

# 터널환경을 고려한 IMU/UWB/LiDAR 기반 복합항법 알고리즘 설계 및 성능분석

박 광 수\*, 장 성 현\*, 장 수 현\*, 윤 상 훈°

## Design and Analysis of the Integrated Navigation System Based on INS/UWB/LiDAR Considering Tunnel Environment

Gwangsoo Park\*, Seonghyun Jang\*, Soohyun Jang\*, Sanghun Yoon°

### 요 약

본 논문은 기하적 특징이 단조로운 터널 환경을 고려한 3차원 지도 및 다중센서 융합 기반 복합항법 알고리즘을 제안하였다. UWB(Ultra-wideband) 센서와 3D LiDAR(Light Detection and Ranging)에 대한 측정 모델을 각각 유도하고 이를 EKF(Extended Kalman Filter)를 사용하여 INS(Inertial Navigation System)와 결합하였다. 알고리즘 성능검증을 위해 복합센서 모듈을 구성하고 터널과 유사한 복도환경에서 실험을 수행하였다. UWB와 LiDAR 각각 단일 센서의 위치추정 실험을 통해 두 센서의 융합이 서로 상호보완적임을 확인하였다. 마지막으로 제안된 알고리즘은 서로 다른 센서 조합과 비교하여 성능을 분석하고, 그 결과 제안된 알고리즘이 실제 궤적에 가장 근접한 항법 성능을 보여주었다.

**키워드** : 센서융합, 확장형 칼만필터, 3차원 지도, 초광대역, 라이다

**Key Words** : sensor fusion, extended Kalman filter, 3D map, ultra-wide band, LiDAR

### ABSTRACT

This paper deals with the algorithm of multiple sensor fusion based navigation system considering tunnel environment with 3D point cloud map. The proposed integrated system is designed to performance complementary navigation using tightly coupled UWB sensors and 3D LiDAR. To verify the performance of the proposed algorithm, and experiment is conducted in a corridor environment similar to a tunnel by configuring a sensor module. It is verified that the sensor fusion of the two sensors was complementary to each other through the analysis of the localization of UWB and LiDAR. Finally we compare the performance of proposed algorithm with other sensor fusion. As a result, our method shows the closest performance to the actual trajectory.

※ 이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021-0-01140, 초고속 V2X 통신기반 자율주행 서비스 기술 개발)

※ This work was supported by the ICT R&D of MSIT/IITP [2021-0-01140, Development of ultra high-speed V2X communication-based autonomous driving service technologies].

• First Author : MOAIS, [gspark@moais.co.kr](mailto:gspark@moais.co.kr), 정희원

° Corresponding Author : Korea Electronics Technology Institute, [shyoon11@keti.re.kr](mailto:shyoon11@keti.re.kr), 정희원

\* Korea Electronics Technology Institute, [jang.sh@keti.re.kr](mailto:jang.sh@keti.re.kr); [shjang@keti.re.kr](mailto:shjang@keti.re.kr), 정희원

논문번호 : 202206-116-C-RN, Received June 15, 2022; Revised August 17, 2022; Accepted August 28, 2022

## I. 서 론

무인이동체 수요가 증가함에 따라 실내의 다양한 목적을 위한 자율주행 기술이 연구되고 있다<sup>1,2</sup>. 고층 빌딩이 밀집한 도심이나 터널, 지하 등 실내 환경에서는 일반적으로 널리 쓰이는 위성항법시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System)의 활용이 제한된다. 이러한 GNSS 음영지역에서 이동체 위치를 추정하기 위한 대표적 연구사례로 영상 또는 LiDAR(Light Detection and Ranging) 기반 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 기술<sup>3,4</sup>이 있으며, 이외에도 LTE/5G, WiFi, UWB(Ultra-wideband) 등과 같은 무선신호 기반 측위 연구<sup>5,6</sup>가 이루어지고 있다.

LiDAR는 영상 대비 환경변화에 강인하며 원거리 측정 등 다양한 이점으로 인해 다소 고가의 가격에도 불구하고 자율주행 주요 센서로 활용되고 있다. LiDAR 기반 측위는 센서 측정치와 사전 구축된 지도정보 사이 매칭<sup>7</sup>을 통해 이동체 위치를 추정한다. 하지만, 매칭 특성상 기하적 특징이 부족하고 동일 패턴의 반복인 터널, 배관, 복도와 같은 환경에서는 매우 취약하다. 예를 들어, 긴 직선 터널 내 무인이동체가 이동하며 주변을 스캔한 결과는 어느 위치에 있던 동일하게 보이기 때문에 이동체의 위치추정이 어렵다. 따라서 이를 대체하거나 보완할 센서의 필요성이 존재한다.

UWB는 500MHz 이상의 넓은 주파수 대역폭을 가지는 초광대역 무선통신 기술로 최근 실내 및 무선신호 기반 측위 기술로 각광받고 있다<sup>8</sup>. UWB 기반 측위는 이동체 Tag와 주변 고정된 Anchor 간 송수신을 통해 얻은 거리정보를 바탕으로 RSS(Received Signal Strength), ToA(Time of Arrival), TDoA(Time Differential of Arrival), AoA(Angle of Arrival) 방법 등으로 태그 위치를 추정할 수 있다<sup>9</sup>. 이때, UWB 신호는 고주파 펄스로 인해 Bluetooth, WiFi 등 다른 무선신호보다 더욱 정밀한 거리 측정이 가능하여 수십 cm 이내 측위 성능을 보이며, 넓은 대역폭으로 인해 기존 무선 장비와의 간섭도 덜하다는 장점이 있다. 하지만, UWB 신호 또한 타 신호와 마찬가지로 주변 장애물이나 벽으로 인해 거리 오차가 커진다.

최근에는 서로 다른 특성을 가진 LiDAR와 UWB를 융합한 연구사례<sup>10-12</sup>도 있다. B.

Bostanci(2019)는 UWB와 LiDAR를 사용하여 실내 환경에서 로봇 위치를 추정하고 초기화하는 알고리즘을 제안하였다. UWB 거리 측정치는 최소자승법(Least Squared Method)을 사용하여 위치를 추정하고 LiDAR 매칭을 통해 초기 로봇방향을 탐색하였던 센서측정 잔차의 Mahalanobis norm 합계를 최소화하여 상태를 추정하는 융합 알고리즘을 소개하였다. 주변 환경에 대한 기하분포와 UWB anchor 기하배치를 반영할 수 있는 trade-off 매개변수를 함께 도입하여, 기존 방법보다 성능이 향상됨을 보였다<sup>11</sup>. W. Zhen(2019)는 LiDAR와 UWB 측정치로부터 GPF(Gaussian Particle Filter)를 적용하여 위치와 자세를 구하고 이를 IMU(Inertial Measurement Unit)와 칼만필터로 결합한 알고리즘을 제시하였다<sup>12</sup>.

기존 연구에서는 UWB 거리 측정치로부터 새로운 위치정보를 추정하여 필터에 결합하는 약결합 방식을 사용하였다. 이러한 방법은 주변 장애물과 같은 환경적 요인으로 인해 거리 측정치를 얻지 못하는 경우 위치정보를 구할 수 없는 문제가 존재한다. 또한, [12]와 같이 GPF로 위치를 추정하면 particle 수에 따른 연산량 문제가 발생한다. 덧붙여 연구 대부분이 이동체의 위치 결과만 보여주고 자세는 다루지 않았다. 이러한 배경에 따라 본 연구에서는 LiDAR 매칭이 취약한 터널환경을 고려하여 UWB를 추가 활용한 복합항법을 설계하고 성능분석 하였다. 특히, 기존 연구와 달리 UWB 거리 측정치를 그대로 필터에 결합하는 강결합 구조를 선택하였다. 이러한 방식은 가용한 UWB 거리 측정치 수에 강인해지며, 약결합에 비해 우수한 성능임을 기존 연구<sup>15,16</sup>에서 증명되었다.

더 나아가 실험으로 UWB와 LiDAR 개별 측위 특성을 분석함으로써 서로 다른 특징을 가진 두 센서의 융합 유효성을 확인하였다. 또한, 본 연구에서는 위치와 자세 추정 결과를 함께 제시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 UWB와 LiDAR 측정 모델을 소개하고 이를 결합한 복합항법 알고리즘을 소개한다. 3장에서 실험환경을 소개하고 알고리즘 검증 및 성능분석 후 4장에서 결론을 맺고 마친다.

## II. IMU/UWB/LiDAR 기반 복합항법

기하적 특징이 제한적이며 반복되는 복도, 터널

과 같은 환경에서 이동체 위치를 추정하고자 서로 다른 특성을 가진 IMU, UWB, LiDAR 센서를 융합한 측위 알고리즘을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 알고리즘 구조는 그림 1과 같다.

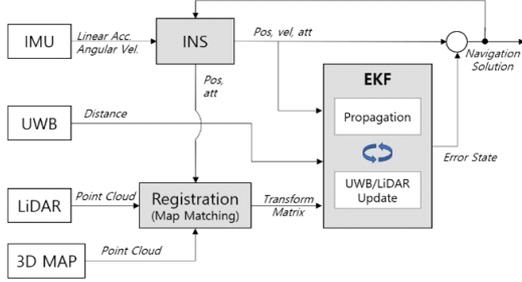


그림 1. 알고리즘 블록도  
Fig. 1. Algorithm block diagram.

### 2.1 UWB 측정 모델

Tag와 anchor로 구성된 UWB는 TWR(To Way Ranging) 방법으로 서로 데이터를 주고받으며 송수신 시간(ToF, Time of Flight)을 측정하여 두 모듈 사이 거리를 구한다. 이러한 UWB 기하관계를 그림 2에 도시하였다.

$$d_{(i)} = d_{true} + \epsilon = \| p_{(i)}^{anchor} - p^{tag} \| + \epsilon \quad (1)$$

$p_{(i)}^{anchor}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )는  $i$ 번째 anchor 위치,  $p^{tag}$ 는 tag 위치이다. Tag는 이동체에 탑재되므로 이는 곧 이동체 위치와 같다.  $d_{(i)}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )는 tag와  $i$ 번째 anchor 사이 측정거리로 정의하였다. 식 (1)의 측정거리는 실제 거리에 다양한 오차가 포함되어 있으며, 오차  $\epsilon$ 항의 모델링 정도가 위치 정확도에 영향을 미친다. 실내 환경에서는 주변 장애물로 인한 신호반사 및 다중경로오차가 큰 영향을 미친다. 본 연구의 주요 환경인 터널에서는 벽면 관통에 의한 신호 감쇠에 대한 영향은 고려되지 않는다. 앞선 식 (1)을 테일러 급수로 전개하여 선형화하면 식 (2)로 정리된다. Tag와 anchor 사이 측정치와 추정거리 차이는 tag의 위치오차  $\delta p^{tag}$ 와 관계있다. 식 (3)은 Tag에서 바라본  $i$ 번째 anchor로의 단위 시선벡터(LoS, Line of Sight)를 의미하며,  $-s_{(i)}$ 는 tag에서 anchor 방향으로의 시선벡터를 나타낸다.

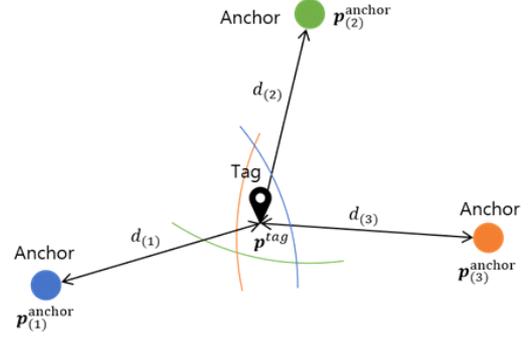


그림 2. UWB 측위 개념  
Fig. 2. Concept of UWB Positioning.

$$d_{(i)} - \hat{d}_{(i)} = -s_{(i)} \cdot \delta p^{tag} + \epsilon_{\delta d} \quad (2)$$

$$s_{(i)} = \frac{p_{(i)}^{anchor} - p^{tag}}{\| p_{(i)}^{anchor} - p^{tag} \|} \quad (3)$$

기존 연구 방식은 tag 주변 고정된 anchor 사이 3개 이상의 거리정보가 존재하면 최소자승법을 통해 tag 위치를 추정할 수 있다. 하지만 본 논문에서는 tag 위치를 별도 추정하지 않고 식 (2)의 거리오차를 그대로 칼만필터에 적용하는 강결합방식으로 알고리즘을 구성하였다. 본 방식은 다른 센서와 결합하여 UWB 측정거리가 3개 미만인 상황에서도 위치추정이 가능하다. 앞선 식 (2)는 UWB anchor 1개에 대한 측정 모델로, n개에 대한 측정 모델을 정리하면 아래와 같다. Tag와 anchor 사이 가용한 측정 거리 수에 따라 행렬의 크기는 가변적이다. 동일한 UWB 센서로 측정된 거리정보는 식 (5)와 같이 측정 잡음도 동일하다고 가정한다.

$$\begin{bmatrix} d_{(1)} - \hat{d}_{(1)} \\ \vdots \\ d_{(i)} - \hat{d}_{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_{(1)} \\ \vdots \\ -s_{(i)} \end{bmatrix} \delta p^{tag} + \begin{bmatrix} \epsilon_{(1)}^{UWB} \\ \vdots \\ \epsilon_{(i)}^{UWB} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\epsilon_{(1)}^{UWB} = \epsilon_{(2)}^{UWB} = \dots = \epsilon_{(i)}^{UWB} = \epsilon_{UWB} \quad (5)$$

### 2.2 LiDAR 측정 모델

LiDAR는 주변 환경을 스캔하여 점군 데이터를 제공한다. 측정된 점군 데이터는 사전 구축된 점군 지도와 매칭(정합)을 통해 이동체 pose(위치, 자세)를 추정한다. 그림 3은 정합 알고리즘에 대한 개념

으로 두 점군  $pc_A, pc_B$  거리가 최소가 되는 변환 행렬을 찾는 데 목적이 있다. 이러한 방법은 MCL(Monte Carlo Localization)과 같은 확률론적 알고리즘과 달리 pose 추정 결과에 대한 불확실성이 감소 될 수 있으며 pose 추정성능이 높다.

본 논문에서는 대표적인 정합 알고리즘 중 하나인 ICP(Iterative Closest Point)<sup>[13]</sup>를 활용하였다. ICP는 반복을 통해 두 점군 사이 거리를 최소화하며 아래와 같이 6단계로 수행된다.

- Step 1-point selection) 알고리즘 연산량 감소를 위해 잡음 제거를 위한 필터링 또는 다운 샘플링을 통해 정합에 사용하고자 하는 점의 수를 줄인다.
- Step 2-neighborhood selection) 각 점의 주변에 분포하는 가까운 점 일부를 선택한다.
- Step 3-point pair matching) Step 2에서 선택한 주변 점들로 곡면이나 평면 등 기하요소를 만들고, 이를 활용하여 각각의 점군  $pc_A$  에 대응되는 점군  $pc_B$ 의 점을 찾는다.
- Step 4-outlier rejection) 두 점군  $pc_A, pc_B$  대응되는 점들만 정합에 이용하고 나머지 점들은 제외한다.
- Step 5-error minimization) 점군  $pc_A$ 가  $pc_B$ 로 이동하는 동안 각 대응점의 거리오차가 최소화 되도록 한다.
- Step 6-transformation) 점군  $pc_A$ 가  $pc_B$ 로 이동하기 위한 변화량을 구한다. 만약 두 점군 사이 거리 오차가 임계치(tolerance) 이내로 수렴하지 못한 경우 Step 3로 되돌아가 반복한다.

정리하면, 정합 알고리즘은 식 (6)과 같이 두 점군 사이 오차가 최소가 되는 회전과 이동에 관한 정보를 담고 있는 변환 매개변수  $M$ 을 찾는 것이

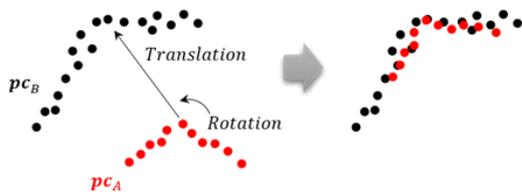


그림 3. 점군 정합 알고리즘 개념  
Fig. 3. Registration algorithm of point cloud.

다. 이때, 두 점군의 대응관계가 정합 성능에 중요한 요소로 대응 오류로 인해 잘못된 정합이 일어날 수 있다.

$$M = \operatorname{argmin} \| pc_B - (R_{rot} pc_A + t_{trl}) \| \quad (6)$$

$$T(M, p^n) = R_{rot} p^n + t_{trl} \quad (7)$$

$$T(M, \psi^n) = R_{rot} \psi^n = (\phi_N \phi_E \phi_D) \psi^n \quad (8)$$

변환 매개변수  $M = [R_{rot} \ t_{trl}]$ 은 LiDAR 측정치가 점군 지도에 정합되기 위한 회전행렬  $R_{rot}$ 과 이동벡터  $t_{trl}$ 로 구성되어 있다. 따라서 현재 위치  $p^n$ 와 자세정보  $\psi^n$ 로부터  $M$ 만큼 보정된 새로운 상태  $T(M, \bullet)$ 를 추정할 수 있다. 식 (7)과 (8)은 이러한 정합 전후에 대한 변환관계를 보여준다. 위첨자  $n$ 은 n-frame에서의 좌표계를 의미하고,  $\phi_N, \phi_E, \phi_D$ 는 회전행렬을 n-frame에서의 각 축별 회전각으로 표현한 것이다.

LiDAR에 대한 측정 모델은 앞서 구한 변환 매개변수  $M$ 을 활용하여 식 (9)와 같이 정리할 수 있다.  $\epsilon_{LiDAR}$ 는 LiDAR 센서에 대한 측정잡음이다.

$$\begin{bmatrix} T(M, p^n) - p^n \\ T(M, \psi^n) - \psi^n \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} \delta p^n \\ \delta \psi^n \end{bmatrix} + \epsilon_{LiDAR} \quad (9)$$

### 2.3 EKF 기반 INS 결합

앞서 설명한 UWB와 LiDAR에 대한 측정 모델은 일반적인 확장형 칼만필터(EKF, Extended Kalman Filter)를 사용하여 INS와 결합하였다. 먼저 필터의 상태변수를 식 (10)과 같이 15차로 구성하고, 상태변수의 오차를 추정하는 간접(Indirect) 시스템 모델로 설계하였다.

$$\delta x = [\delta p^n \ \delta v^n \ \delta \psi^n \ \delta b_a \ \delta b_g]_{15 \times 1}^T \quad (10)$$

$$\delta \dot{x} = F \delta x + G w \quad (11)$$

$p^n, v^n, \psi^n$ 는 각각 3축에 대한 위치, 속도, 자세이며,  $b_a, b_g$ 는 IMU 센서의 3축 가속도와 각속도 바이어스 항이다. 문자열 앞에 위치한  $n$ 은 참값과

추정값 사이 오차를 나타낸다.  $F$ 는 시스템 행렬 (system matrix),  $G$ 는 잡음 변환행렬(noise coupling matrix),  $w = [w_{acc} \ w_{gyro}]^T$ 는 IMU 센서에 대한 잡음으로 백색잡음(white gaussian noise)으로 가정한다.

식 (4)로부터 INS 결합을 위한 UWB에 대한 측정오차, 관측행렬, 측정잡음은 아래와 같다.

$$\delta z_{UWB} = \begin{bmatrix} d_{(1)} - \hat{d}_{(1)} \\ \vdots \\ d_{(i)} - \hat{d}_{(i)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$H_{UWB} = \begin{bmatrix} -s_{(1)} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -s_{(i)} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$R_{UWB} = E\{\epsilon_{UWB} \epsilon_{UWB}^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_{(1)}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_{(i)}^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (9)에서 유도한 LiDAR에 대한 측정오차, 관측행렬, 측정잡음은 아래와 같다. LiDAR 측정치와 점군지도 사이 정합이 n-frame에서 이루어졌기 때문에 변환 매개변수로부터 구한 3축 회전각  $\phi_N, \phi_E, \phi_D$ 은 그대로 측정오차  $\delta z_{LiDAR}$ 의 자세오차로 적용될 수 있다.

$$\delta z_{LiDAR} = \begin{bmatrix} T(M, p^n) - p^n \\ [\phi_N \ \phi_E \ \phi_D]^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$H_{LiDAR} = \begin{bmatrix} I_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & I_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$R_{LiDAR} = E\{\epsilon_{LiDAR} \epsilon_{LiDAR}^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_{pos}^2 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \sigma_{att}^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

최종적으로 EKF 수식을 표 1에 정리하였다. 각 센서별 측정치 갱신주기에 맞추어 칼만필터 측정치 업데이트가 이루어진다.

표 1. EKF 기반 복합항법 알고리즘  
Table 1. Integrated Navigation algorithm based EKF.

<i>Propagation</i>	
$P_k^- = A P_{k-1} A^T + B Q B^T$	
$(A = I + F dt, B = G dt)$	
$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, u)$	
<i>UWB Update</i>	
$K_k = P_k^- H^T (H_{UWB} P_k^- H_{UWB}^T + R_{UWB})^{-1}$	
$P_k = P_k^- - K_k H_{UWB} P_k^-$	
$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \delta z_{UWB}$	
<i>LiDAR Update</i>	
$K_k = P_k^- H^T (H_{LiDAR} P_k^- H_{LiDAR}^T + R_{LiDAR})^{-1}$	
$P_k = P_k^- - K_k H_{LiDAR} P_k^-$	
$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \delta z_{LiDAR}$	

### III. 실험

#### 3.1 실험 구성

제안된 알고리즘 검증을 위해 그림 4와 같이 실험장비를 구성하였다. 먼저 IMU는 u-blox ZED-F9R 센서에 내장된 3축 가속도계와 3축 각속도계를 100Hz 출력주기로 사용하였다. UWB는 Decawave DWM1001- Dev 센서, LiDAR는 Decawave DWM1001- Dev 센서, LiDAR는 Velodyne VLP-16 16채널 3D LiDAR로 구성하고 UWB 5Hz, LiDAR 10Hz 출력주기로 설정하였다. 또한, UWB anchor는 동일 높이에서 일정 간격으로 고정된 위치에 6개 설치했으나 UWB tag에서는 거리정보가 최대 4개까지 동시에 수신 가능하다. 모든 센서 데이터는 임베디드 컴퓨터인 NVIDIA Jetson AGX 기반으로 수집 및 처리하였다.

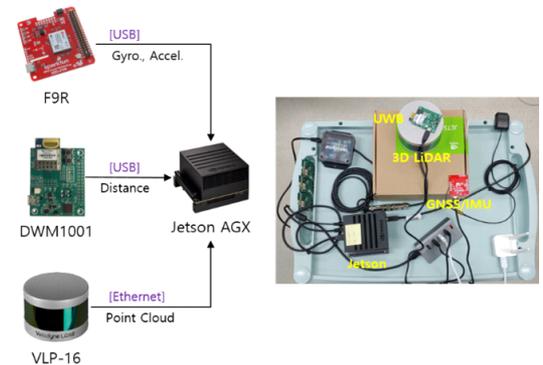


그림 4. 실험장비 구성  
Fig. 4. Test devices configuration.

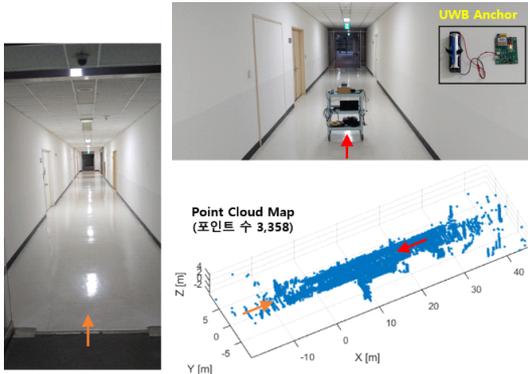


그림 5. 실험환경과 점군 지도  
Fig. 5. Test environment and point cloud map.

실험은 터널과 유사한 특징을 가진 실내 복도 환경에서 이동형 카트로 수행하였다. 실험환경에 대한 점군 지도는 오픈소스 기반 LiDAR SLAM 알고리즘 중 하나인 LeGO-LOAM<sup>[4]</sup>을 활용하여 사진 제작하였다. 그림 5는 실험환경과 여기서 제작한 3차원 점군 지도를 보여준다. 덧붙여 본 환경에서 수집한 센서 데이터와 SLAM 데이터는 ROS bag 파일로 git<sup>[4]</sup>에 업로드되어있다. 본 논문의 실험 결과는 참고문헌 [14] 데이터를 기반으로 한다.

### 3.2 UWB, LiDAR 항법 특성 분석

알고리즘 검증에 앞서 UWB와 LiDAR 개별 센서에 대한 위치추정 특성을 분석하였다. 두 실험 모두 9분간 정지상태에서 수행하였다.

그림 6은 UWB anchor 배치에 따른 UWB 단독 측위 결과로, Case #1은 UWB anchor를 좌우 7.875m 간격으로 교차하며 2m 높이에 부착한 경우이고, Case #2는 2m 높이, 좌우 2개씩 15.75m 간격으로 배치한 경우로 구분하였다. UWB anchor는 빨강 '\*' 표시, 실제 카트가 위치한 지점은 분홍 'x' 표시하였다. UWB 단독 위치추정은 2.1장에서 언급한 3개 이상의 거리정보를 활용하여 최소자승법으로 구하고 그 결과는 녹색 실선으로 나타내었다.

Case #1, #2 모두 위치추정 결과가 실제 카트위치에서 벗어나 있는데, 이는 벽면에 고정된 UWB anchor 설치오차로 볼 수 있다. Case #2에서 수신된 UWB 데이터를 보면 각 anchor별 거리값은 잡음 정도의 차이를 보여야한다. 하지만 표 2에 정리된 것과 같이 anchor별 수신된 거리의 평균은 다소 차이를 보인다. 이러한 점을 고려하더라도 UWB는 폭

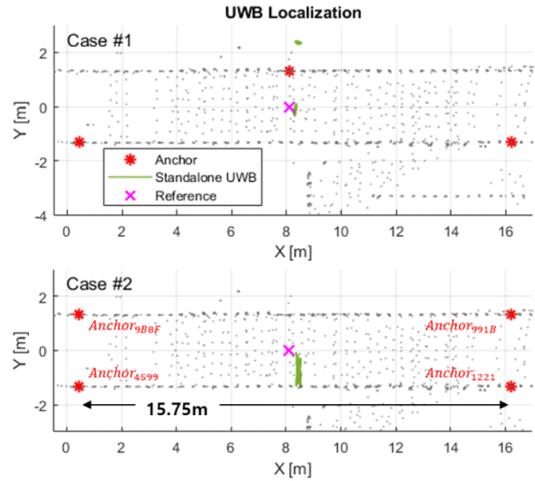


그림 6. Anchor 배치에 따른 UWB 단독 측위  
Fig. 6. Standalone UWB Positioning according arrangement of anchors.

표 2. Case #2에 대한 UWB 평균 거리  
Table 2. UWB ranging measurement about case #2.

Anchor9B8F	Anchor991B	Anchor4599	Anchor1221
8.3776m	8.0227m	8.0568m	7.8808m

이 좁은 직선 복도환경에서 진행방향(X)에 수직인 방향(Y)으로 위치해가 분포하는 것을 확인할 수 있다. 만약 UWB anchor 배치가 정사각형태에 가까워질수록 위치추정 특성이 향상되지만, 그만큼 요구되는 anchor가 늘어날 것이다.

다음으로 그림 7은 LiDAR만 사용하여 위치를 추정된 odometry 결과로 보라색 실선으로 표시하였다. LiDAR odometry는 2.2장에서 설명한 ICP 알고리즘을 사용하였다. UWB와 달리 LiDAR는 점군 측정치가 존재하지 않는 복도 진행방향(X)으로 위치오차가 커지는 반면 좌우 벽면에 대한 점군이 풍

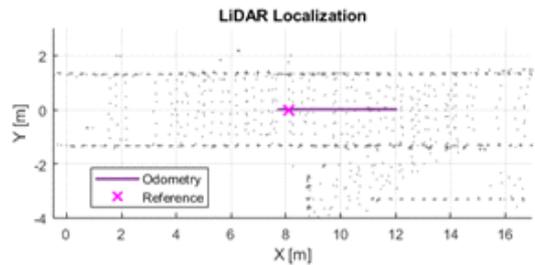


그림 7. LiDAR 단독 측위  
Fig. 7. LiDAR Odometry.

부한 복도 수직방향(Y)으로는 위치추정 성능이 우수하다.

그림 6, 7의 결과를 정리하면 다음과 같다. UWB는 폭이 좁고 긴 복도환경에서 anchor 배치로 인해 복도 벽면방향으로 위치추정 오차가 증가하고, LiDAR는 복도 진행방향으로 위치추정 오차가 증가한다. 따라서 위치추정 특성이 서로 상반되는 두 센서를 함께 사용함으로써 서로 상호보완됨을 기대할 수 있다.

### 3.3 복합항법 실험 결과

그림 6의 Case #1과 동일하게 UWB anchor를 배치하고 복도 바닥에 표시된 Line을 따라 이동형 카트를 수동으로 움직이며 실험하였다. 모션캡처와 같은 3차원 측정장비가 없어 시간에 따른 오차는 알 수 없기 때문에 동일 실험의 센서별 알고리즘과 성능을 비교하였다.

그림 8은 복도를 따라 이동한 실험결과를 보여준다. UWB anchor는 빨강 '\*' 표시, 제안된 알고리즘은 파란 실선, 비교군으로 INS/UWB 결합 알고리즘은 'x' 마커 녹색 실선, 실제 이동경로(Ground Truth)는 검은 점선으로 표시하였다. '◇' 마커 보라 실선으로 표시된 INS/LiDAR 결합 결과는 위치해가 수렴하지 못하여 그림 8에서 제외하였다. INS/UWB는 벽면 방향으로 궤적이 출렁이며, 제안된 알고리즘이 Ground Truth에 가장 근접한 성능을 보여주었다. 이러한 결과는 축별 위치추정 결과를 도시한 그림 9에서도 확인 가능하다. Y축 변화없이 직선이동을 했기 때문에 그림 9의 Y축 결과를 1축에 대한 위치오차로 볼 수 있어, 이 축에 대한 RMSE(Root Means Square Error)를 표 3에 정리하였다. 제안된 알고리즘은 Y축 방향으로 0.1483m 오차 수준으로 INS/UWB, INS/LiDAR 대비 우수한 성능을 보인다

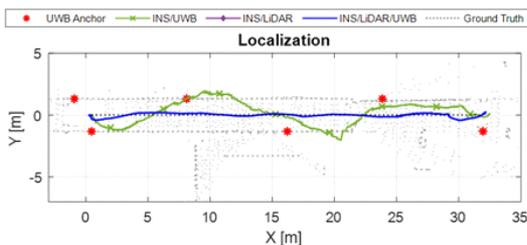


그림 8. 2D 평면에서의 위치추정 결과 비교  
Fig. 8. A comparison of estimated position according to sensor fusion.

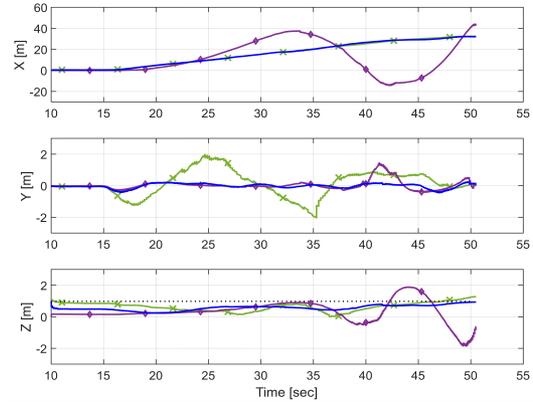


그림 9. 위치추정 결과  
Fig. 9. Estimated position by sensor fusion.

표 3. Y축 위치해 RMSE  
Table 3. Position error for y-axis.

INS/UWB	INS/LiDAR	INS/LiDAR/UWB(Proposed)
0.8236m	0.3024m	0.1483m

다. 또한, 그림 9에서 UWB와 LiDAR의 서로 상반된 위치추정 특성이 나타난다. INS/LiDAR는 복도 진행방향인 X축으로 다른 알고리즘 대비 위치값이 크게 변화하고 있으며, 복도 진행방향에 수직한 Y축 방향으로는 INS/UWB 결합 결과에 대한 위치오차가 가장 크다. 이러한 결과를 비교했을 때, 서로 다른 두 센서 특성이 제안된 알고리즘에서 유효하게 상호보완됨을 알 수 있다.

다음으로 그림 10은 그림 8 실험에서의 자세변화를 보여준다. 본 실험은 이동형 카트로 어떠한 자세

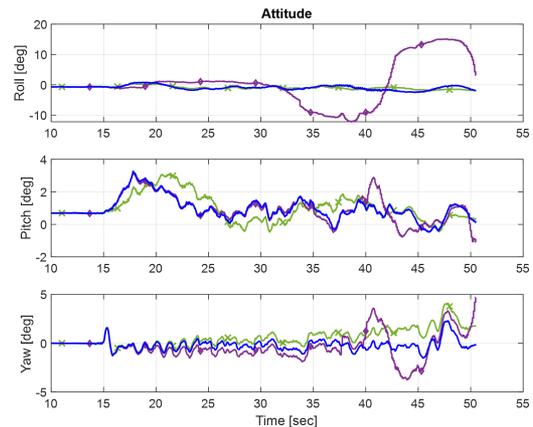


그림 10. 자세추정 결과  
Fig. 10. Estimated attitude by sensor fusion.

변화 없이 고정된 Heading으로 직선기동을 했기 때문에 초기 자세에 가까울수록 Ground Truth에 근접하다고 볼 수 있다. 제안된 알고리즘이 큰 자세변화 없이 2.5도 이내 유지하고 있으며, 이는 Manual 이동으로 발생한 오차로 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문은 기하적 특징이 제한적이고 반복되는 터널에서의 주행을 고려하여 무인이동체 다중센서 (INS/LiDAR/UWB) 기반 복합항법 알고리즘을 제안하였다. UWB는 UWB anchor와의 거리정보를 그대로 필터에 사용하고, LiDAR는 사전 구축된 점군 지도와의 매칭을 통해 새로운 위치와 자세를 구하였다. 이렇게 구한 각 센서별 결과는 EKF를 사용하여 INS와 결합하였다. 제안된 알고리즘은 복도환경에서 실험을 통해 유효성을 검증하고 기존 센서 조합별 비교를 통해 성능 분석하였다. UWB anchor 배치별 단독측위 결과와 LiDAR Odometry 결과를 통해 두 센서의 위치추정 특성이 서로 수직함을 확인하였고, 이러한 두 센서를 함께 사용하여 서로 상호보완 하였다. 그 결과 복도 실험에서 제안된 알고리즘이 실제 궤적이 가장 근접한 성능을 보여주었다.

현재는 주변환경에 대한 기하적 특징이나 UWB anchor 배치형태 등을 반영하지 않고 있지만, 추후 이러한 특성을 알고리즘에 추가 반영한다면 성능향상이 가능할 것으로 기대한다. 덧붙여 UWB anchor 위치를 실측하여 점군 지도와 맞추었지만, 향후 시스템 실 구현 및 운용을 위해 anchor 위치도 추정할 필요성이 존재한다.

#### References

- [1] S. Lee, Y. J. Kwon, S. U. Lee, J. H. Kim, and J. W. Park, "Position tracking of pipe-climbing robot for pipe structure inspection," *J. Inst. Contr., Robotics and Syst.*, vol. 27, no. 6, pp. 428-434, 2021. (<https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2021.21.0035>)
- [2] C. S. Lee, J. Lim, S. Jung, D. M. Seol, and S. Lee, "Implementation of indoor positioning systems in NLOS environment for emergency rescue," *J. KICS*, vol. 46, no. 7, pp. 1199-1207, 2021. (<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.7.1199>)
- [3] B. Huang, J. Zhao, and J. Liu, "A survey of simultaneous localization and mapping," arXiv preprint arXiv:1909.05214, 2019. (<https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.05214>)
- [4] T. Shan and B. Englot, "Lego-loam: Lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain," *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Syst.*, pp. 4758-4765, Oct. 2018. (<https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594299>)
- [5] Z. Li and Y. Zhang, "Constrained ESKF for UAV positioning in indoor corridor environment based on IMU and WiFi," *Sensors*, vol. 22, no. 1, p. 391, 2022. (<https://doi.org/10.3390/s22010391>)
- [6] D. Feng, C. Wang, C. He, Y. Zhuang, and X. G. Xia, "Kalman-filter-based integration of IMU and UWB for high-accuracy indoor positioning and navigation," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 7, no. 4, pp. 3133-3146, 2020. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2965115>)
- [7] M. Elhousni and X. Huang, "A survey on 3D lidar localization for autonomous vehicles," *IEEE Intell. Veh. Symp.*, pp. 1879-1884, Oct. 2020. (<https://doi.org/10.1109/IV47402.2020.9304812>)
- [8] R. J. Fontana, "Recent system applications of short-pulse ultra-wideband (UWB) technology," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 9, pp. 2087-2104, 2004. (<https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.834186>)
- [9] A. Alarifi, A. Al-Salman, M. Alsaleh, A. Alnafessah, S. Al-Hadhrami, M. A. Al-Ammar, and H. S. Al-Khalifa, "Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances," *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 707, 2016. (<https://doi.org/10.3390/s16050707>)
- [10] B. Bostanci, S. Tekkok, E. Soyunmez, P. Oguz-Ekim, and F. Yeganli, "The lidar and uwb based source localization and initialization algorithms for autonomous

robotic systems,” *11th ELECO*, pp. 900-904, Nov. 2019.

(<https://doi.org/10.23919/ELECO47770.2019.8990648>)

- [11] H. Zhou, Z. Yao, and M. Lu, “Lidar/UWB fusion based SLAM with anti-degeneration capability,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 1, pp. 820-830, 2020.  
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3045767>)
- [12] W. Zhen and S. Scherer, “Estimating the localizability in tunnel-like environments using lidar and uwb,” *Int. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 4903-4908, May 2019.  
(<https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794167>)
- [13] J. P. Besl and N. D. McKay, “A method for registration of 3-D shapes,” *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.*, vol. 14, no. 2, pp. 239-256, 1992.  
(<https://doi.org/10.1109/34.121791>)
- [14] <https://github.com/AutomotiveNegotiation1/-K-Localization-data>
- [15] J. D. Hol, F. Dijkstra, H. Luinge, and T. B. Schon, “Tightly coupled UWB/IMU pose estimation,” in *2009 IEEE Int. Conf. Ultra-wideband*, pp. 688-692, Sep. 2009.  
(<https://doi.org/10.1109/ICUWB.2009.5288724>)
- [16] H. Yang, Y. Kuang, M. Wang, X. Bao, and Y. Yang, “Indoor mobile localization based on a tightly coupled UWB/INS integration,” In *2020 16th Int. Conf. Contr., Automat., Robotics and Vision*, pp. 1354-1359, Dec. 2020.  
(<https://doi.org/10.1109/ICARCV50220.2020.9305307>)

**박 광 수 (Gwangsoo Park)**



2021년 8월 : 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 공학박사  
2021년 10월~2022년 3월 : 한국전자기술연구원 모빌리티플랫폼연구센터 연구원  
2022년 4월~현재 : (주)모아이스 데이터플랫폼팀 연구원

<관심분야> 무인이동체, 센서융합, 복합항법  
[ORCID:0000-0002-3897-7082]

**장 성 현 (Seonghyun Jang)**



2006년 2월 : 한양대학교 미디어통신공학과 졸업

2013년 2월 : 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석박사 통합 졸업

2013년 3월~2021년 9월 : 삼성전자 시스템반도체사업부 모뎀개발팀 책임 연구원

2021년 10월~현재 : 한국전자기술연구원 모빌리티플랫폼연구센터 책임 연구원

<관심분야> 무선통신, 위치인식

[ORCID:0000-0002-9451-4605]

**장 수 현 (Soohyun Jang)**



2009년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과 졸업

2011년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 석사

2015년 8월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 박사

2015년 8월~현재 : 한국전자기술연구원 모빌리티플랫폼연구센터 책임 연구원

<관심분야> 통신 모뎀SoC, 항공통신, ITS 시스템

[ORCID:0000-0003-2852-0318]

**윤 상 훈 (Sanghun Yoon)**



1996년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업

1998년 2월 : 한양대학교 전자공학과 석사

2012년 2월 : 한양대학교 전자공학과 박사

현재 : 한국전자기술연구원 책임 연구원

<관심분야> 차량간통신, 측위기술 등 전자 및 통신 공학

[ORCID:0000-0003-2080-8608]