

열차용 복합 항법 시스템 신뢰성 검증을 위한 실 궤적 기반 시뮬레이터 개발

채명석* · 조성윤** · 신경호***

Development of a Real Trajectory-based Simulator to Verify the Reliability of the Integrated Navigation System for Trains

Myeong-Seok Chae* · Seong-Yun Cho** · Kyung-Ho Shin***

요약

철도 시스템에서는 인프라 기반의 열차 검출시스템을 통해 열차의 위치정보를 획득하는 것이 일반적이다. 하지만 미검출 및 오검출에 의해 잘못된 위치정보가 제공될 수 있으며, 이로 인한 사고를 야기할 수 있는 문제점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 센서 기반 복합항법시스템을 사용하여 열차의 위치정보를 제공하는 방법을 제안한다. 그러나 정확한 정보제공을 위해 복합 항법 시스템의 신뢰성을 검증해야 한다. 따라서 본 논문에서는 실 궤적을 기반으로 기준 궤적과 센서 데이터를 생성하고 다양한 시나리오에 따른 복합 항법 시스템의 성능을 실 궤적 상에서 분석할 수 있는 시뮬레이터를 개발한다.

ABSTRACT

In railway systems, it is common to obtain train location information through an infrastructure-based train detection system. However, this system has a problem that may provide incorrect location information due to non-detection and erroneous detection, which may cause an accident. Therefore, in this study, we propose a method of providing train location information using a sensor-based integrated navigation system. In order to provide accurate information; however, the reliability of the integrated navigation system must be verified. Therefore, in this paper, we develop a simulator that can generate a reference trajectory and sensor data based on the real trajectory and analyze the performance of the integrated navigation system according to various scenarios on the real trajectory.

키워드

Train Navigation, Integrated Navigation System, Reliability, Simulator
열차 항법, 복합 항법 시스템, 신뢰성, 시뮬레이터

* 경일대학교 IT공학과(coaudtjr2002@naver.com)

*** 한국철도기술연구원 책임연구원(khshin@krii.re.kr)

** 교신저자 : 경일대학교 자율로봇공학과

• 접수일 : 2020. 11. 13

• 수정완료일 : 2020. 12. 31

• 게재확정일 : 2021. 02. 17

• Received : Nov. 13, 2020, Revised : Dec. 31, 2020, Accepted : Feb. 17, 2021

• Corresponding Author : Seong-Yun Cho

Dept. Robotics Engineering, Kyungil University,

Email : sycho@kiu.kr

I. 서 론

열차의 위치정보는 안전한 열차제어와 승객용 위치 정보서비스를 위해 반드시 필요하다. 열차의 잘못된 위치정보를 사용할 경우 승객들에게 불편함을 줄 수 있을 뿐 아니라 열차 간 안전여유 (Safety Margin)를 잘못 계산하여 큰 사고로 이어질 수 있다. 기존의 열차 위치정보 획득 방법으로는 Balise, 궤도회로(Track Circuit) 등과 같이 인프라 기반으로 열차를 검출함으로써 위치정보를 획득하는 방법이 있다[1-3]. 그러나 미검출 및 오검출 등에 의해 잘못된 열차의 위치정보를 제공하는 문제가 발생할 수 있으며, 이로 인해 큰 사고로 이어질 수도 있는 문제가 있으며, 또한 인프라의 설치 및 유지 보수를 위해 막대한 비용이 필요하다는 단점이 있다.

이런 문제를 해결하기 위해 센서 기반으로 열차의 위치정보를 획득하는 기술들이 연구되고 있다. 대표적으로 GPS (Global Positioning System)/GNSS (Global Navigation Satellite System)와 같은 위성항법시스템이다. 위성항법시스템은 수 m에서 수 cm까지의 정확도를 갖지만 터널, 산악지역 및 도심지역 등에서는 오차가 증가하거나 신호가 차단되어 위치정보를 제공하지 못할 수도 있다[2]. 또 다른 센서 기반 위치추정 기술로는 INS (Inertial Navigation System)가 있다. INS는 주위 환경에 영향을 받지 않고 100Hz 이상의 높은 출력 주파수로 항법 정보를 제공할 수 있는 장점이 있다. 하지만 저급 IMU (Inertial Measurement Unit)를 사용하는 경우 계산과정에서 시간에 따라 오차가 빠르게 증가하는 문제점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 이 두 가지 시스템을 결합하는 복합 항법 시스템을 고려할 수 있다[5-7].

본 논문에서는 INS/GPS 및 INS/GPS/NHC (Non-Holonomic Constraint) 복합 항법 시스템을 설계한다[6]. INS/GPS 복합항법은 INS를 기본 항법장치로 사용하고 Open Sky에서 GPS를 측정치로 사용하며 INS의 오차를 보정하며 GPS 음영지역에서는 INS만 사용한다. 그리고 INS/GPS/NHC 복합항법은 INS를 기본 항법장치로 사용하고 Open Sky에서 GPS와 열차의 NHC 정보를 같이 측정치로 사용하며 GPS 음영지역에서는 NHC 정보만을 측정치로 사용한다. 그

러나 복합 항법 시스템이 항상 좋은 항법 정보를 제공하지는 않기 때문에 특정 실 궤적 상에서 복합 항법 시스템 기반의 열차 위치정보의 신뢰성을 분석하기 위한 시뮬레이터가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 Matlab 기반의 시뮬레이터 개발을 목적으로 한다.

지도상에서 필요한 실 궤적을 획득할 수 없으므로 필요로 하는 철도 구간에서 열차에 항법장치를 탑재하고 운항시험을 하면서 실 궤적 정보를 획득한다. 이렇게 획득된 데이터에서 시간 동기화 되지 않은 위치정보만을 추출해 낸다. 그리고 이 정보를 기반으로 열차의 NHC 기반 2자유도 운동으로 열차의 동적 움직임을 모델링 하여 기준궤적을 생성한다. 여기서 시뮬레이션에 필요한 열차의 가속도 및 속도 정보를 포함하여 기준궤적을 생성할 수 있다. 이렇게 생성된 기준궤적을 기반으로 센서 데이터를 생성한다. 먼저 오차 없는 데이터를 생성하여 센서 데이터 생성 기법의 성능을 분석 후 IMU의 Spec.을 고려한 오차를 추가하여 최종적인 센서 데이터를 생성한다.

센서 데이터를 사용하여 실 궤적에서 열차를 운항하는 것과 같은 환경을 모사할 수 있으며, 복합항법을 위한 필터로는 EKF (Extended Kalman Filter)를 사용한다[8, 9]. 시뮬레이터 상에서 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통한 RMSE (Root Mean Squared Errors)를 구하고, 이 정보와 필터에서 제공하는 오차 공분산을 비교하여 복합 항법 시스템의 성능 및 필터의 정확한 구현을 검증한다. 그리고 이를 기반으로 복합 항법 시스템의 신뢰도 및 성능을 검증한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 시뮬레이터 구조와 기준궤적 생성에 대해 설명하며, III장에서는 기준궤적 기반으로 센서 데이터를 생성하는 기법을 설명한다. IV장에서는 복합항법 필터를 설계하고, 시뮬레이션 분석을 V장에서 제공한다. 그리고 마지막 장에서 논문을 마무리 한다.

II. 시뮬레이터 구조 및 기준궤적 생성

2.1 시뮬레이터 구조

그림 1은 시뮬레이터의 구조로 기준 궤적 생성 모듈, IMU 및 GPS 데이터 생성 모듈, 그리고 복합항법 시뮬레이션 모듈로 구성된다.

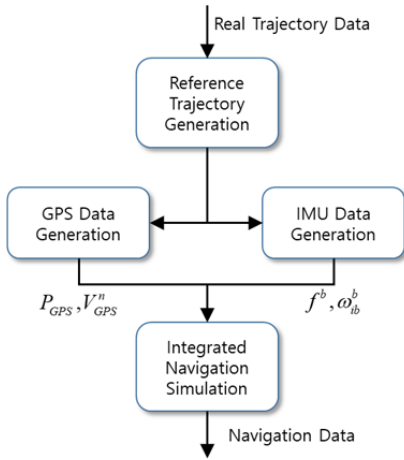


그림 1. 시뮬레이터 구조
Fig. 1 Simulator structure

기준 궤적 생성 모듈에서는 실 궤적 데이터를 이용하여 시뮬레이션 상에서 필요한 데이터와 융합하여 기준 궤적을 생성한다. IMU 데이터 생성 모듈에서는 가속도계와 자이로 출력을 100Hz로 생성하며, GPS 데이터 생성 모듈에서는 1Hz로 열차의 위치 및 속도 정보를 생성한다. 그리고 복합항법 시뮬레이션 모듈에서는 INS를 기본 항법장치로 사용하고 측정치로 GPS와 NHC를 사용하여 INS의 오차를 보정하는 시뮬레이션을 수행한다. 여기서 다양한 시나리오 별로 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 한다.

2.2 실 궤적 데이터 기반 기준 궤적 생성

오송 시험선로의 실 궤적 데이터는 해당 구간에서 열차에 항법장치를 탑재하고 운항시험을 하면서 정보를 획득한다. 이 정보 중에서 시간 동기화 되어있지 않은 위치정보만을 추출한 다음 기준 궤적을 생성한다. 먼저 열차의 움직임은 철도를 따라 움직이기 때문에 NHC 기반 2자유도 운동으로 간략화 할 수 있다. 즉, 전진 방향의 속도와 방위각 정보로 위치 데이터를 생성할 수 있다. 이를 위해 식 (1), (2), (3)과 같이 초기화를 한다.

$$A_0 = [0 \ 0 \ \psi_0^M]^T \quad (1)$$

$$V_0^N = [v_{N,0} \ v_{E,0} \ v_{D,0}]^T = C_{b,0}^n [v_{x,0} \ 0 \ 0]^T \quad (2)$$

$$P_0 = [L_0^M \ l_0^M \ h_0^M]^T \quad (3)$$

여기서 A_0 는 오일러 각으로 초기 방위각 ψ_0^M 는 실 궤적 데이터의 초기 방위각이다. $C_{b,0}^n$ 는 동체좌표계에서 항법좌표계로의 변환행렬 DCM (Direction Cosine Matrix)로 오일러 각을 통해 구할 수 있다. $v_{x,0}$ 는 초기 열차의 전진 방향속도이며 0으로 설정한다. 그리고 V^n 은 항법좌표계 상의 속도를 의미하며 전진 방향속도와 DCM을 이용해 계산된다. 마지막으로 P_0 는 초기 위치로 실 궤적 데이터의 초기 위도, 경도, 고도 정보로 설정한다.

이를 기반으로 먼저 전진 방향속도를 식 (4)와 같이 업데이트를 진행한다.

$$v_{x,t} = v_{x,t-1} + acc_{x,t-1} \Delta t \quad (4)$$

여기서 $acc_{x,t-1}$ 은 시간 $t-1$ 에서 전진 방향으로의 가속도를 의미하며, Δt 는 IMU 데이터 출력 주기와 동일하게 설정하였다.

다음으로 항법좌표계 상의 속도를 업데이트하기 위해 방위각 업데이트를 진행한다. 방위각 업데이트는 식 (5)와 같이 실 궤적 데이터의 위치데이터를 기반으로 이루어진다.

$$\psi_t = \tan^{-1} \left(\frac{(l_k^M - l_{k-1}^M)(R_t + h_t) \cos L_t}{(L_k^M - L_{k-1}^M)(R_m + h_t)} \right) \quad (5)$$

여기서 ψ_t 는 시간 t 에서의 방위각이며, (L_k^M, l_k^M) 는 시간 t 에서 계산된 대략적인 위치와 가장 가까이에 있는 실 궤적 상에서 획득된 수평 위치정보이다. 그리고 R_m, R_t 는 각각 위도, 경도방향의 지구 반경의 의미이며 h_t 는 고도 정보를 의미한다. 이렇게 업데이트된 방위각을 이용하여 DCM을 구하고, 전진 방향의 속도와 함께 사용하여 식 (6)과 같이 항법좌표계 상의 속도를 계산 한다[10, 11].

$$P_t = P_{t-1} + \begin{bmatrix} v_{N,t-1}/R_m + h_{t-1} \\ v_{E,t-1}/(R_t + h_{t-1}) \cos L_{t-1} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta t \quad (6)$$

여기서 P_t 는 시간 t 에서의 위치이며, 이렇게 생성된 기준 궤적 데이터의 정확성을 확인하기 위해 지도상에서 그림 2와 같이 확인한다. 이 그림에서 파란색이

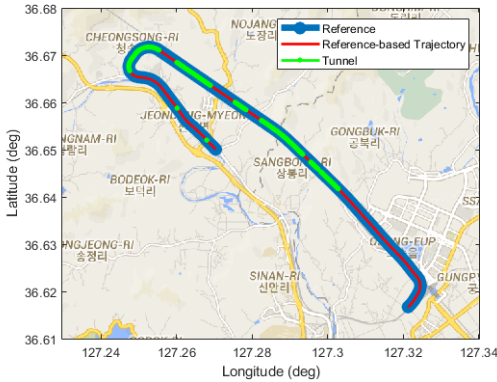


그림 2. 실 궤적 기반 기준 궤적 생성

Fig. 2 Real trajectory-based reference trajectory

실 궤적이고 빨간색이 기준 궤적생성 결과이다. 그리고 초록색은 GPS 음영지역으로 터널 구간이다. 이 그림을 통해 실 궤적과 기준 궤적이 정확하게 일치하는 것을 확인할 수 있으므로 본 논문에서 제안하는 기준 궤적 데이터 생성 기법의 성능이 검증된다.

III. 기준궤적 기반 센서 데이터 생성

기준 궤적을 기반으로 센서 데이터를 생성한다. 먼저 오차 없는 IMU 데이터를 생성하여 INS 계산식을 수행하여 나온 항법 결과를 통해 IMU 데이터 생성 기법이 정확하지 파악한다.

오차 없는 IMU 데이터를 생성하기 위해 식 (7)과 같이 기준 궤적의 위치 차분을 통해 방향별 변위를 계산한다.

$$\begin{bmatrix} dN_k \\ dE_k \\ dD_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (p_k^{(1)} - p_{k-1}^{(1)})(R_m + p_{k-1}^{(3)}) \\ (p_k^{(2)} - p_{k-1}^{(2)})(R_t + p_{k-1}^{(3)})\cos(p_k^{(1)}) \\ (p_k^{(3)} - p_{k-1}^{(3)}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $dP_k = [dN_k \ dE_k \ dD_k]^T$ 는 방향별 변위를 의미하며 $P_k = [p_k^{(1)} \ p_k^{(2)} \ p_k^{(3)}]^T$ 는 기준 궤적의 위치를 의미한다. 이를 기반으로 식 (8), (9)와 같이 항법좌표계 상의 속도와 방위각을 계산한다.

$$V_k^n = [dN_k \ dE_k \ dD_k]^T/dt \quad (8)$$

$$\psi_k = \tan^{-1}(dE_k/dN_k) \quad (9)$$

이렇게 항법좌표계 상에서 계산된 속도와 방위각을 사용하여 시간 t_k 에서 DCM 및 쿼터니언 (Quaternion)을 계산한다. 또한 위치와 속도를 이용하여 지구자전 각속도와 열차의 속도에 의해 발생하는 지구좌표계 대비 항법좌표계의 각속도를 계산하여 코리올리스 (Coriolis) 효과를 식 (10), (11), (12)와 같이 계산한다[12].

$$\omega_{en}^n = \begin{bmatrix} \dot{L}\cos L \\ -\dot{L} \\ -\dot{L}\sin L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_E/(R_t+h) \\ -v_N/(R_m+h) \\ v_E\tan L/(R_t+h) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\omega_{ie}^n = \begin{bmatrix} \Omega_N \\ 0 \\ \Omega_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_{ie}\cos L \\ 0 \\ -\Omega_{ie}\sin L \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Coriolis_k = 2\omega_{ie,k}^n + \omega_{en,k}^n \quad (12)$$

여기서 ω_{ie}^n 는 위도에 따른 지구자전각속도이며, ω_{en}^n 은 속도에 의해 발생하는 지구좌표계 대비 항법좌표계의 각속도를 의미한다.

시간 t_k 에서 속도 차분과 쿼터니언 차분을 각각 식 (13), (14)와 같이 계산한다.

$$dV_{k+1}^n = (V_{k+1}^n - V_k^n)/dt \quad (13)$$

$$\tilde{Q}_{k+1} = Q_k^{CT} * Q_{k+1} \quad (14)$$

여기서 Q_k^{CT} 는 쿼터니언의 Conjugate Transpose를 의미하며 *는 쿼터니언 곱을 의미한다. 이를 이용하여 항법좌표계대비 동체좌표계의 각속도를 식 (15)와 같이 구할 수 있다.

만약 $\tilde{Q}_k^{(1)} = 1$ 이면

$$\omega_{nb,k+1}^b = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (15)$$

그렇지 않으면

$$\omega_{nb,k+1}^b = (\tilde{Q}_{k+1}^{(2:4)} / \sqrt{1 - (\tilde{Q}_{k+1}^{(1)})^2}) (2\cos^{-1}\tilde{Q}_{k+1}^{(1)}/dt) \quad (16)$$

여기서 $Q_{k+1} = [Q_{k+1}^{(1)} \ Q_{k+1}^{(2)} \ Q_{k+1}^{(3)} \ Q_{k+1}^{(4)}]$ 은 쿼터니언이며, $\omega_{nb,k+1}^b$ 는 항법좌표계대비 동체좌표계의 각속도를 의미한다. 이를 이용하여 IMU 최종 출력 데이터인 가속도계와 자이로의 출력을 식 (17), (18)과 같이 계산할 수 있다.



그림 3. 오차 없는 IMU 데이터 기반 INS 결과
Fig. 3 Error-free IMU Data-based INS Result

$$f_{k+1}^b = (C_{b,k}^n)^T (f_{k+1}^n + Coriolis_k - g_k^n) \quad (17)$$

$$\omega_{ib,k+1}^b = \omega_{nb,k+1}^b + (C_{b,k}^n)^T (\omega_{ie,k}^n + \omega_{en,k}^n) \quad (18)$$

이렇게 생성된 가속도계와 자이로계는 오차 없는 데이터로 IMU 데이터 생성 기법의 성능을 분석하기 위해 INS 계산식을 이용하여 항법을 수행하게 되면 그림 3과 같이 기준 궤적과 INS 항법 위치 결과가 동일하게 출력되는 것을 확인할 수 있다. 이 그림에서 파란색이 기준 궤적이며, 빨간색이 오차 없는 IMU 데이터를 기반으로 수행된 INS의 결과이다. 따라서 본 논문에서 제시된 IMU 데이터 생성 기법이 정확한 것을 확인할 수 있다.

IV. 복합항법 필터 설계

INS는 IMU의 3축 자이로와 가속도계의 출력력을 이용하여 선형 가속도와 회전 각속도를 측정하여 이를 적분하여 자세와 속도, 위치의 변위를 계산하는 알고리즘이다. INS의 장점으로 자립형 항법시스템으로 100Hz 이상의 높은 출력 주파수로 항법 정보를 계산하며 동적 특성을 잘 반영하여 단기간 안정성이 좋은 장점이 있다. 하지만 INS의 계산과정에서 관성센서의 오차는 서서히 증가하여 점점 오차가 발산하게 되는 단점이 있다. GPS는 시간에 따른 오차 누적 없이 장기간 안정성이 좋은 장점이 있다. 하지만 낮은 출력 주파수와 외부 신호의 간섭 영향이 크다는 단점이 있다.

따라서 INS와 GPS는 상호보완적인 특성을 갖기 때문에 두 시스템을 결합하여 서로의 장점만을 갖는 시스템을 생성해야 한다. 두 시스템을 결합하는 기법에는 약결합(Loosely Coupled), 강결합(Tightly Coupled), 초강결합(Ultra-Tightly Coupled) 등이 있으며 본 논문에서는 중저가의 센서를 사용하기 때문에 중저가 GPS는 의사거리 및 위성의 위치정보 등은 제공하지 않으므로 약결합을 통해 INS와 결합한다. IMU의 규격으로 가속도계 Bias Repeatability와 Velocity Random Walk, 자이로의 Bias Repeatability와 Angular Random Walk가 중요하다. 여기서 Bias는 센서가 On/Off 될 때마다 달라지는 바이어스로 특정 범위 내에서 발생하는 랜덤 상수를 말한다. 또한 Random Walk은 센서의 노이즈에 해당한다. 본 논문은 가속도계, 자이로 Bias는 각각 $3mg$, $2deg/hr$ 로 선정 하였으며 가속도계, 자이로 Random Walk는 각각 $0.1mg/\sqrt{Hz}$, $0.15deg/\sqrt{hr}$ 로 선정 하였다.

센서 오차를 포함하는 IMU 데이터를 사용하여 계산된 INS 결과의 일에는 그림 4에서 나타내고 있다. 여기서 파란색이 기준 궤적이며 빨간색이 INS 결과이다. 이 오차를 GPS 측정치를 이용해서 보정하는 필터를 설계한다. 기본적으로 INS의 비선형 함수를 고려하여 EKF 기반으로 항법필터를 설계하며, 먼저 다음과 같이 15차 오차 상태변수를 설정한다.

$$\delta X = [\delta P \quad \delta V \quad \phi \quad \nabla \quad \varepsilon]^T \quad (19)$$

여기서 δP 는 위치오차 벡터이며, δV 는 속도오차 벡

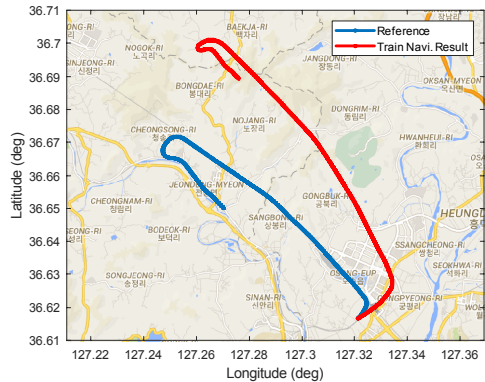


그림 4. 오차 있는 IMU 데이터 기반 INS 결과
Fig. 4 INS Result based on IMU data including errors

터, ϕ 는 항법좌표계 상의 자세오차 벡터, 그리고 ∇ 와 ε 는 각각 가속도계 바이어스 벡터와 자이로 바이어스 벡터를 의미한다.

설정된 오차 상태변수와 INS의 오차모델을 기반으로 INS/GPS 복합 항법 시스템을 설계한다[12].

$$\delta X_{k+1} = \Phi_k \delta X_k + G w_k, \quad w_k \sim N(0, Q) \quad (20)$$

$$y_{k+1} = H_k \delta X_k + v_k, \quad v_k \sim N(0, R) \quad (21)$$

여기서 Φ_k 는 상태전이행렬로 INS의 오차모델을 기반으로 구해지며, Q는 공정잡음 공분산 행렬, R은 측정치 잡음 공분산 행렬이다. 또한 G는 입력 행렬이며 H_k 는 측정치 행렬로 측정치의 종류에 따라 달라진다. GPS의 위치와 속도를 측정치로 사용하는 경우 측정치 행렬은 식 (22)와 같이 설정된다[6].

$$H_k = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 9} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 9} \end{bmatrix} \quad (22)$$

IMU 출력은 100Hz의 주파수로 출력되며 IMU 출력에 맞춰 INS의 항법이 갱신되며, GPS의 출력은 1Hz와 같이 느린 주파수로 출력이 되며 이에 따라 오차 공분산 행렬의 시간전파 (Time Propagation)를 식 (23)과 같이 수행한다.

$$P_{k+1}^- = \Phi_k P_k \Phi_k^T + Q \quad (23)$$

또한 GPS 측정치 주기에 맞추어 식 (24), (25)와 같이 측정치 갱신 (Measurement Update)이 이루어진다.

$$\hat{\delta X}_k = K_k z_k \quad (24)$$

$$P_k = (I_{15 \times 15} - K_k H_k) P_k^- \quad (25)$$

여기서 $K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R)^{-1}$ 는 칼만이득을 의미하며 z_k 는 측정치 잔차로 측정치인 GPS의 위치, 속도와 INS의 위치, 속도 결과의 차를 의미 한다[9].

이 과정을 IMU와 GPS의 측정치 출력 주기와 동기화 하여 반복적으로 수행된다.

INS/GPS의 단점은 터널 구간에서 GPS의 신호가 없는 구간에 측정치 갱신 없이 INS만으로 시간전파

만 이루어져 시간에 따라 오차가 증가한다는 것이다. 물론 GPS 사용 가능 구간에서 IMU의 바이어스를 일부 보정하게 되므로 짧은 터널 구간은 비교적 정확한 항법결과가 나오지만 터널이 긴 경우 시간에 따른 오차 증가를 막을 수 없다. 따라서 열차의 NHC 기반 움직임을 이용하여 추가적인 측정치를 생성한다. NHC 기반 움직임이란 열차는 철도 상에서만 운행되므로 열차의 동체좌표계 상에서 측면 방향과 수직 방향의 속도는 항상 0이라는 조건을 말한다. 물론 GPS 음영지역에서 NHC 정보를 측정치로 사용할 수 있지만 GPS와 같이 측정치로도 사용할 수 있다. 먼저 식 (26)과 같이 NHC 정보를 나타낼 수 있다.

$$v_y^b = v_z^b = 0 \quad (26)$$

이 조건을 이용하여 동체좌표계 상의 속도를 식 (27)과 같이 나타낸다.

$$\hat{V}^b = \hat{C}_n^b \hat{V}^n = (\hat{C}_n^b)^T \hat{V}^n \quad (27)$$

여기서 $\hat{C}_n^b = (I - E^n) C_n^b = (I - \phi^n \times) C_n^b$ 는 오차를 포함하는 DCM 추정값을 의미하며 식 (27)을 선형 섭동법을 통해 식 (28)과 같이 전개하여 오차 제곱 항을 무시하면 다음과 같이 동체좌표계 상의 속도 오차식이 유도된다.

$$\delta V^b = C_n^b \delta V^n - C_n^b (V^n \times) \phi^n \quad (28)$$

따라서 NHC 측정치 행렬은 식 (29)와 같이 유도된다 [6].

$$H_k = \begin{bmatrix} 0 & (C_n^b)_{1:2;1:3} & (-C_n^b(V^n \times))_{1:2;1:3} & 0_{2 \times 6} \end{bmatrix} \quad (29)$$

V. 시뮬레이션 분석

시뮬레이션을 위한 열차의 가속도는 $0.44m/s^2$, 열차 최고 속도 $120km/hr$ 로 선정하였으며 Monte-Carlo 시뮬레이션 수는 30번으로 정하였다.

이 논문의 시뮬레이션 분석은 측정치에 따른 Case 별로 신뢰성을 분석한다. 신뢰성 분석에는 Monte-Carlo 시뮬레이션의 RMSE를 사용한다. RMSE 정보

는 실시간으로 사용하지 못하지만 실제 시스템의 성능을 더 잘 반영하기 때문에 시뮬레이터에서 이 정보를 분석한다. 그리고 이 정보는 실시간으로 사용가능한 복합항법 필터의 오차 공분산과 비교하여 복합 항법 시스템의 실시간 신뢰성을 분석 가능성을 확인한다. 시뮬레이션을 위해 다음 두 가지 경우를 고려하였다.

- Case-1 (INS/GPS)
 - Open Sky : GPS를 측정치로 사용
 - Tunnel : 측정치 갱신 없이 INS만 사용
- Case-2 (INS/GPS/NHC)
 - Open Sky : GPS, NHC를 측정치로 사용
 - Tunnel : NHC를 측정치로 사용

그림 5에 Case-1에 대한 항법정보의 신뢰성 분석

결과를 나타내었다. 그림에서 파란색 점선이 RMSE이며 빨간색 실선이 필터에서 제공하는 오차 공분산 정보이다.

직선구간에서 수평축 가속도와 자이로 Z축 바이어스가 줄어들지 않기 때문에 수평축 자세오차와 수직축 자세오차에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 회전 구간에서 수평축 가속도계 바이어스의 가관측성이 다소 향상됨에 따라 수평축 자세오차의 가관측성이 향상됨을 볼 수 있다. 하지만 큰 회전구간은 마지막 회전구간이며 이 때 터널구간이기 때문에 자이로 Z축은 터널구간이 끝나는 직후 가관측성이 향상되는 것을 알 수 있다. 또한 다수의 터널구간에서 측정치 갱신을 하지 못하므로 위치와 속도 오차 공분산이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 결과에서 확인할 수 있는

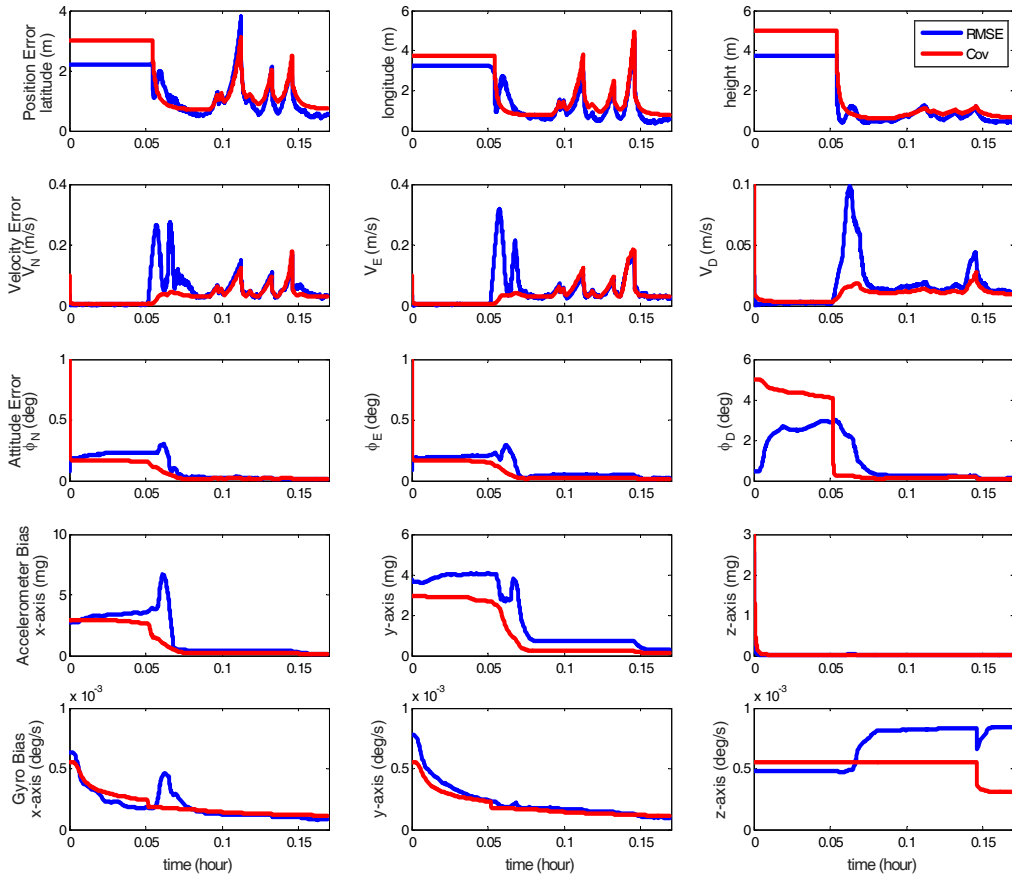


그림 5. Case-1 신뢰도 분석
Fig. 5 Case-1 reliability analysis

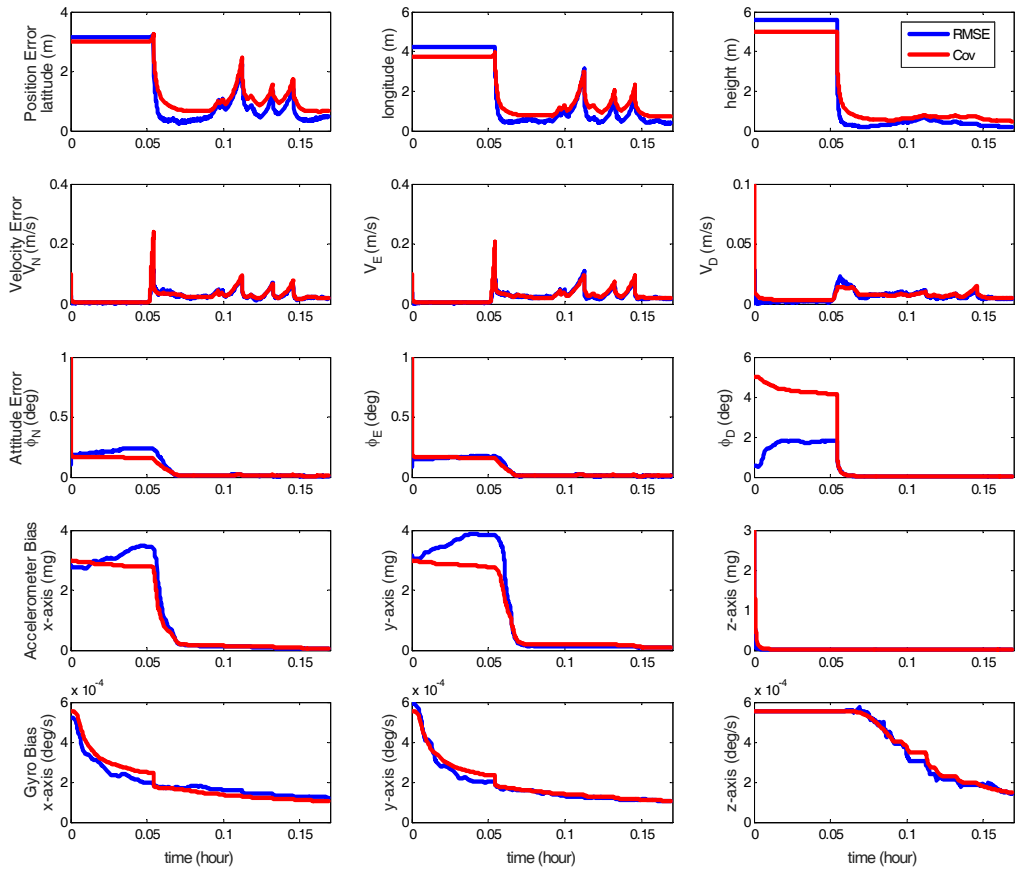


그림 6. Case-2 신뢰도 분석
Fig. 6 Case-2 reliability analysis

것은 궤적의 상황과 측정치의 활용 상황에 따라 필터에서 추정 가능한 상태변수가 달라진다는 것과 RMSE와 오차 공분산의 유사성이다. 그러나 운항 초기에 회전을 하는 상황에서 실제로 발생하는 속도 오차가 RMSE에서 나타나는 것에 반해 오차 공분산에서는 이 부분이 반영이 되지 않는 현상을 볼 수 있다. 따라서 실시간 열차의 항법정보 신뢰성을 판단할 때 이 부분을 고려해야 할 것으로 판단된다.

그림 6은 Case-2에 대한 항법정보의 신뢰성 분석 결과를 나타내었다. 이 경우, 앞에서 설명한 Case-1 보다 Open Sky에서 GPS와 NHC를 측정치로 사용함으로써 가관측 정도 (Degree of Observability)가 향상되는 것을 확인하였다. 또한 Tunnel 구간에서는 NHC를 측정치로 사용하기 때문에 수평축 가속도계

RMSE의 가관측 정도가 Case-1 보다 향상된다는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 위치와 속도 오차 증가도 감소한 것을 볼 수 있다. 또한 RMSE 값과 오차 공분산 정보의 일치도가 Case-1 보다 증가하는 것을 볼 수 있으며, 이 결과로 복합 항법 시스템에서 제공하는 항법정보의 신뢰성을 오차 공분산 정보를 통해 실시간 판단할 수 있을 것으로 판단된다.

결론적으로 Case-2가 NHC 정보를 항상 사용함으로써 항법성능이 향상되며 또한 복합 항법 시스템의 신뢰성이 향상되는 것을 확인하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 실 궤적을 기반으로 기준 궤적과 센서 정보를 생성하고 복합 항법 시스템을 Case 별로 구성하여 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 Case 별로 신뢰성을 분석하는 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이션의 현실성을 고려하여 실 궤적 정보에 시뮬레이션 환경 정보를 추가하여 기준 궤적을 생성하고, 이를 기반으로 센서 데이터를 생성하는 기법을 제안하였다. 그리고 열차용 복합 항법 시스템을 설계하고 시뮬레이터 상에서 Case 별 시뮬레이션을 수행하였다.

복합 항법 시스템의 신뢰성을 실시간으로 파악하기 위해 오차 공분산 정보를 신뢰할 수 있는지 파악해야 한다. 이를 위해 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하여 나온 결과인 RMSE와 오차 공분산 정보를 비교하여 Case 별로 신뢰성을 파악하였다. 또한 여러 가지 복합 항법 시스템 중 어떤 Case가 정확하진지 분석하였다. 그 결과 NHC 정보를 항상 사용하는 경우 RMSE와 오차 공분산 정보의 일치도가 높아 실시간 항법정보의 신뢰도를 공분산 정보를 기반으로 확인할 수 있으므로 결론을 내렸다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK2104 A2)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] L. L. Presti, *GNSS for Rail Transportation. Switzerland: Springer*, 2018.
- [2] B. Kwon, H. Jung, and K. Lee, "Study on Test methods and Procedures of Hybrid Track Circuit." *JKIECS*, vol. 9, no. 3, 2014, pp. 335-342
- [3] D. Yang, C. Li, and Z. Jin, "A Study on Hybrid Track Circuit Tag Recognition Enhancement." *JKIECS*, vol. 9, no. 4, 2014, pp. 537-542
- [4] M. S. Grewal, L. R. Weill, and A. P. Andrews, *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. Canada: John Wiley & Sons*, 2001.
- [5] D. H. Titterton, *Strapdown Inertial Navigation*

Technology. United Kingdom: The Institute of Electrical Engineers, 1996.

- [6] S. Cho, "Reliability analysis according to measurement of INS/GPS/NHC integrated navigation system for train." *Journal of the Korean Society of Radiology*, vol. 22, no. 11, 2019, pp. 852-863
- [7] S. Cho, "IM-filter for INS/GPS-integrated navigation system containing low-cost gyros," *IEEE trans. Aerospace, Electronic Systems*, vol. 50, no. 4, 2014, pp. 2619-2629.
- [8] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Transactions on the ASME-Journal of Basic Engineering*, vol. 82, 1960, pp. 35-45.
- [9] R. G. Brown and P. Y. C. Hwang, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [10] J. Seo, H. Lee, J. Lee, and C. Park, "Lever arm compensation for GPS/INS/ odometer integrated system," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 4, no. 2, 2006, pp. 247-254.
- [11] S. Cho, and W. Choi, "Robust positioning technique in low-cost DR/GPS for land navigation," *IEEE trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 4, 2006, pp. 1132-1142.
- [12] G. M. Siouris, *Aerospace Avionics Systems*. California: Academic Press, 1993.

저자 소개



채명석(Myeong-Seok Chae)

2020년 경일대학교 자동차IT융합과 졸업(공학사)
2020 ~ 현재 경일대학교 대학원 IT공학과 재학

※ 관심분야 : 항법시스템, 차량항법



조성윤(Seong-Yun Cho)

1998년 광운대학교 제어계측공학과 졸업(공학사)

2000년 광운대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사)

2004년 광운대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학박사)

2003년 서울대학교 ASRI 보조연구원

2004년 서울대학교 BK21 박사후연구원

2004년 ~ 2013년 한국전자통신연구원 선임연구원

2008년 ~ 2013년 UST 겸임교수

2013년 ~ 현재 경일대학교 자율로봇공학과 교수

※ 관심분야 : 항법시스템, 추정이론



신경호(Kyung-Ho Shin)

1998년 광운대학교 제어계측공학과 졸업(공학사)

2000년 광운대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사)

2005년 ~ 현재 한국철도기술연구원 책임연구원

※ 관심분야 : 열차제어, 철도신호, 신호안전