

Integrated Navigation System Design of Electro-Optical Tracking System with Time-delay and Scale Factor Error Compensation

Jae Hoon Son¹, Woojin Choi², Sang Heon Oh³, Dong-Hwan Hwang^{1*}

¹Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Department of Space Technology Center, Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

³MI Corporation, Daejeon 34012, Korea

ABSTRACT

In order for electro-optical tracking system (EOTS) to have accurate target coordinate, accurate navigation results are required. If an integrated navigation system is configured using an inertial measurement unit (IMU) of EOTS and the vehicle's navigation results, navigation results with high rate can be obtained. Due to the time-delay of the navigation results of the vehicle in the EOTS and scale factor errors of the EOTS IMU in high-speed and high dynamic operation of the vehicle, it is much more difficult to have accurate navigation results. In this paper, an integrated navigation system of EOTS which compensates time-delay and scale factor error is proposed. The proposed integrated navigation system consists of vehicle's navigation system which provides time-delayed navigation results, an EOTS IMU, an inertial navigation system (INS), an augmented Kalman filter and integration Kalman filter. The augmented Kalman filter outputs navigation results, in which the time-delay of the vehicle's navigation results is compensated. The integration Kalman filter estimates position, velocity, attitude error of the EOTS INS and accelerometer bias, accelerometer scale factor error, gyro bias and gyro scale factor error from the difference between the output of the augmented Kalman filter and the navigation result of the EOTS INS. In order to check performance of the proposed integrated navigation system, simulations for output data of a measurement generator and land vehicle experiments were performed. The performance evaluation results show that the proposed integrated navigation system provides more accurate navigation results.

Keywords: time-delay, scale factor, augmented Kalman filter, integrated navigation system

1. 서론

Electro-Optical Tracking System (EOTS)는 표적과의 거리 측정치와 항법 결과로부터 표적의 좌표를 추정하는 시스템이다 (Park & Jung 2005, Yim et al. 2011, Willers 2013). EOTS 내부에 항법 센서를 포함하지 않는 종래의 EOTS는 항체의 항법시스템으로부터 항법 결과를 제공받는다. 그런데, 항체의 항법시스템은

다른 탑재장비와 함께 동작하므로, 시간지연된 낮은 출력율로 결과를 제공한다 (Park et al. 2014, Balmus 2015). 이러한 항법 결과를 표적 좌표 추정에 사용하면, 정확한 표적 좌표를 얻기 어려우며, 항체가 고속, 고기동으로 동작할 경우, 정확한 표적 좌표 추정이 더욱 더 어렵다 (Yim et al. 2011, Kim et al. 2013).

최근에는 높은 출력율의 항법 결과를 얻기 위하여 Fig. 1과 같이 내부에 관성 측정 장치 (Inertial Measurement Unit, IMU)를 탑재한 EOTS가 소개되고 있으며, EOTS IMU와 항체의 항법 결과를 통합하면, 보다 정확한 항법 결과를 얻을 수 있을 것이다 (Chen et al. 2013, Chen et al. 2016, Sun et al. 2021). Fig. 1에 제시한 통합 항법 알고리즘은 EOTS 관성항법 시스템 (Inertial Navigation System, INS)과 통합 칼만 필터로 이루어지며, 통합 칼만 필터에서 추정된 EOTS INS의 항법 오차를 보상한다. 통합 칼만 필터의 상태 변수는 EOTS INS의 위치, 속도, 자세 오차와 EOTS IMU 오차가 포함된다.

Received Apr 13, 2022 Revised May 25, 2022 Accepted Jun 01, 2022

*Corresponding Author

E-mail: dhhwang@cnu.ac.kr

Tel: +82-42-821-5670 Fax: +82-42-823-5436

Jae Hoon Son <https://orcid.org/0000-0003-1952-2127>

Woojin Choi <https://orcid.org/0000-0003-2911-248X>

Sang Heon Oh <https://orcid.org/0000-0003-1357-0742>

Dong-Hwan Hwang <https://orcid.org/0000-0002-0933-5881>

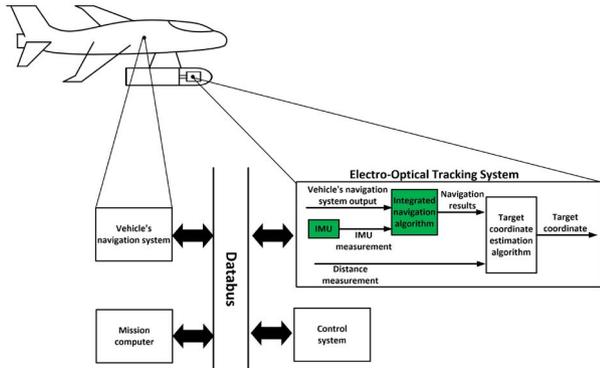


Fig. 1. Avionics system architecture.

IMU 오차는 랜덤 바이어스(random bias), 환산 계수 오차 (scale factor error), 잡음 등 여러 가지 오차를 포함하는데, 특히, 환산 계수는 입력에 대한 출력의 비율이므로, 항체의 가속도와 각속도가 커질수록 환산 계수 오차가 더욱 커진다 (Titterton & Weston 2004). 따라서, 환산 계수 오차를 통합 칼만 필터의 상태 변수에 추가하고, 이를 보상하면, 고속, 고기동 환경에서 매우 정확한 항법 결과를 얻을 수 있을 것이다.

시간지연된 항체의 항법 시스템 출력을 aiding signal로 사용할 경우, 통합 칼만필터가 EOTS INS의 항법 오차를 정확하게 추정하기 어렵는데, augmented 칼만필터를 이용하면 추정치 시간 지연을 효과적으로 보상할 수 있다 (Choi et al. 2009, Yim et al. 2011, Grewal & Andrews 2015, Park et al. 2021). Choi et al. (2009)은 위치 추정치에 가우시안 분포를 갖는 시간지연을 인가하고, augmented 칼만필터를 이용하여 위치와 속도 추정 성능이 향상되는 것을 보였다. Yim et al. (2011)은 augmented 칼만필터를 추가하여 시간지연을 보정한 항체의 자세를 추정하였으며, 이를 EOTS의 표적 추정에 사용할 경우, 표적 좌표 추정 성능이 향상됨을 보였다. Grewal & Andrews (2015)는 augmented 칼만필터의 프로세스 모델과 같이 지연된 시간의 샘플만큼 상태변수를 추가하는 방법을 정리하고, 현재 추정치와 과거의 추정치와의 관계를 측정모델을 통해 정리하였다. Park et al. (2021)은 시간지연된 GPS속도 추정치로부터 저속으로 회전하는 항체의 물을 추정하기 위해 augmented 칼만필터를 추가한 물 추정 알고리즘을 제안하고, 성능이 크게 향상됨을 보였다.

본 논문에서는 시간지연과 환산 계수 오차를 보정한 EOTS의 통합항법 시스템을 제안하고, 성능평가 결과를 제시하고자 한다. 제안한 통합항법 시스템에서 시간지연을 보상하기 위하여 augmented 칼만필터를 이용하였으며, 환산계수 오차 보상을 위하여 통합 칼만필터의 상태변수에 가속도계와 자이로 환산 계수 오차를 포함하였다. 제안한 통합항법 시스템의 성능을 평가하기 위하여 EOTS IMU 측정치와 시간지연된 항체의 항법 결과를 시간지연과 환산계수 오차를 보상하지 않은 통합항법 시스템, 시간지연만 보정한 통합항법 시스템, 제안한 통합항법 시스템에 입력하여 항법 오차를 비교하였다.

논문 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안한 통합항법 시스템의 구조를 서술하고, 3장에서는 augmented 칼만필터, 그리고 4장

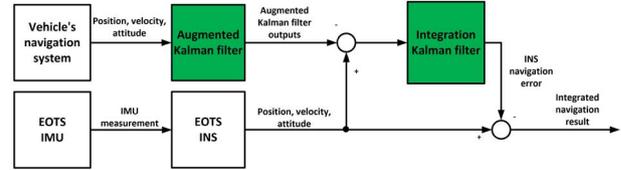


Fig. 2. Structure of proposed integrated navigation system.

에서는 통합 칼만필터에 대하여 서술한다. 5장에서는 제안한 통합항법 시스템에 대하여 시뮬레이션 결과와 지상 항체 실험 결과를 서술한다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 결론을 정리하고, 추후 계획을 서술한다.

2. EOTS의 통합항법 시스템

본 논문에서 제안하는 EOTS의 통합항법 시스템의 구조는 Fig. 2에서 나타내었는데, 항체의 항법 시스템, EOTS IMU, EOTS INS, augmented 칼만 필터, 통합 칼만 필터로 이루어진다. EOTS INS는 EOTS IMU 측정치로부터 EOTS의 위치, 속도, 자세를 출력한다. Augmented 칼만필터는 항체의 항법 시스템에서 출력되는 시간지연된 위치, 속도, 자세로부터 시간지연을 보정한 위치, 속도, 자세를 추정한다. Augmented 칼만필터에서 출력된 위치, 속도, 자세와 EOTS INS의 위치, 속도, 자세의 차이가 통합 칼만필터의 측정치이며, 이로부터 EOTS INS의 위치, 속도, 자세 오차와 가속도계 바이어스, 자이로 바이어스, 가속도계 환산 계수 오차, 자이로 환산 계수 오차를 추정한다. 제안한 통합항법 시스템은 augmented 칼만필터의 출력을 aiding signal로 보면, GPS/INS 통합항법 시스템과 유사한 구조임을 알 수 있다.

3. AUGMENTED 칼만필터

Augmented 칼만필터는 시간지연을 보상하기 위한 것이다. 이것을 서술하기 위하여 항체의 항법 시스템 출력이 M 샘플만큼 지연된 것이 EOTS의 통합항법 시스템에 입력된다고 하자. 이산시간 k에서의 상태변수를 식 (1)과 같이 둔다.

$$\mathbf{x}_{k,veh} = [\mathbf{p}_{k,veh}^n \quad \mathbf{v}_{k,veh}^n \quad \mathbf{a}_{k,veh}^n \quad \boldsymbol{\Psi}_{k,veh} \quad \boldsymbol{\omega}_{ibk,veh}^b \quad \boldsymbol{\rho}_{k,veh}^b]^T \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{p}_{k,veh}^n$ 는 항법 좌표계에서 나타난 항체의 위치, $\mathbf{v}_{k,veh}^n$ 는 항법 좌표계에서 나타난 항체의 속도, $\mathbf{a}_{k,veh}^n$ 는 항법 좌표계에서 나타난 항체의 가속도, $\boldsymbol{\Psi}_{k,veh}$ 는 항체의 자세, $\boldsymbol{\omega}_{ibk,veh}^b$ 는 항체의 각속도, $\boldsymbol{\rho}_{k,veh}^b$ 는 항체의 각각속도를 의미한다. $\mathbf{p}_{k,veh}^n, \mathbf{v}_{k,veh}^n, \mathbf{a}_{k,veh}^n, \boldsymbol{\Psi}_{k,veh}, \boldsymbol{\omega}_{ibk,veh}^b, \boldsymbol{\rho}_{k,veh}^b$ 는 각각 식 (2-7)과 같다.

$$\mathbf{p}_{k,veh}^n = [p_{N,k}^n \quad p_{E,k}^n \quad p_{D,k}^n]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_{k,veh}^n = [v_{N,k}^n \quad v_{E,k}^n \quad v_{D,k}^n]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{a}_{k,veh}^n = \begin{bmatrix} a_{N,k}^n & a_{E,k}^n & a_{D,k}^n \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\Psi}_{k,veh} = \begin{bmatrix} \alpha_k & \beta_k & \gamma_k \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{ib,k,veh}^b = \begin{bmatrix} \omega_{ib,xk}^b & \omega_{ib,yk}^b & \omega_{ib,zk}^b \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\rho}_{k,veh}^b = \begin{bmatrix} \rho_{x,k}^b & \rho_{y,k}^b & \rho_{z,k}^b \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

여기서, $P_{N,k}^n, P_{E,k}^n, P_{D,k}^n$ 는 각각 north, east, down축 위치, $v_{N,k}^n, v_{E,k}^n, v_{D,k}^n$ 는 각각 north, east, down축 속도, $a_{N,k}^n, a_{E,k}^n, a_{D,k}^n$ 는 각각 north, east, down축 가속도, $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k$ 는 각각 roll, pitch, yaw, $\omega_{ib,xk}^b, \omega_{ib,yk}^b, \omega_{ib,zk}^b$ 는 각각 x축, y축, z축의 각속도, $\rho_{x,k}^b, \rho_{y,k}^b, \rho_{z,k}^b$ 는 각각 x축, y축, z축의 각속도를 의미한다. 이때, $\mathbf{x}_{k,veh}$ 에서 $\mathbf{x}_{k+1,veh}$ 로의 상태천이행렬 $\Phi_{k,veh}$ 는 식 (8)과 같다 (Yim et al. 2011, Grewal & Andrews 2015).

$$\Phi_{k,veh} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \Delta \mathbf{t} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \frac{1}{2} \Delta \mathbf{t}^2 \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \Delta \mathbf{t} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \Delta \mathbf{t} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \frac{1}{2} \Delta \mathbf{t}^2 \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \Delta \mathbf{t} \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

그러면, augmented 칼만필터의 상태변수 $\mathbf{x}_{k,aug}$ 는 식 (9)가 된다.

$$\mathbf{x}_{k,aug} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k,veh}^T & \mathbf{x}_{k-1,veh}^T & \cdots & \mathbf{x}_{k-M,veh}^T \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

그리고, augmented 칼만필터의 프로세스 모델은 식 (10)이 된다 (Yim et al. 2011, Grewal & Andrews 2015).

$$\mathbf{x}_{k+1,aug} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1,veh} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{k-M+1,veh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{k,veh} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_{18 \times 18} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_{18 \times 18} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{k,aug} + \mathbf{w}_{k,aug} \quad (10)$$

여기서, $\mathbf{w}_{k,aug}$ 는 평균이 0이고, 공분산 행렬이 $\mathbf{Q}_{k,aug}$ 인 augmented 칼만필터의 프로세스 잡음을 의미한다. 그리고, augmented 칼만필터의 측정 모델은 식 (11)이 된다 (Yim et al. 2011, Grewal & Andrews 2015).

$$\mathbf{y}_{k,aug} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{k,veh}^n \\ \mathbf{v}_{k,veh}^n \\ \boldsymbol{\Psi}_{k,veh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 18M} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \mathbf{0}_{3 \times 18M} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \mathbf{0}_{3 \times 18M} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{k,aug} + \mathbf{v}_{k,aug} \quad (11)$$

여기서, $\mathbf{y}_{k,aug}$ 는 측정치, 측정 잡음 $\mathbf{v}_{k,aug}$ 는 평균이 0이고, 공분산 행렬이 $\mathbf{R}_{k,aug}$ 인 augmented 칼만필터의 측정 잡음을 의미한다

다. 식 (11)을 보면, 이산시간 k에서의 augmented 칼만필터에 입력된 항체의 항법 시스템 출력은 $\mathbf{x}_{k-M+1,veh}$ 로부터 식 (10)과 (11)을 이용하여 추정된 $\hat{\mathbf{x}}_{k,aug}$ 에서 $\hat{\mathbf{x}}_{k,veh}$ 를 얻을 수 있으므로, 시간지연을 보정한 항법 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4. 통합 칼만필터

통합 칼만필터의 모델은 INS의 항법방정식으로부터 유도한 INS의 psi오차모델이며, 식 (12-14)와 같다 (Benson Jr. 1975, Goshen-Meskin & Bar-Itzhack 1992).

$$\delta \dot{\boldsymbol{\Psi}} = -\mathbf{C}_b^n \delta \boldsymbol{\omega}_{ib}^b - \boldsymbol{\Omega}_{en}^n \delta \mathbf{v}^n \quad (12)$$

$$\delta \dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{C}_b^n \delta \mathbf{f}^b + [\mathbf{f}^n \times] \delta \boldsymbol{\Psi} - (2\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\Omega}_{en}^n) \delta \mathbf{v}^n \quad (13)$$

$$\delta \dot{\mathbf{p}}^n = -\boldsymbol{\Omega}_{en}^n \delta \mathbf{p}^n + \delta \mathbf{v}^n \quad (14)$$

여기서, $\delta \boldsymbol{\Psi}$ 는 자세 오차, \mathbf{C}_b^n 는 동체좌표계에서 항법 좌표계로의 Direction Cosine Matrix (DCM), $\delta \boldsymbol{\omega}_{ib}^b$ 는 자이로 오차, $\boldsymbol{\Omega}_{en}^n$ 는 spatial rate, $\delta \mathbf{v}^n$ 는 속도 오차, $\delta \mathbf{f}^b$ 는 가속도계 오차, \mathbf{f}^n 는 항법 좌표계에서 나타난 비력, $\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n$ 는 항법좌표계에서 나타난 earth rate, $\boldsymbol{\Omega}_{en}^n$ 는 항법좌표계에서 나타난 craft rate, $\delta \mathbf{p}^n$ 는 위치 오차를 의미한다. 자이로 오차 $\delta \boldsymbol{\omega}_{ib}^b$ 는 식 (15)와 같이 자이로 바이어스 (\mathbf{b}_G), 자이로 환산계수 오차 (s_{Gx}, s_{Gy}, s_{Gz}), 자이로 잡음 (\mathbf{w}_G)으로 이루어진다 (Titterton & Weston 2004).

$$\delta \boldsymbol{\omega}_{ib}^b = \mathbf{b}_G + \begin{bmatrix} s_{Gx} & 0 & 0 \\ 0 & s_{Gy} & 0 \\ 0 & 0 & s_{Gz} \end{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_{ib}^b + \mathbf{w}_G \quad (15)$$

여기서, s_{Gx}, s_{Gy}, s_{Gz} 는 각각 자이로 환산계수 오차의 x, y, z축 성분, $\boldsymbol{\omega}_{ib}^b$ 는 동체좌표계에서 나타난 관성좌표계에 대한 동체좌표계의 각속도를 의미한다. 가속도계 오차 $\delta \mathbf{f}^b$ 는 식 (16)과 같이 가속도계 바이어스 (\mathbf{b}_A), 가속도계 환산계수 오차 (s_{Ax}, s_{Ay}, s_{Az}), 가속도계 잡음 (\mathbf{w}_A)으로 이루어진다 (Titterton & Weston 2004).

$$\delta \mathbf{f}^b = \mathbf{b}_A + \begin{bmatrix} s_{Ax} & 0 & 0 \\ 0 & s_{Ay} & 0 \\ 0 & 0 & s_{Az} \end{bmatrix} \mathbf{f}^b + \mathbf{w}_A \quad (16)$$

여기서, s_{Ax}, s_{Ay}, s_{Az} 는 각각 가속도계 환산계수 오차의 x, y, z축 성분, \mathbf{f}^b 는 비력을 의미한다.

통합 칼만필터의 프로세스 모델은 식 (12-14)의 INS 오차모델과 식 (15, 16)에 나타난 $\mathbf{b}_A, \mathbf{b}_G, \mathbf{s}_A, \mathbf{s}_G$ 로 구성하며, 이를 정리하면, 식 (17)과 같다.

$$\delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F} \delta \mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (17)$$

여기서, $\delta \mathbf{x}$ 는 상태 변수, \mathbf{F} 는 시스템 행렬, \mathbf{w} 는 공분산 행렬이 \mathbf{Q}

인 프로세스 잡음 벡터를 의미한다. $\delta \mathbf{x}$ 는 식 (18)과 같다.

$$\delta \mathbf{x} = [\delta \mathbf{p}^{nT} \quad \delta \mathbf{v}^{nT} \quad \delta \boldsymbol{\psi}^T \quad \mathbf{b}_A^T \quad \mathbf{b}_G^T \quad \mathbf{s}_A^T \quad \mathbf{s}_G^T]^T \quad (18)$$

여기서, $\mathbf{s}_A = [s_{Ax} \quad s_{Ay} \quad s_{Az}]^T$ 는 가속도계 환산계수 오차, $\mathbf{s}_G = [s_{Gx} \quad s_{Gy} \quad s_{Gz}]^T$ 는 자이로 환산계수 오차를 의미한다. 식 (18)에서 \mathbf{b}_G , \mathbf{s}_A , \mathbf{s}_G 는 랜덤 상수로 둔다. 시스템 행렬 \mathbf{F} 는 식 (19)와 같다.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Omega}_{en}^n & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -(\mathbf{2}\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\Omega}_{en}^n) & [\mathbf{f}^n \times] & \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \mathbf{A} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\boldsymbol{\Omega}_m^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{C}_b^n \mathbf{B} \\ \mathbf{0}_{12 \times 3} & \mathbf{0}_{12 \times 3} \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서, \mathbf{A} 는 식 (20)과 같다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_x^b & 0 & 0 \\ 0 & f_y^b & 0 \\ 0 & 0 & f_z^b \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서, f_x^b 는 동체좌표계에서 나타낸 x축의 비력, f_y^b 는 동체좌표계에서 나타낸 y축의 비력, f_z^b 는 동체좌표계에서 나타낸 z축의 비력을 의미한다. \mathbf{B} 는 식 (21)과 같다.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \omega_{ib,x}^b & 0 & 0 \\ 0 & \omega_{ib,y}^b & 0 \\ 0 & 0 & \omega_{ib,z}^b \end{bmatrix} \quad (21)$$

통합 칼만필터의 측정모델은 식 (22)와 같다 (Song & Lee 2001, Titterton & Weston 2004, Groves 2013).

$$\delta \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{p}}^n - \hat{\mathbf{p}}_{veh}^n \\ \hat{\mathbf{v}}^n - \hat{\mathbf{v}}_{veh}^n \\ \hat{\boldsymbol{\psi}} - \hat{\boldsymbol{\psi}}_{veh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{6 \times 6} & \mathbf{0}_{6 \times 1} & \mathbf{0}_{6 \times 1} & \mathbf{0}_{6 \times 1} & \mathbf{0}_{6 \times 6} & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \mathbf{0}_{1 \times 6} & \frac{\cos \gamma}{\cos \beta} & \frac{\sin \gamma}{\cos \beta} & 0 & \mathbf{0}_{1 \times 6} & \mathbf{0}_{1 \times 6} \\ \mathbf{0}_{1 \times 6} & \sin \gamma & -\cos \gamma & 0 & \mathbf{0}_{1 \times 6} & \mathbf{0}_{1 \times 6} \\ \mathbf{0}_{1 \times 6} & -\tan \beta \cos \gamma & -\tan \beta \sin \gamma & -1 & \mathbf{0}_{1 \times 6} & \mathbf{0}_{1 \times 6} \end{bmatrix} \delta \mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (22)$$

여기서, \mathbf{v} 는 공분산 행렬이 \mathbf{R} 인 측정 잡음 벡터를 의미한다. 제안한 통합항법 시스템에서 augmented 칼만필터를 이용하여 시간지연을 보상한 항법 시스템의 위치, 속도, 자세와 EOTS INS의 위치, 속도, 자세 차이가 통합 칼만필터의 측정치이므로, augmented 칼만필터를 추가하지 않은 방법보다 정확하게 항법 오차를 추정할 것이라고 예상할 수 있다. 그리고, 자이로 환산 계수 오차와 가속도계 환산 계수 오차를 보상하므로, 더 정확한 항법 결과를 얻을 것이라고 예상할 수 있다.

Table 1. Specification of navigation system TALIN4000.

List		Value
Navigation error (1σ)	Horizontal position (m)	12
	Vertical position (m)	14.825
	Attitude (deg)	Roll, Pitch 0.0028 Yaw 0.0056
Output rate (Hz)		12.5

Table 2. Specification of EOTS IMU LN-200.

List		Value
Accelerometer error (1σ)	Random walk error (m/s/rt-hr)	0.03
	Random bias error (ug)	300
	Scale factor error (ppm)	300
Gyroscope error (1σ)	Random walk error (deg/rt-hr)	0.07
	Random bias error (deg/hr)	1
	Scale factor error (ppm)	100
Output rate (Hz)		360

5. 시뮬레이션과 지상 항체 실험

제한한 통합항법 시스템의 성능을 확인하기 위하여 측정치 생성기의 출력에 대한 성능평가와 지상 차량 실험을 통한 성능평가를 수행하였다. 측정치 생성기에서 항체의 항법 시스템 출력은 Table 1에 나타난 항법급 항법 시스템인 Honeywell사의 TALIN4000을 기준으로 생성하고, EOTS의 IMU 측정치는 Table 2에 나타난 전술급 성능을 갖는 Northrop Grumman사의 LN-200 IMU 사양을 기준으로 생성하였다. Augmented 칼만필터에서 프로세스 잡음 공분산 행렬은 항체의 동특성을 보고 식 (23)과 같이 결정하였다.

$$\mathbf{Q}_{k,aug} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{k,veh} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

여기서, $\mathbf{Q}_{k,veh}$ 는 식 (23)과 같다.

$$\mathbf{Q}_{k,veh} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^5}{20} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^4}{8} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^3}{6} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^4}{8} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^3}{3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^2}{2} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^3}{6} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^2}{2} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^5}{20} \cdot 5 & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^4}{8} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^3}{6} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^4}{8} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^3}{3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^3}{6} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \frac{\Delta t^2}{2} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot \Delta t \end{bmatrix} \quad (24)$$

측정 잡음 공분산 행렬은 Table 1에 나타난 항체의 항법 시스템 사양에 따라 식 (24)와 같이 결정하였다.

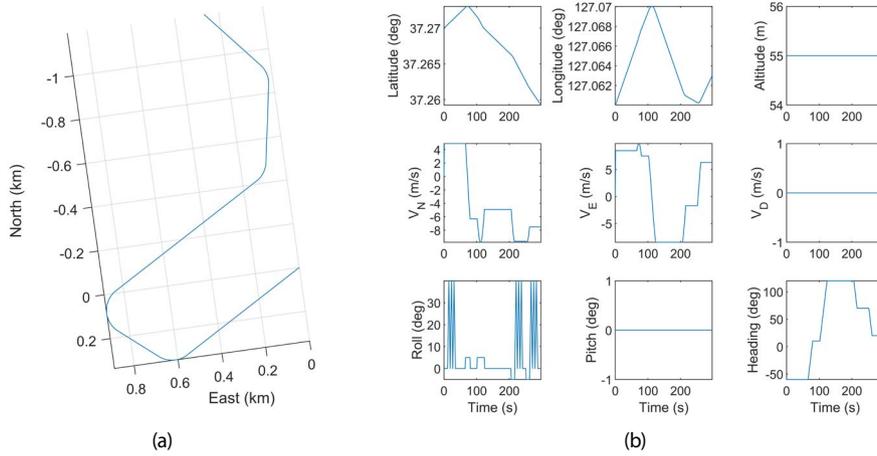


Fig. 3. (a) Trajectory of the vehicle, (b) Position, velocity, and attitude of the vehicle.

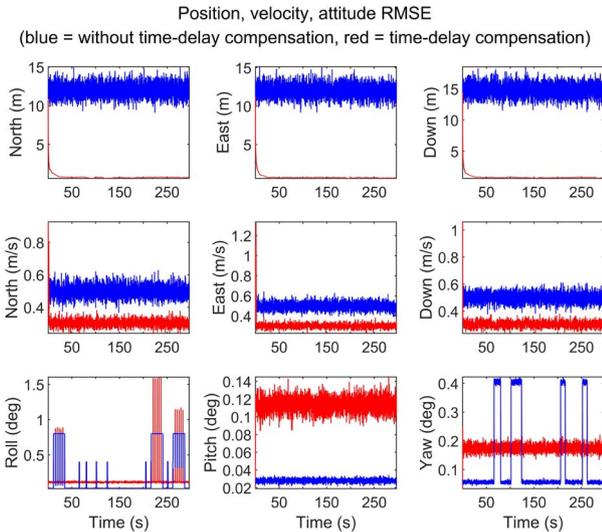


Fig. 4. Vehicle's navigation system results with time-delay 80 ms.

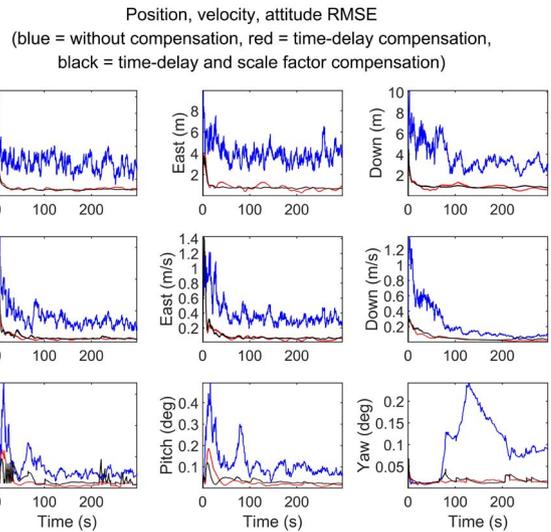


Fig. 5. Navigation results of proposed integrated navigation system with time-delay 80 ms.

$$R_{i,mg} = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} \cdot 12^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 14.825^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{3 \times 3} \cdot 0.5^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{2 \times 2} \left(0.0028 \times \frac{\pi}{180} \right)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \left(0.0056 \times \frac{\pi}{180} \right)^2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

마찬가지로 통합 칼만필터에서 프로세스 잡음 공분산 행렬은 Table 2에 나타난 EOTS IMU의 사양에 따라 결정하였으며, 측정치 잡음 공분산 행렬은 augmented 칼만필터의 출력의 특성을 보고 결정하였다. Augmented 칼만필터의 갱신 주기는 0.08초이며, 통합 칼만필터의 갱신 주기는 0.8초로 두었다. Fig. 3a는 측정치 생성기에서 생성한 항체의 기준 궤적이며, Fig. 3b에는 시간에 따른 항체의 위치, 속도, 자세를 나타내었다. Fig. 3b를 보면, 20초,

230초, 260초에서 큰 폭의 롤 운동이 세번 인가된 것을 알 수 있는데, 이는 항체가 급격하게 롤 기동을 하는 것을 나타낸다. 항체의 항법 결과에 각각 80 ms, 160 ms, 240 ms 시간을 지연시켜 몬테카를로 시뮬레이션을 100회 수행하였다. 즉, 1샘플, 2샘플, 3샘플의 시간지연에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고, 환산계수 오차에 대한 영향을 확인하기 위하여 통합 칼만필터에서는 환산계수 오차를 제외한 15차 모델과 21차 모델을 사용하여 각각의 성능을 비교하였다.

Fig. 4에는 80 ms 시간지연을 미보상한 항체의 항법 결과와 시간지연을 보상한 항체의 항법 결과를 비교한 것을 나타내었다. Augmented 칼만필터를 추가함으로써, 항체의 항법시스템에서 출력된 위치, 속도, 롤, 요 오차가 크게 줄어든 것을 볼 수 있다. 특히, Fig. 3b와 Fig. 4를 보면, 롤과 요의 변화가 큰 구간에서 롤과 요 오차가 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 식 (8)을 보면 항체의 직선운동은 등가속도, 회전운동은 등각속도임을 알 수 있으며, Fig.

Table 3. RMSE of navigation results with time-delay 80 ms.

		Without compensation	Time-delay compensation	Time-delay and scale factor compensation
Position (m)	North	4.12	0.97	0.96
	East	4.10	0.95	0.95
	Down	3.97	0.92	0.92
Velocity (m/s)	North	0.44	0.13	0.13
	East	0.43	0.17	0.17
	Down	0.33	0.07	0.07
Attitude (deg)	Roll	0.16	0.06	0.06
	Pitch	0.14	0.04	0.04
	Yaw	0.12	0.02	0.02

Table 4. RMSE of navigation results with time-delay 160 ms.

		Without compensation	Time-delay compensation	Time-delay and scale factor compensation
Position (m)	North	4.01	0.89	0.89
	East	4.07	0.98	0.99
	Down	3.79	0.94	0.94
Velocity (m/s)	North	0.36	0.15	0.15
	East	0.35	0.20	0.20
	Down	0.28	0.06	0.07
Attitude (deg)	Roll	0.14	0.09	0.09
	Pitch	0.06	0.02	0.02
	Yaw	0.23	0.02	0.02

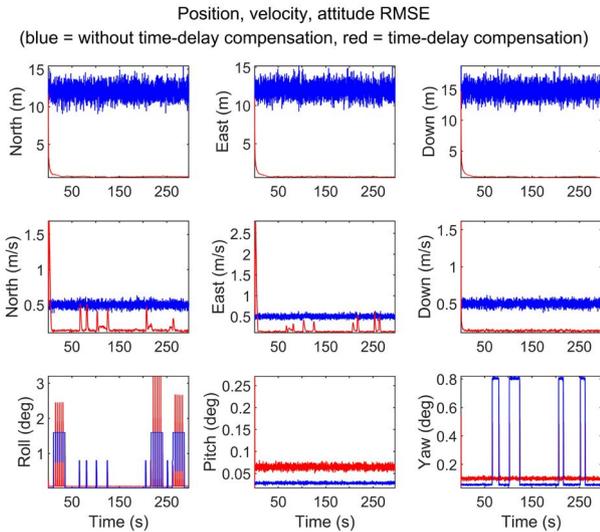


Fig. 6. Vehicle's navigation system results with time-delay 160 ms.

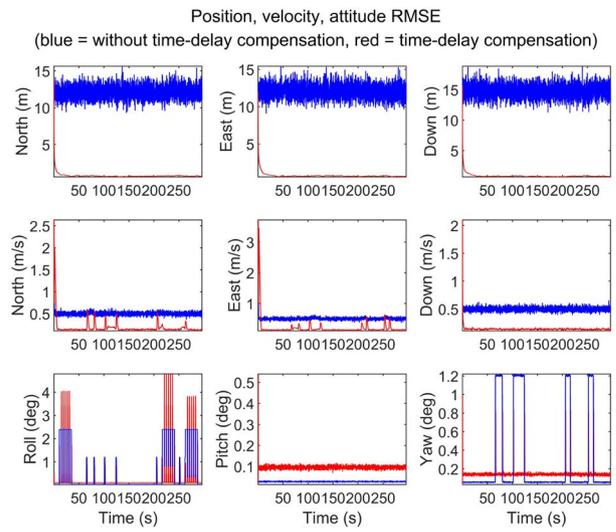


Fig. 8. Vehicle's navigation system results with time-delay 240 ms.

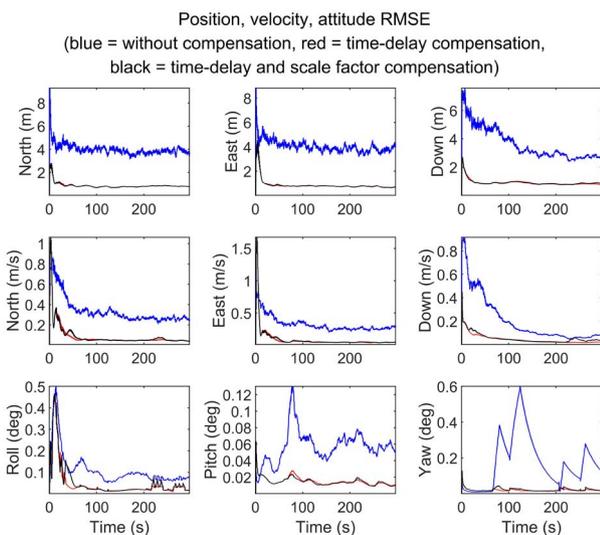


Fig. 7. Navigation results of proposed integrated navigation system with time-delay 160 ms.

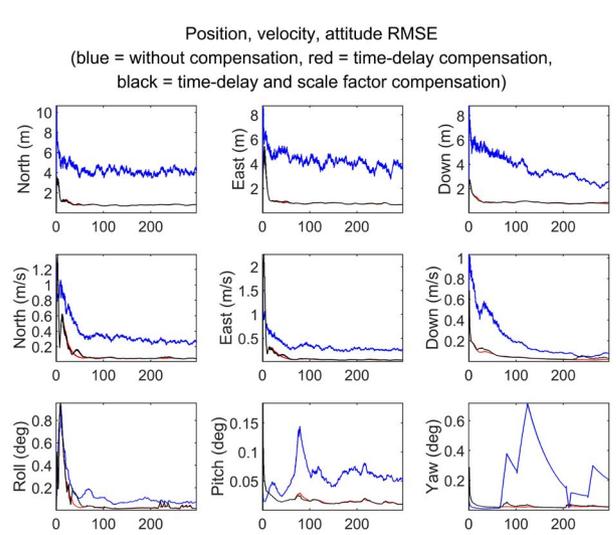


Fig. 9. Navigation results of proposed integrated navigation system with time-delay 240 ms.

3의 항체의 속도를 보면 일정한 기울기로 속도가 감소하는 등가 속도 운동 구간이 포함된 것을 알 수 있다. 항체의 동특성과 운동 모델이 가까울수록 정확한 상태변수를 추정하므로, 시간지연 보

상의 효과가 두드러지는 것을 알 수 있다. Fig. 5에는 시간지연이 80 ms인 경우의 항법 결과를 나타내었으며, Table 3에 Fig. 5에 나

Table 5. RMSE of navigation results with time-delay 240 ms.

		Without compensation	Time-delay compensation	Time-delay and scale factor compensation
Position (m)	North	4.31	0.93	0.93
	East	4.31	1.04	1.05
	Down	3.86	0.93	0.93
Velocity (m/s)	North	0.40	0.19	0.19
	East	0.37	0.26	0.26
	Down	0.28	0.07	0.08
Attitude (deg)	Roll	0.20	0.16	0.17
	Pitch	0.06	0.02	0.02
	Yaw	0.29	0.03	0.03

Table 6. RMSE of navigation results with time-delay 80 ms, 10000 ppm accelerometer scale factor error and 10000 ppm gyro scale factor error.

		Without compensation	Time-delay compensation	Time-delay and scale factor compensation
Position (m)	North	4.06	1.27	0.98
	East	3.81	1.22	1.00
	Down	4.71	2.63	0.98
Velocity (m/s)	North	0.42	0.22	0.15
	East	0.37	0.23	0.19
	Down	0.43	0.34	0.15
Attitude (deg)	Roll	0.24	0.20	0.14
	Pitch	0.08	0.06	0.03
	Yaw	0.71	0.69	0.08

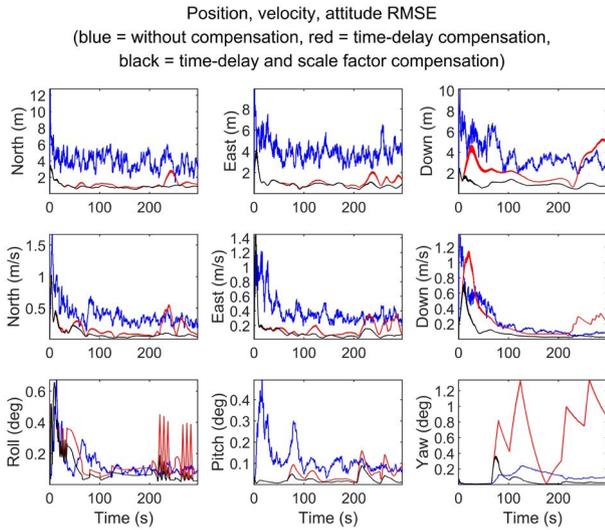
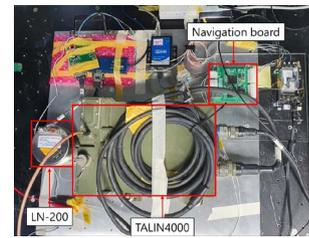


Fig. 10. Navigation results of proposed integrated navigation system with time-delay 80 ms, 10000 ppm accelerometer scale factor error and 10000 ppm gyro scale factor error.

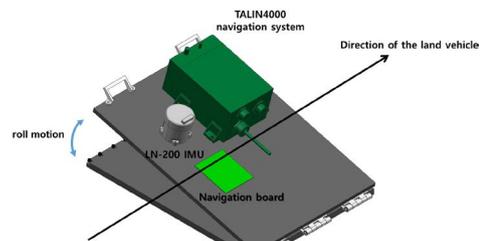
타낸 항법 결과의 평균을 나타내었다. Table 3를 보면, 시간지연을 보상할 경우, 항법 오차가 감소하는 것을 알 수 있으며, 시간지연을 보상한 결과와 시간지연과 환산계수 오차를 보상한 결과는 비슷한 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 160 ms 시간지연을 미보상한 항체의 항법 결과와 시간지연을 보상한 항체의 항법 결과를 나타내었다. Fig. 7에는 시간지연이 160 ms인 경우의 항법 결과를 나타내었으며, Table 4에 Fig. 7에 나타낸 항법 결과의 평균을 나타내었다. Fig. 8에는 240 ms 시간지연을 미보상한 항체의 항법 결과와 시간지연을 보상한 항체의 항법 결과를 나타내었다. Fig. 9에는 시간지연이 240 ms인 경우의 항법 결과를 나타내었으며, Table 5에 Fig. 9에 나타낸 항법 결과의 평균을 나타내었다. Tables 4와 5를 보면, 시간지연이 80 ms 보다 커지더라도, 비슷한 결과임을 알 수 있다.

전술한 결과에서 환산계수 오차에 대한 영향이 보이지 않는 것은 대상 EOTS IMU인 LN-200의 가속도계 환산계수 오차가 300 ppm이며, 자이로 환산계수 오차가 100 ppm으로 아주 작은 값이기 때문으로 보인다. 따라서, 환산계수 오차에 대한 영향을 확인하기 위하여 실제보다 훨씬 더 큰 값인 가속도계와 자이로 환산계수 오차를 각각 10000 ppm으로 두고, 항법 결과를 확인하였다. Fig. 10에는 시간지연이 80 ms이며, 가속도계와 자이로 환



(a)



(b)

Fig. 11. (a) Experimental setup of a land vehicle, (b) Roll motion input tool.

산계수 오차가 각각 10000 ppm인 경우의 항법 결과를 나타내었다. Table 6에 Fig. 10에 나타낸 항법 결과의 평균을 나타내었다. Table 6을 보면, 시간지연을 보상하면, 항법 오차가 감소하고, 환산계수 오차까지 보상하면, 항법 오차가 더 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11a와 같이 지상 항체에 TALIN4000과 LN-200 IMU를 탑재하고, Fig. 11b의 롤 운동 입력 치구를 통해 항체의 고기동 롤 운동을 모사한 지상 차량 실험을 수행하였다. Fig. 12a에는 TALIN4000 항법시스템에서 출력된 위치를 나타내었으며, Fig. 12b에는 TALIN4000에서 출력된 항체의 위치, 속도, 자세를 나타내었다. 지상 항체 실험에서도 TALIN4000 항법 시스템의 시간지연이 80 ms, 160 ms, 240 ms인 경우에 대하여, 제한한 통합항법 시스템의 항법 결과를 확인하였다. 실험에서는 true 위치, 속도, 자세를 알 수 없으므로, 통합항법 결과와 TALIN4000 항법 결과를 비교하였다. 그리고, TALIN4000과 LN-200 IMU 간의 장착비정렬 오차는 무시하였다.

Fig. 13에는 80 ms 지연된 TALIN4000 출력과 augmented 칼만필터를 이용하여 시간지연을 보상한 항법 결과를 나타내었는데, 항체가 고속, 고기동으로 동작하는 구간에서 augmented 칼만 필터가 항법 결과의 시간지연을 효과적으로 보상하는 것을 볼 수

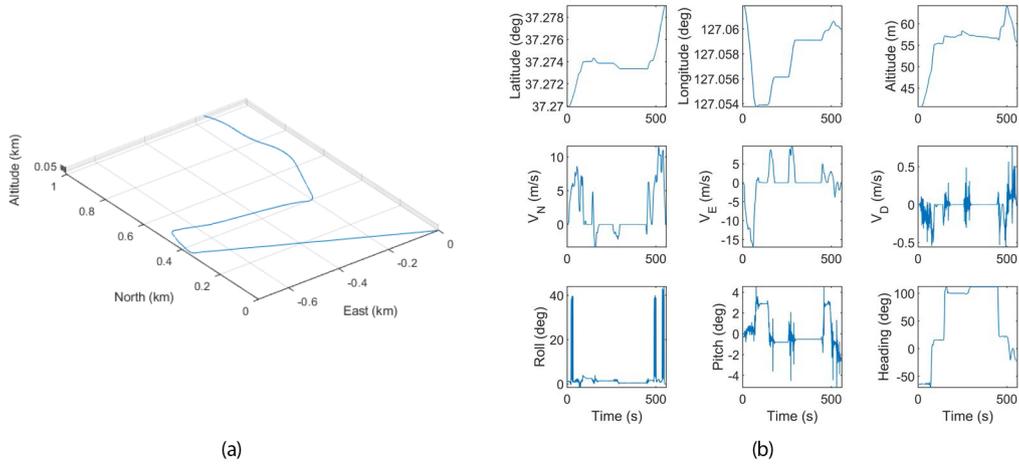


Fig. 12. (a) Trajectory of the vehicle (output of TALIN4000), (b) Position, velocity, and attitude of the TALIN4000.

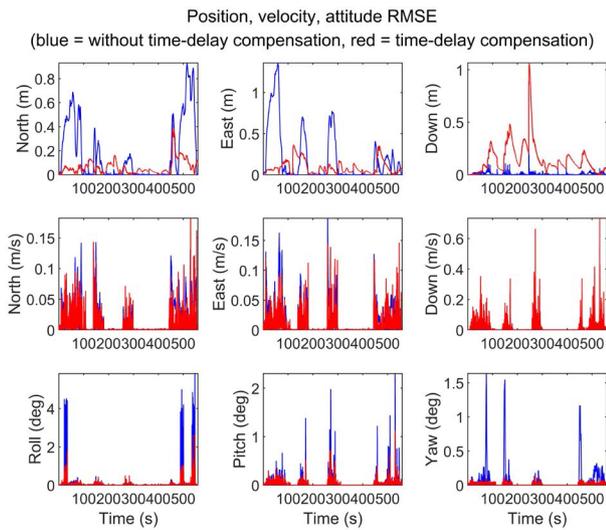


Fig. 13. Vehicle's navigation system results with time-delay 80 ms.

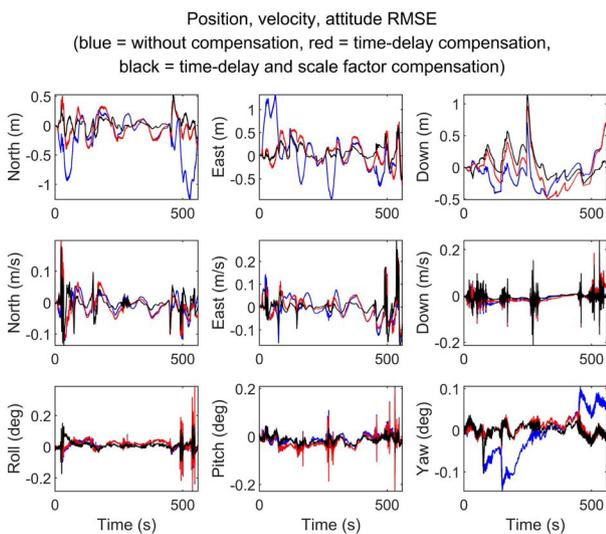


Fig. 14. Navigation results of proposed integrated navigation system with time-delay 80 ms.

Table 7. RMSE of navigation results for the land vehicle with time-delay 80 ms.

		Without compensation	Time-delay compensation	Time-delay and scale factor compensation
Position (m)	North	0.40	0.18	0.11
	East	0.45	0.26	0.17
	Down	0.25	0.29	0.24
Velocity (m/s)	North	0.04	0.04	0.03
	East	0.06	0.05	0.04
	Down	0.02	0.02	0.02
Attitude (deg)	Roll	0.03	0.03	0.02
	Pitch	0.02	0.03	0.02
	Yaw	0.05	0.02	0.01

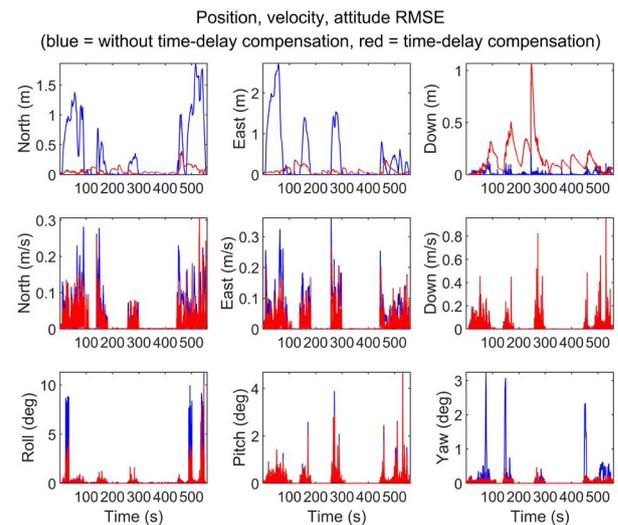


Fig. 15. Vehicle's navigation system results with time-delay 160 ms.

있다. Fig. 14에는 위치, 속도, 자세의 추정 결과를 나타내었으며, Table 7에는 Fig. 14의 RMSE를 나타내었다. Table 7을 보면, 시간 지연을 보상할 경우, 위치 오차, 속도 오차, 롤 오차와 요 오차가 조금 감소하였으며, 시간지연을 보상한 결과와 시간지연과 환산 계수 오차를 보상한 결과가 비슷한 것을 알 수 있다.

Fig. 15에는 160 ms 지연된 TALIN4000 출력과 시간지연을

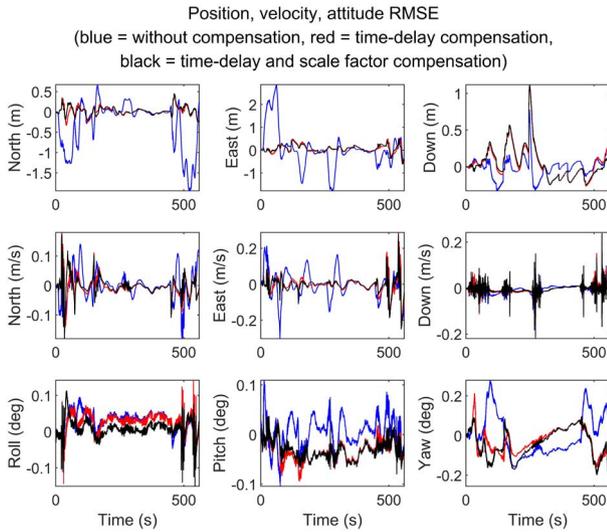


Fig. 16. Navigation results of proposed integrated navigation system with time-delay 160 ms.

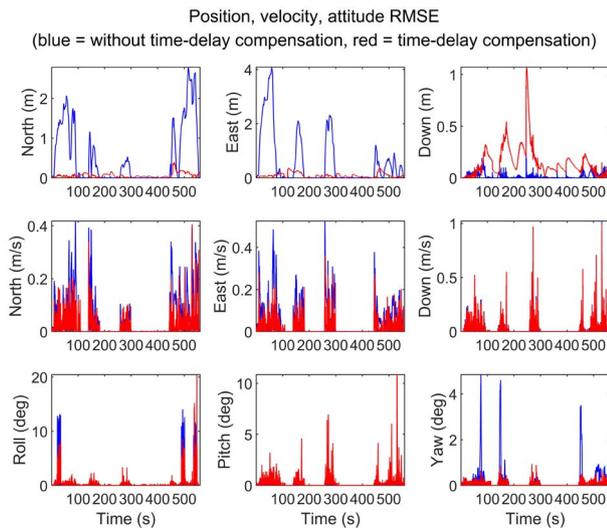


Fig. 17. Vehicle's navigation system results with time-delay 240 ms.

보상한 TALIN4000 출력, Fig. 16에는 시간지연이 160 ms인 경우의 위치, 속도, 자세 추정 결과, Fig. 17에는 240 ms 지연된 TALIN4000 출력과 시간지연을 보정한 TALIN4000 출력, Fig. 18에는 지연이 240 ms인 경우의 위치, 속도, 자세 추정 결과를 나타내었다. Table 8에는 Fig. 16의 RMSE, Table 9에는 Fig. 18의 RMSE를 나타내었다. Tables 8과 9를 보면, Table 7의 결과와 비슷한 것을 알 수 있다. 이는 시뮬레이션 결과에서 확인한 바와 같이 대상 EOTS IMU의 환산계수 오차가 작기 때문인 것으로 보인다.

대상 EOTS IMU의 환산계수 오차가 작은 경우의 결과를 나타낸 Tables 3-5, Tables 7-9를 보면, 시간지연만 보정한 통합항법 시스템과 제안한 통합항법 시스템이 비슷한 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 한편, 대상 EOTS IMU의 환산계수 오차가 큰 경우의 결과를 나타낸 Table 6를 보면, 제안한 통합항법 시스템이 가장 정확한 항법 결과를 제공하는 것을 알 수 있다. 즉, IMU의 환산계

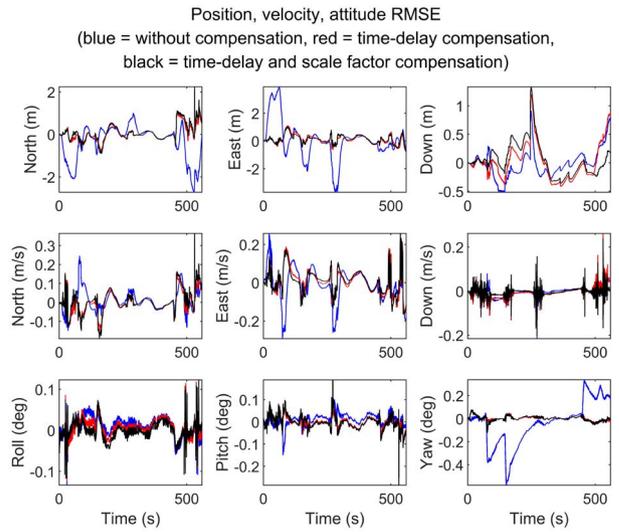


Fig. 18. Navigation results of proposed integrated navigation system with time-delay 240 ms.

Table 8. RMSE of navigation results for the land vehicle with time-delay 160 ms.

		Without compensation	Time-delay compensation	Time-delay and scale factor compensation
Position (m)	North	0.66	0.24	0.25
	East	0.90	0.30	0.27
	Down	0.25	0.31	0.29
Velocity (m/s)	North	0.04	0.04	0.04
	East	0.07	0.06	0.06
	Down	0.02	0.02	0.02
Attitude (deg)	Roll	0.02	0.02	0.02
	Pitch	0.02	0.02	0.02
	Yaw	0.13	0.02	0.02

Table 9. RMSE of navigation results for the land vehicle with time-delay 240 ms.

		Without compensation	Time-delay compensation	Time-delay and scale factor compensation
Position (m)	North	0.88	0.35	0.40
	East	1.35	0.34	0.32
	Down	0.25	0.32	0.30
Velocity (m/s)	North	0.06	0.05	0.06
	East	0.09	0.06	0.06
	Down	0.03	0.03	0.02
Attitude (deg)	Roll	0.02	0.02	0.02
	Pitch	0.03	0.02	0.03
	Yaw	0.19	0.02	0.02

수 오차가 크고, aiding signal이 지연되면, 제안한 통합항법 시스템은 가장 정확한 항법 결과를 제공한다.

6. 결론 및 추후 계획

본 논문에서는 시간지연과 환산계수 오차를 보정한 EOTS의 통합항법 시스템을 제안하였다. 제안한 통합항법 시스템의 유용함을 확인하기 위하여 측정치 생성기의 출력에 대한 시뮬레이션

과 지상 차량 실험을 통해 성능을 평가하였다. 성능평가 결과로부터 제안한 통합항법 시스템이 환산계수와 시간지연을 보상하지 않은 항법시스템보다 더 좋은 항법 결과를 제공하는 것을 확인하였다. 특히, 통합항법 시스템에 시간지연된 측정치가 입력될 때, 항체의 기동이 크면 클수록, augmented 칼만필터의 효과가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 환산계수 오차까지 보상하면, 더 좋은 항법 결과를 제공하는 것을 확인하였다. 추후에는 환산계수 오차가 큰 IMU에 대해 제안한 통합항법 시스템의 성능을 확인하고, 항공기에 TALIN4000 항법시스템과 LN-200IMU를 탑재하여 데이터를 수집하고, 항법 성능을 확인할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Agency for Defense Development (UD200003FD).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, S. H. Oh and D.-H. Hwang; methodology, S. H. Oh, W. J. Choi, J. H. Son and D.-H. Hwang; software, J. H. Son; supervision, W. J. Choi and D.-H. Hwang; writing - review & editing, D.-H. Hwang.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Balmus, E. 2015, Avionics and ATC Technology for Mission Control, *INCAS BULLETIN*, 7, 161-171. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2015.7.3.15>
- Benson Jr, D. O. 1975, A comparison of two approaches to pure-inertial and Doppler-inertial error analysis, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-11, 447-455. <https://doi.org/10.1109/TAES.1975.308106>
- Chen, Y., Zhen, K., Xue, Y., Zhang, X., Li, Y., et al. Navigation and Geo-Tracking System of UAV EO Payload, in 2015 the Chinese Society for Optical Engineering Conferences, Various, China, Nov 2015. <https://doi.org/10.1117/12.2229478>
- Chen, Y., Xue, Y., Zhang, X., Tang, C., & Jiang, N. 2013, Target Tracking System Based on Inertial Stabilized Platform, *Applied Mechanics and Materials*, 271-272, 1669-1674. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.271-272.1669>
- Choi, M., Choi, J., Park, J., & Chung, W. K. 2009, State Estimation with Delayed Measurements Considering Uncertainty of Time Delay, in 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 12-17 May 2009. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152887>
- Goshen-Meskin, D. & Bar-Itzhack, I. Y. 1992, Unified approach to inertial navigation system error modeling, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 15, 648-653. <https://doi.org/10.2514/3.20887>
- Grewal, M. S. & Andrews, A. P. 2015, *Kalman Filtering - Theory and Practice Using MATLAB*, 4th ed. (New Jersey: Wiley).
- Groves, P. D. 2013, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, 2nd ed. (Boston: Artech House)
- Kim, S.-S., Moon, S.-M., Kwon, K.-H. & Yun C.-R. 2013, Enhancement of Geo-pointing Performance for Electro-Optical Systems by Compensating Transmission Time Delay of Navigation Data, *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 16, 191-198. <https://doi.org/10.9766/KIMST.2013.16.2.191>
- Park, J.-K. & Jung, S. 2005, An Experimental Study on Coordinates Tracker Realization for EOTS Slaved to the Radar of a Helicopter, *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, 11, 369-377.
- Park, J., Ahn, H., Jung, S., Noh, J., Hong, K., et al. 2021, Roll Angle Estimation of Slowly Rolling Guided Munition With Time-delayed Measurement and Its Verification Through Flight Experiment, *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 49, 373-381. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.5.373>
- Park, H.-J., Go, K.-C., & Kim, J.-H. 2014, Design Method for Integrated Modular Avionics System Architecture, *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 39C, 1094-1103. <https://doi.org/10.7840/kics.2014.39C.11.1094>
- Song, K. W. & Lee, S. J. 2001, The Kalman Filter Design for the Transfer Alignment by Euler Angle Matching, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 7, 1044-1050.
- Sun, H., Jia, H., Wang, L., Xu, F., & Liu, J. 2021, Systematic Error Correction for Geo-Location of Airborne Optoelectronic Platforms, *Applied Sciences*, 11, 11067. <https://doi.org/10.3390/app112211067>
- Titterton, D. H. & Weston, J. L. 2004, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2nd ed. (Stevenage: The Institution of Electrical Engineers). https://doi.org/10.1049/PBRA017E_fm
- Willers, C. J. 2013, *Electro-Optical System Analysis and*

Design: A Radiometry Perspective, (Washington: SPIE Press). <https://doi.org/10.1117/3.1001964>

Yim, J.-B., Moon, S.-M., & Lyou, J. 2011, Compensation of Geo-pointing Error due to Information Transport Delay for Electro-Optical Tracking Systems, Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea - Computer and Information, 48, 1-7.



Jae Hoon Son received B.S. degree in the Department of IT Electronics Engineering, Daejeon University, in 2018. Now he is a Ph.D. candidate at the Department of Electronics Engineering, Chungnam National University. His research interest is inertial navigation system, Integration navigation system and

embedded system.



Woojin Choi is a senior researcher of Defense Space Technology Center, Agency for Defense Development, Korea. He received his B.S. degree from Tsukuba University, Japan in 2014. He received M.S. degree from the University of Tokyo, Japan in 2014. His research interests include electro-optical tracking system, PAT system of satellite laser communication terminal and military application.



Sang Heon Oh is a Head of Advanced Technology Laboratory, Microinfinity Co., Ltd., Korea. He received his B.S. degree from Chungnam National University, Korea in 1999. He received M.S. and Ph.D. degree from Chungnam National University, Korea in 2001 and 2006, respectively. His research interests include GPS/INS integration system, inertial navigation system, and military application.



Dong-Hwan Hwang is a professor in the Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Korea. He received his B.S. degree from Seoul National University, Korea in 1985. He received M.S. and Ph.D. degree from Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea in 1987 and 1991, respectively. His research interests include GNSS/INS integrated navigation system design and GNSS applications.

