

# 무인항공기의 실내비행을 위한 2.5차원 자기위치추정기반 항법연구 및 비행실험

## A 2.5D SLAM-aided Navigation Research for Indoor Flight of UAVs and Flight Tests

조성욱<sup>1\*</sup>, 정연득<sup>2</sup>, 심현철<sup>1</sup>

카이스트 항공우주공학과<sup>1</sup>, 한국항공우주연구원 비행제어연구팀<sup>2</sup>

### 초 록

무인항공기의 실외비행은 GPS 와 관성항법센서를 융합한 항법필터를 이용한다. 이는 관성항법센서의 오차누적현상을 GPS 를 이용하여 보정하므로 오차누적 없이 일정 수준의 오차범위를 유지해준다. 본 논문에서는 무인항공기의 실내비행을 위해 2 차원 LiDAR 로부터 수평 방향의 상대거리 정보를 획득하고 1 차원 LiDAR 로부터 수직방향의 상대거리 정보를 획득하는 방식으로 2.5 차원 자기위치추정 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)기반 항법필터를 개발하였다. 또한 비행실험을 통해 알고리즘 동작확인 및 성능검증을 수행하였다. SLAM 방식은 Robot Operating System (ROS)에 공개된 2 차원 LiDAR 를 이용한 스캔매칭 기반의 Hector SLAM 을 활용하였고 이를 고도방향으로 확장하여 2.5 차원 지도작성 (mapping)이 가능하도록 코드를 추가하였다. 또한 기존에 보유한 GPS 기반 항법필터의 오차보정 시 필요한 GPS 위치정보를 2.5 차원 SLAM 에서 제공하는 수평, 수직방향 위치로 교체하여 보다 정밀한 실내비행이 가능하도록 하였다. 개발한 소프트웨어는 무인항공기에 탑재된 소형 임베디드 시스템을 통해 구현하였고 실내 정지비행, 경로점 비행실험을 통해 비행성능을 검증하였다.

### ABSTRACT

The indoor flight of UAVs uses a GPS-aided navigation filter that combines a GPS and an inertial measurement sensor. This technology can maintain the constant error boundary without the accumulation of the error because it corrects the inertial measurements by using GPS information. In this paper, we propose a 2.5D simultaneous localization and mapping(SLAM)-aided navigation filter by using 2D light detection and ranging (LiDAR, relative horizontal distance) and 1D LiDAR (relative vertical distance). Also, it is verified and validated by performing flight tests. SLAM algorithm is adopted the Hector SLAM: it is the open package of robot operating system (ROS) that is used the 2D LiDAR scan matching. Also, we added the feature that can mapping in the direction of the altitude. Furthermore, we developed the SLAM-aided navigation filter by replacing the GPS measurement to 2.5D SLAM consisting of the three-dimensional position and heading. All software is implemented by onboard embedded computer and verified by flight tests.

**Key Words:** Simultaneous Localization and Mapping (자기위치추정), SLAM-aided Navigation(자기위치추정기반 항법), Robot Operating System(ROS), Indoor Flight(실내비행)

## 1. 서 론

무인항공기의 실외비행은 GPS 와 관성항법센서를 융합한 GPS-aided inertial navigation system(INS)을 이용하여 관성항법센서의 오차누적현상을 없애고 일정수준의 오차범위를 갖는 추정된 비행상태 변수를 사용한다.

최근에는 GPS 신호수신 환경이 열악한 지역 혹은 실내환경 하의 한 항법기술을 기반으로 하는 자동비행 임무가 크게 증가함에 따라 실내 환경에

서 주변을 고려한 항법기술이 요구되고 있다. 이는 무인항공기에 정밀한 상대거리 측정센서를 이용하여 사전 지도작성을 통한 위치결정(MAP-based localization) 또는 SLAM 알고리즘으로 해결할 수 있다. 본 논문에서는 무인항공기의 실내비행을 위해 기 보유 및 활용 중인 GPS-aided INS 에서 측정변수로 활용하는 GPS 위치정보를 SLAM 에서 제공하는 위치정보로 변경한 SLAM-aided INS 를 구축하고 이를 이용한 실내 비행실험결과에 대해 기술하였다. 이 때, SLAM 기법은 최근 비약적으로 발전한 소형 임베디드 컴퓨터에 ROS 개

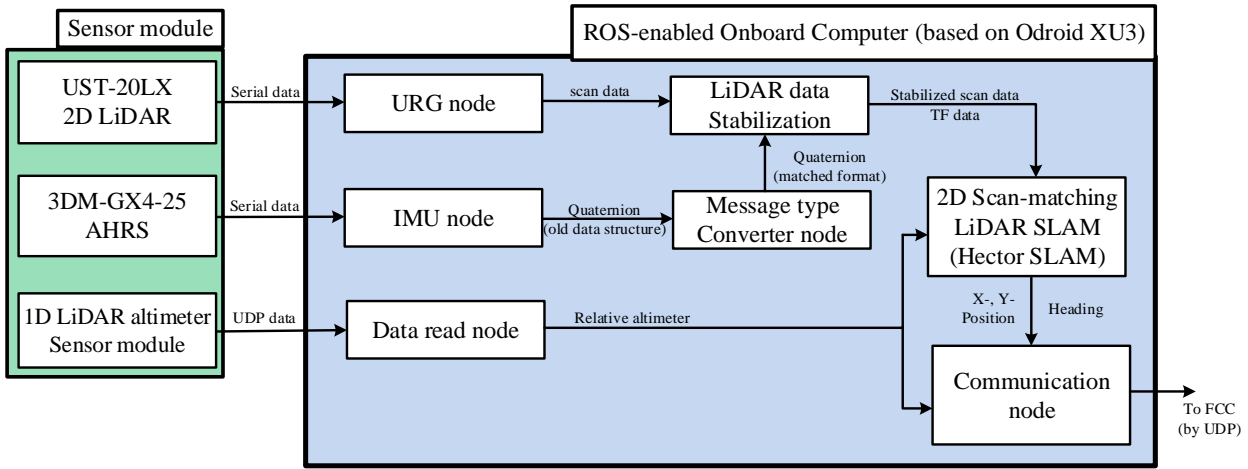


Fig. 1. System architecture of the ROS-enabled onboard computer based on Odroid XU3

발환경을 구축하여 오픈 소스로 사용 가능한 2 차원 LiDAR 기반 SLAM 기법(Hector SLAM)을 적용하였고 이것을 별도의 1 차원 LiDAR 를 통해 측정 한 상대고도를 활용하여 수직방향으로의 지도작성(mapping)이 가능하도록 확장시켜 활용하였다. 또한 획득한 3 차원 위치정보는 기존의 비행제어컴퓨터로 송신하여 기존의 GPS 속도에 맞게 측정값을 갱신하던 부분을 SLAM 항법해를 수신하는 속도에 맞게 측정값을 갱신하도록 함으로써 기존에 보유한 항법필터 구조를 그대로 활용하되 갱신속도를 증가시키는 효과를 가져오도록 하였다.

이것은 기존의 2 차원 스캔매칭(scan-matching)의 경우 수평위치와 방향각 정보만 산출가능하기 때문에 비행상태변수를 모두 제공하지 않는 단점을 보완할 수 있으며 5~10Hz 로 동작하는 GPS 의 역할을 약 20Hz 정도로 동작하는 SLAM 알고리즘으로 대체하여 상대적으로 빠른 보정효과를 가지므로 항법필터의 추정 성능을 높일 수 있다. 또한 GPS 수신성능이 악화되는 상황을 스스로 판단하여 SLAM 항법해로 변환하는 방식의 항법기술로 활용할 수 있고 비행환경 변화 시 자력계(magneto-meter) 없이도 방향각 발산을 억제할 수 있으므로 매우 유용하다.

본 논문의 본론에서는 ROS 기반 2.5 차원 SLAM 알고리즘과 이를 이용한 전체 시스템의 구조에 대해 기술하였다. 또한, 이를 이용한 비행실험 결과 및 그 성능에 대해 기술하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. ROS 기반 2.5 차원 SLAM 알고리즘

ROS 는 무인시스템 개발을 위한 센서 드라이버 및 동기화 기능, 저수준 기기제어, 다수 기기간의 메시지 통신 등을 제공하는 오픈소스 로봇 미들웨어(middleware)이다. 특히, 각각의 알고리즘을 노드(node)로 정의하고 P2P 네트워크 통신을 이용하여 각 노드들의 정보를 손쉽게 공유할 수 있을 뿐만 아니라 영상/LiDAR 센서, 비행제어컴퓨터, 고도센서모듈 등 타 기기와의 통신을 손쉽게 구현할 수 있으므로 무인시스템 개발을 용이하게 한다[1-2].

본 논문에서는 하드커널 사의 Odroid XU-3 를 이용하여 ROS 개발환경을 구축하였고 ROS 에서 제공하는 여러 기능들 중에 Hokuyo 사의 UST-20LX LiDAR 센서와 Micro-strain 사의 3DM-GX4-25 관성센서를 사용하기 위한 드라이버들과 2 차원 스캔매칭 기반 SLAM 알고리즘인 Hector SLAM 알고리즘을 사용하였다[1-2]. 이 때, Hector SLAM 에 필요한 스캔데이터의 자세안정화 및 포인트 클라우드 데이터로 만들기 위한 부분과 해당 데이터의 고도방향 변화를 추가하기 위하여 부분적인 코드 수정을 수행하였다. 또한 SLAM 알고리즘의 결과인 수평방향 위치 및 방향각 정보와 고도방향 상대거리 측정을 위한 1 차원 LiDAR 센서모듈의 정보를 취합한 다음 ROS 에서 제공하는 시간정보와 통합하여 비행제어컴퓨터로 전송해주는 별도의 노드를 구축하여 활용하였다. Odroid XU-3 에서 수행하는 전체 알고리즘의 실행 순서는 Fig. 1 과 같다.

### 2.2. SLAM-aided INS 항법 알고리즘

일반적으로 관성항법센서를 활용한 항법시스템은 센서에서 계산된 지역위치(geographic location)

에 대해 섭동(perturbation)방법을 적용하여 구한 Psi 오차모델을 활용한다[4]. 본 논문에서 활용하는 관성항법시스템은 위에서 언급한 모델을 시스템 모델과 측정값 모델에 활용하고 있다. 하지만, 관성항법시스템은 운용시간에 따라 오차모델을 적분하는 과정에서 오차누적현상이 필연적으로 발생하게 되므로 실외환경에서는 이 현상을 일정 수준으로 억제하기 위해 GPS 위치정보를 측정값 모델에 적용한다. 이를 수식으로 표현하면 (1)과 같다.

$$\mathbf{z}_k^{GPS} = \hat{\mathbf{r}}_{INS}^n - \mathbf{r}_{GPS}^n \quad (1)$$

이를 기반으로, 본 논문에서는 실내비행 시에도 관성항법을 활용하기 위해 이전 절에서 언급한 ROS 기반 2.5 차원 SLAM 알고리즘을 활용하여 실내비행 중 수평 절대위치와 수직 상대위치를 약 20[Hz]로 획득하였고 이 정보를 UDP 통신을 통해 비행제어컴퓨터로 전송하여 GPS 위치정보를 대체하였다. 이를 수식으로 표현하면 (2)와 같다.

$$\mathbf{z}_k^{SLAM} = \hat{\mathbf{r}}_{INS}^n - \mathbf{r}_{SLAM}^n \quad (2)$$

결과적으로, 본 논문에서는 Fig. 2 와 같은 확장 칼만필터(extended Kalman filter)기반 항법 알고리즘 구조를 그대로 활용하기 위해 측정값 모델 (2) 와 같이 변경하였고 비행실험을 통해 시스템 모델의 잡음 공분산  $\mathbf{Q}_k$  와 측정값 모델의 잡음 공분산  $\mathbf{R}_k$  을 조절하여 실내비행 시 관성항법기반의 항법해를 산출할 수 있도록 하였다.

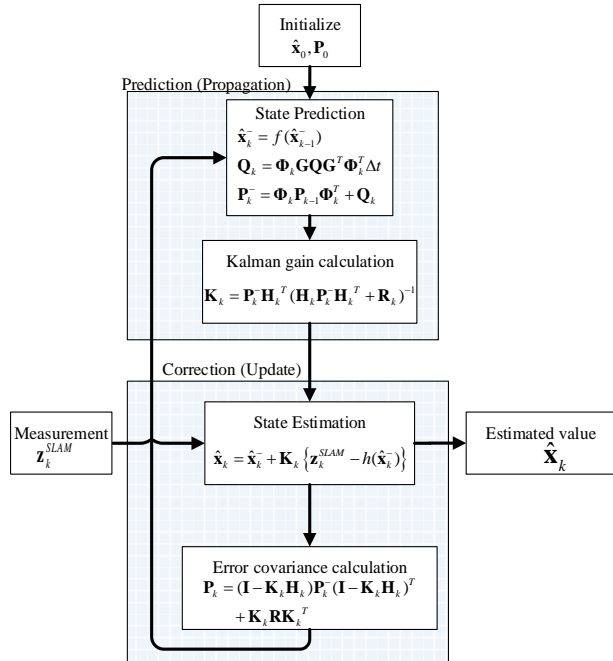
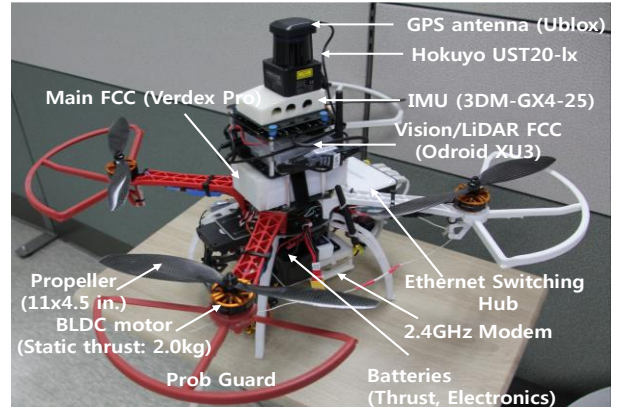


Fig. 2. Flow chart of the SLAM-aided inertial navigation algorithm



Size	Diameter: 0.6 [m], Height: 0.5 [m]
Weight	Empty weight: 2.5 [kg] (with batt. and FCC system) Takeoff Gross Weight: 4.0 [kg] (with payload)
Powerplant Duration	DYS D4215-21 650KV (2.0 [kg] per 1 ea) Max. 10 [min] (Batt. - 6500mAh, 22.2V, 40C)
Flight Control System	Gumstix Verdex pro XL6P COM (600MHz, 128Mb) PWM generation board, Altitude Sensor (1D LIDAR) Ublox LEA-6H Small Custom board Odroid XU3-based ROS enabled SLAM-aided Navigation Microstrain 3DM-GX3-25, GPS-aided Navigation 2.4GHz Wi-Fi Access Point Network
Onboard Computer	Odroid XU3 (ROS-enabled,) (Samsung Exynos5422 Cortex™-A15 2.0Ghz quad core and Cortex™-A7 quad core CPUs)
Autonomy	Attitude, Altitude, Heading, Speed hold/command Waypoint/Path following/Hovering Automatic Takeoff/Landing

Fig. 3. System specification of the UAV for indoor flight

### 2.3. 실내비행을 위한 비행제어시스템 구성

본 논문에서 활용하는 무인항공기는 Fig. 3 과 같은 상세사양을 갖는다. 즉, 기존에 실외비행이 가능한 소형 무인항공기에 실내비행을 위한 센서 모듈 및 소형 임베디드 컴퓨터를 추가로 탑재하였고 탑재용량을 늘리기 위해 모터/변속기/프로펠러 조합을 변경하였다. 또한 기존의 실외비행을 위한 항법필터를 그대로 활용하되 측정값과 측정값에 대한 공분산 행렬을 실외 혹은 실내에 따라 변경하여 사용하므로 본 논문에서 제시한 소형 무인항공기는 사용자의 필요에 따라 실외/실내비행 변경이 가능하다는 특징을 갖는다. 또한 지상으로의 데이터 송수신을 통한 실내비행 방식이 아닌 탑재형(onboard) 방식이므로 약 20[Hz]로 동작하는 SLAM 알고리즘의 실행속도 및 비행제어컴퓨터로 데이터 전송속도를 고려했을 때 상대적으로 통신 지연 및 데이터 손실률이 현저하게 적은 장점이 있다. 본 논문에서 제시한 전체 비행제어시스템의 신호흐름도는 Fig. 4 와 같다.

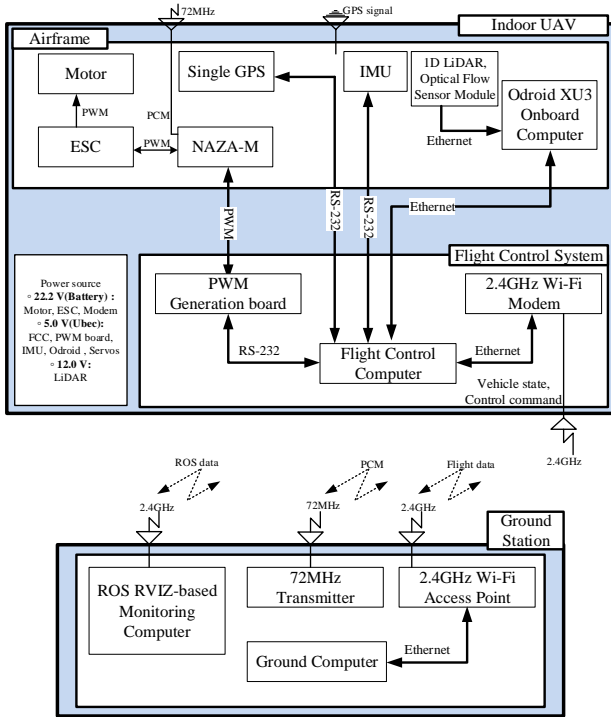


Fig. 4. Integrated system architecture for indoor UAV

#### 2.4. 실내비행을 위한 비행제어기 설계

GPS 를 활용한 실내비행은 GPS 의 오차수준에 따라 위치정확도가 결정되므로 single GPS 사용 시 위치오차는 약 2~4[m] 정도이다. 하지만 실내비행의 경우 충돌위험이 높은 좁은 공간, 벽 혹은 구조물에 의해 비행공간이 협소하므로 최소 1[m]이하의 위치오차를 요구한다.

본 논문에서는 이를 위해 사용자가 설정한 경로점을 목표 위치로 지정하고 현재 무인항공기의 위치 사이의 오차를 최소화하는 위치기반 제어를 구성하였다. 이 때, 무인항공기의 기체축 속도성분은 위치이동 시 댐핑요소로 활용하였고 오일러 방식의 각속도 성분은 자세변화의 댐핑요소로 활용하였다. 즉, 보다 정밀한 위치제어를 위하여 기체축 속도성분의 빠른 안정화가 필요하였고 이것은 기체 하방에 부착한 광류센서를 통해 기체축 속도를 측정하여 해결하였다. 광류센서기반의 기체축 속도값은 항법필터에서 추정된 속도값에 비해 반응속도가 빠르기 때문에 정밀한 실내비행에 이용시 큰 이점이 있다. 본 논문에서 제시한 전체 제어 알고리즘의 수식은 (3)-(5)와 같다.

$$\mathbf{P}_e = \mathbf{P}_r - \mathbf{P}_c \quad (3)$$

$$\mathbf{V}_{b_e} = -\mathbf{V}_{b_r} \quad (\mathbf{V}_{b_c} = 0) \quad (4)$$

$$\delta = \mathbf{K}_p \mathbf{P}_e + \mathbf{K}_d \mathbf{V}_{b_e} - \mathbf{k}_\omega \omega \quad (5)$$

#### 2.5. 실내비행실험 및 결과분석

비행실험은 가로 6[m], 세로 7[m], 높이 2.7[m]의 공간에서 수행하였고 3 개의 경로점을 순차적으로 통과하여 다시 출발지점으로 돌아오는 임무를 수행하였다. 이 때, 실시간 지도작성 및 이동경로는 별도의 ROS 기반 지상국을 통해 모니터링하도록 하였다. 비행실험결과 획득한 상태변수들의 변화 그래프는 Fig. 5 와 같다. 비행실험 수행 결과 위치오차 반경 0.5[m] 내에서 호버링 및 위치이동이 가능한 것을 확인할 수 있다. 또한 비행 중에 작성된 지도는 고도축 방향이 포함된 Fig. 6. (b)와 2 차원 평면정보만 포함한 Fig. 6. (c)으로 획득할 수 있다. 이 때, Fig. 6. (a)의 적색 원이 1 번 경로점, 녹색 원이 2 번 경로점, 청색 원은 3 번 경로점이며 경로점 반경은 0.5[m] 이다. 결과적으로 실내비행 중 적절한 수평비행 성능을 확보한 것으로 판단할 수 있다.

#### 3. 결론

본 논문에서는 무인항공기의 실내비행을 위해 기 보유 및 활용 중인 GPS-aided INS 에서 측정변수로 활용하는 GPS 위치정보를 SLAM 에서 제공하는 위치정보로 변경한 SLAM-aided INS 를 구축하고 이를 이용한 실내 비행실험결과 및 정성적인 분석결과를 제시하였다. 즉, 무인시스템 개발 시 활용 가능한 ROS 개발환경과 공개된 2 차원 스캔매칭 기반 SLAM 알고리즘을 고도방향으로 활용할 수 있도록 수정 및 보완하여 소형 임베디드 시스템에 구현하였고 이를 자체적으로 탑재한 소형 무인항공기 비행제어시스템을 구축하여 실내비행이 가능함을 검증하였다.

2 차원 스캔매칭 기반 SLAM 알고리즘은 사전에 작성된 지도를 기반으로 3 차원 자기위치추정 방식을 활용하여 비행하는 방법에 비해 수평위치와 방향각 정보를 상대적으로 빨리 획득할 수 있고 지도가 없는 환경에서도 비행이 가능하다[3].

결과적으로 오픈소스 기술을 상황에 맞게 수정 및 보완하여 저비용, 고효율의 정밀한 실내비행이 가능함을 증명하였으며 기본적인 실내 항법기술을 확보함에 따라 이를 기반으로 다양한 실내 비행실험 및 임무수행이 가능함을 증명하였다.

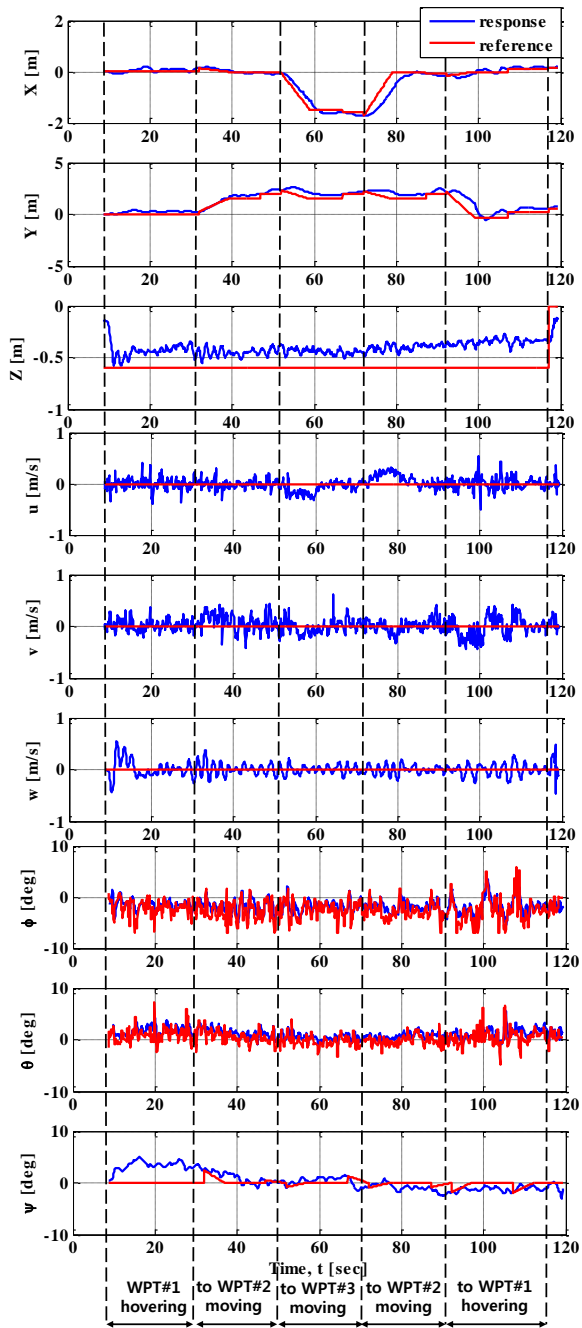
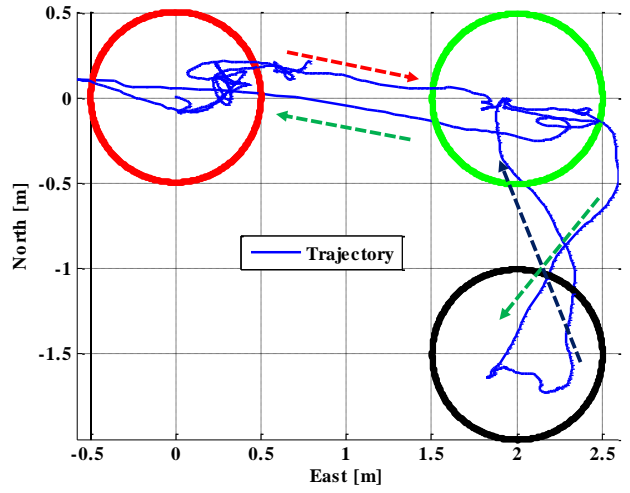


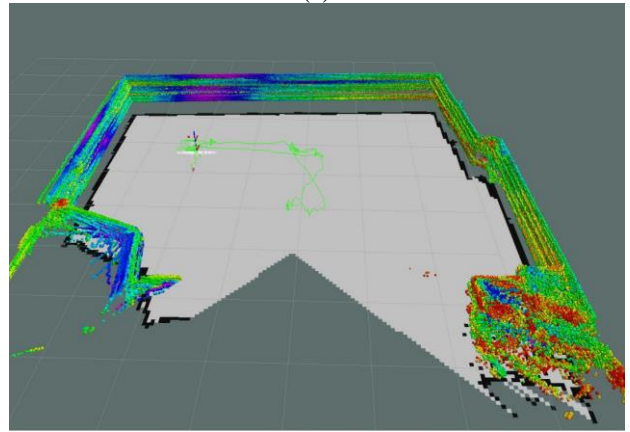
Fig. 5. Flight test results of the indoor UAV

### 후 기

본 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(과제번호: NRF-2012M1A3A3A02033464) 이며 지원에 감사드립니다.



(a)



(b)

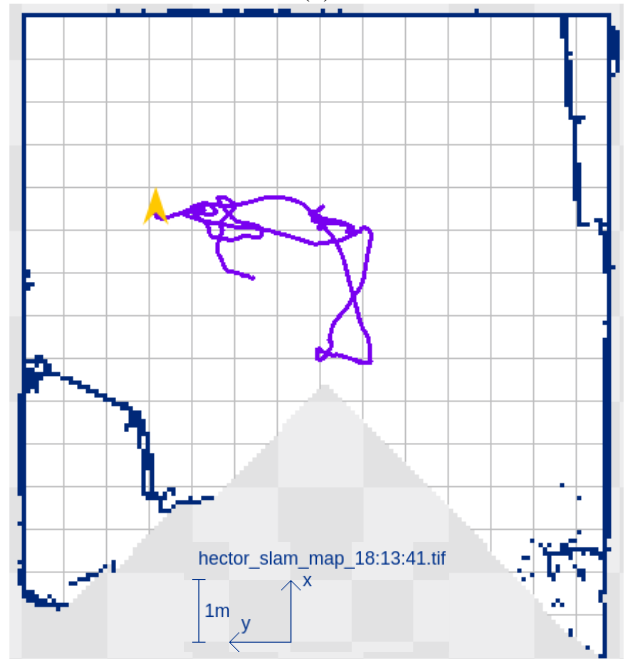


Fig. 6. (a) Two-dimensional trajectory, (b) 2.5D mapping result, (c) 2D mapping result with the trajectory

## 참고문헌

- (1) Gäbel, M., T. Krüger, and U. Bestmann. "Design of a Quadrotor System for an Autonomous Indoor Exploration." IMAV 2014: International Micro Air Vehicle Conference and Competition 2014, 12<sup>th</sup>, Aug., Netherlands
- (2) Stefan Kohlbrecher, Johannes Meyer, Thorsten Graber, Karen Petersen, Uwe Klingauf, Oskar von Stryk, "Hector Open Source Modules for Autonomous Mapping and Navigation with Rescue Robots", the series Lecture Notes in Computer Science (RoboCup 2013: Robot World Cup XVII), Vol. 8371, pp. 624-631, 2014
- (3) S. Huh, S. Cho, D. H. Shim, "3-D Indoor Navigation and Autonomous Flight of a Micro Aerial Vehicle using a Low-cost LIDAR", Journal of Korea Robotics Society Vol. 9, No. 3., pp. 154-159, Sep., 2014
- (4) Itzhack Y. Bar-Itzhackm, Berman N., "Control theoretic approach to inertial navigation systems", Journal of Guidance and Control, Vol. 11, No. 3, pp. 237-245, May, 1988