기관측성이 나타나는 것으로 추측되는 변화된 자세위치 초기상태에서 급격히 추정오차가 감소되는 양상을 보였으며 방위각 오차의 경우 정지상태중 약한 기관측성의 특성으로 인해 서서히 감소되었다. 또한 부분적으로 기관측성이 주로 각운동중에 크게 나타나는 것으로 추측되는 자이로 비정렬의 경우에도 자세변화중 칼만필터 동작을 중지하므로 변화된 자세위치에서 계단식으로 추정되는 양상을 나타내었고 정상상태에서 추정오차가 약간 증가하였다. 그리고 장착비정렬 크기에 따르는 성능분석 결과 최종 추정오차에 거의

영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 제시된 교정기법은 자이로와 가속도계의 모든 오차요소들을 포함하는 정확한 필터모델을 적절히 구성하고 필터튜닝을 한다면 실제 적용도 가능할 것으로 판단된다.

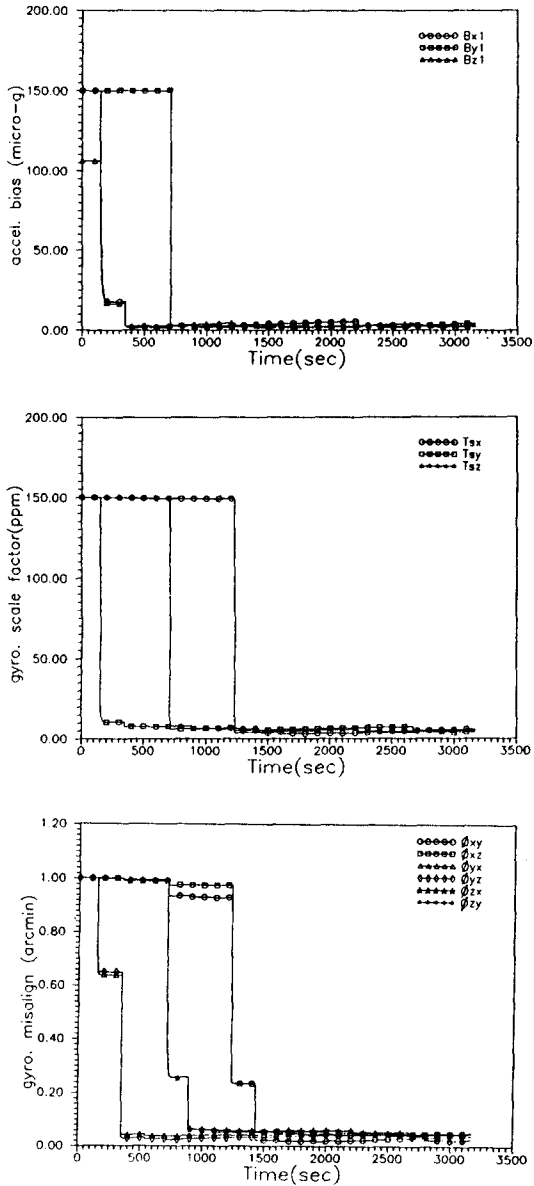


그림 3.1 칼만필터의 추정오차 추이
Fig 3.1 Estimation Error Trend of Kalman Filter

4. 결 론

스트랩다운 관성측정기의 항법 시스템 레벨에서의 교정을 위한 칼만필터 구성방법을 제시하였으며 시뮬레이션을 통하여

추정성능을 확인하여 실제 적용 가능성을 검토하였다. 성능분석 결과 18 다위치 자세변화에 의해 자이로 및 가속도계 정적오차 요소들이 추정되었으며 추정성능은 장착비정렬에 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타나 중급성능의 SDIMU 성능시험 평가에 가용할 것으로 전망된다. 특히 가관측성 분석에 의해 최적 시험순서와 오차추정 소요시간을 정하게 된다면 기존의 SDIMU의 레이트 테이블 장착정렬을 포함하는 시험평가에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] U. Krogmann, " Identification Procedures for strapdown Sensor Parameter by Laboratory Testing," DGON-Symposium Gyro Technology, Bochum, Germany, 1978.
- [2] P. J. Donoghue and L. B. Cotter, "Test and Evaluation of a Dry Tuned Strapdown Gyroscope in a System Environment,"
- [3] L. Camberlein and F. Mazzanti, " Calibration Technique for Laser Gyro Strapdown Inertial Navigation Systems," SAGEM, France.
- [4] K. R. Britting, Inertial Navigation Systems analysis, John Wiley & Sons Inc., 1971.
- [5] 박 흥원, "스트랩다운 관성항법장치의 영속도 보정 칼만필터 구성 및 성능분석." 서울대학교 석사학위 논문, 1988.