

# 빔 형성을 위한 군집 소형무인이동체 정지비행 성능 시뮬레이션

김선교, 장재원, 조성진, 나선필, 박철순, 김창성\*, 임상훈\*

국방과학연구소, \*한화시스템(주)

seonkyo.kim@gmail.com

## Simulation of hovering accuracy of swarm small unmanned vehicles for beamforming

Seon-Kyo Kim, JaeWon Chang, SungJin Jo, Sun-Phil Nah, Cheol-Sun Park, ChangSeong Kim\*, SangHun Im\*

Agency for Defense Development, \*Hanwha System

### 요 약

배열 안테나의 각 소자 역할을 하는 소형무인이동체는 빔포밍 시 위치가 고정되어 있어야 안정적으로 빔포밍을 할 수 있어서 군집 소형무인이동체의 정지비행 성능은 중요하다. 만약 소형무인이동체의 위치가 변하면 개별 소형 무인이동체에서 신호가 도달하는 거리 차이가 발생해 위상 정합이 어긋나고 이로 인해 메인 로브 빔 왜곡, 사이드로브 레벨(SLL) 증가, 합성 이득 감소 등의 빔포밍 및 간섭 제거 성능 저하로 이어질 수 있다. 본 논문에서는 PX4 SITL(Simulation-In-The-Loop) 환경에서 Holybro X500 Quadrotor 비행체를 이용해 군집 소형무인이동체의 정지비행 성능을 시뮬레이션하였다. 그 결과, 관성측정장치(IMU)의 성능 향상으로 인해 수직 방향의 정지비행 정확도에서 오차가 80% 이상 감소하는 것을 확인하였다.

### I. 서 론

멀티콥터(Multicopter) 기반 빔포밍은 산악 지형으로 인한 차폐 지역과 적지 중심지역에 대한 접근이 쉽고, 빔포밍 합성 이득으로 인한 탐지 거리를 대폭 늘릴 수 있어 목표 신호원의 방향을 탐지하고 수집 가능한 장점이 있다.

무인항공기(UAV) 기반 배열 안테나의 성능은 UAV의 위치에 크게 영향을 받으며 바람과 같은 외부 환경이나 부정확한 위치와 같은 실외 환경에서의 간섭에 취약하다. 이러한 간섭으로 인해 UAV가 공중 배치 후 초기 위치에서 벗어날 수 있으며 이 경우 배열 안테나의 성능이 저하될 수 있다. 특히, UAV의 소자 위치 에러는 합성 빔의 방향성을 감소시키고 사이드로브 레벨(SLL) 증가를 유발할 수 있다[1].

관성측정장치(Inertial Measurement Unit)는 무인항공기(UAV)에 장착되어 자이로스코프는 자세각, 자세 각속도, 가속도계는 가속도를 측정하여 무인항공기의 자세(Attitude)를 안정시킨다.

본 논문에서는 PX4 SITL(Simulation-In-The-Loop) 환경에서 고급 물리 엔진이 적용된 Gazebo 시뮬레이터와 연동하여 Holybro X500 Quadrotor 비행체로 군집 소형무인이동체의 정지비행(Hovering) 성능을 시뮬레이션하였다.

### II. 본론

PX4 SITL(Simulation-In-The-Loop)[2]은 시뮬레이션 환경에서 비행 제어 소프트웨어인 PX4 펌웨어를 시험 및 개발하기 위한 도구로서 픽스호크(Pixhawk)와 같은 하드웨어 없이 비행 제어 알고리즘, 정지비행 성능 등을 사전에 검증할 수 있는 개발 환경이다. 게다가 Gazebo, jMAVSIM, AirSim, FlightGear 등의 서드 파티 시뮬레이터를 지원하며 QGroundControl(GCS) 등의 지상 통제 소프트웨어와 연동해 MAVLink(마블링크)로 통신이 가능하다. 그림 1, 2는 시뮬레이션 환경인

PX4 SITL에서 Gazebo 시뮬레이터와 QGroundControl(QGC)이 연동된 화면으로 Holybro X500 Quadrotor 비행체 6대가 군집 정지비행 성능 시뮬레이션에 사용되었다.

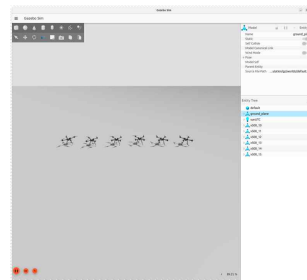


그림 1. Gazebo

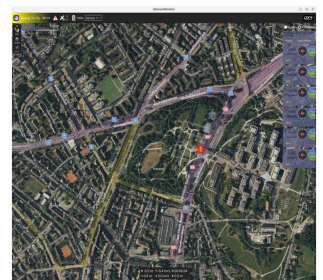


그림 2. QGroundControl

Gazebo[3]에서 제공되는 Holybro X500 Quadrotor 비행체의 관성측정장치(IMU)는 TDK IIM-42653 센서가 플러그인되어 있고 현재 판매되고 있는 PX4 Development Kit - X500v2[4]에는 TDK ICM-45686이 장착되어 있다.

TDK IIM-42653과 ICM-45686은 TDK InvenSense에서 제조한 고성능 6축 동작 추적 센서로서 크기는  $2.5 \times 3 \times 0.91\text{mm}$ 와  $2.5 \times 3 \times 0.81\text{mm}$ 로 비슷하고 비행 제어기(Flight Controller), 드론, 휴대용 게임기 등의 고정밀 응용에 활용될 수 있다. 아래 그림 3, 4는 두 센서의 외형이고, 표1에서 두 센서의 주요 사양을 비교하였다. 두 센서 모두 3축 자이로스코프와 3축 가속도계의 측정 범위(scale)는  $\pm 4,000^\circ/\text{sec}$ ,  $\pm 32g$ 으로 같으나 잡음 성능이 달라 높은 정밀도가 요구되는 응용 분야에 ICM-45686이 더 적합하다고 볼 수 있다.



그림 3. IIM-42653[5]



그림 4. ICM-45686[5]

표 1. Comparison of Key Specifications of IMU

Model	3-axis Gyroscope		3-axis Accelerometer	
	Full Scale	RMS Noise	Full Scale	RMS Noise
TDK IIM-42653	$\pm 4,000^\circ$ /sec	$0.05^\circ$ /s-rms	$\pm 32g$	X·Y-axis: 0.65 mg-rms Z-axis: 0.70 mg-rms
TDK ICM-45686	$\pm 4000^\circ$ /sec	$0.038^\circ$ /s-rms	$\pm 32g$	X·Y·Z-axis: 0.70 mg-rms

군집 정지비행 성능 시뮬레이션에서는 관성측정장비(IMU)로 IIM-42653과 ICM-45686이 탑재된 Holybro X500 Quadrotor 비행체를 비교하였다. Gazebo 시뮬레이터에서 IIM-42653 잡음은 기본적으로 제공되었고 ICM-45686은 TDK 홈페이지[5]의 데이터시트를 참고하여 플러그인하였다.

군집 소형무인 이동체 정지비행 시 그림 1처럼 드론은 총 6대, 드론 간 간격은 1.0m로 선형 배치, 목표 고도는 10.0m로 설정하였다. 드론 1번부터 6번까지 순서대로 이륙 후 목표 고도에 6대가 모두 도달하면 약 3분간 정지비행을 수행하고 제자리로 착륙하는 비행 플랜이었고 군집 정지비행 제어는 QGC에서 수행하였다. 그림 5는 드론 3번이 이륙 후 목표 고도에 도달 후 정지비행 중 이동 궤적을 나타내고 있다.

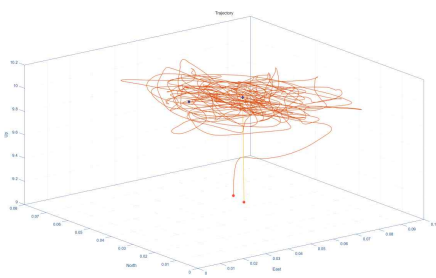


그림 5. Example of a motion trajectory during hovering flight

드론 1번부터 6번까지 수평·수직 방향의 정지 비행 정확도를 분석하여 오차를 계산하였고 수직 방향의 오차를 표2에 나타내었다. 시뮬레이션 결과, 두 센서의 사양 비교에서 예상되었듯이 3축 자이로스코프의 전체 RMS 잡음 성능이 우수한 ICM-45686의 수직 방향 정지 비행 정확도에서 평균 오차, 최대 오차, 표준편차 오차가 IIM-42653 대비 80% 이상 감소한 것을 확인하였다. 참고로 수평 방향 오차는 두 모델이 같아서 표2에서 생략하였다.

표 2. Accuracy analysis of swarm hovering flight

IMU Model	Drone Position	1	2	3	4	5	6	Mean
TDK IIM-42653	Vertical Error(m)-Mean	0.09	0.06	0.07	0.09	0.11	0.14	<b>0.09</b>
	Vertical Error(m)-Max	0.83	0.47	0.52	0.64	0.53	0.57	<b>0.59</b>
	Vertical Error(m)-Standard deviation	0.17	0.10	0.09	0.12	0.11	0.11	<b>0.12</b>
TDK ICM-45686	Vertical Error(m)-Mean	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	<b>0.01</b>
	Vertical Error(m)-Max	0.11	0.10	0.08	0.10	0.08	0.07	<b>0.09</b>
	Vertical Error(m)-Standard deviation	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	<b>0.01</b>

### III. 결론

본 논문에서는 PX4 SITL(Simulation-In-The-Loop) 환경에서 Holybro X500 Quadrotor 비행체를 이용해 군집 소형무인이동체의 정지비행 성능을 시뮬레이션하였다. 그 결과, 관성측정장치(IMU)의 성능 향상으로 인해 수직 방향의 정지비행 정확도에서 평균 오차, 최대 오차, 표준편차 오차가 80% 이상 감소하였다. 군집 정지비행 시 비행체의 자세를 제어하는 관성측정장치의 성능도 정지비행 정확도에 영향을 미친다는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. GPS-denied 환경에서 소형무인이동체는 실시간 이동 측위 기술(Real Time Kinematic, RTK)을 이용해 센티미터(cm) 단위의 정지비행이 불가능하므로 군집 정지비행의 위치 정확도를 높이기 위해 고성능 관성측정장치(IMU) 사용도 고려해볼 수 있을 것이다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 미래도전국방기술과제(No. 915087201)를 통해 연구가 수행되었다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. Wang, H. Kang, G. Sun, J. Li, J. Xiao and N. Lit, "Position Errors Analysis, Prediction and Recovery for UAV-enabled Virtual Antenna Array," *2022 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2022, pp. 1-6
- [2] <https://docs.px4.io/main/en/simulation>
- [3] [https://docs.px4.io/main/en/sim\\_gazebo\\_gz](https://docs.px4.io/main/en/sim_gazebo_gz)
- [4] <https://holybro.com/products/px4-development-kit-x500-v2>
- [5] <https://invensense.tdk.com>