한국항해항만학회지 제35권 제10호, pp. 785~791, 2011 (ISSN-1598-5725)
Journal of Navigation and Port Research
DOI : http://dx.doi.org/10.5394/KINPR.2011.35.10.785

소형 선박용 관성측정장치 개발을 위한 MEMS 기반 관성 센서의 평가와 선정

†임 정 빈

† 목포해양대학교 해사대학 해상운송시스템학부 교수

Evaluation and Selection of MEMS-Based Inertial Sensor to Implement Inertial Measurement Unit for a Small-Sized Vessel

†*Jeong-Bin Yim*

† *Division of Maritime Transportation System, College of Maritime Sciences, Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea*

요 약 : 본 논문에서는 소형 선박용 관성측정장치(Inertial Measurement Unit, IMU) 개발에 적합한 MEMS(Micro-Electro Mechanical System) 기반의 관성 센서 평가와 선정에 관하여 기술했다. 먼저, 오일러 공식에 기초한 관성 센서의 오차 모델과 잡음 모델을 정의하고, 앨런 분산(Allan Variance) 기법과 몬테카르로(Monte Carlo) 시뮬레이션 기법을 도입하여 관성 센서를 평가하였다. ADIS16405, SAR10Z, SAR100Grade100, LIS344ALH, ADXL103 등 다섯 가지 관성 센서에 대한 평가결과, ADIS16405의 자이로와 가속도계를 조합한 경우 오차가 가장 작게 나타났는데, 600 초 경과시 속도 오차의 표준편차가 약 160 m/s, 위치 오차의 표준편차가 약 35 km로 나타났다. 평가를 통해 ADIS16405 관성 센서가 IMU 구축에 최적임을 알았고, 이러한 오차 감소 방법에 대해서 참고문헌을 조사하여 검토하였다.

핵심용어 : 소형 선박, 관성 측정 장치, MEMS 기반 관성 센서, 속도 오차, 위치 오차

Abstract : *This paper describes the evaluation and selection of MEMS(Micro-Elect Mechanical System) based inertial sensor to fit to implement the Inertial Measurement Unit(IMU) for a small-sized vessel at sea. At first, the error model and the noise model of the inertial sensors are defined with Euler's equations and then, the inertial sensor evaluation is carried out with Allan Variance techniques and Monte Carlo simulation. As evaluation results for the five sensors, ADIS16405, SAR10Z, SAR100Grade100, LIS344ALH and ADXL103, the combination of gyroscope and accelerometer of ADIS16405 is shown minimum error having around 160 m/s standard deviation of velocity error and around 35 km standard deviation of position error after 600 seconds. Thus, we select the ADIS16405 inertial sensor as a MEMS-based inertial sensor to implement IMU and, the error reducing method is also considered with the search for reference papers.*

Key words : *small-sized vessel, inertial measurement unit, MEMS-based inertial sensor, velocity error, position error*

1. 서 론

최근 반도체 기술의 발전으로 기존 관성 센서와 달리 소형, 저가격, 저전력 소모의 관성 센서가 MEMS(Micro-Electro Mechanical System) 기술을 기반으로 연구 및 개발되고 있다. 이러한 관성 센서는 항공기, 무기체계, 잠수함 등에 사용하는 관성항법 시스템(Inertial Navigation System, INS)의 관성측정 장치(Inertial Measurement Unit, IMU)에 적용되는데, 최근에는 MEMS 기반 관성 센서를 이용한 IMU(이하 MEMS-IMU) 연구가 광범위하게 진행되고 있다(Volker Kempe, 2011; Mohamed Gad-el-Hak, 2006).

MEMS-IMU는 MEMS 기반 관성 센서 오차를 보상하기 위해 일반적으로 GPS(Global Positioning System)와 연동시킨 후, 칼만 필터(Kalman Filter, KF)를 적용하여 시스템을 구축한다. KF를 적용하는 경우, 시스템 변수와 잡음 상태에 대한 사전지식이 필요하기 때문에 MEMS-IMU를 구축하기 전에 이러한 센서들의 잡음 특성을 규명하는 것이 중요하다(Chris Goodall et. al., 2005; Naserel-Sheimy et. al., 2006).

본 연구의 최종 목적은 저가면서 가볍고 부피가 작으며 전력 소모가 적은 소형 선박용 관성항법 장치를 개발하는 것이고, 본 연구의 목적은 다양한 MEMS 기반 관성 센서의 오차 특성을 규명하여 최적의 관성 센서를 선정하는데 있다. 우선, 관성 센서 오차 모델과 잡음 모델을 정의한 후, 다양한 센서들의 특성과 오차를 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation) 기법을 적용하여 분석하였다. 이를 통해 최적의 관성 센서를 선정하고, 오차 감소 방안을 참고문헌을 통해 검토하였다.

† 교신저자 : 종신회원, jbyim@mmu.ac.kr 061)240-7170

2. 관성 센서 오차 모델

2.1 관성 센서 오차 모델

Fig. 1과 같이 세 축이 서로 직교하는 가속도계와 자이로스코프(gyroscope, 이하 자이로)를 플랫폼(Platform)에 설치한 6-자유도 운동의 관성측정장치(Inertial Measurement Unit, IMU)를 고려한다(S. M. Bennett et. al., 1998).

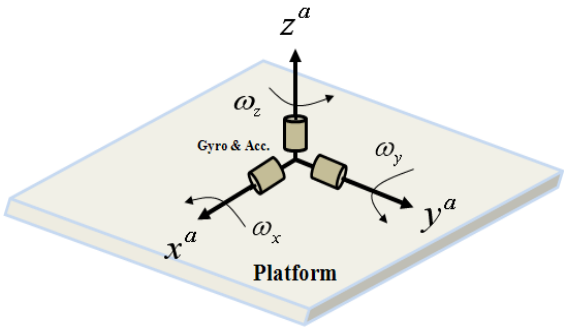

Fig. 1 Inertial Measurement Unit(IMU) of six degree of freedom with 3-axis accelerometer and 3-axis gyroscope

Fig. 1에서 가속도계는 플랫폼 내부에서 $\{x^a, y^a, z^a\}$로 구성된 3차원 관성 공간을 감지하고, 자이로는 이 관성 공간에서 $\{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}$의 3-축 각속도를 측정하여 IMU에 대한 상대 위치를 계산한다. 계산 절차는, 자이로 각속도를 이용하여 플랫폼의 회전 행렬을 구하고, 가속도를 플랫폼 좌표계로 변환시켜 두 번 적분하여 위치를 구한다. 이러한 관성측정 과정에서 오차가 발생하면 시간 경과에 따라 위치 오차가 누적된다.

Fig. 2는 가속도계의 3-축 좌표 $\{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}$가 플랫폼의 3-축 좌표 $\{x^p, y^p, z^p\}$와 서로 직교하지 않아 오차를 야기하는 상태를 나타낸다. 이러한 센서들의 부정합 오차는 그림에 나타낸 각도 차, $\{\alpha_{xy}, \alpha_{xz}, \alpha_{yx}, \alpha_{yz}, \alpha_{zx}, \alpha_{zy}\}$를 이용하여 가속도계 좌표를 플랫폼 좌표에 정렬시킬 수 있다.

Fig. 2에서, 3-축 가속도계에서 측정한 가속도 $\boldsymbol{f}^a$ 은 다음 식(1)을 적용하여 플랫폼 좌표계에서의 가속도 $\boldsymbol{f}^p$ 로 변환시킬 수 있다(Claudia C. Meruane Naranjo, 2008).

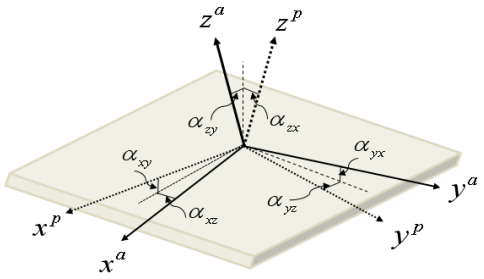

Fig. 2 Drawing for the mis-alignment between 3-axis accelerometers and platform coordinate axes(Claudia C. Meruane Naranjo, 2008)

$$\boldsymbol{f}^p = \boldsymbol{T}_a^p \boldsymbol{f}^a \tag{1}$$

여기서, $\boldsymbol{T}_a^p$ 는 다음 식(2)과 같이 가속도계 좌표계에서 플랫폼 좌표계로의 변환을 나타내고, α_{ij} 는 j 의 플랫폼 축에 대한 i 의 가속도계 축 사이에서 발생한 회전 각도를 의미한다.

$$\boldsymbol{T}_a^p = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_{yz} & -\alpha_{zy} \\ \alpha_{xz} & 1 & -\alpha_{zx} \\ -\alpha_{xy} & \alpha_{yx} & 1 \end{pmatrix} \tag{2}$$

그리고 플랫폼 내부에서 측정한 각속도 $\boldsymbol{\omega}_{ing}^g$ 는 다음 식(3)을 적용하여 지구 기준 플랫폼 좌표계의 각속도 $\boldsymbol{\omega}_{inp}^p$ 로 변환된다.

$$\boldsymbol{\omega}_{inp}^p = \boldsymbol{T}_g^p \boldsymbol{\omega}_{ing}^g \tag{3}$$

여기서, $\boldsymbol{T}_g^p$ 는 자이로 좌표계에서 플랫폼 좌표계로의 변환을 나타내고, γ_{ij} 는 j 의 플랫폼 축에 대한 i 의 자이로 축 사이의 회전 각도를 의미한다.

$$\boldsymbol{T}_g^p = \begin{pmatrix} 1 & -\gamma_{yz} & -\gamma_{zy} \\ \gamma_{xz} & 1 & -\gamma_{zx} \\ -\gamma_{xy} & \gamma_{yx} & 1 \end{pmatrix} \tag{4}$$

상기 식들은 플랫폼-가속도계-자이로의 부정합 오차만을 나타낸 것인데, IMU 최종 단에서는 관성 센서의 다양한 오차가 더해져서 출력된다. Fig. 3은 위에 기술한 부정합 오차를 $\boldsymbol{T}^{-1}$ 로 표시한 관성 센서의 오차 모델이다(I. Skog et. al., 2006).

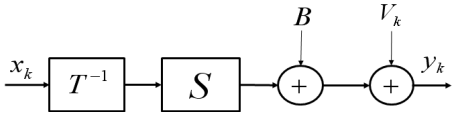

Fig. 3 Inertial sensor error model including various error sources

Fig. 3에서, 가속도계에 대한 출력을 $\boldsymbol{y}_k = \tilde{\boldsymbol{f}}^a$ 로 표시하고, 자이로에 대한 출력을 $\boldsymbol{y}_k = \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ing}^g$ 로 표시하면, 다음 식(5)과 식(6)으로 각각 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\boldsymbol{f}}^a = \boldsymbol{S}_a (\boldsymbol{T}_a^p)^{-1} \boldsymbol{f}^p + \boldsymbol{B}_a + \boldsymbol{V}_a \tag{5}$$

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ing}^g = \boldsymbol{S}_g \boldsymbol{\omega}_{ing}^g + \boldsymbol{B}_g + \boldsymbol{V}_g \tag{6}$$

여기서, $\boldsymbol{S}_a$, $\boldsymbol{B}_a$, $\boldsymbol{V}_a$, $\boldsymbol{S}_g$, $\boldsymbol{B}_g$, $\boldsymbol{V}_g$ 등은 가속도계(아래 첨자 a 로 표시)와 자이로(아래 첨자 g 로 표시)의 스케일 팩터(scale factor), 바이어스(bias), 측정 잡음 등을 각각 나타낸다. 한편, $\boldsymbol{S}_a$ 와 $\boldsymbol{S}_g$ 는 가속도계와 자이로의 분해능에 따라 결정되는 고정 값이기 때문에 본 연구에서는 시간 경과에 따라 변하는 잡음 특성, $\boldsymbol{B}_a$, $\boldsymbol{V}_a$, $\boldsymbol{B}_g$, $\boldsymbol{V}_g$ 만을 고려하였다.

2.2 관성 센서 잡음 모델

관성 센서 잡음 모델은 앨런 분산(Allan Variance, AV) 기법을 적용하였다. AV는 시간 경과에 따른 MEMS 기반 관성 센서의 다양한 통계적 특징을 측정하기 위한 기술인데, MEMS 기반 자이로에 대한 AV 측정방법은 다음과 같다. 자이로의 각속도를 τ_s 의 샘플링 시간으로 M 개 샘플링한 후, 다시 L 개의 데이터 샘플로 그룹을 구성하면, 각 그룹은 $\tau = L\tau_s$ 시간에 해당하는 데이터를 갖는다. 자이로 연속 출력을 $\Omega(t)$ 로 두고, 이산시간 간격 $t = k\tau_s$ ($k = 1,2,3,\cdots,M$) 로 측정하는 경우, 각도를 θ_k 로 나타내면, $k\tau_s$와 ($k\tau_s + \tau$) 사이의 평균 각도는 $\bar{\theta}_k(\tau) = \frac{1}{\tau}\int_{k\tau_s}^{k\tau_s+\tau}\Omega(t)dt$로 주어지고, 이에 대한 AV는 다음 식(7)로 정의된다(Giorgio De Pasquale et. al., 2010).

$$\sigma^2_{AVAR}(\tau) = \frac{1}{2\tau^2(M-2L)}\sum_{k=1}^{M-2L}(\theta_{k+2L} - 2\theta_{k+L} + \theta_k)^2 \quad (7)$$

가속도계도 역시 상기 절차를 통해서 AV를 구할 수 있다. 이러한 관성 센서에 대한 AV의 통계 값은 센서 제작사에서 제공하는데, 주로 앵글 랜덤 워크(Angle Random Work, ARW), 바이어스 불안정성(Bias Instability, BI), 레이트 랜덤 워크(Rate Random Walk, RRW), 드리프트 레이트 램프(Drift Rate Ramp, DRR) 등이다. 이러한 용어는 아직 한글로 정의된 바 없고, 한글로 번역하기도 곤란하기 때문에 본 연구에서는 영문 약자를 그대로 사용한다. 여기서, ARW는 고주파 성분의 잡음으로 다른 잡음과 비교하여 짧은 시간동안 발생하는 일종의 백색 잡음(white noise)으로 고려한다. BI는 저주파 영역에서 일종의 프릭커(flicker) 잡음으로 나타나며, 특히 센서 안정성 결정에 중요한 잡음 특성이다. RRW는 긴 시간동안 변하는 것으로 불규칙하게 분포한다. DRR은 통계적인 오차에 포함되는 것으로 장시간 동안 천천히 일정하게 변한다. 여기서, MEMS 기반 자이로 오차에 큰 영향을 미치는 것은 ARW와 BI이고, RRW와 DRR은 일정하거나 불규칙하게 나타나기 때문에 본 연구에서는 ARW와 BI에 대해서만 고려하였다(Volker Kempe, 2011; Mohamed Gad-el-Hak, 2006).

ARW에 대한 AV는 다음 식(8)로 나타나고, BI에 대한 AV는 식(9)로 나타난다(Martin Vagner, 2011, Songlai Hanet. al., 2009).

$$\sigma^2_{ARW}(\tau) = \frac{N^2_{AV}}{\tau} \quad (8)$$

$$\sigma^2_{BI}(\tau) = \frac{2B^2_{AV}}{\pi}\left[\ln 2 - \frac{\sin^3\omega}{2\omega^2}(\sin\omega + 4\omega\cos\omega) + C_i(2\omega) - C_i(4\omega)\right] \quad (9)$$

여기서, $\omega = \pi f_o \tau$, f_0 는 차단주파수, $C_i(\,)$ 는 코사인 적분, N_{AV}는 ARW의 계수, B_{AV}는 BI의 계수이다. 그리고 상기 식(8)과 식(9)의 AV 값은 서로 독립적이기 때문에 다음 식(10)과 같이 서로 더하여 대표적인 값으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma^2_{AVAR}(\tau) = \sigma^2_{ARW}(\tau) + \sigma^2_{BI}(\tau) \quad (10)$$

2.3 자이로 센서 잡음 모델

지구를 참조(아래 첨자 e 로 표시)하는 자이로 센서의 잡음 모델은 다음 식(11)과 같이 이산시간 k 에 대한 각속도로 나타낼 수 있다(Kim Mathiassen, 2010; D. H. Titterton et. al., 2009).

$$\dot{\theta}_e[k] = v_w + v_P \quad (11)$$

여기서, v_w 는 백색 잡음으로 위의 식(5)의 측정 잡음 $\boldsymbol{V}_g$ 에 해당하고, 이에 대한 AV는 위의 식(8)로 추정할 수 있다. v_P 는 프릭커 잡음으로 위의 식(5)의 바이어스 $\boldsymbol{B}_g$ 에 해당하고, 이에 대한 AV는 위의 식(9)로 추정할 수 있다.

위의 식(11)의 $\dot{\theta}_e[k]$ 를 샘플링 시간 T 로 적분하면 다음 식(12)과 같은 자이로 각도에 대한 이산 모델이 된다.

$$\theta_e[k+1] = \theta_e[k] + T\dot{\theta}_e[k] \quad (12)$$

2.4 가속도계 센서 잡음 모델

가속도를 $\ddot{x}_e[k]$ 로 나타내고, 속도를 $\dot{x}_e[k]$, 거리를 $x_e[k]$ 로 나타내면, 가속도계 센서 잡음 모델은 오일러 방법을 적용하여 다음 식(13)과 같이 나타낼 수 있다(Kim Mathiassen, 2010; D. H. Titterton et. al., 2009).

$$\begin{bmatrix} x_e[k+1] \\ \dot{x}_e[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_e[k] \\ \dot{x}_e[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T \end{bmatrix}\ddot{x}_e[k] \quad (13)$$

한편, 가속도계 잡음은 자이로와 달리 백색 잡음만 나타나기 때문에 가속도 오차는 다음 식(14)로 나타나고, 여기에 더하여 가속도는 관성의 영향을 받기 때문에 자이로 각도 $\theta_e[k]$ 에 대한 지구 중력 가속도 g 가 부가된다. 고도 $h = 0$ 인 해수면에서의 위도(Lat)에 대한 g 는 다음 식(16)으로 구할 수 있다(D. H. Titterton et. al., 2009).

$$\ddot{x}_e[k] = v_w[k] \quad (14)$$

$$\ddot{x}_e[k] = v_w[k] + g\sin(\theta_e[k]) \quad (15)$$

$$g(0) = 9.78(1 + 5.30\times10^{-3}\sin^2 Lat - 5.9\times10^{-6}\sin^2 2Lat) \quad (16)$$

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 방법

시뮬레이션은 랜덤 변수를 이용하는 몬테카르로(Monte Carlo, MC) 기법을 적용하였다. 관성 센서에 랜덤 잡음을 삽입한 오차 모델에서 M 개의 샘플을 취한 경우의 기댓값을 $\hat{e}_k$ ($k = 0,1,2,\cdots,M$)로 나타내고, M 개의 샘플을 L 개의 데이터

그룹으로 구분한 기댓값을 $\{\{\hat{e}_k^i,\ k=0,1,2,\cdots,M\}, i=1,2,3,\cdots,L\}$로 나타내면, 이에 대한 그룹 평균 $\hat{m}_k^L$은 다음 식(17)이 되고, 공분산 행렬 $\hat{Q}_k^L$은 다음 식(18)로 나타낼 수 있다(Jonathan Pengelly, 2002; Eric C. Anderson, 1999; Jonathan Goodman 2011).

$$\hat{m}_k^L = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}\hat{e}_k^i \tag{17}$$

$$\hat{Q}_k^N = \frac{1}{L-1}\sum_{i=1}^{L}(\hat{e}_k^i-\hat{m}_k^L)(\hat{e}_k^i-\hat{m}_k^L)^T \tag{18}$$

여기서, T는 전치를 의미한다. 본 연구에서는 상기 식(18)을 몬테카르로 시뮬레이션에 적용하여 오차를 평가하였다..

3.2 시뮬레이션에 적용한 변수

다음 Table 1과 Table 2는 각각 본 연구에 적용한 세 가지 자이로와 가속도계에 대한 주요 잡음 특성을 나타낸다. 여기서, ADIS16405(Analog Device, 2009)는 3-축 자이로와 가속도계를 내장하고, SAR10Z(Sensonor, 2009)과 SAR100Grade100 (Sensonor, 2010)은 1-축 자이로를 내장하며, LIS344ALH(ST Microerectronics, 2008)은 3-축 선형 가속도계를 내장하고, ADXL103(Analog Device, 2004)은 1-축 가속도계를 내장하고 있다.

Table 1 Noise parameters of gyroscopes

Product	Angle Random Work ($^\circ/\sqrt{hr}$)	Bias Instability ($^\circ/hr$)
ADIS16405	2.0	25.2
SAR10Z	1.8	125
SAR100Grade100	0.65	100

Table 2 Mechanical parameters of accelerometers

Product	Dynamic Range (g)	Noise Density ($\mu g/\sqrt{Hz}$)	Bandwidth (Hz)
ADIS16405	± 18	500	330
LIS344ALH	± 6	50	1,800
ADXL103	± 1.7	110	5,500

3.3 시뮬레이션 결과

Table 1의 ARW와 BI 및 Table 2의 잡음 밀도(Noise Density)를 이용하여 관성 센서들의 오차를 분석하였다.

(1) 자이로에 대한 AV 시뮬레이션 결과

Fig. 4는 Table 1의 세 가지 자이로에 대한 AV 시뮬레이션 결과로서, 'ADIS16405(Real Data)'로 표시한 그래프는 이 센서의 자이로에 대한 실제 AV 데이터(Analog Device, 2009)를 나타내고, 'ADIS16405(AV)'는 위의 식(10)을 이용하여 추정한 AV이며, 'ADIS16405(Gyro Model)'는 식(7)에 몬테카르로 시뮬레이션을 적용한 AV를 나타낸다. 100 초 부근까지 이들 세 가지 결과가 일치하고, 100 초 이후부터는 실제 데이터와 추정 결과에 차이가 발생하고 있다. 이 차이는 AV 계산에 ARW와 BI 만을 적용하였기 때문인데, Fig. 4로부터 ARW와 BI만을 적용하더라도 실제 AV 데이터와 유사한 정도의 추정이 가능함을 알 수 있다.

SAR10Z와 SAR100Grade100('SAR100G'로 표시)의 그래프 설명은 ADIS16405와 같은데 다만, 이 두 가지 자이로의 실제 AV 데이터는 제조회사 데이터에 기록되어 있지 않아 표시하지 못했다. 한편, AV는 시간 경과에 따른 관성 센서의 시간 경과에 따른 잡음 특성과 안정화 여부를 평가하기 위한 것으로, 시간 경과에 따라 각도 변화의 감소폭이 클수록 안정화됨을 의미한다. Fig. 4로부터 ADIS16405 자이로의 안정화 속도가 다른 두 가지 자이로와 비교하여 빠름을 알 수 있다. 한편, 가속도계의 경우, AV 추정에 사용되는 변수가 Table 2에 나타낸 잡음 밀도뿐이기 때문에 나타내지 않았다. 후술하는 평가결과에서 가속도계의 잡음 특성을 확인할 수 있다.

Fig. 5부터 Fig. 7은 ADIS16405 관성 센서만의 특성을 상세히 검토하기 위해 나타낸 시뮬레이션 결과이다.

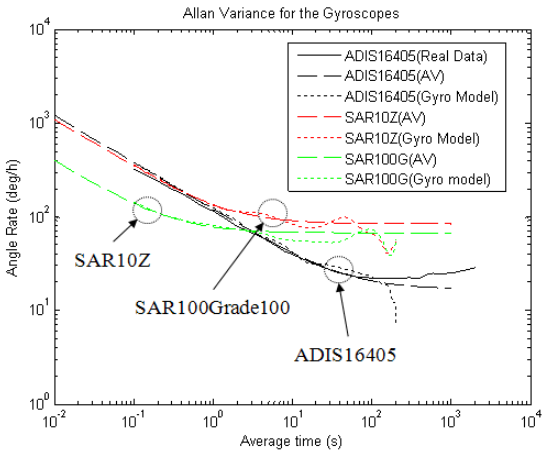

Fig. 4 Simulation results of Allan Variance(AV) for the three kinds of gyroscopes

(2) ADIS16405 자이로와 가속도계의 시뮬레이션 결과

Fig. 5는 ADIS16405 자이로의 각도 오차에 대한 표준편차이다. 이 결과는 식(11)의 각속도 $\dot{\theta}_e[k]=v_w+v_P$에서, v_w로서 식(8)의 $\sigma_{ARW}^2(\tau)$을 적용하고, v_P로서 식(9)의 $\sigma_{BI}^2(\tau)$을 적용한 후, 식(12)의 $\theta_e[k+1]=\theta_e[k]+T\dot{\theta}_e[k]$에 대입한 것인데, ADIS16405 자이로의 각도 오차에 영향을 미치는 요소는 대부분 BI에 의한 프리커 잡음임을 알 수 있고, ARW에 의한 백색 잡음은 영향이 작게 나타났다.

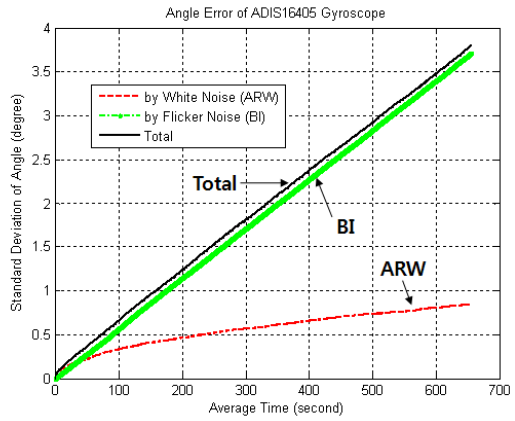

Fig. 5 Simulation results for the angle error of ADIS16405 gyroscope

Fig. 6과 Fig. 7은 ADIS16405 자이로와 가속도계 모두에 대해서 식(11)부터 식(16)까지를 적용한 결과이다. Fig. 6의 속도 오차와 Fig. 7의 위치 오차는 대부분 자이로에 기인하고 있음을 알 수 있다. 속도 오차의 표준편차는 약 600 초 경과시 160 m/s로 나타났고, 위치 오차의 표준편차는 35 km로 나타났다.

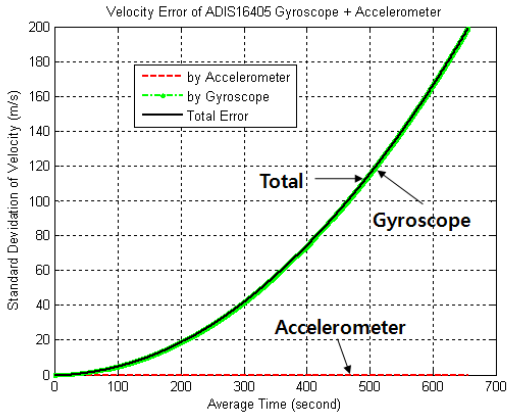

Fig. 6 Simulation results for the velocity error of ADIS16405 gyroscope with accelerometer

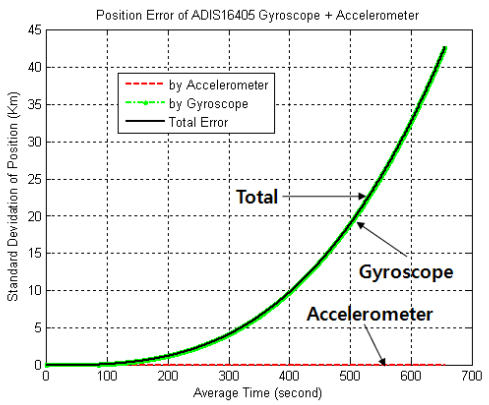

Fig. 7 Simulation results for the position error of ADIS16405 gyroscope with accelerometer

(3) 자이로와 가속도계 조합에 대한 시뮬레이션 결과

Fig. 8과 Fig. 9는 Table 1과 Table 2에 나타낸 자이로와 가속도계를 조합하여 계산한 속도 오차와 위치 오차에 대한 표준편차이다. 본 실험 목적은 다양한 자이로와 가속도계를 조합하여 가장 오차가 작은 조합을 찾기 위한 것으로 조합은 다음과 같이 하였다.

조합-1 : ADIS16405 자이로 + 가속도계
조합-2 : SAR10Z 자이로 + ADXL103 가속도계
조합-3 : SAR10Z 자이로 + LIS344ALH 가속도계
조합-4 : SAR100G100 자이로 + ADLX103 가속도계
조합-5 : SAR100G100 자이로 + LIS344ALH 가속도계

Fig. 8의 속도 오차에서, 조합-1(ADIS16405 자이로 + 가속도계)을 적용한 경우('ADIS16405'로 표시)가 가장 작게 나타났는데, 600 초 부근에서 약 160 m/s이고 나머지 조합들은 600 m/s ~ 800 m/s 사이에 분포하고 있다. Fig. 9의 위치 오차의 경우에도 조합-1(ADIS16405 자이로 + 가속도계)을 적용한 경우가 가장 작게 나타났는데. 600 초 부근에서 35 km임에 반하여 나머지 조합은 130 km ~ 160 km 사이를 나타내고 있다.

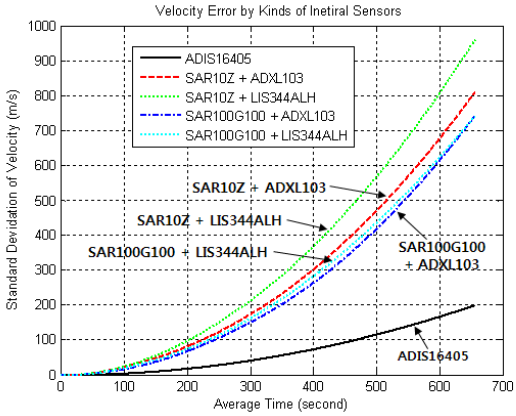

Fig. 8 Simulation results for the velocity error of ADIS16405 gyroscope with accelerometer

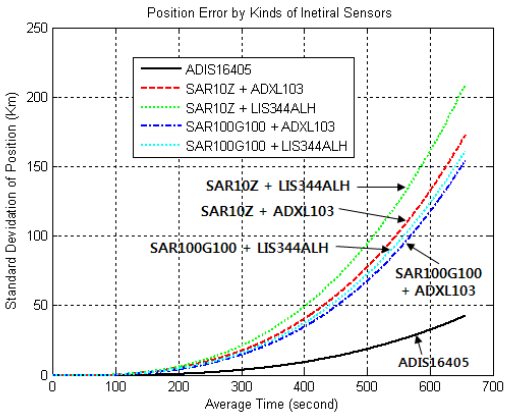

Fig. 9 Simulation results for the velocity error of ADIS16405 gyroscope with accelerometer

3.4 시뮬레이션 결과 검토

세 가지 자이로와 가속도계에 대한 시뮬레이션 결과, ADIS16405 자이로와 가속도계를 조합하여 사용하는 것이 최적임을 알았다. 한편, ADIS16405의 경우, 속도 오차의 표준편차가 600 초 경과시 약 160 m/s, 위치 오차의 표준편차는 약 35 km 발생하였다. 이러한 정밀도를 갖는 MEMS-IMU는 선박용 관성항법 장치로 적용 불가능할 것으로 고려된다. 이와 같은 이유로 서론에서 기술한 바와 같이 현재 대부분의 MEMS-IMU의 경우, GPS 신호를 수신할 수 없는 실내에서 짧은 시간 동안의 항법보조 장치로 적용할 목적 또는 GPS의 위치 정밀도를 향상 시킬 목적 등으로 적용하고 있다.

한편, 현재 MEMS 기반 관성 센서들의 성능이 해가 거듭될수록 향상되고, 가격이나 부피, 무게, 전력소모 등에서 많은 이점이 있기 때문에 다양한 연구가 진행되고 있다. 한 예로, 현재 대부분의 연구들이 GPS와 MEMS-IMU를 서로 결합하여 사용하고 있는데, GPS의 도움 없이 소형 도플러 레이더(doppler Radar)를 부가하여 MEMS-IMU의 정밀도를 크게 향상시킨 연구결과도 보고되어 있다(Walid Abdel-Hamid, 2005; Peter Sherman et. al., 2005).

이러한 연구결과를 활용하면, 소형 선박에서도 속력 측정장치를 이용하여 IMU의 정밀도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 MEMS 기반 자이로와 가속도계를 이용하여 소형 선박용 IMU(Inertial Measurement Unit)을 구성하기 위한 최적의 자이로와 가속도계 선정 방법과 결과를 검토하였고, 그 결과는 다음과 같다.

(1) ADIS16405, SAR10Z, SAR100Grade100, LIS344ALH, ADXL103 등의 관성 센서 조합에 대한 평가결과, ADIS16405 자이로와 가속도계를 적용한 경우가 가장 작은 속도 오차와 위치 오차를 나타냈다.

(2) 속도 오차와 위치 오차에 대부분의 영향을 미치는 것은 자이로 오차로 나타났기 때문에 고정밀도의 자이로 선정이 MEMS-IMU 구축에 가장 중요한 요소임을 알았다.

(3) ADIS16405 관성 센서에 대한 속도 오차의 표준편차는 600 초 경과 시 약 160 m/s, 위치 오차의 표준편차는 약 35 km 발생하여 ADIS16405 관성 센서만을 이용한 소형 선박용 항법장치 구축은 곤란함을 알았다.

이러한 상기 (3)항의 문제를 해결하기 위한 방법으로, Walid Abdel-Hamid(2005)와 Peter Sherman et. al.,(2005) 등이 제안한 속도 측정 센서를 이용하면 MEMS-IMU의 정밀도를 향상시킬 수 있을 것으로 고려되는바, 연구를 지속하여 정밀도를 향상시킬 예정이다.

현재, ADIS16405 관성 센서와 속도 측정 센서를 이용한 MEMS-IMU를 제작 중에 있으며, 실험을 통하여 선박용 항법장치에의 적용 가능성을 확인할 예정이다.

후 기

이 논문은 2011년도 국토해양부지정 호남지역 Sea Grant 사업단 연구개발사업 과제 지원에 의해 수행된 연구임.

참고문헌

[1] Analog Device(2009), *ADIS16405 data sheet* (URL: http://www.analog.com)

[2] Analog Device(2004), *ADXL103/ADXL203 data sheet* (URL: http://www.analog.com)

[3] Bennett S. M., Dyott R., Allen D., Brunner J., Kidwell R. and Miller R. (1998), *Fiber Optic Rate Gyros As Replacement for Mechanical Gyros,* American Institute of Aeronautics and Astronautics, KVH Industries Inc. Report AIAA-98-4401, pp.1~7 (URL: ftp://ftp.uni-duisburg.de)

[4] Claudia C. Meruane Naranjo(2008), *Analysis and Modeling of MEMS based Inertial Sensors*, Thesis Paper of Signal Processing School of Electrical Engineering, ungliga Tekniska Hgskolan, Stockholm, XR-EE-SB 2008:011

[5] Chris Goodall, Naser El-Sheimy and Kai-Wei Chiang(2005), "The Development of a GPS/MEMS INS Integrated System Utilizing a Hybrid Processing Architecture," Proc. of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, pp.1444~1455

[6] D. H. Titterton and J. L. Weston(2009), *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2nd Edition, Volume 207 Progress in Astronautics and Aeronautics, pp.57

[7] Eric C. Anderson(1999), *Monte Carlo Methods and Importance Sampling*, Lecture Notes for Stat 578C, Statistical Genetics (URL: http://ib.berkeley.edu)

[8] Giorgio De Pasquale and Aurelio Soma(2010), "Reliability Testing Procedure for MEMS IMUs Applied to Vibrating Environments," Sensors2010, Vol.10, pp.456~474

[9] I. Skog and P. Handel(2006), "Calibration of a MEMS Inertial Measurement Unit," XVII IMEKO WORLD CONGRESS, Brazil, pp.1~6

[10] Jonathan Pengelly(2002), *Monte Carlo Methods*, Tutorial Materials, pp.1~18 (URL: http://www.cs.otago.ac.nz)

[11] Jonathan Goodman(2011), *Lecture Note on the Principles of Scientific Computing*, Chapter 9: Monte Carlo methods, pp.183~201 (URL: http://www.cs.nyu.edu)

[12] Kim Mathiassen(2010), *A low cost navigation unit for*

position estimation of personnel after loss of GPS position, Masters of Science degree in Engineering Cybernetics from the Norwegian University of Science and Technology

[13] Martin Vagner(2011), *MEMS Gyroscope Performance Comparing Using Allan Variance Method*, Doctoral Degree Programme(1), FEEC BUT, (URL: http://www.feec.vutbr.cz)

[14] Mohamed Gad-el-Hak(2006), *MEMS Applications*, 2nd Edition, Taylor & Francis, pp. 1-1~11-1

[15] Naserel-Sheimy, Eun-Hwan Shin and Xiaojinlu(2006), *Kalman Filter Face-Off - Extended vs. Unscented Kalman Filters for Integrated GPS and MEMS Inertial,* InsideGNSS March 2006, pp.48~54 (URL: www.insidegnss.com)

[16] Peter Sherman and Steven Holmes(2005), *Personal navigation system, Technical report NATRICK/TR-06 /004*, Draper Laboratory, Cambridge, MA 02130

[17] Sensonor(2009), *SAR10Z Gyro Sensor Series data sheet* (URL: http//www.Sensonor.com)

[18] Sensonor(2010), *SAR100Grade100 Single-Axis Gyro data sheet* (URL: http//www.Sensonor.com)

[19] Songlai Han, Jinling Wang and Nathan Knight(2009), "Using Allan Variance to Determine the Calibration Model of Inertial Sensors for GPS/INS Integration," 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Presidente Prudente, São Paulo, Brazil, pp.1~8

[20] ST Microerectronics(2008), *LIS344ALH data sheet* (URL: http//www.st.com)

[21] Volker Kempe(2011), *Inertial MEMS Principles and Practice*, Cambridge University Press, pp.1~452

[22] Walid Abdel-Hamid(2005), *Accuracy Enhancement of Integrated MEMS-IMU/GPS Systems for Land Vehicular Navigation Applications,* UCGE Reports Number 20207, Thesis for PhD. Department of Geomatics Eng., Calgary, Alberta, Canada

원고접수일 : 2011년 10월 31일
심사완료일 : 2011년 12월 06일
원고채택일 : 2011년 12월 06일