

논문 2022-17-29

# GNSS 부분 음영 지역에서 마할라노비스 거리를 이용한 GNSS/다중 IMU 센서 기반 측위 알고리즘 (GNSS/Multiple IMUs Based Navigation Strategy Using the Mahalanobis Distance in Partially GNSS-denied Environments)

김지연, 송무근, 김재훈, 이동익\*  
(Jiyeon Kim, Moogeun Song, Jaehoon Kim, Dongik Lee)

**Abstract** : The existing studies on the localization in the GNSS (Global Navigation Satellite System) denied environment usually exploit low-cost MEMS IMU (Micro Electro Mechanical Systems Inertial Measurement Unit) sensors to replace the GNSS signals. However, the navigation system still requires GNSS signals for the normal environment. This paper presents an integrated GNSS/INS (Inertial Navigation System) navigation system which combines GNSS and multiple IMU sensors using extended Kalman filter in partially GNSS-denied environments. The position and velocity of the INS and GNSS are used as the inputs to the integrated navigation system. The Mahalanobis distance is used for novelty detection to detect the outlier of GNSS measurements. When the abnormality is detected in GNSS signals, GNSS data is excluded from the fusion process. The performance of the proposed method is evaluated using MATLAB/Simulink. The simulation results show that the proposed algorithm can achieve a higher degree of positioning accuracy in the partially GNSS-denied environment.

**Keywords** : Multiple IMUs, GNSS, Integrated navigation, Extended Kalman filter, GNSS novelty detection

## 1. 서론

위성 항법 시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS)은 정밀도가 높고 시간이 지나도 오차가 누적되지 않으며, 저가의 수신기만 있으면 특별한 데이터 처리를 거치지 않고 위치 정보를 얻을 수 있다. 이러한 장점 때문에 실외에서 운용되는 다양한 이동체의 측위 기술에서 GNSS를 사용한다. 그러나 이동체가 터널, 지하 주차장, 건물이 밀집한 도심 등의 'GNSS 음영 지역'을 통과하는 경우 위성 신호의 수신에 원활하지 않아 GNSS 신호만으로는 높은 측위 정확도 확보에 한계가 있다. 반면, 관성 측정 장치 (Inertial Measurement Unit, IMU)를 이용한 항법 시스템은 장시간 사용 시 적분 과정에서 오차가 누적되는 문제점이 있으나 단시간 운행에서는 높은 정밀도를 보이며 외부 환경에 강인하다. 따라서 GNSS와 IMU 센서를 함께 활용하는 융합 항법이 폭넓게 연구되고 있으며, 특히 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 기반 IMU 센서는 소형, 저전력, 저비용의 장점 때문에 여러 분야에서 활용성이 높다 [1-4]. 그러

나 저가형 센서의 특성상 잡음이 많고 측정값에 바이어스 오차, 이득 오차와 같은 다양한 오류가 포함되어 있으며 시간에 따라 특성이 변하므로, GNSS 신호가 차단되면 오류가 누적되어 측위 결과가 급격히 저하된다 [5]. 이러한 GNSS 음영 환경에서의 문제를 보완하기 위해 참고문헌 [6-8]에서는 GNSS 대신 여러 개의 IMU 센서 정보를 융합하여 하나의 입력으로 사용하는 중첩 IMU (redundant IMU) 기법을 제안하였다. 또 다른 방법으로는 여러 개의 IMU 센서로부터 각각 독립된 상태 추정치를 계산하여 이를 결합하는 연합형 융합 필터 (federated fusion filter) 기법이 연구되었다 [9-11]. 그러나 이러한 다중 IMU 센서 융합 기법들은 GNSS 신호가 양호한 상황에서도 GNSS를 배제함으로써 상대적으로 위치 정밀도를 저하시킨다는 단점이 있다. 따라서 저가형 다중 IMU 센서를 사용하는 융합 시스템에서 GNSS 음영 지역이 빈번한 상황이나 고장으로 인한 성능 저하 등의 이상 상태를 판별하여 GNSS 신호를 부분적으로 활용하는 연구가 필요하다.

본 논문에서는 GNSS 신호가 제한적인 환경에서 더 높은 측위 정확도를 제공할 수 있도록, 다중 IMU 센서의 위치 추정 시스템과 GNSS의 정보를 융합한 측위 융합 알고리즘을 제안한다. GNSS/INS 융합 시스템의 일부 센서에 성능 저하가 발생하더라도 강인하게 대처할 수 있도록 연합형 융합 시스템을 적용하였다. 연합형 융합 필터는 독립적으로 구성된 부 필터 (local filter)에서 계산한 각 센서의 개별 상태 추정치를 주 필터 (master filter)의 측정 업데이트 단계

\*Corresponding Author (dilee@ee.knu.ac.kr)

Received: Feb. 10, 2022, Revised: Mar. 2, 2022, Accepted: Mar. 23, 2022.

J.Y. Kim: Kyungpook National University (Ph.D. Student)

M.G. Song: Kyungpook National University (Ph.D. Student)

J.H. Kim: Kyungpook National University (PostDoc.)

D.I. Lee: Kyungpook National University (Prof.)

※ 이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체 원천기술개발사업단의 지원 (과제번호: NRF-2020M3C1C1A02086313)과 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: NRF-2018K1A3A7A03089832).

에서 결합한다. 주 필터에서 부 필터로 피드백하지 않는 구조의 경우 오류가 발생한 부 필터의 추정치가 다른 부 필터에 영향을 미치지 않으므로 고장에 강인하다. IMU 센서의 측정값을 입력으로 사용하는 쿼터니언 (quaternion) 기반의 확장 칼만 필터 (Extended Kalman Filter, EKF) [12]를 적용하여, 동체 좌표계 (body frame)에서 지구 표면 좌표계 (North-East-Down frame, NED frame) 기준으로 변환하는 회전 변환 행렬을 구하고 이동체의 정확한 자세 변환을 추정한다. 각각의 IMU 센서는 개별적으로 연합형 융합 시스템의 부 필터에서 GNSS와 융합하여 이동체의 속도와 위치를 추정하고, 부 필터에서 계산된 추정치와 공분산을 주 필터에서 가장 평균하여 최종적으로 결합한다. 불안정한 GNSS 환경을 판별하기 위해 [13]에서 제안한 GNSS 이상 검출 방법을 적용한다. 융합 시스템에서 추정한 위치와 GNSS로 측정된 위치로 마할라노비스 거리 (Mahalanobis distance) [14]를 계산하여, 미리 설정한 한계치보다 클 경우 GNSS 신호에 성능 저하가 발생한 것으로 판단하고 융합 시스템에서 GNSS를 제외한다.

본 논문의 II장에서는 연합형 융합 기법에 대해 기술하며, III장에서는 GNSS와 다중 IMU 센서의 연합형 융합 구조 및 GNSS 이상 신호 대처 알고리즘을 제시한다. IV장에서 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 효용성을 검증하고, V장에서 결과를 고찰한다.

II. 연합형 융합 기법

연합형 융합 기법은 여러 개의 독립적인 부 필터 정보를 주 필터에서 융합하여 공분산과 상태 변수를 추정하는 구조이다. 주 필터는 각 부 필터의 신뢰도에 따라 가중치를 두어 추정 결과를 융합하며, 부 필터에서 추정한 상태 벡터들은 다음의 식과 같이 융합된다.

$$P_m^{-1} = \sum_{i=1}^n P_i^{-1}, \tag{1}$$

$$\hat{x}_m = P_m \left[ \sum_{i=1}^n P_i^{-1} \hat{x}_i \right]. \tag{2}$$

여기서  $m$ 은 주 필터,  $i$ 는  $i$ 번째 부 필터를 의미하며  $\hat{x}$ 와  $P$ 는 필터의 추정 상태 벡터, 추정 공분산을 의미한다.

연합형 융합 기법은 주 필터와 부 필터 간의 정보 공유 방법에 따라, 주 필터의 추정 항법 해를 부 필터로 다시 분배하는 FR (Fusion Reset) 방식과 각각의 부 필터가 독립적으로 동작하는 NR (No Reset) 방식으로 구분할 수 있다 [9]. FR 방식은 최적해가 보장된다는 장점이 있으나 고장이 발생할 경우 모든 부 필터에 영향을 미치므로 고장 검출 측면에서 불리하다. NR 방식은 그림 1과 같이 주 필터에서 융합된 추정치가 피드백되지 않고 각각의 부 필터에서 독립적으로 연산되기 때문에, FR 방식에 비해 최적성은 보장되지 않지만 잘못된 부 필터의 추정치가 다른 부 필터에 영향을 미치지 않으므로 고장에 강인하다는 장점이 있다.

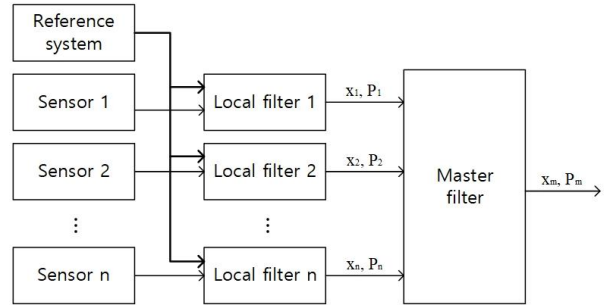


그림 1. 연합형 융합 필터 기법 - NR 방식  
Fig. 1. Federated fusion filter - NR mode

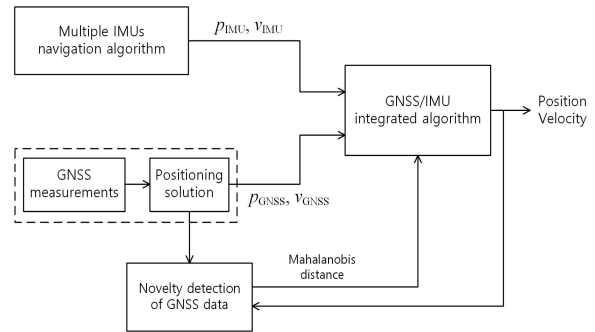


그림 2. 제안한 융합 항법 시스템의 구조  
Fig. 2. Structure of the proposed fusion navigation system

III. GNSS/다중 IMU 센서 융합 알고리즘

본 논문에서는 그림 2와 같이 다중 IMU 센서와 GNSS의 위치, 속도 정보를 칼만 필터로 융합하고 GNSS 신호의 성능 저하를 판별하는 알고리즘을 제안한다. 세 개의 IMU 센서에서 각각 쿼터니언 기반 확장 칼만 필터로 이동체의 자세를 추정할 수 있는 변환 행렬을 구한 뒤, NED 좌표계 기준 가속도를 이용하여 속도와 위치를 계산한다. 연합형 융합 구조의 부 필터에서 칼만 필터를 사용하여 IMU 센서와 GNSS의 위치 정보를 융합하고, 상태 변수와 공분산을 다시 주 필터에서 융합한다. GNSS의 측정값과 주 필터에서 결합한 추정값으로 계산한 마할라노비스 거리가 미리 설정한 한계치보다 클 경우 GNSS 신호의 성능이 저하된 것으로 판단하고 GNSS 정보를 제외한 다중 IMU 센서로만 위치를 추정한다.

1. 표기법

GNSS/다중 IMU 센서 융합 알고리즘에서 이용할 표기법을 다음과 같이 정의한다. 각각의 벡터에서 위첨자  $n$ 을 표기할 경우 NED 좌표계 기준, 위첨자  $b$ 를 표기할 경우 동체 좌표계 기준에서 표현되었음을 의미한다.

- $\omega$       자이로스코프 측정 데이터
- $a$       가속도 센서 측정 데이터

|                  |                                     |
|------------------|-------------------------------------|
| $m$              | 지자기 센서 측정 데이터                       |
| $q$              | 쿼터니언                                |
| $\Omega(\omega)$ | 각속도의 반대칭 행렬 (skew-symmetric matrix) |
| $C_n^b$          | NED 좌표계에서 동체 좌표계로 변환시키는 회전 변환 행렬    |
| $v_{IMU}$        | INS에서 계산한 속도                        |
| $p_{IMU}$        | INS에서 계산한 위치                        |
| $v_{GNSS}$       | GNSS에서 측정된 속도                       |
| $p_{GNSS}$       | GNSS에서 측정된 위치                       |
| $\hat{x}_m$      | 주 필터의 추정 상태 벡터                      |
| $\hat{x}_p$      | $\hat{x}_m$ 의 위치 추정 상태 벡터           |
| $M$              | 마할라노비스 거리                           |

2. 쿼터니언 기반 다중 IMU 센서 융합 알고리즘

쿼터니언은 하나의 스칼라  $q_0$ 와 세 개의 벡터 성분으로 구성되며 다음의 식과 같이 정의한다.

$$q = q_0 + iq_1 + jq_2 + kq_3 = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T. \quad (3)$$

쿼터니언과 각속도의 관계식을 이용하여 자세 미분방정식을 표현하면 식 (4)와 같으며,  $\omega(t) = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$  는 동체 좌표계를 기준으로 측정된 각속도를 의미한다.

$$\dot{q} = \Omega(\omega)q \quad (4)$$

$$\Omega(\omega) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega^T \\ \omega & [\omega \times] \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_y & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ \omega_z & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

위의 식을 다음과 같이 이산 식으로 표현할 수 있으며,  $\Delta t$  는 샘플링 간격이다.

$$\dot{q}_{k+1} = \exp(\Omega_k \Delta t) q_k, \quad k = 0, 1, \dots \quad (6)$$

쿼터니언 기반 자세 추정 필터 모델의 상태 방정식은 다음과 같으며, 상태 벡터  $x_k$ 는 쿼터니언 벡터  $q$ 와 가속도 센서, 지자기 센서 바이어스  $b^a, b^m$ 으로 이루어져 있고 쿼터니언 모델 부분은 식 (6)을 이용하였다 [12].

$$x_k = [q_k \ b_k^a \ b_k^m]^T, \quad (7)$$

$$x_{k+1} = \Phi(\Delta t, \omega_k)x_k + w_k$$

$$= \begin{bmatrix} \exp(\Omega_k \Delta t) & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_k \\ b_k^a \\ b_k^m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_k^q \\ w_k^a \\ w_k^m \end{bmatrix}. \quad (8)$$

여기서 쿼터니언, 가속도 센서, 지자기 센서의 공정 잡음은 다음과 같다.

$$w_k^q = -\frac{\Delta t}{2} \Xi_k \sigma_w^q = -\frac{\Delta t}{2} \begin{bmatrix} -e^T \\ [e \times] + q_0 I \end{bmatrix} \sigma_w^q, \quad (9)$$

$$w_k^a = \sigma_w^a, \quad w_k^m = \sigma_w^m.$$

전 상태 추정 오차 공분산 행렬 (a priori error covariance matrix)  $P_{k+1}^-$ 와 진행 잡음에 대한 공분산 행렬  $Q_k$ 는 다음과 같다.

$$P_{k+1}^- = \Phi(\Delta t, \omega_k) P_k \Phi(\Delta t, \omega_k)^T + Q_k, \quad (10)$$

$$Q_k = \begin{bmatrix} (\Delta t/2)^2 \Xi_k \sigma_w^{q^2} \Xi_k & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_w^{a^2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_w^{m^2} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

추정 벡터는 가속도 센서와 지자기 센서의 측정 데이터로 구성되며 추정 모델  $z_{k+1}$ 은 다음과 같다.

$$z_{k+1} = \begin{bmatrix} a_{k+1} \\ m_{k+1} \end{bmatrix} = f[x_{k+1}] + v_{k+1}$$

$$= \begin{bmatrix} C_n^b(q_{k+1}) & 0 \\ 0 & C_n^b(q_{k+1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{k+1}^a \\ b_{k+1}^m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{k+1}^a \\ v_{k+1}^m \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$= \begin{bmatrix} z^a(q_{k+1}) \\ z^m(q_{k+1}) \end{bmatrix}.$$

여기서  $g$ 는 중력 가속도,  $h$ 는 지구 자기장 벡터,  $v^a, v^m$ 은 각각 가속도 센서, 지자기 센서의 측정 잡음을 나타내며, 회전 변환 행렬  $C_n^b$ 는 다음과 같이 계산한다 [15].

$$C_n^b(q) = \begin{bmatrix} 1-2(q_2^2+q_3^2) & 2(q_0q_3+q_1q_2) & 2(q_1q_3-q_0q_2) \\ 2(q_1q_2-q_0q_3) & 1-2(q_1^2+q_3^2) & 2(q_0q_1+q_2q_3) \\ 2(q_0q_2+q_1q_3) & 2(q_2q_3-q_0q_1) & 1-2(q_1^2+q_2^2) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

공분산 행렬  $R$ 은 다음과 같다.

$$R_{k+1} = \begin{bmatrix} R_{k+1}^a & 0 \\ 0 & R_{k+1}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 I & 0 \\ 0 & \sigma_m^2 I \end{bmatrix}. \quad (14)$$

미분을 통해 시스템을 선형 근사화시키기 위해 식 (12)를 자코비안 행렬 (Jacobian matrix)의 형태로 계산한  $F_{k+1}$ 는 다음과 같다 [12].

$$F_{k+1} = \begin{bmatrix} J_a(g_{k+1}) & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ J_m(g_{k+1}) & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$J_a(q) = \frac{\partial z^a(q)}{\partial(q)} = \begin{bmatrix} 2gq_2 & -2gq_3 & 2gq_0 & -2gq_1 \\ -2gq_1 & -2gq_0 & -2gq_3 & -2gq_2 \\ 0 & 4gq_1 & 4gq_2 & 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$J_m(q) = \frac{\partial z^m(q)}{\partial(q)} = \begin{bmatrix} -2q_3h_z & 2q_3h_x & 2q_3h_y \\ -2q_3h_x+2q_1h_z & 2q_3h_x+2q_0h_z & 2q_3h_y+2q_1h_z \\ 2q_3h_x & 2q_3h_x-4q_1h_z & 2q_3h_y+2q_1h_z \\ -4q_2h_x-2q_0h_z & -4q_3h_x+2q_1h_z & 2q_1h_x-4q_2h_z \\ 2q_1h_xq_3h_z & -2q_0h_x+2q_2h_z & 2q_1h_x-4q_2h_z \\ 2q_0h_x-4q_2h_z & 2q_1h_x & 2q_1h_x \end{bmatrix}. \quad (17)$$

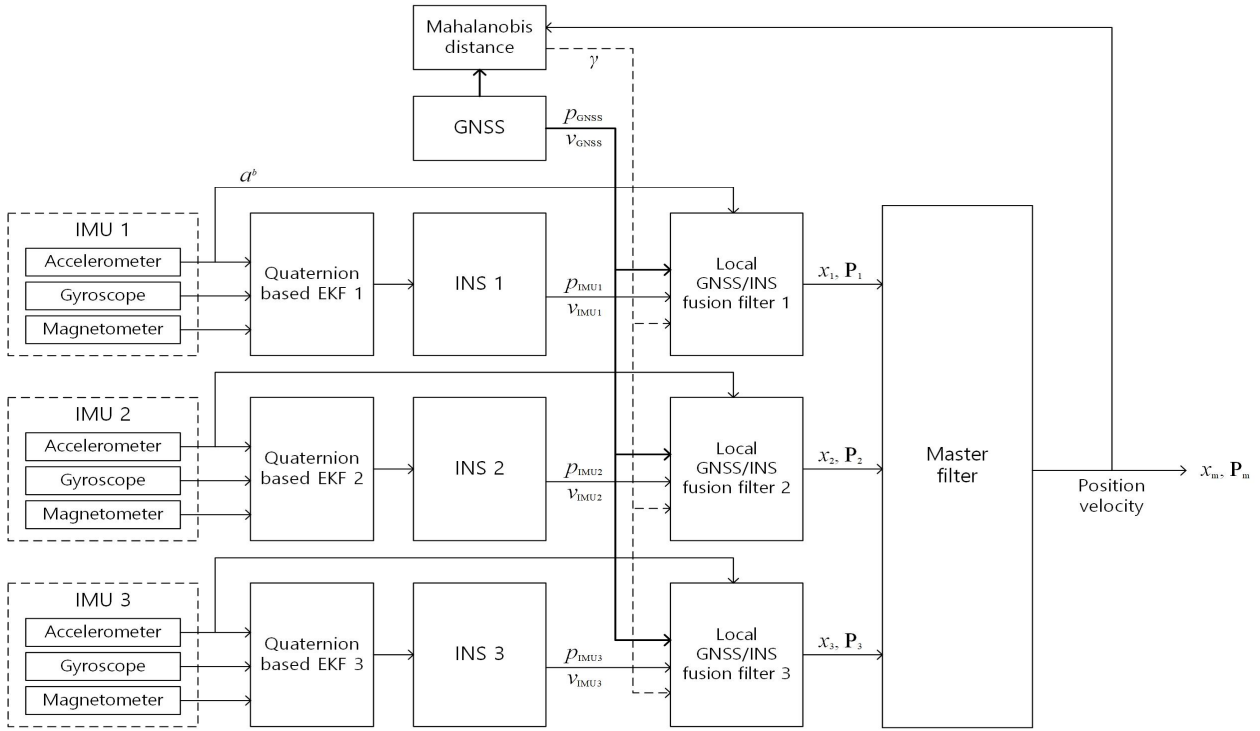


그림 3. GNSS/다중 IMU 센서 융합 알고리즘 개념도

Fig. 3. Schematic diagram of the GNSS/multiple IMUs fusion algorithm

확장 칼만 필터 알고리즘은 표 1과 같이 예측 과정과 보정 과정으로 나뉘며, 여기서  $K$ 는 칼만 이득,  $H$ 는 측정 행렬을 의미한다.

확장 칼만 필터를 통해 추정된 쿼터니언을 식 (18)과 같이 오일러각인 롤, 피치, 요 각 ( $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ )으로 변환하여 회전 변환 행렬  $C_n^b$ 을 계산하면 식 (19)와 같으며, 이를 이용하여 IMU 센서에서 측정된 가속도를 동체 좌표계에서 NED 좌표계 기준으로 변환할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{2(q_0 q_1 + q_2 q_3)}{2(q_0^2 + q_3^2) - 1} \\ \sin^{-1} \frac{2(q_1 q_3 - q_0 q_2)}{2(q_0^2 + q_3^2) - 1} \\ \tan^{-1} \frac{2(q_0 q_3 + q_1 q_2)}{2(q_0^2 + q_3^2) - 1} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$C_n^b = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & \sin\theta \sin\theta \cos\psi - \cos\theta \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi & \sin\theta \sin\theta \sin\psi + \cos\theta \cos\psi \\ -\sin\theta & \cos\theta \sin\phi \\ \cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \\ \cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (19)$$

NED 좌표계로 변환된 가속도  $a^n$ 으로부터 다음과 같이 이동체의 속도  $v_{IMU}$ 와 위치  $p_{IMU}$ 를 계산할 수 있다.

$$v_{IMU, t+1} = v_{IMU, t} + a^n \Delta t, \quad (20)$$

$$p_{IMU, t+1} = p_{IMU, t} \Delta t + \frac{1}{2} a^n \Delta t^2. \quad (21)$$

표 1. 확장 칼만 필터 알고리즘

Table 1. Extended Kalman filter algorithm

| Time update (Prediction)  |
|---|
| $\hat{x}_{k+1} = \Phi_k \hat{x}_k$  |
| $P_{k+1}^- = \Phi_k P_k \Phi_k^T + Q_k$                                   |
| Measurement update (Correction)   |
| $P_{k+1} = H P_{k+1}^- H^T + R_{k+1}$                                     |
| $K_{k+1} = P_{k+1}^- H^T (H P_{k+1}^- H^T + R_{k+1})^{-1}$                |
| $\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1}^- + K_{k+1} (z_{k+1} - H \hat{x}_{k+1}^-)$ |
| $P_{k+1} = P_{k+1}^- - K_{k+1} H P_{k+1}^-$                               |

### 3. GNSS/다중 IMU 센서 융합 알고리즘

IMU 센서에서 측정된 가속도와 INS에서 계산한 속도, 위치는 그림 3과 같이 연합형 융합 구조의 부 필터 입력으로 들어가서 GNSS와 IMU 센서의 융합 알고리즘에 사용된다. 관성 항법 시스템의 동특성을 기반으로 센서에서 측정된 가속도와 속도, 위치에 대한 관계식을 다음과 같이 6차 상태 방정식으로 나타낼 수 있다 [16]. 여기서 상태 변수  $v^n$ ,  $p^n$ 은 NED 좌표계 기준 속도와 위치,  $a^b$ 는 동체 좌표계에서 측정된 가속도,  $g$ 는 중력 가속도 벡터를 의미한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Fx + Gu \\ &= \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^n \\ p^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b^n & -I_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^b \\ g \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (22)$$

상태 방정식을 이산 식으로 나타내면 식 (23)과 같으며,  $\Delta t$  는 샘플링 간격이다.

$$x_{k+1} = Ax_k + G_k u_k \Delta t, \quad A = I + F \Delta t. \quad (23)$$

전 상태 추정 오차 공분산 행렬  $P_{k+1}^-$  와 진행 잡음에 대한 공분산 행렬  $Q_k$  는 다음과 같으며,  $\sigma_a$  와  $\sigma_g$  는 잡음 표준편차이다.

$$\begin{aligned} P_{k+1}^- &= AP_k A^T + G_k Q_k G_k^T \Delta t^2, \\ Q_k &= \text{diag}\{\sigma_a^2, \sigma_a^2, \sigma_a^2, \sigma_g^2, \sigma_g^2, \sigma_g^2\}. \end{aligned} \quad (24)$$

측정 벡터는 식 (26)과 같이 NED 좌표계 기준 속도와 위치를 측정값으로 사용하며, GNSS 신호가 정상적으로 수신되지 않는 상황을 판단하여 INS의 추정값 혹은 GNSS의 측정값으로 전환하여 대입한다.  $H$  는 측정 행렬,  $v_{k+1}$  는 평균이 0인 백색 측정 잡음이다.

$$\begin{aligned} z_{k+1} &= \begin{bmatrix} z_{v,k+1} \\ z_{p,k+1} \end{bmatrix} = Hx_{k+1} + v_{k+1} \\ &= \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} x_{k+1} + v_{k+1}. \end{aligned} \quad (26)$$

GNSS 신호의 상태가 양호할 경우 식 (27)과 같이 GNSS에서 측정한 속도와 위치 데이터를 측정값으로 사용한다. GNSS에서 획득할 수 있는 데이터인 위도 ( $L$ ), 경도 ( $\lambda$ ), 고도 ( $h$ )를 NED 좌표계 기준 위치  $p_{GNSS}^n$  로 변환하면 식 (28)과 같다. 여기서  $R_M$  은 자오선 곡률반경 (radius of curvature in the meridian),  $R_N$  은 횡 곡률반경 (radius of curvature in the prime vertical)이다.

$$\begin{aligned} z_{k+1} &= \begin{bmatrix} v_{GNSS,k+1} \\ p_{GNSS,k+1} \end{bmatrix}, \\ p_{GNSS} &= \begin{bmatrix} L \cdot (R_M + h) \\ \lambda \cdot (R_N + h) \cos L \\ h \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (27)$$

불안정한 GNSS 신호 수신 환경을 판별하기 위해 주 필터에서 세 개의 IMU 센서를 융합한 상태 벡터  $\hat{x}_m$  의 위치 추정값  $\hat{x}_{p,k+1}$  을 이용한다. 각각의 부 필터에서 추정된 상태 벡터와 공분산을 다음과 같이 주 필터에서 융합하여 최적의 전체 추정치  $\hat{x}_m$  을 계산한다. 여기서  $P_m$  과  $P_i$  는 각각 주 필터와  $i$  번째 부 필터의 추정 공분산이다.

$$\begin{aligned} P_{k+1,m}^{-1} &= \sum_{i=1}^n P_{k+1,i}^{-1}, \\ \hat{x}_{k+1,m} &= P_{k+1,m} \left[ \sum_{i=1}^n P_{k+1,i}^{-1} \hat{x}_{k+1,i} \right], \quad n = 3. \end{aligned} \quad (29)$$

$$\hat{x}_{k+1,m} = P_{k+1,m} \left[ \sum_{i=1}^n P_{k+1,i}^{-1} \hat{x}_{k+1,i} \right], \quad n = 3. \quad (30)$$

GNSS의 실제 위치 추정값  $p_{GNSS,k+1}$  과 비교하기 위해 주 필터의 추정 상태 벡터와 추정 공분산에서 위치 상태 벡터와 관련된 부분을 각각 아래와 같이 설정한다.

$$\begin{aligned} P_{p,k+1} &= P_{m,k+1} (4:6, 4:6), \\ \hat{x}_{p,k+1} &= \hat{x}_{m,k+1} (3:6), \quad z_{p,k+1} = p_{GNSS,k+1}. \end{aligned} \quad (31)$$

GNSS 신호 수신 상태를 판별하기 위해 다음과 같이 마할라노비스 거리  $M_{k+1}$  를 구한다 [13].

$$\begin{aligned} \gamma_{k+1} &= M_{k+1}^2 \\ &= (z_{p,k+1} - \widehat{x}_{p,k+1})^T (P_{p,k+1})^{-1} (z_{p,k+1} - \widehat{x}_{p,k+1}). \end{aligned} \quad (32)$$

마할라노비스 거리는 관측치가 평균보다 얼마나 벗어나 있는가를 측정하는 통계량으로, 한계치  $\chi^2$  를 초과하는 경우 이상치로 정의된다.  $M_{k+1}$  의 제곱 값  $\gamma_{k+1}$  가 미리 설정한 한계치보다 클 경우 GNSS 신호가 정상적으로 들어오지 않는다고 판단하여 GNSS의 측정값 대신 식 (33)과 같이 식 (20), (21)에서 계산한 INS의 속도, 위치 추정값을 측정 변수로 사용한다. 한계치는 실험을 통해 시뮬레이션 환경에 맞춰 GNSS의 이상 상태를 판별할 수 있는 적절한 값으로 설정한다.  $\gamma_{k+1}$  가 한계치 이하의 값이 되면 GNSS 음영 지역에서 벗어나 정상 신호가 수신되는 상황으로 판단하고 다시 GNSS 측정값을 적용한다.

$$z_{k+1} = \begin{bmatrix} v_{IMU} \\ p_{IMU} \end{bmatrix}. \quad (33)$$

## IV. 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 Matlab/Simulink를 이용하여 이동체의 경로를 생성하고, Matlab에서 제공하는 9축 IMU 센서 시뮬레이션 모델

표 2. 시뮬레이션 센서 파라미터  
Table 2. Simulation parameters of the sensors

| Sensor        | Parameter                    | Value                                |
|---------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Accelerometer | Resolution                   | 0.00239<br>[(m/s <sup>2</sup> )/LSB] |
|               | Constant bias                | 0.49 [m/s <sup>2</sup> ]             |
| Gyro          | Resolution                   | 0.0011<br>[(rad/s)/LSB]              |
|               | Constant bias                | 0.0545 [rad/s]                       |
| Magnetometer  | Resolution                   | 0.1 [ $\mu T$ /LSB]                  |
|               | Constant bias                | 100 [ $\mu T$ ]                      |
| GNSS          | Horizontal position accuracy | 1.6 [m]                              |
|               | Vertical position accuracy   | 1.6 [m]                              |
|               | Velocity accuracy            | 0.1 [m/s]                            |



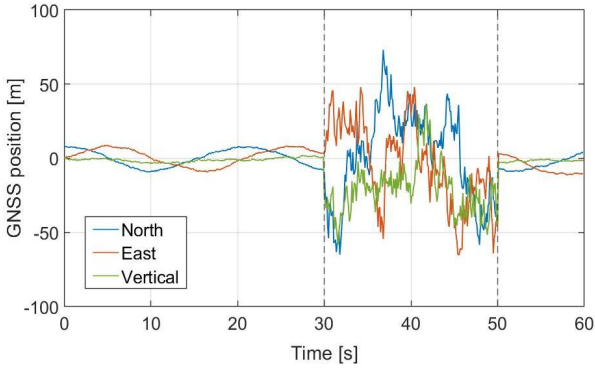


그림 4. 시뮬레이션에 사용된 GNSS 위치 측정값  
Fig. 4. GNSS position data used in the simulation

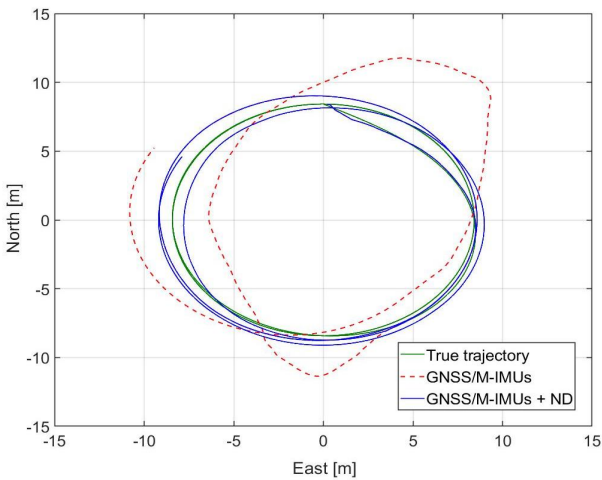


그림 5. 위치 추정 시뮬레이션 결과  
Fig. 5. Simulation result of the position estimation

(imuSensor)과 GNSS의 시뮬레이션 모델 (gpsSensor)을 표 2와 같은 조건으로 설정하여 이동 경로에 따른 센서 측정값을 생성하였다. GNSS 시뮬레이션 모델인 gpsSensor의 출력값은 위도, 경도, 고도 데이터이므로 GNSS/다중 IMU 센서 융합 알고리즘에 적용하기 위해 NED 좌표계 기준 위치값으로 변환하였다. 시뮬레이션은 East = 0m, North = 8.46 m 지점에서 출발하여 60초 동안 2.5m/s<sup>2</sup>의 일정한 속도로 원운동을 하는 상황을 가정하였으며, 그림 4와 같이 30초부터 50초 사이 GNSS에 임의의 백색 잡음을 인가하여 신호 수신에 불안정한 환경을 구성하였다.

잡음이 인가된 GNSS 신호와 다중 IMU를 융합한 시뮬레이션 결과는 그림 5-7과 같다. 그림 5에서 초록색 실선은 이동체가 실제 이동한 경로, 빨간색 점선은 GNSS의 이상 신호에 대처하지 않은 GNSS/다중 IMU 센서 융합 알고리즘의 위치 추정 결과, 파란색 실선은 GNSS의 이상 신호를 검출하여 제한한 방법으로 대처한 위치 추정 결과를 나타낸다. GNSS 이상 신호 검출 기법을 사용하지 않은 빨간색 점선의 경우 비정상적인 신호가 들어오는 30초부터 위치 추정값이 실제 이동 경로에서 크게 벗어나기 시작했으며, 누적

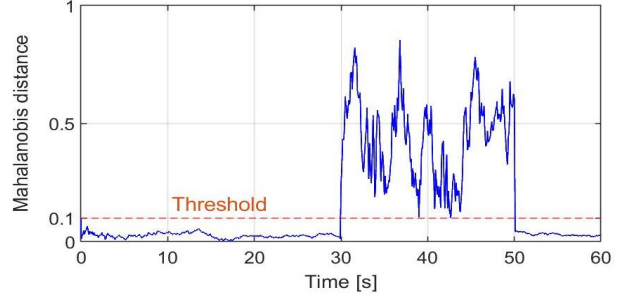
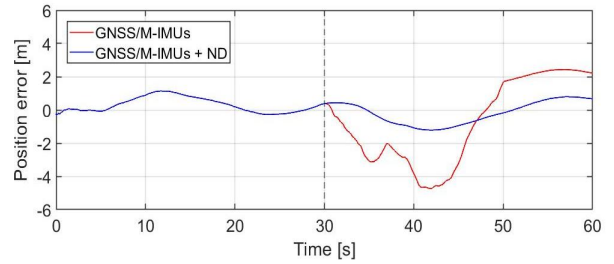
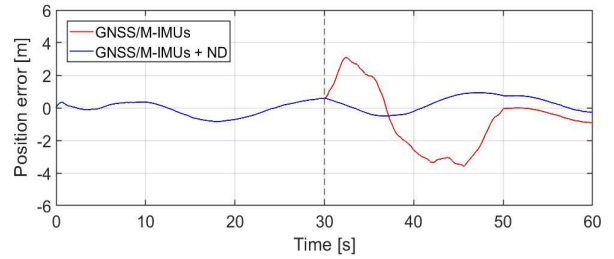


그림 6. 이상 신호 검출을 위한 마할라노비스 거리  
Fig. 6. Mahalanobis distance for the novelty detection



(a) x-axis



(b) y-axis

그림 7. 시뮬레이션의 위치 추정 오차  
Fig. 7. Position estimation error of the simulation

된 오차의 영향으로 GNSS의 정상 신호가 들어오는 50초 후에도 여전히 큰 오차가 있음을 확인할 수 있다. 반면 GNSS의 이상 신호에 대처한 파란색 실선은 신호 수신에 불안정한 구간에서도 정상적인 위치 추정이 이뤄졌음을 확인할 수 있다. GNSS의 이상 신호를 판별하기 위한 마할라노비스 거리의 계산 결과는 그림 6과 같으며, GNSS 신호에 잡음을 인가한 30초에서 50초 사이의 값이 설정한 한계치  $\chi^2 = 0.1$ 보다 큰 것을 확인할 수 있다.

이동체의 실제 이동 경로의 위치와 추정 위치와의 오차는 그림 7과 같다. 빨간색 실선은 GNSS의 이상 신호에 대처하지 않은 경우로, x축과 y축의 위치 모두 30초부터 오차가 급격히 증가하였다. 반면 마할라노비스 거리를 이용하여 이상 신호에 대처한 파란색 실선의 경우 빨간색 실선에 비해 오차가 크게 감소하였으며, GNSS 신호가 다시 정상으로 돌아온 50초 이후에도 빨간색 실선의 누적된 오차보다 더 적은 오차를 보여 GNSS의 이상 신호를 제대로 판별하여 대처함을 보여준다.

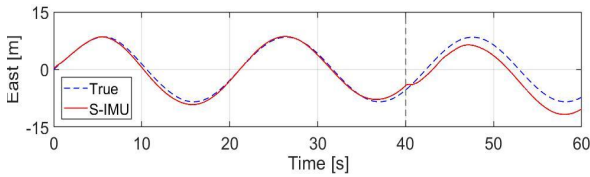
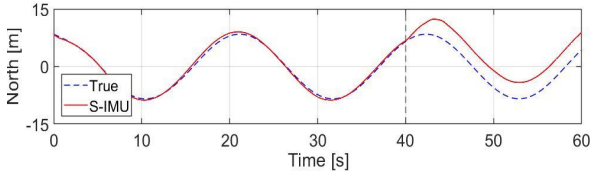
표 3. 평균 제곱근 오차를 이용한 위치 오차 비교  
Table 3. RMSE comparison of the position error

| Scheme               | RMSE     |
|----------------------|----------|
| GNSS                 | 26.4185m |
| GNSS/Multi-IMUs      | 1.6792m  |
| GNSS/Multi-IMUs + ND | 0.5616m  |

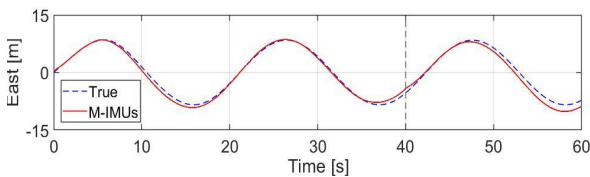
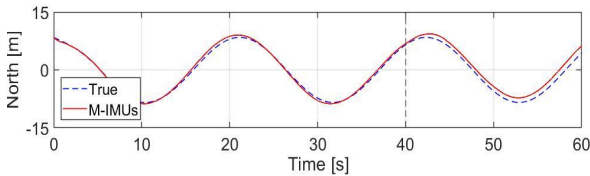
표 4. IMU 센서 고장 시나리오의 평균 제곱근 오차를 이용한 위치 오차 비교

Table 4. RMSE comparison of the position error with the IMU sensor fault scenario

| Scheme               | RMSE    |
|----------------------|---------|
| GNSS/Single IMU      | 2.0398m |
| GNSS/Multi-IMUs + ND | 0.7974m |



(a) GNSS/Single IMU



(b) GNSS/Multiple IMUs

그림 8. IMU 센서 고장 시나리오의 위치 추정 결과

Fig. 8. Position estimation with the IMU sensor fault scenario

시뮬레이션 결과를 보다 정확히 분석하기 위해 표 3과 같이 평균 제곱근 오차 (Root Mean Square Error, RMSE)를 계산하여 위치 오차를 비교하였다. 30초부터 잡음이 인가된 GNSS 위치 측정값의 경우 위치 오차는 26.4185m였으며, 이상 신호 검출 기법을 적용하지 않은 GNSS/다중 IMU 센서 융합 알고리즘의 위치 추정값의 오차는 1.6792m로 나타났다. 제안한 알고리즘의 위치 오차는 0.5616m로 다른 기법에 비해 우수한 성능을 보였다.

두 번째 시뮬레이션은 다중 IMU 센서 연합형 융합 구조의 고장 대처 효용성을 검증하기 위해 하나의 IMU 센서에 40초부터 임의의 잡음을 인가하여 센서 고장 상황을 가정하고, 첫 번째 시뮬레이션과 동일한 시나리오로 진행하였다. 시간에 따른 north, east 방향의 위치 추정값은 그림 8과 같으며, 3번째 IMU에 고장 상황을 가정한 (a)의 경우 40초부터 오차가 크게 발생하였다. 반면 연합형 융합 필터로 결합한 (b)의 경우, 고장이 발생한 3번 IMU 센서가 포함되어 있

음에도 불구하고 (a)의 결과에 비해 높은 정확도를 보였다. 평균 제곱근 오차는 표 4와 같으며 고장이 발생한 IMU 센서를 하나만 사용했을 때는 2.0398m의 오차를 보였지만, 연합형 융합 필터로 세 개의 센서를 융합한 경우 0.7974m로 오차가 감소하여 센서의 고장이나 성능 저하에 강인한 대처를 수행했음을 확인하였다.

## V. 결론

본 논문에서는 GNSS가 제한적이고 불안정한 환경에서 측위 정확도를 향상시키기 위해 GNSS의 이상 신호 구간을 판별하여 GNSS와 다중 IMU 센서를 융합하는 측위 융합 알고리즘을 제안하였으며, 다중 IMU 센서의 일부에 성능 저하가 발생하더라도 강인하게 대처할 수 있도록 연합형 융합 필터 구조를 적용하였다. GNSS 음영 지역을 판별하기 위해 마할라노비스 거리를 이용한 GNSS 이상 검출 기법을 적용하였으며, 이상 신호로 판단될 경우 융합 시스템의 측정 변수로 GNSS 측정값 대신 INS의 속도, 위치 추정값을 사용하였다. 본 연구에서 제안한 알고리즘을 검증하기 위해 GNSS와 IMU 센서 시뮬레이션 모델을 이용하여 특정 경로로 이동하는 상황에 대한 센서 측정값을 생성하였고, GNSS의 일부 구간에 잡음을 인가하여 GNSS 음영 지역을 가정하였다. GNSS 이상 검출 기법의 적용 유무에 대한 성능을 비교했을 때, GNSS에 이상 구간이 발생한 경우 이상 신호 검출 기법을 적용한 시뮬레이션 결과가 상대적으로 더 높은 측위 정확도를 나타내는 것을 확인하였다. 이는 부분적으로 특정 구간에서 GNSS 수신에 취약한 환경을 판별하여 GNSS 대신 단시간에 높은 정밀도를 보이는 INS 항법으로 대처하고, 음영 지역을 빠져나왔을 때 다시 GNSS의 정상 동작을 판별하여 측정값을 사용함으로써 측위 성능이 더 좋아졌음을 의미한다. 또한 다중 IMU 센서에 연합형 융합 필터 구조를 적용하여 일부 IMU 센서에 성능 저하가 발생하더라도 고장에 강인하게 대처함을 검증하였다.

## References

[1] S. Sasani, J. Asgari, A.R. Amiri-Simkooei, "Improving MEMS-IMU/GPS Integrated Systems for Land Vehicle Navigation Applications," *Journal of GPS Solutions*, Vol. 20, pp. 89-100, 2016.

[2] A. D. Abosekeen, A. E. Abdalla, "Fusion of Low-cost

- MEMS IMU/GPS Integrated Navigation System,” Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Engineering, pp. 29-31, 2012.
- [3] M. Wang, G. Feng, H. Yu, Y. Li, Y. Yang, X. Xiao, “A Loosely Coupled MEMS-SINS/GNSS Integrated System for Land Vehicle Navigation in Urban Areas,” IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, pp. 103-108, 2017.
- [4] G. Falco, M. Pini, G. Marucco, “Loose and Tight GNSS/INS Integrations: Comparison of Performance Assessed in Real Urban Scenarios,” Journal of Sensors, Vol. 17, No. 2, pp. 255, 2017.
- [5] L. Lou, X. Xu, J. Cao, Z. Chen, Y. Xu, “Sensor Fusion Based Attitude Estimation Using Low-cost MEMS-IMU for Mobile Robot Navigation,” Proceedings of the 6th IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference, pp. 465 - 468, 2011.
- [6] M. Tanenhaus, D. Carhoun, T. Geis, E. Wan, A. Holland, “Miniature IMU/INS with Optimally Fused Low Drift MEMS Gyro and Accelerometers for Applications in GPS-denied Environments,” IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS), pp. 259-264, 2012.
- [7] I. Skog, J. O. Nilsson, P. Handel, “An Open-source Multi Inertial Measurement Unit (MIMU) Platform,” International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS), pp. 1-4, 2014.
- [8] A. M. Shahri, R. Rasoulzadeh, “Implementation of a Low-cost Multi-IMU by Using Information form of a Steady State Kalman Filter,” AUT Journal of Electrical Engineering, Vol. 49, No. 2, pp. 195-204, 2017.
- [9] J. B. Bancroft, G. Lachapelle, “Data Fusion Algorithms for Multiple Inertial Measurement Units,” Journal of Sensors, Vol. 11, No. 12, pp. 6771-6798, 2011.
- [10] J. Kim, M. Song, J. Kim, D. Lee, “GPS-free Localization Based on Multiple IMUs and Federated Filter Fusion,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 26, No. 9, pp. 708-714, 2020.
- [11] U. N. Patel, I. A. Faruque, “Sensor Fusion to Improve State Estimate Accuracy Using Multiple Inertial Measurement Units,” IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2021.
- [12] A. M. Sabatini, “Quaternion-based Extended Kalman Filter for Determining Orientation by Inertial and Magnetic Sensing,” IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 53, No. 7, July 2006.
- [13] N. Ko, S. Jeong, “Fused Navigation of Unmanned Surface Vehicle and Detection of GPS Abnormality,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 22, No. 9, pp. 723-732, 2016 (in Korean).
- [14] P. Mahalanobis, “On the Generalized Distance in Statistics,” Proceedings of the National Institute of Science, Vol. 2, No. 1, pp. 49-55, 1936.
- [15] J. L. Marins, X. Yun, E. R. Bachmann, R. B. McGhee, M. J. Zyda, “An Extended Kalman Filter for Quaternion-based Orientation Estimation Using MARG Sensors,” International Conference on Intelligent Robots and Systems, Hawaii, USA, pp. 2003-2011, 2001.
- [16] N. Li, L. Guan, Y. Gao, S. Du, M. Wu, X. Guang, X. Cong, “Indoor and Outdoor Low-cost Seamless Integrated Navigation System Based on the Integration of INS/GNSS/LIDAR System,” Journal of Remote Sensing, Vol. 12, No. 19, pp. 1-21, 2020.

### Jiyeon Kim (김지연)



2010 Electrical Engineering and Computer Science from Kyungpook National University (B.S.)

2012 Electrical Engineering and Computer Science from Kyungpook National University (M.S.)

2012~Electronic and Electrical Engineering from Kyungpook National University (Ph.D. Student)

Field of Interests: Navigation systems, Formation control, Sensor fusion

Email: jiykim@knu.ac.kr

### Moogeun Song (송무근)



2008 Electrical Engineering and Computer Science from Kyungpook National University (B.S.)

2010 Electrical Engineering and Computer Science from Kyungpook National University (M.S.)

2010~Electronic and Electrical Engineering from Kyungpook National University (Ph.D. Student)

Field of Interests: Sensor fusion, Dependable embedded systems, Industrial networks

Email: moogeun.song@gmail.com



**Jaehoon Kim (김재훈)**



2011 Electrical Engineering and Computer Science from Kyungpook National University (B.S.)

2013 Electrical Engineering and Computer Science from Kyungpook National University (M.S.)

2021 Electronic and Electrical Engineering from Kyungpook National University (Ph.D.)

2021~Center for ICT and Automotive Convergence from Kyungpook National University (Postdoctoral Research Fellow)

Field of Interests: Non-linear estimation and filtering, Control engineering, Monitoring and diagnostic techniques

Email: jaehoon87kim@gmail.com

**Dongik Lee (이동익)**



1987 Electronics Engineering from Kyungpook National University (B.S.)

1990 Electronics Engineering from Kyungpook National University (M.S.)

2002 Complex Systems Control Engineering from Sheffield University, U.K. (Ph.D.)

2005~Electronic and Electrical Engineering from Kyungpook National University (Prof.)

Career:

1990~1997 Researcher, Agency for Defense Development

2002~2005 Co-founder and CTO, DRTS Ltd, U.K.

Field of Interests: Design of real-time networked control for various safety-critical applications, including autonomous underwater vehicles, wind turbines, and intelligent automobiles

Email: dilee@ee.knu.ac.kr