

# Integrated Navigation Filter Design for Trains Considering the Mounting Misalignment Error of the IMU

Myeong Seok Chae<sup>1</sup>, Seong Yun Cho<sup>2†</sup>, Kyung Ho Shin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of IT Engineering, Kyungil University, Gyeongsan 38428, Korea

<sup>2</sup>Department of Robotics and Mobility, Kyungil University, Gyeongsan 38428, Korea

<sup>3</sup>Railway Designated Certification Department, Korea Railroad Research Institute, Uiwang 16105, Korea

## ABSTRACT

To estimate the location of the train, we consider an integrated navigation system that combines Inertial Navigation System (INS) and Global Navigation Satellite System (GNSS). This system provides accurate navigation results in open sky by combining only the advantages of both systems. However, since measurement update cannot be performed in GNSS signal blocked areas such as tunnels, mountain, and urban areas, pure INS is used. The error of navigation information increases in this area. In order to reduce this problem, the train's Non-Holonomic Constraints (NHC) information can be used. Therefore, we deal with the INS/GNSS/NHC integrated navigation system in this paper. However, in the process of installing the navigation system on the train, a Mounting Misalignment Error of the IMU (MMEI) inevitably occurs. In this case, if the NHC is used without correcting the error, the navigation error becomes even larger. To solve this problem, a method of easily estimating the MMEI without an external device is introduced. The navigation filter is designed using the Extended Kalman Filter (EKF) by considering the MMEI. It is assumed that there is no vertical misalignment error, so only the horizontal misalignment error is considered. The performance of the integrated navigation system according to the presence or absence of the MMEI and the estimation performance of the MMEI according to the method of using NHC information are analyzed based on simulation. As a result, it is confirmed that the MMEI is accurately estimated by using the NHC information together with the GNSS information, and the performance and reliability of the integrated navigation system are improved.

**Keywords:** train navigation, INS/GNSS/NHC, mounting misalignment error, EKF

## 1. INTRODUCTION

철도 시스템에서 열차의 위치정보는 안전과 편의 목적으로 매우 중요하다. 즉, 열차 사이의 안전한 배차 간격을 조정함으로써 추돌사고를 방지하고, 정확한 출발/도착 시간 정보를 제공함으로써 탑승객들의 스케줄링에 도움을 준다. 기본적으로 열차의 위치 정보는 철도에 장착된 Balise, 궤도회로와 같은 인프라 기반으로 획득되고 있다. 여기에 두 가지 문제점이 있다. 첫 번째는 인프라

구축 및 유지보수에 막대한 비용지출이 요구되고, 두 번째는 인프라 기반 열차 검지 (Detection) 과정에서 미검지 (Undetection) 또는 오검지 (False Detection)로 인해 사고가 발생할 수 있다는 것이다. 이런 문제를 해결하기 위해 열차에 항법장치를 장착하고 항법장치에서 제공하는 열차의 위치정보를 기반으로 철도 시스템을 운영하는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다 (Cho et al. 2019, Chen et al. 2020).

열차에 사용될 수 있는 항법장치 중 가장 일반적인 것은 Global Navigation Satellite System (GNSS)이다. GNSS는 항법 위성의 신호를 수신하여 열차의 위치와 속도정보를 계산할 수 있으며, Satellite-based Augmentation System (SBAS), Real Time Kinematic (RTK), Virtual Reference Station (VRS) 등과 같은 Differential Global Positioning System (DGPS)를 기반으로 항법 정보의 정확도를 높일 수 있다. 그러나 터널, 산악지역 및 도심 지역과 같이 항법위성의 신호를 수신할 수 없거나 신호의 미약/

Received Jun 01, 2021 Revised Jun 29, 2021 Accepted Jul 02, 2021

†Corresponding Author

E-mail: sycho@kiu.kr

Tel: +82-53-600-5584 Fax: +82-53-600-5599

Myeong Seok Chae <https://orcid.org/0000-0002-2638-559X>

Seong Yun Cho <https://orcid.org/0000-0002-4284-2156>

Kyung Ho Shin <https://orcid.org/0000-0002-4700-5955>

다중경로가 발생하는 지역에서는 항법정보를 제공하지 못하거나 오차가 증가하게 되기 때문에 사용이 제한적이다 (Grewal et al. 2001). 이 문제를 해결하기 위해 Dead Reckoning (DR) 또는 Inertial Navigation System (INS)를 GNSS와 결합한 복합항법시스템을 사용할 수 있다 (Brown & Hwang 1997). 그러나 위성항법 신호가 차단되는 지역에서 단독으로 사용되는 INS의 항법정보는 시간에 따라 점점 증가하는 오차 특성을 갖는 문제를 안고 있다 (Cho 2014).

INS의 오차를 GNSS와 상관없이 보정할 수 있는 방법으로는 열차에 장착된 속도계 정보와 열차의 Non-Holonomic Constraints (NHC) 정보를 복합항법 필터의 측정치로 활용하는 방법이 있다 (Cho et al. 2019). 그러나 여기에서도 문제점이 존재한다. 열차의 미끄러짐 현상이 발생하는 경우에 속도계 정보는 오차를 포함하게 된다. 그리고 열차의 진행축에 수직인 두 축의 속도가 0이라는 NHC 정보를 사용하기 위해서는 열차에 장착되는 IMU의 센서 좌표계와 열차의 동체좌표계는 정확하게 정렬되어야 하며 이 조건이 만족되지 않으면 INS의 오차보정에 문제가 발생하게 된다 (Park et al. 2009). 하지만 열차에 MEMS형 IMU를 장착하는 과정에서 두 좌표계의 완전한 정렬은 물리적으로 불가능하며, 특히 수평축 비정렬 오차는 비교적 크게 발생한다. 이 경우 NHC 정보를 사용한 필터링 과정에서 잘못된 항법정보 보정이 발생한다.

본 논문에서는 열차용 INS/GNSS/NHC 복합항법시스템을 구성할 때 IMU의 장착 비정렬 오차 (MMEI: Mounting Misalignment Error of the IMU)가 존재하는 경우를 고려하여 필터를 설계한다. 필터는 INS의 비선형성을 고려하여 Extended Kalman Filter (EKF)를 사용하며, MMEI는 수직축에만 발생하는 것으로 가정한다. 설계된 복합항법 필터의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 궤적은 오산 시험선 궤적을 사용하며, Monte-Carlo 시뮬레이션을 통한 Root Mean Squared Errors (RMSE)와 장착 비정렬 오차의 추정 오차를 분석하여 제안된 필터의 성능을 검증한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 열차용 복합항법시스템에 대하여 설명하고, 3장에서는 MMEI를 고려한 복합항법 필터 설계기법을 설명한다. 시뮬레이션 분석을 4장에서 제공하고, 마지막 장에서 논문을 마무리한다.

## 2. INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM FOR TRAINS

INS와 GNSS는 상호보완적인 특성을 갖기 때문에 두 시스템의 결합을 통해 장·단기 정확도와 안정성을 갖는 항법시스템을 구성할 수 있다. 본 논문에서는 가장 쉽게 구성할 수 있는 약결합 방식의 결합 시스템을 고려한다. 열차가 출발하기 전 정지상태에서 MEMS형 Inertial Measurement Unit (IMU)를 사용하여 개략정렬 (Coarse Alignment)을 통해 자세정보를 계산한다. 이때 Yaw 각은 열차의 초기 방향정보를 고려하여 오차가 작은 방향각 정보를 입력하는 것으로 한다. 초기 자세 정보는 Euler 각으로 계산되며, 이 정보는 Direction Cosine Matrix (DCM)과 쿼터니언

(Quaternion)으로 변환 가능하다. INS에서는 쿼터니언 기반으로 자세정보를 갱신한 다음 DCM으로 변환한다. 그리고 DCM 정보를 사용하여 가속도계의 출력을 항법좌표계로 변환하고 Coriolis 효과와 중력 성분을 제거한 다음 적분을 통해 속도를 갱신하고, 한 번 더 적분을 함으로써 위치를 갱신하게 된다 (Siouris 1993, Titterton & Weston 1997).

INS에서 계산된 항법정보는 초기 자세오차 및 관성센서 오차로 인해 시간에 따라 증가하는 오차를 갖는다. 이 오차는 결합 필터에서 GNSS 신호와 결합하여 추정된 다음 보상하게 된다. 이때 결합 필터는 INS의 비선형성을 고려하여 EKF가 주로 사용되며, Uncented Kalman Filter (UKF) 및 Cubature Kalman Filter (CKF), 등이 사용되기도 한다 (Cho 2014).

GNSS 신호를 사용할 수 있는 구간에서는 INS/GNSS 결합을 통해 INS의 오차를 보정할 수 있다. 그러나 GNSS 음영지역에서는 필터의 측정치 갱신이 불가능하므로 순수 INS만으로 항법정보를 계산하게 됨으로써 오차가 증가하게 된다. GNSS 정보를 사용할 수 있는 구간에서 관성센서의 바이어스를 추정/보상함으로써 GNSS 음영지역에서 INS의 오차 증가 속도는 줄일 수 있다. 그러나 터널과 같이 음영지역이 긴 구간에서는 순수 INS의 시간에 따른 오차의 발산은 막을 수 없다. 이 문제를 해결하기 위해서는 이 환경 내에서 이용 가능한 센서를 추가하거나 사용 가능한 정보를 최대한 이용하여야 한다. 본 논문에서는 열차의 NHC 특성을 통한 속도 정보를 사용하도록 한다. 즉 열차는 철도 상에서만 운행하므로 전진방향에 수직인 두 축의 속도는 항상 0이 된다. 따라서 열차의 동체 좌표계상에서 식 (1)의 조건이 만족된다.

$$v_y^b = v_z^b = 0 \tag{1}$$

여기서  $v_j^b$ 는 열차의 동체 좌표계상의  $j$ 축 속도이다.

NHC 정보를 칼만필터의 측정치로 이용하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$z_k = \begin{bmatrix} \hat{v}_{y,k}^b \\ \hat{v}_{z,k}^b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_y^b \\ v_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_{y,k}^b \\ \hat{v}_{z,k}^b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서  $v_j^b$ 는 INS에서 계산된 항법좌표계 상의 속도를 식 (3)과 같이 동체 좌표계 상의  $j$ 축 속도로 변환한 속도정보이다.

$$\hat{V}_k^b = (\hat{C}_{b,k}^n)^T \hat{V}_k^n \tag{3}$$

여기서

$$\hat{C}_{b,k}^n = (I - \phi^n \times) C_{b,k}^n \tag{4}$$

여기서  $\phi^n$ 는 항법좌표계 상에서 정의된 자세오차를 나타낸 것이다.

식 (4)를 식 (3)에 대입한 다음 선형섭동법을 통해 식을 전개하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{V}_k^b &= \left\{ (I - \phi^n \times) C_{b,k}^n \right\}^T (V_k^n + \delta V_k^n) \\ &\cong C_{n,k}^b V_k^n - C_{n,k}^b (\phi^n \times)^T V_k^n + C_{n,k}^b \delta V_k^n \\ &\equiv V_k^b + \delta V_k^b \end{aligned} \tag{5}$$

따라서 동체좌표계 상의 속도 오차식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\delta V_k^b &= C_{n,k}^b \delta V_k^n - C_{n,k}^b (\phi^n \times)^T V_k^n \\ &= C_{n,k}^b \delta V_k^n - C_{n,k}^b (V_k^n \times) \phi^n\end{aligned}\quad (6)$$

NHC 정보 기반으로 복합항법시스템의 15차 결합필터를 위한 측정치 행렬은 식 (7)과 같이 유도된다 (Cho 2019).

$$H_{NHC,k} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 3} & (C_{n,k}^b)_{2,3,1,3} & \{-C_{n,k}^b (V_k^n \times)\}_{2,3,1,3} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} \end{bmatrix}\quad (7)$$

### 3. INTEGRATION FILTER DESIGN CONSIDERING MMEI

#### 3.1 NHC Considering MMEI

Fig. 1은 열차의 동체좌표계와 IMU의 센서 좌표계 사이의 장착 비정렬의 개념을 나타내고 있다. 장착 비정렬 없이 장착되면 이 두 좌표계는 일치하게 된다. 그러나 작은 크기의 MEMS형 IMU를 비정렬 없이 열차에 정확하게 장착하는 것은 사실상 쉽지 않다. Fig. 1에서 나타낸 것처럼 두 좌표계의 중심은 같다고 가정하고 장착오차는  $\xi^b = [\xi_x \ \xi_y \ \xi_z]^T$ 로 나타낸다. 여기서  $\xi_x$ 와  $\xi_y$ 는 크지 않으므로 없다고 가정하고 본 논문에서는 수평 장착오차  $\xi_x$ 만을 고려한다. 두 좌표계 사이의 DCM은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_s^b = \begin{bmatrix} \cos \xi_z & -\sin \xi_z & 0 \\ \sin \xi_z & \cos \xi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\quad (8)$$

장착 비정렬 오차가 없는 경우 열차의 NHC 움직임을 고려하면 열차의 전진방향으로만 속도가 발생한다. 그러나 장착 비정렬에 의하여 센서 좌표계 상의 속도는 식 (9)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}V^s &= (C_s^b)^T V^b \\ &= \begin{bmatrix} v_x^b \cos \xi_z \\ -v_x^b \sin \xi_z \\ 0 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (9)$$

여기서  $v_x^b$ 는 열차의 전진방향 속도를 의미한다.

INS에서 계산되는 항법정보는 IMU의 센서 측에 정렬되어 계산된다. 따라서 INS에서 계산된 속도 정보는 식 (9)와 같이 장착 비정렬에 의한 영향을 받아 NHC 조건을 벗어나게 된다. 즉, y축 속도정보가 전진방향 속도에 비례하여 나타나게 된다. 이 경우 NHC 정보를 사용한 필터링을 하게 되면 오차가 발생하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 먼저 상태변수에 수평 장착 비정렬 오차를 포함시킨다.

$$\delta X = [\delta P \ \delta V^n \ \phi^n \ \nabla \ \varepsilon \ \xi_z]^T\quad (10)$$

여기서  $\delta P$ ,  $\delta V^n$ ,  $\phi^n$ 는 위치오차, 속도오차, 자세오차를 각각 나

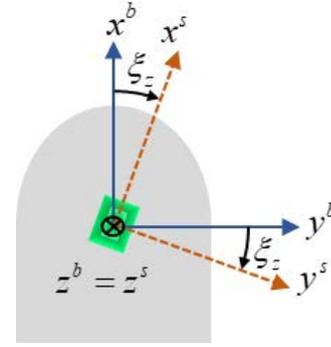


Fig. 1. Concept of the MMEI.

타내며,  $\nabla$ 와  $\varepsilon$ 는 3축의 가속도계 바이어스와 자이로 바이어스를 나타낸 것으로 15차 EKF용 상태변수를 의미한다.

그 다음 NHC 정보를 칼만필터의 측정치로 사용하기 위하여 항법좌표계 상에서 계산된 INS의 속도 정보는 식 (11)과 같이 동체 좌표계가 아닌 센서 좌표계로 변환한다.

$$\hat{V}_k^s = \hat{C}_{b,k}^s (\hat{C}_{b,k}^n)^T \hat{V}_k^n\quad (11)$$

여기서

$$\hat{C}_{b,k}^s = (I - \xi^b \times) C_{b,k}^s\quad (12)$$

식 (4)와 식 (12)를 식 (11)에 대입하고 오차 항들의 곱은 무시하고 정리하면 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned}\hat{V}_k^s &= (I - \xi^b \times) C_{b,k}^s \{(I - \phi^n \times) C_{b,k}^n\}^T (V_k^n + \delta V_k^n) \\ &= (I - \xi^b \times) C_{b,k}^s \{C_{n,k}^b + C_{n,k}^b \phi^n \times\} (V_k^n + \delta V_k^n) \\ &= C_{b,k}^s \{C_{n,k}^b + C_{n,k}^b \phi^n \times\} (V_k^n + \delta V_k^n) \\ &\quad - (\xi^b \times) C_{b,k}^s \{C_{n,k}^b + C_{n,k}^b \phi^n \times\} (V_k^n + \delta V_k^n) \\ &\cong C_{b,k}^s C_{n,k}^b V_k^n + C_{b,k}^s C_{n,k}^b \delta V_k^n - C_{b,k}^s C_{n,k}^b (V_k^n \times) \phi^n \\ &\quad + C_{b,k}^s C_{n,k}^b (V_k^n \times) \xi^b \\ &\cong V_k^s + \delta V_k^s\end{aligned}\quad (13)$$

따라서 센서 좌표계 상의 속도 오차는 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta V_k^s = C_{b,k}^s C_{n,k}^b \delta V_k^n - C_{b,k}^s C_{n,k}^b (V_k^n \times) \phi^n + C_{b,k}^s C_{n,k}^b (V_k^n \times) \xi^b\quad (14)$$

센서 좌표계 상의 y축과 z축만을 고려하여 측정치 행렬을 구성하면 식 (15)와 같다.

$$H_{NHC,k}^s = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 3} & \{C_{b,k}^s C_{n,k}^b\}_{2,3,1,3} & \{-C_{b,k}^s C_{n,k}^b V_k^n \times\}_{2,3,1,3} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{2 \times 3} & \{C_{b,k}^s (C_{n,k}^b)^T (V_k^n \times)\}_{2,3,3} \end{bmatrix}\quad (15)$$

### 3.2 INS/GNSS/NHC Integrated Navigation System Considering MMEI

MMEI가 존재하면 INS는 IMU의 센서 좌표계 상에서 항법을 수행하게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{q}_s^n &= \frac{1}{2} q_s^n * \{ \omega_{is}^s - C_n^s (\omega_{ie}^n - \omega_{en}^n) \} \\ \dot{V}^n &= C_s^n f^s - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V^n + g^n \\ \dot{P} &= \begin{bmatrix} v_N & v_E & -v_D \\ R_m + h & (R_l + h) \cos L & \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $q$ 는 쿼터니언을 의미하며,  $C_n^s$ 는 항법 좌표계와 센서 좌표계 사이의 DCM,  $\omega_{is}^s$ 와  $f^s$ 는 각각 자이로와 가속도계 출력, 그리고  $\omega_{ie}^n$ 와  $\omega_{en}^n$ 는 각각 지구자전각속도와 열차의 속도에 의한 항법 좌표계의 회전각속도 벡터를 의미한다.  $g^n$ 는 중력 벡터,  $R_m$ 과  $R_l$ 는 위치  $P = [L \quad l \quad h]^T$ 에서 각각 위도방향과 경도방향의 지구 반경을 의미한다.

식 (10)에서 설정한 상태변수에 따라 칼만필터 시스템/측정치 모델은 식 (17)과 같이 설정된다.

$$\begin{aligned} \delta \dot{X}(t) &= F(t) \delta X(t) + w(t) \\ &= \begin{bmatrix} F_{15 \times 15}(t) & 0_{15 \times 1} \\ 0_{1 \times 15} & 0 \end{bmatrix} \delta X(t) + w(t), \quad w \sim N(0, Q) \\ z(t) &= H(t) \delta X(t) + v(t), \quad v \sim N(0, R) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서  $F_{15 \times 15}(t)$ 는 기본 15차 시스템 행렬이며 (Seo et al. 2006), 측정 행렬은 GNSS 신호 수신 상황과 NHC 정보의 활용 방법에 따라 다르게 설정된다.

먼저 GNSS 기반 위치/속도 정보만 측정치로 사용하면 측정 행렬과 측정치 오차 공분산 행렬은 식 (18)과 설정한다.

$$H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 10} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 10} \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} \sigma_{Pos}^2 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \sigma_{Vel}^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서  $\sigma_{Pos}$ 와  $\sigma_{Vel}$ 는 GNSS 기반으로 획득된 위치/속도 정보의 표준편차 벡터를 의미한다.

GNSS 음영지역에서 NHC 정보만을 측정치로 사용하면 식 (15)와 같이 측정 행렬을 설정하고 측정치 오차 공분산 행렬은  $R = [\sigma_{NHC}^2]$ 와 같이 설정한다. 여기서  $\sigma_{NHC}$ 는 열차의 진동에 의해 발생하는 y, z축 속도의 표준편차 벡터를 의미하며 작은 값으로 설정한다.

그리고 GNSS 정보와 NHC 정보를 함께 사용하게 되면 측정 행렬과 측정치 오차 공분산 행렬은 식 (19)와 같이 설정한다.

$$H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{2 \times 3} & \{C_{b,k}^s, C_{n,k}^b\}_{2,3,1,3} & \{-C_{b,k}^s, C_{n,k}^b V_k^n \times\}_{2,3,1,3} & 0_{2 \times 3} \end{bmatrix}$$

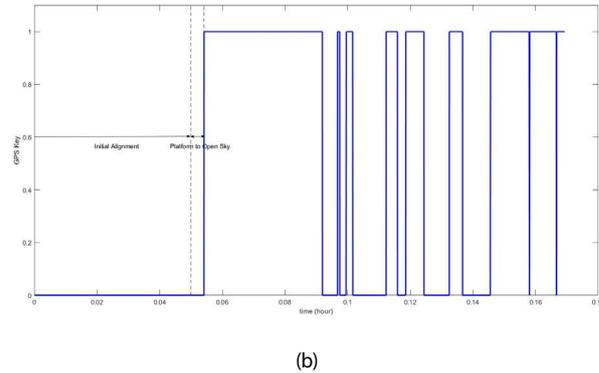
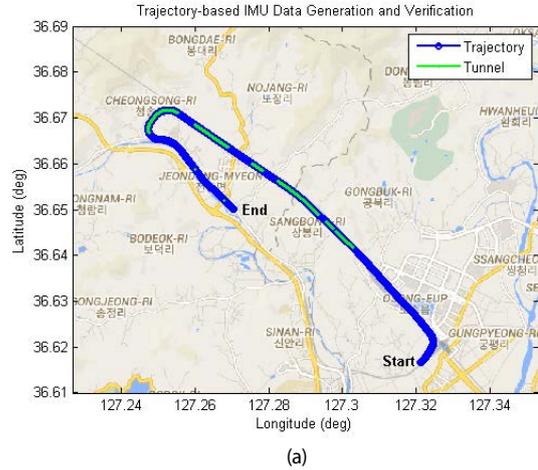


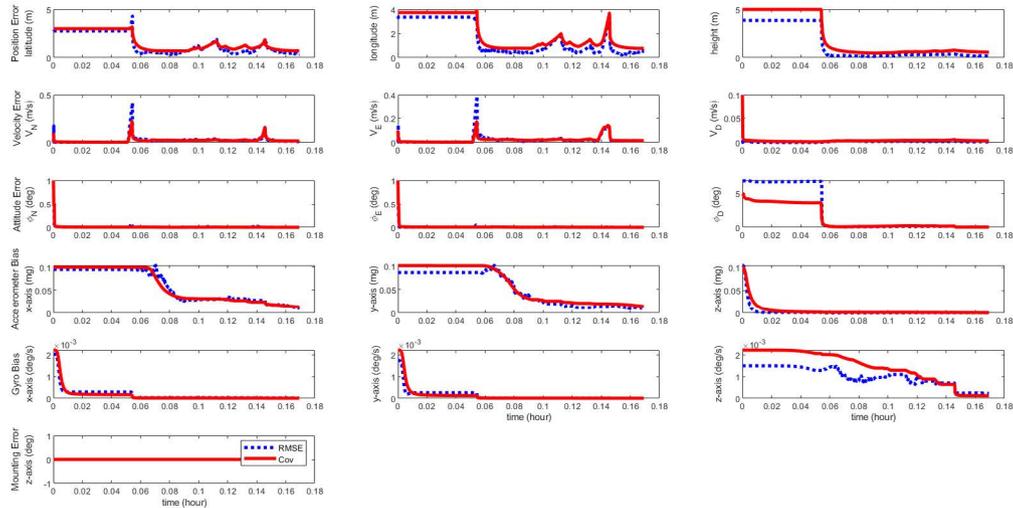
Fig. 2. Reference trajectory. (a) trajectory, (b) GNSS signal reception situation by tunnels.

$$R = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{2 \times 3} & \{C_{b,k}^s, (C_{b,k}^n)^T (V_k^n \times)\}_{2,3,3} \end{bmatrix} \quad (19)$$

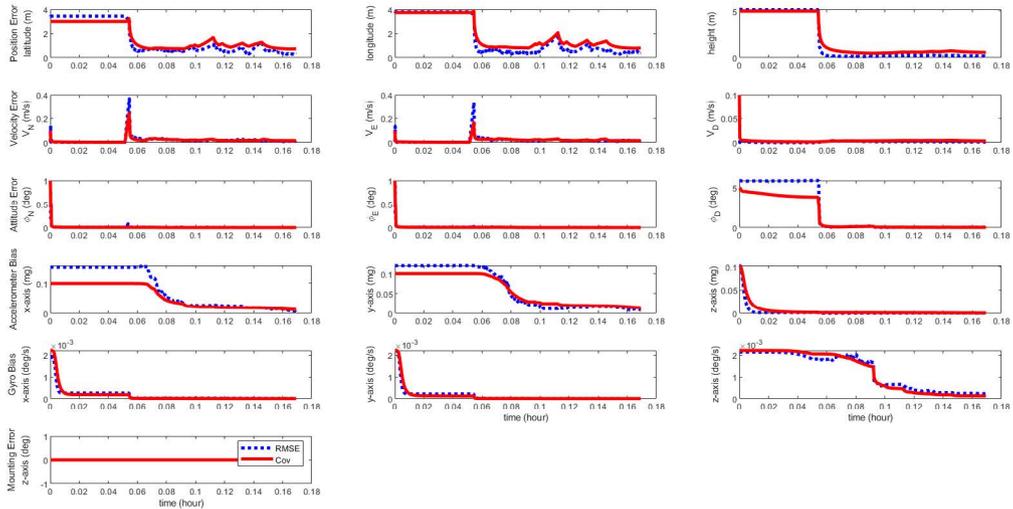
칼만필터는 IMU의 출력주기에 동기되어 시간전파 (Time Propagation)되며, GNSS 측정치 출력주기에 동기되어 측정치 갱신 (Measurement Update)을 수행한다. NHC 정보는 항상 만족되는 조건이지만 이 논문에서는 GNSS 측정치 출력주기와 같은 주기로 사용한다. 측정치 갱신을 통해 추정된 상태변수 중에서 위치, 속도, 자세오차는 INS에서 계산된 항법정보와 차를 통해 INS의 오차를 보정하며, 센서 바이어스는 이전 추정값에 더해져 가속도계와 자이로 출력값을 보정하며, MMEI는 이전 추정값에 더해져  $C_b^s$ 를 보정한다.

### 4. SIMULATION ANALYSIS

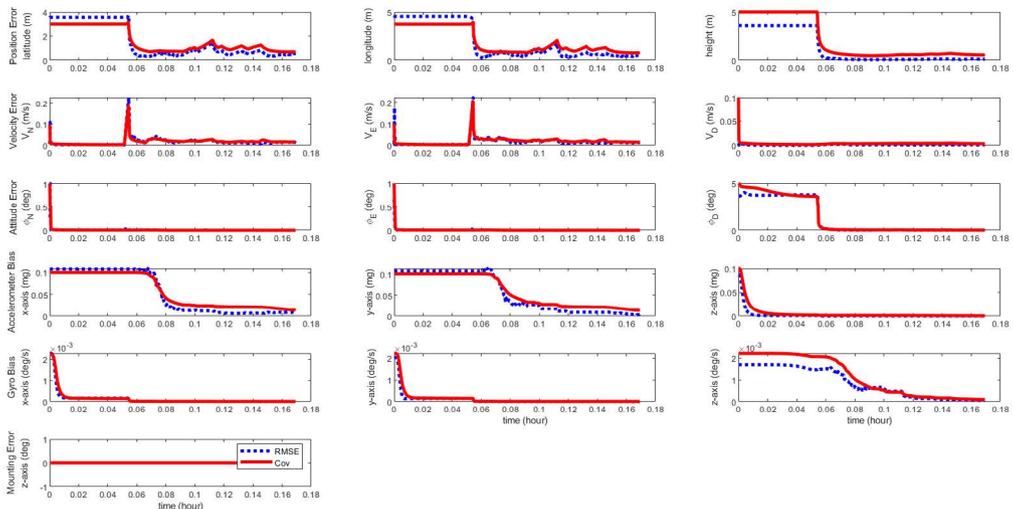
제한한 MMEI를 고려한 INS/GNSS/NHC 복합항법 필터의 성



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Reliability analysis of the integrated navigation system without MMEI. (a) INS/GNSS, (b) INS/GNSS/NHC-option, (c) INS/GNSS/NHC-default.

능과 신뢰도를 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 열차용 항법 시뮬레이션을 위해 오송 시험선로의 실 궤적을 기반으로 생성된 궤적을 사용하였다. 실 궤적 데이터는 열차에 항법장치를 탑재하고 운행시험을 하면서 획득된 위치정보를 사용하여 시뮬레이션 조건에 맞는 기준 궤적을 생성하고, 생성된 기준 궤적을 기반으로 센서 데이터를 생성한 다음 시뮬레이션에 활용한다 (Chae et al. 2021).

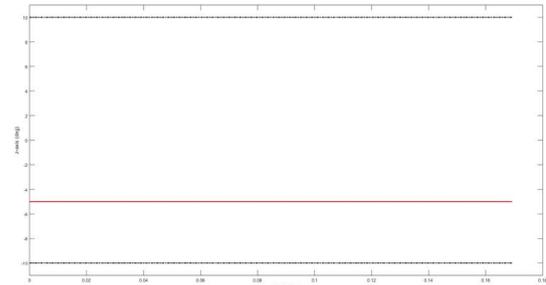
시뮬레이션에 사용된 IMU는 Novatel 사의 OEM-IMU-EG370N을 모델로 하며, IMU의 잡음 규격은 다음과 같다.

- Angular random walk: 0.06 deg/ $\sqrt{\text{hr}}$
- Velocity random walk: 0.025 m/s/ $\sqrt{\text{hr}}$

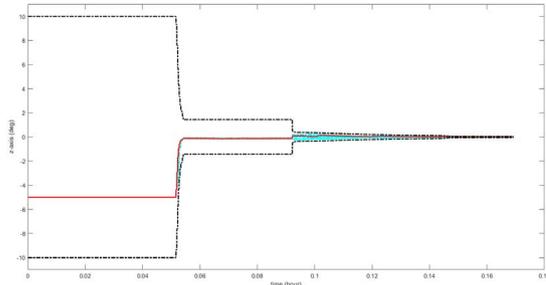
열차의 초기 수평 자세오차를 1°, 수직 자세오차를 5°로 설정하였다. 그리고 MMEI는 수평 장착오차만 있다고 가정하고 5°로 설정하였다. Fig. 2는 기준궤적을 보여주고 있으며 초록색으로 나타낸 부분은 터널 구간이다. 열차는 처음 3분 동안 정지 상태를 유지하여 초기정렬을 수행한다. 열차 정류장에서는 일반적으로 GNSS 신호받지 못하는 환경이기 때문에 열차가 출발하고 정류장을 빠져나가는 시간을 15초로 설정하고 이 구간에서는 순수 INS만 구동시킨다. 터널 구간에서는 GNSS 신호가 차단되며 이 구간에서는 NHC 정보만을 사용하여 필터를 구동시킨다. Fig. 2b에서 GNSS Key가 1 이면 GNSS 신호가 수신 가능한 구간이며, 0 이면 GNSS 신호가 수신 불가능한 구간으로 터널을 의미한다. 열차의 속도는 0.44 m/s<sup>2</sup>의 가속도로 증가하여 최고속도인 120 km/hr에 도달하면 최고속도를 유지한 상태로 주행하도록 설정하였다. Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 통계적인 특성을 분석하였으며 시뮬레이션 횟수는 10으로 설정하였다. INS/GNSS, INS/GNSS/NHC-Option, 그리고 INS/GNSS/NHC-Default에 따라 측정치 사용 방법에 따른 복합항법시스템의 성능을 분석하였다. 여기서 NHC-Option는 NHC 정보를 GNSS 음영지역에서만 사용하는 것이며, NHC-Default는 NHC 정보를 GNSS와 함께 항상 사용하는 것을 의미한다.

#### 4.1 Analysis of the Integrated Navigation System without MMEI

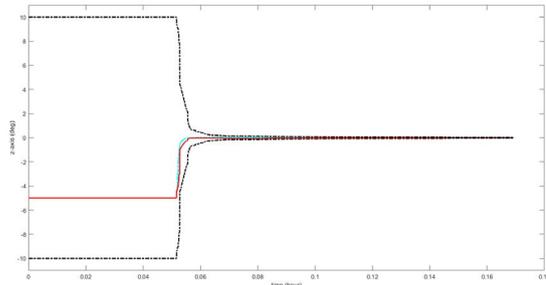
Fig. 3은 열차에 IMU가 이상적으로 장착되어 MMEI가 없는 경우로 각 측정치 사용 방법에 따른 오차 공분산과 RMSE를 나타낸 것이다. 그림에서 빨간색 실선은 EKF에서 제공하는 오차 공분산이며, 파란색 점선은 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 계산된 RMSE 값이다. 먼저 (a)는 INS/GNSS의 결과로 회전 구간에서 수평축 가속도계 바이어스 및 Z축 자이로 바이어스의 가관측성이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 회전 터널구간에서 터널이 끝나고 측정치 갱신을 하면서 방위각 오차가 더 줄어드는 것을 Fig. 2b와 함께 분석함으로써 확인할 수 있다. 그러나 터널 안에서는 측정치 갱신이 불가능하므로 위치 및 속도의 오차가 터널의 길이에 비례하여 계속 증가하는 것을 알 수 있다. (b)는 INS/GNSS/NHC-Option의 결과로 터널구간에서 NHC를 측정치로 사용함으로써 전체적인 가관측성이 향상되는 것을 확인할 수 있으며 특히



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Estimation results of MMEI. (a) INS/GNSS, (b) INS/GNSS/NHC-option, (c) INS/GNSS/NHC-default.

회전 터널에서는 가관측성이 좀 더 향상되는 것을 알 수 있다. 이러한 영향으로 인해 방위각 오차가 줄어들며 터널에서 위치 및 속도 오차의 증가가 (a)에 비해 감소하는 것을 알 수 있다. 마지막으로 (c)는 INS/GNSS/NHC-Default의 결과로 Open Sky환경에서 GNSS와NHC를 같이 사용함으로써 방위각 추정 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.2 Analysis of the Integrated Navigation System with MMEI

Figs. 4와 5는 MMEI가 있는 경우의 시뮬레이션 결과이다. Fig. 4는 MMEI 추정 결과로 검정색 점선은 오차 공분산을 통해 계산된 2σ (95.4%) 값이며 하늘색 실선은 시뮬레이션의 1~9번의 추정치이며 빨간색 실선은 마지막 10번째 시뮬레이션의 추정치이다.

INS/GNSS에서는 MMEI가 추정 불가함을 Fig. 4a를 통해 알 수 있다. GNSS 신호를 수신할 수 있는 곳에서 위치와 속도는 GNSS 측정치를 통해 보정된다. 그러나 방위각 오차는 MMEI 만큼의 추

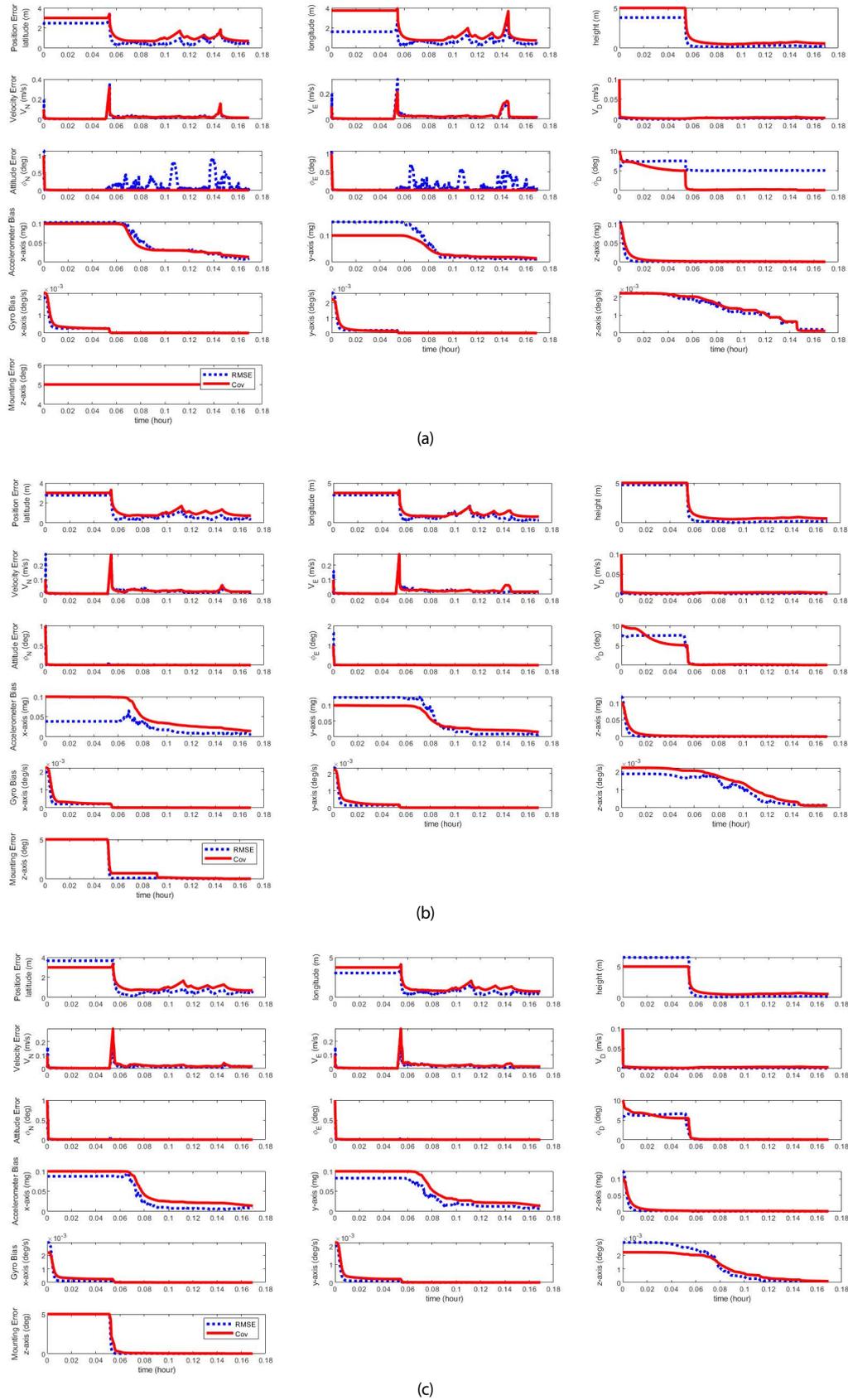


Fig. 5. Reliability analysis of the integrated navigation system with MMEI. (a) INS/GNSS, (b) INS/GNSS/NHC-option, (c) INS/GNSS/NHC-default

정오차를 갖게되고 수평축 자세 추정치 또한 오차가 크게 발생하는 것을 Fig. 5a를 통해 확인할 수 있다. 또한 측정치 갱신이 없는 터널 구간에서는 위치 및 속도 오차가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

NHC-Option의 경우 MMEI 추정값을 통해 보정된 NHC 정보를 터널구간에만 사용하기 때문에 터널이 없는 경우에는 INS/GNSS의 경우와 같이 추정이 불가능하다. 그러나 터널에 들어감과 동시에 NHC 정보를 측정치로 사용함으로써 MMEI 추정이 가능해지는 것을 Fig. 4b에서 확인할 수 있다. 하지만 터널 안에서만 GNSS 신호없이 NHC 정보만으로 MMEI를 추정함으로써 정확도가 낮으며 여러 번의 터널을 통과한 후에 수렴하게 된다. Fig. 5b를 Fig. 5a와 비교해 보면 MMEI가 추정되면서 자세오차가 줄어들게 되고 터널구간에서 항법오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

NHC-Default의 경우 운행시작과 함께 MMEI를 추정하고 이를 기반으로 보정된 NHC 정보를 사용하기 때문에 처음부터 MMEI가 정확하게 추정되는 것을 Fig. 4c에서 확인할 수 있다. 그 결과 Fig. 5c를 Fig. 3c와 비교하면 유사한 결과를 산출할 수 있게 되는 것을 알 수 있으며 MMEI를 포함한 INS의 오차를 잘 보상할 수 있게 되는 것이 검증되었다.

정리하면 INS/GNSS는 MMEI 추정이 불가하여 상태변수들을 신뢰할 수 없으며 정확도가 크게 떨어진다. NHC-Option은 터널에서만 NHC 측정치를 사용하여 MMEI를 추정함으로써 터널구간이 없으면 MMEI 추정이 불가능하기 때문에 사용하기에 적합하지 않다. NHC-Default는 GNSS 신호와 NHC 정보를 함께 사용하여 MMEI를 정확하게 추정하게 됨으로써 모든 상태변수들의 추정 성능이 MMEI가 없는 경우와 유사하게 산출된다. NHC-Option과 NHC-Default는 MMEI가 없는 이상적인 경우에는 성능은 비슷하지만 MMEI가 있는 경우에 성능이 확연히 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

## 5. CONCLUSIONS

센서 기반으로 열차의 위치를 추정하기 위해 사용하는 방법으로 INS/GNSS 복합항법시스템이 대표적이다. 터널에서 GNSS 신호 수신에 불가하며, 오차가 증가하는 특성을 보완하기 위해 열차의 NHC 정보를 사용한 INS/GNSS/NHC 복합항법시스템을 이 논문에서 다룬다. IMU를 정확하게 열차의 좌표계와 일치시켜 장착하게 되면 복합항법 시스템을 통해 비교적 안정적인 항법정보를 획득할 수 있다. 그러나 IMU를 열차에 장착하는 과정에서 장착오차가 발생할 수 있다. 이 경우 NHC 정보를 통해 잘못된 방향으로 속도보정을 하게 됨으로써 복합항법시스템의 성능이 저하되는 문제가 발생한다. 이 논문에서는 이 문제를 고려하여 장착오차를 포함한 복합항법필터를 설계하였다. 그리고 INS/GNSS, INS/GNSS/NHC-Option, INS/GNSS/NHC-Default 복합항법시스템의 성능을 시뮬레이션 기반으로 분석하였다.

먼저 장착오차가 없는 경우에는 INS/GNSS/NHC-Option과 INS/GNSS/NHC-Default의 성능이 유사하며, INS/GNSS 보다 우수한 것을 확인되었다. 그러나 장착오차가 있는 경우에는 INS/GNSS/NHC-Option은 터널에서만 NHC를 사용한 필터링을 함

으로써 장착오차의 추정이 불확실하다. 이와 달리 INS/GNSS/NHC-Default는 운행 초기에 GNSS와 NHC 정보를 함께 사용하여 필터링 함으로써 장착오차를 정확하게 추정하게 되고 그 결과 항법정보의 우수한 성능이 유지되는 것을 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한 실시간으로 계산되는 오차 공분산 정보와 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 계산된 RMSE의 일치도가 높아 공분산 정보를 통한 실시간 열차 항법정보의 신뢰도 정보로 활용할 수 있음을 알 수 있다.

추후 실 철도환경을 고려할 때 직선 및 회전 궤적에 따른 속도 영역 잡음의 크기 변화를 관측하여 NHC 정보의 적용에 함께 활용하는 방안을 연구할 계획이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant from R&D program (PK2104A2) of the Korea Railroad Research Institute, Republic of Korea.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, S.Y.; methodology, M.S.; formal analysis, M.S. and S.Y.; writing-original draft preparation, M.S.; writing-review and editing, S.Y.; visualization, M.S.; supervision, S.Y.; project administration, S.Y. and K.H.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

## REFERENCES

- Brown, R. G. & Hwang, P. Y. C. 1997, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. (New York: John Wiley & Sons)
- Chae, M. S., Cho, S. Y., & Shin, K. H. 2021, Development of a Real Trajectory-based Simulator to Verify the Reliability of the Integrated Navigation System for Trains, JKIECS, 16, 135-144. <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2021.16.1.135>
- Chen, Q., Zhang, Q., & Niu, X. 2020, Estimate the Pitch and Heading Mounting Angles of the IMU for Land Vehicular GNSS/INS Integrated System, IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 1-13. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2993052>
- Cho, S. Y. 2014, IM-filter for INS/GPS-integrated navigation system containing low-cost gyros, IEEE trans. Aerospace, Electronic Systems, 50, 2619-2629. <https://doi.org/10.1109/AES.2014.6817111>

[doi.org/10.1109/TAES.2014.130128](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.130128)

- Cho, S. Y., Kang, C. H. & Shin, K. H. 2019, Reliability analysis according to measurement of INS/GPS/NHC integrated navigation system for train, *JKSR Journal*, 22, 852-863. <https://doi.org/10.7782/JKSR.2019.22.11.852>
- Grewal, M. S., Weill, L. R., & Andrews, A. P. 2001, *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration* (Canada: John Wiley & Sons)
- Park, Y. B., Kim, K. J., & Park, J. P. 2009, Design and Performance Analysis of NHC/ZUPT Kalman Filter with Mounting Misalignment Estimation, *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 12, 636-643.
- Seo, J., Lee, H. K., Lee, J. G., & Park, C. G. 2006, Lever arm compensation for GPS/INS/odometer integrated system, *IJCAS*, 4, 247-254
- Siouris, G. M. 1993, *Aerospace Avionics Systems*. (California: Academic Press)
- Titterton, D. D. & Weston, J. L. 1997, *Strapdown Inertial Navigation Technology* (London: Peregrinus)



**Kyung Ho Shin** received the B.S., and M.S. degrees in Control and Instrumentation Engineering from Kwangwoon University in 1998, and 2000, respectively. In 2005, he joined as a Researcher with the Korea Railroad Research Institute, where he is currently a Principal Researcher. His current research topics include railway signaling, RAMS, and global navigation satellite system.



**Myeong Seok Chae** received the B.S. degree in Mechanical Automotive Engineering from Kyungil University in 2020, where he is currently pursuing the master's degree with the Department of IT Engineering. His current research topics include vehicular navigation system, pedestrian inertial navigation, and estimation theory.



**Seong Yun Cho** received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Control and Instrumentation Engineering from Kwangwoon University in 1998, 2000, and 2004, respectively. From 2003 to 2004, he was an Assistant Researcher with Automatin and System Research Institute, Seoul National University. He was a BK 21 Post-Doctoral Fellow with Seoul National University in 2004. From 2004 to 2013, he was with Electronics and Telecommunications Research Institute as a senior researcher. From 2008 to 2013, he was an Adjunct Professor with the University of Science and Technology. In 2013, he joined the faculty of the Department of Robotics Engineering at Kyungil University, where he is currently an associate professor. His current research topics include positioning and navigation systems, filtering theory for linear/nonlinear systems, sensors-based motion detection, autonomous driving system, and location-based services.

