

관성측정장치의 오차계수 식별기법 및 실험 IMU Calibration Technique and Laboratory Test

성 상 만*, 이 달 호**, 박 찬 국***, 이 장 규****

*서울대학교 전기공학부(Tel: 872-8190; Fax:878-8198; E-mail:ssm@asrignc1.snu.ac.kr)
 **경원대학교 전자공학과(Tel: 0342-750-5320; Fax: 0342-751-6149; E-mail: dhlee@mail.kyungwon.ac.kr)
 ***광운대학교 제어계측공학과(Tel: 940-5157; Fax: 942-7950; E-mail: cgpark@daisy.kwangwoon.ac.kr)
 ****서울대학교 전기공학부(Tel: 880-7308; Fax: 878-8198; E-mail: jglee@asrignc1.snu.ac.kr)

Abstracts: This paper presents the error parameter estimation technique for IMU(Inertial Measurement Unit) which is core sensor of INS(Inertial Navigation System) and verifies it via laboratory test. Firstly the error characteristic of gyroscope and accelerometer which is contained in IMU is examined and the error modelling is executed. The error of IMU can be divided into deterministic and random part, and the deterministic error can be divided into static and dynamic part. This paper consider the random part as constant. Secondly the error parameter estimation technique and following procedure for laboratory test is explained. Thirdly according to the test procedure the IMU test for static error is executed using 2-axis rate table and estimation result is presented with discussion about its validity.

Keywords: Parameter estimation, Error, Calibration, IMU, Laboratory test .

1. 서론

IMU는 INS가 그 목적을 수행하기 위하여 반드시 요구되는 장치이며 동시에 INS의 성능을 결정하는 주요한 요인이 된다. 다른 측정장치와 마찬가지로 IMU는 제작단계에서부터 오차요인을 포함하게 되며 항체의 운동 및 주변 환경에 따라 다양한 종류의 오차들이 복합적으로 작용한다. 이러한 오차는 항체의 가속도 및 각속도 측정오차로 작용하여 결국 INS의 오차로 나타나게 된다. 그러므로 INS의 성능을 향상시키기 위하여 오차 보정은 필수적이다. 정확한 오차보정을 위해서는 다양한 오차 요소에 대하여 오차모델을 설정하고 모델계수를 추정하기 위한 오차계수 식별기법 설정되어야 한다. 또한 실제 운항중인 항체와 유사한 조건을 실험실에서 제공하기 위한 시험기법이 설정되어야 한다.

본 논문에서는 진자형(pendulous type) 가속도계와 DTG(Dry Tuned Gyroscope)형 자이로를 채택한 스트랩다운 IMU의 오차계수 추정을 위한 기법을 알아보고 이를 실제 시험 데이터에 적용한다. 먼저 IMU를 구성하는 주센서인 가속도계와 자이로스코프의 오차의 특성을 규명하고 오차모델을 설정한다. 오차의 종류는 정적오차(deterministic error)와 랜덤오차(random error)로 구분되고 정적오차는 다시 정적오차(static error)와 동적오차(dynamic error)로 구분된다[1][2][3]. 또한 실제 시험 데이터로부터 오차계수를 추정하는 방법 및 시험절차를 설명하고 정적오차 계수를 추정한다.

2. 오차 모델링

2.1 가속도계 오차모델링

가속도계는 각축의 가속도를 독립적으로 측정하기 위하여 1자유도 진자형 가속도계 3개가 서로 수직이 되도록 배치한 IMU를 고려하면 가속도계 오차모델은 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_x V_x \\ K_y V_y \\ K_z V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{xx} & d_{xy} & d_{xz} \\ d_{yx} & d_{yy} & d_{yz} \\ d_{zx} & d_{zy} & d_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x a_x^2 \\ n_y a_y^2 \\ n_z a_z^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서 사용된 기호의 정의 및 단위는 다음과 같다.

K_i : i -축 환산계수[g]
 $\{d_{ij}\}$: 방향코사인 행렬
 n_i : i -축 g^2 항 계수[g/g²]
 b_i : i -축 바이어스[g]

V_i : i -축 가속도계 출력
 a_i : i -축 입력가속도[g]

방향코사인 행렬의 정의는 그림 1과 같다. 그림에서 i_A 는 가속도계 i 축이며, X, Y, Z축은 IMU의 3축을 나타낸다. 방향코사인 행렬은 가속도계 축과 IMU축의 비정렬(misalignment) 오차를 반영하는 부분으로서 비정렬 오차가 없는 이상적인 경우에는 단위행렬이 된다. g^2 항은 방향코사인 행렬에 비해 그 영향을 무시할 수 있을 정도로 작다고 알려져 있다. 한편 바이어스 항은 랜덤오차가 포함된 항으로서 본 논문에서는 상수로 가정하였으므로 추정값의 표준편차는 다소 크리라고 판단된다.

2.2 자이로스코프 오차모델링

자이로스코프는 DTG형 2축 자이로스코프 2개를 사용한다고 가정한다. IMU 내에서의 배치는 IMU의 3축을 X, Y, Z라고 한다면 하나의 자이로스코프는 회전축이 Z축이며 X, Y축 각속도를 측정하고, 나머지 하나의 자이로는 회전축이 X축이며 Y, Z축의 각속도를 측정한다고 가정한다. 이 경우 자이로스코프 오차모델은 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} K_x V_x \\ K_y V_y \\ K_z V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{xx} & d_{xy} & d_{xz} \\ d_{yx} & d_{yy} & d_{yz} \\ d_{zx} & d_{zy} & d_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_{xx} & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{yx} & m_{yy} & m_{yz} \\ m_{zx} & m_{zy} & m_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$+ \begin{bmatrix} n_x a_x a_z \\ n_y a_y a_z \\ n_z a_z a_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_x \dot{\omega}_y \\ A_y \dot{\omega}_x \\ A_z \dot{\omega}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x \omega_x \omega_z \\ C_y \omega_y \omega_z \\ C_z \omega_z \omega_x \end{bmatrix} + \dot{\alpha}_i \begin{bmatrix} mc_x \omega_x \\ mc_y \omega_y \\ mc_z \omega_z \end{bmatrix}$$

여기에서 사용된 기호의 정의 및 단위는 다음과 같다.

K_i : i -축 환산계수[rad/sec]
 $\{d_{ij}\}$: 방향코사인 행렬
 $\{m_{ij}\}$: 질량 불균형 행렬[rad/sec/g]
 a_i : i -축 입력가속도[g], ω_i : i -축 입력가속도[rad/sec]
 n_i : i -축 비등탄성(anisoelectricity)항 계수[rad/sec/g²]
 b_i : i -축 바이어스[rad/sec] A_i : i -축 각가속도항 계수[sec]
 $\dot{\alpha}_i$: i -축 모터 위상각(phase angle) mc_i : i -축 모터 커플링
 C_i : i -축 비등관성(anisoinertia)항 계수[1/rad/sec]

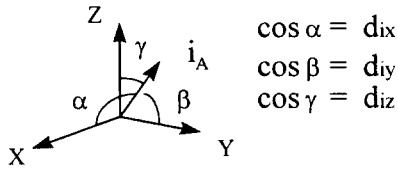


그림 1. 방향코사인 행렬의 정의

방향코사인 행렬, 질량 불균형 행렬, 비등탄성항 계수, 바이어스는 정적오차이다. 방향코사인 행렬의 정의는 가속도계의 경우와 같으며 입력가속도와 관계있는 항으로서 IMU 축과 자이로의 비정렬에 의해 발생한다. 비정렬이 없다면 방향코사인은 단위행렬이 된다. 질량불균형 행렬은 입력 가속도에 의해 영향을 받는 항으로서 자이로스코프 하나만을 고려하면 회전축외에 나머지 두 축에만 관계있는 것으로 모델링 되기도 하나[1][3], 본 논문에서는 참고문헌 [2]에서와 같이 회전축에도 관계있다고 가정하여 행렬의 형태로 일반화시켰다. 비등탄성항은 회전축과 입력축에 동시에 인가되는 가속도의 영향을 받는 항이다. 바이어스는 가속도계와 마찬가지로 랜덤성분이 포함된 항으로서 본 논문에서는 상수로 가정하였다. 한편 각가속도항 계수, 모터 위상각, 모터커플링, 비등탄성항 계수는 동적오차 부분이다. 각가속도항은 입력축에 각가속도가 인가되는 경우에 발생하며, 모터커플링 항 및 비등탄성항 계수는 회전축과 입력축에 동시에 각속도가 인가되는 경우에 발생한다. 모터커플링항은 자이로스코프 회전축에 각속도를 인가하는 경우에 발생하는 미끄럼(slip) 현상에 기인하는 것으로 입력가속도가 0.5Hz~2Hz 이내인 경우에만 영향을 미친다[4].

3. 시험 데이터에 의한 정규오차 추정

실험에 사용된 관성측정장치는 Litton 사의 LP-81 로써 3 개의 진자형(pendulous) 가속도계와 2 개의 2축 DTG(Dynamically Tuned Gyro)로 구성되어 있다. 표 1, 표 2 에 시험에 사용된 가속도계 및 자이로스코프 센서사양에 표시된 오차를 정리하였다. 바이어스는 첨가되는 잡음(noise)이 있으나 본 논문에서 사용한 오차모델의 바이어스는 이를 포함하고 있으므로 표 1, 표 2 에서 나타난 값보다 크다고 할 수 있다.

실제시험에서 인가된 입력의 정확도는 계수 추정오차와 밀접한 관계가 있으므로 정밀한 장비의 선택은 매우 중요하다. 본 논문에서는 정확한 자세 및 각속도 입력을 위하여 서울대학교 자동차어특화연구센터에서 보유하고 있는 Acutronics 사의 ACT-2000 2축 레이트 테이블을 사용하였다. ACT-2000 은 자세오차 10^{-4} ° 이내, 각속도 오차 10^{-3} °/s 이내의 정확도를 지니고 있다. 가속도 인가는 레이트 테이블에서 일정한 자세를 인가하여 중력이 IMU의 세축에 영향이 나타나도록 하였다. 한편 레이트 테이블 위에 IMU의 설치를 위한 치구 제작의 정밀도 역시 정확한 입력을 가하기 위해서 중요한 요소이다.

3.1 가속도계 오차계수 추정

가속도계의 경우 하나의 축에 대하여 추정하고자 계수는 6 개이므로 식 (3)과 같이 관성측정장치를 독립된 6 가지 이상의

표 1. 가속도계 센서사양(1σ)

오차의 종류	오차값	단위
바이어스	5e-8	g
방향코사인 행렬: d_{ix}	5e-6	-
d_{iy}	2.9e-4	
g^2 항	8e-5	g/g^2

표 2. 자이로스코프 센서사양(1σ)

오차의 종류	오차값	단위
바이어스	1.5e-7	rad / sec
방향코사인 행렬: d_{ix}	5e-6	-
d_{iy}	2.9e-4	
질량불균형 행렬: m_{ix}	4.8e-6	rad / sec/ g
m_{iy}	4.8e-6	
비등탄성항	4.8e-7(0.1)	rad / sec/ g ²

위치에 두고 가속도 측정값을 얻으면 최소자승법을 사용하여 한 축에 대하여 계수를 추정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_i(1) \\ \vdots \\ V_i(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x(1) & a_y(1) & a_z(1) & a_i^2(1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_x(n) & a_y(n) & a_z(n) & a_i^2(n) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{ix}/K_i \\ d_{iy}/K_i \\ d_{iz}/K_i \\ n_i/K_i \\ b_i/K_i \end{bmatrix} + v \quad (3)$$

여기서 사용된 기호의 정의는 다음과 같다.

$V_i(n)$: n번째 위치에서의 i-축 가속도계 출력

$a_i(n)$: n번째 위치에서의 i-축 입력가속도

v : 측정잡음

그런데 방향코사인은 정의에 의하여 식 (4)가 성립하므로 이로부터 환산계수를 구할 수 있다.

$$\left(\frac{d_{ix}}{K_i}\right)^2 + \left(\frac{d_{iy}}{K_i}\right)^2 + \left(\frac{d_{iz}}{K_i}\right)^2 = \frac{1}{K_i^2} \quad (4)$$

시험에서 사용한 위치수는 IMU X, Y, Z 축을 항법좌표계(NED)의 NED, SUW, EDN, WSU, DNE, UWS 에 일치시키는 6 가지이다. 이 경우 가속도계 3 축에 +g 및 -g 가 독립적으로 입력되어 총 6 개의 측정치를 얻는다. 이와 같이 총 19 회의 반복실험을 통하여 추정된 계수들의 평균과 분산을 표 3 에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 가속도계 오차계수는 각 실험마다 추정값이 거의 일정하므로 일치성(consistency)이 있는 결과를 보여주고 있다. 특히 환산계수는 표준편차가 매우 작음을 알 수 있다. 방향코사인 행렬의 평균값은 거의 단위행렬과 같으며 g^2 항의 평균값은 방향코사인 행렬에 비해 그 영향이 매우 적은데 이는 예상과 일치한다. 표 1 에서 주어진 오차값과, 표 3 과 비교하면 실험에서 추정된 방향코인 행렬은 센서사양에서 주어진 오차이내이며, g^2 항은 센서사양보다 큰 오차를 나타냄을 알 수 있는데 이는 레이트 테이블 자체의 진동과, 치구와 IMU 사이의 진동 등이 영향으로 추정된다. b_i 는 랜덤성분으로 인하여 각 실험마다 다소 차이를 보이고 있어 잡음 등 랜덤오차 추정이 필요함을 알 수 있다.

정북방향과 가속도계 축과의 장각오차를 추정하기 위하여 IMU의 Z축을 중심으로 -2° 0° 까지 회전 시키면서 방향코사인 행렬을 추정하였다. 그 중 d_{ix} 의 추정결과를 그림 2 에 도시하였다. IMU의 Z축을 중심으로 회전한 각을 δ 라고 하면 δ 와 d_{ix} 의 관계는 식 (5)와 같다.

$$d_{ix} = \cos \beta = \cos(90^\circ + \delta) = -\sin \delta \quad (5)$$

그림 2 와 식 (5)로부터 d_{ix} 에 -1° 정도의 천이(shift)가 있음을 알 수 있는데 이는 정북방향과 장각오차를 나타낸다.

3.2 자이로 오차계수 추정

자이로 오차계수 추정은 가속도계에 비하여 추정하여야 할 계수가 많으며 또한 가속도 및 각속도를 동시에 인가하여야 하므로 동시에 모든 계수를 추정하는 것이 용이하지 않다. 그러므로 오차계수 추정을 레이트시험과 다위치시험으로 나누어 단계적으로 수행한다.

먼저 레이트 시험으로부터 환산계수 및 방향코사인 행렬을

추정한다. 레이트 시험은 일정한 레이트를 자이로에 가하는 방법이며, 식 (6)은 x 축에 대한 측정식을 나타낸 것이다. y, z 축에 대해서도 측정식이 유사하다[2].

$$\frac{1}{T} \begin{bmatrix} V_x(3) - V_x(2) \\ V_x(5) - V_x(6) \\ V_x(9) - V_x(8) \\ V_x(11) - V_x(12) \\ V_x(15) - V_x(14) \\ V_x(17) - V_x(18) \end{bmatrix} = 2\omega_{ni} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{ix} / K_x \\ d_{iy} / K_x \\ d_{iz} / K_x \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $V_i(n)$ 은 n 번째 실험에서의 i 축 자이로 출력, ω_{ni} 은 자이로에 가한 입력 각속도, T는 자이로 출력을 얻는 시간을 나타낸다. 시험에서 사용한 위치수는 IMU X, Y, Z 축을 항법좌표계(NED)의 NED, SUW, EDN, WSU, DNE, UWS에 일치시키는 6 가지 위치이며 각 위치에 대하여 레이트를 0, 10deg/sec, -10deg/sec로 가하여 총 18 개의 측정치를 얻는다. 최소자승법을 적용하여 5 회의 반복된 레이트 시험에서 얻은 데이터로 부터 얻은 결과를 표 4 에 표시하였다. 추정된 환산계수는 가속도계와 마찬가지로 일치된 값을 보이고 있다. 방향코사인 행렬 역시 표준편차가 표 2 에 나타난 센서사양이내이므로 시험에 의한 추정값이 신뢰성이 있다고 판단할 수 있다.

다음으로 다위치 시험에 의하여 질량불균형 행렬, 비등관성항 계수, 바이어스를 추정한다. x 축 오차계수를 추정하는 경우 측정식은 식 (7)과 같다. y, z 축에 대해서도 측정식이 유사하다[2].

$$\begin{bmatrix} K_x V_x(1) - d_{\omega_x}(1) - d_{\omega_y}(1) - d_{\omega_z}(1) \\ \vdots \\ K_x V_x(n) - d_{\omega_x}(n) - d_{\omega_y}(n) - d_{\omega_z}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x(1) & a_y(1) & a_z(1) & a_{\omega_x}(1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_x(n) & a_y(n) & a_z(n) & a_{\omega_x}(n) & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_n \\ e_n \\ e_n \\ n_i \\ b_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $\omega_i(n)$, $a_i(n)$ 은 n 번째 위치에서의 자이로에 가한 입력 각속도 및 가속도이며, $\{e_i\}$ 는 방향코사인 행렬과 질량불균형 행렬의 곱이다. 시험 위치수의 증가에 따라 추정값의 정확도가 증가하나[1] 실제 시험에서는 시험 위치수를 무한히 증가시키는 것이 불가능하다. 그러므로 본 논문에서는 시험 위치수에 따른 추정값의 정확도가 더 이상 크게 개선되지 않는 24 개의 위치수를 선정하여 시험하였다. 시험에서 사용한 위치는 IMU X, Y, Z 축을 항법좌표계(NED)에 일치시키는 24 개의 위치에서 롤각을 45° 회전한 다음 요각을 45° 회전하여 구한 위치이다. 이와같이 시험에서 얻은 데이터를 식 (6)에 대입한 후 최소자승법을 적용하면 $\{e_i\}$, 비등관성항 계수 및 바이어스를 추정할 수 있다. $\{e_i\}$ 로부터 질량불균형 행렬을 구하는 방법은 식 (8)과 같다. 여기에서 방향코사인 행렬은 레이트 시험에서 구한 값을 이용한다.

$$\{m_{ii}\} = \{d_{ij}\}^{-1} \{e_{ij}\} \quad (8)$$

설명한 기법에 의하여 다위치 시험을 3회 반복하여 추정한 오차계수를 표 5에 표시하였다. 질량불균형 행렬, 비등관성항, 바이어스 모두 표준편차가 표 2의 자이로스코프 사양보다 다소 큰 값을 보인다. 이는 시험 위치수를 24 위치로 제한하여 시험 가능한 경우의 수를 크게 감소시킨데서 기인한 것으로 판단된다. 바이어스의 경우에 대해서는 잡음 등 랜덤성분을 상수로 가정한다에서도 그 원인을 찾을 수 있다. 그러므로 자이로스코프 또한 랜덤오차에 대한 추정이 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 스트랩다운 IMU의 오차계수 추정을 위한 기법을 알아보고 이를 실제 시험 데이터에 적용하였다. 이를 위하여 먼저 IMU의 오차계수 모델링에서는 정규오차 및 불규칙

오차로 구분하고 정규오차는 다시 정적오차 및 동적오차로 나누었다. 다음으로 설정된 모델에 대하여 오차계수를 추정하는 방법 및 절차에 대하여 설명하였다. 마지막으로 실제 시험을 통하여 정적오차계수 추정의 결과를 제시하였다. 오차계수 추정결과 랜덤성분이 포함된 가속도계 및 자이로의 바이어스는 표준편차가 상대적으로 크므로 랜덤오차 보상이 필요함을 알 수 있었다. 가속도계 방향코사인 행렬 및 자이로스코프 방향코사인 행렬의 추정값 표준편차는 주어진 센서사양의 오차 이내이므로 추정결과가 신뢰성이 있다고 판단할 수 있었다. 가속도계의 g^2 항은 표준편차가 센서사양에 비해 다소 큰 값을 나타내는데 이는 시험시의 진동에 의한 영향으로 판단된다. 한편 다위치 시험에 의한 자이로스코프 질량불균형 행렬 및 비등관성항은 시험 위치 선정을 24 위치로 제한하여 수행한 결과 센서사양에 비해 다소 큰 표준편차 값을 보인다. 다위치 시험의 시험위치 선정은 추후에 연구가 더 진행되어야 할 것이다. 전체적으로 고찰하면 본 논문에서 설정된 IMU 오차계수 모델 및 오차계수 추정을 위한 시험절차는 실제시험 결과에서 알 수 있듯이 대부분 일치된 추정값을 보임으로써 그 타당성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] U. Krogmann, "Identification Procedures for Strapdown Sensor Parameters by Laboratory Testing," *DGON-Symposium Gyro Technology*, Bochum, Germany, 1978.
- [2] 이장규, 박찬국, 강태삼, 김일선, "스트랩다운 관성측정장치 오차계수 추정 및 평가," 국방과학연구소 연구보고서 MSRD-417-90235, 1990.
- [3] D. K. Joos, "Determination and Evaluation of Strapdown-Sensor-Parameters from System-Test-Data", *Conference-Symposium Gyro Technology*, Bochum, Germany, 1978.
- [4] R. J. G. Craig, "Dynamically Tuned Gyros in Strapdown Systems," *Conference Proceedings No. 116, N.A.T.O. Advisory Group for Aerospace Research and Development, Florence, Italy, 2-5 Oct. 1972.*

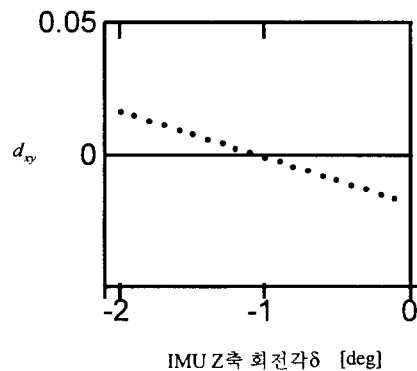


그림 2 IMU Z 축 회전에 따른 d_{iy} 추정값

표 3 가속도계 오차계수 추정값

계수	평균	표준편차	계수	평균	표준편차
K_x	1.8985e-4	2.5975e-8	d_{ix}	1.0000	5.0642e-8
K_y	1.8984e-4	1.7064e-8	d_{iy}	-4.9479e-4	1.1901e-4
K_z	1.8984e-4	2.9289e-8	d_{iz}	-5.7279e-5	1.4827e-4
n_x	1.2262e-4	1.8868e-4	d_{yx}	3.9042e-4	9.4385e-5
n_y	2.6984e-4	1.7791e-4	d_{yy}	9.9998e-1	7.6319e-7
n_z	2.4623e-5	1.3792e-4	d_{yz}	-6.8237e-3	1.1146e-4
b_x	1.2774e-4	1.0607e-4	d_{zx}	-3.1600e-5	1.0558e-4
b_y	-4.1077e-4	9.1146e-5	d_{zy}	6.8560e-3	1.0739e-4
b_z	-2.8668e-6	8.7050e-5	d_{zz}	9.9998e-1	7.3262e-7

표 4 레이트 시험에 의한 자이로 오차계수 추정값

계수	평균	표준편차	계수	평균	표준편차
K_x	1.9067e-6	6.1975e-11	d_{yx}	-8.0259e-3	1.8820e-5
K_y	9.5319e-7	2.0464e-11	d_{yy}	9.9995e-1	1.3680e-7
K_z	9.5334e-7	2.6995e-11	d_{yz}	-6.5896e-3	1.6258e-5
d_{xx}	9.9997e-1	6.0928e-8	d_{zx}	-8.0201e-5	6.5080e-6
d_{yy}	8.0458e-3	7.4357e-6	d_{zy}	6.5948e-3	1.7972e-5
d_{yz}	1.6354e-4	1.1697e-5	d_{zz}	9.9998e-1	1.1860e-7

표 5 다위치 시험에 의한 자이로 오차계수 추정값

변수	평균	표준편차	변수	평균	표준편차
m_{xx}	-1.3146e-1	5.6551e-5	m_{zz}	-1.5983e-1	3.5481e-5
m_{xy}	-2.3803e-2	4.6099e-5	n_x	9.0617e-3	9.0958e-5
m_{xz}	2.0102e-2	2.5943e-5	n_y	9.6535e-3	6.0835e-5
m_{yx}	-2.1414e-2	3.1323e-5	n_z	3.0186e-2	3.2701e-5
m_{yy}	-1.3067e-1	3.6333e-5	b_x	-2.4041e-3	8.3965e-6
m_{yz}	-2.0939e-2	6.3262e-5	b_y	3.1356e-3	2.4579e-5
m_{zx}	-7.2845e-3	5.2571e-5	b_z	-1.0219e-2	2.5252e-5
m_{zx}	8.5518e-3	1.6965e-5			