

무인기를 이용한 Last-Mile 서비스를 위한 배송 자동화 및 영상기반 착륙 알고리즘 연구

이한섭[†] · 정 훈

JeongHoon Song

Dept. of AI and Bigdata , SCH Univ.

sjhon121215@sch.ac.kr

목차

1. 서론
2. 시스템 구성
3. 알고리즘
4. 실험 결과
5. 결론
6. 연구에 적용시킬 방법

1. 서론

- 4차산업 혁명의 시작으로 4차산업의 산물들이 직접적으로 우리 사회에 나타나기 시작
ex)드론과 로봇
- 공간의 한계를 저비용으로 극복하기 위한 방법으로 "드론"을 활용
ex) 방송 촬영, 산불 감시, 방제 드론
- 여러 분야에 활용되지만 가장 각광받고 있는 분야는 물류 분야
- 물류 배송 시장은 해가 거듭할수록 시장 규모가 커짐 → 물류 서비스를 제공하는 기업 또한 빠르게 성장
→택배 단가가 낮아지면서 사람이 직접 택배를 배송하는데 한계에 이르기 시작
 - 다른 수단을 통한 택배 물량 분산의 필요성 증가
→ 무인이동체를 활용해서 Last-Mile 배송 서비스 연구를 수행.

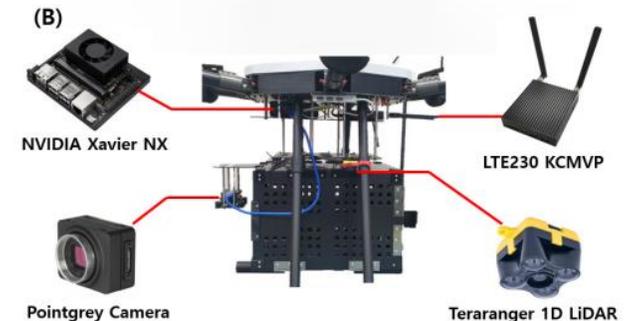
1. 서론

- 선행 연구
 - 드론이 물품을 배송하고 배송된 물품을 지상 로봇에 실어 최종 소비자에게 물품을 배송 하는 과정
→ 영상기반 자동 착륙 알고리즘 탑재 & 지상 거점으로부터 목적지까지의 자율 비행
 - 영상기반 자동 착륙 알고리즘 연구
 - 초기에는 영상처리 컴퓨터 성능의 한계로 주로 색상 마커를 이용해 착륙 연구 수행
 - 이후 컴퓨터 성능이 우수해지면서 특정 형태의 마커를 인식하고 자동 착륙하는 연구 진행
- 개발 시나리오
 - 건물 옥상에 물품을 배송 로봇으로 인계하는 중간 시설물이 존재
 - 시설물 지붕에 있는 마커에 정밀하게 착륙하여 물품을 내려놓고 다시 출발지로 복귀하여 다음 물품 배송을 준비
 - 이 과정을 자동으로 수행하기 위해 건물 상공까지의 비행 임무와 지붕 위 마커에 정밀하게 착륙할 수 있는 영상기반 착륙 알고리즘 개발
 - ETRI 원내에서 여러 번의 시범 운영을 통한 성능 입증

2. 시스템구성

2.1 하드웨어 구성

- 6개의 모터를 가진 HexaCopter 타입
- 랜딩기어 사이에 물품을 실을 수 있는 적재함이 위치
- 적재함 앞쪽으로 하방에 H마커를 탐지할 수 있는 카메라 탑재
- 적재함과 랜딩기어 사이에 아래 지면까지의 거리를 측정할 수 있는 1차원 Range Finder 탑재
- 적재함 상판 위로 배터리 2개가 위치 & 자율 비행 및 영상기반 자동 착륙 알고리즘이 실행되는 mission computer와 LTE 모뎀이 위치
- 프로펠러를 포함한 드론의 전체 크기는 약 1.8m x 1.8m 정도 기체 무게는 9.8kg
payload를 포함한 MTOW(Maximum Take-off Weight)는 22kg



<Figure 1> Hardware Configuration of the Delivery Drone.
(A) 3-D Rendering Image of the Drone, (B)
The Side View of the Drone and Main
Component for Autonomous Operation

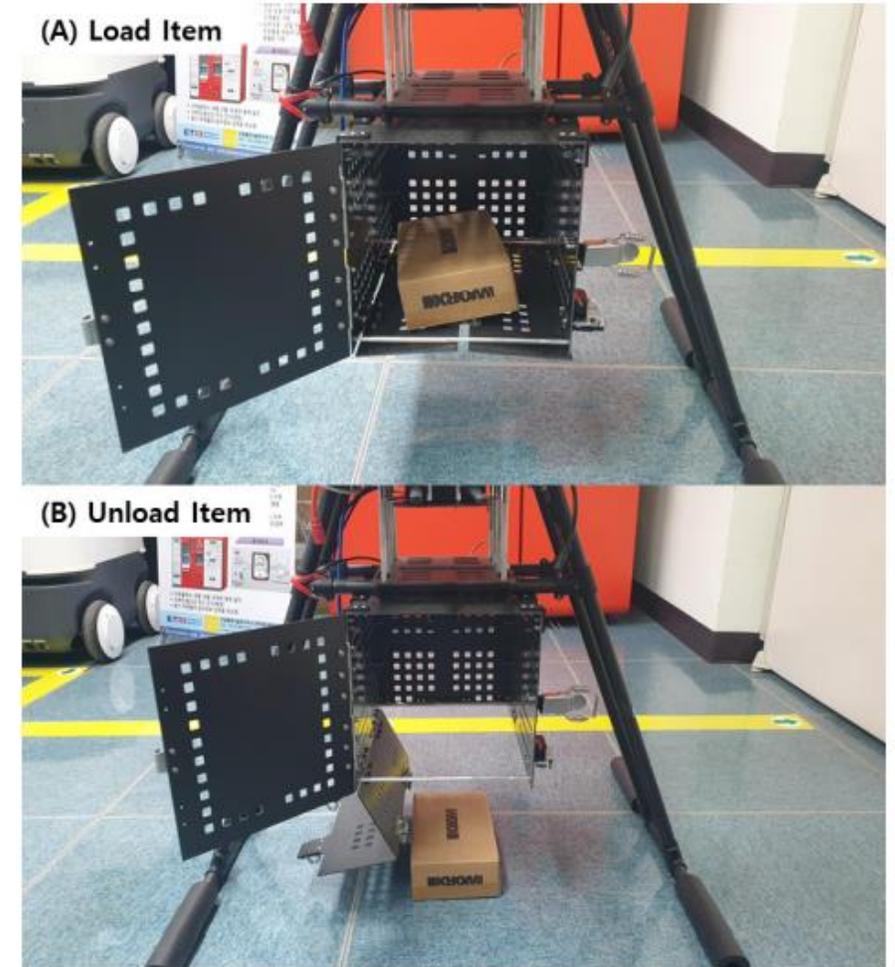
2. 시스템구성

2.1 하드웨어 구성

- 드론 하방에 부착된 적재함은 드론 후방에서 물품을 적재할 수 있도록 고정식 여닫이문으로 구성
- 적재함 하단으로 물품이 투하될 수 있게 구성

<Table 1> Specification of the Delivery Drone

Items	Value
Max. Take-off Weight	22[kg]
Max. Flight Time	21[min]
Delivery Payload	5[kg]
Wind Endurance	10[m/s]
Size	1810×1810×680[mm]
Prop. Size	22.4×8[in]
Motor & ESC	170[KV] 60[A]
Battery	Li-Po 12S 16,000[mAh]

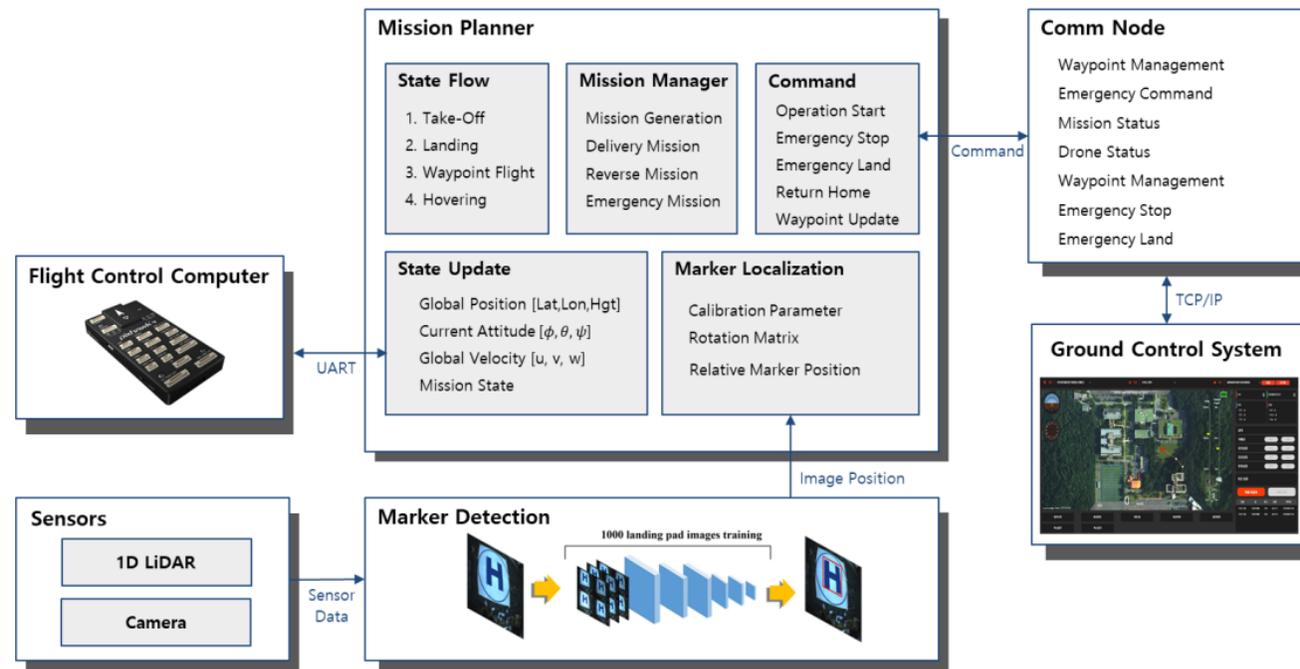


<Figure 2> Cargo Box Installed under the Delivery Drone. (A) The Parcel is loaded in the Cargo Box. (B) The Parcel is unloaded from the Cargo Box

2. 시스템구성

2.2 소프트웨어 구성

- Mission Planner : 물품 배송을 위해 자율 비행, 배송 경로와 비상상황에 드론 제어를 담당
- Ground Control System(GCS) : 드론을 모니터링하고 배송 과정과 비상상황에 따라 명령을 내리는 담당
- Comm Node : 통신 담당
- Marker Detection : 하방 카메라로부터 들어오는 영상에서 H마크어의 위치를 탐지

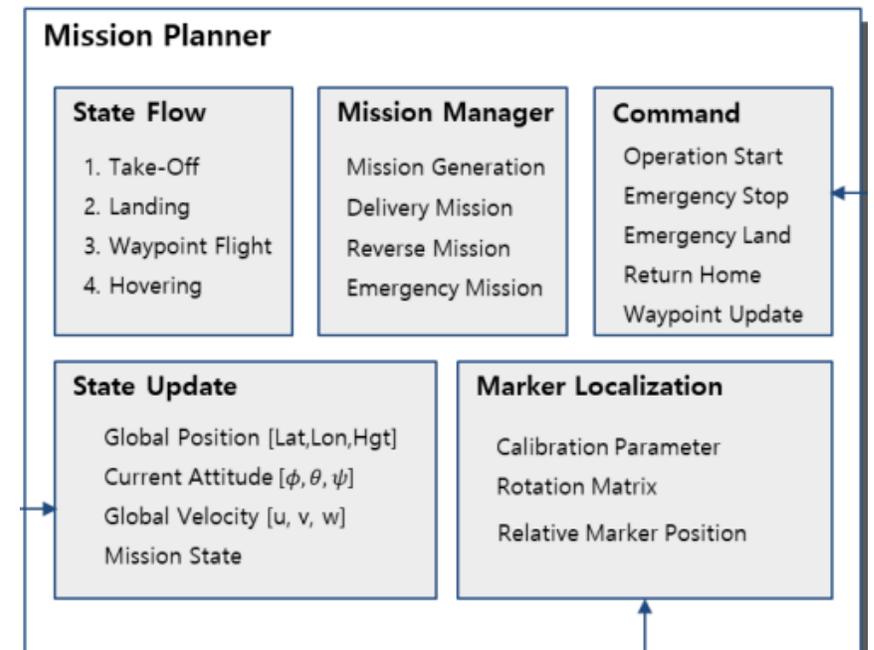


<Figure 3> Software System Architecture and Data Flow Chart

2. 시스템구성

2.2 소프트웨어 구성 - Mission Planner

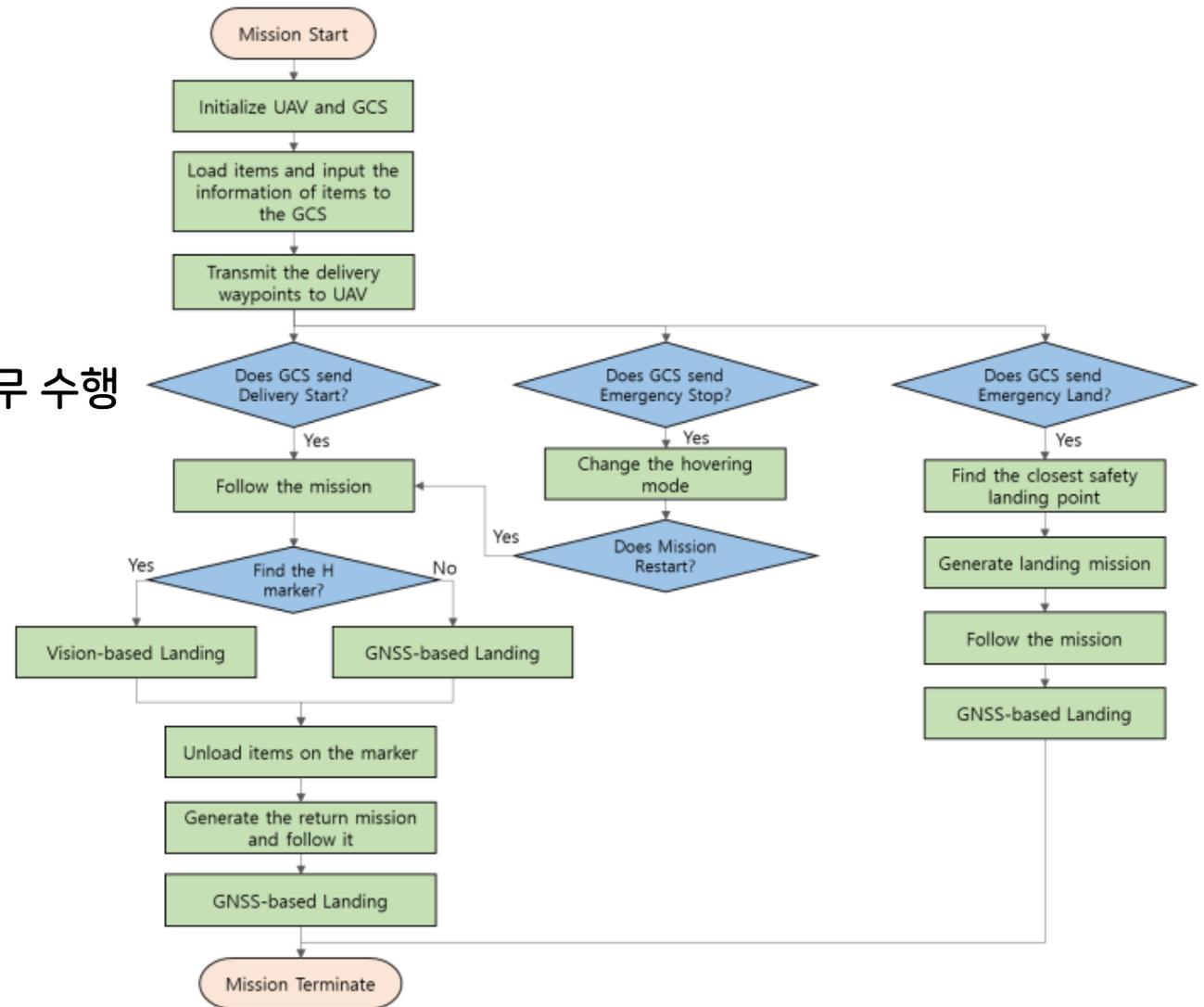
- State Flow : 임무에 따라 State 흐름을 관장
- Mission Manager : GCS로부터 배달점 Array를 받았을 때 배송 임무로 변환하거나 출발지로 돌아오는 복귀 임무, 비상상황일 때 임무를 생성
- Command : GCS로부터 배송 시작 및 여러가지 비상상황을 명령을 받고 배달점 Array를 관리하는 Command
- State Update : Flight Control Computer(FCC) 로부터 드론의 State를 업데이트
- Marker Localization : 영상기반 착륙을 위해 마커 탐지 알고리즘으로부터 마커의 이미지 평면 위치를 받아 드론의 현재 정보를 통해 마커 위치를 계산



3. 알고리즘

3.1 배송 자동화 알고리즘

- 미션이 시작되면 UAV 및 GCS 초기화
- 상품을 적재하고 상품 정보를 GCS에 입력
- UAV로 배달 경유지 정보 전송
- 배달 시작, 비상 정지, 비상 착륙 신호에 따라 임무 수행



<Figure 4> The Flow Chart of the Last-Mile Delivery Mission using UAV

3. 알고리즘

3.1 배송 자동화 알고리즘

- GCS로부터 전송되는 배달점 : Array

위도,경도,해발고도(Above Mean Sea Level, AMSL) 세 정보를 포함하고 있고, Array를 DP라고 하면 DP는 n개의 집합으로 구성되어 있다.

$$DP = \{dp_i \mid dp_i \in \mathbb{R}^3, i = 1, \dots, n\}$$

- GCS에서 보내준 Array 정보를 통해 이륙부터 착륙까지 자율 비행 임무 생성 식

$$M = \{T(dp_1), W(dp_2), W(dp_3), \dots, L(dp_n)\}$$

- $T(\bullet)$: Take-off mission mapping → 해당 점을 기준으로 이륙을 수행하는 임무
- $W(\bullet)$: Waypoint mission mapping → 해당 점으로 웨이포인트 비행을 수행하는 임무
- $L(\bullet)$: Landing mission mapping → 하방 영상으로 마커 탐지가 되었을 때 영상 기반 착륙 수행을 수행하고 그렇지 않을 때 dp_n 을 기준으로 착륙

- 물품 배송을 완료한 후 처음 위치까지의 복귀 임무 생성 식

$$R = \{T(dp_n), W(dp_{n-1}), \dots, W(dp_2), L(dp_1)\}$$

3. 알고리즘

3.1 배송 자동화 알고리즘

Algorithm 1. $V_{cmd} \leftarrow \text{LandingMission}(P, C)$

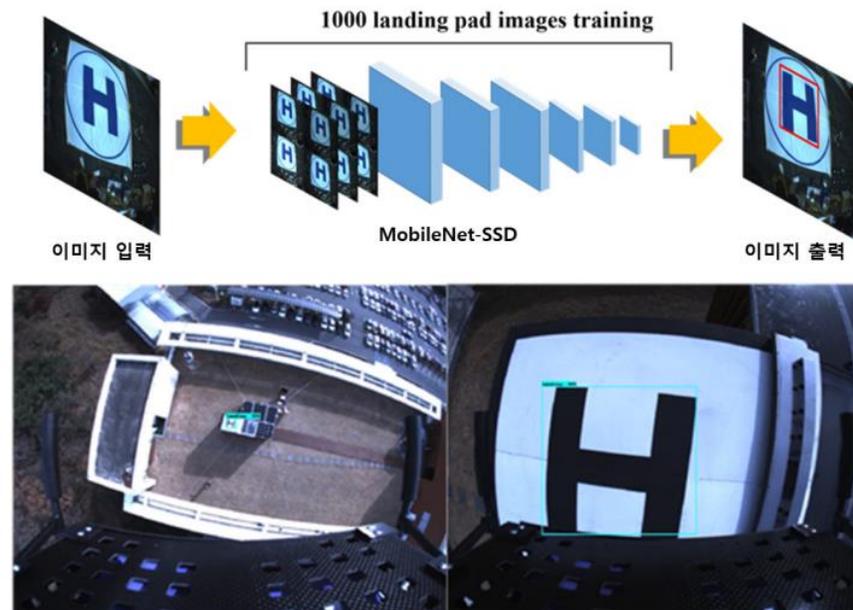
```
1: init :  $P, C$ 
2:  $L_{tmp} \leftarrow P.position()$ 
3: if flagDetection then
4:    $L \leftarrow \text{GeoLocation}(P, C)$ 
5:    $L_{tmp} \leftarrow L$ 
6: else
7:    $L \leftarrow L_{tmp}$ 
8: end if
9:  $V_{cmd} \leftarrow \text{Guidance}(L, P)$ 
10: Return  $V_{cmd}$ 
```

1. 입력값으로 P,C 주어짐
2. $P.position()$ 값을 L_{tmp} 에 할당
3. *flagDetection* 결과에 따라
4. 참이라면 L에 $\text{GeoLocation}(P, C)$ 결과값 할당
5. L_{tmp} 에 L 할당
6. 참이 아니면
7. L_{tmp} 를 L에 할당
8. 마지막으로
9. V_{cmd} 에 $\text{Guidance}(L, P)$ 결과값 할당
10. 최종적으로 V_{cmd} 리턴

3. 알고리즘

3.2 영상기반 정밀 착륙 알고리즘

- 중간 시설물을 크게 만들 수 없기 때문에 최소한의 크기를 가져야 함 → 마커의 크기는 1.5m x1.5m
 - GPS 위치 기반이 아닌 영상기반 정밀 착륙을 수행해야 한다.
- 영상기반 정밀 착륙
 - 카메라를 통한 마커 탐지 : 임베디드 컴퓨터에서도 사용 가능한 MobileNet-SSD 알고리즘 사용
- MobileNet-SSD의 학습은 실제 환경에서 저장된 비디오로부터 추출된 이미지를 가지고 수행하였다.
 - 입력 영상은 900 x 720크기로 30Hz의 속도로 들어왔다.
- 드론에 탑재된 카메라를 통해 들어오는 이미지에는 드론 모터에서 발생하는 진동때문에 노이즈가 많이 발생한다.
 - 이러한 현상을 데이터셋에 반영하기 위해 정상 이미지와 함께 흐림 효과(Blur)처리된 이미지를 추가
 - 추가적으로 조도에 대한 강인성을 높이기 위해 밝기가 조절된 이미지들도 함께 학습 데이터셋으로 추가



<Figure 5> The Results of Vision-based Detection

3. 알고리즘

3.2 영상기반 정밀 착륙 알고리즘

- Geo-Location 알고리즘

- 필요성

- 본 연구에서 어안렌즈 카메라를 사용
 - 어안렌즈를 통한 영상은 넓은 영역을 볼 수 있지만, 영상의 가장자리로 갈수록 영상의 왜곡이 심해짐.
 - 3차원 공간의 물리량으로 변환하는 작업이 필요

- 드론과 마커의 상대 고도를 1-D LiDAR를 통해 측정하고, 고도값을 이용하여 영상 평면 위에 있는 점을 North-East-Down(NED) 좌표계의 점으로 변환 가능

- 변환을 위한 어안렌즈의 모델

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ f(u, v) \end{bmatrix} = s R_N^C \chi_{rel}$$

- u 와 v 는 2차원 이미지 평면에서 중심으로부터 거리
 - $f(u, v)$ 는 초점으로부터 어안렌즈에 맺히는 상까지의 거리
 - s 는 $s \in \mathbb{R}$ 이고, 카메라 모델의 좌표계와 NED 좌표계간의 scale factor
 - R_N^C 은 $R_N^C \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 이며 NED좌표계와 카메라 좌표계 간의 상대 회전 행렬
 - χ_{rel} 은 $\chi_{rel} \in \mathbb{R}^3$ 이며 NED좌표계에서 드론의 위치로부터 마커까지의 상대거리를 나타내는 벡터

- 이미지 평면에 있는 타겟의 원점으로부터 거리에 polynomial function으로 approximation을 수행

$$f(\rho) = a_0 + a_1\rho + a_2\rho^2 + a_3\rho^3 + \dots$$

$$\text{where } \rho = \sqrt{u^2 + v^2}$$

3. 알고리즘

3.2 영상기반 정밀 착륙 알고리즘

- NED 좌표계의 마커 위치를 구하기 위한 카메라 모델 식

$$\chi_{rel} = \begin{bmatrix} x_{rel} \\ y_{rel} \\ H \end{bmatrix} = s^{-1} \mathbf{R}_C^N \begin{bmatrix} u \\ v \\ f(u, v) \end{bmatrix}$$

- 마커의 높이를 알고 있을 때 상대고도를 알 수 있으므로 모르는 변수는 x, y, s
- 마커와의 상대 고도 H 를 이용해 s 를 구할 수 있다.

$$s = H^{-1}(R_{31}u + R_{32}v + R_{33}f(\rho))$$

- s 를 구하면 NED 좌표계에서 마커의 상대 위치를 구할 수 있다.

$$x_{rel} = s^{-1}(R_{11}u + R_{12}v + R_{13}f(\rho))$$

$$y_{rel} = s^{-1}(R_{21}u + R_{22}v + R_{23}f(\rho))$$

3. 알고리즘

3.2 영상기반 정밀 착륙 알고리즘

- Geo-location을 수행하기 위해서는 카메라의 기울어진 각도가 필요하다.
- 무인기 하방에 카메라를 고정하였기 때문에 무인기의 자세값이 카메라의 기울어진 각도가 된다.
- 마커의 상대 위치를 구한 후 마커에 도달하는 제어 명령을 생성한다.
 - 수평 속도 명령 식

$$\vec{v}_{cmd} = R(\psi) \left(K_p \vec{e} + K_d \dot{\vec{e}} \right)$$
$$K_p = \begin{bmatrix} K_{px} & 0 \\ 0 & K_{py} \end{bmatrix} \quad K_d = \begin{bmatrix} K_{dx} & 0 \\ 0 & K_{dy} \end{bmatrix}$$

- K_p : proportional gain matrix
- K_d : derivative gain matrix
- \vec{e} : 드론과 마커 사이의 상대 위치 에러 벡터, Global 좌표계에서 정의된 값
- $\dot{\vec{e}}$: 드론과 마커 사이의 상대 속도 에러 벡터, 드론의 Body 좌표계에서 정의된 값
- $R(\psi)$ 는 $R(\psi) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 이고, 현재 드론의 헤딩 각도, ψ 만큼 회전하는 행렬
* ψ : 프사이

- 마커를 발견하고 고도를 내리는 수직 속도 명령의 조건
 - 수평 에러를 충분히 줄이면서 착륙할 수 있는 방식

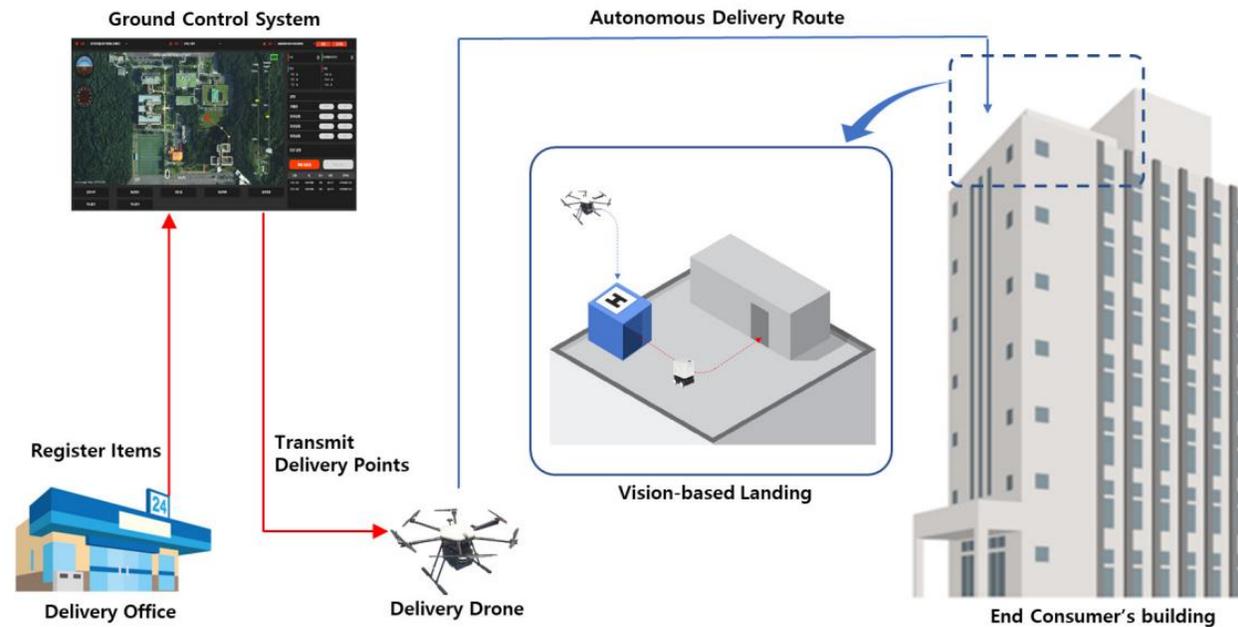
$$v_z = \begin{cases} 0.1 & \text{if } \|\vec{e}\| > 5.0m \\ 0.5 & \text{if } \|\vec{e}\| \leq 5.0m \text{ and } H > 0.3m \\ 0.3 & \text{if } H \leq 0.3m \end{cases}$$

- 마커와의 수평 위치 에러의 절대값
 - 5m보다 클 때는 0.1m/s
 - 5m 이내에 있는데 고도가 0.3m보다 높을 때는 0.5m/s
 - 마커 위의 착륙직전의 단계에서는 0.3m/s

4. 실험 결과

4.1 배송 실증 시나리오

- 지상에 있는 물품 집하소에서 운용자가 관제시스템을 통해 물품을 등록하고 등록된 물품을 드론 적재함에 적재하여 드론 배송을 준비한다.
- 드론 배송 준비가 완료되면 관제시스템에 배송 시작 버튼을 누르면 드론이 이륙하면서 드론 배송이 시작된다.
- 드론은 관제시스템으로부터 받은 웨이포인트를 따라 비행하면서 건물 옥상으로 비행하게 된다.
- 물품을 투하할 인계 시설물에 도착하게 되면 하방 영상으로부터 마커가 발견되게 되고 그럼 착륙 모드로 변경될 때 영상기반 착륙 프로세스를 거치게 된다.
- 마커를 따라 정밀 착륙을 완료하게 되면 마커 위에 물품을 투하하게 되고 드론은 다시 이륙해서 지상에 출발지로 다시 비행하여 도착하게 되면 배송 시나리오가 마무리된다.

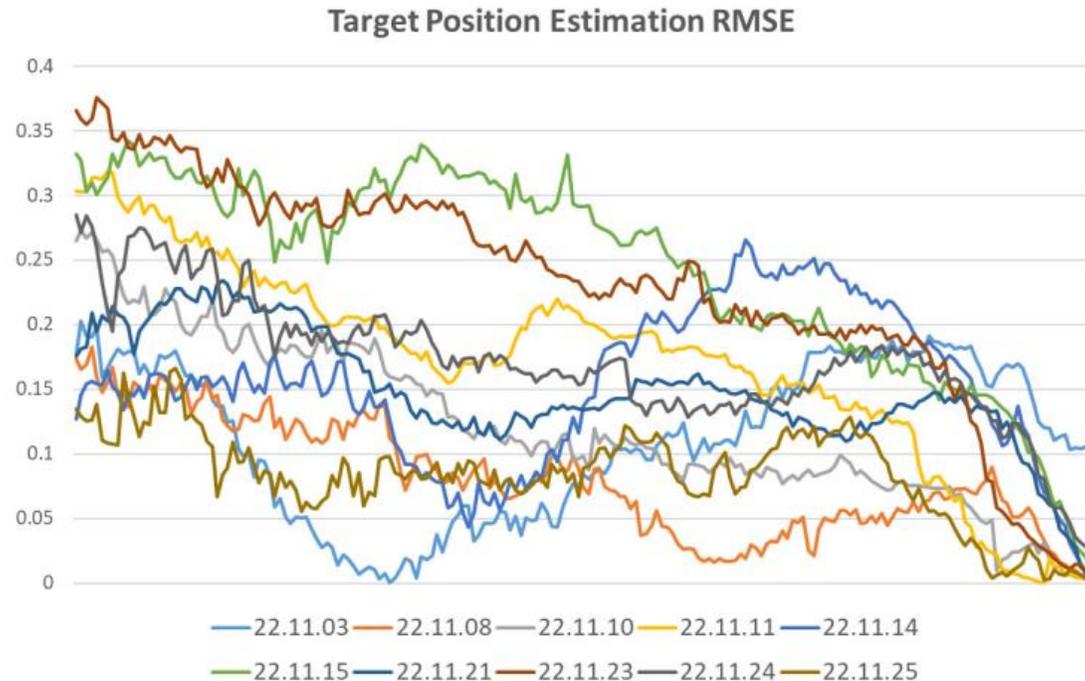


<Figure 6> The Scenario of the Last-Mile Delivery using UAV/UGV Platforms

4. 실험 결과

4.2 정밀 착륙 결과

- 시나리오를 따라 드론이 영상 기반 착륙을 수행하게 되는데 착륙 마커의 위치 정확도를 평가하기 위해서는 마커의 절대 위치를 알아야 한다.
- 마커의 절대 위치를 측정하여 비교하기는 쉽지 않기 때문에 마커에 도달하기 바로 직전 고도 0m~0.5m 사이의 데이터를 평균을 내서 참값으로 간주하고 약 10m 고도부터 착륙하는 동안의 RMSE를 계산하여 성능을 비교하였다.
- 10회에 걸친 시범운영에서 착륙 마커 인식 정확도의 평균은 약 0.151m로 측정되었다.



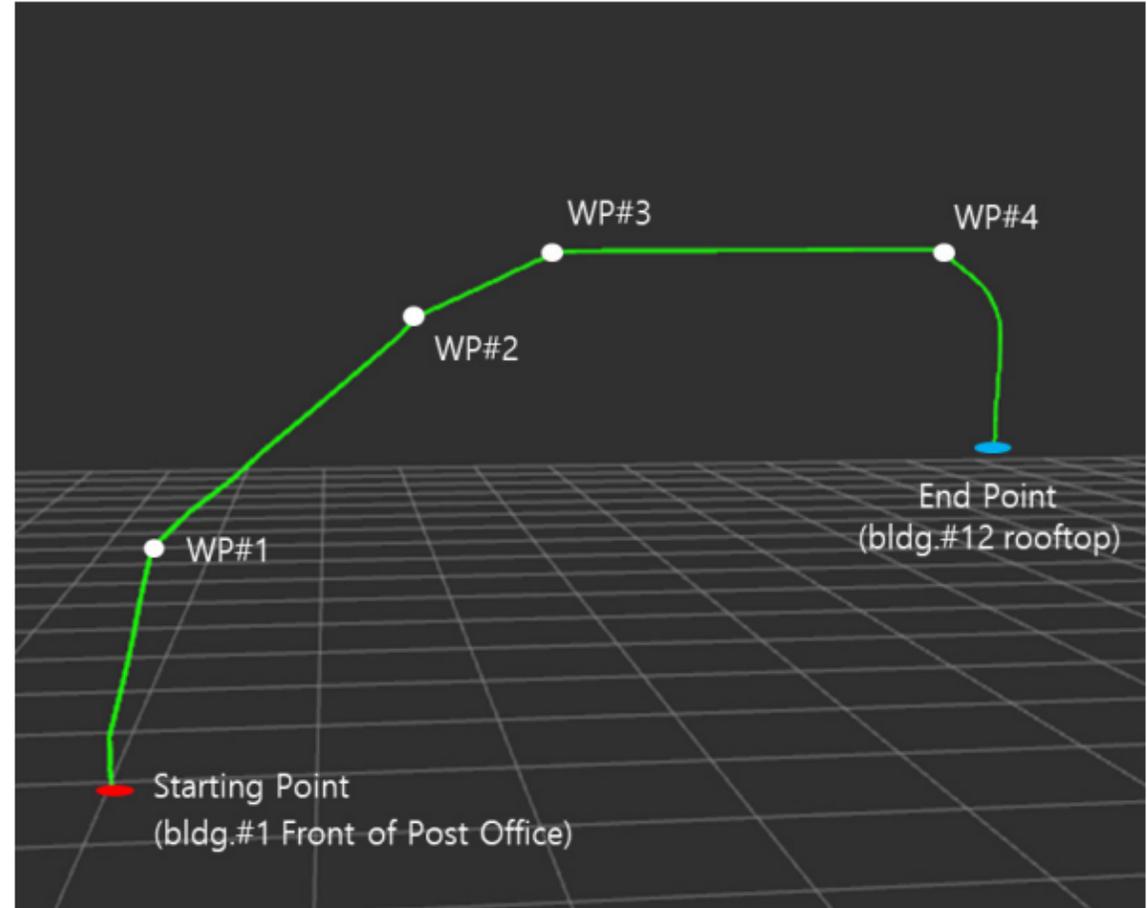
<Figure 7> The RMSE Graphs for the Accuracy of the Position of the Marker

4. 실험 결과

4.3 배송 시나리오 결과



<Figure 8> The snapshots of the Vision-based Landing



<Figure 9> The 3-D Trajectory of the Last-Mile Delivery using UAV

5. 결론

- 본 연구의 내용은 Last-Mile 배송 서비스를 수행하기 위해 드론에 적용되어야 할 배송 자동화 알고리즘과 영상기반 자동착륙 알고리즘에 대한 내용이다.
- 배송 자동화 알고리즘은 관제시스템으로부터 전송된 배송점을 기반으로 배송 경로와 복귀 경로를 생성하기 위해 mission mapping이라는 개념으로 배송 임무를 생성하였다.
- 영상기반 자동 착륙 알고리즘은 먼저 인공지능 기반으로 인계 시설물 지붕에 설치된 H마커를 인식하고 인식된 정보와 드론의 상태 정보를 바탕으로 착륙 마커의 절대위치를 정밀하게 추정하였고 그 위치를 바탕으로 착륙 Guidance와 고도 프로파일을 설계하여 본 연구에 적용하였다.
- 개발된 알고리즘은 ETRI 내부에서 시범 운영을 통해 알고리즘의 강건성을 검증하였다.

6. 연구에 적용시킬 내용

- 드론이 자율주행 중 장애물 인식 후 피하기
- 특정 모션 인식 후 모션에 따른 명령 자동 실행

