

INS/GNSS/NHC Integrated Navigation System Compensating for Lever Arm Effect between NHC Effective Point and IMU Mounting Location

Myeong Seok Chae¹, Jae Uk Kwon¹, Eui Yeon Cho¹, Seong Yun Cho^{2†}

¹Department of IT Engineering, Kyungil University, Gyeongsan, Gyeongsangbuk-do 38428, Korea

²Department of Mechanical Automotive Engineering, Kyungil University, Gyeongsan, Gyeongsangbuk-do 38428, Korea

ABSTRACT

Inertial Navigation System (INS)/Global Navigation Satellite System (GNSS) integrated navigation system can be used for land vehicle navigation. When the GNSS signal is blocked in a dense urban area or tunnel, however, the problem of increasing the error over time is unavoidable because navigation must be performed only with the INS. In this paper, Non-Holonomic Constraints (NHC) information is utilized to solve this problem. The NHC may correct some of the errors of the INS. However, it should be noted that NHC information is not applicable to all areas within the vehicle. In other words, the lever arm effect occurs according to the distance between the Inertial Measurement Unit (IMU) mounting position and the NHC effective point, which causes the NHC condition not to be satisfied at the IMU mounting position. In this paper, an INS/GNSS/NHC integrated navigation filter is designed, and this filter has a function to compensate for the lever arm effect. Therefore, NHC information can be safely used regardless of the vehicle's driving environment. The performance of the proposed technology is verified through Monte-Carlo simulation, and the performance is confirmed through experimental test.

Keywords: land vehicle navigation, INS/GNSS/NHC integration, lever arm

1. INTRODUCTION

자율주행자동차는 최근 몇 년 동안 많은 연구가 진행되고 있다. 이에 따라 차량의 정확한 제어 및 주행경로 결정을 위해서 고정밀 항법정보에 대한 요구가 점점 증가함에 따라 자율주행자동차의 항법정보에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이를 위해 가장 대표적으로 사용되는 Global Positioning System (GPS) / Global Navigation Satellite System (GNSS)는 정확한 위치와 속도를 제공한다. 그러나 외부영향으로 인해 오차가 증가할 수 있다. 특히 자율주행자동차의 경우 터널이나 도심지역 등을 지나

갈 때 멀티패스 및 신호 차단 현상이 발생하기 쉽다. 이는 자율주행자동차의 항법 정확도와 신뢰도를 떨어뜨리는 역할을 한다 (Grewal et al. 2007). 이 문제를 해결하기 위해 상호보완적인 특성을 가지고 있는 Inertial Navigation System (INS)와 결합하는 복합항법이 주로 사용되고 있다 (Han et al. 2020). 그러나 INS/GNSS 복합항법시스템은 GNSS 신호가 길게 차단되는 지역에서 순수 INS를 사용함으로써 항법정보의 정확도를 신뢰할 수 없는 경우가 발생하게 된다 (Brown & Hwang 1997). 따라서 최근에는 보조 센서 Vision 및 LiDAR를 추가로 결합하여 차선레벨의 항법 정확도를 제공하는 기법이 지속적으로 연구되고 있다 (Rose et al. 2014, Schutz et al. 2020). 본 논문에서는 INS/GNSS복합항법시스템을 기반으로 Non-Holonomic Constraints (NHC)를 추가적인 측정치로 사용한다 (Chae & Cho 2021, Cho et al. 2021).

NHC는 차량의 운동특성으로 차량이 지면에서 점프하거나 미끄러지지 않는다는 가정을 만족하는 경우 차량의 전진 방향에 수직인 평면에서 두 축의 차량의 속도는 0이라는 정보이다. 그러나 NHC 조건은 차량의 모든 위치에서 유효한 것은 아니다 (Zhang et al. 2020, Wen et al. 2022). 차량의 주행방향은 앞바퀴에 조향

Received Jul 09, 2022 Revised Aug 06, 2022 Accepted Aug 23, 2022

†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>

Jae Uk Kwon <https://orcid.org/0000-0001-6222-5043>

Eui Yeon Cho <https://orcid.org/0000-0003-1155-2823>

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

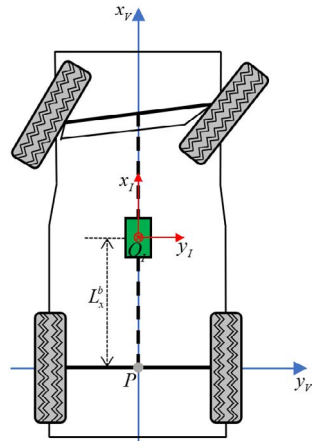


Fig. 1. Lever arm effect caused by IMU mounting location.

장치가 연동되어 제어된다. 이로 인해 차량이 회전하는 경우 두 앞바퀴를 연결한 축은 회전각속도에 비례하여 측면방향으로 추가적인 속도가 생성되어 NHC 조건이 성립하지 않는다. 반면 뒷바퀴에는 조향장치가 없어 차량의 주행방향과 상관없이 전진방향의 속도만 가지게 된다. 따라서 NHC의 유효지점은 차량의 두 뒷바퀴를 연결하는 축 위에 있게 된다 (Cho & Chae 2022). Fig. 1에서 아래 점 I 와 V 는 각각 Inertial Measurement Unit (IMU)와 차량의 좌표계를 의미한다. 그리고 L_x^b 는 점 P 와 O_I 까지의 거리인 동체 좌표계 상의 Lever arm을 의미한다. 여기서 O_I 는 IMU의 중심을 나타낸다. 만약 L_x^b 가 0이 되면 NHC 유효 지점과 IMU의 중심이 일치함으로써 NHC를 적절하게 사용할 수 있다. 그러나 Fig. 1과 같이 IMU가 장착되는 경우 NHC 유효 지점과 IMU의 중심이 일치하지 않게 되어 차량이 회전하는 경우 측면방향 (y 축)의 속도가 추가적으로 생성되게 된다. 즉 Lever arm 효과가 발생하게 되어 NHC를 측정치로 사용하게 되면 잘못된 정보로 인해 오히려 항법오차가 증가하는 문제가 발생한다. 따라서 Lever arm을 정확히 추정하여 보상하는 것은 NHC를 사용하기 위해 필수적이다. 이를 위해 본 논문에서는 Lever arm을 오차 상태변수에 추가하여 Extended Kalman Filter (EKF)를 설계하여 추정한다. 그리고 Monte Carlo 시뮬레이션을 기반으로 제안하는 INS/GNSS/NHC 복합항법시스템의 성능을 분석하고 제안한 시스템의 실용성을 차량 실험을 통해 검증한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 차량용 복합항법 시스템에 대해 소개하고, 3장에서는 IMU 장착 위치를 고려하는 NHC에 대해 설명한 후 제안하는 복합항법시스템을 설계한다. 시뮬레이션 분석과 차량실험 결과를 4장에서 기술하고, 마지막 장에서 논문을 마무리한다.

2. INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM FOR LAND VEHICLE

INS와 GNSS의 결합은 INS의 위치와 속도 추정 값과 GNSS의 위치와 속도를 결합함으로써 INS의 단점을 보완해주면서 GNSS의 신호를 사용할 수 없는 도심/산악지역, 터널 등에서도 항법정

보를 제공할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서 INS/GNSS 복합항법시스템은 약결합 (Loosely Coupled) 방식의 결합시스템을 고려한다.

차량이 출발하기 전 정지상태에서 IMU의 가속도계 출력만을 이용하여 초기정렬을 수행하여 롤, 피치각을 구할 수 있다 (Park et al. 1998). 그러나 Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 형 IMU를 사용하는 경우 지구자전각속도를 측정할 수 없다. 따라서 요각은 계산이 불가능하기 때문에 차량의 초기 요각은 안다고 가정한다. 이렇게 초기정렬을 이용하여 계산된 오일러각은 Direction Cosine Matrix (DCM)과 Quaternion으로 변환 가능하며 초기정렬 후 초기자세로 사용된다. 차량이 출발하면 IMU의 출력 주기로 Quaternion을 갱신한 다음 정규화를 통해 DCM으로 나타낼 수 있다. 그리고 DCM과 가속도계 출력을 이용하여 항법 좌표계로 변환한 다음 Coriolis 효과와 중력 성분을 제거함으로써 속도정보를 갱신하여 최종적으로 위치를 계산할 수 있다 (Siouris 1993). 그러나 계산된 INS 항법정보에는 가속도계와 자이로 바이어스 및 잡음과 초기정렬 오차 등이 포함되어 있어 시간에 따라 오차가 점점 증가하는 문제가 발생하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 GNSS와 결합하여 오차를 보상하게 된다. GNSS는 시간에 따라 오차의 누적이 현상이 없어 일정한 오차수준으로 항법결과를 얻을 수 있다. 그러나 외부 환경에 민감하여 신호를 수신받지 못하거나 멀티패스 영향으로 인해 오차가 크게 발생할 수 있다. 이 경우 순수 INS만 사용하게 되므로 오차의 증가를 막을 수 없는 문제가 있다 (Titterton & Weston 1997).

본 논문에서는 INS/GNSS 결합의 문제점을 해결하기 위해 차량의 NHC기반 움직임을 이용하여 추가적인 속도 정보를 측정치로 사용한다. 따라서 차량의 전진 방향에 수직한 평면에서 두 축의 차량의 속도는 0이라는 조건을 이용하여 동체 좌표계의 측면 (y 축) 및 수직 (z 축) 속도의 측정값은 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다 (Dissanayake et al. 2001).

$$\begin{aligned} v_y^b &= 0 \\ v_z^b &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 v_y^b 와 v_z^b 는 차량의 전진방향에 수직한 측면 및 수직 속도를 의미한다.

NHC는 동체 좌표계에서만 사용이 가능하기 때문에 INS로 계산된 항법 좌표계 상의 속도를 동체 좌표계 상의 속도로 Eq. (2)와 같이 변환할 수 있다.

$$\hat{V}_{INS}^b = (\hat{C}_b^n)^T \hat{V}^n \quad (2)$$

여기서 $\hat{C}_b^n = (I - \phi^n \times) C_b^n$ 이며, ϕ^n 는 항법 좌표계 상에서 정의된 자세오차를 의미한다.

동체 좌표계 상의 속도 오차식은 Eq. (2)의 선형섭동법을 통해 Eq. (3)과 같이 구할 수 있다 (Cho et al. 2019).

$$\delta V^b = C_b^n \delta V^n - C_b^n (\mathbf{V}^n \times) \phi^n \quad (3)$$

NHC의 측정치 행렬은 Eq. (3)의 두 번째, 세 번째 행을 이용하여 설계할 수 있으며, 측정 벡터는 Eq. (4)와 같이 구할 수 있다.

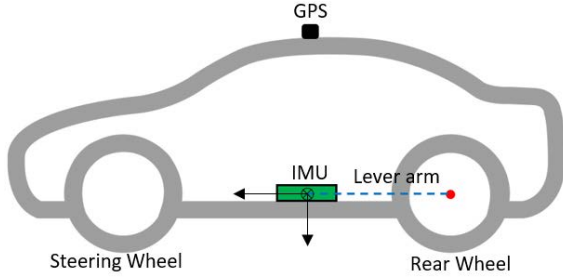


Fig. 2. Schematic of the sensor mounted on the vehicle.

$$\delta z = \begin{bmatrix} \hat{v}_{INS,y}^b - v_y^b \\ \hat{v}_{INS,z}^b - v_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_{INS,y}^b - 0 \\ \hat{v}_{INS,z}^b - 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이를 기반으로 GNSS 음영지역에서도 NHC 측정치 갱신을 수행함으로써 INS의 오차를 보정할 수 있다. Eq. (2)를 보면 IMU의 장착 위치를 고려하지 않고 NHC를 사용하는 것을 알 수 있다. 그러나 실제로는 차량의 모든 지점에서 NHC 조건이 성립하는 것은 아니다. 따라서 NHC를 사용하기 위해서는 IMU 장착 위치와 NHC 유효 지점과의 Lever arm을 고려해야 한다.

3. INS/GNSS/NHC NAVIGATION SYSTEM CONSIDERING LEVER ARM

3.1 NHC Considering the IMU Mounting Location

차량의 조향은 앞바퀴로 제어된다. 그리고 뒷바퀴는 조향 기능이 없기 때문에 NHC 조건에 의해 제어가 된다. Fig. 2는 차량에 장착된 센서의 개략도이다. 본 논문에서의 목적은 IMU 중심과 NHC 유효지점 사이의 Lever arm을 추정하는 것이다. 따라서 GPS와 IMU의 수평축 방향의 Lever arm은 없도록 실험 장비를 차량에 장착하였다. Fig. 2와 같이 차량에 IMU가 장착되는 경우 NHC 유효지점인 뒷바퀴 축과 Lever arm이 발생하게 된다. 이 경우 동체 좌표계 상의 속도는 INS로 계산된 항법 좌표계 상의 속도를 동체 좌표계로 변환한 속도(Eq. (2))와 Lever arm에 의해 발생하는 속도로 구분된다. Lever arm에 의해 발생하는 속도는 Eq. (5)와 같이 나타난다.

$$V_{LA}^b = \omega_{nb}^b \times L^b \quad (5)$$

여기서 L^b 는 IMU 장착 위치와 NHC 유효지점까지의 Lever arm을 의미하며, ω_{nb}^b 는 항법 좌표계 대비 동체 좌표계의 회전각속도를 동체 좌표계 상으로 나타낸 것이다. 그리고 V_{LA}^b 는 Lever arm에 의해 생성되는 동체 좌표계 상의 속도이다. Eq. (5)는 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{LA}^b = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{nb,z}^b & \omega_{nb,y}^b \\ \omega_{nb,z}^b & 0 & -\omega_{nb,x}^b \\ -\omega_{nb,y}^b & \omega_{nb,x}^b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_x^b \\ L_y^b \\ L_z^b \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $\omega_{nb,x}^b$ 는 차량의 움직임을 고려하여 0으로 가정할 수 있으며, 이를 이용해 정리하면 Eq. (7)과 같다.

$$\begin{aligned} v_{LA,y}^b &= \omega_{nb,z}^b L_x^b \\ v_{LA,z}^b &= -\omega_{nb,y}^b L_x^b \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 Lever arm이 없는 경우는 Eq. (1)과 같이 NHC 조건이 성립한다. 그러나 Lever arm이 있는 경우 Eq. (7)과 같이 Lever arm의 x축에 영향을 받아 동체 좌표계 상의 y축 속도는 z축 각속도, 동체 좌표계 상의 z축 속도는 y축 각속도에 의해 속도가 추가로 생성되어 NHC 조건을 만족하지 않게 되는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 x축 Lever arm만 고려하여 정확하게 추정/보상하는 것을 목표로 한다.

Eqs. (2)와 (5)를 이용하여 동체 좌표계 상의 속도를 Eq. (8)과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{V}^b = \hat{V}_{INS}^b + \hat{V}_{LA}^b \quad (8)$$

IMU 장착 위치를 고려한 동체 좌표계 상의 속도 오차식은 Eq. (8)의 선형섭동법을 통해 Eq. (9)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{V}^b &= \hat{V}_{INS}^b + \hat{V}_{LA}^b \\ &= (\hat{C}_b^n)^T (V^n + \delta V^n) + \omega_{nb}^b \times (L^b + \delta L^b) \\ &= \{ (I - \phi^n \times) C_b^n \}^T (V^n + \delta V^n) + \omega_{nb}^b \times (L^b + \delta L^b) \\ &\equiv C_n^b V^n - C_n^b (V^n \times) \phi^n + C_n^b \delta V^n + (\omega_{nb}^b \times) L^b + (\omega_{nb}^b \times) \delta L^b \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 Lever arm을 고려한 NHC의 속도 오차식은 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta V^b = C_n^b \delta V^n - C_n^b (V^n \times) \phi^n + (\omega_{nb}^b \times) \delta L^b \quad (10)$$

Eq. (10)에서 동체 좌표계의 속도 오차의 성분 중 Lever arm 오차는 각속도의 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 그리고 측정 벡터는 Eq. (11)과 같이 구할 수 있다.

$$\delta z = \begin{bmatrix} \hat{v}_y^b - v_y^b \\ \hat{v}_z^b - v_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_y^b - 0 \\ \hat{v}_z^b - 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.2 INS/GNSS/NHC Integrated Navigation System Considering Lever Arm

IMU 장착 위치에 따라 발생하는 Lever arm을 추정하기 위해 먼저 오차 상태변수에 x축 Lever arm 오차를 포함시켜 Eq. (12)와 같이 설정한다.

$$\delta X = [\delta P \quad \delta V^n \quad \phi^n \quad \nabla \quad \varepsilon \quad L_x]^T \quad (12)$$

여기서 $\delta P = [\delta L \quad \delta l \quad \delta h]^T$ 는 위치오차, $\delta V^n = [\delta v_N \quad \delta v_E \quad \delta v_D]^T$ 는 속도오차, $\phi^n = [\phi_N \quad \phi_E \quad \phi_D]^T$ 자세오차를 의미한다. 그리고 $\nabla = [\nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z]^T$ 와 $\varepsilon = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z]^T$ 는 각각 가속도계 바이어스와 자이로 바이어스를 의미한다. 마지막으로 L_x 는

x축 Lever arm오차를 나타낸 것으로 16차로 오차 상태변수를 설계하였다.

설정된 오차 상태변수와 INS를 통해 획득된 오차모델을 이용하여 Eq. (13)과 같이 시스템 모델을 설계한다.

$$\delta X_{k+1} = \Phi_k \delta X_k + w_k \quad (13)$$

여기서

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} \Phi_{15 \times 15, k} & 0_{15 \times 1} \\ 0_{1 \times 15} & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 Φ_k 는 시스템 행렬로 INS의 오차모델을 기반으로 구성되고 (Seo et al. 2006), w_k 는 공정잡음으로 IMU 성능에 따라 달라지는 프로세스 잡음 공분산 Q 를 가지는 백색잡음이다.

측정치 모델은 추정값과 측정값의 차이를 이용하여 Eq. (15)와 같이 설계한다.

$$y_k = H_k \delta X_k + v_k \quad (15)$$

여기서 v_k 는 측정잡음으로 측정치 잡음 공분산 행렬 R 를 가지는 백색잡음이다. H_k 는 측정치 행렬로 측정치의 활용 방법에 따라 Eqs. (16-18)과 같이 다르게 설정할 수 있다.

- GNSS를 측정치로 사용하는 경우

$$H_{GNSS, k} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 10} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 10} \end{bmatrix} \quad (16)$$

- NHC를 측정치로 사용하는 경우

$$H_{NHC, k} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 3} & (C_{n,k}^b)_{23,13} & \{-C_{n,k}^b(V_k^n \times)\}_{23,13} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & (\omega_{ab}^b \times)_{23,1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

- GNSS/NHC를 측정치로 사용하는 경우

$$H_{GNSS/NHC, k} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{2 \times 3} & (C_{n,k}^b)_{23,13} & \{-C_{n,k}^b(V_k^n \times)\}_{23,13} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & (\omega_{ab}^b \times)_{23,1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

본 논문에서는 측정치 사용 방법을 두가지로 구분한다. Open Sky에서 GNSS만 측정치를 사용하고 GNSS 음영지역에서는 NHC를 측정치로 사용하는 방법과 Open Sky에서 GNSS/NHC를 같이 측정치로 사용하고 GNSS 음영지역에서는 NHC를 측정치로 사용하는 방법을 4장에서 시뮬레이션과 차량 실험을 통해 분석하고자 한다.

4. SIMULATION ANALYSIS AND LAND VEHICLE EXPERIMENT

4.1 Simulation Analysis

IMU 장착 위치에 따라 발생하는 Lever arm을 고려한 EKF 기반 INS/GNSS/NHC 복합항법필터의 결과 분석을 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 IMU의 장착 위치는 차량의 환경을 고

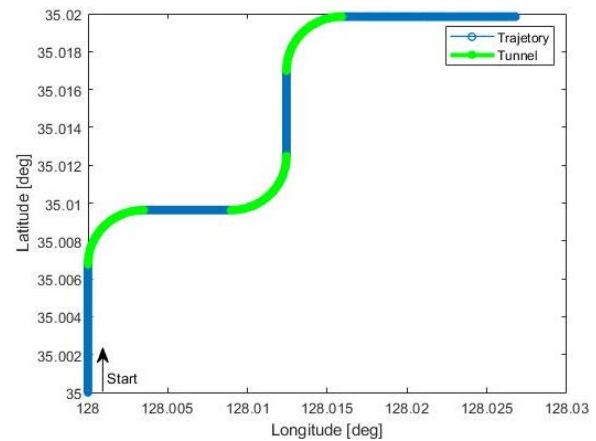


Fig. 3. Simulation trajectory and tunnel section.

Table 1. Simulation trajectory setting.

Time (sec)	Trajectory		Tunnel
	movement	value	
0 ~ 10	Standing	-	Outside
~ 20	Accelerate	5.0 m/s	Outside
~ 30	Cruise	-	Outside
~ 40	Turn	9.0 deg/s	Inside
~ 50	Cruise	-	Outside
~ 60	Turn	-9.0 deg/s	Inside
~ 70	Cruise	-	Outside
~ 80	Turn	9.0 deg/s	Inside
~ 100	Cruise	-	Outside

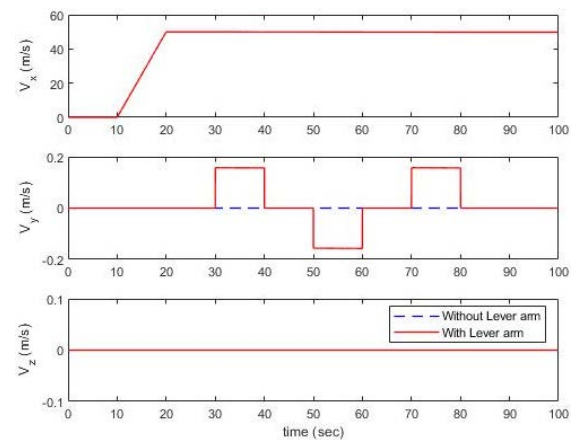
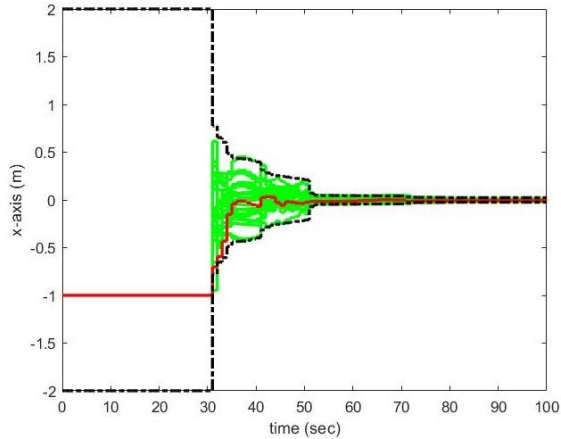


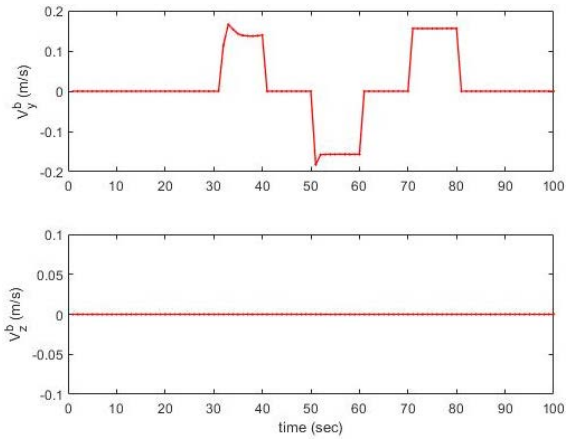
Fig. 4. Velocity in body frame generated by lever arm.

려하여 두 뒷바퀴의 중앙을 기준으로 x 방향으로 1 m 앞에 장착되게 설정하였다. 궤적에 대한 정보는 Fig. 3에서 나타내고 있으며, Table 1에서 궤적에 대한 정보를 정리하였다. 여기서 파란색 실선은 기준 궤적, 초록색 실선은 터널구간을 의미한다. 이 궤적을 기반으로 차분을 통해 IMU 데이터를 생성하였으며 Xsens사의 Mti-680G 모델의 규격을 사용하였다. Mti-680G의 Angular random walk와 Velocity random walk는 각각 $0.007 \text{ deg/s}/\sqrt{\text{Hz}}$, $60 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이다.

Fig. 4는 바이어스 및 노이즈 등 오차를 포함하고 있지 않은



(a)



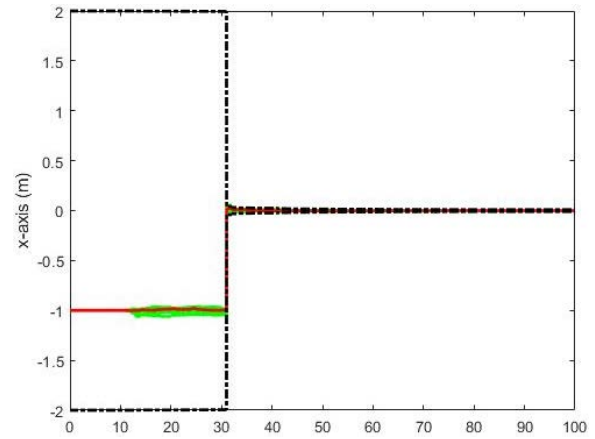
(b)

Fig. 5. Estimation results of lever arm (Case-I). (a) Lever arm estimation error, (b) Estimation of velocity in body frame.

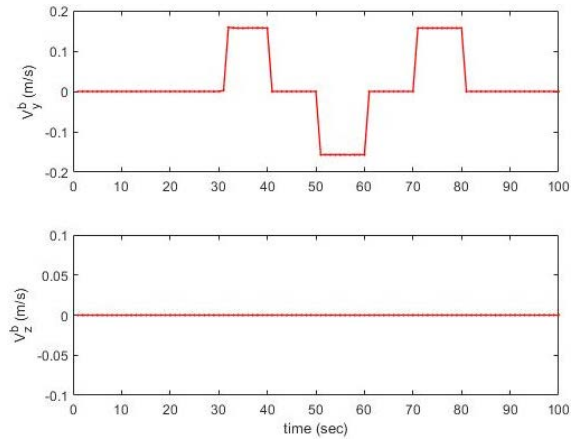
IMU 데이터로 생성된 동체 좌표계의 속도를 의미한다. 파란색 점선은 Lever arm이 없는 경우이며 동체 좌표계 상의 y, z축 속도는 0으로 NHC 조건이 성립하는 것을 확인할 수 있다. 빨간색 실선은 Lever arm이 존재하는 경우이며 차량이 회전함과 동시에 동체 좌표계 상의 y축 속도가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 z축 속도가 0인 이유는 시뮬레이션 궤적이 Pitch축으로 회전이 없기 때문이다. 즉, Fig. 4는 Lever arm의 영향으로 인해 NHC 조건을 불만족하는 것을 보여준다.

시뮬레이션의 목적은 Lever arm 추정 성능과 항법정보의 정확도와 신뢰도를 분석하는 것이다. 정확도는 오차 공분산의 가관측 정도를 통해 분석할 수 있다. 그리고 신뢰도는 Monte Carlo 시뮬레이션을 활용하여 계산한 Root Mean Square Error (RMSE)와 실시간으로 획득 가능한 오차 공분산행렬을 비교하여 분석한다. 이를 위해 Monte Carlo 시뮬레이션은 30번 수행하도록 설정하였다. 그리고 추정치의 사용방법에 따라 2가지 경우를 다음과 같이 설정하였다.

- Case-I: Open Sky에서 GNSS 만 사용하고 터널에서 NHC 정보를 사용
- Case-II: Open Sky에서 GNSS /NHC를 함께 사용하고 터널



(a)



(b)

Fig. 6. Estimation results of lever arm (Case-II). (a) Lever arm estimation error, (b) Estimation of velocity in body frame.

에서 NHC 정보를 사용

먼저 Figs. 5a와 6a는 Lever arm 추정 성능을 측정치 사용 방법에 따라 나타난 결과이다. 각 그림에서 빨간색 실선은 마지막 30번째 시뮬레이션 결과이며 초록색 실선은 Monte-Carlo 시뮬레이션 1~29번째의 결과이다. 또한, 검은색 점선은 오차 공분산을 통해 계산된 표준편차의 2배이며 $\pm 2\sigma$ (95.4%)의 값을 나타낸다.

Case-I에서는 Open Sky에서 GNSS 측정치만 사용하기 때문에 Lever arm을 추정할 수 없다. 그러나 31~40초에서 회전 터널에 진입함과 동시에 NHC를 측정치로 사용함으로써 Lever arm 상태변수가 가관측해져 추정이 시작되고 51~60초, 71~80초 구간에서 추가적인 회전 터널구간을 지남에 따라 추정 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 터널 구간을 벗어난 41~50초 구간에서 Lever arm 추정치의 정확도가 향상되는 이유는 이 상태변수와 상관관계를 갖는 자이로 출력값에 포함된 자이로 바이어스의 가관측성 정도가 이 구간에서 향상되기 때문이며 이 정보는 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 이 영향으로 인해 동체 좌표계 상의 y축과 z축 속도 추정 결과인 Fig. 5b를 보면 첫번째 회전 터널구간에서 추정이 시작되지만 Fig. 4와 비교하면 정확하지 않은 것을 볼 수 있다. Lever arm 추정이 수렴하기 시작하는 세번째 회전 터

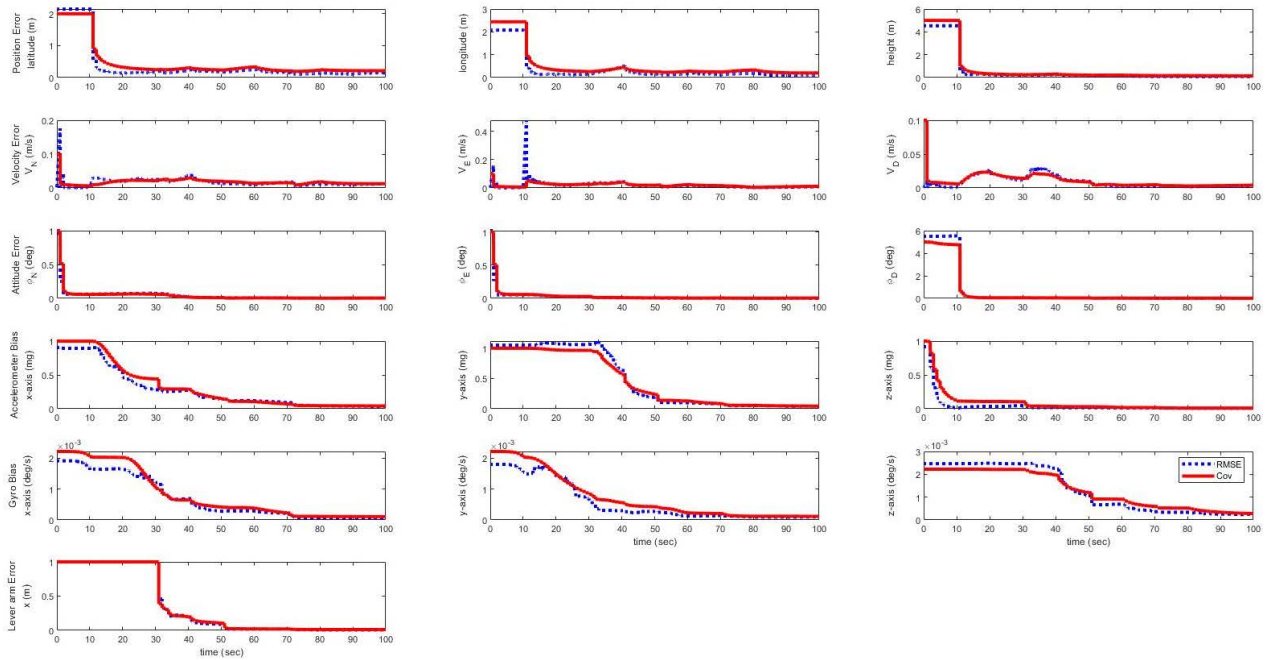


Fig. 7. Reliability analysis of the integrated navigation system with lever arm error (Case-I).

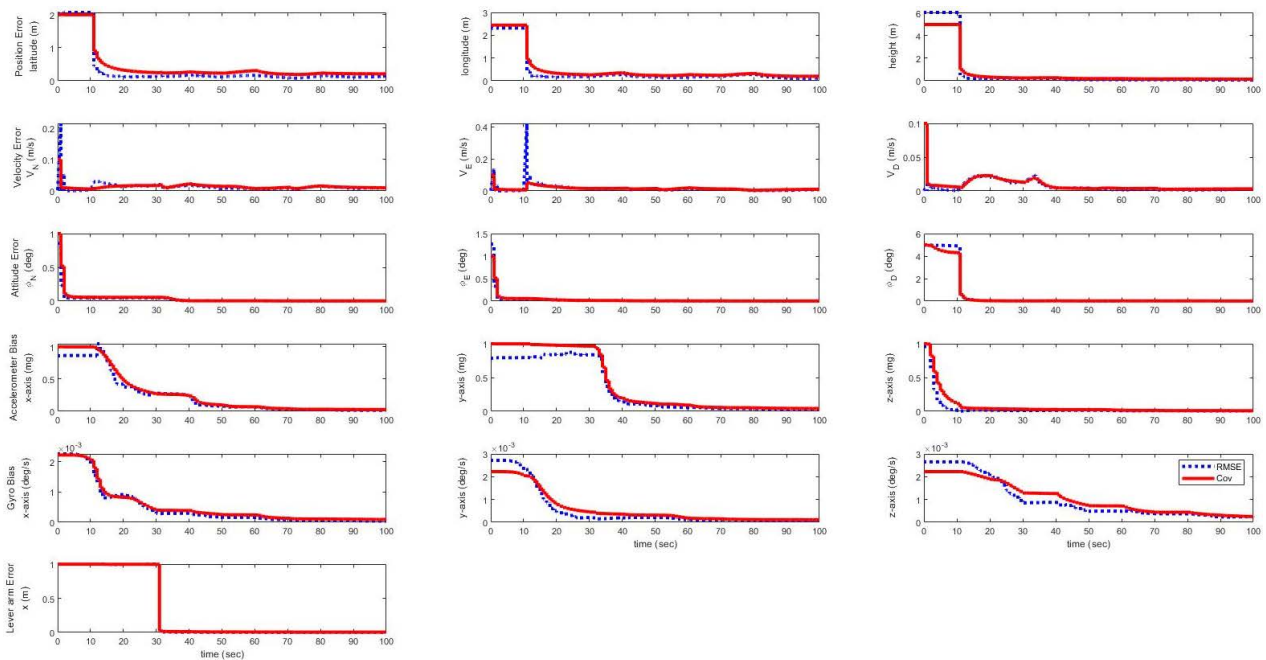


Fig. 8. Reliability analysis of the integrated navigation system with lever arm error (Case-II).

널 구간에서는 정확히 속도를 추정하는 것을 확인할 수 있다.

Case-II에서는 Open Sky에서 GNSS/NHC를 동시에 사용하지 만 Case-I과 같이 회전 터널 구간에서부터 Lever arm을 추정하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 각속도가 생성되는 회전구간에서 만 NHC 조건이 성립하지 않고 직선구간에서는 NHC 조건이 성립하기 때문이다. 그러나 Case-II는 Open Sky에서 GNSS/NHC

정보를 사용함으로 인해 상태변수들의 가관측성이 높아 더 좋은 항법정보를 생성한 후 회전 터널에 진입하기 때문에 Case-I보다 빠르게 수렴하여 Lever arm 추정 성능이 우수하다는 것을 확인할 수 있다. 터널 진입 전에 상태변수들의 가관측성이 좋은 것을 Figs. 8과 7을 비교하여 확인할 수 있다. 이 영향으로 인해 Fig. 6b에서 보는 바와 같이 첫번째 회전 터널구간 에서부터 정확히 y축

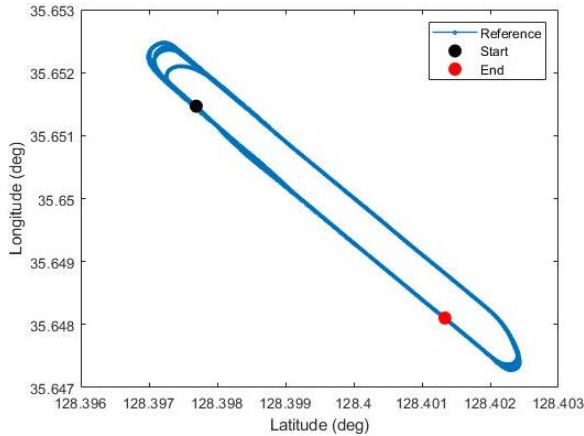


Fig. 9. Experiment area.

속도를 추정하는 것을 확인할 수 있다.

Figs. 7과 8은 각각 Case-I과 Case-II의 INS/GNSS/NHC 복합 항법시스템의 항법정보의 성능과 신뢰성 정보를 분석하기 위한 결과이다. 각 그림에서 빨간색 실선은 실시간으로 사용가능한 오차 공분산을 나타낸 것이며 파란색 점선은 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 계산된 상태변수의 RMSE를 나타낸 것이다.

Case-I의 경우 차량이 회전 터널에 진입하면서 Lever arm의 가관측성이 향상되는 것을 볼 수 있다. 그러나 31~40초때 속도 오차 공분산의 가관측성 정도가 조금 낮아지고 RMSE가 오차 공분산 보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 필터의 오차 공분산 행렬이 실제로 발생하는 오차를 정확하게 반영하지 못하므로 오차 공분산의 신뢰도가 떨어지게 된다. 이는 Lever arm 가관측성 정도가 낮기 때문이다. 이 후 Lever arm의 오차 공분산이 수렴하게 되면서 신뢰도가 향상되지만 다수의 회전 터널구간을 필수적으로 지나야 한다는 제약 조건이 발생하는 문제가 있다.

Case-II의 경우 Case-I과 유사한 특성을 보이고 있다. 그러나 Open Sky에서 GNSS/NHC를 함께 사용함으로써 Case-I보다 Lever arm의 가관측성이 빠르게 향상되는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 모든 상태변수의 가관측성 정도가 향상되어 정확도가 Case-I 보다 높으며 모든 상태변수의 RMSE가 오차 공분산 내에 있는 것으로 보아 항법정보의 신뢰성이 높다고 판단된다.

시뮬레이션을 측정치 사용방법에 따라 Case를 구분하여 INS/GNSS/NHC 복합항법 시스템을 분석하였다. 먼저 Case-I은 다수의 회전 터널구간이 필수적으로 있어야 Lever arm을 정확히 추정할 수 있는 반면에 Case-II는 Open Sky에서 GNSS와 NHC를 같이 측정치로 사용하기 때문에 회전구간만 있으면 Lever arm을 정확히 추정할 수 있고 더 좋은 항법정보를 생성하여 Case-I보다 Lever arm의 추정 성능이 빠르고 정확하였다. 이 영향으로 인해 Case-II 항법결과와 신뢰성과 정확도가 높은 것을 알 수 있었다.

4.2 Land Vehicle Experiment Results

시뮬레이션으로 검증된 Case-II를 선정하여 차량 실험을 수행하였다. 실험은 차량에 실험 장비를 장착하여 지능형자동차부품진흥원의 주행 시험 도로에서 수행하였다. 실험에 사용된 장비는

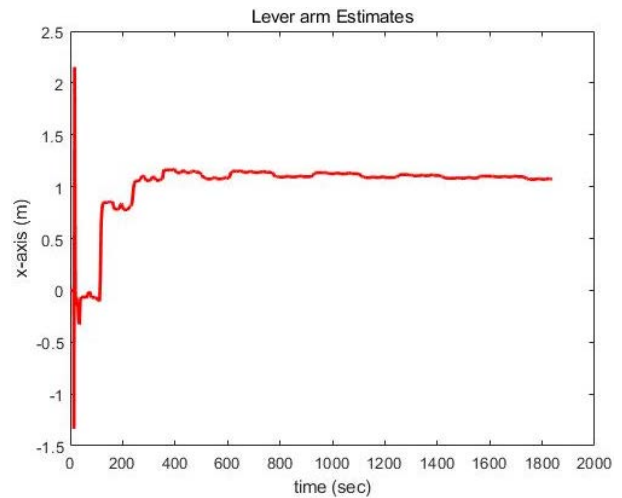


Fig. 10. Lever arm estimation experimental results.

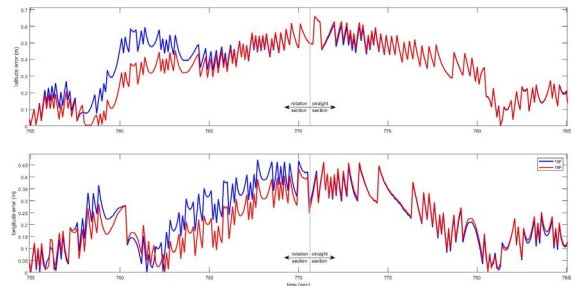


Fig. 11. Comparison of 15F and 16F position errors.

시뮬레이션에서 사용한 Xsens사의 Mti-680G로 IMU는 100 Hz, GNSS는 10 Hz의 샘플링 속도로 출력하였다. 그리고 정확한 항법을 위해 Real Time Kinematic (RTK)-GPS 수신기를 사용하여 실험을 수행하였다. GNSS 데이터는 위도, 경도, 고도와 전진 방향의 속도를 측정치로 사용한다. 여기서 전진 방향의 속도는 INS에서 계산된 DCM을 활용하여 항법 좌표계 상의 속도로 변환하여 사용하였다. 주행 경로는 Fig. 9에 나타내고 있다. 여기서 검은색 실선은 Reference를 의미하며 차량에 탑재된 RTK-GPS 수신기를 통해 획득한 것이다. 실험 주행에 소요된 시간은 총 30분이며 INS의 초기 정렬을 위해 처음 14초간 정지 상태를 유지한 후 출발하였다. 실험 주행 동안 차량 주행 속도는 0 ~ 55 km/h이다. 이 연구에서 사용되는 NHC 측정치를 위한 측정잡음 공분산은 이상적인 경우에는 0에 가깝지만 실제 차량시험에서는 다소 크게 설정하였다. 그 이유는 차량의 서스펜션에 의한 모션과 차량의 가감속 및 방지턱을 지나는 구간 등에서 발생하는 회전 및 진동 등에 의해 NHC 측정치 오차는 다소 크게 발생할 수 있기 때문이다.

실험 주행을 통해 본 논문에서 제안한 알고리즘의 실용성을 검증하고, 상태변수를 정확하게 추정할 수 있는지를 판단한다. Fig. 10은 Lever arm 추정 실험 결과를 나타낸 것이다. 차량이 주행하면서 회전구간을 만나 Lever arm 추정이 시작되고 최종적으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

기존의 15차 복합항법시스템과 제안하는 16차 복합항법시스템의 위치 오차를 Fig. 11에 나타내고 있다. 파란색 실선은 15차의

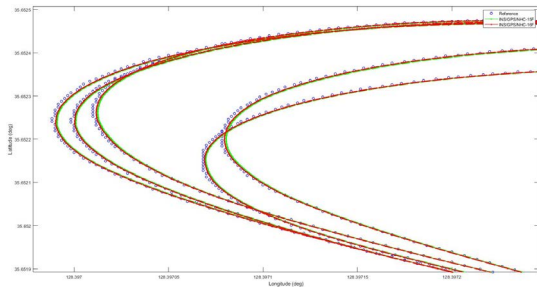


Fig. 12. Experimental results of the 15F and 16F integrated navigation system.

Table 2. Comparison of 15F and 16F order position error.

RMSE	Extended Kalman filter	
	15F	16F
Latitude (m)	0.3032	0.2937
Longitude (m)	0.2282	0.2189
Height (m)	0.1424	0.1188

오차이며, 빨간색 실선은 16차의 오차이다. 그림에서 755~771초에서는 회전구간으로 Lever arm의 영향으로 인해 15차의 오차가 16차의 오차보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 Lever arm을 추정 및 보상하여 NHC 정보를 정확히 사용하기 때문이다. 그리고 772~785초에서는 직진구간으로 15차와 16차의 오차가 거의 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 직진구간에서 Lever arm의 영향이 거의 없기 때문이다. Fig. 12는 Fig. 11에 해당하는 구간의 위치추정 결과를 나타내고 있다. 여기서 파란색 점은 Reference이며 초록색과 빨간색 실선은 각각 15차와 16차 복합항법시스템에서 추정된 위치를 의미한다. 16차가 15차보다 회전구간에서 더 정확하게 위치가 추정되며, 직진구간에서는 15차와 16차의 결과 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다.

Reference에 대한 15차, 16차의 위치결과의 오차를 Table 2에 나타내고 있다. Table 2의 RMSE값 계산 방법은 Eq. (19)와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i)^2} \quad (19)$$

여기서 n 은 데이터 수를 의미하고 P_i 와 $\hat{P}_i$ 는 각각 기준위치와 추정위치를 의미한다. 이를 통해 제안한 알고리즘이 15차 INS/GNSS/NHC 복합항법시스템 보다 정확한 것을 확인할 수 있다. 이는 Lever arm에 의해 발생하는 동체 좌표계 상의 y축과 z축의 속도를 정확히 추정/보상함으로써 속도정보의 정확성이 향상되어 위치정보에 영향을 주기 때문이다. 본 논문의 실험은 최고 속도 55 km/h로 저속으로 실험을 진행하여 기존 15차 보다 향상된 정확도를 보여주었지만 큰 차이가 없는 것처럼 보일 수 있다. 그러나 회전구간이 많은 복잡한 도로나 차량이 고속으로 움직일수록 Lever arm의 영향이 더욱 커질 것이기 때문에 기존 15차와 제안한 16차 복합항법시스템의 성능 차이는 크게 날 것이다. 따라서 Lever arm을 추정/보상하여 속도정보의 정확성을 향상시키는 것이 필수적이다.

5. CONCLUSIONS

본 논문에서는 차량용 INS/GNSS/NHC 복합항법시스템을 설계하였다. NHC는 차량 항법을 위해 보조 측정치로 INS의 오차를 보정하기 위해 많이 사용되고 있다. 그러나 NHC는 차량 모든 곳에서 유효하지 않고 차량의 두 뒷바퀴를 연결한 축에서만 만족하는 것을 확인하였다. 따라서 NHC 조건을 만족시키기 위해서는 IMU를 두 뒷바퀴를 연결한 축 상에 위치하도록 장착하여야 한다. 그러나 IMU를 차량의 무게중심에 장착하는 경우가 많기 때문에 이런 경우 차량 뒷바퀴의 중심축과 IMU의 장착 위치에 따른 Lever arm을 정확히 추정하여야 한다. 본 논문에서는 Lever arm과 회전각속도에 따라 생성되는 동체 좌표계 상의 속도를 분석하였으며 이를 기반으로 NHC 오차식을 구하였다. 결합 필터로는 EKF를 선택하였으며 측정치 사용 방법에 따라 두가지 Case로 나누어 시뮬레이션을 분석하였다. 시뮬레이션 결과 Case-II의 경우가 Lever arm 추정 성능이 좋았으며 이 영향으로 인해 항법성능도 향상됨을 확인하였다. 또한 오차 공분산의 가관측 정도가 우수하였으며 상태변수의 RMSE가 오차 공분산 안에 분포됨을 보아 항법정보의 신뢰성도 높은 것을 확인하였다. 따라서 Case-II를 선정하여 차량 실험을 수행하였다. 차량 실험에서 Lever arm에 의해 발생하는 동체 좌표계 상의 y축과 z축의 속도를 정확히 추정/보상함으로써 속도정보의 정확성이 향상되어 제안한 복합항법시스템이 기존의 복합항법시스템 보다 위치 정확도가 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE), Korea, under the “Cooperation program for regional leading industrial complexes”

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Myeong Seok Chae contributed to the design and implementation of the algorithm and to the writing of the manuscript. Jae Uk Kwon and Eui Yeon Cho contributed to provide information in writing the manuscript. Seong Yun Cho supervised the research and reviewed the manuscript as a project administrator. All authors discussed the proposed approach and results.

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, 3rd ed. (New York: John Wiley & Sons)
- Chae, M. S. & Cho, S. Y. 2021, Vehicular integrated navigation system compensating for mounting misalignment of the IMU through CKF-based state extension, JICRS, 27, 1084-1091. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2021.21.0152>
- Cho, S. Y. & Chae, M. S. 2022, Ackermann Geometry-based Analysis of NHC Satisfaction of INS for Vehicular Navigation according to IMU Location, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 11, 29-34. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2022.11.1.29>
- Cho, S. Y., Chae, M. S., & Shin, K. H. 2021, Reliability analysis of the integrated navigation system based on real trajectory and calculation of safety margin between trains, IEEE Access, 9, 32986-32996. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061070>
- 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>
- Dissanayake, G., Sukkarieh, S., Nebot, E., & Durrant-Whyte, H., 2001, The aiding of a low-cost strapdown inertial measurement unit using vehicle model constraints for land vehicle applications, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 17, 731-747. <https://doi.org/10.1109/70.964672>
- Grewal, M. S., Weill, L. R., & Andrews, A. P. 2007, Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration (Canada: John Wiley & Sons)
- Han, J. S., Ji, G. H., & Won, J. H. 2020, Implementation and experimental test result of a GPS/INS/DR integrated navigation system for ground vehicle using commercial MEMS IMU and vehicle CAN data, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 26, 55-65. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2020.19.0138>
- Park, C. G., Kim, K. J., Park, H. W., & Lee, J. G. 1998, Development of an Initial Coarse Alignment Algorithm for Strapdown Inertial Navigation System, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 4, 674-679
- Rose, C., Britt, J., Allen, J., & Bevely, D. 2014, An Integrated Vehicle Navigation System Utilizing Lane-Detection and Lateral Position Estimation Systems in Difficult Environments for GPS, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 15, 2615-2629. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2321108>
- Schutz, A., Sanchez-Morales, D. E., & Pany, T. 2020, Precise Positioning Through a Loosely-coupled Sensor Fusion of GNSS-RTK, INS and LiDAR for Autonomous Driving, IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 20-23 April 2020, Portland, OR, USA, pp.219-225. <https://doi.org/10.1109/PLANS46316.2020.9109934>
- Siouris, G. M. 1993, Aerospace Avionics Systems (California: Academic Press)
- Seo, J., Lee, H. K., Lee, J. G., & Park, C. G. 2006, Lever arm compensation for GPS/INS/odometer integrated system, International Journal of Control Automation, and Systems, 4, 247-254.
- Titterton, D. H. & Weston, J. L. 1997, Strapdown Inertial Navigation Technology (London: Peregrinus)
- Wen, Z., Yang, G., & Cai, Q. 2022, An improved SINS/NHC integrated navigation algorithm based on Ackermann turning geometry, Measurement, 192. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110859>
- Zhang, Q., Hu, Y., & Niu, X. 2020, Required Lever Arm Accuracy of Non-Holonomic Constraint for Land Vehicle Navigation, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69, 8305-8316. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2995076>



Myeong Seok Chae received the B.S. degree from the Mechanical Automotive Engineering at Kyungil University and M.S. degree from the Department of IT Engineering at the same university in 2020, and 2022, respectively, where he is currently pursuing the Ph.D. degree with the Department of IT Engineering. His current research topics include vehicular navigation system, pedestrian inertial navigation, and estimation theory.



Jae Uk Kwon received the B.S. degree from the Mechanical Automotive Engineering at Kyungil University and M.S. degree from the Department of IT Engineering at the same university in 2020, and 2022, respectively, where he is currently pursuing the Ph.D. degree with the Department of IT Engineering. His current research topics include LTE-based fingerprinting for positioning, UWB-based wireless positioning, and navigation for autonomous vehicle.



Eui Yeon Cho received the B.S. degree from the Robotics Engineering at Kyungil University in 2022, where he is currently pursuing the master's degree with the Department of IT Engineering. His current research topics include pedestrian inertial navigation, integrated navigation technologies, 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 Mechanical Automotive 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, inertial motion detection, autonomous driving system, and location-based services.