

### 관성측정장치의 인자측정 및 재측정 방법 고찰

이 허 수      백 승 철      이 종 희  
                  대영전자기술연구소

#### A SURVEY OF METHODS FOR IMU CALIBRATION AND CALIBRATION-UPDATE

HUH SOO LEE      SEUNG CHUL BAEK      JONG HEE LEE  
DAEYOUNG ELECTRONICS IND. CO., LTD.

#### ABSTRACT

INPUT/OUTPUT EQUATIONS IN SDINS IMU ARE MODELED FROM SURVEY OF IMU DATA FLOW. GIVEN WITHOUT PRECISE EQUIPMENTS WHICH CAN GENERATE ACCELERATION AND ANGULAR VELOCITY, A SIMPLE METHOD IS DERIVED TO CALIBRATE THE PARAMETERS OF I/O EQUATIONS. ALSO IN ORDER TO UPGRADE INS PERFORMANCE, METHODS TO ESTIMATE VARIANT MAGNITUDES OF TIME VARIANT PARAMETERS ARE SURVEYED.

#### 1. 서    론

스트랩다운 관성항법장치(SDINS)는 동체 좌표계(BODY FRAME)의 각축에 입력되는 선가속도 및 각속도를 감지(SENSING)하여 소프트웨어 처리함으로써 자세(ATTITUDE) 및 위치(PPOSITION) 데이터를 출력한다. 그런데 감지기(ACCELEROMETERS, GYROS)의 기계적 특성, 관성 측정 장치 블록의 가공 및 조립상의 오차, 그리고 감지기의 제어 및 감지된 데이터를 A/F 변환하는 전자기판 특성등에 의해 입력치와 출력치가 일치되지 않고 2차 정도의 관계를 갖게되므로, 입출력 방정식에 나타나는 인자들(PARAMETERS)을 측정(CALIBRATION)해야 한다.

입출력 방정식상에 나타나는 인자들 가운데, 감지

기의 기계적 특성변화, 전자기판의 전자적 특성 변화 등으로 인한 수치변화 인자들이 있다. 이들 인자들 가운데 그 변화량이 관성 항법 장치의 성능저하 효과를 크게 유발시키는 인자들에 대해서는 관성 측정 장치가 동체에 탑재된 상태에서 동체의 이동 직전에 재측정(CALIBRATION-UPDATE) 해주어야 한다. 관성 측정 장치의 인자측정을 수행하기 위해서는 선가속과 각속도를 정밀하게 발생시킬 수 있는 장치가 필요한데, 본 논문에서는 그런 장치가 갖추어지지 않은 조건에서 중력 가속도(GRAVITY FORCE)와 지구 자전 각속도(EARTH RATE) 그리고 수동 회전 테이블(MANUAL ROTARY TABLE)를 이용한 인자측정 방법을 유도해 보았다. 또한, 인자측정 개념을 응용 회전 메카니즘(ROTATION MECHANISM)을 사용한 인자 재측정 방법을 모색해 보았다.

#### 2. 기호 정의

수식표현의 편의를 위해 (x y z)를 (1 2 3)으로 치환하여 사용하는 경우가 있는데, 예를 들면 다음과 같다.

$$\text{예) } (A_x \ A_y \ A_z) ==> (A_1 \ A_2 \ A_3)$$

의	비	기호
동계 좌표계		C
가속도계 좌표계		Ca
자이로 좌표계		Cg
C의 선가속도 입력		A
C의 각속도 입력		W
Ca의 선가속도 입력		Ai
Cg의 각속도 입력		Wi
가속도계 출력		As
자이로 출력		Ws
Ca의 Ia축과 C의 J축의 사이각에 대한 COSINE		Da
Cg의 Ig축과 C의 J축의 사이각에 대한 COSINE		Dg
가속도계 비례 인자		Ka
자이로 비례 인자		Kg
가속도계 바이어스		Ba
자이로 바이어스		Bg
자이로 기울기 불균형 인자		Mg
좌표 변환 행렬 인자 (LEVELLING)		Cnb

표 1. 사용 기호표

### 3. 관성측정장치의 인자측정

#### (1) 스트랩다운 관성측정장치의 데이터 흐름

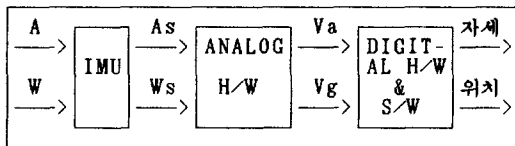


그림 1. 데이터 흐름 블록 다이어그램

스트랩다운 관성항법장치의 데이터 흐름은 그림 1.에 나타난 바와같이 선가속도와 각속도가 관성측정장치에 입력되었을때 감지기가 감지하여 전기적 신호를 출력하게 된다. 그리고 이전기적 신호가 A/D 변환기를 거쳐 디지털 데이터가 되고, 이 디지털 데이터가 소프트웨어로 처리되어 자세 및 위치에 관한 정보를 출력하게 된다.

#### (2) 관성측정장치의 입출력 방정식

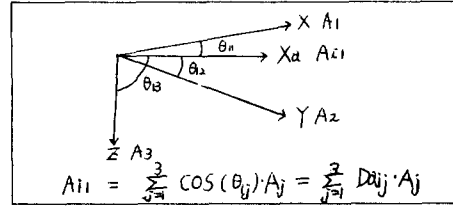


그림 2. 좌표축간의 벡터 관계

그림 2.에 도시된 바와같이 기준좌표계 C의 각축에 선가속도 벡터 A가 존재할 경우 가속도계의 Xa축에는 각축의 선가속도 성분과 Xa축과 각축과의 사이각에 대한 코사인값의 곱들을 합한 값이 입력된다. 다른축과 자이로의 Cg 좌표계에 나타나는 각속도도 같은 방법으로 유도하면 다음과 같이 정리된다.

$$A_i = D_a * A$$

$$W_i = D_g * W$$

관성측정장치의 인자측정에서는 선형인자들의 추정을 모색하고 비선형 인자들에 대해서는 시스템 관점에서 추정하기로 한다. 그래서 가속도계 및 자이로의 입출력 방정식을 아래와같이 비선형 성분을 오차로 모델링 하였다.

$$K_a * A_s = B_a + A_i + E_a$$

$$W_s = B_g + W_i + M_g * A_i + E_g$$

$$= B_g + D_g * W_i + M_g * D_g * A + E_g$$

#### (2) 절차 및 수식유도

입출력 방정식 인자들의 수치를 구하기 위해서는 인자들의 갯수 이상의 입력변화를 가해주어 출력을 얻어야 한다. 여기서 제시하는 방법은 관성측정장치 블록을 직육면체 블록(IMU TEST JIG) 내부에 고정시켜 직육면체 블록을 90도씩 회전시켜 가면서 입력을 변화시키는 방법이다. 각속도의 경우 지구 자전 각속도가 상대적으로 작고 수동 회전 테이블을 이용하여 쉽게 얻을 수 있으므로 이 두가지에 의한 입력변화를 발생시킨다. 관성측정장치의 동계 좌표축 위치 및 시험 절차를 표 2.에 나타냈다.

그리고 각 시험 절차에서 입력되는 선가속도 및 각속도 입력치가 표3.과 4.에 나타나 있다. 각속도 입력치에 대해서 유도를 해보면 다음과 같다. T초동안 회전 테이블을 TH(rad) 각 만큼 회전시킬 경우 T초 동안의 평균 각속도는 R=TH/T가 된다. 그러므로 동체 좌표계 (XYZ)와 (NED)가 일치한 상태에서 D축을 기준으로 시계방향으로 회전 (CW) 시킬경우 동체 좌표계의 각축에 입력되는 각속도는

$$X\text{-축} : \left[ \int_0^T ER_n \cdot \cos(R \cdot t) dt \right] / T = ER_n \cdot \sin(TH) / TH = 0x$$

$$Y\text{-축} : \left[ \int_0^T ER_n \cdot \sin(R \cdot t) dt \right] / TH = ER_n \cdot (\cos(TH) - 1) / TH = 0y$$

$$Z\text{-축} : [TH - ER_u \cdot T] / T = R + 0z \text{ 가 된다.}$$

지금까지 기술한 CALIBRATION 프로씨저를 수행해서 얻은 입력과 출력치(Va, Vg)를 표5.에 정리된 수식에 대입하여 풀면 각 인자들의 수치를 구할 수 있다.

POSIT-ION NO	AXES			TEST NO		
	X	Y	Z	0	CCW	CW
1	N	E	D	1	2	3
2	S	U	W	4	5	6
3	E	D	N	7	8	9
4	W	S	U	10	11	12
5	D	N	E	13	14	15
6	U	W	S	16	17	18

표2. 동체좌표 위치 및 시험 절차

TEST	SECIFIC FORCE		
	X	Y	Z
1	0	0	-G
4	0	+G	0
7	0	-G	0
10	0	0	+G
13	+G	0	0
16	-G	0	0

표3. 선가속도 입력

ANGULAR RATE											
TEST	0			TEST	CCW			TEST	CW		
	X	Y	Z		X	Y	Z		X	Y	Z
1	ERn	ERe	-ERu	2	0x	0y	-R+0z	3	0x	0y	+R+0z
4	-ERn	ERu	-ERe	5	-0x	+R-0z	-0y	6	-0x	-R-0z	0y
7	ERe	-ERu	ERn	8	0y	-R+0z	0x	9	0y	+R+0z	0x
10	-ERe	-ERe	ERu	11	-0y	-0x	+R-0z	12	-0y	-0x	-R-0z
13	-ERu	ERn	ERe	14	-R+0z	0x	0y	15	+R+0z	0x	0y
16	ERu	-ERe	-ERn	17	+R-0z	-0y	-0x	18	-R-0z	-0y	-0x

표4. 각속도 입력

(3) 시스템 관점(SYSTEM LEVEL)의 인자추정

선가속도 및 각속도 입력(A,W)이 관성 측정 장치(IMU)와 아날로그 H/W를 거쳐 디지털화 되어 출력(Va,Vg) 되었을때 입출력 관계는 아래와 같이 모델링 될 수 있다.

$$V_{aj} = B_{aj} + \sum_{k=1}^3 D_{ak} \cdot A_k + \sum_{k \leq m=1}^3 S_a(k+m) \cdot A \cdot A_m + E_{aj}$$

$$V_{gj} = B_{gj} + \sum_{k=1}^3 D_{gk} \cdot W_k + \sum_{k, m=1}^3 S_g(k+m) \cdot W_k \cdot W_m +$$

$$\sum_{k=1}^3 M_{gk} \cdot A_k + \sum_{k, m=1}^3 S_g(k+m) \cdot A_k \cdot A_m + E_{gj}$$

여기서, j=x,y,z

이 입출력 모델의 인자추정을 위해서는 교락 (CROSS-COUPLING) 효과가 출력에 나타나도록 입력을 발생시켜야 한다. 관성측정장치

$$K_{aj} = \frac{2 * G}{\sqrt{[Asj(13) - Asj(16)]^2 + [Asj(4) - Asj(7)]^2 + [Asj(10) - Asj(1)]^2}}$$

$$D_{ajx} = K_{aj} * [Asj(13) - Asj(16)] / G$$

$$D_{ajy} = K_{aj} * [Asj(4) - Asj(7)] / G$$

$$D_{ajz} = K_{aj} * [Asj(10) - Asj(1)] / G$$

$$B_{aj} = K_{aj} * \left[ \sum_{k=0}^5 Asj(3*k+1) \right] / 6$$

$$K_{gj} = \frac{2 * \sqrt{2} * TH}{\sqrt{\sum_{k=1}^6 [Ws_j(3*k) - Ws_j(3*k-1)]^2}}$$

$$D_{gjx} = K_{gj} * [Ws_j(15) - Ws_j(14) + Ws_j(17) - Ws_j(18)] / (4 * TH)$$

$$D_{g jy} = K_{gj} * [Ws_j(5) - Ws_j(6) + Ws_j(9) - Ws_j(8)] / (4 * TH)$$

$$D_{gjz} = K_{gj} * [Ws_j(3) - Ws_j(2) + Ws_j(11) - Ws_j(12)] / (4 * TH)$$

$$B_{gj} = K_{gj} * T * \left[ \sum_{k=0}^5 Ws_j(3*k+1) \right] / 6$$

$$M_g = \begin{bmatrix} Ws(13) - Ws(16) \\ Ws(7) - Ws(4) \\ Ws(10) - Ws(1) \end{bmatrix}^T - D_g * 2 * 0_z \quad * D_g / (2 * G), \quad j=x, y, z$$

표5. 인자 측정 방정식

블록을 X나 Y축을 기준으로 일정 각도 (예)

45도) 회전시켜 직육면체 블록에 고정시킨 후 앞에서 제시한 방법을 수행하면 교착 효과를 얻을 수 있다.

그러므로 앞에서 제시한 방법을 확장시켜 수평축 (X, Y)을 회전시킨 상태에서 입출력치를 얻어 주어진 모델에 대하여 최소 자승법(LEAST SQUARE METHOD)을 사용한 중회귀 분석(MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS)를 실시하여 인자들의 수치를 얻을 수 있다.

#### 4. 관성측정장치의 인자재측정

서론에서 언급된 바와같이 관성 항법 장치의 성능 저하를 막기 위해서는 시간경과에 따른 변화 인자들 (TIME-VARIANT PARAMETERS)에 대하여 그 변화량을 추정하여 보상에 주어야 하는데, 그 인자들과 입출력 방정식은 표6.과 같다고 가정한다.

변화인자

- \* 가속도계 바이어스
- \* 자이로 바이어스
- \* 자이로 길량 불균형 인자

입출력 방정식

$$EA = DBa + A$$

$$EW = DBg + W + DMg * A$$

$$\Rightarrow EW_x = DBg_x + W_x + DMg_{xx} * A_x$$

$$EW_y = DBg_y + W_y + DMg_{yy} * A_y$$

$$EW_z = DBg_z + W_z + DMg_{zz} * A_z$$

표6. 변화인자 및 입출력 방정식

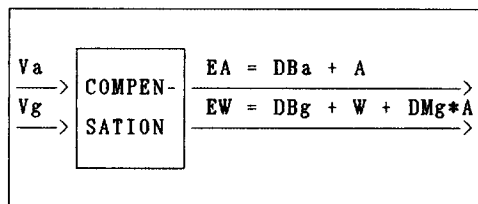


그림3. 입출력 블록 다이어그램

인자재측정의 수행을 위해서는 각 감지축(SENS-ING-AXIS)의 입력을 변화시키기 위한 회전 메카니즘이 필요하다. 여기서 제시하는 방법은 90도 및 180도를 정확히 회전시킬 수 있는 메카니즘을 사용한 방법이다.

순서	각 감지축의 회전각		
1	0°	0°	0°
2	180°	180°	180°
3	90°	0°	0°
4	0°	90°	0°

표 7. 감지축 회전각 및 순서

(1) 자세 변화가 없는 경우

가. 가속도계

입력출력 방정식이  $EA(1) = Cnb(1)*(-G) + DBa$

$EA(2) = Cnb(2)*(-G) + DBa$

$= Cnb(1)*(+G) + DBa$ 가 되므로

바이어스 변화량은

$DBa = (EA(1) + EA(2))/2$ 이 된다.

나. 자이로

가속도계의 인자재측정이 수행되었으므로 가속도계를 이용하여 Cnb를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} CTH1 &= -A3 / \sqrt{A2^2 + A3^2} \\ STH1 &= -A2 / \sqrt{A2^2 + A3^2} \\ CTH2 &= \sqrt{A2^2 + A3^2} / G \\ STH2 &= A1 / G \end{aligned}$$

표 8. 가속도와 변환 행렬의 관계

입력-출력 방정식은

$EW(1) = W(1) + DBg*A(1) + DBg$

$= Cnb(1)*ER + DBg*Cnb(1)*(-G) + DBg$

$EW(2) = W(2) + DMg*A(2) + DBg$

$= Cnb(2)*ER + DMg*Cnb(2)*(-G) + DBg$

$= Cnb(1)*(-ER) + DMg*Cnb(1)*(G) + DBg$

가 되므로 바이어스 변화량은

$DBg = (EW(1) + EW(2))/2$ 이 된다.

수평축의 경우 선가속도 성분이 없으므로

$EWx(1) - EWx(2) - 2*Cnb13(1)*ERv$

$= 2*Cnb1j(1)*ERj = DEWx$

$EWy(1) - EWy(2) - 2*Cnb23(1)*ERv$

$= 2*Cnb2j(1)*ERj = DEWy$ 이 된다.

그러므로 수평축의 지구 자전 각속도 성분은

$$\begin{bmatrix} ER1 \\ ER2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Cnb11(1) & Cnb12(1) \\ Cnb21(1) & Cnb22(1) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} DEWx \\ DEWy \end{bmatrix}$$

이 된다.

따라서 Zg축의 질량 불균형 변화량은  $DMgz =$

$[EWz(1) - EWz(2) - \sum_{j=1}^3 2*Cbr3j*ERj] / (2*G)$

이 된다. Xg, Yg축의 질량 불균형 변화량을

구하기 위해서는 각각의 축을 수직방향으로 회전(90도 회전)시켜 출력을 얻으면 된다.

$DMgxx = [Bgx - \sum_{j=1}^3 Cnb1j(3)*ERj] / A1(3)$

$DMgyy = [Bgy - \sum_{j=1}^3 Cnb2j(4)*ERj] / A2(4)$

(2) 자세 변화가 있는 경우

동체의 자세변화가 있는 경우는 변환 행렬 Cnb가

변화하므로 감지축을 180도 회전시켜도 회전

이전의 입력과 크기가 같고 부호 반대인 입력이

발생되지 않고, 또한 동체의 각 속도가 자이로의

입력으로 추가된다. 그러므로 자세변화가 없는 경

우와는 다른 알고리즘을 써야되며, 특히 자이로의

경우는 동체의 각속도를 추정하는 작업이 필요하다.

가. 가속도계

동체 좌표계에 입력되는 선가속도의 노름(NORM)은

G와 같으므로,  $G^2 = \sum_{j=1}^3 Aj^2 = \sum_{j=1}^3 (EAj - DBaj)^2$

$= \sum_{j=1}^3 (EAj^2 - 2*EAj*DBaj)$

$= EA^2 - \sum_{j=1}^3 2*EAj*DBaj$ 가 된다.

그러므로 바이어스 변화량은 각 감지축을 수직

방향으로 회전시켜 가면서 출력을 얻어 다음과

같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} DBax \\ DBay \\ DBaz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} EAx(1) & EAy(1) & EAz(1) \\ EAx(3) & EAy(3) & EAz(3) \\ EAx(4) & EAy(4) & EAz(4) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} (G^2 - EA(1)^2)/2 \\ (G^2 - EA(3)^2)/2 \\ (G^2 - EA(4)^2)/2 \end{bmatrix}$$

나. 자이로

자이로의 입출력 방정식은

$EW = DBg + WB + Cnb * ER + DMg * A$ 가 되므로,

동체의 회전 각속도  $WB$ 를 추정해야 된다.

$WB$ 는  $Cnb$ 와 마찬가지로 가속도계를 이용하여 추정할 수 있는데, 유도과정은 생략하고 결과 수식만 표 9.에 나타냈다.

$$\begin{aligned} \dot{TH1} &= \frac{\dot{A2}}{A3} + \frac{A1 * A2 * A1}{A3 * (A2^2 + A3^2)} \\ \dot{TH2} &= \dot{A1} / \sqrt{A2^2 + A3^2} \\ \dot{TH3} &= 0 \text{ (가정)} \\ \begin{bmatrix} WB1 \\ WB2 \\ WB3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -STH2 \\ 0 & CTH1 & STH1 * CTH2 \\ 0 & -STH1 & CTH1 * CTH2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} TH1 \\ TH2 \\ TH3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

표 9. 가속도 변화율 이용한 동체 각속도 추정

$$DEWj = EWj - WBj - Cnbj3 * ER3 + DMgj * Aj$$

이라고하면, 감지축의 회전 상태  $k=1, 2$ 의

경우는 (1)에서의 유사하게

$$DEWx(k) = DBgx + \sum_{j=1}^3 Cnb1j(k) * ERj$$

$$DEWy(k) = DBgy + \sum_{j=1}^3 Cnb2j(k) * ERj$$

$$DEWz(k) = DBgz + \sum_{j=1}^3 Cnb3j(k) * ERj$$

+  $DMgz * Az(k)$ 이 된다.

$$DEWx(1) - DEWx(2)$$

$$= \sum_{j=1}^3 [Cnb1j(1) - Cnb2j(2)] * ERj$$

을 다음과 같이 치환하여,

$$C1 = C2 * \cos(TH3) + C3 * \sin(TH3)$$

$$= \cos(TH3 - \cos(C2 / \sqrt{C2^2 + C3^2}))$$

$$* C2^2 + C3^2$$

HEADING 각  $TH3$ 를 구하면

$$TH3 = \sum_{j=1}^2 \cos[Cj / \sqrt{C2^2 + C3^2}] \text{이 된다.}$$

그러므로 각 인자들의 수식은 다음과 같이 정리된다.

$$DBgx = \sum_{k=1}^2 [DEWx(k) - \sum_{j=1}^3 Cnb1j(k) * ERj] / 2$$

$$DBgy = \sum_{k=1}^2 [DEWy(k) - \sum_{j=1}^3 Cnb2j(k) * ERj] / 2$$

$$DMgz = \frac{\sum_{k=1}^2 [DEWz(k) - \sum_{j=1}^3 Cnb3j(k) * ERj] * (-1)^k}{A3(2) - A3(1)}$$

$$DBgz = \frac{\sum_{k=1}^2 [DEWz(k) - \sum_{j=1}^3 Cnb3j(k) * ERj - DMgz * A(k)]}{2}$$

$$DMgx = [EWx(3) - WBx(3) - \sum_{j=1}^3 Cnb1j(3) - DBgx] / Ax(3)$$

$$DMgy = [EWy(4) - WBx(4) - \sum_{j=1}^3 Cnb2j(4) - DBgy] / Ay(4)$$

5. 결 론

지금까지 관성측정장치의 출력을 통한 관성 입력 추정 (COMPENSATION)을 위해 필요한 계수들의 측정 방법에 대하여 고찰해 보았다. 그런데 입출력 방정식에 비선형 항 (NONLINEAR TERM)이 존재하므로 인자들의 추정이 정확하게 되었어도 실시간 (REAL TIME) 입력 추정이 곤란하므로 입출력 관계를 잘 표현하면서 입력추정의 실시간 처리가 가능한 모델을 만들었고 앞으로 이 분야의 많은 연구가 기대된다.

관성항법장치의 성능 저하를 유발하는 가장 큰 요인이 감지기의 바이어스이므로 변화율을 정밀하게 추정에 보상함으로써 성능 저하를 막아야 하는데, 본 논문에서 이에 필요한 인자계측정 방법들을 제시하였다.

6. 참고문헌

- (1) ROBERT J.G. CRAIG "THEORY OF ERRORS OF A MULTIGIMBAL, ELASTICALLY SUPPORTED, TUNED GYROSCOPE" IEEE TRANSACTION ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEM VOL. AES-8 NO. 3, MAY 1972
- (2) 이장규외, "스트랩다운 관성측정장치의 오차보상" 서울대학교 공과대학 부속 생산기술연구소 1987.6
- (3) 박성현 "회귀 분석" 대영사 1983.3
- (4) 김종웅, "STRAPDOWN ALIGNMENT AND NAVIGATION SYSTEM", 대영전자 기술 연구소 기술보고서 86-0111-1, 1986. 5