

R&D / 18CTAP-C143427-01

# 도심 저고도 무인항공기 관제와 충돌방지 지원을 위한 Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반 Multilateration 시스템 기초연구 최종보고서

---

2020. 1. 16.

주관연구기관 / 연세대학교 산학협력단  
공동연구기관 / 홍익대학교 산학협력단

국토교통부  
국토교통과학기술진흥원

## 제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

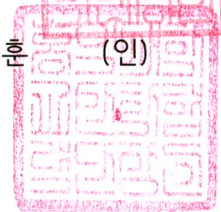
‘도심 저고도 무인항공기 관제와 충돌방지 지원을 위한 Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반 Multilateration 시스템 기초연구’(연구개발 기간 : 2018.04.17. ~ 2019.12.31.) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2020. 1. 16.

주관연구기관명: 연세대학교 산학협력단 (대표자) 이 원 용



공동연구기관명: 홍익대학교 산학협력단 (대표자) 하 정 훈



주관연구기관책임자: 서 지 원

공동연구기관책임자: 김 의 호

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

## 보고서 요약서

|                                       |                                                                                        |                                                                                           |                             |             |                                                                 |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------|
| 과제 고유 번호                              | 18CTAP-C1<br>43427-01                                                                  | 해당 단계<br>연구 기간                                                                            | 2018.04.17.~<br>2019.12.31. | 단계구분        | 1/1                                                             |
| 연구사업명                                 | 중사업명                                                                                   |                                                                                           |                             |             |                                                                 |
|                                       | 세부사업명                                                                                  | 국토교통기술촉진연구사업                                                                              |                             |             |                                                                 |
| 연구과제명                                 | 대과제명                                                                                   |                                                                                           |                             |             |                                                                 |
|                                       | 세부과제명                                                                                  | 도심 저고도 무인항공기 관제와 충돌방지 지원을 위한 Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반 Multilateration 시스템 기초연구 |                             |             |                                                                 |
| 연구책임자                                 | 서지원                                                                                    | 해당단계<br>참여연구원 수                                                                           | 총: 20명<br>내부: 17명<br>외부: 3명 | 해당단계<br>연구비 | 정부: 370,000 천원<br>민간: 천원<br>정부외: 천원<br>상대국: 천원<br>계: 370,000 천원 |
|                                       |                                                                                        | 총 연구기간<br>참여연구원 수                                                                         | 총: 20명<br>내부: 17명<br>외부: 3명 | 총 연구비       | 정부: 370,000 천원<br>민간: 천원<br>정부외: 천원<br>상대국: 천원<br>계: 370,000 천원 |
| 연구기관명 및<br>소속 부서명                     | 연세대학교 산학협력단                                                                            |                                                                                           |                             | 참여기업명       |                                                                 |
| 국제공동연구                                | 상대국명:                                                                                  |                                                                                           |                             | 상대국 연구기관명:  |                                                                 |
| 공동연구                                  | 연구기관명: 홍익대학교 산학협력단                                                                     |                                                                                           |                             | 연구책임자: 김의호  |                                                                 |
| ※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음 |                                                                                        |                                                                                           |                             |             |                                                                 |
| 연구개발성과의<br>보안등급 및<br>사유               | 보안등급: 일반<br>사유: 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4제1항에 따라<br>보안과제로 분류되지 않는 과제이므로 일반과제로 분류함 |                                                                                           |                             |             |                                                                 |

### 9대 성과 등록·기탁번호

| 구분           | 논문 | 특허 | 보고서<br>원문 | 연구시설<br>· 장비 | 기술요약<br>정보 | 소프트<br>웨어 | 화합물 | 생명자원     |          | 신품종 |    |
|--------------|----|----|-----------|--------------|------------|-----------|-----|----------|----------|-----|----|
|              |    |    |           |              |            |           |     | 생명<br>정보 | 생물<br>자원 | 정보  | 실물 |
| 등록·기<br>탁 번호 |    |    |           |              |            |           |     |          |          |     |    |

### 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

| 구입기관 | 연구시설<br>· 장비명 | 규격<br>(모델명) | 수량 | 구입연월일 | 구입가격<br>(천원) | 구입처<br>(전화) | 비고<br>(설치장소) | NTIS<br>등록번호 |
|------|---------------|-------------|----|-------|--------------|-------------|--------------|--------------|
|      |               |             |    |       |              |             |              |              |
|      |               |             |    |       |              |             |              |              |

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)      보고서 면수 110

## 요약문

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |             |        |                        |  |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------|------------------------|--|
| 연구의<br>목적 및 내용            | <p>연구개발 목표: 도심 저고도 (500 ft 미만) 비행 무인항공기 관제 지원을 위한 LTE, 5G 등 Signals of Opportunity 기반 Multilateration (MLAT) 무인항공기 측위 시스템 아키텍처를 개발하며 MLAT 측위, V2V/V2I, 3D 도심 모델을 이용한 실시간 무인항공기 비행 충돌방지 안전거리 생성 알고리즘을 연구한다.</p> <p>연구개발 내용:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. LTE, 5G 거리측정 성능 조사 및 도심 3D 모델링</li> <li>2. 현실적인 중계기 분포를 고려한 MLAT 시스템 아키텍처 구축</li> <li>3. 정밀측위를 위한 도심 LTE 및 5G 중계기 보강 최적화 알고리즘 개발</li> <li>4. MLAT 관제 위치와 3D 도심 모델을 이용한 무인항공기 충돌방지 안전거리 생성</li> </ol> |             |        |                        |  |
| 연구개발성과                    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. LTE, 5G 등 Signals of Opportunity 기반 Multilateration 무인항공기 측위 시스템 아키텍처 및 Matlab 시뮬레이터 개발</li> <li>2. 도심 LTE 및 5G 중계기 분포 보강 최적화</li> <li>3. 도심 충돌방지 안전거리 생성 알고리즘 개발</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                        |             |        |                        |  |
| 연구개발성과의<br>활용계획<br>(기대효과) | <p>도심 저고도 비행 무인항공기 관제(UTM, Unmanned Aircraft System Traffic Management)는 현재 미국 NASA를 위주로 활발히 연구되고 있으며 미래 저고도 비행 무인항공기 관제의 국제표준으로 사용될 예정이다. 도심 저고도 환경은 위성항법신호가 불안정하여 UTM을 실현하기에 기술적인 난제가 가장 많은 지역으로 분류되고 있다. 본 연구를 통해 도심 저고도 비행 무인항공기 관제 핵심원천기술을 획득할 수 있으며 제안된 시스템의 실용화와 파생되는 지적재산권은 무인항공기의 안전한 운영과 우리나라의 관련 산업발전을 촉진시킬 것이다.</p>                                                                                                                                               |             |        |                        |  |
| 국문핵심어<br>(5개 이내)          | 무인항공기                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 측위          | 저고도 관제 | 기회신호                   |  |
| 영문핵심어<br>(5개 이내)          | UAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Positioning | UTM    | Signals of Opportunity |  |

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

## < 목 차 >

|                                                      |               |
|------------------------------------------------------|---------------|
| <b>1. 연구개발과제의 개요</b>                                 | <b>7</b>      |
| 가. 연구 목적                                             | 7             |
| 나. 연구의 필요성                                           | 8             |
| 다. 연구 범위                                             | 9             |
| (1) 1차 연도 (9개월)                                      | 9             |
| (2) 2차 연도 (12개월)                                     | 9             |
| 라. 연구개발과제의 차별화 방안                                    | 10            |
| (1) 선행연구 과제                                          | 10            |
| (2) 차별화 방안                                           | 10            |
| <br><b>2. 연구수행내용 및 성과</b>                            | <br><b>12</b> |
| 가. 1차년도 연구수행내용                                       | 12            |
| (1) 특정 지역의 3D 도심 모델 구축                               | 12            |
| (가) VWorld API 데이터 불러오기                              | 12            |
| (나) VWorld 데이터의 종류                                   | 13            |
| (다) 3D 도심 모델 설계                                      | 14            |
| (2) 가상 구역 설정                                         | 17            |
| (3) 현실적인 기지국 위치 설정                                   | 18            |
| (4) LTE 및 5G 거리측정에 관한 표준 동향 조사                       | 19            |
| (가) 표준 동향 조사                                         | 19            |
| (나) 충돌 방지(Collision avoidance) 선행조사                  | 21            |
| (다) 전파특성 모델링 기법 조사                                   | 23            |
| (라) V2V 거리측정 센서 시제품 조사                               | 23            |
| (5) MLAT 측위 엔진 알고리즘 구축                               | 24            |
| (가) MLAT 아키텍처 조사                                     | 24            |
| (나) MLAT 시스템 구성 방법                                   | 25            |
| (6) MLAT 수신기 시각 동기화 방법 연구                            | 25            |
| (가) 공통시각 시스템(Common Clock System)                    | 26            |
| (나) 기준 트랜스폰더 동기 시스템(Transponder Synchronized System) | 28            |

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| (다) 독립 GNSS 동기 시스템(Standalone GNSS Synchronized System) .....      | 28 |
| (라) 공통 시계 GNSS 동기 시스템(Common View GNSS Synchronized System) .....  | 29 |
| (7) 기지국 분포를 이용한 MLAT 측위 성능 연구 .....                                | 30 |
| (가) 도심 저고도(500ft 미만) 무인항공기 관제 알고리즘 .....                           | 31 |
| (나) 도심 저고도(500ft 미만) 무인항공기 관제 알고리즘 시뮬레이션 .....                     | 32 |
| 나. 2차년도 연구수행내용 .....                                               | 35 |
| (1) 도심 5G 전파 특성 연구 .....                                           | 35 |
| (2) MLAT 측위 정보와 UWB/DSRC 이용한 cooperative positioning 알고리즘 개발 ..... | 37 |
| (가) Cooperative Positioning 알고리즘 조사 .....                          | 37 |
| (나) Cooperative Positioning 구성 방법 .....                            | 40 |
| (다) 소형 무인기를 사용한 UWB 기반 MLAT 성능 실험 .....                            | 43 |
| (라) DSRC를 이용한 상대 거리 측정 .....                                       | 50 |
| (마) UWB 거리 측정 센서를 이용한 상대 거리 측정 .....                               | 54 |
| (3) 기지국 분포 보강 최적화 알고리즘 개발 .....                                    | 56 |
| (가) 이진 정수 계획법을 이용한 DSRC 기지국 분포 보강 최적화 알고리즘 개발 .....                | 58 |
| (4) 측위 정확도에 따른 기지국 분포 보강 형태 개발 .....                               | 59 |
| (가) 도심지역(강남역 사거리)의 기지국 분포 현황 및 위치정확도 .....                         | 59 |
| (나) 이진 정수 선형 계획법을 이용한 DSRC 기지국 분포 보강 결과 .....                      | 60 |
| (5) 측위 신뢰도 생성 알고리즘 연구 .....                                        | 70 |
| (가) LTE 신호 기반 거리 측정 알고리즘 .....                                     | 70 |
| (나) LTE 신호 기반 거리 측정 실험 .....                                       | 72 |
| (다) 측위 신뢰도의 정의 .....                                               | 74 |
| (라) 측위 신뢰도 생성 알고리즘 .....                                           | 75 |
| (마) 측위 시뮬레이션을 통한 보정 상수 결정 .....                                    | 83 |
| (6) 도심 공역별 안전거리 생성 알고리즘 연구 .....                                   | 85 |
| (가) 무인항공기 안전거리 생성 시뮬레이션 .....                                      | 85 |
| (나) 무인항공기 관제 실현성 검토 .....                                          | 89 |
| (다) 통신 단절 및 간섭 대처방안 검토 .....                                       | 92 |
| (라) 도심 전파환경 및 비행속도 고려 검토 .....                                     | 92 |
| 다. 연구개발성과 .....                                                    | 94 |
| (1) 연구 수행 체계도 .....                                                | 94 |

|                                              |         |
|----------------------------------------------|---------|
| (2) 성과 목표 및 달성 점수 (총괄) .....                 | 96      |
| (3) 성과점검기준표 .....                            | 96      |
| (4) 핵심 연구 성과별 설명 .....                       | 98      |
| (5) 연구개발성과 .....                             | 100     |
| (가) 국내외 논문 게재 .....                          | 100     |
| (나) 국내 및 국제학술회의 발표 .....                     | 101     |
| (다) 지식재산권 .....                              | 101     |
| (라) 전문 연구 인력 양성 .....                        | 102     |
| (6) 기술적 성과 .....                             | 102     |
| (7) 경제적 성과 .....                             | 103     |
| <br>3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 .....              | <br>104 |
| 가. 목표 .....                                  | 104     |
| 나. 목표 달성여부 .....                             | 104     |
| 다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등) ..... | 106     |
| <br>4. 연구개발성과의 활용 계획 등 .....                 | <br>107 |
| <br>붙임. 참고 문헌 .....                          | <br>108 |
| <br><별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서                    |         |

# 1. 연구개발과제의 개요

---

## 가. 연구 목적

현재 무인항공기 시장의 발전 및 군사·민간 산업에서의 무인항공기 사용의 증가에 따라 무인항공기 관제 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 그러나 저고도 공역에서의 무인항공기에 대한 교통 관리 방법이 아직 정립되지 않았기 때문에 현재 미국 NASA에서 Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) 프로젝트라는 이름으로 연구를 진행 중이다. UTM에는 저고도 공역에서의 효율적인 무인항공기 안전운항을 지원하기 위해 공역·지오펜스(geofence) 설정, 날씨에 따른 비행 경보 시스템, 교통 혼잡 관리, 무인항공기 간 충돌 방지 등이 포함되어 있다. UTM이 도입된다면 운영자(human operators)가 모든 무인항공기를 지속적으로 감시하지 않아도 될 것이며, 관리자(human managers)가 무인항공기 운항(시작, 지속, 종료)에 관련된 전략적 판단을 내릴 수 있도록 데이터를 제공받게 될 것이다.

UTM이 가능하려면 비행 중인 무인항공기의 위치를 파악하는 것은 필수적이다. 보통은 GPS와 같은 위성항법시스템(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)을 이용하여 무인항공기의 정밀한 위치를 파악할 수 있다. 하지만 도심 저고도 지역의 위성항법시스템 신호는 매우 불안정하여 위치측정이 불가능할 수 있으며 다중경로파의 영향으로 수십에서 수백 미터의 위치오차가 쉽게 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 본 연구과제에서는 LTE, 5G와 같은 기회신호(Signals of Opportunity)를 이용한 측위 및 무인항공기 간 cooperative positioning을 이용하여 도심 저고도 지역에서의 관제 위치정확도를 높이는 방법을 제시하는 것을 목표로 하고 있다.

본 연구결과를 통해 도출될 MLAT 측위 알고리즘과 실제 무인항공기 간의 충돌회피 시스템을 연계하기 위하여 99.999% 확률의 안전거리를 계산하는 알고리즘 개발도 연구 범위에 포함하였다. 이를 통해 각 무인항공기들은 자신이 해당 확률로 존재할 수 있는 범위를 계산하고, 이 범위가 겹치지 않도록 관제하면 해당 확률로 실제 무인항공기 간의 충돌회피가 가능하게 된다. (제시한 99.999% 확률은 현재 유인항공기가 GNSS를 이용하여 수평 비행을 하고 있을 경우 Protection Level 계산을 위해 고려해야하는 확률 값이다.)

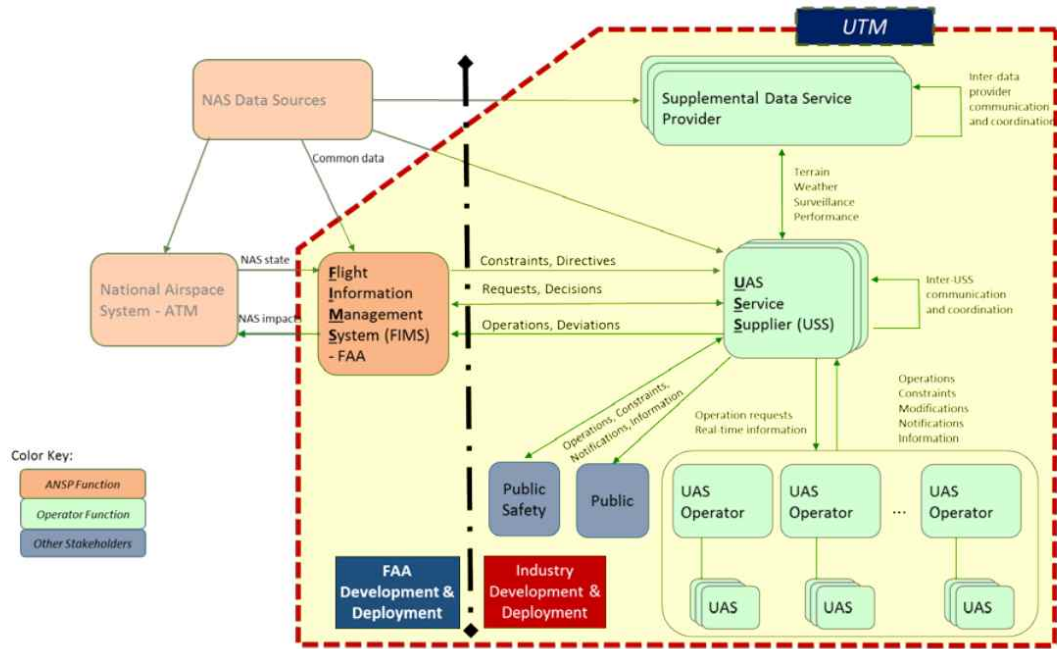


그림 1. UTM 구성 개념도 (utm.arc.nasa.gov)

## 나. 연구의 필요성

도심에서의 정밀측위는 아직 뚜렷한 해결책이 없는 기술적 난제이며 무인항공기의 상업적 운영의 가장 큰 장애물이다. 도심 무인항공기의 성공적인 관제를 위한 측위 방법은 위성항법시스템에 전적으로 의존하지 않으며, 도심 다중경로 전파에 강인하고, 저가의 경량 센서를 활용한 방법이 이상적이다.

본 연구팀이 제안하는 LTE, 5G 등 Signals of Opportunity 및 UWB 기반 Multilateration (MLAT) 측위 방법은 이러한 조건을 만족시키는데, 먼저 도심의 밀집된 이동통신 기지국은 안정된 신호 및 기하학적 분포(geometry)로 일관성 있는 위치측정을 가능케 한다. LTE 및 5G 통신을 이용한 측위도 다중경로 전파의 영향을 받을 수 있지만 UWB와 같은 센서를 활용한 무인항공기간 거리측정 기반 cooperative positioning 기법으로 다중경로파의 영향을 대폭 줄일 수 있어 관제에 필요한 위치측정 정확도를 제공할 수 있을 것이다. 또한, LTE/5G와 UWB 모듈은 소형 드론에 장착하기 쉬운 정도의 작은 크기이며 저가의 센서라는 장점이 있다. 특히, 본 제안과제의 MLAT 정밀측위 기법은 도심 기지국 위치가 고정적이기 때문에 도심의 각 지역마다 예측 가능한 측위 정확도를 보인다는 특징이 있다.

기지국의 위치를 도심 건물 3D 모델과 연동하면 각 도심 고도 및 지역 별로 무인항공기 충돌방지를 위한 안전거리 정보 생성이 가능하여 도심 관제에 큰 도움을 줄 것으로 예상된다. 현재 5G 통신 표준이 완성되지 않았지만 10여 미터 정확도 이상의 거리측정 기능이 포함될 것으로 예상되며 이를 가정한 5G 기반 위치측정 연구들이 국외에서는 이미 활발히 진행 중이다. 따라서 도심 무인항공기 관제와 5G 측위 원천기술의 확보를 위해 국내에서도 관련 연구 시작의 필요성이 매우 높다고 할 수 있다.

## 다. 연구 범위

### (1) 1차 연도 (9개월)

- ① 개발 목표: 도심 저고도 무인항공기 관제를 위한 Signals of Opportunity 기반 MLAT 측위 시스템 아키텍처 개발

- 주관연구기관(연세대): 3D 도심 모델 구축 및 LTE, 5G 신호 및 표준 기초조사
- 공동연구기관(홍익대): MLAT 아키텍처 구축 및 도심 측위 성능 연구

### ② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(연세대): 특정 지역의 3D 도심 모델 구축, 가상 구역 설정, 현실적인 중계기 위치 설정, LTE 및 5G 거리측정에 관한 표준 동향 조사
- 공동연구기관(홍익대): MLAT 측위 엔진 알고리즘 구축, MLAT 수신기 시각 동기화 방법 연구, 기지국 분포를 이용한 MLAT 측위 성능 연구

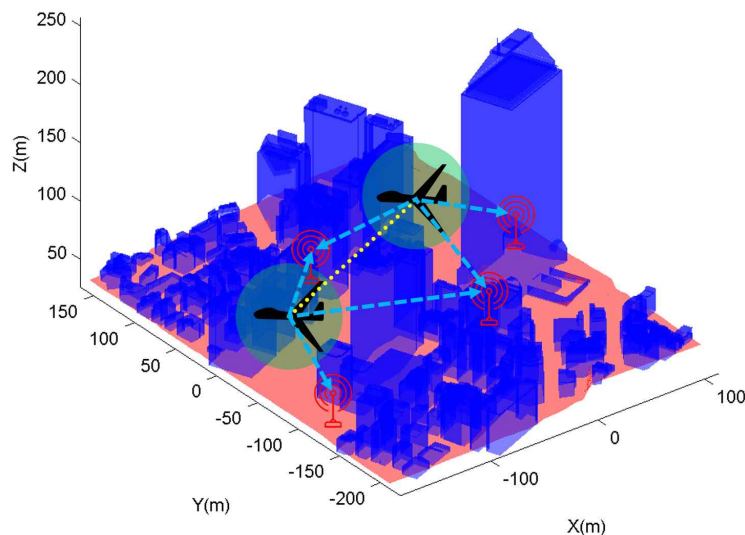


그림 2. 본 연구팀이 기존에 구현한 일부 도심지역 3D 모델링과 MLAT 시스템 개념도

### (2) 2차 연도 (12개월)

- ① 개발 목표: 무인항공기 충돌방지를 위한 안전거리 예측 알고리즘 개발

- 주관연구기관(연세대): 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘 연구, 시뮬레이터 구현
- 공동연구기관(홍익대): MLAT 기반 cooperative positioning 알고리즘 개발 및 기지국 분포 최적화

### ② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)

- 주관연구기관(연세대): 도심 5G 전파 특성 연구, 측위 신뢰도 생성 알고리즘 연구, 도

### 심 구역별 안전거리 생성 알고리즘 연구

- 공동연구기관(홍익대): MLAT 측위 정보와 UWB를 이용한 cooperative positioning 알고리즘 개발, 기지국 분포 보강 최적화 알고리즘 개발, 측위 정확도에 따른 기지국 분포 보강 형태 개발

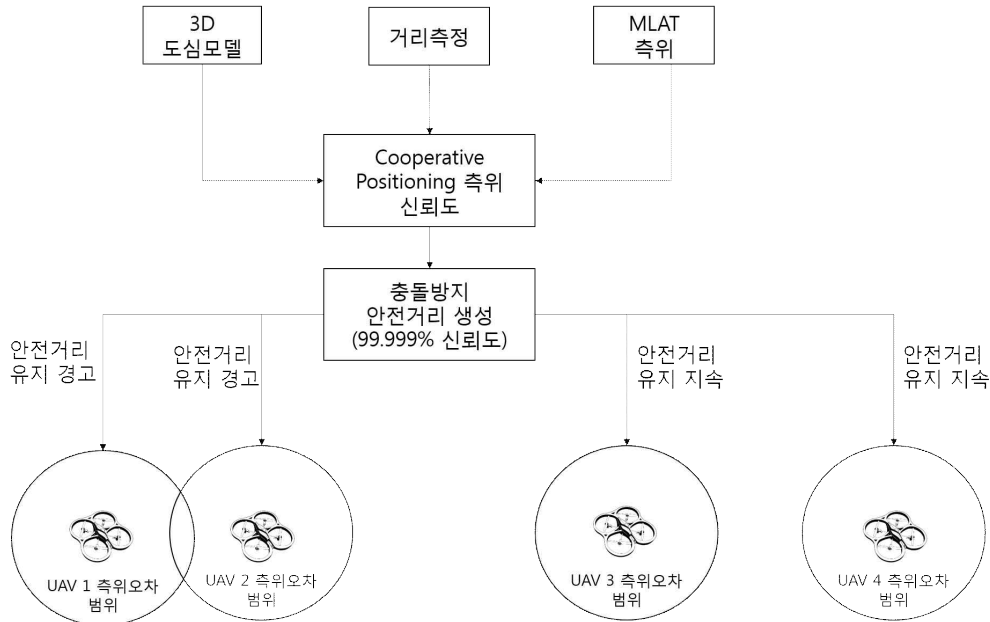


그림 3. 무인항공기 충돌방지를 위한 안전거리 생성 프로세스 예시

## 라. 연구개발과제의 차별화 방안

### (1) 선행연구 과제

| 부처명           | 사업명                                       | 과제명                                      | 예산 | 비 고 |
|---------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|----|-----|
| 국토교통부         | 항공안전기술개발사업                                | 무인항공기 안전운항기술 개발<br>및 통합 시범운용             |    |     |
| 과학기술<br>정보통신부 | 저고도 무인비행장치<br>교통관리 감시기술<br>개발 및<br>실증시험사업 | 저고도 교통관리 체계를 위한<br>보안 및 무인비행장치<br>핵심기술개발 |    |     |

### (2) 차별화 방안

- 국토부의 ‘무인항공기 안전운항기술 개발 및 통합 시범운용’ 과제는 민간 무인기 시험 운용을 위한 시범 인프라 구축 및 시범 운용을 목표로 하고 있으며, 무인기 관련 법령의 정비와 관련 기술의 제정 및 개정을 위한 연구 내용도 포함한다.

- 본 제안 연구는 상기 ‘무인항공기 안전운항 기술 개발 및 통합 시범운용’ 과제와는 그 목적과 연구 분야가 다르다. 상기 과제에서는 무인기 시범 운용을 위해 기존 측위기술을 활용하기 때문에 도심지역 관제를 위한 측위기술을 개발하려는 본 제안 과제와는 목적과 연구 내용이 상이하다. 하지만, 향후 본 제안 과제에서 개발될 도심지역 무인기 측위기술이 상기 과제를 위한 기반 기술로써 사용될 수 있을 것이다.
- 과기정통부의 ‘저고도 교통관리 체계를 위한 보안 및 무인비행장치 핵심기술개발’ 과제는 저고도 공역에서의 무인기 교통관리체계의 요구조건을 만족하기 위한 GNSS 및 다중 센서 기반 정밀통합 항법기술과 소형, 경량, 소출력 무인비행장치 간 직접 정보교환 단말장치의 개발을 목표로 한다.
- 상기 ‘저고도 교통관리 체계를 위한 보안 및 무인비행장치 핵심기술개발’ 과제에서는 무인기의 항법을 위해 수십 cm 단위의 정밀한 측위를 목표로 하고 있으며, 이를 위해 GPS-RTK 방식의 측위를 기본으로 하고 추가적인 센서로 보완하는 방식을 채택하고 있다. 이는 GPS 수신 환경이 원활하지 않은 도심 지역에서의 무인항공기 관제를 목표로 하는 본 제안 과제와는 목표가 상이하다.
- 본 연구팀이 제안하는 과제는 항법이 아닌 관제를 목적으로 하기 때문에 상기 과제보다 정확도 요구 조건은 낮으나, 도심지역 등 GPS 수신이 어려운 환경에서도 원활히 동작할 수 있는 안정적인 관제 시스템 구축을 목표로 한다. 또한 고가의 항법 센서에 의존하지 않고 최소한의 인프라 투자로 도심지역 무인기 관제에 필요한 측위 정보를 제공하는 것을 목표로 한다. 따라서 상기 과제와는 그 목적과 개발 기술이 상이하다.
- 본 제안 과제에서는 UWB와 LTE, 5G 등 Signals of Opportunity를 이용한 MLAT 시스템, 무인항공기 간의 V2V 상대 측위 등을 통하여 도심 지역 무인기에 적합한 최적의 복합측위 기법을 제시한다. 이는 결과적으로 도심지역 저고도 교통관리 체계를 구축하는데 요소기술로 이용될 수 있기 때문에 상기 과제에서 다루지 않는 부분을 보완할 수 있을 것이다.

## 2. 연구수행내용 및 성과

### 가. 1차년도 연구수행내용

#### (1) 특정 지역의 3D 도심 모델 구축

국내 대표적 도심환경의 3D 모델을 구축하기 위해 국토부에서 제공하는 도심 지도인 VWorld API를 활용하였다. VWorld API에는 지표 모델, 건물 형태 모델, 건물 모델이 각각 제공되며, 이를 알맞게 합쳐서 Matlab 상에서 3D 도심 모델 구축에 성공하였다.

#### (가) VWorld API 데이터 불러오기

VWorld란 국가가 보유하고 있는 공개 가능한 모든 공간정보를 다양한 수요에 대응할 수 있도록 단순 조회에서부터 원시 데이터 직접 제공까지의 서비스를 제공하는 오픈 플랫폼이다. VWorld는 HTTP 요청을 통해 API에 접근이 가능하며, 요청이 확인되면 이진(binary) 데이터를 제공한다. 이렇게 제공받은 이진 데이터는 요청한 데이터의 포맷에 맞게 파싱하여 사용이 가능하다. 본 연구팀은 데이터를 파싱하는 소프트웨어를 자체 제작하여 3D 도심 모델 구현에 활용하였다.

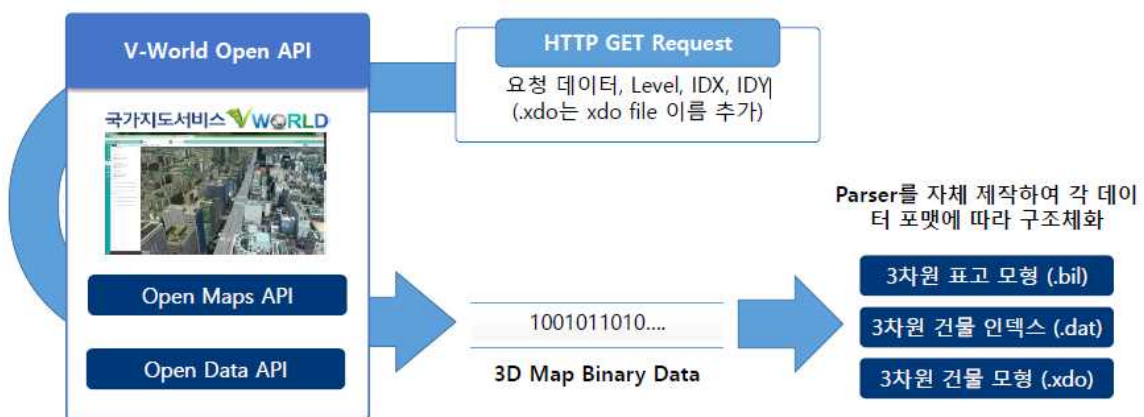


그림 4. VWorld API 데이터 요청 순서도

본 연구과제에서는 VWorld의 공개 API 중 데이터 API의 3차원 표고 모형과 3차원 건물 데이터를 이용하여 3차원 지도를 구성하였다.

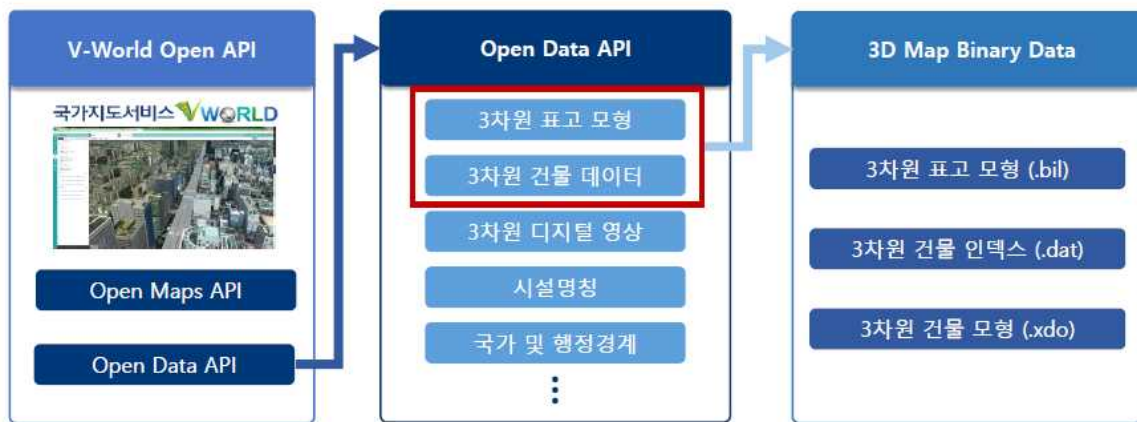


그림 5. VWorld API 데이터 구조

#### (나) VWorld 데이터의 종류

VWorld는 공개 API의 데이터 제공 범위를 타일(tile)이라는 단위로 할당하여 제공한다. 타일은 레벨에 따라 세분화되며, 한 레벨마다 상위 레벨 타일에서 경위도 방향으로 이등분하여 세분화된다. 각 타일은 타일이 위치한 경위도에 따라 좌표(IDX, IDY)가 부여되며 원점(90S, 180W)을 기준으로 각각 동쪽과 북쪽에 위치할수록 증가하며, 경위도 좌표로 표현된 수신기의 위치는 IDX, IDY로 변환하여 사용이 가능하다. 본 연구과제에서는 가장 상세한 정보 획득을 위해 VWorld에서 제공하는 레벨의 최대값인 15로 고정하여 도심 모델 구현을 진행하였다.

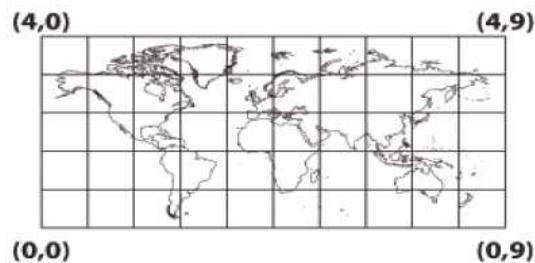


그림 6. 최상위 단계 타일의 배열 및 좌표

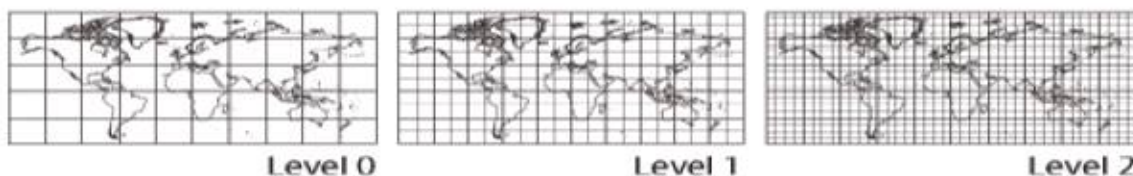


그림 7. 레벨 증가에 따른 타일 분할 예시 (www.vworld.kr)

본 3D 도심 모델에 쓰인 VWorld 데이터에는 3차원 표고 모형 데이터, 3차원 건물 인덱스 데이터, 그리고 3차원 건물 모형 데이터가 사용되었다. 3차원 표고 모형 데이터는  $65 \times 65$

크기의 고도값으로 구성된 행렬이며, 경위도 좌표 매핑을 통해 3차원 지형 모델을 생성할 때 사용된다. 3차원 건물 인덱스 데이터는 타일 내 건물에 대한 정보를 포함하며, 3차원 건물 모형 데이터를 불러오고 건물 중심 좌표에 지정한 건물을 위치시킬 때 사용된다. 3차원 건물 모형 데이터는 실제 지도에 위치할 건물의 형태 및 고도 정보를 포함하며, 이 데이터를 통해 3차원 건물 모형을 구성한다.

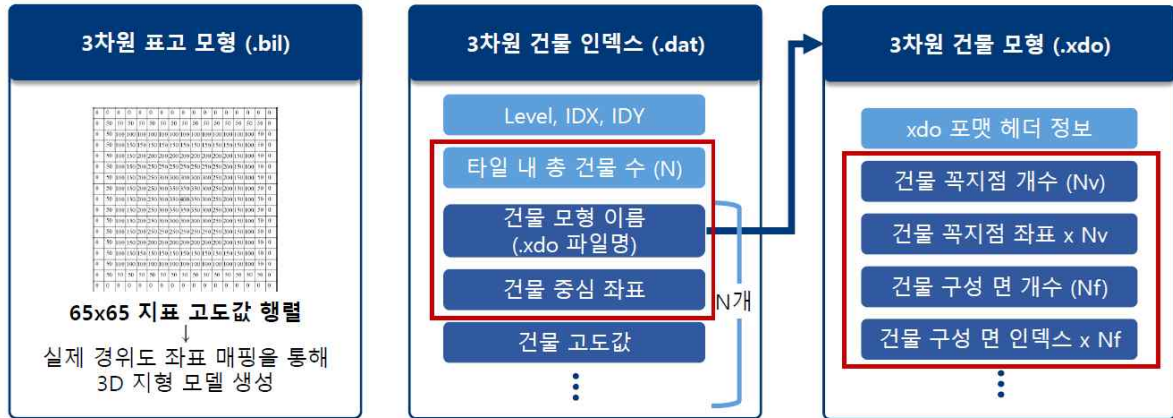


그림 8. VWorld 데이터의 구성 요소

#### (다) 3D 도심 모델 설계

먼저 3차원 표고 모형을 VWorld API에서 불러들여 Matlab의 3D 좌표 상에 올린 후 그 위에 3차원 건물 인덱스를 올리는 작업을 진행하였다.

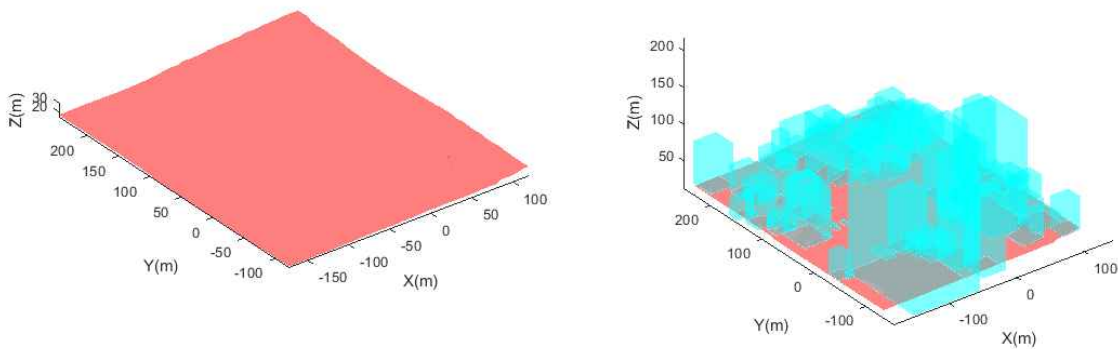


그림 9. (왼쪽) 강남역 부근의 3차원 표고 모형 (오른쪽) 3차원 건물 인덱스 모형

그 후 3차원 건물 인덱스 안에 폴리곤으로 구성된 3차원 건물 모형을 적용하는 작업을 진행하였다. 이렇게 완성된 3D 도심 모델은 2D 평면 및 3D 어느 각도에서도 관측이 가능하며, 해당 지역의 위성 지도와 비교한 결과 건물의 위치가 일치함을 알 수 있었다.

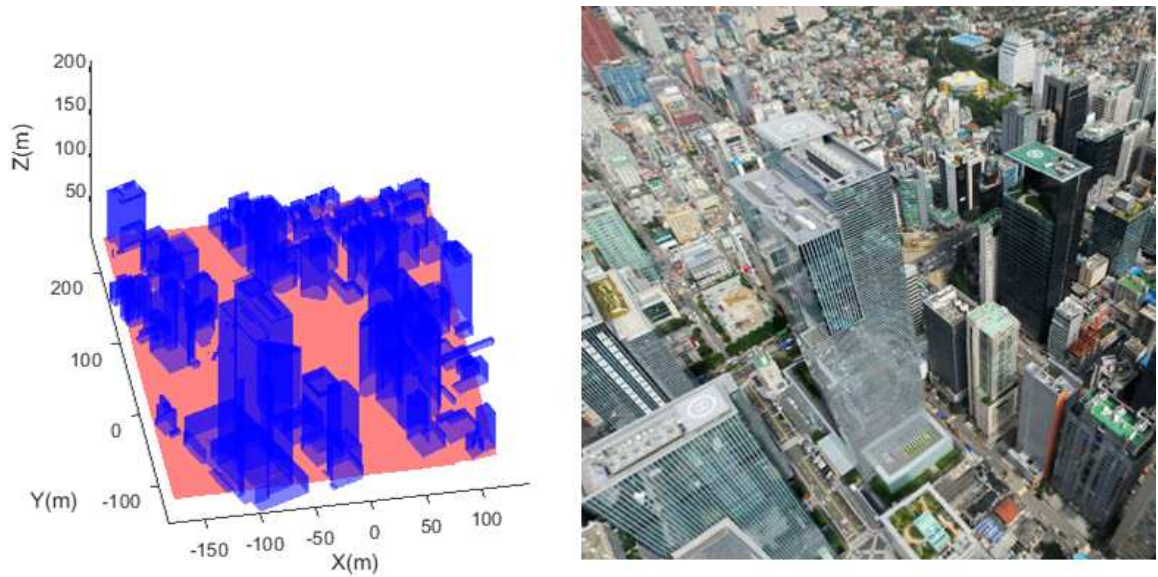


그림 10. (왼쪽) 본 연구팀이 구축한 강남역 부근의 3D 도심 모델  
(오른쪽) 실제 강남역 부근의 항공뷰 사진

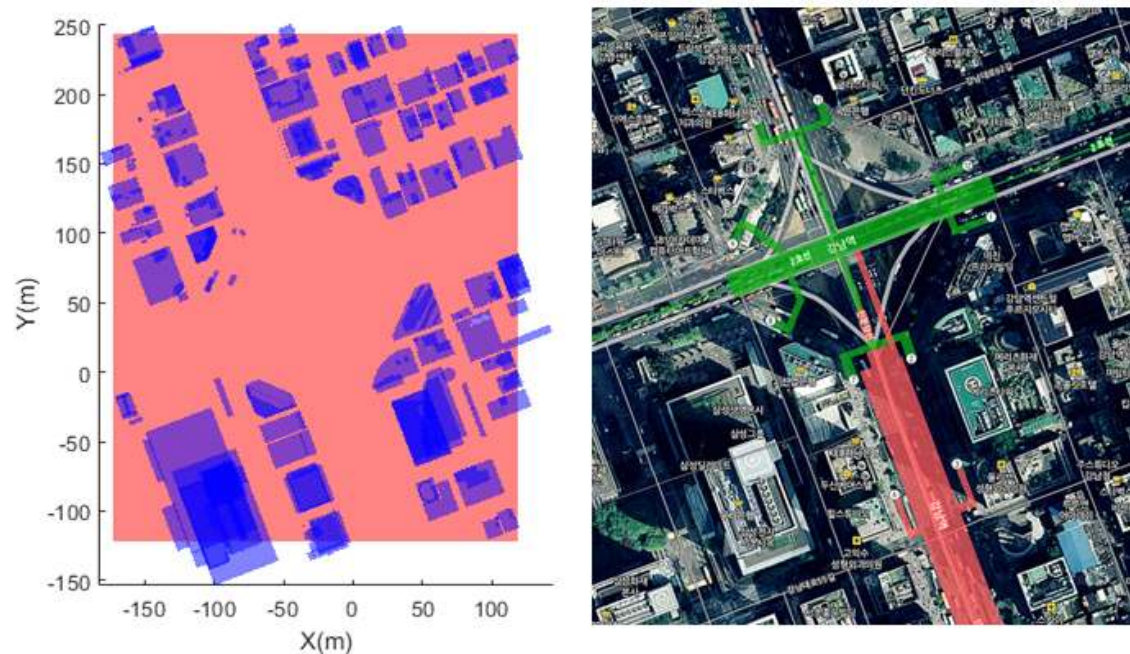


그림 11. (왼쪽) 강남역 부근의 2D 지도 (오른쪽) 실제 강남역 부근의 위성 지도

본 연구과제에서 제작한 3D 도심 모델은 VWorld에서 지원하는 3차원 건물 인덱스 데이터 및 3차원 건물 데이터가 존재하는 서울 테헤란로 주변 지역(강남역, 역삼역 인근)에 대해 구현되었다.

본 연구과제에서는 서울의 대표적인 고밀도 도심 환경의 예시로 서울 테헤란로 주변 지역을 선택하여 중계기 최적화 및 안전거리 생성 시뮬레이션을 진행하였다. 그러나 서울 롯데월드타워 인근과 같은 초고층 빌딩 인근 지역에서의 신호 수신 환경은 일반적인 도심 환경

에서와 차이가 있다. 예를 들어, 무인항공기가 초고층 빌딩 인근 지역을 비행 중일 때는 LTE 기지국이나 DSRC 송수신기가 무인항공기와 가까운 곳에 있다고 하더라도 초고층 빌딩으로 인해 송신되는 신호의 LOS가 확보되지 못한다면 측위 성능이 떨어지게 된다. 그리고 상대적으로 저밀도인 도심 환경 혹은 교외 환경의 경우에는 어떤 성능이 나오는지 등도 추가로 연구해볼 필요가 있다. 저밀도 도심 환경이나 교외 환경의 경우에는 GNSS 신호의 수신이 원활할 것으로 예측되기 때문에 본 연구에서 고려한 고밀도 도심 환경보다 안전거리의 크기가 작을 것으로 예상할 수 있다.

이처럼 다양한 도심 환경 혹은 교외 환경을 대상으로, 본 과제 종료 이후의 추가적인 연구 개발 계획을 아래와 같이 제시할 수 있다.

- 전파 및 비행 환경이 다른 도심 환경 분류
- 각 도심 혹은 교외 환경에 맞는 MLAT 측위 네트워크 분포 제시
- 각 환경에서 무인항공기 안전거리 시뮬레이션

이와 같이 다양한 환경에 대한 후속 연구개발이 이루어진다면 본 개발 기술의 상용화에도 도움이 될 수 있을 것이다.

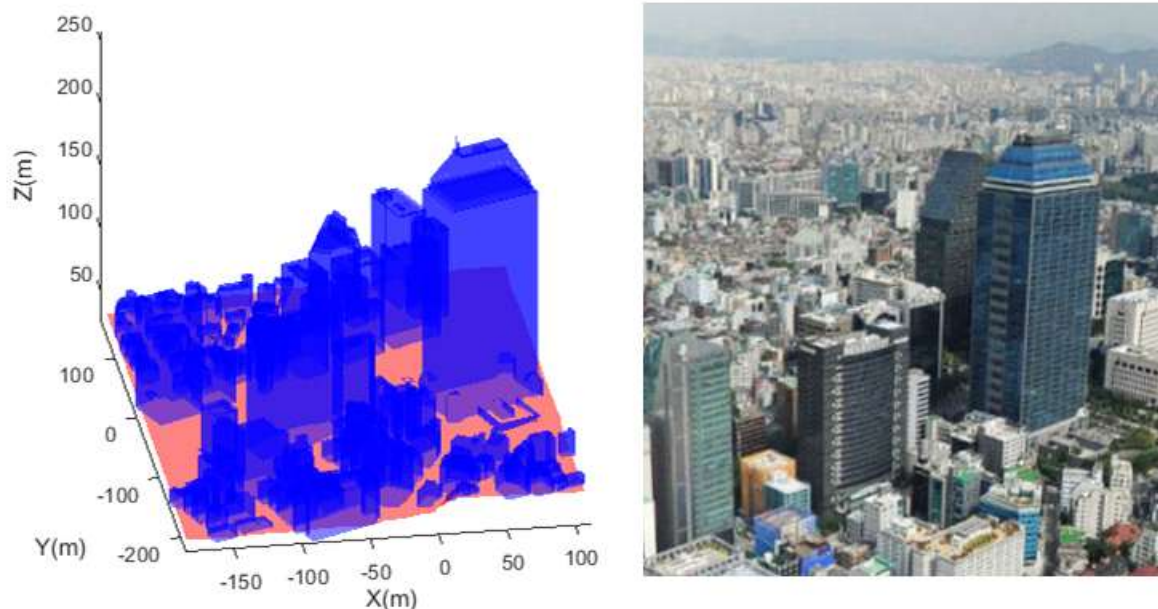


그림 12. (왼쪽) 역삼역 부근의 3D 도심 모델 (오른쪽) 실제 역삼역 부근의 항공뷰 사진

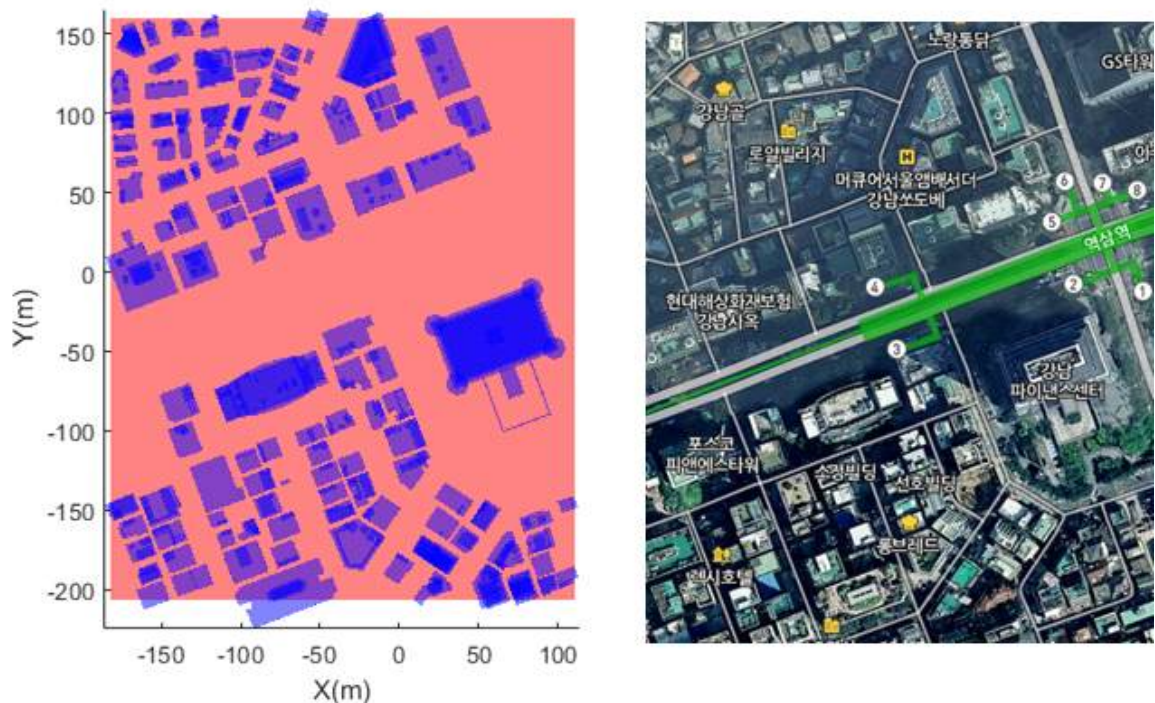


그림 13. (왼쪽) 역삼역 부근의 2D 지도 (오른쪽) 실제 역삼역 부근의 위성 지도

## (2) 가상 구역 설정

전 세계적으로 항공기의 안전하고 효율적인 비행을 위하여 항공교통관제업무, 비행정보업무 및 경보업무를 제공하는 구역이 나누어져 있다. 이를 비행정보구역(Flight Information Region, FIR)이라 하며, 흔히 공역(Airspace)이라 칭한다. 우리나라에서는 비행안전을 확보하기 위해 국내 비행정보구역을 A, B, C, D, E 및 G 등급 공역으로 세분화하여 각 공역 등급별로 비행방식과 항공교통업무 제공 범위 등을 지정·고시하여 시행하고 있다. 소형무인기가 운용되는 공역은 비관제 공역인 G등급 공역으로, G등급 공역은 전 세계적으로 지표면 혹은 해수면 기준 고도 500 ft 이하의 공역으로 정해져 있다[1]. 또한 2015년 미국 아마존 사에서는 Prime Air라는 드론 택배 서비스를 소개하며 G등급 공역을 분할하여 이용하는 방안을 제안하였다. 제안된 공역 분할 계획에는 고도별로 저속 국지 공역 (200 ft 미만), 고속 순항 공역 (200 ft ~ 400 ft), 그리고 유인항공기와의 충돌 방지를 위한 운용 금지 공역 (400 ft ~ 500 ft)으로 공역을 분할하였다.

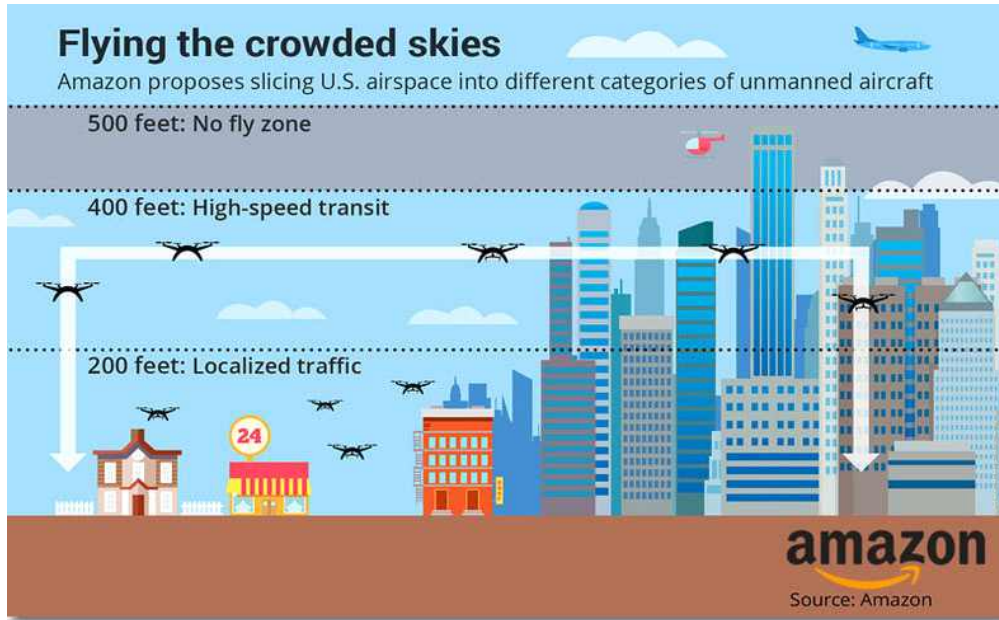


그림 14. 미국 아마존사에서 제안한 무인항공기 택배용 공역 구성 (www.supplychain247.com)

본 연구과제에서 구축한 3D 도심 지도는 해수면 기준 고도를 Z축에 표시하고 있으며, 이를 바탕으로 고도별 공역이 설정이 가능하기 때문에, 2차년도에 공역별 안전거리 생성 알고리즘 연구 및 시뮬레이터 구현을 위해 사용되었다.

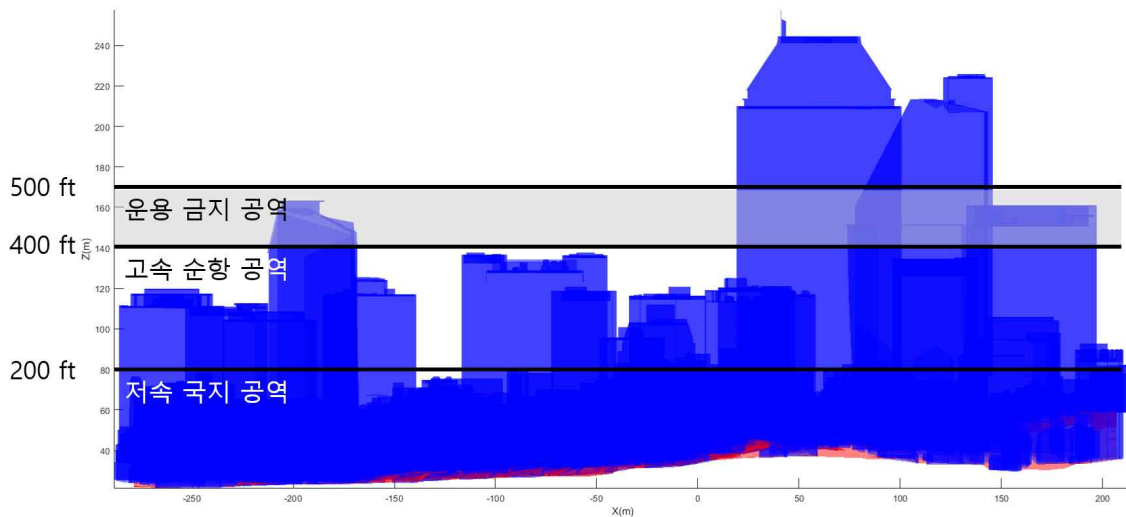


그림 15. 3D 도심 모델을 이용해 구현한 G등급 공역 분할

### (3) 현실적인 기지국 위치 설정

현재 설치되어있는 LTE 기지국 위치를 파악하기 위해 한국방송통신전파진흥원에서 제공하는 주파수 종합정보 시스템인 ‘전파누리’의 API를 이용하였다. 전파누리는 전국에 설

치되어 있는 이동통신 기지국의 위치를 제공하여, 전파누리에서 제공하는 이동통신 기지국 위치 정보를 이용해 지도상에 LTE 기지국의 위치를 표시하였다. 위 정보가 포함된 3D 도심 모델은 2차년도에 LTE 기반 측위 및 안전거리 생성 시뮬레이션에 사용되었다.

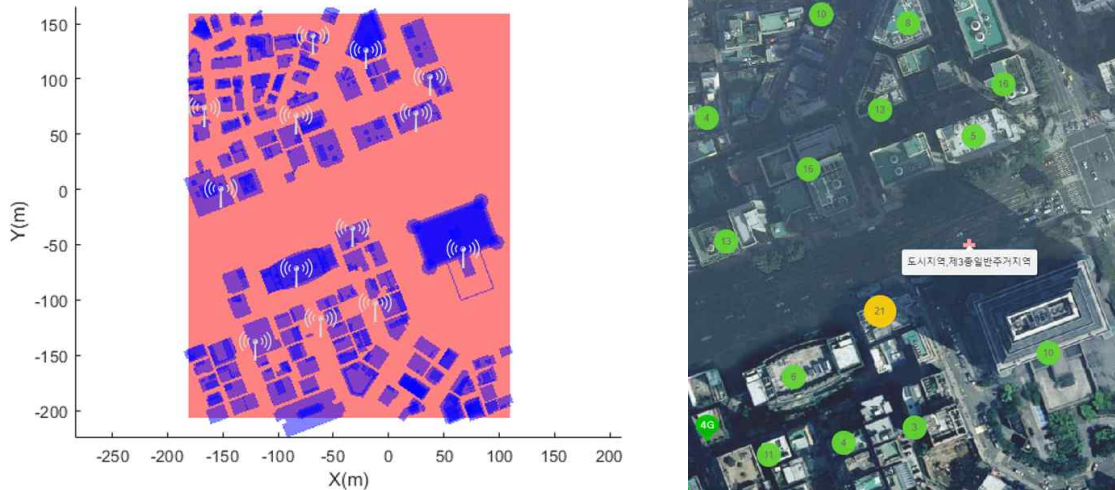


그림 16. (왼쪽) 역삼역 부근 2D 지도에 표시된 LTE 기지국 위치  
(오른쪽) 실제 역삼역 부근 LTE 기지국 위치

#### (4) LTE 및 5G 거리측정에 관한 표준 동향 조사

##### (가) 표준 동향 조사

###### ① LTE 표준 동향

LTE 시스템은 2008년 3rd Generation Partnership Project(3GPP) Release 8을 통해 최초로 표준이 성립된 이후, 2009년 상용화를 통해 소개되었다. LTE 신호는 기존 3G에서 가능했던 대역폭의 4배인 최대 20 MHz의 대역폭을 가지며, 변조 방식으로 직교 주파수 분할 다중 방식(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM)을 채택하여 효율적인 협대역 이용이 가능해지는 등 3G 기술보다 발전된 특성을 보이며 현재 전세계적으로 높은 사용량을 보이고 있다.

현재까지 LTE 신호를 이용한 측위 기술은 크게 네트워크 기반 측위와 수신기 기반 측위로 나눌 수 있다. 네트워크 기반 측위는 2009년 3GPP Release 9을 통해 LTE 신호 안에 측위를 목적으로 한 기준 신호인 측위 기준 신호(Positioning Reference Signal, PRS)가 소개되면서 가능해졌다. PRS는 기존 LTE 신호의 데이터 송수신 대역폭과 다른 대역폭을 이용하여 신호 간섭에 강인하고 50 m 범위의 정확도를 가진다고 소개되었으나[2], PRS는 LTE 신호의 부가 옵션이므로 많은 이동통신사에서는 PRS가 송신되는 대역폭에 일반 데이터 송수신을 하는 경우가 많고, 보안 문제 등이 제기되어 PRS를 이용하지 않는 측위 방식에 대한 필요성이 대두되었다. 수신기 기반 측위는 LTE 신호에 포함되어 있는 기준 신호(Reference Signal)를 이용하는 것으로, 이 기준 신호는 데이터 송수신 대역폭에 포함되어 있으나 시각 동기화를 위해서만 사용되는 신호로, 데이터 정보는 포함되어 있지 않다. 기준 신호의 구조

가 알려져 있고, 일정한 시간 간격으로 송신된다는 점을 이용하여 신호 도달 시간(TOA)을 계산하고, 이를 통해 의사 거리(pseudorange) 및 위치를 계산하는 연구가 국외에서 진행되었다[3].

2018년 6월 3GPP Release 16을 통해 LTE 표준화 발전을 위한 신규 과제들이 결정되었다. LTE 기술의 경우 5G 기술에 비해 기술 성숙도가 높지만, 상용 서비스를 진행함에 있어 발전이 필요하다 여겨진 하향 다중 안테나 기술(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 효율 개선, 이동성 성능 개선, 고속 이동 지원 등에 대한 신규 과제들이 승인되었다.

## ② 5G 표준 동향

2018년 6월 3GPP Release 15를 통해 최초로 독립적인 5G New Radio (NR) 표준 일부가 정립되었다. 5G 신호는 기존에 쓰이고 있던 LTE 주파수 대역인 6 GHz 이하의 주파수 대역을 뛰어넘는 최대 52.6 GHz 까지의 대역폭을 기준으로 삼게 되었다. 이러한 초고주파는 국제적으로 사용 빈도가 크지 않았기 때문에 각 국가별로 광대역 확보에 용이하지만, 물리적 특성상 낮은 주파수에 비해 멀리까지 전파되지 못하고 건물 외벽과 같은 장애물에 대한 투과력이 상대적으로 약하다. 이러한 특성을 극복하기 위해 다중 안테나 기술이 5G 표준 기술로 도입되었다. MIMO는 4G 및 LTE에서도 사용된 기술이지만, 4G에서 사용된 MIMO는 적은 수의 안테나를 1차원 배열로 정렬하여 사용하였기 때문에 사용자 구분에 한계가 있었고, 이를 개선하기 위해 5G에서는 거대 안테나 배열(Massive Antenna Array)을 활용하여 수직·수평 방향으로 사용자를 구분할 수 있는 규격의 기준을 제시하였다. 이외에도 사용자의 방향으로 전파를 집중하여 송신할 수 있는 빔포밍(beamforming) 기술, 4G 기술에 쓰이는 직교 주파수 분할 다중 방식(Orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) 구조를 개선하여 신호 지연율을 줄이는 등의 방식들이 기준으로 설정되었다.

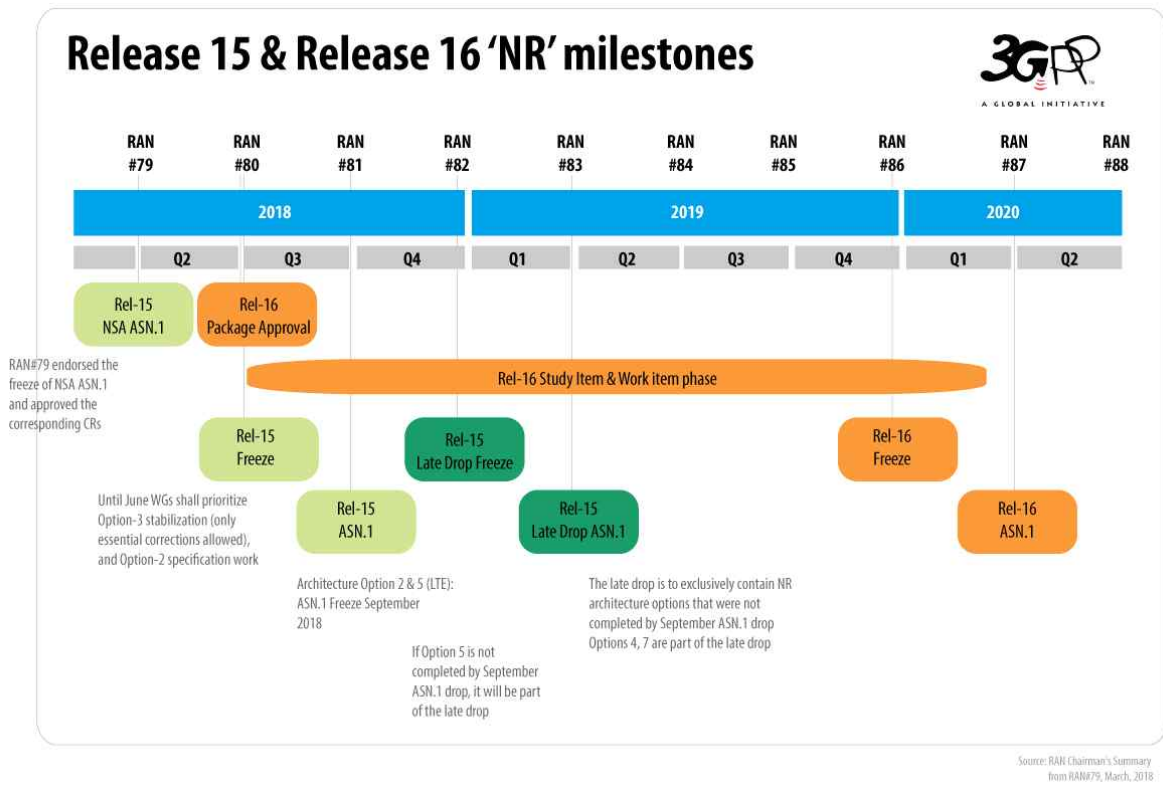


그림 17. 3GPP Release 15 & 16 계획표 (www.3gpp.org)

### (나) 충돌 방지(Collision avoidance) 선행조사

무인항공기의 충돌 방지 기술은 현재 미국에서 Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) 프로젝트를 통해 활발히 연구 중인 기술이다. UTM이란 미국 NASA에서 저고도 공역에서의 무인항공기 안전운항을 지원하기 위한 교통관리체계이다. UTM 구축 계획은 총 네 단계의 Technology Capability Level(TCL)로 구분되는데, 이 중 적은 교통량을 가진 농촌 등 교외 지역에서의 무인항공기 운영 단계인 TCL1과 TCL2가 각각 2015년과 2017년에 진행되었고, 2018년 6월 TCL3 완료 발표가 진행되었다. TCL3는 중간 정도의 인구 및 교통량을 가진 교외 지역에서의 무인항공기 운영 단계로, 무인항공기 간 충돌 방지, 시스템 요소 간 데이터 교환 및 V2V 통신 등의 체계가 기준으로 설정되었다. 위 운영 체계는 미국 네바다, 알래스카를 비롯한 6군데의 장소에서 시험 운영되었다. UTM의 마지막 계획인 TCL4는 많은 인구와 혼잡한 교통량을 가진 대도시에서의 관제 시스템과 택배 서비스나 뉴스 취재와 같은 업무 목적의 무인항공기 운용 능력 테스트에 대한 내용으로, 2019년 미국 네바다와 텍사스에서 2번의 시험 비행을 통해 2019년 12월 기준 마감 단계에 있다.



그림 18. NASA의 UTM 구축 계획 (utm.arc.nasa.gov)

UTM 프로젝트를 통하여 저고도 비행 체계가 만들어지면 무인항공기와 유인항공기의 충돌 위험성이 크게 감소할 것으로 기대되나, 저고도를 비행하는 일반 항공기(general aviation aircraft, GA aircraft)와의 충돌이 여전히 가능하기 때문에 추가 충돌 방지 시스템(sense and avoid system, SAA system)이 필요하다. sUAV의 충돌 방지 시스템으로는 지상기반 충돌 방지 시스템(ground-based SAA)과 항공기 기반 충돌 방지 시스템(onboard SAA)이 있다. 지상기반 충돌 방지 시스템은 기내에 따로 추가적인 장치 없이 적은 비용으로 시스템 구동이 가능하나 지상과 항공기 간 통신 장애가 발생할 경우 심각한 사고로 이어질 수 있다. 항공기 기반 충돌 방지 시스템은 무인항공기와 지상 간의 통신 장애가 있어도 다른 무인항공기와의 직접 통신이 가능하기 때문에 지상기반 충돌 방지 시스템의 단점을 보완할 수 있다. 현재 저고도 무인항공기 관제에 쓰이는 항공기 기반 충돌 방지 시스템은 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) 시스템이 가장 크게 쓰일 것으로 기대되나, UTM 프로젝트에서 향후 소형 무인항공 시스템(Small Unmanned Aerial System, sUAS) 사용 빈도를 예상한 결과 ADS-B 시스템의 수용력을 넘는 수준의 무인항공기 사용이 예상된다는 결과를 제시하였다. 이에 ADS-B 시스템을 대체할 수 있는 충돌 방지 시스템의 필요성이 대두되었다.

UTM 프로젝트의 일환으로 55 lbs (25 kg) 미만의 sUAS 시험 비행이 진행되었다[4]. 비행 시험의 목적은 ADS-B 시스템을 대체할 수 있는 무인항공기 조종 및 충돌 방지를 위한 ① 단거리 전용 통신(Dedicated Short Range Communications, DSRC) 시스템, ② 4G 통신 시스템을 테스트하는 것으로 진행되었다. DSRC 시스템은 Intelligent Transport System (ITS) 전용 근거리 무선 통신 시스템으로 현재 전세계적으로 도로 통행요금 자동징수 시스템의 통신 모듈로 사용되고 있다. 시험 비행 결과 DSRC의 지상-항공 통신은 100 m 이하 범위에서

약 90%의 패킷 수신율을, 400 m 범위에서 50%의 패킷 수신율을, 800 m 범위에서 20%의 패킷 수신율을 보였고, 항공-항공 통신은 300 m 범위에서 50%, 500 m 범위에서 20% 수신율을 보여, 10 m/s 이상의 속도로 움직이는 무인항공기에 대해서는 부적합한 것으로 결론 내려졌다. 4G 통신의 경우, 중고도 대역과 같이 신호 손실이 적을 때 신호 발신 타워와 25 km 이상의 거리에서도 수신 가능한 것으로 확인되었으나, 무인항공기가 지면에 가깝게 운용될 시에는 매우 낮은 RSRP(reference signal received power)로 인해 신호가 잡히지 않는 상황이 비행 도중 자주 발생하였으며, 이를 보완하기 위해 근거리 통신을 도심 지역과 같은 4G 통신이 어려운 지역에서 결합하여 활용하는 방법이 제시되었다.

#### (다) 전파특성 모델링 기법 조사

##### ① LTE 전파 모델

LTE 신호의 경우 도심(urban)·교외(suburban)·지방(rural) 지역으로 전파 손실 상황을 나누어 이론적으로 정립된 여러 전파 손실 모델에 대한 비교를 한 바 있다[5]. 연구에 사용된 전파 모델로는 Stanford University Interim (SUI) 모델, Okumora 모델, COST-231 Hata 모델, COST-231 Walfisch-Ikegami 모델, Ericsson 9999 모델로 총 5가지이다. 다섯 모델에 대한 전파 손실 상황별·주파수별 전파 손실을 계산한 결과, 대체로 SUI 모델이 가장 낮은 전파 손실을, COST-231 Hata 모델이 가장 높은 전파 손실 결과를 보였다. 또한 Ericsson 9999 모델은 도심과 같은 밀집 구역에서의 전파 손실 구현을 목적으로 설계된 모델이므로 교외 및 지방 지역에서의 전파 손실을 정확히 계산해 내지 못한다는 결론을 내렸다.

##### ② 다중 경로 모델

다중 경로 전파 손실 모델은 2008년 3GPP Release 8에 전파 수신자 및 수신 환경을 구분한 세 가지 프로파일이 제시된 바 있다[6]. 이 프로파일은 전파 신호를 시간에 따른 여러 이산 신호로 나누어 각각의 이산 신호의 상대 전력을 정의한 것으로, 신호를 프로파일에 따라 합성곱(convolution)하여 다중 경로 전파 손실을 모델링할 수 있다. 앞서 소개한 전파 모델 모두 각각의 다중 경로 프로파일이 존재하며, 주파수 및 전파 환경에 따른 다중 경로 프로파일이 각 모델마다 존재한다.

#### (라) V2V 거리측정 센서 시제품 조사

일반적으로 무선 Radio Frequency (RF) 기반 측위시스템을 사용하여 Transmitter(TX)와 Receiver(RX) 간의 전파시간으로부터 TOA방식으로 V2V 거리측정이 이루어진다. TOA 방식의 위치추정 정확도는 해당 RF 신호의 대역폭에 비례한다. 따라서 정밀한 위치 측정 결과를 얻기 위해 광대역의 신호가 V2V 거리측정에 있어 선호된다. 현재 UWB, Wi-Fi, ZigBee 시스템이 TOA방식의 위치추정에 사용된다.

##### ① Ultra Wideband (UWB) Ranging Sensor

UWB는 낮은 전력으로 매우 넓은 대역에 걸쳐 대용량의 정보를 전달하는 무선통신 기술이다. 포괄적으로는 500 MHz 이상의 대역폭을 사용하는 무선통신, 중심 주파수에 대응하는 대역폭(비대역폭)이 20~25% 이상인 초광대역 무선통신을 뜻한다. 소비전력이 적고, 광대역을 사용하여 방해전파나 multipath에 강한 것이 특징이다. 넓은 대역을 사용하기 때문에 위치추정의 정밀도가 높고, 오차도 cm 수준이다. Ubisense사의 Ubisense series 7000의 경우 160 m 정도 떨어진 거리까지 작동하며 정확도는 15 cm 정도이다. 태그는 0.1~20 Hz 정도의 업데이트 속도를 갖는다. BeSpoon사의 SpoonPhone과 tag는 평균 2.5 Hz 정도의 업데이트 속도를 가지고, LOS에서 880 m 정도 떨어진 거리까지 사용할 수 있으며 10 cm 정도의 정확도를 제공한다. Decawave사의 DW1000은 IEEE 802.15.4-2011 UWB 규격에 맞는 낮은 전력의 CMOS 칩으로 구성된 모듈이고 two-way-ranging (TWR) 방식으로 이상적인 환경에서는 300 m 떨어진 거리까지 작동하며, 10 cm 정도의 정확도를 제공한다. 실시간으로 움직이는 tag의 위치 추정의 경우에는 TOA, TDOA 방식 모두 x,y 방향으로 각각  $\pm 30$  cm 정도의 정확도를 제공한다[7]. Time domain사의 P440의 경우 열린 공간에서는 240 m, 평지에서는 1000 m까지 작동하고, 3 sigma 수준의 정밀도는 2.3 cm, 정확도는 2.1 cm 수준이다[8].

## ② Wi-Fi

Wi-Fi의 경우 측정 스테이션(measuring station)이 클라이언트 스테이션(client station)에 DATA 프레임을 전송하고 ACK를 수신할 때까지 대기한다. 클라이언트 스테이션에 DATA를 전송한 시각으로부터 ACK를 수신할 때까지 걸리는 시간이 time of flight(TOF)이므로 해당 시간으로부터 V2V 거리를 측정할 수 있다. Wi-Fi의 경우 150 m 떨어진 지점까지 측정할 수 있으며, 오차는 5~15 m로 상대적으로 큰 오차를 갖는다.

## ③ Zigbee

IEEE 802.15.4, 2 MHz의 좁은 대역에서 ZigBee 시스템을 사용하여 TOA 방식으로 거리를 추정할 수 있다. 상대적으로 좁은 대역을 사용하기 때문에, 정밀한 위치 추정결과를 얻기 위해 TOA의 소수점 아래 부분을 샘플링 간격 사이에서 추정하는 알고리즘 개발에 관한 연구가 진행되었고, 해당 연구에서 신호 대 잡음비(SNR)가 8 dB일 때 50 cm 정도의 정확도를 보인 바 있다[9]. 하지만 이 방식을 이용한 상용화된 제품은 아직 알려진 바 없다.

## (5) MLAT 측위 엔진 알고리즘 구축

### (가) MLAT 아키텍처 조사

2000년대 초 GPS 안전성에 대한 문제가 제기되어 ADS-B를 지상감시로 사용한 경우에는 ADS-B 데이터의 유효성을 검증할 수 있는 장비와 함께 사용할 것이 권고되었고, 그 대안기술 혹은 유효성 검증장비로 MLAT이 주목을 받게 되었다. MLAT은 SSR과 같이

독립적으로 표적을 감시 할 수 있으며 수신기의 분포에 따라 정밀도가 달라진다. MLAT 시스템은 질문기(Interrogator)의 유무에 따라 능동형 MLAT과 수동형 MLAT으로 나뉜다. 수동형 MLAT은 SSR의 질문기에 반응하는 트랜스폰더 응답신호나, 주기적으로 송출되는 자동방송 신호인 1090ES 신호를 이용하여 표적위치를 계산한다. 이에 반해 능동형 MLAT은 독자적으로 구비된 질문기를 이용하여 트랜스폰더의 응답을 유도하고 무인기로부터 송출신호를 받아 표적의 위치를 계산한다[10].

ADS-B 시스템은 항공기의 위치를 다른 항공기 및 지상기반 송수신기로 계속 방송하며, ADS-B in과 ADS-B out이 모두 장착된 항공기는 이를 수신하여 사용할 수도 있다. 현재 ADS-B 시스템의 트래픽은 일정량의 상용(commercial) 및 일반(GA) 항공기 정도만 감당할 수 있도록 설계되었다. 미래에 사용될 sUAS의 예상 수는 기존의 ADS-B 시스템의 무선 주파수(RF) 구성 요소 및 지상 기반 송수신 장치에 과부하를 줄 수 있을 정도로 많기 때문에, 도심 저고도 무인항공기 관제에 있어서는 ADS-B가 적합하지 않으며, 추후 충돌 방지 시스템의 구축에 있어 제한된 ADS-B out 사용으로 활용도가 감소한다. NASA의 항공 운영 및 안전 프로그램(AOSP)의 일환인 UTM(UAS Traffic Management) 프로젝트에 의해, 자동차 산업을 위해 개발된 DSRC 시스템이 sUAS(Small Unmanned Aerial System)의 감지 및 회피를 위해 설치 및 테스트 되었고, 운송수단의 제어에 셀룰러 4G 시스템의 접목도 시도되었다[4].

#### (나) MLAT 시스템 구성 방법

UTM 운영을 위해 DSRC와 LTE/5G 중 어떠한 통신 방법을 택할지는 아직 정해진바 없는 것으로 알려졌지만 본 연구에서는 두 방식 모두 사용된다고 가정하였다. LTE/5G는 그 운영 특성상 일반적으로 위성항법 시스템 시각 정보를 이용해 UTC(Coordinated Universal Time)로 동기화가 되어있으며 도심에서는 기지국이 밀집되어 있기 때문에 MLAT으로 위치측정을 하기에 적절한 인프라(V2I)가 될 수 있다. 반면 DSRC는 버스도착정보 시스템에 주로 사용되고 있으며 connected car와 무인항공기 V2V 통신을 위한 기술개발이 진행 중이다. 최근 LTE/5G와 DSRC를 이용한 거리측정 기술개발이 활발히 이루어지고 있으며 5G는 약 10 m [11], DSRC는 2 m 가량의 거리측정 정확도가 보고되었다[12]. DSRC의 거리측정 정확도는 5G 보다 우수하지만 현재 인프라로 구축되어 있지 않기에 단독 MLAT 측위를 위한 인프라로 구축하는 것 보다 LTE/5G 기지국 분포가 열악한 지역을 보강하는 V2I 보조 센서로서의 역할이 더 적절할 것이다. DSRC도 위성항법 시스템을 이용하여 시각 동기하여 MLAT 시스템을 구성할 수 있지만 이러한 방법은 복잡한 시스템 개발이 수반될 수 있기에 [12]에서 제안한 것처럼 주기적인 쌍방향 통신을 이용해 절대 거리를 측정하는 것이 더 바람직해 보인다.

#### (6) MLAT 수신기 시각 동기화 방법 연구

MLAT에서 측위는 무인기의 트랜스폰더에서 송출되는 신호를 여러 대의 수신기가 해당 신호를 수신함으로써 이루어진다, 이렇게 수신된 신호를 바탕으로 하나의 수신기를

기준으로 하여 다른 수신기 간의 TDOA(Time Difference of Arrival)가 계산된다. 해당 TDOA 값으로부터 여러 방식의 추정기법을 통해 표적의 위치를 추정하게 된다. 따라서 정밀하고 정확한 위치 추정값을 위해서는 수신기들 간의 시각 동기화가 매우 중요하며, 수신기들의 시각 동기화가 위치 정확도에 직접적인 영향을 미치게 된다[13].

현재 사용되는 시각 동기 방식은 크게 공통시각(Common Clock) 시스템과 분산시각(Distributed Clock) 시스템으로 나눌 수 있다. 분산시각 시스템으로는 트랜스폰더 동기 시스템(Transponder Synchronized System), 독립 GNSS 동기시스템(Standalone GNSS Synchronized System), 공통 시계 GNSS 동기 시스템(Common View GNSS Synchronized System) 등이 있다.

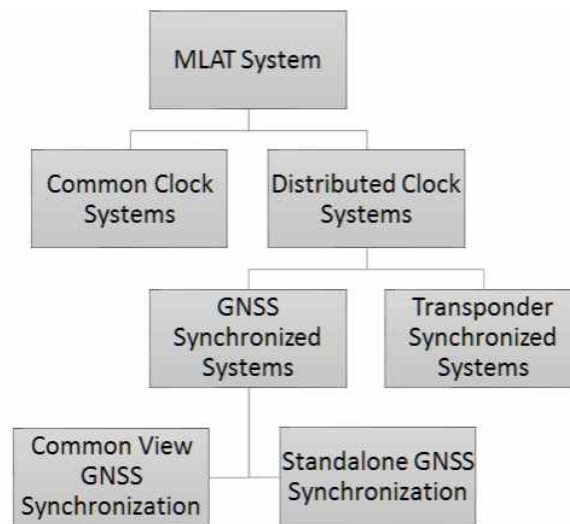


그림 19. MLAT 수신기 시각 동기화 방법

#### (가) 공통시각 시스템 (Common Clock System)

수신기에서 무인기로부터 송출된 RF (Radio Frequency) 신호를 수신한 후 IF (Intermediate Frequency) 신호로 변환하고 아날로그 링크를 통해 중앙처리 장치(CPS)로 전달한다. 중앙처리장치에서는 IF 신호를 각각의 수신기의 공통시각을 기준으로 기저대역(baseband)신호로 변환한 후 Cross-Correlation TDOA를 측정하여 표적의 위치를 계산한다. 수신기들 간의 시각 동기는 불필요하지만 수신기와 중앙처리장치 간의 아날로그 링크의 group delay는 정밀하게 보정되어야 한다. 정밀도는 2~20 ns이다.

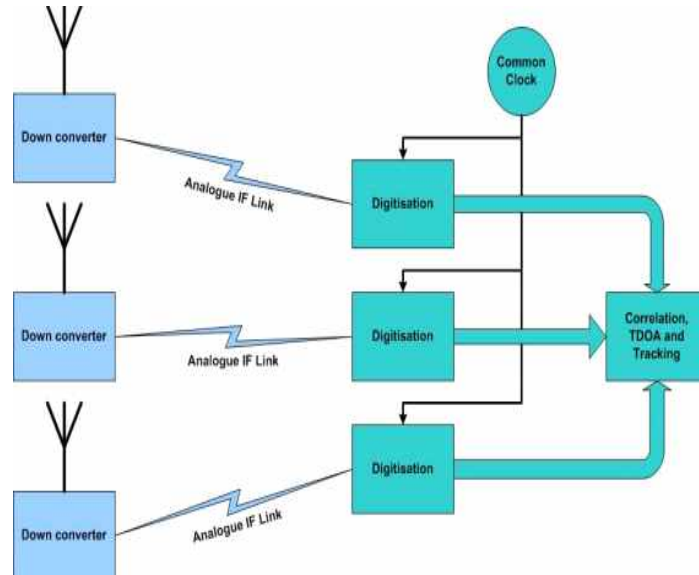


그림 20. 공통시각 시스템  
(Common Clock System)

이에 반해 분산시각 시스템은 수신기가 수신한 자료를 기저대역으로 변환한 후 digitization, code extraction과 TOA 측정을 모두 수행한다. 해당 정보는 디지털 링크를 통해 중앙처리장치로 전달되고, 중앙처리장치에서는 각 수신기의 도달시각(TOA)으로부터 두 쌍의 각 수신기 간의 TDOA를 계산하여 표적의 위치를 추정한다. 따라서 분산시각 시스템은 한 지역에서 수신기들 간의 정밀한 시각동기가 요구되며, 시각 동기 방식에 따라 기준 트랜스폰더 시각동기 시스템, 독립(Standalone) GNSS 시각동기 시스템, 공통시계 (Common View) GNSS 시각동기 시스템으로 분류된다.

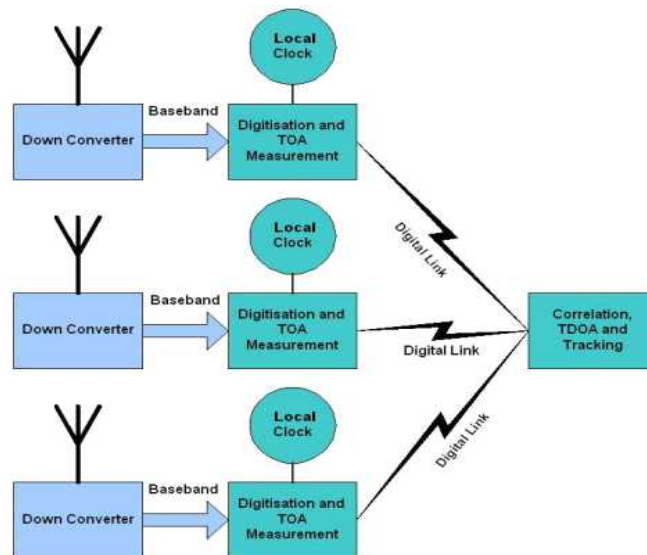


그림 21. 분산시각 시스템  
(Distributed Clock System)

(나) 기준 트랜스폰더 동기 시스템 (Transponder Synchronized System)

기준 트랜스폰더 동기 시스템은 기준 트랜스폰더로부터 송신된 신호를 사용하여 각각의 수신기들 간의 시각을 동기화 한다. 동기화 트랜스폰더는 중앙 처리기와 함께 배치될 필요는 없지만 기준 트랜스폰더와 수신기 간의 LOS는 확보되어야 한다. 이를 위해 긴 mast나 타워가 사용되곤한다. 기준 트랜스폰더 동기 시스템의 시각동기화 정밀도는 2~20 ns이다.

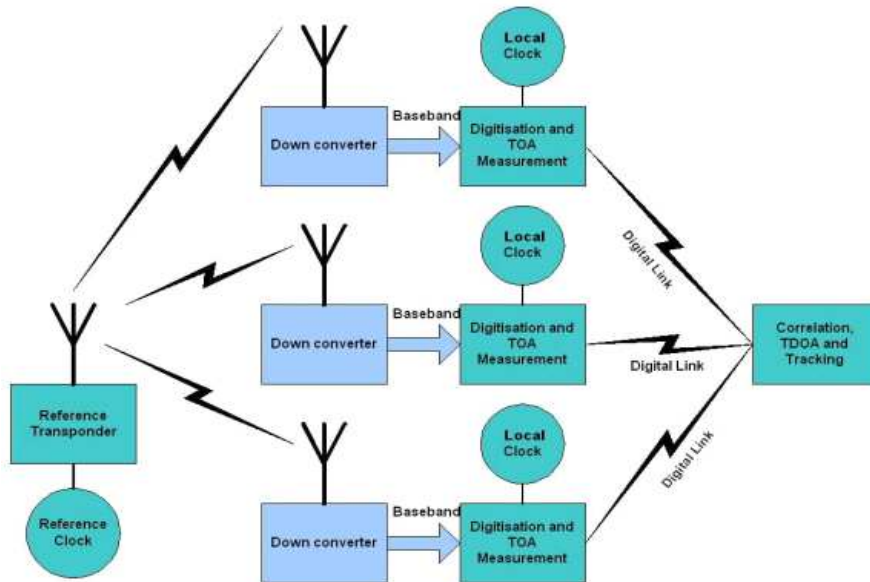


그림 22. 기준 트랜스폰더 동기 시스템  
(Transponder Synchronized System)

(다) 독립 GNSS 동기 시스템 (Standalone GNSS Synchronized System)

독립 GNSS 동기 시스템은 GNSS와 같은 외부 공통 시각 기준을 사용하여 각 수신기에 공통된 시각 기준을 제공한다. GPS의 UTC는 100 ns 이내의 정밀 시각을 제공하며 해당 시각은 수신기에 대한 공통 시각 기준으로 사용될 수 있다. MLAT의 경우 절대 시각이 아닌 주변 수신기 간의 시간 차이에 관심이 있으므로, GPS disciplined oscillator를 각 지역에서 사용하면 10~20 ns 정도의 정밀도로 동기화 시킬 수 있다. 시스템 무결성 (integrity)은 GNSS 수신기 무결성에 의존하며 별도의 높은 타워나 디지털 링크가 필요하지 않은 간단하고 쉬운 방법의 시각 동기 시스템이다.

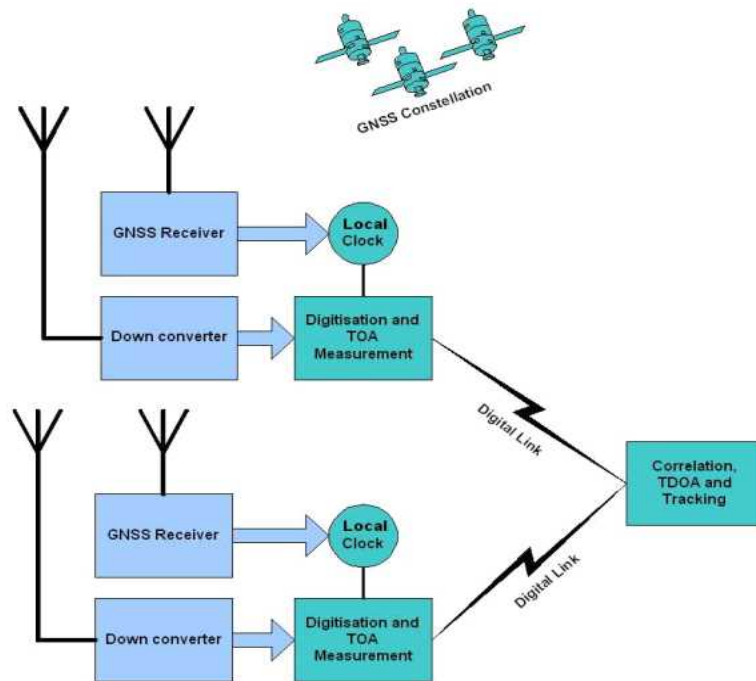


그림 23. 독립 GNSS 동기 시스템  
(Standalone GNSS Synchronized System)

(라) 공통 시계 GNSS 동기 시스템 (Common View GNSS Synchronized System)

수신기들 간의 독립 GNSS 동기 시스템이 정확하지 않을 경우에는, 공통 시계 GNSS 동기 시스템이 사용된다. 공통 시계 GNSS 동기 시스템은 주변에 LOS인 모든 GNSS 수신기의 GPS 위성정보(예를 들어 수신기 1에서 수신한 위성 A 정보, 수신기 2에서 수신한 위성 A 정보)의 Differential Data를 사용하여 error source를 제거하며 동기화 품질에 대한 Integrity 확인을 한다. 시각동기 정밀도는 2~5 ns 정도로 매우 정밀한 편이다.

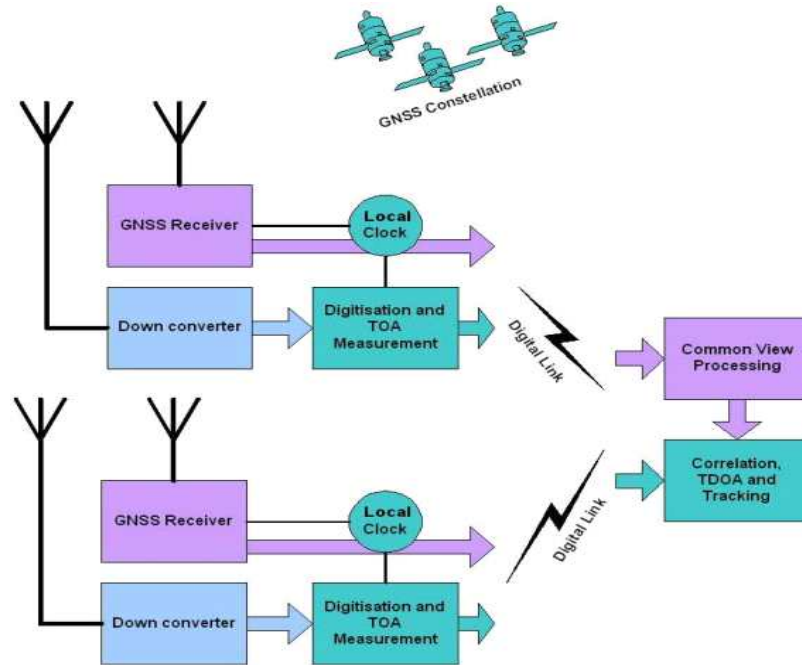


그림 24. 공통 시계 GNSS 동기 시스템  
(Common View GNSS Synchronized System)

#### (7) 기지국 분포를 이용한 MLAT 측위 성능 연구

무인항공기 관제는 DSRC(Dedicated Short Range Communication)와 LTE/5G를 이용한 관제 기술을 기반으로 할 수 있다. UTM 운영을 위해서 무인항공기는 비행 정보를 DSRC 또는 LTE/5G 통신망을 이용하여 지상 기지국으로 전달할 것으로 예측된다[4]. 하지만, 도심 저고도 지역에서 무인항공기는 위성항법 신호 음영지역을 수분 이상 비행할 가능성이 크므로 UTM 메시지에 위성항법 기반 위치 측정값을 포함 시킬 수 없다. 현재 위성항법 시스템을 제외하면 무인항공기에서 측위가 가능한 센서는 IMU(Inertial Measurement Unit)와 같은 관성 센서이지만 이러한 센서는 수십 초만 지나도 수십 미터의 위치 오차를 일으키기 때문에 단독 위치측정 센서로는 사용될 수 없다. 카메라 이미지와 라이다(Lidar)를 이용한 위치측정도 가능하지만, 위치측정의 불확실성과 센서의 무게 및 복잡한 신호처리의 어려움으로 소형 무인항공기에는 적용이 어렵다. 이와 같이 도심 저고도 위성항법 시스템 음영지역에서의 안전한 비행을 위한 대체항법 시스템 기술 중에 현재까지 상용화된 신뢰성 있는 기술은 존재하지 않는 것이 현실이다. 본 연구에서 제안한 Multilateration 방식은 DSRC/LTE 신호와 같은 기회 신호(Signals of Opportunity)를 사용하며, 주변 무인항공기를 이용한 cooperative positioning도 적용하여 관제 위치정확도를 극대화하는 방법이다.

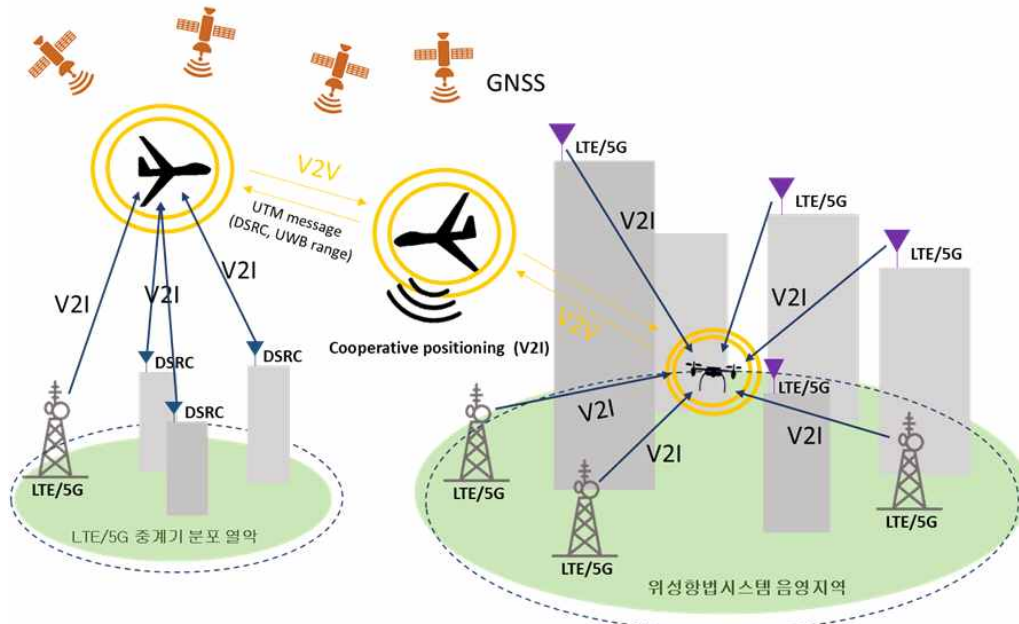


그림 25. LTE/5G, DSRC, 주변 무인항공기를 이용한 관제 시스템 아키텍처

#### (가) 도심 저고도(500ft 미만) 무인항공기 관제 알고리즘

본 연구에서 제안된 무인항공기 관제 방식은 LTE/5G, DSRC 기지국과의 거리측정 값들과 주변 무인항공기간의 UWB 거리측정 값을 사용하며 이러한 측정값들은 각기 다른 시각에 이루어져 위치측정에 사용될 시 이 시각 차이를 보정 해주어야 한다. 시각 차이를 보정 해주는 방식은 측정값이 빨리 이루어지는 순서로 위치를 업데이트하는 forward time propagation 방식과 최신 측정값을 먼저 사용하는 backward time propagation 방식으로 분류할 수 있다. 예를 들면, backward time propagation 방식은 LTE/5G 신호를 이용한 MLAT 측위가 가장 먼저 이루어지고 DSRC와 UWB 거리측정 값을 이용하여 무인항공기 위치와 covariance matrix를 업데이트한다. 본 연구에서는 backward time propagation 방식을 택하였으며 이 방식은 기존 MLAT 측위 알고리즘과 신호처리 프로세스를 그대로 유지하며 signals of opportunity와 cooperative positioning 알고리즘을 후처리로 추가할 수 있는 장점이 있다. Backward time propagation positioning 알고리즘이 수행되는 프로세스는 다음의 그림과 같다. 다음 프로세스에서 LTE/5G는 one-way 통신으로 TDOA 방식으로 측위를 수행하며 DSRC와 UWB는 two-way 통신으로 상대 거리 측정값을 얻는다

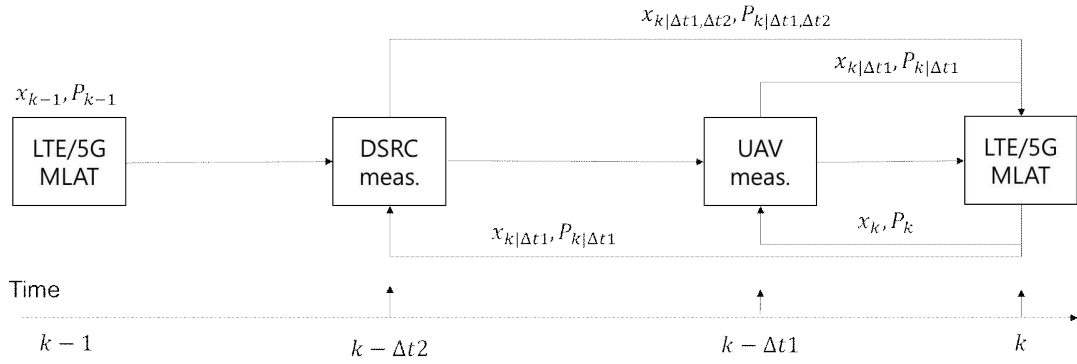


그림 26. MLAT 관제와 cooperative positioning 알고리즘 수행도

(나) 도심 저고도(500ft 미만) 무인항공기 관제 알고리즘 시뮬레이션

제안된 positioning 알고리즘의 성능 및 민감성을 측정하기 위해 2개의 시뮬레이션 환경을 구성하였다. MLAT은 TDOA 기법을 사용하므로 최소한 3개의 LTE/5G 수신기의 line-of-sight이 확보되어야 한다. 첫 번째 환경은 4개의 LTE/5G 기지국, 2개의 DSRC 기지국, 2대의 무인항공기로 구성되어 측위가 원활하게 이루어질 수 있는 환경을 나타내었고 두 번째 환경은 3개의 LTE/5G, 1개의 DSRC, 1대의 무인항공기로 측위에 열악한 환경으로 구성하였다. 각 시뮬레이션은 500 초 동안의 저속 등속도 비행에서 수행되었고 LTE/5G, DSRC, UWB 거리측정 정확도는 문헌 조사를 기반으로 정하였다. 시뮬레이션 실행 시 true distance에 거리측정 정확도를 반영한 랜덤 오차를 더하여 현실적인 거리측정 값을 얻었고 이를 Asynchronous Kalman Filter를 사용하여 optimal 한 위치측정 값을 산출하였다. 위치측정 통계의 신뢰성을 위해 각 시뮬레이션 당 500번의 실험이 반복되었다.

표 1. 원활한 LTE/5G 수신기, DSRC 기지국, 주변 UAV 분포

|   | LTE/5G 수신기 위치  | DSRC 기지국 위치  | 주변 UAV 위치    |
|---|----------------|--------------|--------------|
| 1 | (100,100,10)   | (50,50,10)   | (30,30,10)   |
| 2 | (100,-100,10)  | (-50,-50,10) | (-10,-40,10) |
| 3 | (-100,100,10)  |              |              |
| 4 | (-100,-100,10) |              |              |

표 2. 열악한 LTE/5G 수신기, DSRC 기지국, 주변 UAV 분포

|   | LTE/5G 수신기 위치 | DSRC 기지국 위치 | 주변 UAV 위치  |
|---|---------------|-------------|------------|
| 1 | (100,100,10)  | (50,50,10)  | (30,30,10) |
| 2 | (100,-100,10) |             |            |
| 3 | (-100,100,10) |             |            |

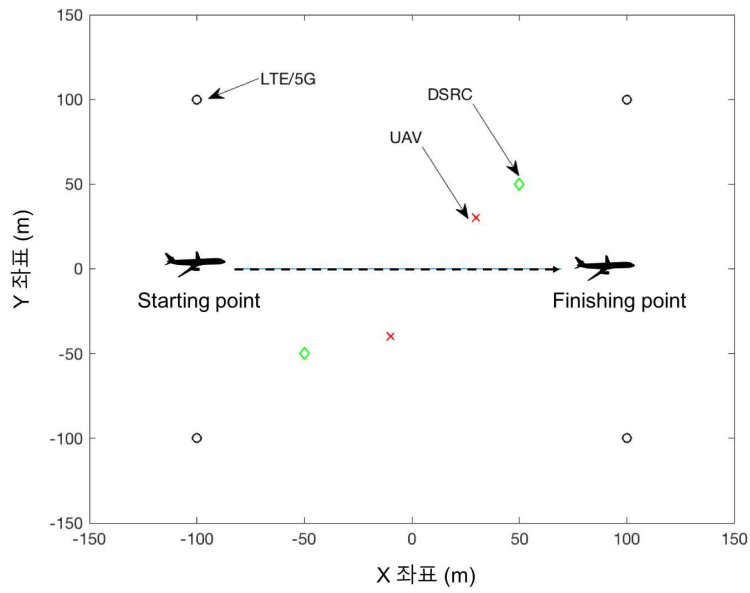


그림 27. LTE/5G, DSRC, UAV 분포와 무인항공기 비행경로

표 3. 거리측정 정확도

|                  | LTE/5G | DSRC | 주변 UAV |
|------------------|--------|------|--------|
| 거리측정<br>정확도 (미터) | 10     | 2    | 1.4    |

표 4. 거리측정 시간차

|         | LTE/5G | DSRC       | 주변 UAV   |
|---------|--------|------------|----------|
| 시간차 (초) | N/A    | 0.04, 0.08 | 0.1, 0.2 |

위의 시뮬레이션 환경에서 측위 정확도를 추정한 결과를 다음 표와 그림에 정리하였다. 무인항공기 관제는 수평 위치 정확도만을 추정하였으며 고도는 기압고도계를 사용한다고 가정하였다.

표 5. 위치측정 정확도 통계 (500 second duration)

|                                 | LTE/5G | LTE/5G, DSRC | LTE/5G, DSRC, UAV |
|---------------------------------|--------|--------------|-------------------|
| x 축 오차 (RMS, 미터)<br>-원활한 기지국 분포 | 2.0    | 1.25         | 0.83              |
| y 축 오차 (RMS, 미터)<br>-원활한 기지국 분포 | 1.99   | 1.25         | 0.67              |
| x 축 오차 (RMS, 미터)<br>-열악한 기지국 분포 | 3.4    | 1.5          | 1.2               |
| y 축 오차 (RMS, 미터)<br>-열악한 기지국 분포 | 2.6    | 2.4          | 2.6               |

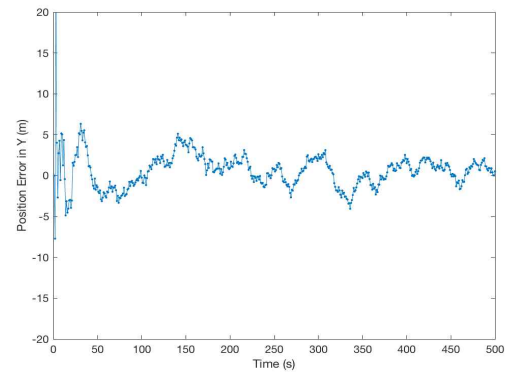
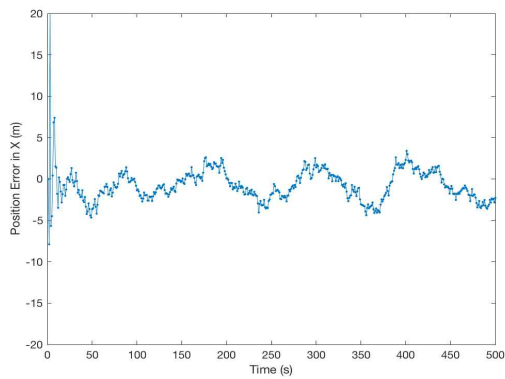


그림 28. LTE/5G 기반 MLAT 수평위치오차 (원활한 기지국 분포)

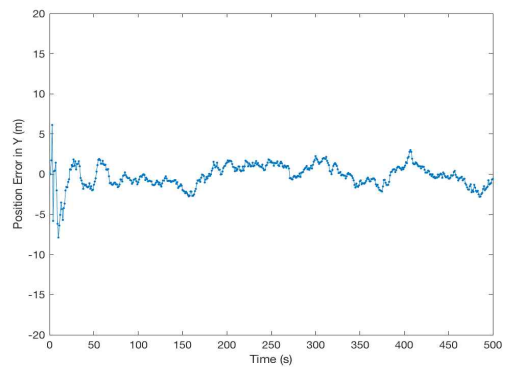
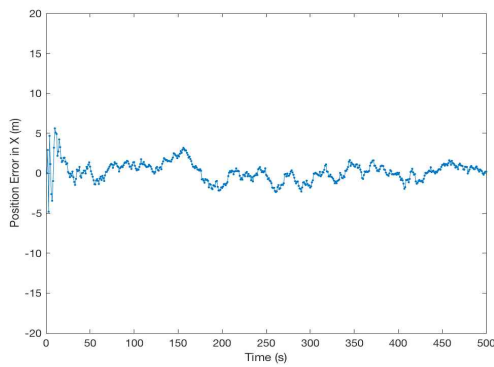


그림 29. LTE/5G, DSRC 기반 MLAT 수평위치오차 (원활한 기지국 분포)

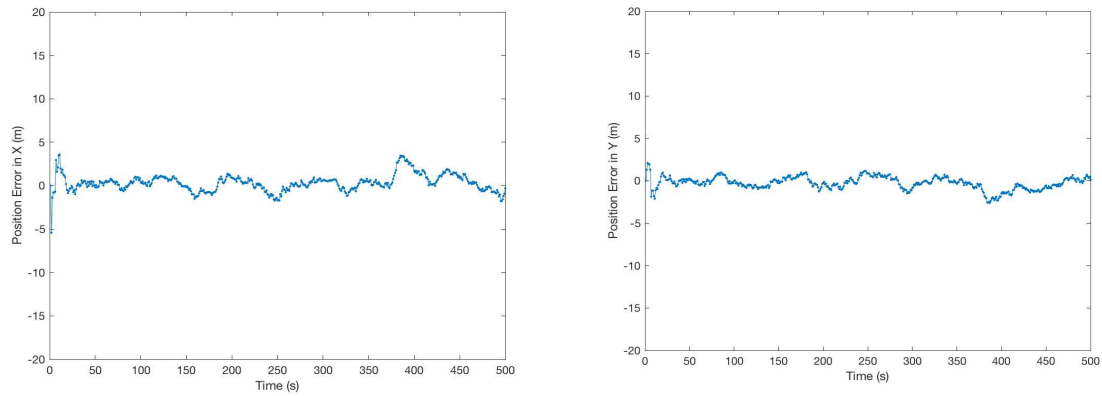


그림 30. LTE/5G, DSRC, UAV 기반 MLAT 수평위치오차 (원활한 기지국 분포)

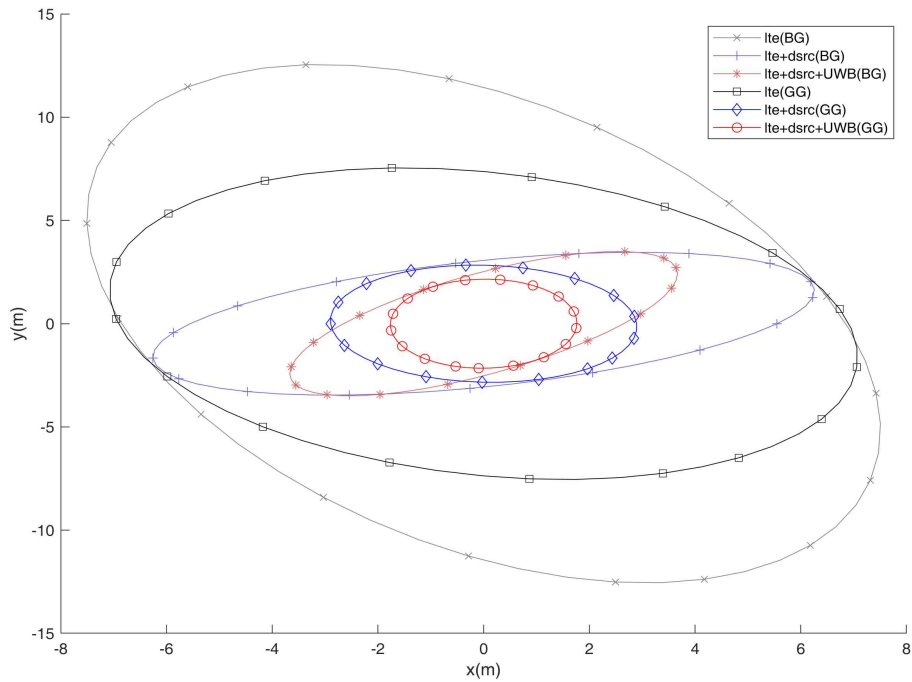


그림 31. 각 측위 조건에 따른 측위오차 confidence ellipse (99.999%)

## 나. 2차년도 연구수행내용

### (1) 도심 5G 전파 특성 연구

5G 신호의 경우 3GPP 기준이 정립되기 전 특정 초고주파 대역에 대해 실험적으로 전파 손실을 측정하고, 그 측정값을 3G 및 4G 전파 손실 모델에 적용하여 5G 초고주파 신호의 전파 손실 모델을 만든 바가 있다[14]. 연구에서는 당시 산업에서 5G 초고주파 대역으로 주목하고 있던 28 GHz와 38 GHz 전파를 수신하여 그 측정값을 기존의 LTE 전파 모델 결과에 보간하여 5G 전파 모델을 제시하였다. 위 연구에서는 일반적으로 전파 손실 정확도가 높다고 밝혀진 SUI 모델과 경로에 따른 전파 손실이 거의 없을 때 이상적인 모델인 Free Space

모델을 합친 모델과 실측값을 보간하였다.

2019년 4월 5G New Radio (NR) 신호의 첫 3GPP 기준이 Release 15를 통해 정립되었다. Release 15에는 2020년까지 만족해야 하는 5G NR 신호의 3가지 주요 전파 특성 및 세부 전파 특성을 포함하고 있다. 주요 전파 특성은 다음과 같다:

- eMBB (enhanced Mobile BroadBand): > 10 Gb/s 최대 데이터 레이트
- URLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communications): < 1 ms 지연율
- mMTC (massive Machine Type Communications): > 1 M/km<sup>2</sup> 연결 수용력

세부 전파 특성은 표 6에 소개되었다.

표 6. 5G NR 신호 세부 전파 특성 (www.spectrum.ieee.org)

| Metric                     | Requirement                                                              | Comments                                                              |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Peak Data Rate             | DL: 20 Gb/s<br>UL: 10 Gb/s                                               | Single eMBB mobile in ideal scenarios assuming all resources utilized |
| Peak Spectral Efficiency   | DL: 30 b/s/Hz (assuming 8 streams)<br>UL: 15 b/s/Hz (assuming 4 streams) | Single eMBB mobile in ideal scenarios assuming all resources utilized |
| User Experienced Data Rate | DL: 100 Mb/s<br>UL: 50 Mb/s                                              | 5% CDF of the eMBB user throughput                                    |
| Area Traffic Capacity      | Indoor hotspot DL: 10 Mb/s/m <sup>2</sup>                                | eMBB                                                                  |
| User Plane Latency         | eMBB: 4 ms<br>URLLC: 1 ms                                                | Single user for small IP packets, for both DL and UL (eMBB and URLLC) |
| Control Plane Latency      | 20 ms (encouraged to consider 10 ms)                                     | Transition from Idle to Active (eMBB and URLLC)                       |
| Connection Density         | 1M devices per km <sup>2</sup>                                           | For mMTC                                                              |
| Reliability                | 99.9999% success prob.                                                   | 32 L2 bytes within 1 ms at cell edge                                  |
| Bandwidth                  | >100 MHz; up to 1 GHz in > 6 GHz                                         | Carrier aggregation allowed                                           |

이를 바탕으로 저지연 고정밀 5G NR 프로토타입 측위 시스템을 연구하고 있는 Fraunhofer 집적회로연구소 (Fraunhofer Institute for Integrated Circuits)에서는 5G NR 측위 시스템의 측위 성능을 예측하여 소개하였다. 그림 32는 Fraunhofer 집적회로연구소에서 5G NR 및 LTE, GNSS, UWB 등을 이용한 측위 시스템의 서로 다른 환경별 측위 성능을 나타낸 그림이다. 특히, 5G NR 기지국의 경우 실내나 터널과 같이 기존 LTE나 GNSS 신호가 수신되지 않던 환경에도 설치될 것으로 예측되어 상대적으로 더 높은 측위 범위를 가질 것으로 예측된다. 또한, 발표된 5G NR 전파 특성 기준에 따르면 5G NR 신호의 샘플링 레이트는 최대 122.88 MHz로 LTE 신호의 샘플링 레이트의 4배이다. 이에 따라 5G 측위 시스템은 LTE 측위 시스템의 4배 정도의 측위 정확도를 가질 것으로 보이며, 이는 Fraunhofer 집적회로연구소에서 예측한 수준과 일치한다.

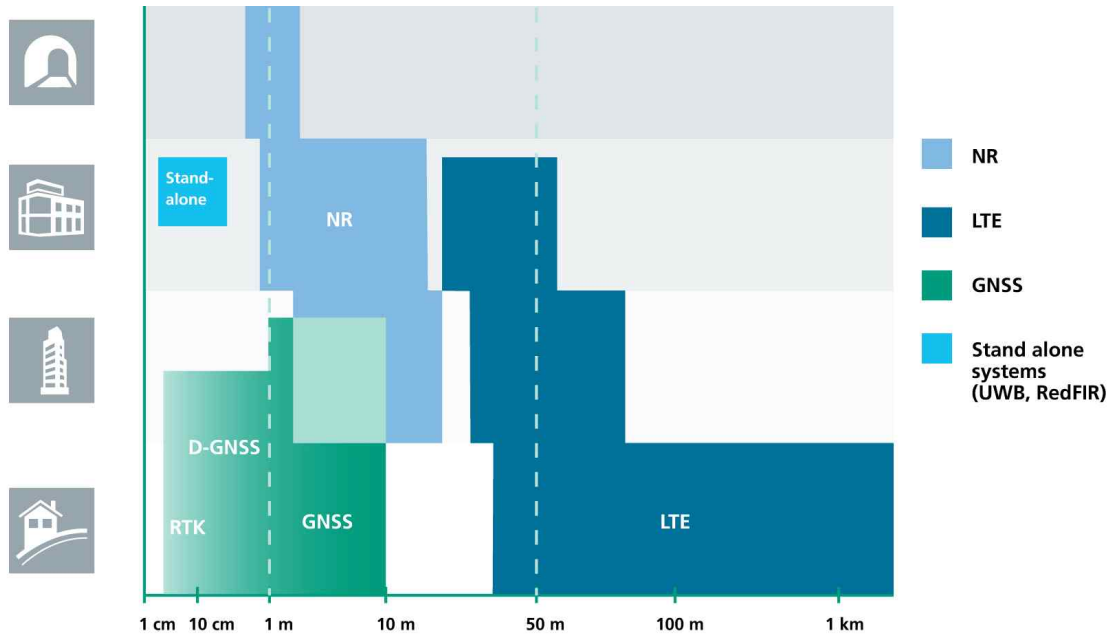


그림 32. 5G NR, LTE, GNSS 및 독립형 측위 시스템의 측위 환경별 측위 성능  
(www.iis.fraunhofer.de)

5G NR 신호는 기존 LTE 측위 시스템에서 사용되었던 셀 ID 기반 혹은 TOA/TDOA 기반 측위 기법의 정확도를 크게 끌어올릴 것으로 보인다. 또한 대용량 다중 연결이 가능함에 따라 다중 V2V 통신을 통해 수신기 간 상대 거리 계산 결과를 혼합하여 도심 지역의 측위 상황에서 발생할 수 있는 다중 경로 현상에 의한 측위 정확도 저하 효과를 크게 감소시킬 수 있을 것이다.

## (2) MLAT 측위 정보와 UWB/DSRC를 이용한 cooperative positioning 알고리즘 개발

### (가) Cooperative Positioning 알고리즘 조사

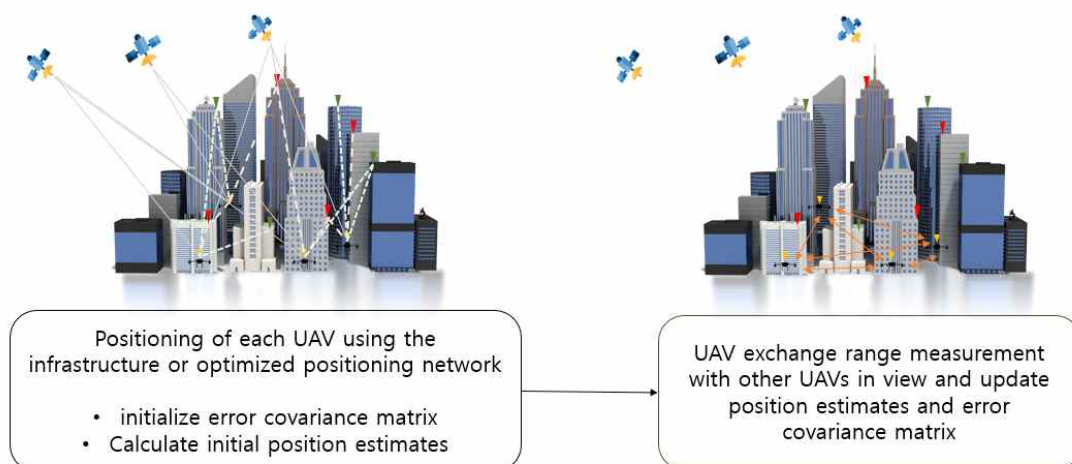


그림 33. Cooperative Positioning 개념도

Signals of opportunity 기반 측위가 보통 기존 인프라에 의해 발생하는 신호를 측위에 이용하는 방식이라면, Cooperative Positioning은 주위 무인항공기의 위치와 거리측정치를 사용하는 측위 방식이다. 이 방식은 주로 위성항법 시스템을 사용할 수 없는 환경을 가정하며 무인 이동체와의 상호 거리측정치만을 이용하여 상대 위치를 결정한다. 무인항공기들과의 거리측정은 UWB Ranging Sensor, 카메라, 초음파 등의 센서들이 주로 사용되었다[15], [16].

그림 34의 왼쪽 예시는 거리측정원의 종류/개수가 증가할수록 무인항공기의 측위 오차가 작아지는 것을 나타내고 있으며, 오른쪽 예시에서는 무인항공기간의 상대 거리 측정값과 측위 데이터 정보 교환을 통해(Cooperative Positioning) 향상된 측위 결과를 얻는 것을 도식화하여 나타낸 것이다.

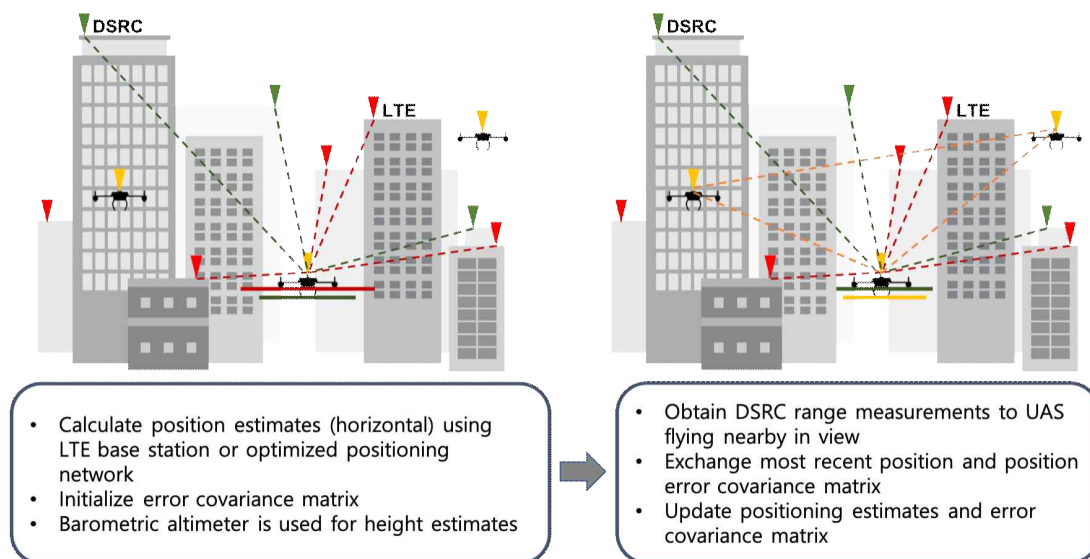


그림 34. 거리측정원의 종류/개수의 증가로 인한 무인항공기 측위 오차 감소 및 상대 거리 및 측위 정보 교환을 통한 향상된 측위 결과 획득

일반적으로 사용되는 RF 기반 상대 거리 추정 방법에는 신호 세기가 전파 거리의 제곱에 반비례하는 것을 바탕으로 거리를 추정하는 Received Signal Strength Indicator (RSSI), 신호가 관측된 시간을 기반으로 거리를 추정하는 Time of Arrival (ToA), 두 개 이상의 신호가 서로 다른 수신기에 수신된 시각 차이로 거리를 계산하는 Time Difference of Arrival (TDoA) 방식이 있다. Two-way 통신을 이용한 TOA 기반 거리측정(two-way ranging)에는 Single-sided two-way ranging(SS-TWR)과 Double-sided two-way ranging (DS-TWR) 방식이 존재한다.

Single-sided two-way ranging의 경우 무인항공기 각각의 local 시각(시계)을 사용하여 소요시간을 측정하고 이를 바탕으로 상대 거리를 추정한다. 이때 각각의 local 시각을 사용하기 때문에 응답하는데 걸리는 시간이 길어질수록 상대 거리 측정값의 오차가 커지게 된다. Double-sided two-way ranging의 경우 Single-sided two-way ranging을 기반으로 하여 두

번의 왕복 시간 측정치를 사용한다. 따라서 상대 무인항공기의 응답에 긴 지연이 존재하더라도 SS-TWR에 비해 작은 오차를 갖는 상대 거리 측정값을 계산할 수 있다. 각각의 무인항공기는 메시지 송수신 시각을 기록하여  $\hat{T}_{prop}$ 을 추정하며, 이때 시계오차는 20 ppm의 crystal 혹은 비대칭적인 응답시간에서도 picoseconds 수준이다. 이때 첫 번째 왕복 시간 측정치를 한번 재사용하면 3번의 메시지 교환으로도 Double-sided two-way ranging을 구현할 수 있다.

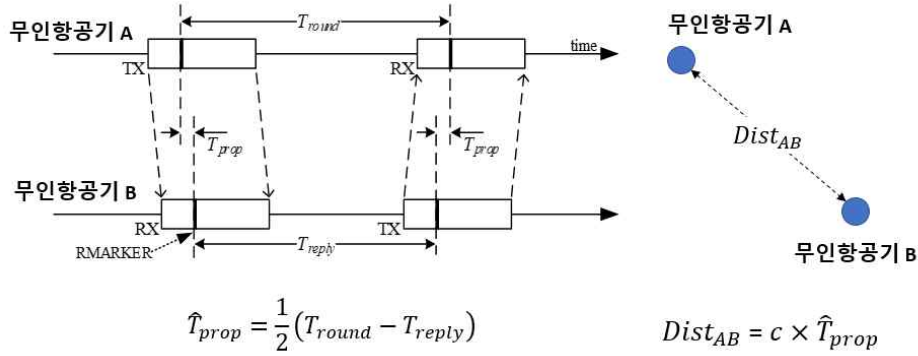


그림 35. Single-sided Two-way ranging을 통한 상대 거리 측정

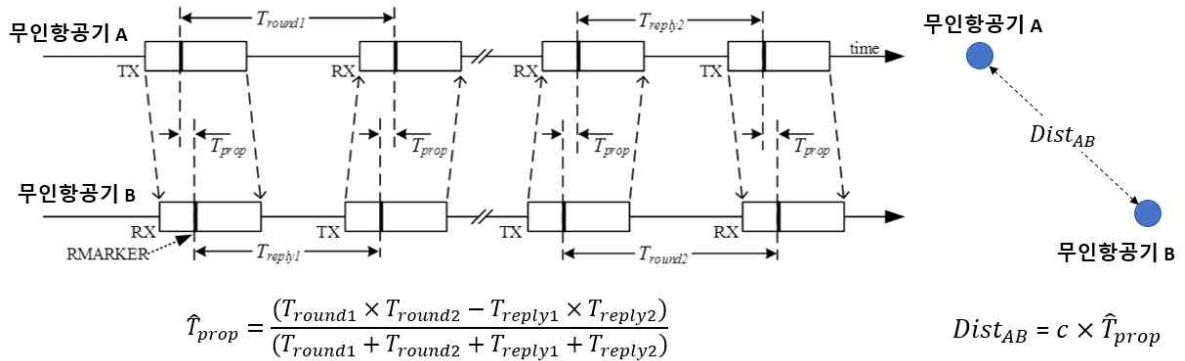


그림 36. Double-sided Two-way ranging을 통한 상대 거리 측정

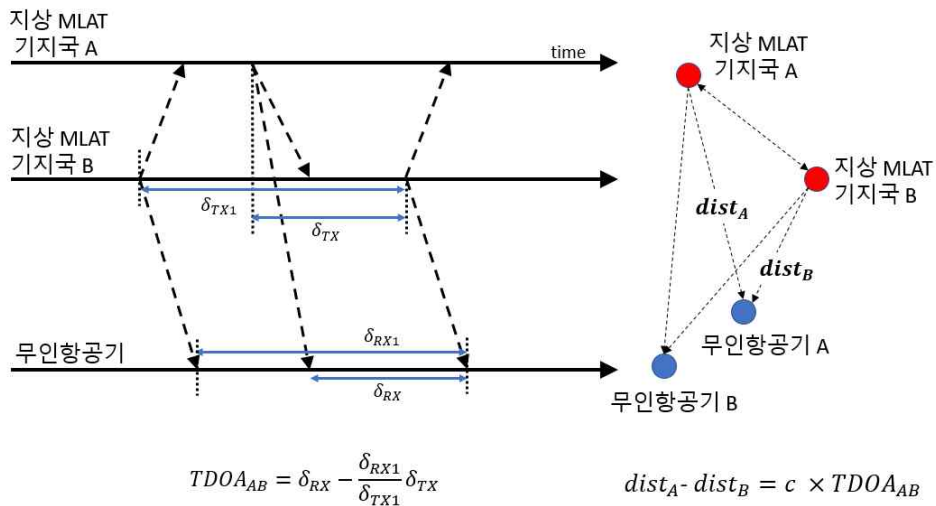


그림 37. One-way ranging, TDOA 기법을 이용한 무인항공기 측위

또한, 네트워크의 복잡도를 낮추기 위해 One-way ranging을 사용하여 MLAT 기지국에서만 전파를 송출하고, 무인항공기는 passive mode로 전파를 송출하지 않고 기지국으로부터의 전파를 수신하여 자신의 위치를 TDOA 기법으로 산출하도록 할 수 있다.

상대 거리 정보를 이용한 측위는 그림 38과 같이 상대 거리 측정 → 개별 위치계산 → 측위 알고리즘(Cooperative Positioning)의 세 가지 요소에 의해 수행된다. 각 단계에서의 정확도는 최종적인 위치 측위 정확도에 영향을 미치게 된다.

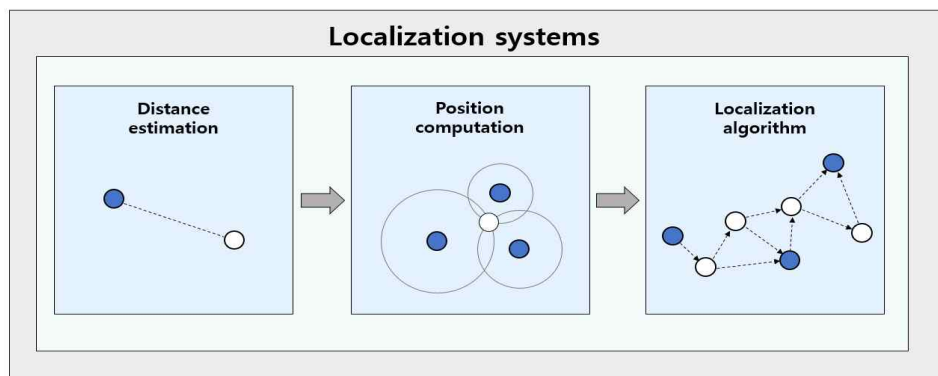


그림 38. 위치 측위를 위한 3가지 요소 및 순서도

Cooperative positioning에서 위치계산을 위해 다양한 알고리즘이 사용될 수 있다. 가장 편리한 방법은 Centralized Extended Kalman Filter를 사용하여 각 무인 이동체의 위치와 속도를 state로 정의하고 측정값은 무인 이동체와의 거리 측정값을 이용하는 것이다. 위성항법 시스템과 달리 무인 이동체 간의 상호 거리측정으로 위치를 결정하므로 ranging source와 user와의 covariance matrix를 identity matrix로 정의할 수 없어 측위 과정에서 실시간으로 갱신해 주어야 한다.

#### (나) Cooperative Positioning 구성 방법

주변 무인항공기와의 거리측정 값을 바탕으로 Kalman Filtering 등의 estimation 기법을 이용하면 지상 MLAT 기지국의 측위 정확도를 향상시킬 수 있다. 주변 무인항공기와의 거리측정은 DSRC 또는 UWB Ranging Sensor 등의 V2V 통신 기법을 사용할 수 있으며, 이 거리측정 값은 주변 항공기 ID 번호, 거리측정이 이루어진 시각 정보와 함께 지상 UTM 시스템으로 전송되어야 한다. 그림 39는 DSRC와 UWB range를 포함한 UTM 메시지를 나타내며 preamble은 LTE/5G 기반 MLAT 측위 시 메시지가 기지국에 도착한 시각을 정하기 위해 사용된다.

|          |                |                      |                     |                |
|----------|----------------|----------------------|---------------------|----------------|
| Preamble | Other messages | DSRC time, ID, range | UAV time, ID, range | Other messages |
|----------|----------------|----------------------|---------------------|----------------|

그림 39. MLAT 관제와 cooperative positioning을 위한 UTM 메시지 구조

주변 무인 항공기와의 거리측정은 DSRC 또는 UWB Ranging Sensor 등의 V2V 통신 기법을 사용할 수 있으며, 이 거리측정 값은 주변 항공기 ID 번호, 거리측정이 이루어진 시각 정보와 함께 지상 UTM 시스템으로 전송되어야 한다. 본 연구에서는 inter-vehicle 거리측정을 위해 UWB(10 cm, 1 sigma)와 DSRC(1 m, 1 sigma) 신호를 사용하였다.

각 거리측정 값에 시각 동기 오차를 무시할 수 있다고 가정하면, MLAT 시스템만을 사용한 측위 값의 오차는 식 1로부터 계산된다.

$$P = (G^T W^{-1} G)^{-1} \quad (1)$$

행렬  $G$ 는 거리측정원과 사용자 사이의 2차원의 기하 행렬이다. MLAT 시스템이  $m$  개의 LTE 기지국과,  $n$  개의 지상 DSRC 송수신기로 구성되어있다고 가정하면, 행렬  $W$ 는 거리측정원들의 공분산 행렬이며 각각의 거리측정원의 상대 거리 측정 정확도를 사용하여 식 2와 같이 대각행렬로 구성된다.

$$W = \begin{bmatrix} \sigma_{LTE,1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{LTE,2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{LTE,m}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{DSRC,1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{DSRC,2}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{DSRC,n}^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

MLAT 시스템을 이용한 무인항공기의 측위 이후 지정된 통신 채널을 통한 UTM 메시지 교환을 통해 무인항공기 간의 상대 거리 측정 정보와 주변 무인항공기의 측위 오차 공분산 값을 얻을 수 있다. 이때,  $i$ 번째 무인항공기의 측위 오차는 식 3과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_{Coor,i} = \sqrt{\sigma_{E,i}^2 + \sigma_{N,i}^2 + 2\rho_i\sigma_{E,i}\sigma_{N,i} + \sigma_{U,i'}^2} \quad (3)$$

여기서  $\sigma_{Coord,i}^2$ 는 상대 거리 측정값을 받은 무인항공기(거리측정원)의 측위 오차 공분산 값이다. 수평 방향의 측위 오차(불확실성)에 해당하는  $\sigma_E^2$ ,  $\sigma_N^2$ 는 각각 초기 지상 MLAT 기지국(LTE/DSRC 측위 네트워크)을 사용하여 얻은 위치 정보의 동쪽, 북쪽 방향 측위 오차 공분산 값을 나타내며,  $\rho_i$ 는  $\sigma_E$ 과  $\sigma_N$ 값 사이의 correlation 값이다.  $\rho_i$ ,  $\sigma_E$ ,  $\sigma_N$  값은 모두 식 (3)에서 계산할 수 있으며 무인항공기의 고도 측정은 기압고도계에서 받은 측정값으로부터 이루어지므로  $\sigma_U$  값은 고도계의 정확도에 의해 정해진다.

그림 40은 도심 지역의 지상 MLAT 기지국(지상 LTE 기지국 사용을 가정)을 통한 무인항공기 측위 시의 측위 정확도와 cooperative positioning을 통해 향상된 무인항공기의 측위 정확도를 나타낸 것이다. 주변 무인항공기 간의 상대 거리 측정은 DSRC 송수신기 또는 UWB Ranging Sensor를 사용할 수 있으며, UWB의 경우 상대 거리 측정 오차가 DSRC 송수신기에 비해 작아 더 나은 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 이와 같이 지상 MLAT 기지국을 통해 초기 위치를 계산하고, 주변 무인항공기와의 상대 거리를 측정할 경우 무인항공기의 측위 오차를 줄일 수 있다. 본 과제의 연구 범위에는 포함되지 않지만, 무인항공기에 장착되어있는 내부 INS 센서 데이터들도 같이 integration을 진행한다면 더욱 향상된 측위 정확도를 얻을 수 있을 것이다.

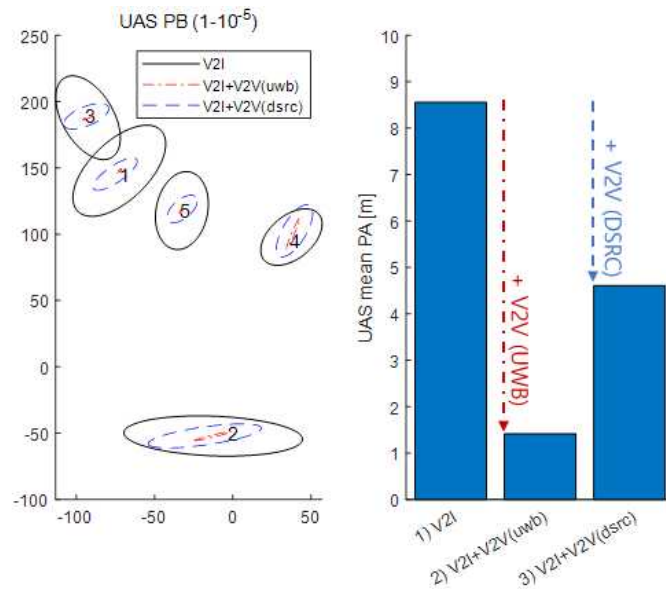


그림 40. 지상 MLAT 기지국을 통한 무인항공기 측위와 Cooperative Positioning을 통해 향상된 무인항공기의 측위 정확도

앞서 언급하였듯이, 주변 무인항공기와의 거리측정 값을 바탕으로 Kalman Filtering 등의 estimation 기법을 이용하면 지상 MLAT 기지국의 측위 정확도를 향상시킬 수 있으며, 실제 무인항공기 간의 상대 거리 측정값은 비동기 측정값이므로 asynchronous 칼만 필터 혹은 추가적인 시각 차이 보상 기법이 무인항공기에 실시간으로 적용되어

야 할 필요가 있다.

#### (다) 소형 무인기를 사용한 UWB 기반 MLAT 성능 실험

##### ① UWB 기반 위치 오차를 고려한 소형 무인기의 실내 비행경로 설정

UWB 기반 MLAT 시스템 사용을 가정하여 실내 비행 실험을 계획하였다. 실내에서의 UWB 통신 및 측위 성능을 확인하기 위하여 협소한 환경을 조성하여 실험을 진행하였으며, 8대의 수신기를 x축으로 10 m, y축으로 3 m, z축으로 3 m 공간의 환경 속에 고르게 분포시켰고, 도심지역의 빌딩 사이를 무인항공기가 지나가는 것과 유사한 실험을 진행하기 위해 0.8 m 길이의 문을 통과한 후 다른 방향으로 착륙을 하는 시나리오로 실험을 진행하였다.



그림 41. 실내환경에서 소형 무인기의 실시간 경로생성 및 비행 실험 사진

##### ㉠ 실시간 경로생성 알고리즘

실내 비행공간 내에서 UWB 기지국 위치를 파악한 후 해당 측위 네트워크가 제공할 수 있는 측위 성능을 바탕으로 비행 가능 구역을 우선 설정하였다. 현재 측위 데이터를 바탕으로 다음 이동할 지점을 계산하고, 해당 지점의 측위 오차를 다시 고려하여 무인기

가 해당 지점에 도착했는지 판단하였으며, 측위 오차를 포함한 무인기 추정 위치와 건물과의 거리가 일정 거리 이내로 가까워진 경우 해당 방향과 반대 방향으로 경로가 생성되도록 하였다. 동시에, 무인기가 주변환경과 충돌 위험이 있는 상황이 아니라면 최단 거리를 우선으로 하여 경로생성이 이루어졌다. 경로생성 알고리즘은 포텐셜 기법을 변형하여 사용하였으며 그림 42, 43과 같이 UWB 거리측정 센서(anchor)가 배치된 경우 위치 오차가 큰 지역은 피하고 그 이외에는 최단 거리로 이동하도록 전체 필드를 구성하였으며, 무인항공기의 PB(Protection Bound, 99.999% Confidence Ellipse)가 주변 장애물과 겹치면 장애물로부터 멀어지는 방향으로 척력을 생성하여( $F_{rep,APF}(X)$ ) 무인항공기가 주변 장애물과 충돌하는 것을 방지하였다.

$$F_{rep,APF}(X) = -\nabla U_{rep,APF}(X) = \begin{cases} \eta \left( \frac{1}{\rho(X)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho(X)^2} \frac{\partial \rho(X)}{\partial X}, & \rho(X) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(X) > \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

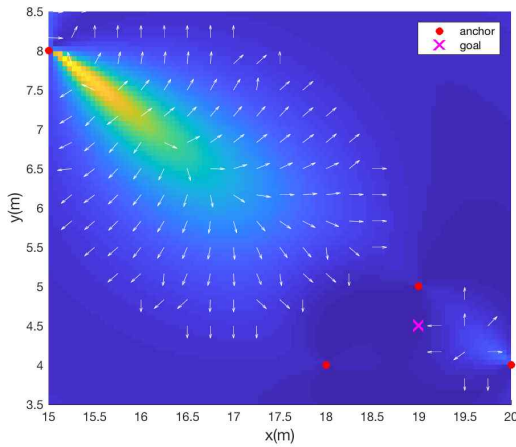


그림 42. UWB 측위 네트워크 구성예시 및 측위 오차가 큰 지역은 피하도록 설정된 척력장 예시

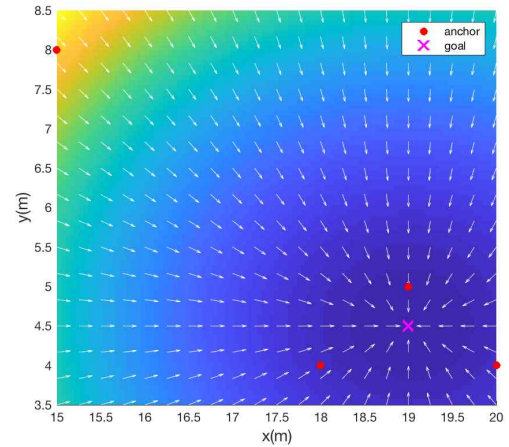


그림 43. 최단 거리로 목적지까지 이동할 수 있도록 생성된 인력 장의 예시

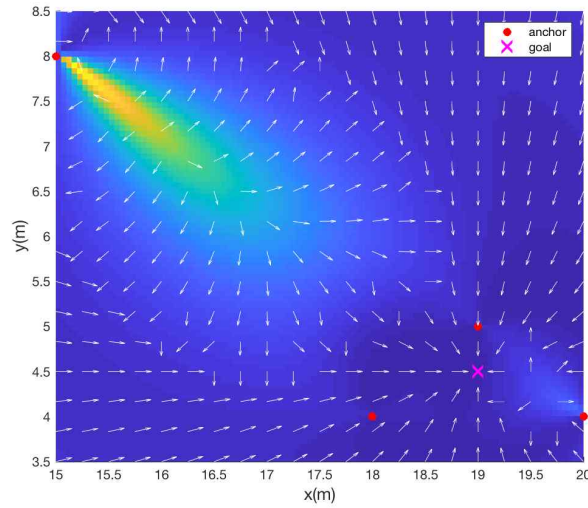


그림 44. 그림 42의 인력 장과 그림 41의 척력 장을  
합하여 구성한 전체 포텐셜 필드

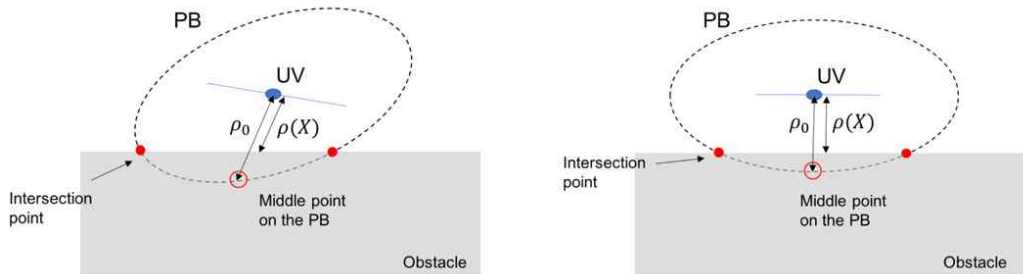


그림 45. 무인항공기(UV)가 장애물과 일정 거리( $\rho_0$ ) 이내로 가까워진 경우 장애  
물로부터 멀어지는 방향으로 척력 발생 (식 4)

#### ㉞ 실내 비행 실험 테스트베드 (Crazyflie 2.0 및 Local Positioning System)

Bitcraze사에서 제공하는 쿼드콥터 Crazyflie 2.0은 4 x 7 mm 크기의 DC 모터, 최대 중량 47g, 총무게 24g의 실험용 드론이다. 다양한 확장 Deck을 사용하여 UWB 기반의 측위가 가능하며, Python 기반의 오픈 소스를 제공하여 사용자 환경에 맞게 변경할 수 있다. 이는 실내 실험에 적합하며, UWB 기반 MLAT 시스템을 사용할 수 있기에 본 실험에 적합한 모델이므로 Crazyflie 2.0을 소형 무인기로 채택하여 실험을 진행하였다.



그림 46. Crazyflie 2.0과 UWB 거리측정 센서인 LPS deck & Node

#### ㉔ 소형 무인기의 실내 비행 실험

Python 코드는 Bitcraze 사에서 제공하는 오픈 소스를 기반으로, Remote PC와 소형 무인기와의 radio 설정, Matlab engine 모듈을 활용한 Matlab과의 연동, UWB 기반의 Deck을 사용하여 Kalman filter를 통한 x,y,z 측위, 그리고 데이터 저장이 가능하도록 코드를 수정하여 진행하였다. 또한, 실시간 위치 계산 결과의 데이터 출력이 가능하도록 하였다. 그림 47은 실내 비행경로 설정 간의 Kalman filter 기반 측위를 통한 3차원 위치 값을 나타낸 것으로 가운데 파란 직사각형은 방과 방 사이에 있는 벽을 의미한다.

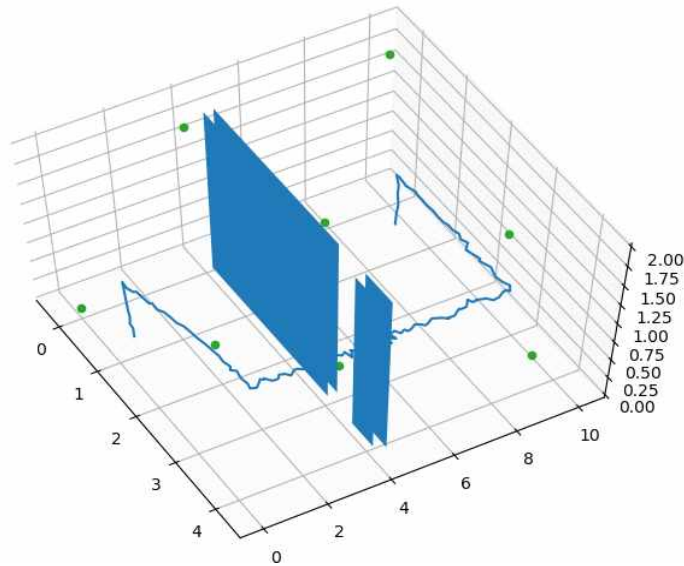


그림 47. 실시간 경로생성을 통한 자율 비행 및 UWB 기반 소형 무인기의 3차원 측위 결과

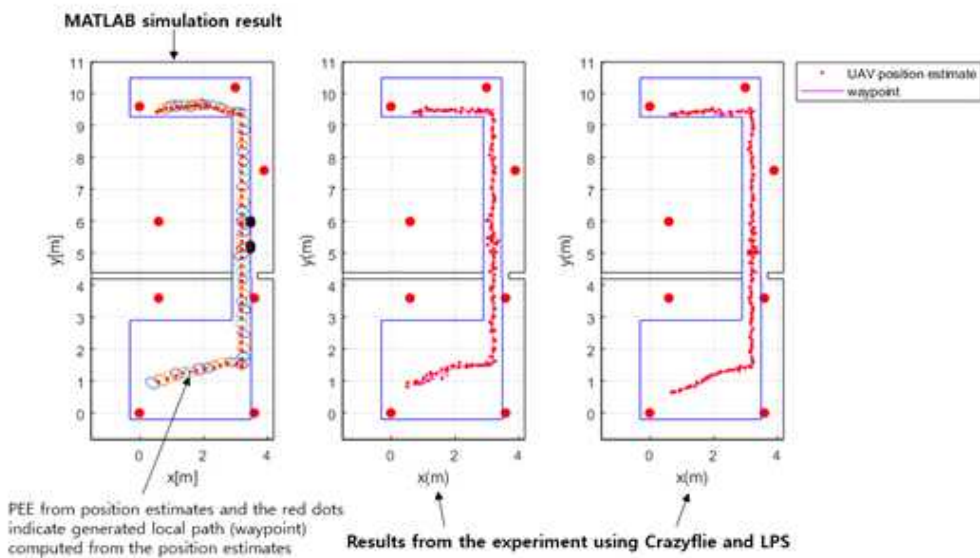


그림 48. MATLAB 시뮬레이션 결과와 실제 실내 비행 실험 결과

② UWB 기반 MLAT 시스템의 측위 정확도 분석을 위한 동작분석시스템(Optitrack)과의 비교

모든 무인항공기 간의 상대 거리 측정 시 two-way 통신을 사용할 경우 도심 네트워크에 과도한 전파 환경이 조성되어 간섭현상이 일어날 수 있다. 이를 방지하기 위해 도심 지역의 기지국은 one-way ranging을 사용하여 전파를 송출하고, 무인항공기는 이를 수신하여 측위를 수행할 수 있다. 이때의 UWB 기반 MLAT 시스템의 측위 정확도를 알아보기 위하여 동작분석시스템을 이용하여 실내 비행 실험을 진행하였다. 총 8대의 UWB 기반 MLAT 기지국을 x, y축으로 2 m, z축으로 1 m의 직사각형 형태로 분포시켜 실험을 진행하였다.

㉗ 동작분석시스템 (Optitrack)



그림 49. Optitrack



그림 50. 동작분석시스템 실험 환경

(검은색 삼각대 위에 위치한 것이 Optitrack 카메라)

동작분석시스템은 움직이는 대상의 움직임과 관련된 정보(위치, 속도, 가속도)를 시간에 따라 분석하는 것으로서 정보를 감지(Sensing), 수치화(Digitizing), 기록(Recording), 가시화(Visualization)하는 시스템이다. 이는 가상현실, 생명 공학, 애니메이션 그리고 로봇틱스에 사용되며 본 실험에서는 MLAT 시스템을 이용한 무인항공기 측위의 정확도를 분석하기 위해 동작분석시스템을 동시에 사용하여 실험을 진행하였다. 정확한 실험 결과를 얻기 위해 주변 환경을 정리하고, 외부 빛과 바닥에 반사를 일으킬만한 것들을 마스킹 테이프로 차단하였으며 하나의 마커를 최소한 두 대 이상의 카메라가 볼 수 있도록 위치를 조정하였다.

㉘ 실험 절차

실험은 2대의 PC를 사용하여 진행하였다. 한 대의 PC는 Python을 활용하여 소형 무인

기의 이착륙 및 데이터 저장에 사용하였다. Bitcraze사에서 제공하는 오픈 소스를 이용하여 Remote PC와 소형 무인기 간의 통신을 위한 radio 채널을 설정하고, 실시간 Way Point 계산 및 전송, UWB를 사용한 칼만 필터 기반 센서 퓨전 측위 알고리즘, 일정 주기로 데이터 저장을 수행하도록 코드를 수정하여 진행하였으며, UWB 기반의 지상 MLAT 기지국은 총 8개를 사용하였다.

나머지 한 대의 PC는 Optitrack의 Motive software를 사용하여 무인기의 위치 데이터를 얻었으며 사전에 Calibration 작업을 진행한 후 무인기 위치 인식을 위한 작은 Marker를 소형 무인기에 부착하였다.

#### ㉔ 실험 결과

##### - UWB 기반 상대 거리 측정 실험 결과

UWB와 소형 무인기 사이의 상대거리 측정값에 대한 정확도를 파악하기 위하여 1.8 m의 정사각형 형태로 UWB 거리측정 센서 4대를 설치하여 거리를 측정하는 실험을 진행하였다. 본 실험은 Bitcraze사에서 제공하는 프로그램을 활용하여 데이터를 받았으며, 100 ms의 logging period로 50초 동안 진행하였다. Range 값의 bias는 0.327 m였으며, 4대의 UWB의 실제 거리 값과 상대 거리 측정값의 오차를 계산하여 평균과 표준편차를 계산하였다. 오차에 대한 평균과 표준편차는 표 7과 같다.

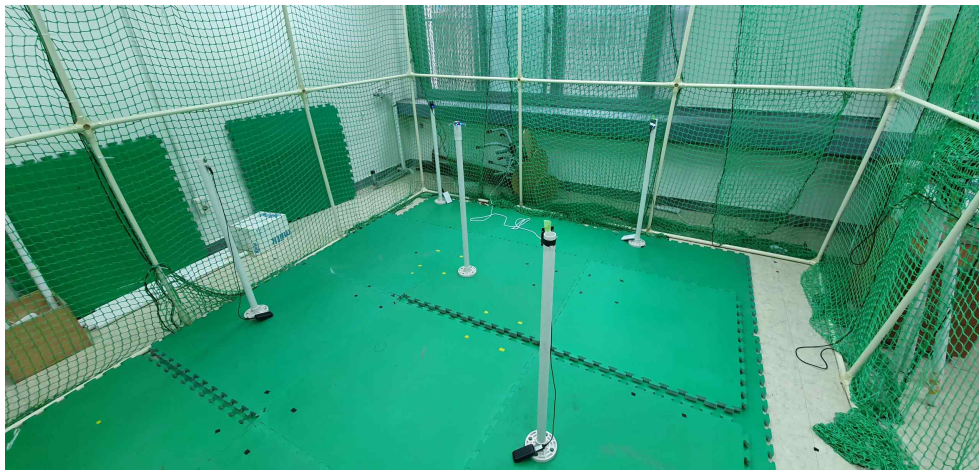


그림 51. UWB 기반 소형 무인기의 상대거리 측정값에 대한 정확도 실험

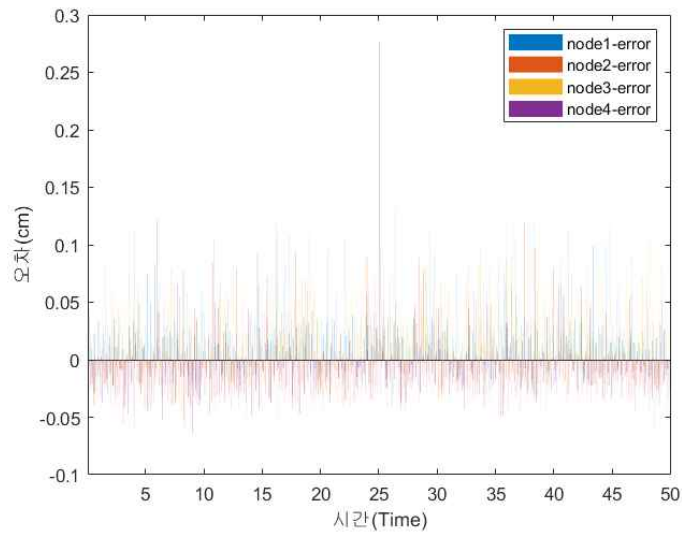


그림 52. UWB 지상기지국(node 1~4)과 소형 무인기 간의 상대 거리 측정 오차

표 7. UWB와 소형 무인기의 거리에 대한 오차의 평균과 표준편차

|      | node1-error | node2-error | node3-error | node4-error |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|      | [cm]        | [cm]        | [cm]        | [cm]        |
| 평균   | 1.7754      | 1.017       | 1.9328      | 0.887       |
| 표준편차 | 2.682       | 2.9183      | 2.8529      | 2.8607      |

- UWB 기반 상대 거리 측정값을 이용한 측위 실험 결과

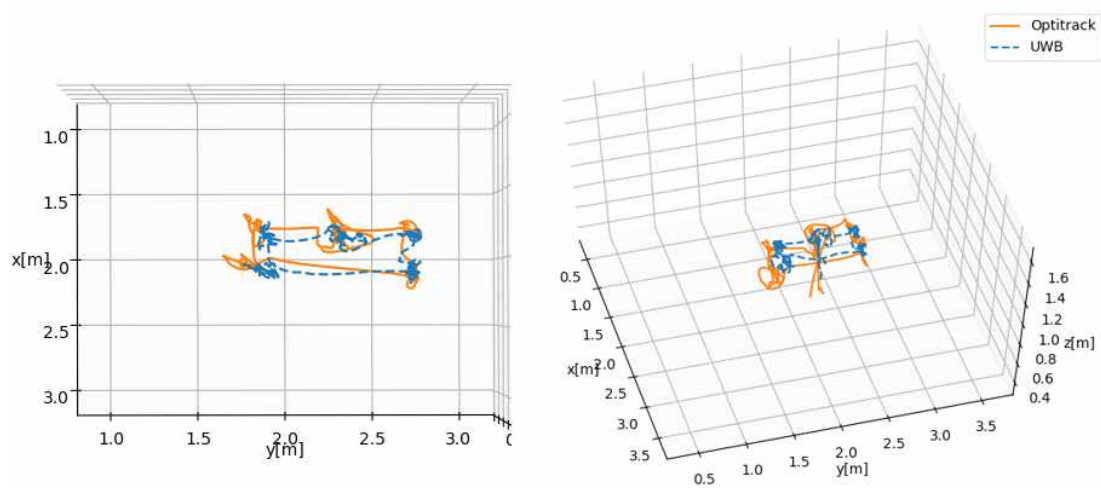


그림 53. UWB 기반 MLAT 시스템의 측위 결과와 동작 분석 시스템(Optitrack)의 ground-truth 생성 결과

그림 53은 UWB 기반 MLAT 시스템과 Optitrack을 활용하여 생성한 소형 무인기의 위치를 3차원으로 측정하여 나타낸 결과이다. 비행은 총 60 초로 이륙 후 2 m 간격의 사각형을 그린 뒤 착지하는 방식으로 이루어졌으며, 모서리마다 10 초의 정지 비행을 하게 설정해두었다. 실험 결과, Optitrack을 통해 생성한 ground truth와 비교하였을 때 비행 중 UWB 기반 MLAT 시스템의 경우 x, y, z 방향으로 각각 최대 15 cm, 20 cm, 33 cm의 위치 오차를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

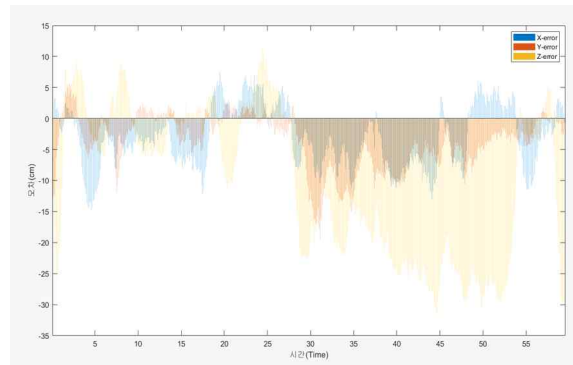


그림 54. UWB 기반 MLAT 측위 시스템의 측위 오차

표 8. UWB 기반 MLAT 시스템 오차의 평균과 표준편차

|      | x-error [cm] | y-error [cm] | z-error [cm] |
|------|--------------|--------------|--------------|
| 평균   | 3.1013       | 3.8308       | 10.2880      |
| 표준편차 | 5.2209       | 6.2190       | 12.4635      |

#### (라) DSRC를 이용한 상대 거리 측정

Cohda Wireless사의 DSRC 모듈인 MK5 OBU를 이용한 실험을 통해 DSRC 기반 상대 거리 측정 성능을 알아보았다.



그림 55. Cohda Wireless사의 MK5 OBU



그림 56. 실험에 사용된 MK5 OBU 하드웨어와 안테나

MK5 OBU는 본래 DSRC 기반 애플리케이션을 실행하는 차량에 장착하도록 설계되었으며, Single or Dual channel Cohda Wireless IEEE 802.11p radio, 보안 기능을 포함한 IEEE 1609와 ETSI TC-ITS protocol stacks, 향상된 GNSS positioning system과 자동차 센서를 사용하여 추가적인 추측항법을 제공한다. MK5의 성능은 표 9와 같다.

표 9. MK5 OBU specification

|                                |                                                                                                             |                                |                                                                                                               |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bandwidth                      | 10 MHz                                                                                                      | Frequency Band                 | 5.9 GHz                                                                                                       |
| Data Rates                     | 3 - 27 Mbps                                                                                                 | Max Tx Power                   | +22 dBm (ETSI Mask C)                                                                                         |
| Operating System               | Linux 4.1.15                                                                                                | GNSS                           | 2.5 m Best-In-Class Accuracy                                                                                  |
| Antenna Diversity              | <ul style="list-style-type: none"> <li>o CDD Transmit Diversity</li> <li>o MRC Receive Diversity</li> </ul> | Mobility & Multipath Tolerance | <ul style="list-style-type: none"> <li>o Doppler Spread: 800 km/hr</li> <li>o Delay Spread: 1500ns</li> </ul> |
| Receiver Sensitivity           | -99 dBm @ 3 Mbps                                                                                            | Dimensions                     | 130 x 120 x 35 mm                                                                                             |
| Environmental Operating Ranges | -40° C to +85° C                                                                                            | Power Supply                   | 12/24V                                                                                                        |

MK5 OBU는 field test시 데이터 전송을 빠르게 진행을 하기 위한 스크립트를 제공하고 있다. 테스트 과정에서는 MK5와 연결된 PC에서 결과를 실시간 모니터링 할 수 있으며, 이러한 실시간 출력은 JSON (machine-readable format ASCII) 형식으로 화면 출력 및 UDP를 통해 브로드캐스트 된다. 송수신기 헬퍼 스크립트는 starttx.sh와 startrx.sh의 두 가지로 MK5의 명령줄에서 실행할 수 있다.

표 10. 송신기 스크립트의 매개변수(좌)와 수신기 스크립트의 매개변수(우)

| Parameter                         | Variable            | Parameter              | Variable            |
|-----------------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| transmit channel number           | CHANNEL_NUMBER      | receive channel number | CHANNEL_NUMBER      |
| log directory                     | LOG_DIRECTORY       | log directory          | LOG_DIRECTORY       |
| optional external GPS             | EXTERNAL_GPS        | optional external GPS  | EXTERNAL_GPS        |
| Number of packets to transmit     | NUM_PACKETS         | Logfile prefix         | LOG_FILENAME_PREFIX |
| Transmit antenna                  | TX_ANTENNA          | Table purge timeout    | TABLE_PURGE         |
| 802.11 RateID codes or MCS labels | MCS_LIST            | UDP broadcast port     | BROADCAST_PORT      |
| Logfile prefix                    | LOG_FILENAME_PREFIX | Extra arguments        | EXTRA_ARGS          |
| Transmit power level              | TX_POWER            |                        |                     |

|                      |             |  |  |
|----------------------|-------------|--|--|
| Transmit packet rate | PKT_RATE    |  |  |
| Packet Lengths       | PKT_LENGTHS |  |  |
| Extra arguments      | EXTRA_ARGS  |  |  |

표 10의 값들은 설정이 가능한 매개변수로서 기본적으로 채널 번호와 저장 위치, 외부의 GPS 옵션과 패킷 수를 설정할 수 있다. 또한, 전원 수준, 안테나 설정, 라디오 설정 및 기타 매개 변수를 변경하기 위해 스크립트를 편집할 수도 있다. 추가적인 인수(EXTRA\_ARGS)는 명령어를 통해 값을 얻어낼 수 있으며 전력 제어 모드, 기본 생성되는 테스트 패킷 유형과 같은 값을 추가로 알 수 있다.

표 11. 기본값으로 실행한 송신기 스크립트(starttx.sh)의 예시

```

root@MK5:~# /opt/cohda/test/starttx.sh
Interface: wave-raw
Channel: CCH
Radio: A
ChannelNumber: 178
DefaultMCS: 10
DefaultTxPower: 40
DefaultTRC: 0
DefaultTPC: 0
Bandwidth: 10
DualTxControl: 0
ChannelUtilisationPeriod: 49
TxAntenna: 3
RxAntenna: 3
MACAddr: 04:e5:48:01:3f:4c
...
...

```

표 12. 기본 값으로 실행한 수신기 스크립트(startrx.sh)의 예시

```

...
...
{"epoch" : 1555557745.094481, "Pkts": 11482, "Bytes": 10399224, "Delta": 37.97, "comment": null, "header":

```

```

“mac[#mode!_rate]      :  latitude  longitude  range    max    age
    sig_A  noise_A    sig_B  noise_B    num loss%    kBps“,“data“:{
“04:e5:48:01:33:00#0000“:[-34.9424383, 138.5881283, 1.27, 1.89, 0.57, -90.33,
    -102.20,    0.00,    0.00, 2494, 0, 28.376],
“04:e5:48:01:33:00#0005“:[-34.9424383, 138.5881283, 1.27, 1.89, 0.64, -89.90,
    -102.20,    0.00,    0.00, 451, 81, 17.010]
} }

```

표 11에서의 starttx.sh 스크립트의 값들은 기본값을 바탕으로 나타낸 매개변수들을 의미한다. 표 11에서의 starttx.sh 스크립트의 값들은 필드 테스트를 사용한 패킷 오류율 측정을 하기 위한 데이터로써 기본 패킷 속도를 초당 400으로 설정된다. 표 12의 첫 번째 행의 11482는 총 패킷 수를 나타낸다. 여기의 모든 데이터 행은 패킷 번호에 따라 하나의 패킷 세트를 나타낸다. 수신자는 2494 패킷을 수신했으며 PER은 0이고 RSSI는 -90.33 dBm이다. 패킷 길이는 1400 Bytes이고, 수신자는 451개의 패킷을 수신했으며 PER은 81%이고 RSSI는 -89.90 dBm인 것을 확인할 수 있다. 양방향 테스트를 위해 두 스크립트를 동시에 실행할 수 있다.

두 개의 DSRC 모듈을 이용하여 10 m 떨어뜨린 후 총 2934번의 패킷교환이 일어나는 동안(약 5분)의 상대 거리를 측정 한 결과 상대 거리 측정값의 RMS 오차는 2.2176 m 정도 존재하였다. 그림 55와 같이 상대거리 측정값의 bias는 1.3946 m정도 존재하였고, bias를 제거한 오차의 표준편차(1 sigma)는 1.7269 m로 계산되었다.

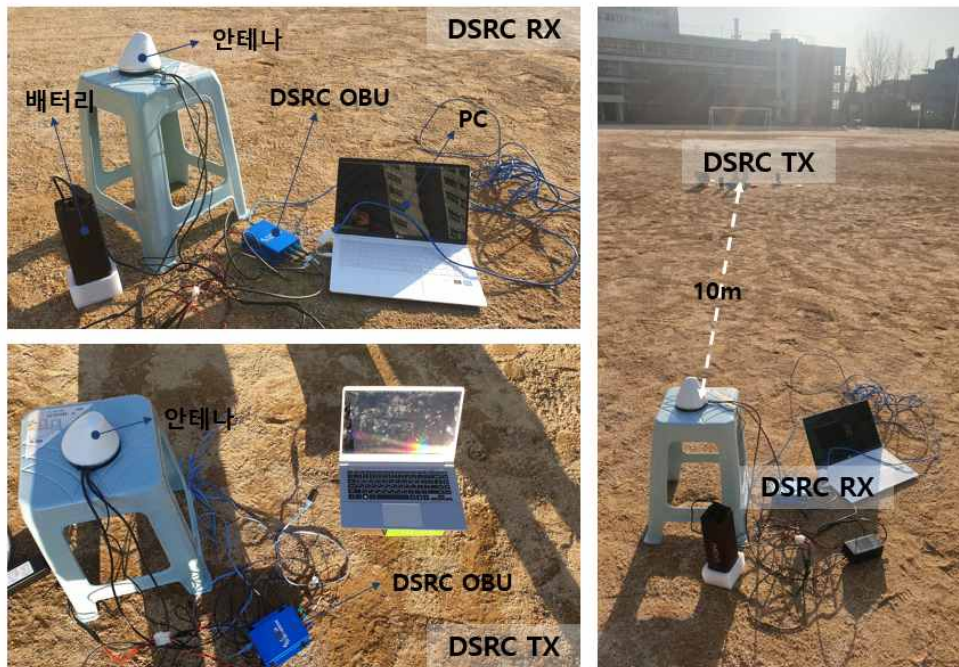


그림 57. DSRC 기반 상대거리 측정 실험 환경

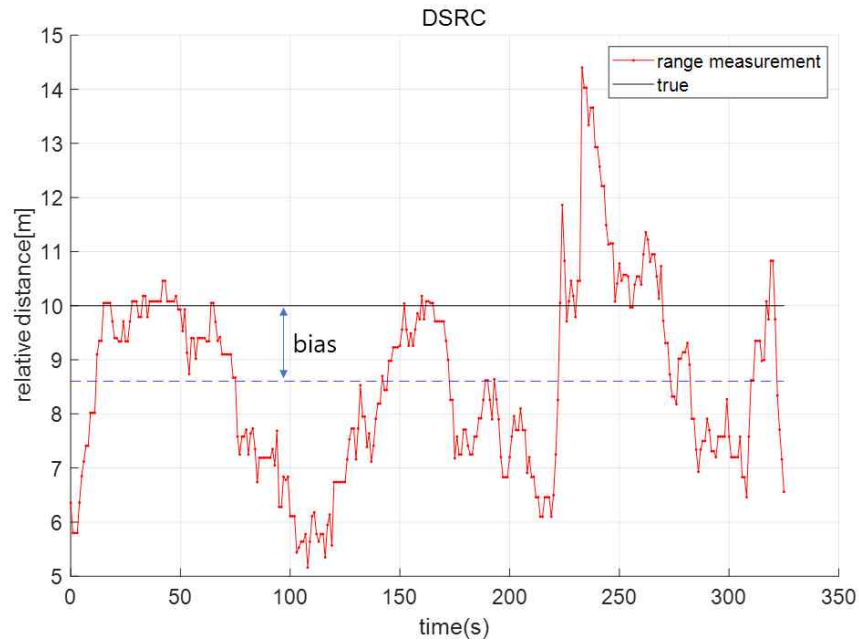


그림 58. DSRC 기반 상대거리 측정 실험 결과

(마) UWB 거리 측정 센서를 이용한 상대 거리 측정

홍익대학교 화성캠퍼스 운동장에서 GNSS 수신기와 Time domain사(현, Humatics사)의 P440 UWB 거리측정 센서를 사용하여 상대 거리 측정 실험을 진행하였다. GNSS 데이터는 GNSS 데이터 통합센터의 수원 관측소를 이용하여 RTK급의 정확도를 갖도록 후처리를 진행한 후 UWB 상대 거리 측정값과 비교하였다.



그림 59. UWB 거리 측정 센서(P440)와 GNSS 수신기(삼각대 위에 위치)

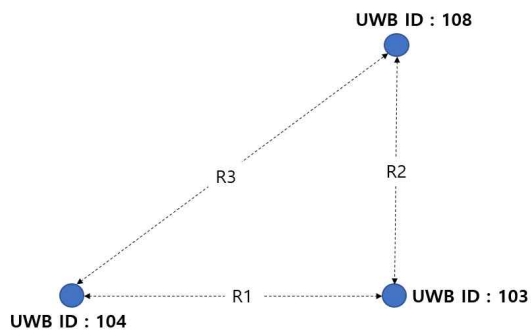


그림 60. UWB 기반 상대 거리측정 실험환경

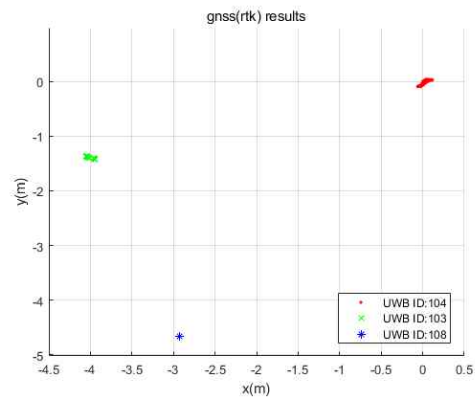


그림 61. GNSS 수신기 기반 측위 결과



그림 62. UWB ID 104번에 해당하는 GNSS 수신기 post processing 결과

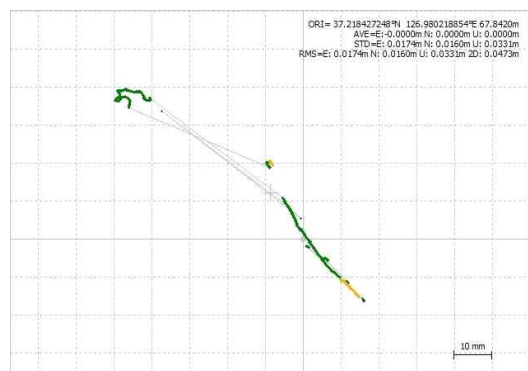


그림 63. UWB ID 103번에 해당하는 GNSS 수신기 post processing 결과

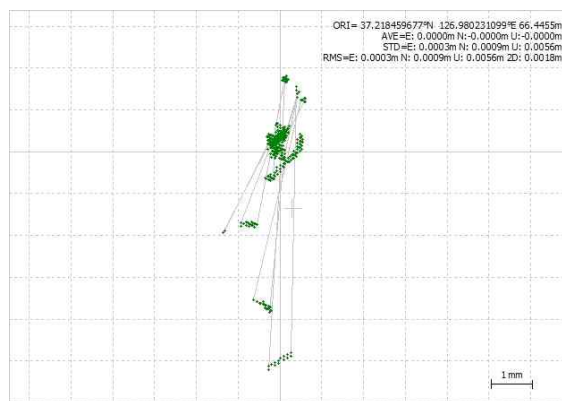


그림 64. UWB ID 108번에 해당하는 GNSS 수신기 post processing 결과

표 13. UWB 기반 상대 거리 측정값과 GNSS 수신기 기반 상대 거리 측정값 비교

|    | UWB 기반<br>상대 거리 측정 결과 |        | GNSS(RTK) 기반<br>상대 거리 측정 결과 |        | 상대 거리<br>rms<br>오차[m] |
|----|-----------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------|
|    | 평균                    | 표준편차   | 평균                          | 표준편차   |                       |
| R1 | 4.0231                | 0.0047 | 4.2768                      | 0.0690 | 0.2633                |
| R2 | 3.0944                | 0.1825 | 3.9979                      | 0.0203 | 0.9069                |
| R3 | 4.8461                | 0.18   | 5.8911                      | 0.0606 | 1.0727                |

### (3) 기지국 분포 보강 최적화 알고리즘 개발

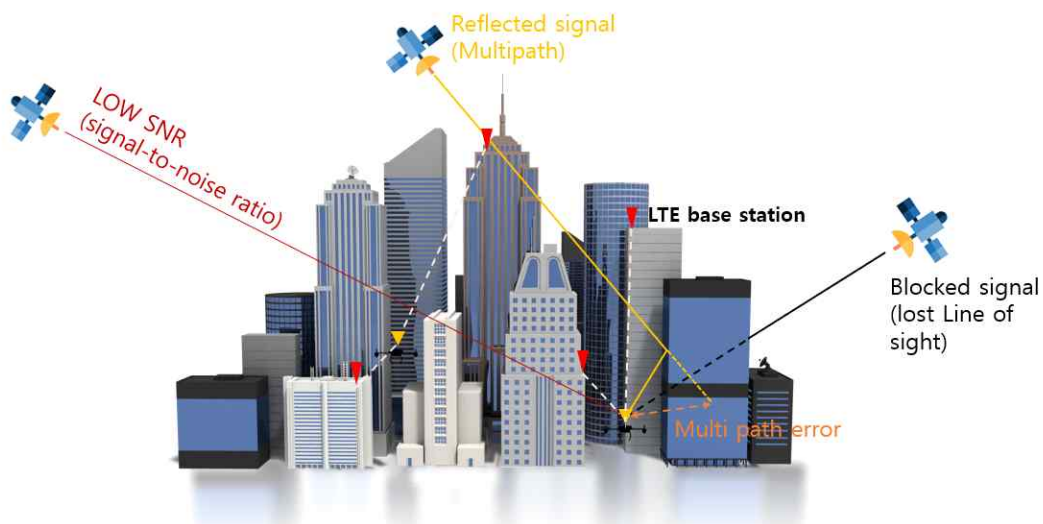


그림 65. 도심지역의 열악한 위성 항법 신호 수신 환경

위성항법 신호 수신 환경이 좋지 않은 도심지역에서 무인항공기의 안정적인 측위 성능을 제공하기 위해 도심지역에 많이 설치된 기존 LTE 기지국의 LTE 신호를 이용한 측위 서비스 제공이 우선 고려되었다.



그림 66. 전파누리(왼쪽)에서 받은 LTE 기지국 위치(오른쪽) 예시

전파누리로부터 LTE 기지국 위치를 받아 도심지역 무인항공기 측위 성능을 시뮬레이션해본 결과, 현재 도심지역에 설치된 LTE 기지국의 경우 이동 통신 서비스를 목적으로 최적화되어 설치되어 있어 측위에는 최적화되지 않은 형태를 가지고 있으며, 동시에 LTE 신호를 이용하여 상대 거리 측정 시 오차가 수십 미터 정도로 발생하여 현재 구축된 LTE 네트워크망에만 의존한 측위 시스템을 구성하는 것은 무리가 있다고 판단하였다.

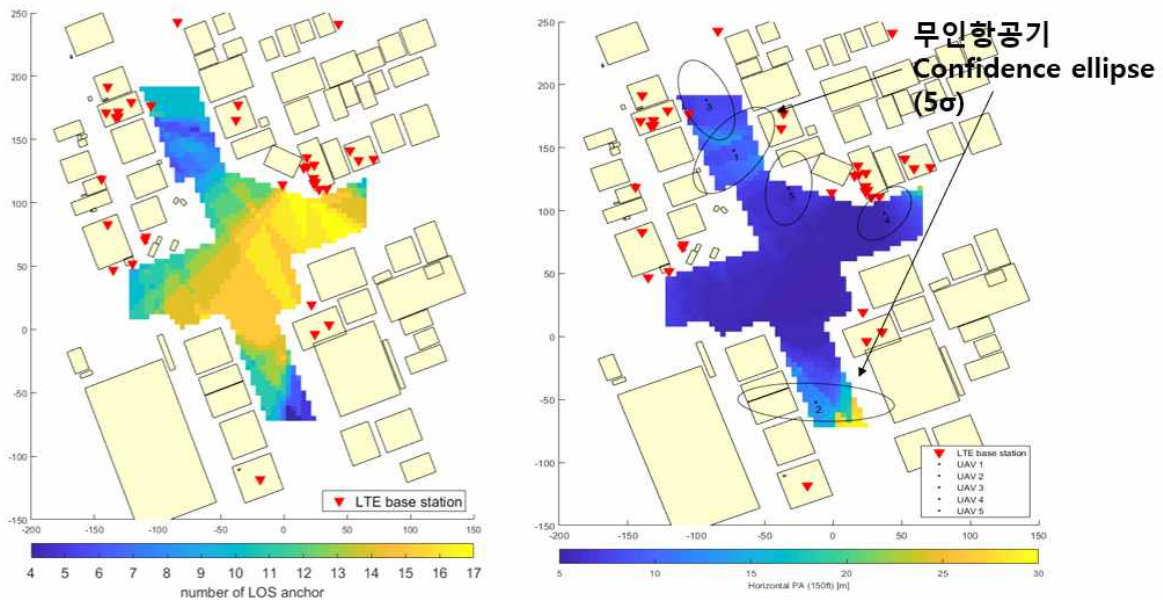


그림 67. 강남역 사거리에 위치한 모든 LTE 기지국을 사용할 경우, 각각의 위치에서 사용 가능한 LTE 기지국 개수(왼쪽), 수평 방향 위치정확도(오른쪽) 및 Confidence ellipse (99.999%); 오른쪽 화살표가 가리키고 있는 두 개의 confidence ellipse의 경우 건물과의 충돌 위험을 내포하고 있음

이를 보완하기 위해, 목표한 측위 성능을 제공할 수 있도록 LTE 기지국을 추가로 도심 지역에 설치하는 것을 고려해보았으나 LTE 기지국 설치에 큰 비용이 소요된다는 점에서 경제적으로 적합하지 않았다. 이에 1 km 정도의 도달 범위를 가지며 동시에 LTE 기지국과 비교하여 적은 설치비용을 가지고, 상대 거리 측정 오차가 2 m(95%) 정도로 알려진 DSRC(Dedicated Short Range Communication) 송수신기를 도심 지역에 추가로 설치하는 것이 적절하다고 판단하였다.



그림 68. 도심지역 LTE 기지국에 DSRC 송수신기를 보강 배치하여  
구성한 측위 네트워크 개념도

#### (가) 이진 정수 선형 계획법을 이용한 DSRC 기지국 분포 보강 최적화 알고리즘 개발

기존에 설치된 LTE 기지국에 DSRC 송수신기를 추가로 설치하여 목표하는 측위 정확도를 제공하는 기지국 분포를 이진 정수 선형 계획법을 이용하여 최적화하였다. 효율적인 측위 네트워크 구성을 위해서는 최소한의 개수의 DSRC 송수신기를 추가 설치하고, LTE 기지국을 활용하며 위치 오차를 최소화할 수 있어야 한다. 따라서 제약조건을 아래와 같이 설정하여 측위 네트워크 구성 문제를 수식화하고, 요구 측위 정확도를 맞출 때까지 이를 반복하여 최적 네트워크 분포를 계산하였다.

- 격자로 구성되어있는 사용자 공간에 시야가 확보되는 DSRC 송수신기/LTE 기지국의 개수가 3차원 측위의 경우 3개 이상 존재해야 한다.
- DSRC 송수신기/LTE 기지국들은 특정 거리 이상 떨어져 존재해야 한다.
- 이전 단계보다 적은 개수의 LTE 기지국과 DSRC 송수신기를 사용해야 한다.
- 이전의 해보다 더 나은 해를 가져야 한다.

$x$ 를 0과 1로 구성된 LTE 기지국, DSRC 후보 지역의 색인(index) 열벡터 (해당 LTE 기지국을 사용하거나 DSRC 송수신기를 설치한 경우 1, 반대의 경우 0), 행렬  $A$ 를 가시 행렬, 열

벡터 **b**를 측위에 필요한 최소한의 송수신기 개수, 행렬 **C**를 수신기 사이의 최소 거리 분리 행렬, 열벡터 **d**를 특정 거리 내에 존재할 수 있는 최대 송수신기 개수, 행렬 **F**와 **g**를 탐색 과정 중 찾은 해라고 하면, 측위 네트워크 구성 문제를 그림 69와 같이 수식화할 수 있다.

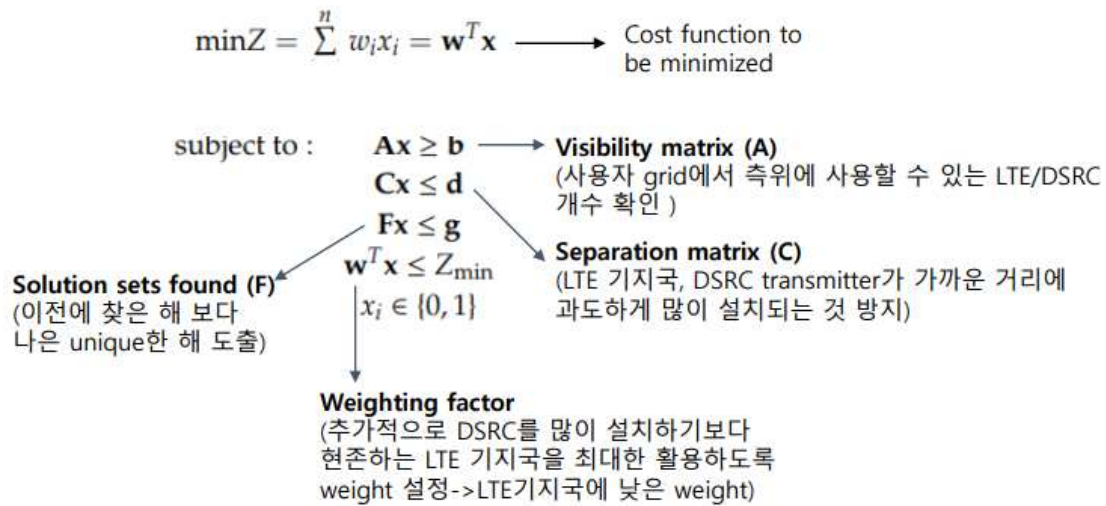


그림 69. 측위 네트워크 구성 문제 수식화

#### (4) 측위 정확도에 따른 기지국 분포 보장 형태 개발

##### (가) 도심지역(강남역 사거리)의 기지국 분포 현황 및 위치정확도

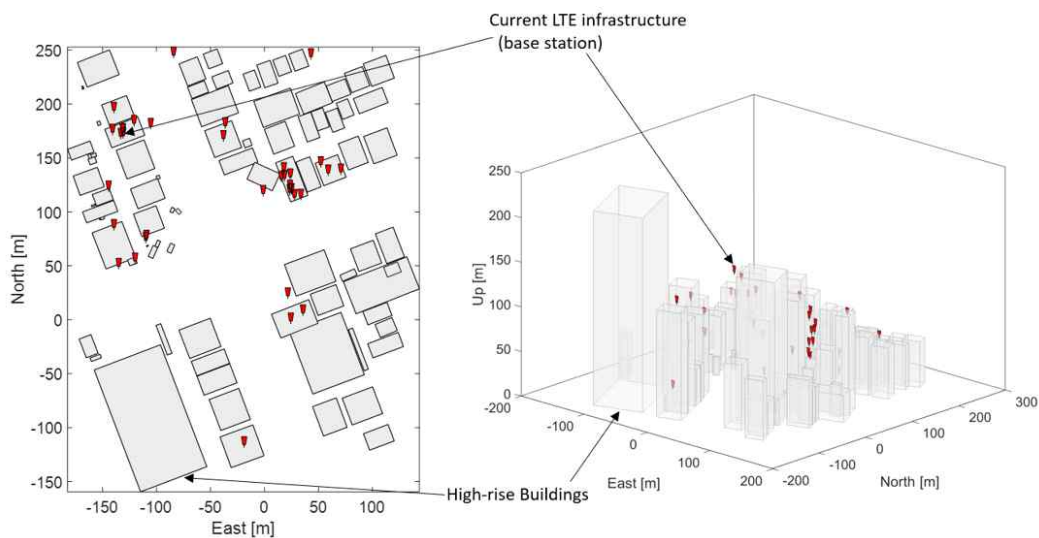


그림 70. 서울시 강남구 강남대로 396 강남역 사거리 도심 모델 및 LTE 기지국 위치

그림 71과 같이, 강남역 사거리를 도심 모델로 선정하여 LTE 기지국만을 사용한 위치 정확도를 분석하였다. LTE 기지국의 경우 대부분 건물 옥상의 한정된 높이에 존재하기 때문에 고도는 별도의 고도계를 통해 측정한다고 가정하고, 수평 방향의 위치추정 정확

도만 나타내었다.

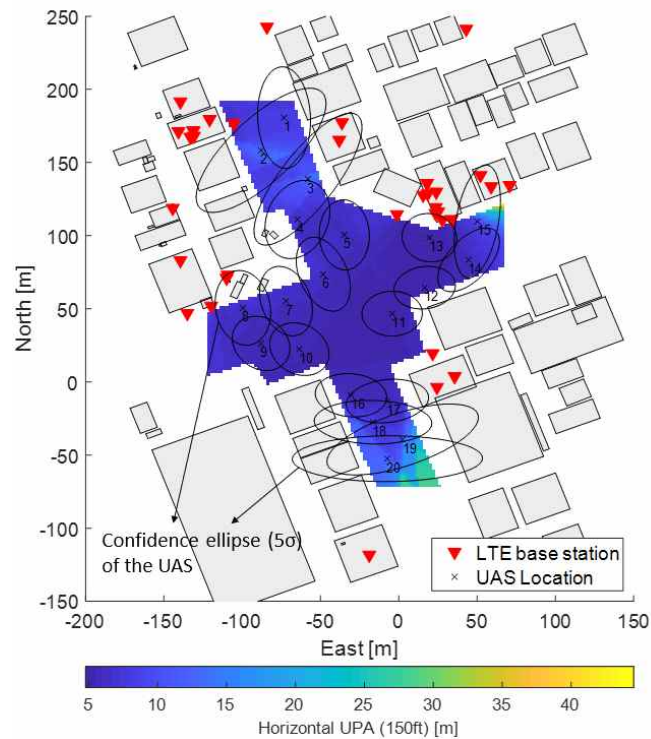


그림 71. 강남역 사거리에 위치한 35개의 LTE 기지국을 이용한 20대 무인항공기 측위 시의 Confidence Ellipse (99.999%)

(나) 이진 정수 선형 계획법을 이용한 DSRC 기지국 분포 보강 결과

도심 모델과 해당 지역에 있는 LTE 기지국을 바탕으로 앞서 구성했던 이진 정수 선형 계획법을 사용하여 DSRC 기지국 분포를 최적화하여 보강할 수 있도록 알고리즘을 구성하였다. 그림 72와 같이 DSRC가 설치될 수 있는 후보 지역들을 도로에 인접한 건물에 위치시키고, 도로 위 상공 150 ft 높이를 비행 구역, 즉 무인항공기의 측위 및 관제가 필요한 지역으로 설정하였다.

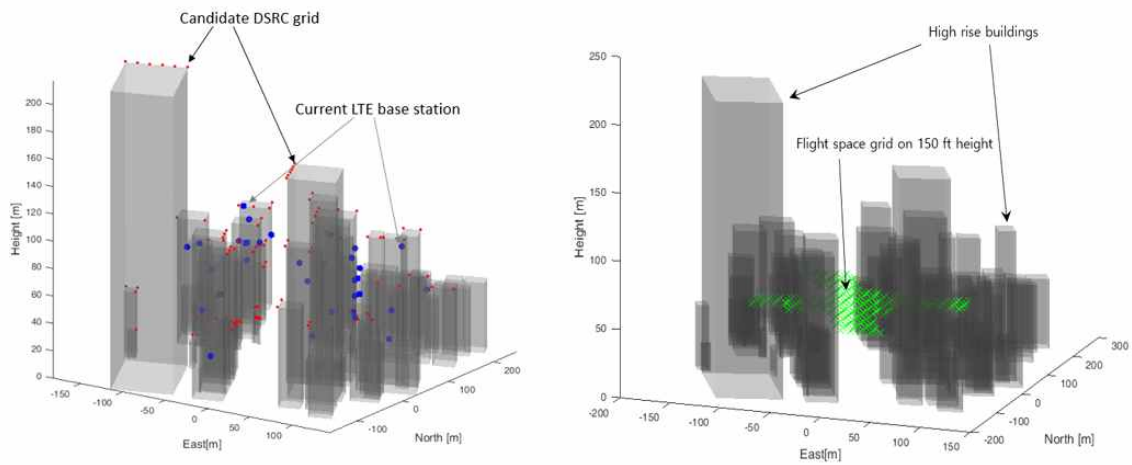


그림 72. 현재 설치되어 있는 LTE 기지국 위치와 DSRC 송수신기 보강 배치 후보 위치(왼쪽), 무인항공기 비행 구역(오른쪽)

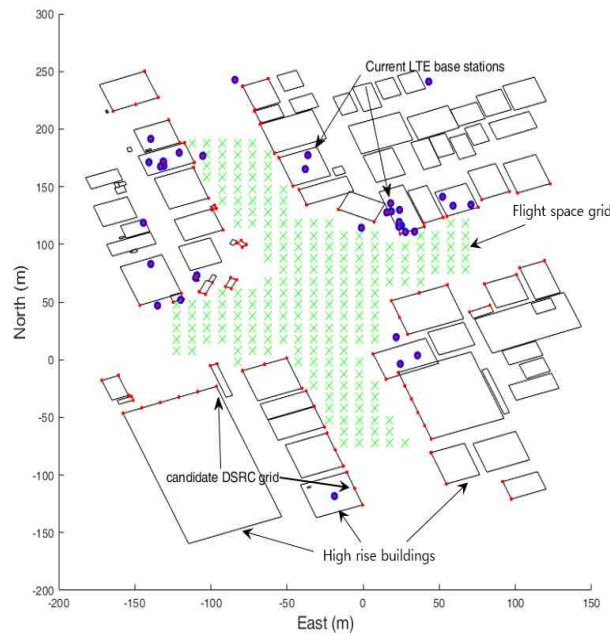


그림 73. 이진 정수 선형 계획법을 사용하기 위한 LTE/DSRC 측위 네트워크 환경 구성

- 이진 정수 선형 계획법을 통해 구성한 최적화된 기지국 분포 형태 예시(1)

모든 비행 가능 구역에서 무인항공기의 측위 시  $2\sigma$  (95%) 기준 각각 4, 6, 8 m 측위 정확도를 제공하도록 이진 정수 선형 계획법을 이용하여 기지국 분포를 최적화하여 계산하였다.

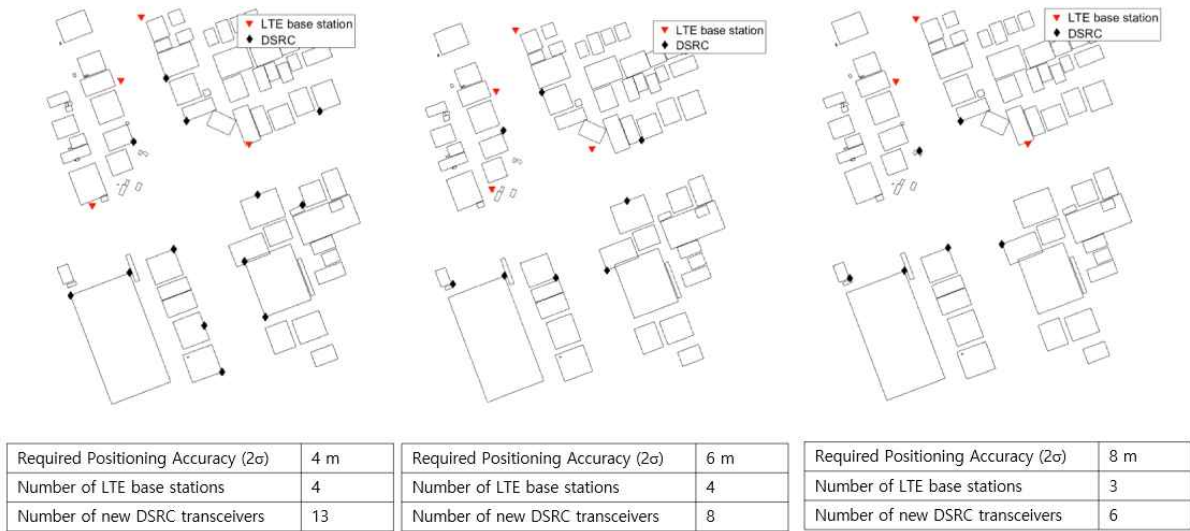


그림 74. 각각의 요구 측위 정확도(95% 기준)와 최적 측위 네트워크 구성 결과

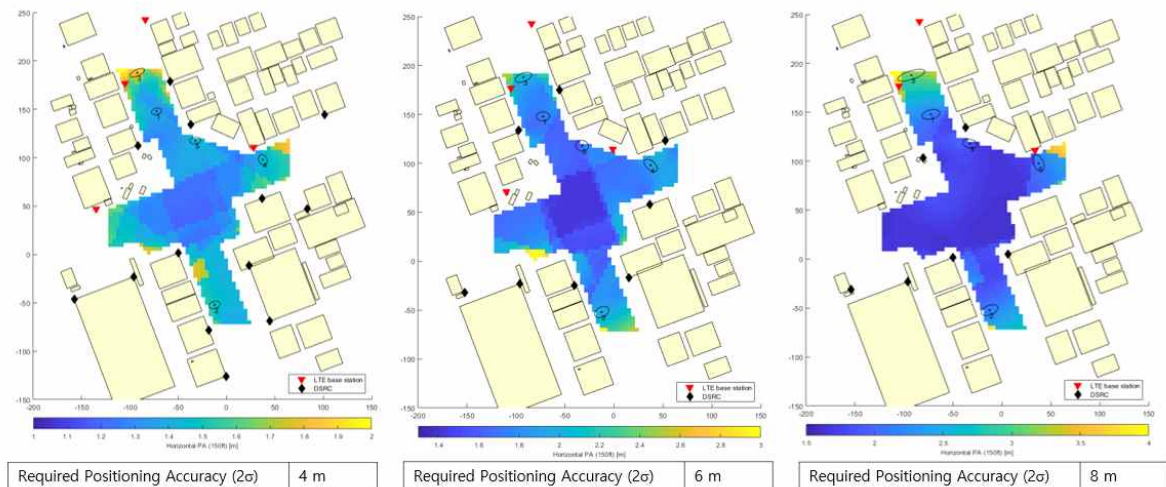


그림 75. 측위 네트워크의 위치추정 정확도( $1\sigma$ ), 각각의 그래프에 나타나 있는 5개의 타원은 해당 위치에서의 무인항공기 confidence ellipse(99.999%)를 나타냄

기존에 존재하는 LTE 기지국만 사용하여 측위를 하였을 때와 4 m(95%)의 측위 정확도를 갖도록 구성된 최적 네트워크 구성 결과를 가지고 8대의 무인기를 측위 하는 상황을 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이때, 측위 인프라만을 사용한 무인항공기 측위 결과(V2I)와 무인항공기 간의 상대 거리를 측정하여 수행한 Cooperative Positioning(V2V), 무인항공기 간의 상대 거리와 측위 네트워크를 모두 사용한 측위 결과(V2I+V2V)를 비교하여 나타내었다.

또한, 무인항공기가 DSRC 송수신기를 탑재하고, 지상의 기지국과 주변 무인항공기와 상대 거리를 측정하는 경우와 무인항공기가 UWB 거리측정 센서를 탑재하고, 무인항공기 간의 상대 거리측정에는 UWB 거리측정 센서로 상대 거리를 측정하는 경우를

모두 비교하였다. 앞서 언급했듯이 UWB의 상대 거리 측정값의 오차가 작아 더욱 정밀한 측위 결과를 얻을 수 있었다.

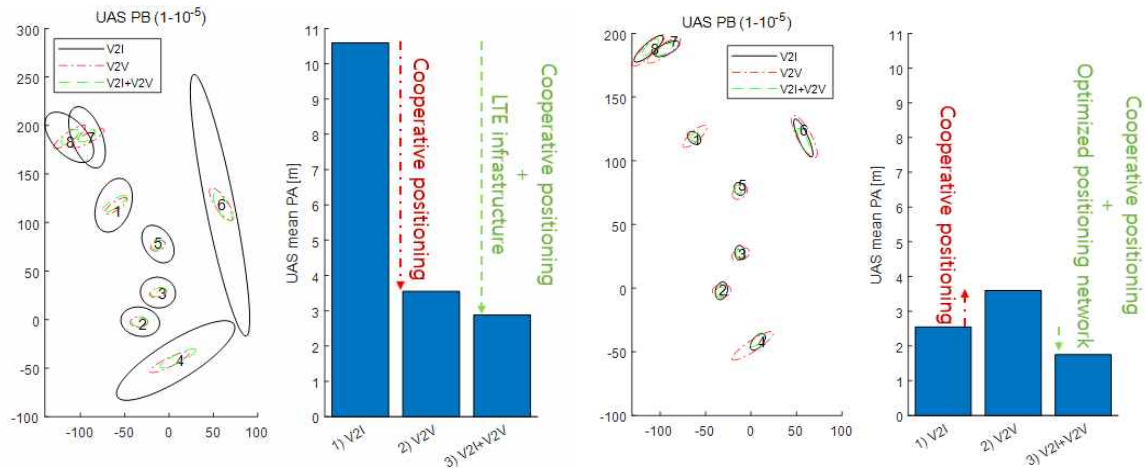


그림 76. 기존의 LTE 기지국을 무인항공기 측위 네트워크로 사용한 경우 (무인기 간 상대 거리 측정에는 DSRC를 이용)

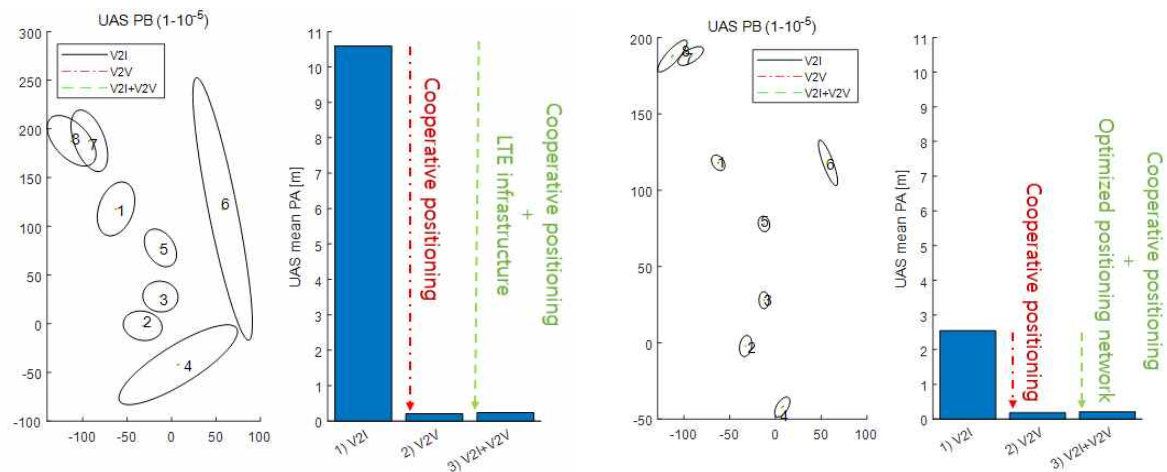


그림 78. 기존의 LTE 기지국을 무인항공기 측위 네트워크로 사용한 경우 (무인기 간 상대 거리 측정에는 UWB를 이용)

-이진 정수 선형 계획법을 통해 구성된 최적화된 기지국 분포 형태 예시(2)

모든 비행 가능 구역에서 무인항공기의 측위 시 1 $\sigma$ (68%) 기준 각각 1, 2, 3 m 측위 정확도를 제공하도록 이진 정수 선형 계획법을 이용하여 기지국 분포를 최적화하여 계산하였다. 앞서서 구하였던 기지국 분포 형태 예시(1)과 마찬가지로 이진 정수 선형 계획법을 통해 최적화된 기지국 분포 형태를 구한 다음 도심 모델의 비행 구역에서 Cooperative Positioning을 통해 무인기의 측위 오차를 어느 정도 줄일 수 있는지 살펴보았다. 이번

시뮬레이션에서는 DSRC를 이용한 무인항공기 간의 상대 거리 측정만을 가정하였으며, 각각 10대, 20대의 무인항공기를 비행 구역에 무작위로 배치한 후 측위 오차를 계산하였다.

시뮬레이션 결과 기존 LTE 기지국 네트워크의 경우 수평 방향으로 15~20 m의 측위 정확도를 제공했지만, 이진 정수 선형 계획법을 통해 DSRC를 송수신기를 4-5개 정도 추가하면 같은 도심 모델에 1~3 m의 측위 정확도를 제공할 수 있는 것으로 나타났다. 그리고 무인기 간 상대 거리측정에 무시할만한 시각 동기 오차가 존재한다고 가정하였을 때, 해당 최적 네트워크에서 무인기 간의 Cooperative Positioning을 수행할 경우 대부분 비행공간에서 1 m 이상의 수평 위치정확도의 측위 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

표 14. 요구 측위 정확도를 맞추기 위해 사용된 LTE 지상 기지국과 보강된 DSRC 송수신기 개수

| 요구 측위 정확도 ( $1\sigma$ ) | 사용된 총 지상 기지국<br>개수 | 사용된 LTE 기지국<br>개수 | 네트워크 보강을 위해<br>추가된 DSRC 송수신기 개수 |
|-------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|
| 1m                      | 15                 | 3                 | 12                              |
| 2m                      | 9                  | 4                 | 5                               |
| 3m                      | 7                  | 3                 | 4                               |

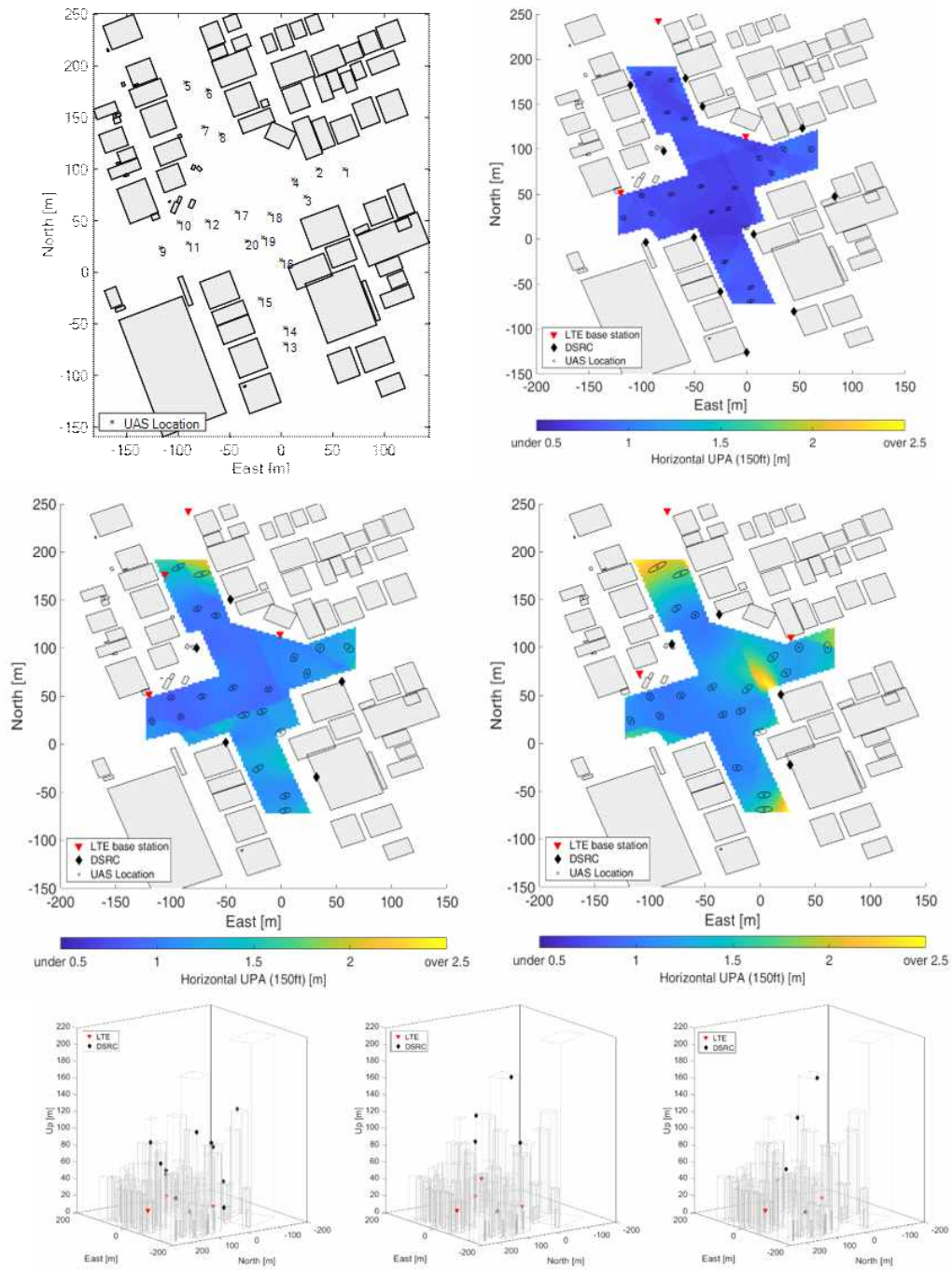


그림 80. 도심지역에 임의로 배치한 20대 무인기의 위치와 순서대로  $1\sigma$  (68%) 각각 1, 2, 3 m 측위 정확도를 제공하도록 최적 네트워크 보강 수행 결과 및 해당 네트워크의 측위 정확도, 해당 네트워크에서 무인 항공기 측위 시의 Confidence Ellipse

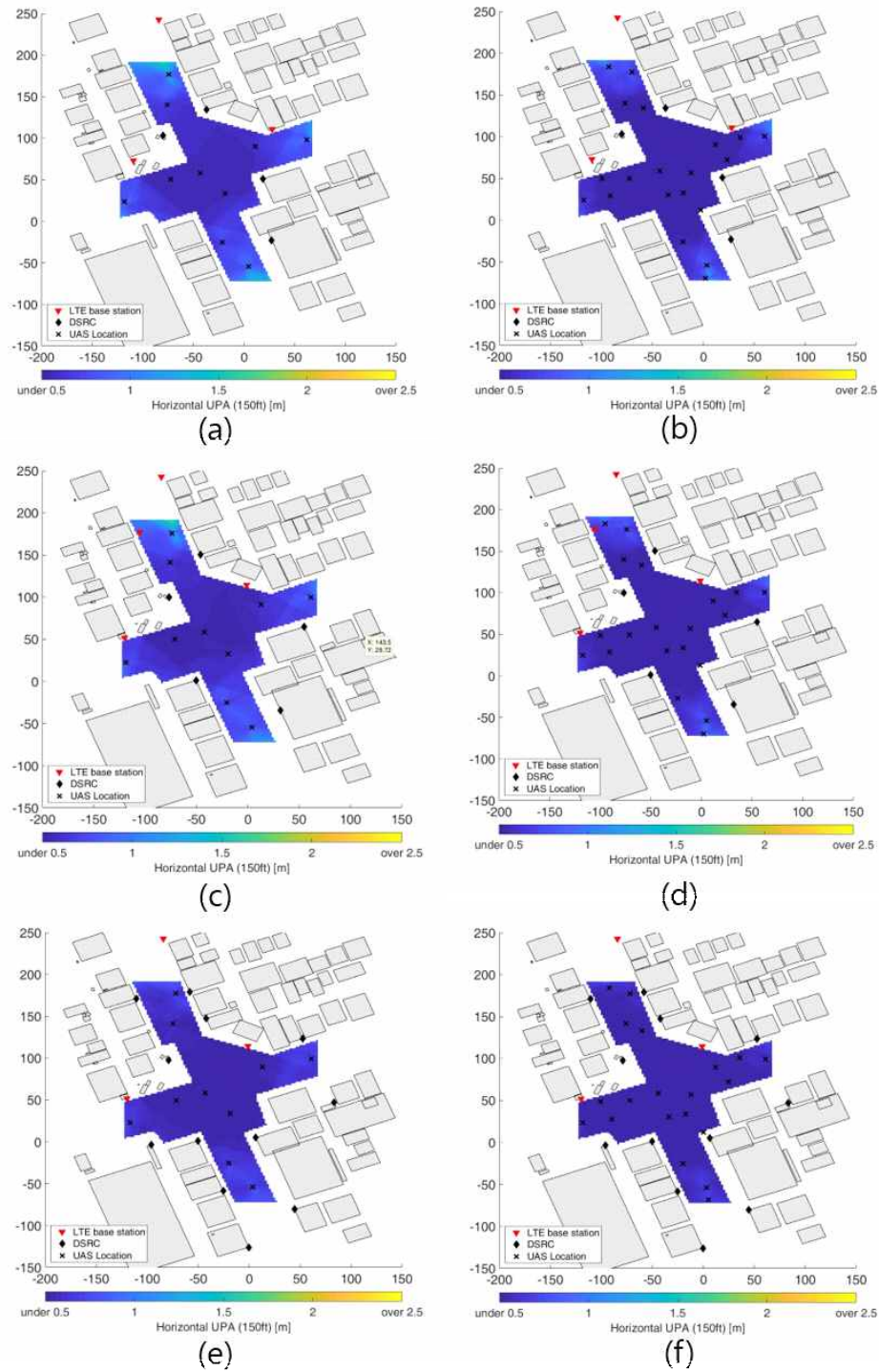


그림 81. 그림 74의 최적 네트워크에서 무인기 간 Cooperative Positioning을 통한 위치정확도 개선 (a) 수평 방향으로 3 m( $1\sigma$ )의 측위 정확도를 제공하는 측위 네트워크에 무인기 10대가 존재하는 경우 (b) 20대가 존재하는 경우 (c) 수평 방향으로 2 m( $1\sigma$ )의 측위 정확도를 제공하는 측위 네트워크에 무인기 10대가 존재하는 경우 (d) 20대가 존재하는 경우 (e) 수평 방향으로 1 m( $1\sigma$ )의 측위 정확도를 제공하는 측위 네트워크에 무인기 10대가 존재하는 경우 (f) 20대가 존재하는 경우

같은 측위 네트워크에서 10대의 무인기를 사용한 경우와 20대의 무인기를 사용한 경우를 비교하였을 때, 무인기 수가 증가할수록 측위 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. 많은 DSRC 송수신기를 거리 측정원으로 사용하는 것은 전체 패킷 손실률을 증가시키고, 네트워크의 채널 접근 지연을 일으킬 수도 있지만, 최근 170개 이상의 채널을 가진 20개의 DSRC 송수신기의 경우 채널 및 혼잡 제어 알고리즘을 적용한 결과 해당 네트워크의 통신 성능에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타난 바 있다[9].

본 과제의 연구범위에는 포함되지 않지만, 최적화된 측위 네트워크에서 더욱 정밀한 측위 데이터를 얻기 위해서는 GPS/IMU Integration 필터와 같은 LTE/DSRC/IMU가 통합된 비동기식 칼만 필터가 적합하다. 저가의 GPS/IMU 통합 칼만 필터의 경우 한 사이클에 4300  $\mu$ s의 주기가 임베디드 시스템에서 요구되는 것을 보았을 때, 23개의 LTE/DSRC 송수신기의 경우 비동기식 칼만 필터를 사용하면 0.1초 정도의 processing time이 소요될 것으로 보인다. 따라서 제안된 시스템을 사용하면 10 Hz의 위치 갱신 주기를 얻을 수 있으며, 일반적인 GNSS 수신기를 사용한 경우에도 1~10 Hz 정도의 갱신 주기를 제공한다는 점을 고려하면 이는 적절한 성능이라고 판단된다.

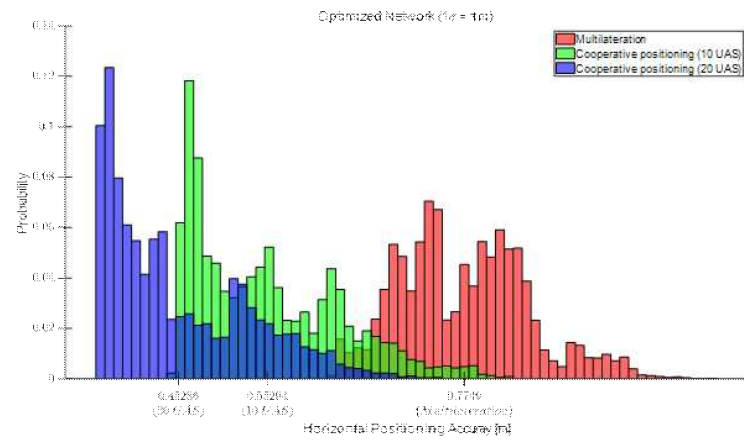
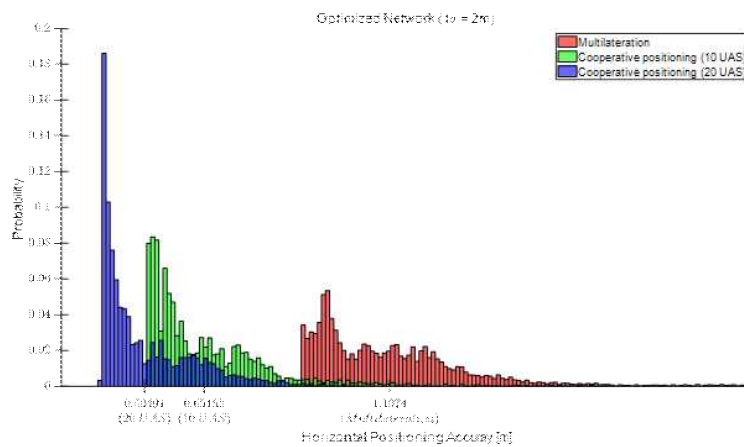
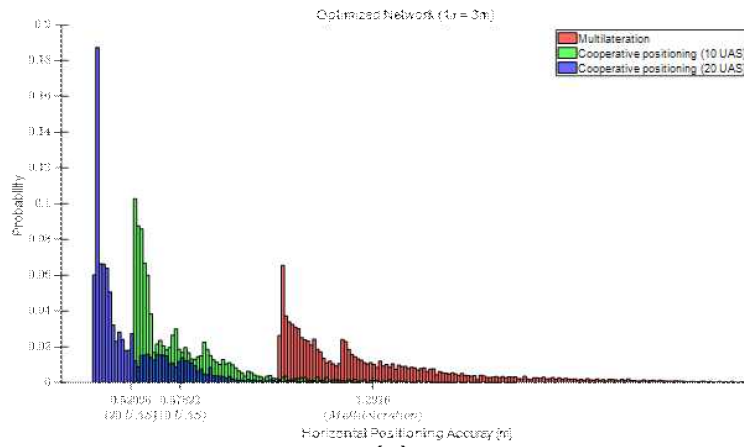


그림 82. 그림 74의 3개의 최적 네트워크에서 MLAT과 무인기 10대, 20대를 사용한 Cooperative Positioning의 위치추정 정확도 분포: (a) 3 m ( $1\sigma$ ) 위치 정확도를 갖는 최적 네트워크 (b) 2 m ( $1\sigma$ ) 위치 정확도를 갖는 최적 네트워크 (c) 2 m ( $1\sigma$ ) 위치 정확도를 갖는 최적 네트워크

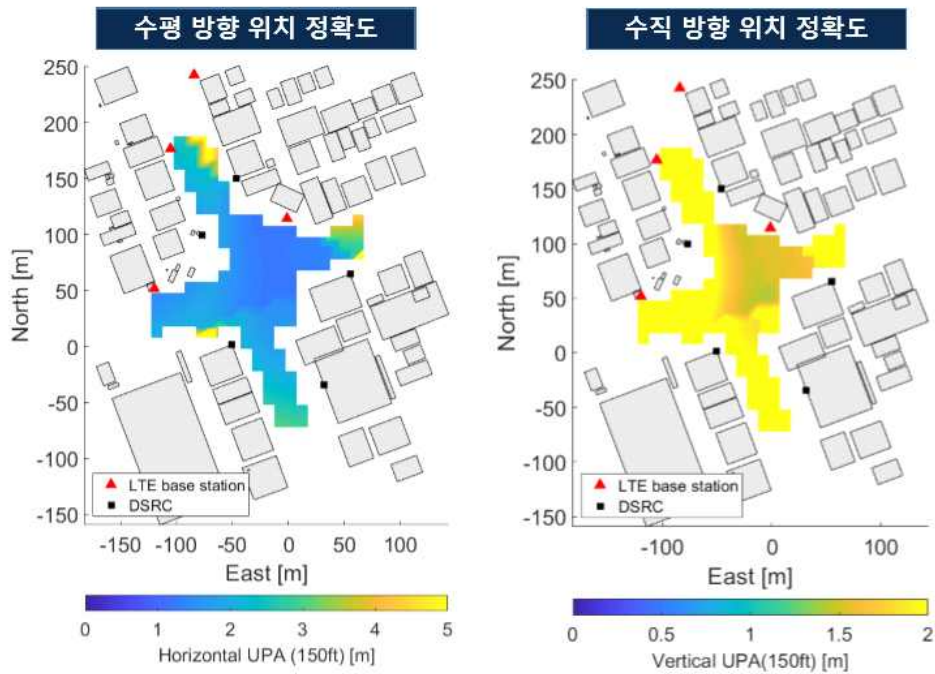


그림 83. 비행 구역(고도 150 ft)에서 수평 방향으로 최소 4 m( $1\sigma$ ) 위치 추정 성능을 제공하는 측위 네트워크의 수평 방향 위치정확도와 수직 방향 위치정확도 (기압고도계를 사용하지 않은 경우)

앞서, 이진 선형 정수 계획법을 통해 구성된 측위 네트워크(MLAT 시스템)는 특정 수평 방향 측위 정확도를 제공할 수 있도록 구성되었으며, 도로 인근 빌딩 옥상이라는 한정된 고도에 DSRC를 추가로 배치하였기 때문에 수직 방향으로 무인항공기의 측위에 적절한 성능을 제공하지 못하는 것으로 나타났다. 수직 방향의 위치정확도 또한 안정적인 무인항공기 운용에 필수적이므로, 노면 주변에 DSRC를 추가로 배치하여 기존에 빌딩 옥상에만 한정되어 제한된 수직 방향 위치정확도를 가졌던 측위 네트워크의 성능이 어느 정도까지 향상될 수 있는지 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 시뮬레이션 결과 초기에 구성한 최적 측위 네트워크의 비행 구역에서 수직 방향 측위 정확도의 평균은 1.3722 m, 표준편차( $1\sigma$ )는 0.6608 m로 나타났다. 해당 측위 네트워크의 고도 방향 거리 측정원을 보강하기 위해 노면 근처(지표면)에 DSRC 기지국(송수신기)을 15개 추가 배치하였고 이때의 수직 방향 측위 정확도의 평균은 0.6122 m, 표준편차( $1\sigma$ )는 0.0763 m로 나타났다. 즉, 250 m \* 400 m의 공간에 15개의 DSRC 기지국을 추가 배치하면 70 cm 정도 더 나은 성능을 얻을 수 있게 되는 것이다.

수평 방향 측위 정확도는 비교적 적은 개수의 기지국 추가 설치로 원하는 측위 성능을 얻을 수 있었으나, 건물 옥상이나 노면 근처에 DSRC 송수신기를 추가 설치하여 얻을 수 있는 수직 방향의 위치정확도는 매우 한정적이었다. 도심지역에 DSRC 송수신기를 다양한 고도로 추가하고 무인항공기가 해당 송수신기와 모두 통신한다는 것은 매우 어렵고 제한적이므로, 무인항공기의 3차원 측위 시 고도 측정에는 DSRC 송수신

기 분포를 보강하는 것보다는 각 무인항공기에 기압고도계를 설치하여 사용하는 것이 경제적인을 알 수 있다.

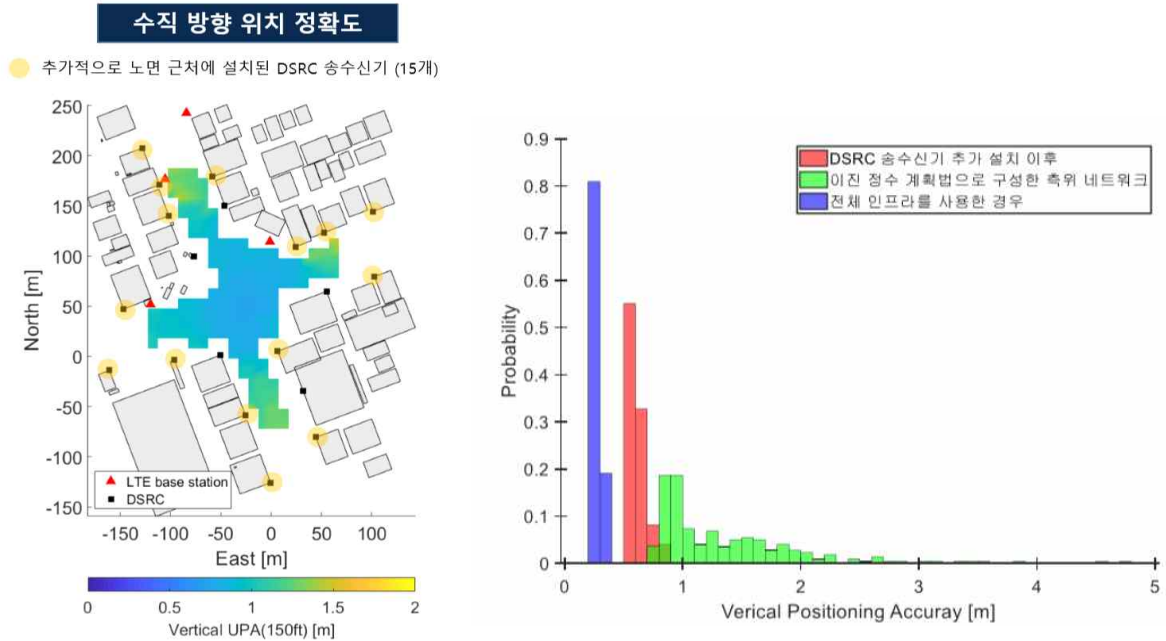


그림 84. 노면 근처에 추가로 설치된 15개의 DSRC 송수신기와 해당 측위 네트워크의 수직 방향 측위 정확도 (기압고도계를 사용하지 않은 경우)

그림 85. 15개의 DSRC 기지국(송수신기)을 노면 근처에 추가 설치한 경우(빨강), 기존 최적 네트워크(초록), 전체 DSRC 후보 지역에 DSRC 송수신기를 모두 설치한 경우(보라)의 수직 방향 측위 정확도 비교 (기압고도계를 사용하지 않은 경우)

## (5) 측위 신뢰도 생성 알고리즘 연구

### (가) LTE 신호 기반 거리 측정 알고리즘

LTE 신호를 이용한 측위에는 기존의 3GPP(3rd Generation Partnership Project)의 Release 9에서 소개된 PRS(positioning reference signal)를 사용할 수 있으나, PRS를 수신한 단말기(UE; user equipment)의 위치가 네트워크에 알려짐으로 인한 보안 문제가 야기될 수 있고[17], PRS를 제공하는 것은 통신사의 선택이기 때문에 많은 통신사들이 추가적인 전파 대역을 필요로 하는 PRS 신호를 제공하지 않고 있기 때문에 실제 PRS를 이용한 측위에는 어려움이 있다.

수신된 LTE 신호에는 측위에 사용할 수 있는 기준 시퀀스(reference sequence)가 존재한다. 이 기준 시퀀스들은 PRS와 다르게 모든 상용 LTE 신호에 존재하는 시퀀스이다. 먼저 PSS(primary synchronization signal)는 3개의 서로 다른 시퀀스 중 하나로 표현되며, 신호가 발신된 기지국(BS; base station 혹은 eNodeB)의 섹터를 구분하는 데 쓰인다. SSS(Secondary synchronization signal)는 168개의 서로 다른 시퀀스 중 하나로 표현되며,

LTE 무선 통신 서비스 영역인 셀의 그룹 ID를 표현하는 데 쓰인다. PSS와 SSS의 전파 대역폭은 930 KHz로, GNSS 중 대표적인 GPS(Global Positioning System)의 C/A (coarse acquisition) 코드의 대역폭인 1.023 MHz와 비슷한 수준이다. 수신된 LTE 신호에 대해 시간 영역에서 PSS나 SSS의 시퀀스를 상호 상관(cross-correlation) 함으로써 시간 지연을 계산하여 의사 거리(pseudorange)를 도출해 낼 수 있다.

UE는 수신된 LTE 신호의 프레임 시작 시각을 추정하기 위해 매 프레임의 특정 위치에 삽입된 PSS와 SSS 두 동기화 신호를 이용한다. PSS는 Zadoff-Chu 시퀀스 기반의 기준 시퀀스로 슬롯 0과 10의 마지막 심볼에 담겨 전송된다. PSS는 3개의 서로 다른 시퀀스 중 하나로 표현되며, 각각의 시퀀스는  $N_{ID}^{PSS} \in \{0, 1, 2\}$  중 하나로 지정되어 있다. SSS는 최장 수열(m-sequence; maximum length sequence) 기반 기준 시퀀스로 PSS와 마찬가지로 슬롯 0과 10에 존재하며, PSS가 담긴 심볼 바로 이전의 심볼에 담겨 전송된다. SSS는 168개의 서로 다른 시퀀스 중 하나로 표현되며, 각각의 시퀀스는  $N_{ID}^{SSS} \in \{0, 1, \dots, 167\}$  중 하나로 지정되어 있다.

셀 ID는 신호가 발신된 BS마다 서로 다른 값을 가지고 각 셀 ID는 하나의 특정한 하향 링크(downlink) LTE 신호와 대응되기 때문에, UE 주변에 설치된 BS의 위치와 BS에서 발신하는 신호의 셀 ID를 알고 있다면 신호에서 셀 ID를 취득하는 것으로 신호의 발신 위치를 알 수 있다. 앞서 설명한  $N_{ID}^{PSS}$ 와  $N_{ID}^{SSS}$ 로 셀 ID  $N_{ID}^{Cell}$ 를 계산하기 때문에 셀 ID 계산을 위해서는 PSS와 SSS 검출이 선행되어야 한다. PSS와 SSS는 프레임 내 위치가 인접해 있기 때문에 먼저 수신된 신호의 한 프레임 길이에 대해 PSS를 먼저 검출한 뒤 SSS의 위치를 예측한다.

PSS를 검출하기 위해 UE는 세 가지의 서로 다른 PSS 시퀀스를 생성하여 수신된 신호에 대해 상관(correlation)한다. 이를 수식으로 표현하면 식 5와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Corr}(r, s_{PSS})[n] &= \sum_{n=0}^{N-1} r(n) s_{PSS}^*(n+m)_N \\ &= r(m) \otimes_N s_{PSS}(-m)_N \end{aligned} \quad (5)$$

이때,  $r$ 은 수신된 신호를,  $s_{PSS}$ 는 UE가 생성한 시간 영역에서의 PSS를,  $N$ 은 한 프레임 안의 샘플 수를,  $(\cdot)^*$ 은 켤레 복소수를,  $(\cdot)_N$ 은 모듈로  $N$  연산을, 그리고  $\otimes_N$ 은  $N$ -point circular convolution을 의미한다. 이 과정을 주파수 영역에서 진행하기 위해, 식 5에 고속 푸리에 변환(FFT; Fast Fourier Transform)과 고속 푸리에 역변환(IFFT; Inverse Fast Fourier Transform)을 취하면 식 6과 같다.

$$\text{Corr}(r, s_{PSS}) = \text{IFFT}\{R S_{PSS}^*\} \quad (6)$$

이때,  $R := FFT\{r\}$ 이고  $S_{PSS}^* := FFT\{s_{PSS}^*\}$ 이다. 그림 86은 실제 LTE 신호에서 얻은  $Corr(r, s_{PSS})$ 의 예시이다.

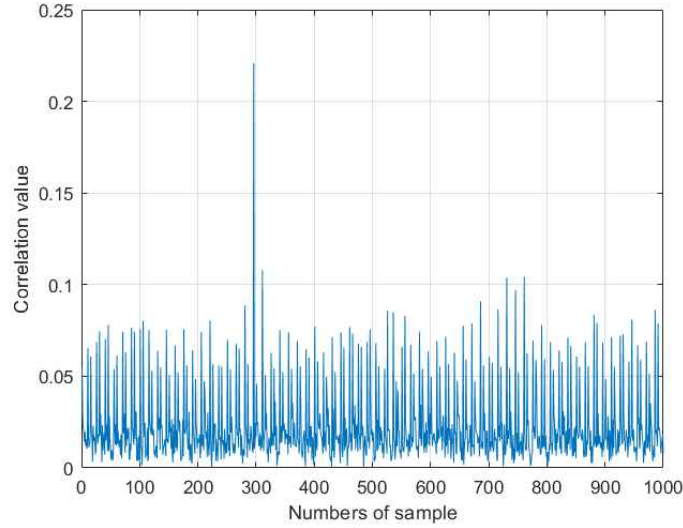


그림 86. 수집된 LTE 신호에 대한 PSS 상관 값 예시

PSS는 신호의 시간 영역 내 correlation peak value를 띄는 위치에서 검출되며, SSS는 PSS가 검출된 바로 직전 위치에 168 가지의 서로 다른 SSS 시퀀스를 상관하여 검출한다. SSS의 상관 및 검출은 PSS와 같은 방법으로 이루어진다.

PSS와 SSS가 수신된 신호로부터 모두 검출된 후, 각각의 시퀀스는 미리 지정된  $N_{ID}^{PSS}$ 와  $N_{ID}^{SSS}$ 로 변환되고, 셀 ID는 식 7과 같이 계산된다.

$$N_{ID}^{Cell} = N_{ID}^{PSS} + 3N_{ID}^{SSS} \quad (7)$$

이때,  $N_{ID}^{Cell} \in \{0, 1, \dots, 503\}$ 이다. PSS와 SSS 위치로부터 얻은 프레임 시작 시각을, 위치를 알고 있는 시각 보정 위치에서 계산한 값을 이용하여 보정하면 거리 측정을 할 수 있다.

#### (나) LTE 신호 기반 거리 측정 실험

LTE 신호 기반 거리 측정을 위해 Analog Device사(社)의 ADI AD9361 시스템 온 모듈(SOM; system-on-module) 소프트웨어 기반 수신기를 사용하였다. 신호 수집은 인천 연세대학교 국제캠퍼스 교내에서 진행했으며, 교내 LTE 기지국의 셀 ID를 조사하고, 기지국 및 수신기의 위치는 실시간 이동측위(RTK; real time kinematic)를 이용해 센티미터 오차 수준의 정확도로 측정하였다. 그림 87은 RTK 실험 및 LTE 신호 수신 실험 환경 사진이다. 그림 88는 구글 지도 상에 표시한 기지국, 수신기 및 시각 보정 위치를 나타낸

다.

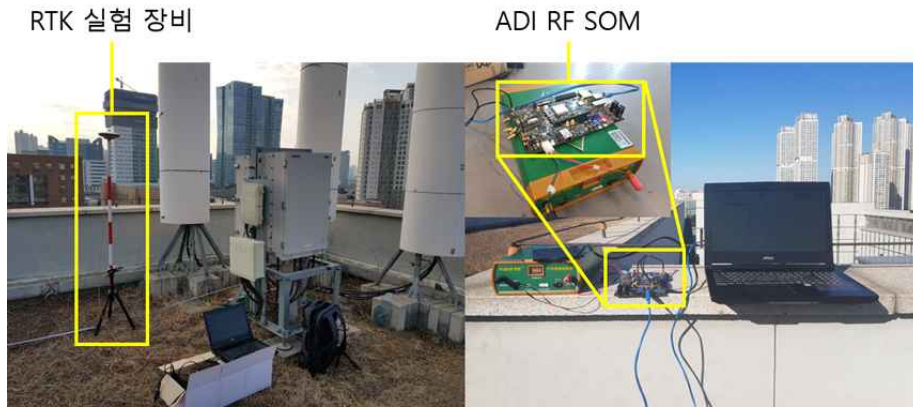


그림 87. (좌) RTK 측위 실험 환경 (우) LTE 신호 수집 실험 환경



그림 88. 시험에 사용된 기지국, 수신기 및 시각 보정 위치

수신된 신호는 889 MHz 중심 주파수 신호이다. 자체 개발된 MATLAB 코드를 통해 수집된 신호의 셀 ID 및 지연 시간을 취득하고, 이 과정을 통해 수집한 프레임 시각 정보를 같은 방식으로 수집한 시각 보정 위치에서의 프레임 시각 정보와 비교하여 기지국과 수신기와의 거리를 계산하였다. 예를 들어, 수신된 신호 후처리 단계에서 셀 ID 59를 검출하였고, 셀 ID 59를 발신하는 해당 기지국과 수신기의 3차원 공간상 직선 거리는 약 81.60 m 였고, 기지국과 시각 보정 위치의 직선 거리는 약 102.36 m 였다. 표 15는 수신된 LTE 신호에 대한 자세한 정보를 나타낸다.

표 15. 수신된 LTE 신호 정보

|                 |             |
|-----------------|-------------|
| Cyclic Prefix   | Normal      |
| 주파수 분할 방식       | FDD         |
| 서브캐리어 간 주파수 간격  | 15 (kHz)    |
| 중심 주파수          | 889 (MHz)   |
| 송신 대역폭          | 10 (MHz)    |
| 샘플링 주파수         | 15.92 (MHz) |
| FFT 크기          | 1024        |
| $N_{ID}^{Cell}$ | 59          |

본 실험에서는 1초 동안 수집한 LTE 신호 안에서 1 프레임(10 ms) 마다 한 번의 거리 계산을 함으로써 총 100회의 연속적인 거리 계산이 이루어졌다. 표 16은 이렇게 측정된 거리 계산 결과의 bias와 표준편차, 최대 오차를 나타낸다.

표 16. 기지국과 수신기 간 LTE 신호 기반 거리  
측정 실험 결과

|       |         |
|-------|---------|
| Bias  | 19.42 m |
| 표준편차  | 9.58 m  |
| 최대 오차 | 39.71 m |

#### (다) 측위 신뢰도의 정의

기존 위성항법시스템에서는 무결성(integrity) 요구조건을 통해 측위 신뢰도를 보장하였다. 무결성이란 항법 시스템으로부터 추정된 위치 해가 신뢰 가능한지를 판별하고 항법 시스템을 신뢰할 수 없을 때 사용자에게 적시에 경고를 전달하는 능력을 포함한다[18].

항법 시스템의 무결성을 감시할 수 있는 파라미터로는 alert limit (AL), time to alert (TTA), integrity risk, 보호 수준 등이 있다. 각 무결성 파라미터의 정의는 표 17과 같다. 무결성 사건이란 위치 오차가 보호 수준을 초과한 사건을 뜻하며, 본 연구에서 구하고자 하는 보호 수준은 protection level 혹은 protection bound로 영문 표기되며 의미는 동일하다.

표 17. 무결성 파라미터와 그 정의

|                  |                                               |
|------------------|-----------------------------------------------|
| Alert Limit      | 시스템을 신뢰 가능하다고 판단할 수 있는 최대 위치 오차 허용치           |
| Time to Alert    | 무결성 사건이 발생했을 때, 사용자에게 경고가 도달하기까지 최대 경과 시간 허용치 |
| Integrity Risk   | 위치 오차가 alert limit을 초과할 확률                    |
| Protection Level | 위치의 참값이 특정 확률 이상으로 포함된다고 보장할 수 있는 범위          |

Stanford diagram에서는 그림 89와 같이 각 무결성 파라미터의 관계를 토대로 항법 시스템의 동작 상태를 구분하였다. Nominal operations는 시스템이 정상적으로 동작함을 의미하고, system unavailable은 시스템이 가용하지 않음을 의미한다. 또한, misleading operations는 시스템이 가용할 때 위치 오차 (PE; position error)가 보호 수준을 초과하였지만 alert limit은 넘지 않은 상태를 의미하고, hazardously misleading operations는 시스템이 가용할 때 위치 오차가 보호 수준과 alert limit을 모두 초과한 상태를 의미한다.

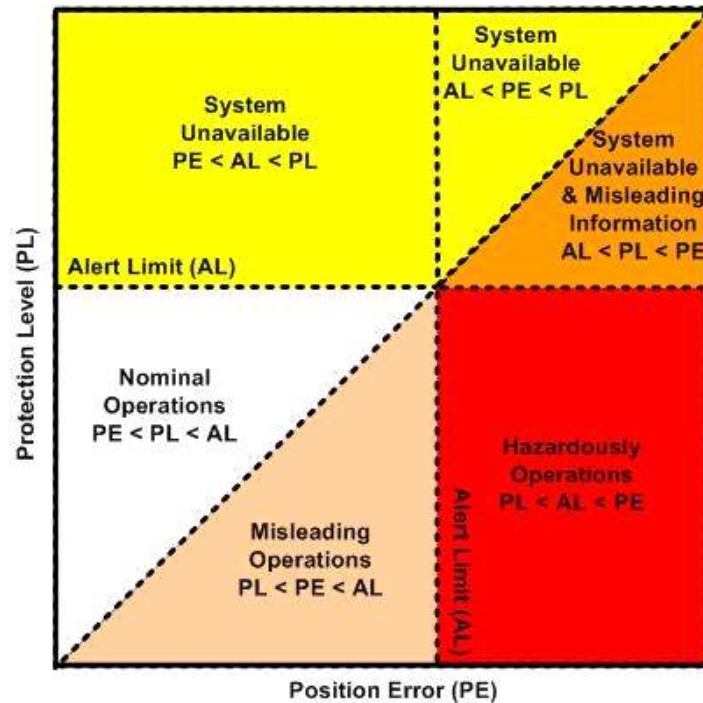


그림 89. The Stanford diagram[18]

본 과제에서는 무인항공기 간 충돌방지 목적으로 안전거리를 계산하기 위하여 위치 오차(95%)가 아닌 보호 수준(99.999%)을 사용하기 때문에 단일 무인항공기에 대하여 허용할 수 있는 최대 위치 오차는 따로 정의되지 않았다. 따라서, 이에 관한 파라미터인 alert limit과 time to alert을 고려하지 않았으며, 시스템의 동작 상태는 nominal operations와 misleading operations 두 가지로 구분된다.

#### (라) 측위 신뢰도 생성 알고리즘

사용자 위치의 참값이 특정 확률 이상으로 포함된다고 신뢰할 수 있는 범위가 보호 수준으로 정의되며, 해당 확률값은 신뢰도 요구 수준에 의해 결정된다. 보호 수준을 계산하는 방법은 주변환경과 측위 시스템에 따라 달라질 수 있다. 거리측정 오차가 정규분포를 따를 때, 그림 90과 같이 오차의 평균인 바이어스(bias)와 오차의 분산(variance) 두 가지 대푯값을 이용하여 보호 수준을 계산할 수 있다.

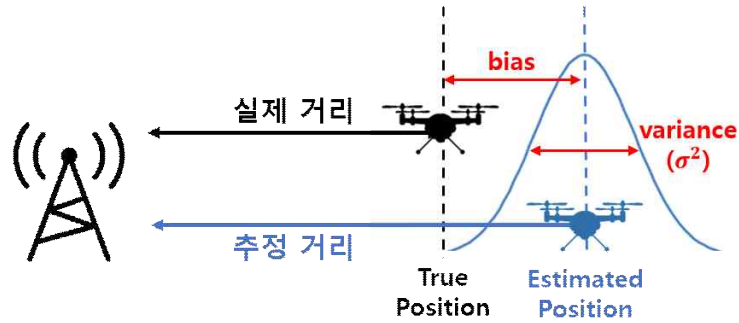


그림 90. 측위 오차의 bias와 분산

측위 알고리즘이나 신호 특성에 의하여 거리 측정치에 바이어스(bias)가 발생하고 이를 보정할 수 없을 경우, bias를 고려하여 보호 수준을 계산하여야 한다. 또한, 주변에 장애물이 많은 환경에서는 multipath에 의해 추가적으로 bias가 발생할 가능성이 있다. 그림 91은 다양한 상황에서 보호 수준을 계산하는 방법을 나타낸다. 각 그림에서 빨간색 네모는 보호 수준을 의미한다. 그림 91(a)는 multipath가 존재하지 않고 거리 오차에 bias도 없는 이상적인 경우로, 오차의 분산만을 고려하여 보호 수준을 계산할 수 있다. 그림 91(b)는 측위 알고리즘이나 신호 특성에 의하여 거리 측정치에 bias가 발생한 경우로, 이를 고려하여 그림 91(a)에 비해 보수적으로 보호 수준을 계산한다. 주변에 전파를 반사하는 장애물이 거의 없는 open-sky 환경의 경우, 일반적으로 그림 91(a), (b) 방법으로 보호 수준을 계산한다. 그러나 본 과제에서 목표하는 도심 지역과 같이 주변에 전파를 반사하는 장애물이 다수 분포하는 경우에는 그림 91(c)와 같은 방식으로 multipath를 고려하여 보호 수준을 계산하는 것이 타당하다. 그림 91(c)의 경우 multipath와 bias에 의해 발생할 수 있는 모든 상황의 가짓수를 고려하여 보호 수준을 계산한다.

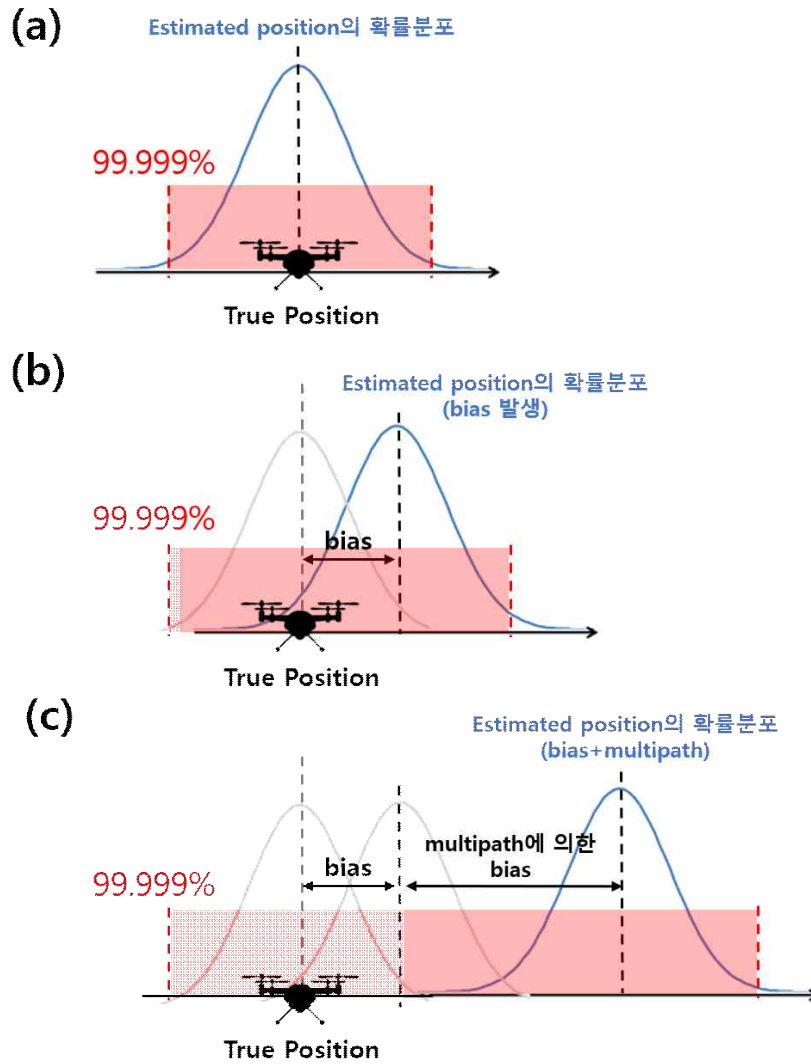


그림 91. 상황에 따른 보호 수준 계산 방법. (a) open-sky, 거리 측정치에 bias가 없는 경우, (b) 거리 측정치에 bias가 있는 경우, (c) multipath 환경

본 연구에서는 보호 수준 계산을 위해 [20]-[23]에서 소개된 multiple hypothesis solution separation (MHSS) 방식을 활용하였다. MHSS 방식에서 보호 수준은 거리 추정치에 bias가 발생한 신호의 개수에 따라 계산할 수 있는 모든 조합의 보호 수준을 포함한 범위로 정의된다[20]. [23]의 그림 5-15를 참고하여 보호 수준을 도식화하면 그림 92과 같다. 본 보고서에 기술한 보호 수준 계산 방식은 본 과제의 성과로 출판한 논문[24]의 알고리즘을 바탕으로, GPS 및 V2V 거리 측정치까지 추가로 반영한 방식이다.

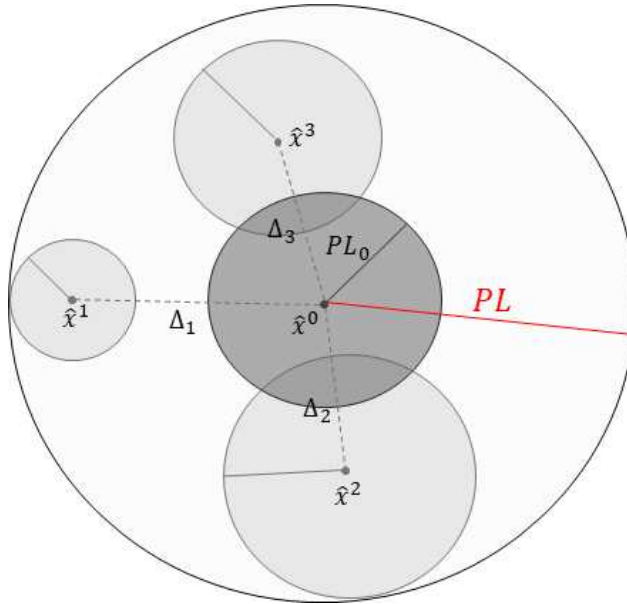


그림 92. MHSS 방식에서 보호 수준의 정의

본 연구에서 제안하는 측위 시스템은 GPS 신호뿐만 아니라 LTE와 DSRC 신호를 이용한 V2I 상대거리, 무인항공기 간 V2V 상대거리 등을 거리측정원으로 사용한다. (고 고도에서는 GPS도 활용 가능하지만, 저고도에서는 GPS는 가용하지 않다고 가정함) 따라서, 위성항법 신호만을 고려한 기존의 MHSS 방식을 그림 93과 같이 변형하여 다양한 거리측정원을 반영할 수 있도록 개선하였다.

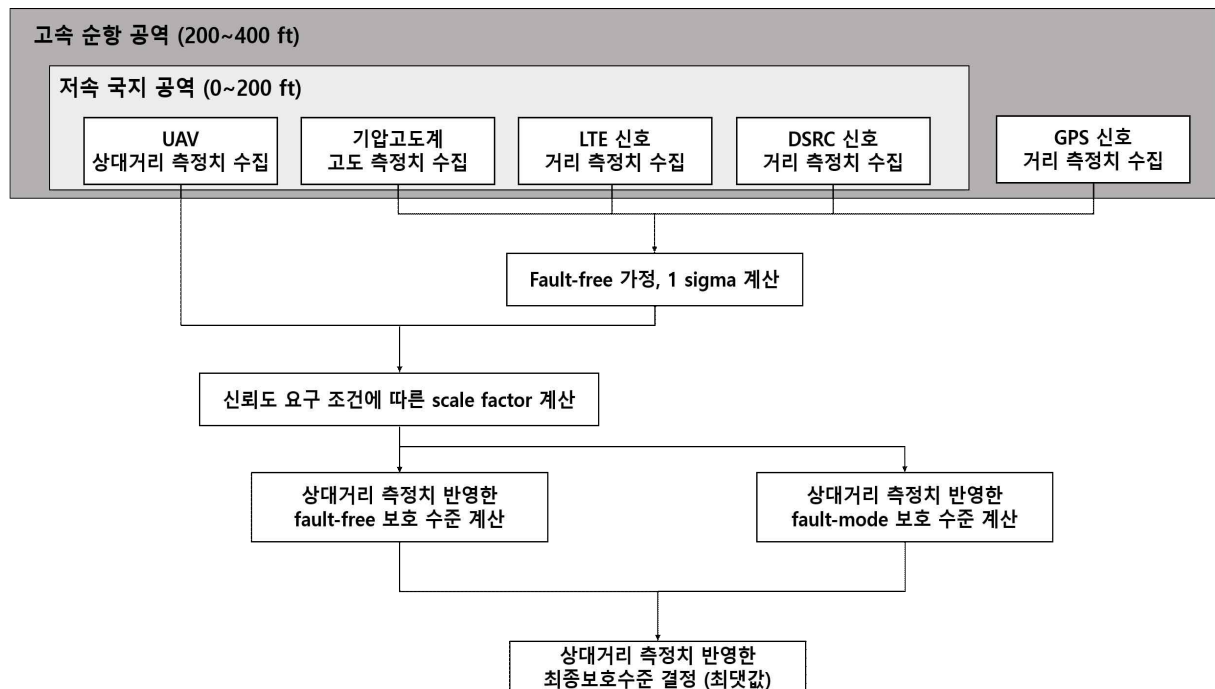


그림 93. 제안하는 측위 신뢰도 기반 보호 수준 생성 알고리즘

우선 저속 국지 공역(0~200 ft)의 경우, 고도가 낮아 주변에 건물이 많이 분포하므로 GPS 신호의 가시성을 확보하기가 힘들며, GPS 신호가 수집되더라도 무결성을 보장할 수 없다. 따라서 무인항공기 간 상대 거리 측정치와 LTE, DSRC 거리 측정치만을 거리측정원으로 사용하였다. 반면, 고속 순항 공역(200~400 ft)의 경우, 고도가 높아 GPS 신호의 가시성이 확보되므로 추가로 GPS 거리 측정치까지 고려하였다. 또한, 두 공역에서 모두 기압고도계로 고도를 측정한다고 가정하였다.

본 연구에서는 [20]을 참고하여 식 8과 같이 다중 경로, NLOS의 영향으로 의사거리(pseudorange)에 일정 수준 이상의 bias가 발생한 신호를 고장 신호로 정의하고, 그 외의 신호를 정상 신호라고 정의하였다.

$$E_k \sim N(b_k, \sigma_k^2) \quad (8)$$

이때, 확률변수  $E_k$ 는  $k$ 번째 기지국과 사용자 사이의 거리측정 오차이며,  $b_k$ 와  $\sigma_k$ 는 각각 거리측정 오차의 평균과 표준편차이다. Nominal 상태의 최대 거리측정 bias를  $b_{\max,k}$ 라고 할 때,  $b_k > b_{\max,k}$ 인 경우 고장 신호이며,  $b_k < b_{\max,k}$ 인 경우 정상 신호이다 [20]. 고장 신호는 일반적인 LOS 상황에서 발생할 수 없는 bias가 추가로 발생한 경우로 판단할 수 있다.

Fault-mode(FM)와 fault-free(FF)는 각각 고장 신호를 하나 이상 포함한 위치 추정치와 고장 신호를 포함하지 않는 위치 추정치를 뜻한다[20]. 최종 보호 수준 솔루션은 FM과 FF 각각에서 도출한 보호 수준 부분 집합의 최댓값이다. 식 9~28은 [20]에 제시된 GNSS 관련 수식을 LTE, DSRC 등 V2I 거리측정치와 무인항공기 간 V2V 상대거리 측정치 및 기압고도계의 측정치까지 고려하여 변형한 것이다.

#### ① Fault-free 가정, $\sigma_{0,q}$ 계산

FF의 위치 추정치  $\hat{x}^0$ 는 식 9와 같이 가중최소자승법(WLS; weighted least-squares)로 계산된다.

$$\hat{x}^0 = S^0 \cdot y \quad (9)$$

이때, 투영행렬(projection matrix)  $S^0$ 은 식 10과 같다. 또한, 행렬  $y$ 의  $k$ 번째 행  $y_k$ 는 식 11과 같다.

$$S^0 = (G^T W G)^{-1} G^T W \quad (10)$$

$$y_k = [r_k^2 - r_n^2 - x_k^2 - y_k^2 - z_k^2 + x_n^2 + y_n^2 + z_n^2] \quad (11)$$

이때,  $n$ 은 측위에 사용되는 LTE, DSRC, GPS 거리측정원 중 마지막 측정원의 인덱스(index)이며, 각 신호의 인덱스는 임의로 정할 수 있다.  $r_k$ 는  $k$ 번째 측정원과 무인항공기의 의사거리,  $x_k, y_k, z_k$ 는 직교 좌표계 상에서  $k$ 번째 측정원의 위치를 나타낸다. 식 10에서 기하행렬(geometry matrix)  $G$ 와 가중행렬(weighting matrix)  $W$ 는 각각 식 12, 13과 같이 정의된다.  $El_k$ 와  $Az_k$ 는 각각 무인항공기로부터  $k$ 번째 거리측정원까지의 고도각(elevation angle)과 방위각(azimuth angle)을 뜻한다. 식 13에서  $\sigma_k^2$  ( $1 \leq k \leq n$ )는 거리측정원과 무인항공기의 의사거리 측정 오차의 분산이며,  $\sigma_{Alt}^2$ 는 기압고도계의 고도 측정 오차의 분산이다.

$$G_k = \begin{cases} [-\cos El_k \sin Az_k - \cos El_k Az_k - \sin El_k] & (1 \leq k \leq n) \\ [0 \ 0 \ 1 \ 0] & (k = n+1) \end{cases} \quad (12)$$

$$W^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \sigma_n^2 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \sigma_{Alt}^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

이에 따라, east-north-up (ENU) 좌표계에서 측위 오차  $\sigma_{0,q}$ 는 식 14와 같이 표현된다.  $q$ 의 값이 1, 2, 3일 때, 각각 동쪽, 북쪽, 위쪽을 나타낸다.

$$\sigma_{0,q} = \sqrt{(G^T W G)^{-1}_{q,q}} \quad (14)$$

## ② 신뢰도 요구조건에 따른 scale factor 계산

스케일 팩터  $K_q^0$ 는 식 15, 16과 같이 신뢰도 요구조건에 의하여 결정된다[20]. 신뢰도를 나타내는 확률  $P_{MI\_HOR}$ 과  $P_{MI\_VER}$ 는 각각 수평, 수직 MI가 발생할 확률이다. [20]에서는 무결성 사건 기준을 HMI로 설정하였지만, 본 연구에서는 위치 오차가 보호 수준을 초과하는 MI를 기준으로 설정하였다. 이는 본 연구에서는 alert limit을 따로 설정할 필요가 없고 무인항공기 간의 충돌 방지를 목적으로 보호 수준을 계산하기 때문이다.  $Q$ 는 표준 정규분포의 꼬리확률이고,  $N_{maxsub}$ 는 고장 신호의 최대 개수이다.

$$K_1^0 = K_2^0 = Q^{-1} \left( \frac{P_{MI\_HOR}}{4 \cdot (N_{\max sub} + 1)} \right) \times c_{hor} \quad (15)$$

$$K_3^0 = Q^{-1} \left( \frac{P_{MI\_VER}}{2 \cdot (N_{\max sub} + 1)} \right) \times c_{ver} \quad (16)$$

식 15, 16에서  $c_{hor}$ 와  $c_{ver}$ 은 주어진 신뢰도 요구조건에 따른 위치 오차 분포를 over-bounding 하기 위한 보정 상수이다. 제안하는 측위 시스템에서는 무인항공기 간 상대거리 측정치까지 사용하기 때문에, 모든 거리측정 오차가 독립된 정규분포를 따른다고 가정할 수 없다. 이에 따라, 모든 거리 측정치가 정규분포를 따른다고 가정하는 이상적인 경우에 비하여 더 큰 위치 오차를 가지게 되며, 이럴 경우에도 무결성을 보장하기 위해서는 보호 수준이, 주어진 신뢰도 요구조건에 따른 위치 오차 분포를 over-bounding 할 수 있어야 한다.  $c_{hor}$ 와  $c_{ver}$ 의 값은 통계적으로 추정하였다.

### ③ 상대거리 측정치 반영한 fault-free 보호 수준 계산

특정 무인항공기를 기준으로 LOS에 있는 무인항공기가 총  $m$ 대일 때, 무인항공기 간 상대거리 측정치를 반영한 가중행렬  $W'$ 은 식 17과 같다.

$$W'^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_n^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Alt}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{coop,1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{coop,m}^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 17에서,  $\sigma_{coop,i}$  ( $1 \leq i \leq m$ )은 정확한 위치를 알지 못하는 무인항공기(거리측정원)와의 상대거리를 측정하는 cooperative ranging의 불확실성(uncertainty)을 나타낸다. 이는 거리측정원이 되는 무인항공기의 위치가 불확실하므로, 해당 무인항공기(거리측정원)의 위치추정 오차까지 고려하여 식 18과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{coop,i}^2 = & \sigma_{0,1,i}^2 + \sigma_{0,2,i}^2 + \sigma_{0,3,i}^2 \\ & + 2\rho_{1,2,i}\sigma_{0,1,i}\sigma_{0,2,i} + 2\rho_{1,3,i}\sigma_{0,1,i}\sigma_{0,3,i} + 2\rho_{2,3,i}\sigma_{0,2,i}\sigma_{0,3,i} + \sigma_{V2V}^2 \end{aligned} \quad (18)$$

여기서,  $\sigma_{0,q,i}$ 는  $i$ 번째 무인항공기 거리측정원의 측위 오차 표준편차이며, 식 14에서 구

한 바 있다.  $\rho_{q_1 q_2, i}$ 는  $i$ 번째 무인항공기 거리측정원의  $\sigma_{0, q_1, i}$ 와  $\sigma_{0, q_2, i}$  사이의 correlation coefficient이다. 또한,  $\sigma_{V_2 V}^2$ 는 무인항공기 상대거리 측정 오차의 분산이다. 무인항공기 상대거리 측정치를 고려한 투영행렬  $S'^0$ , 기하행렬  $G'$ , 측위 오차의 표준편차  $\sigma'_{0, q}$ 는 각각 식 19, 20, 21과 같이 정의된다.

$$S'^0 = (G'^T W' G')^{-1} G'^T W' \quad (19)$$

$$G'_k = \begin{cases} [0 & 0 & 1 & 0] & (k = n+1) \\ [-\cos E_k \sin A z_k & -\cos E_k A z_k & -\sin E_k & 1] & \text{others} \end{cases} \quad (20)$$

$$\sigma'_{0, q} = \sqrt{(G'^T W' G')_{q, q}^{-1}} \quad (21)$$

최종적으로 FF에서 모든 의사거리를 고려한 보호 수준은 식 22의 방법으로 계산된다. 보호 수준( $PL_0$ )은 거리 측정의 bias와 노이즈를 모두 포함하는 범위이며,  $q$ 의 값이 1, 2, 3인 경우는 각각 동쪽, 북쪽, 위쪽을 나타낸다.

$$(PL_0)_q = K_q^0 \cdot \sigma'_{0, q} + \sum_{k=1}^N |s'_{q, k}| \cdot b_{\max, k} \quad (22)$$

여기서  $N = n + m + 1$ 이며,  $s'_{q, k}$ 은 투영행렬  $S'^0$ 의  $q$ 행  $k$ 열이다.

#### ④ 상대거리 측정치 반영한 fault-mode 보호 수준 계산

FM 위치 추정치 및 보호 수준 솔루션의 가짓수는 고장 신호의 최대 개수인  $N_{\max \text{fault}}$ 에 의해 결정된다.  $N_{\max \text{fault}}$  이하의 고장 신호가 발생하였다고 가정하면, 식 23에 따라  $N_{\max \text{sub}}$  개의 보호 수준 부분 집합을 구할 수 있다.

$$N_{\max \text{sub}} = \sum_{n=1}^{N_{\max \text{fault}}} \binom{N}{n} \quad (23)$$

$i$ 번째 부분 집합 위치 추정치는 식 24와 같이 계산된다.

$$\hat{x}^i = S'^i \cdot y \quad (24)$$

여기서 투영행렬  $S^i$ 는 식 25와 같다.  $M'_i$ 는 고장 신호의 인덱스에 해당하는 대각 원소가 0인  $(N \times N)$  크기의 단위행렬(identity matrix)이다.

$$S^i = (G'^T M'_i W' G')^{-1} G'^T M'_i W' \quad (25)$$

이에 따라, solution separation 항인  $\Delta_{i,q}$ 와 보호 수준( $PL_i$ )은 식 26, 27과 같이 정의된다.

$$\Delta_{i,q} = \left| \hat{x}_q^i - \hat{x}_q^0 \right| \quad (26)$$

$$(PL_i)_q = \Delta_{i,q} + K_q^i \cdot \sigma'_{i,q} + \sum_{k=1}^N \left| s'_{q,k}{}^i \right| \cdot b_{\max,k} \quad (27)$$

스케일 팩터  $K_q^i$ 는 식 15, 16과 동일하다.

#### ⑤ 상대 거리 측정치 반영한 최종 보호 수준 결정

모든 보호 수준 부분 집합을 포함하는 최종 보호 수준 솔루션은 식 28과 같다.

$$PL_q = \max((PL_0)_q, \max((PL_i)_q)) \quad (28)$$

$PL_0$ 와  $PL_i$ 는 각각 식 22, 26에서 도출된 값이다.

#### (마) 측위 시뮬레이션을 통한 보정 상수 결정

무인항공기 거리 측정치가 서로 독립적이지 않은 경우, 오차가 누적되어 예상되는 신뢰도 요구 수준을 충족하지 못하는 경우가 생길 수 있다. 따라서, 이런 경우에는 일반적으로 통계적인 방법을 이용하여, 주어진 신뢰도 요구조건에 따른 위치 오차 분포를 over-bounding 하도록 보호 수준을 계산한다[25]. 무인항공기 간 상대거리 측정을 포함한 모든 거리측정원의 거리 측정치가 독립적이라고 가정한 이상적인 경우와 거리 측정원의 거리 측정치가 서로 의존적인 실제 경우에 대하여 측위 오차의 표준편차를 비교하면 그림 94, 95와 같다. 그림 94, 95는 각각 수평, 수직 방향에 해당한다. 각 그래프는 200,000회의 측위 오차 측정 시뮬레이션의 결과이다. 거리측정원에 따른 오차의 표준편차는 실측값을 바탕으로 표 18과 같이 가정하였다. GPS와 기압고도계 거리 측정 오차는 각각 [26], [27]에서 제안한 값을 사용하였다.

표 18. 시뮬레이션에서 가정한 거리측정원에 따른 거리측정 오차

| 거리측정 원            | 오차 표준편차( $\sigma$ , meter) |
|-------------------|----------------------------|
| GPS               | 8                          |
| LTE               | 10                         |
| DSRC              | 1                          |
| 기압고도계             | 12                         |
| 무인항공기 상대거리 (DSRC) | 2                          |

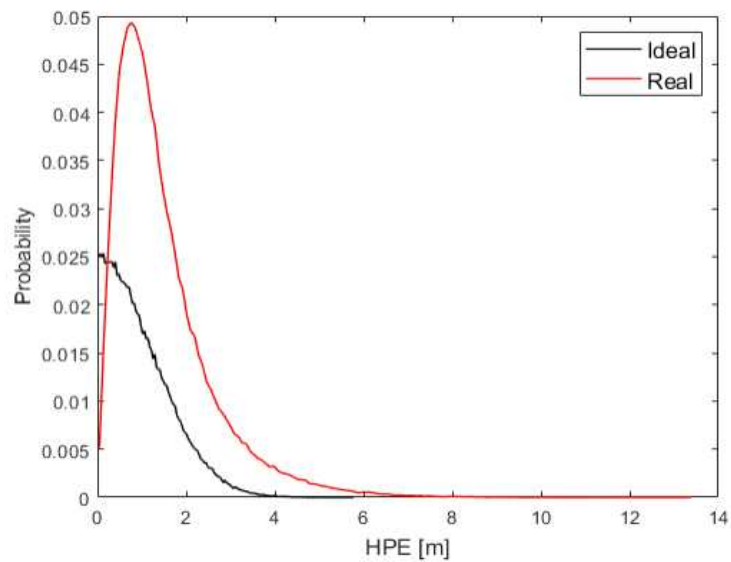


그림 94. 수평 방향에 대하여 모든 거리 측정치가 독립인 경우(Ideal)와 실제 시뮬레이션 결과(Real) 비교

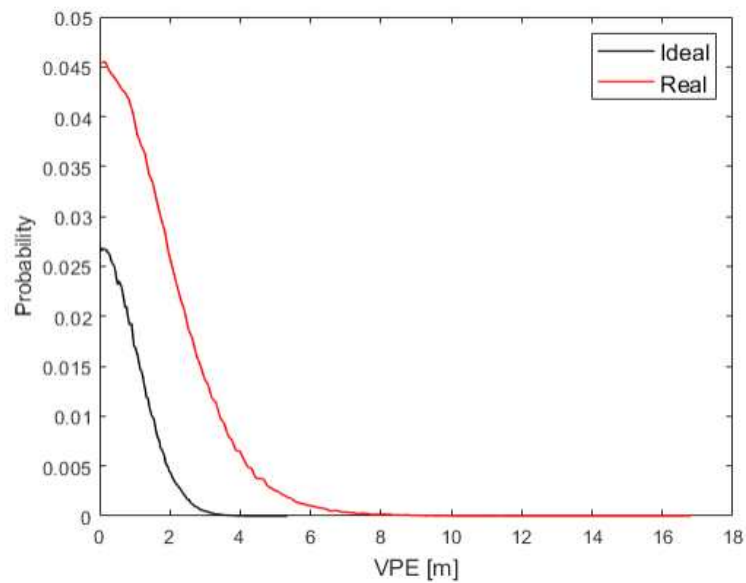


그림 95. 수직 방향에 대하여 모든 거리 측정치가 독립인 경우(Ideal)와 실제 시뮬레이션 결과(Real) 비교

그림 94, 95에서 실제 위치 오차는 이상적인 경우에 비해 큰 값을 가진다. 주어진 신뢰도 요구조건에 따른 위치 오차 분포를 over-bounding 할 때, 위치 오차가 커지는 현상을 보상해주는 상수인  $c_{hor}$ 와  $c_{ver}$ 를 큰 수로 설정하면 측위 신뢰도는 보장할 수 있으나, 보호 수준의 크기가 지나치게 커져서 가용성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서, 알맞은  $c_{hor}$ ,  $c_{ver}$  값을 찾기 위해 총 200,000회의 시뮬레이션을 통하여 측위 신뢰도를 측정하였고, 그 결과는 표 19와 같다. 측위 신뢰도 측정 결과를 바탕으로 보호 수준이 지나치게 커지지 않는 동시에 신뢰도 요구조건을 충족할 수 있도록  $c_{hor}$ 와  $c_{ver}$ 을 각각 2와 2.2로 설정하였다.

표 19.  $c_{hor}$ ,  $c_{ver}$ 에 따른 측위 신뢰도 변화

| $c_{hor}$ | 측위 신뢰도  | $c_{ver}$ | 측위 신뢰도  |
|-----------|---------|-----------|---------|
| 1.2       | 99.958% | 1.2       | 99.884% |
| 1.4       | 99.994% | 1.4       | 99.977% |
| 1.6       | 99.998% | 1.6       | 99.994% |
| 1.8       | 100%    | 1.8       | 99.998% |
| 2.0       | 100%    | 2.0       | 100%    |
| 2.2       | 100%    | 2.2       | 100%    |
| 2.4       | 100%    | 2.4       | 100%    |

#### (6) 도심 공역별 안전거리 생성 알고리즘 연구

##### (가) 무인항공기 안전거리 생성 시뮬레이션

본 연구에서는 그림 93과 같이 저속 국지 공역에서는 무인항공기 측위에 무인항공기 간 상대거리 측정치와 고도기압계, LTE 및 DSRC 신호를 이용했으며, 고속 순항 공역에서는 GPS 거리 측정치를 추가하여 무인항공기의 위치를 추정했다. 앞서 제시한 측위 신뢰도 기반 보호 수준 계산 기법을 실제 3차원 도심 환경 내의 기지국 분포에 적용하면 무인항공기 간 안전거리를 구할 수 있다. 앞서 제시한 3차원 도심 지도 내에서 최적화 기법을 통하여 얻은 최적화된 중계기 분포를 고려하여 무인항공기의 안전거리를 생성할 수 있도록 시뮬레이터를 제작하였다.

그림 96은 제작된 3차원 시뮬레이터의 출력 결과를 여러 각도에서 바라본 예시이다. 3차원 시뮬레이터 상에 LTE, DSRC 송신기를 그림 74와 동일하게 배치하였으며, 무인항공기의 안전거리는 그림 97과 같이 3차원 타원체(confidence ellipsoid)로 나타나게 된다. 시뮬레이터 상에 보이는 GPS 위성의 위치는 가시화의 편의상 실제 천정 높이에서 약  $10^{-7}$  배 축소된 천정에 투사하여 표시하였다.

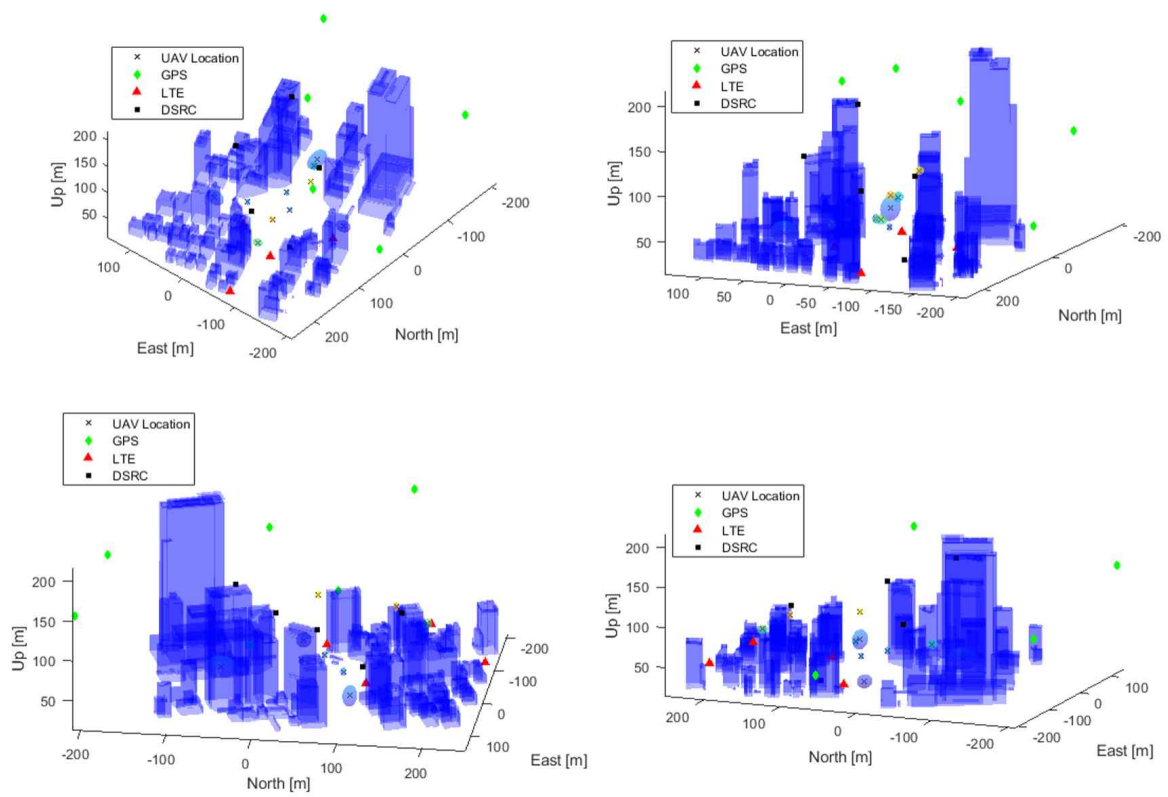


그림 96. 제작된 3D 도심 시뮬레이터 상에 표시된 무인항공기(UAV), GPS, LTE, DSRC의 위치

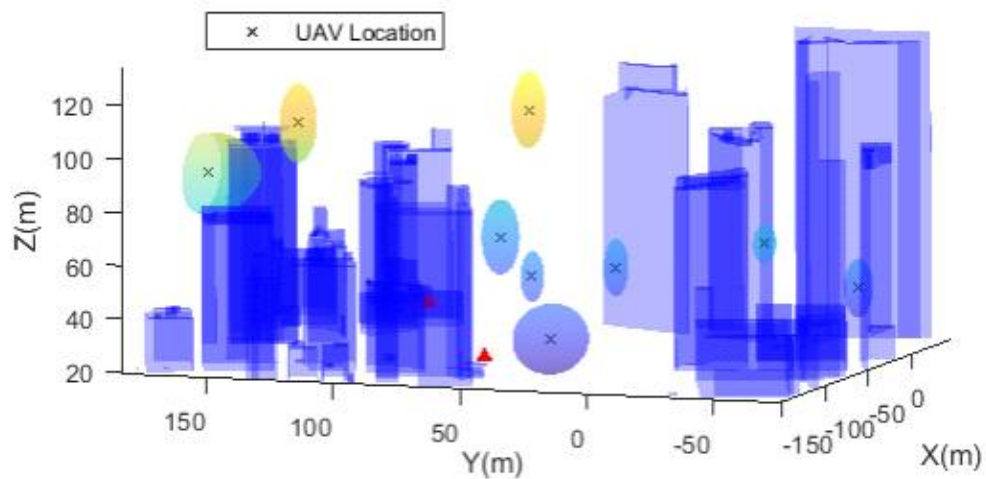


그림 97. 무인항공기 안전거리를 3차원 타원체로 시각화한 모습

그림 98은 bias와 고장 신호가 없다고 가정할 때, 실제 무인항공기 위치와 안전거리를 비교한 시뮬레이션 예시이다. 무인항공기의 수평 방향 위치는 그림 81과 같으며, 수직 방향 위치는 임의로 생성하였다. 각 거리측정원에 의한 거리측정 오차는 표 18과 동일하

게 설정하였다.

그림 98에서 무인항공기 위치추정 오차는 실제 위치(true location, 빨간색 동그라미)와 추정 위치(estimated location, 검은색 x 표시)의 차이이다. 무인항공기의 실제 위치가 안전거리(3차원 타원체) 안쪽으로 바운딩 되면 위치추정 오차 또한 안전거리 내에 바운딩 되는 것이므로, 주어진 신뢰도 요구조건 내에서 안전거리가 제대로 생성된 것임을 알 수 있다.

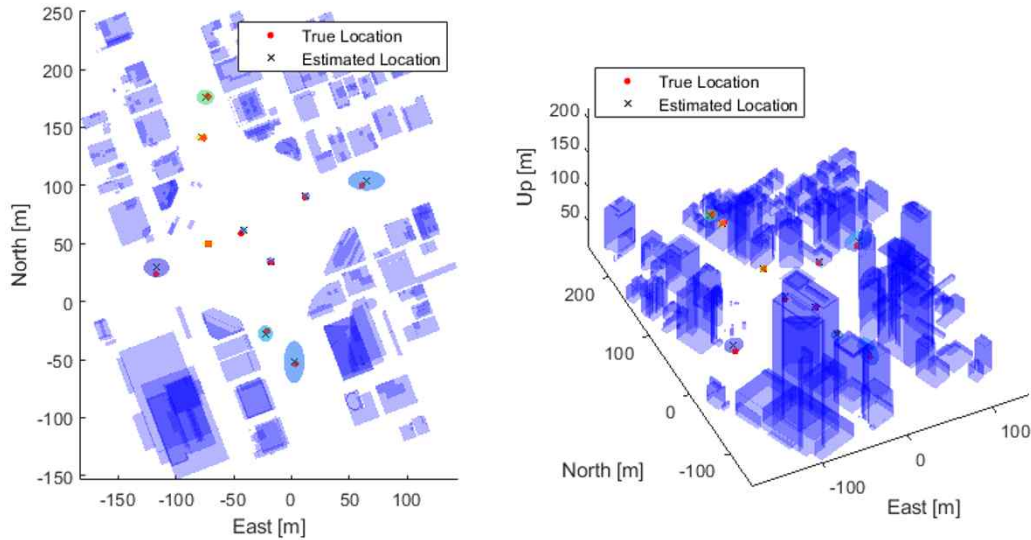


그림 98. 구역별 안전거리 생성 알고리즘 시뮬레이션 결과. 모든 무인항공기에 대해서 안전거리(타원체)가 실제 위치를 포함함 (즉, 안전거리가 측위 오차를 바운딩 함)

그림 99, 100은 각각 수평, 수직 방향에 관한 Stanford diagram이다. 시뮬레이션에서 LTE 기지국과 DSRC 송수신기의 위치는 그림 80에서  $\sigma$ 가 1 m일 때의 최적 분포를 사용하였으며, 각 기지국 및 송수신기의 좌표는 표 20과 같다. 또한, 각 거리측정원에 의한 거리측정 오차의 표준편차는 표 18과 동일하게 설정하였으며, true distance에 정규분포 난수를 더하여 현실적인 거리측정 값을 얻었다. 매 시뮬레이션마다 무인항공기는 그림 72의 무인항공기 비행 구역에 무작위로 10 대씩 생성하였다. 총 105,071 회의 시뮬레이션을 진행하였고, 1 회마다 10 대의 무인항공기를 무작위로 배치하였으므로 총 1,050,710 epoch의 안전거리 계산이 이루어졌다. 안전거리 계산 시뮬레이션 횟수는 [28]을 참고하여 결정하였다. [28]에서는 99.99% 측위 신뢰도를 기준으로 약 85,000 epoch의 시뮬레이션을 진행하였으므로 99.999%의 측위 신뢰도를 요구하는 본 과제에서는 850,000 epoch 이상의 시뮬레이션을 진행하는 것이 적절하다. 마지막으로 시뮬레이션에서 사용한 파라미터는 표 21과 같이 설정하였다. 일반적인 line-of-sight 상황을 가정하였으므로,  $b_{\max,k}$ 와  $N_{\max,sub}$ 를 0으로 두었다.

표 20. 시뮬레이션에서 사용한 LTE 기지국과 DSRC 송수신기 좌표

|    | LTE 기지국              | DSRC 송수신기                |
|----|----------------------|--------------------------|
| 1  | (-119.81, 51.86, 27) | (-96.12, -3.50, 19.28)   |
| 2  | (-84.19, 242.70, 30) | (-79.24, 97.57, 19.32)   |
| 3  | (-1.16, 114.44, 31)  | (-110.81, 171.08, 42.68) |
| 4  |                      | (-50.29, 1.49, 92.25)    |
| 5  |                      | (-25.44, -58.40, 40.17)  |
| 6  |                      | (-0.31, -125.92, 119.86) |
| 7  |                      | (-58.25, 178.97, 79.49)  |
| 8  |                      | (-42.20, 147.47, 47.83)  |
| 9  |                      | (44.50, -80.53, 73.24)   |
| 10 |                      | (6.43, 5.05, 99.68)      |
| 11 |                      | (83.22, 47.26, 44.98)    |
| 12 |                      | (52.50, 123.21, 90.38)   |

표 21. 거리 측정치에 bias가 없는 경우의 시뮬레이션 파라미터

|               |           |             |     |
|---------------|-----------|-------------|-----|
| $P_{MI\_HOR}$ | $10^{-5}$ | $c_{hor}$   | 2   |
| $P_{MI\_VER}$ | $10^{-5}$ | $c_{ver}$   | 2.2 |
| $N_{maxsub}$  | 0         | $b_{max,k}$ | 0 m |

그림 99, 100에서  $n$ 은 점의 개수를 의미하며,  $\log(n)$ 이 클수록 점의 밀도가 더 높다. 시뮬레이션 결과를 보면, 수평, 수직 두 방향 모두에 대하여 99.999% 이상의 확률로 nominal operations 상태임을 알 수 있다. 즉, 무인항공기의 측위 오차는 99.999% 이상의 확률로 안전거리 안으로 바운딩 되었음을 알 수 있다.

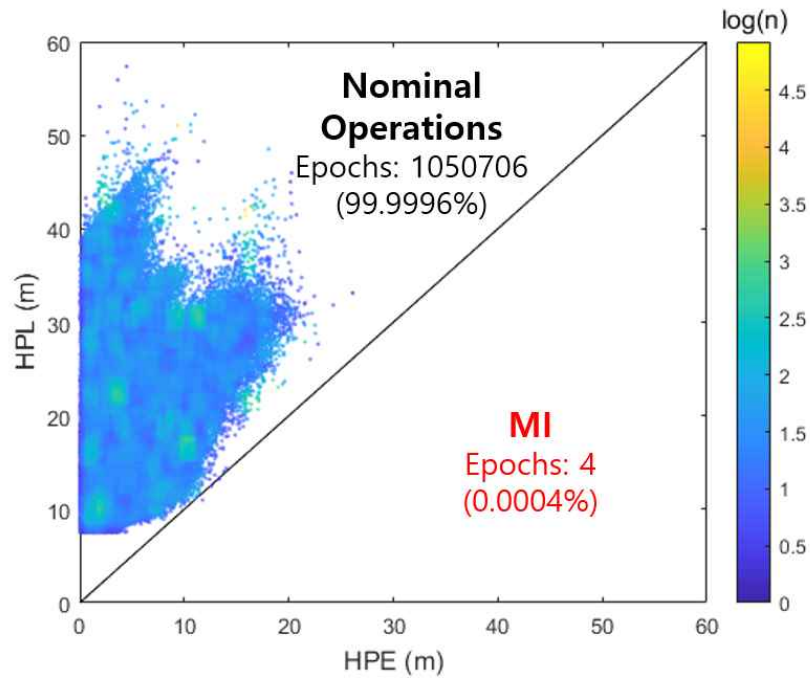


그림 99. 거리 측정치에 bias가 없는 경우의 수평 Stanford Diagram (99.9996%의 확률로 수평 안전거리가 수평 측위 오차를 바운딩함)

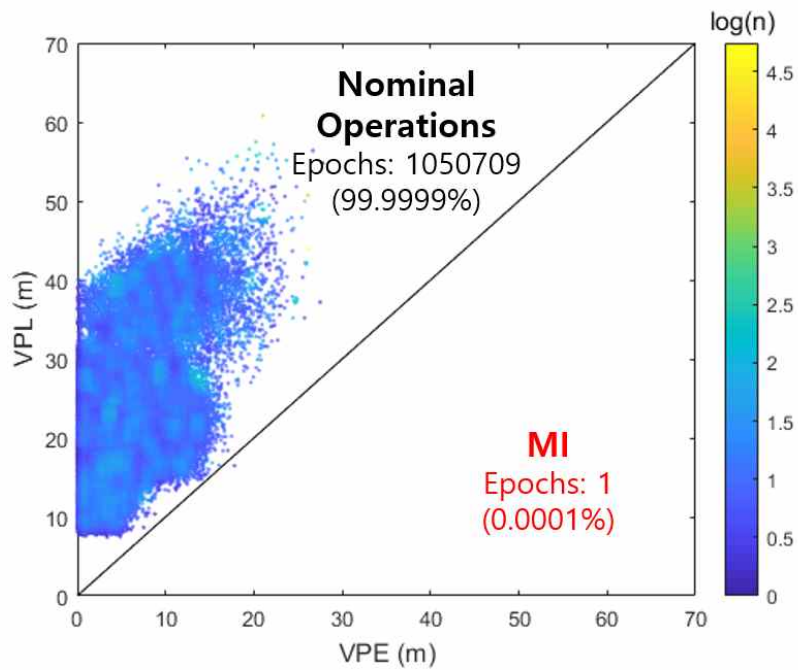


그림 100. 거리 측정치에 bias가 없는 경우의 수직 Stanford Diagram (99.9999%의 확률로 수직 안전거리가 수직 측위 오차를 바운딩함)

#### (나) 무인항공기 관제 실현성 검토

본 연구에서 개발한 cooperative positioning 방식은 일반적인 line-of-sight 상황을 가정하므로 multipath에 의한 영향을 따로 고려해주지 않아도 되었다. 하지만, 실제 도심 지

역에서 무인항공기를 관제하는 경우 주변 환경이나 측위 알고리즘, 신호 특성에 의하여 거리 측정치에 예기치 못한 측위 오차가 추가로 발생할 수 있다. 따라서, 이를 고려한 시뮬레이션을 추가로 진행하였다.

시뮬레이터 상에서 거리 측정치에 임의의 오차를 추가했을 때의 시뮬레이션 예시는 그림 101과 같다. 시뮬레이션을 위해서 임의로 선택된 단일 거리 측정치에 10 m의 거리 오차를 추가하였다.

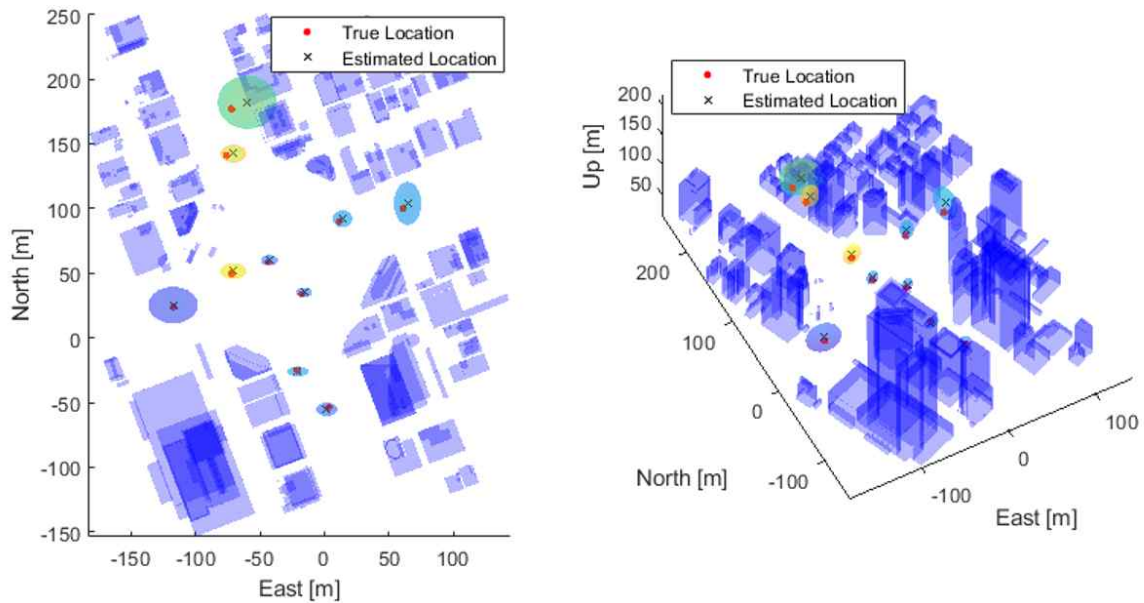


그림 101. 단일 거리 측정치에 bias가 있을 때 구역별 안전거리 생성 알고리즘 시뮬레이션 결과. 모든 무인항공기에 대해서 안전거리(타원체)가 실제 위치를 포함함 (즉, 안전거리가 측위 오차를 바운딩함)

그림 101을 보면, bias를 고려하는 알고리즘이 효과적으로 동작하여 모든 무인항공기에 대하여 안전거리가 무인항공기의 실제 위치를 포함하는 것을 알 수 있다. 그림 98과 비교했을 때, 알고리즘이 bias를 추가로 고려하기 때문에 안전거리의 크기가 증가했음을 알 수 있다.

거리 측정치에 bias가 있는 경우에 대한 수평 및 수직 방향 Stanford diagram은 그림 102, 103과 같다. 이는 총 1,000,000 epoch의 시뮬레이션을 진행한 결과이다. 시뮬레이션에서 기지국 분포와 거리 오차, 무인항공기 생성 방식은 bias를 고려하지 않았을 때와 동일하게 설정하였다. 단, 안전거리 생성 시에 bias를 추가로 고려해주어야 하므로 시뮬레이션 파라미터를 표 22와 같이 설정하였다.

표 22. 거리 측정치에 bias가 있는 경우의 시뮬레이션 파라미터

|               |           |             |     |
|---------------|-----------|-------------|-----|
| $P_{MI\_HOR}$ | $10^{-5}$ | $c_{hor}$   | 2   |
| $P_{MI\_VER}$ | $10^{-5}$ | $c_{ver}$   | 2.2 |
| $N_{maxsub}$  | 5         | $b_{max,k}$ | 1 m |

Stanford diagram를 보면, 모든 경우에 대하여 99.999% 이상의 확률로 (실제로는 100%의 확률로) 시스템은 nominal operations 상태임을 알 수 있다. 즉, 안전거리가 무인항공기의 실제 위치를 99.999% 이상의 확률로 바운딩하였다. 따라서, 도심 지역의 환경으로 인해 거리 측정치에 bias가 생기는 경우에도 본 연구를 통해 개발된 알고리즘을 사용하면 안전거리를 정상적으로 도출할 수 있음을 알 수 있고, 이는 본 알고리즘이 실제 도심 지역에서의 관제 시스템에 활용되기 적절함을 의미한다.

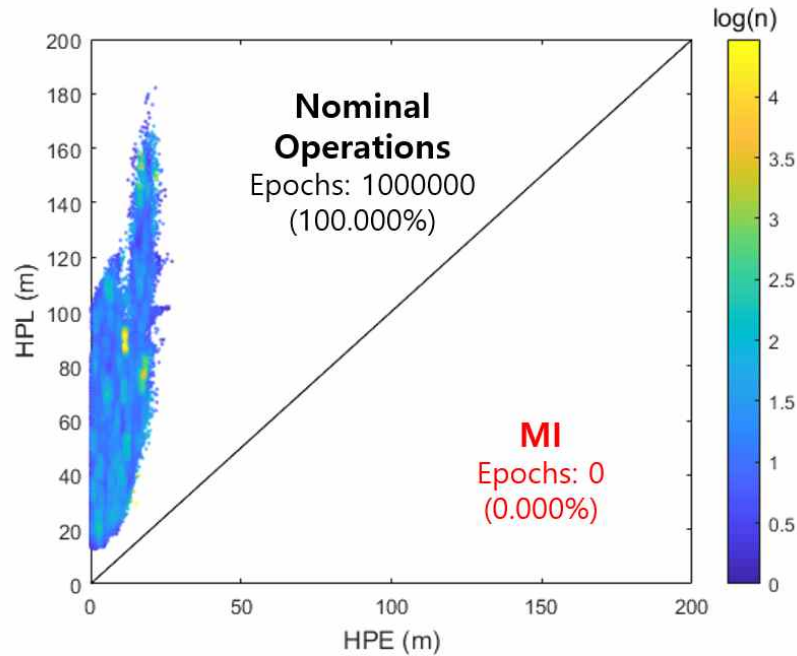


그림 102. 거리 측정치에 bias가 있는 경우의 수평 Stanford Diagram (100%의 확률로 수평 안전거리가 수평 측위 오차를 바운딩함)

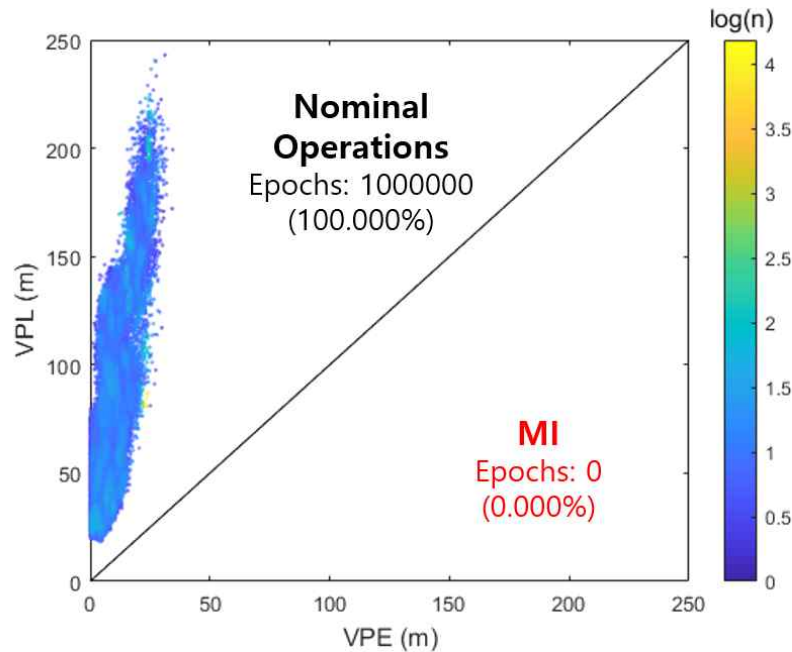


그림 103. 거리 측정치에 bias가 있는 경우의 수직 Stanford Diagram (100%의 확률로 수직 안전거리가 수직 측위 오차를 바운딩함)

#### (다) 통신 단절 및 간섭 대처방안 검토

본 과제에서 제안하는 측위 시스템은 LTE, DSRC 기지국의 거리측정 신호가 모든 비행 영역에서 3개 이상 수신될 수 있도록 기지국 분포를 구축하며 이외에도 주변 무인항공기 간 상대거리 측정센서(UWB 거리센서 등)를 사용하여 일부 거리측정 신호가 단절 및 간섭 위험에 노출되더라도 지속적인 측위가 가능하도록 설계되었다. 또한 추후 무인항공기 onboard 관성센서, 지자기 센서 등과의 결합을 통하여 복합적인 측위 시스템으로 개발한다면 모든 거리측정 신호가 완전히 차단되는 환경에서도 수 분여의 측위가 가능할 것이다.

#### (라) 도심 전파환경 및 비행속도 고려 검토

본 과제에서 제안하는 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘은 다수의 multipath 신호를 고려할 수 있으므로 다양한 도심 환경에 적용될 수 있다. 또한, 개발한 알고리즘은 도심 전파 환경에 따른 다양한 변수를 조절하여 안전거리를 생성하므로, 추후 도심 전파환경에 따른 측위 오차 모델과 함께 활용된다면 더욱 신뢰도 있는 관계 시스템을 구축할 수 있을 것이다. 더불어, 무인항공기 비행속도를 추가로 고려한다면 더욱 현실적으로 무인항공기 간 충돌을 방지할 수 있을 것이다.

그림 104는 무인항공기 비행 방향으로 속력에 비례하게 위치 오차 분포를 over-bounding 하여 안전거리를 생성하는 방식의 예시이다. 그림 104(a)에서는 비행속도

를 고려하지 않고 위치 오차만을 이용하였으며, 그림 104(b)~(e)는 비행속도를 고려하여 위치 오차 분포를 over-bounding 하였다. 비행속도를 고려할 경우, 특정 시간 이내에 무인항공기가 존재할 수 있는 범위를 포함하여 안전거리를 생성한다. 그림 104(b)~(e)의 각 무인항공기 안전거리는 현 속도를 고려하였을 때 현재 안전거리를 생성한 시점 이후 1초 이내에 무인항공기가 존재할 수 있는 범위를 나타낸다. (예시로서 1초 이후의 안전거리를 고려한 것이고 비행 속도가 유지된다면 임의의 시간 이후로도 고려 가능함)

그림 104(b), (c)는 각각 두 무인항공기가 서로 가까워지는 방향으로 천천히 이동(2 m/s)할 때와 빠르게 이동(4 m/s)할 때를 나타낸다. 그림 104(c)에서 두 무인항공기의 안전거리가 겹쳐지므로 향후 1초 이내에 무인항공기의 충돌 가능성을 내포한다. 그림 104(d), (e)는 각각 두 무인항공기가 서로 멀어지는 방향으로 천천히 이동(2 m/s)할 때와 빠르게 이동(4 m/s)할 때를 나타낸다. 이 경우에는 그림 104(b), (c)와는 달리 두 무인항공기의 안전거리가 겹쳐지지 않으며, 이는 제안하는 비행속도를 고려한 안전거리 생성 알고리즘이 효과적임을 나타낸다.

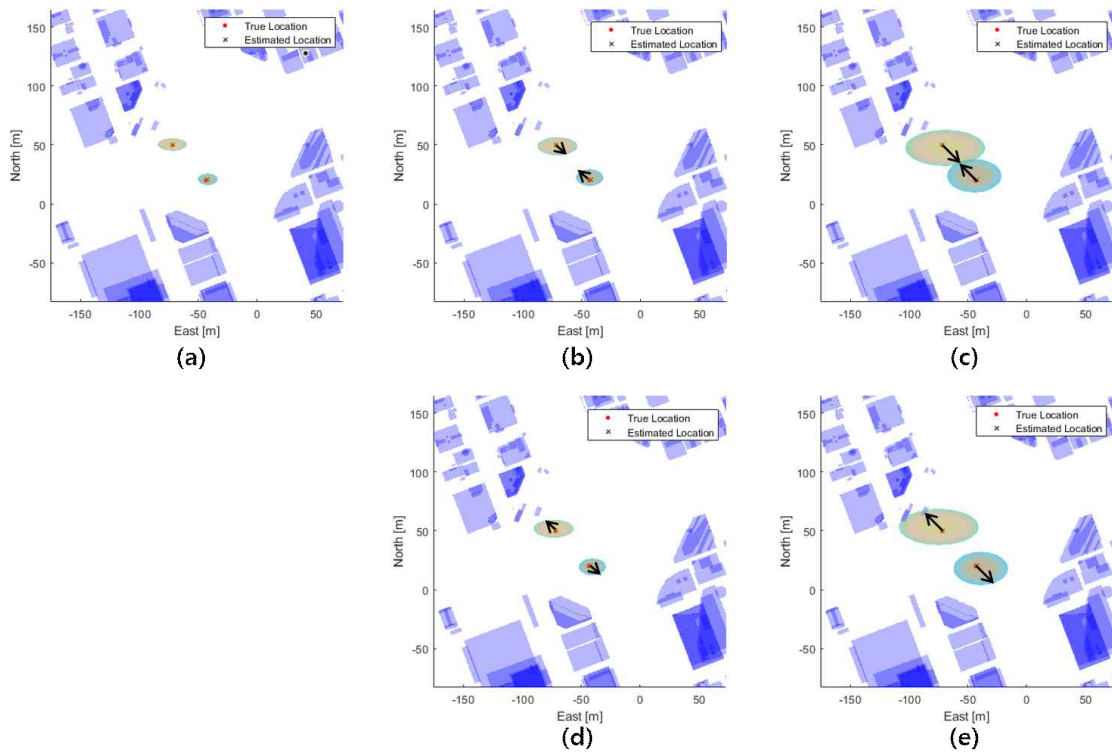
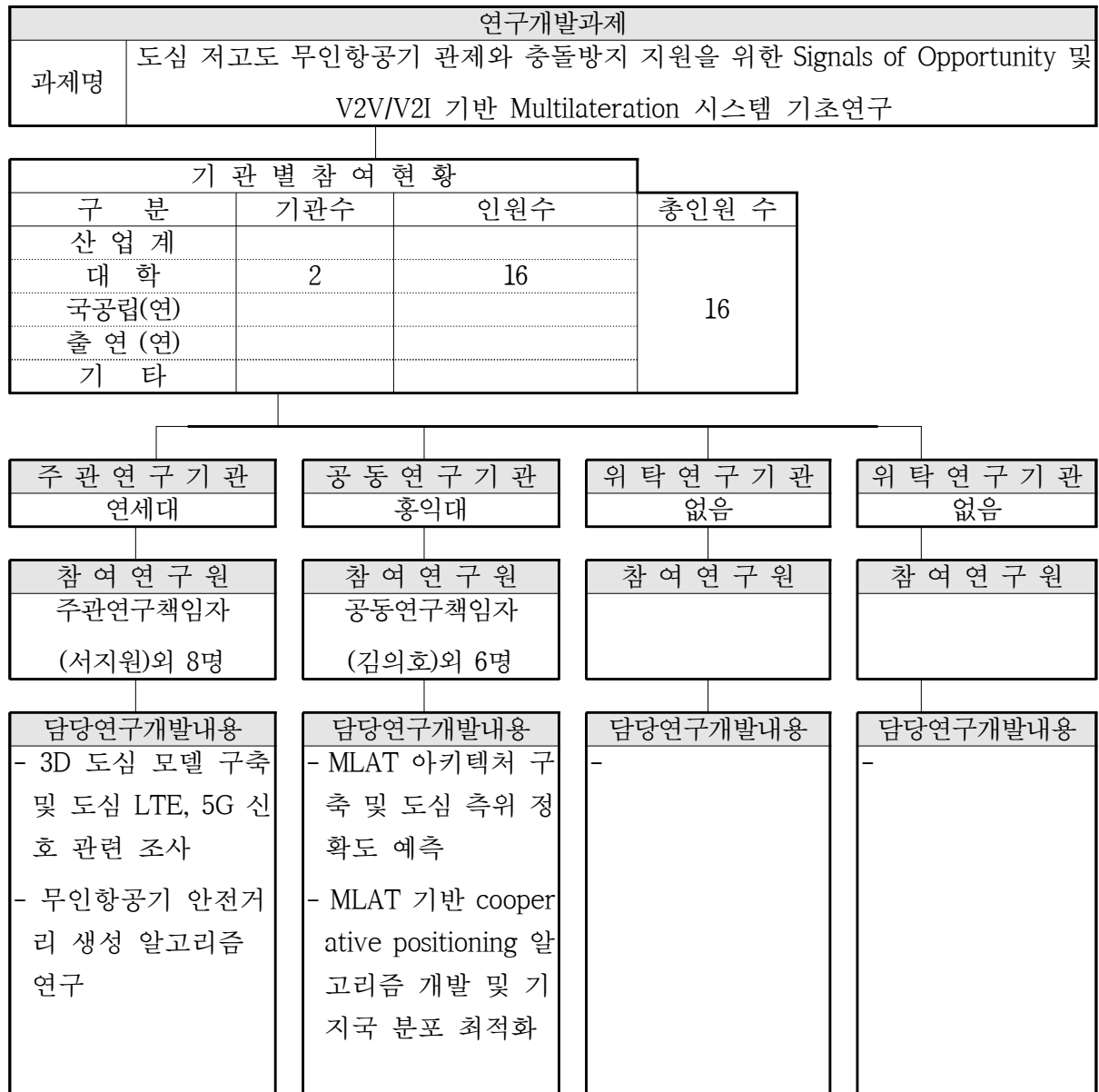


그림 104. 비행속도를 고려하여 안전거리를 생성한 시뮬레이션 예시. (a) 비행속도를 고려하지 않은 경우, (b) 두 무인항공기가 서로 가까워지는 방향으로 천천히 이동하는 경우, (c) 두 무인항공기가 서로 가까워지는 방향으로 빠르게 이동하는 경우, (d) 두 무인항공기가 서로 멀어지는 방향으로 천천히 이동하는 경우, (e) 두 무인항공기가 서로 멀어지는 방향으로 빠르게 이동하는 경우

## 다. 연구개발성과

### (1) 연구수행 체계도

- 1차년도



- 2차년도

| 연구개발과제 |                                                                                           |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 과제명    | 도심 저고도 무인항공기 관제와 충돌방지 지원을 위한 Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반 Multilateration 시스템 기초연구 |

| 기관별 참여 현황 |     |     |       |
|-----------|-----|-----|-------|
| 구 분       | 기관수 | 인원수 | 총인원 수 |
| 산업계       | 2   | 17  | 17    |
| 대학        |     |     |       |
| 국공립(연)    |     |     |       |
| 출연(연)     |     |     |       |
| 기타        |     |     |       |

| 주관연구기관                        | 공동연구기관                                             | 위탁연구기관   | 위탁연구기관   |
|-------------------------------|----------------------------------------------------|----------|----------|
| 연세대                           | 홍익대                                                | 없음       | 없음       |
| 참여연구원                         | 참여연구원                                              | 참여연구원    | 참여연구원    |
| 주관연구책임자                       | 공동연구책임자                                            |          |          |
| (서지원)외 9명                     | (김의호)외 6명                                          |          |          |
| 담당연구개발내용                      | 담당연구개발내용                                           | 담당연구개발내용 | 담당연구개발내용 |
| - 무인항공기<br>안전거리 생성<br>알고리즘 연구 | - MLAT 기반<br>cooperative<br>positioning<br>알고리즘 개발 | -        | -        |
| - 안전거리 생성<br>시뮬레이터 구현         | - 기지국 분포<br>최적화                                    |          |          |

(2) 성과 목표 및 달성 점수 (총괄)

| 성과지표               | 달성 점수   | 제안 성과 목표 | 최소 성과 목표 |
|--------------------|---------|----------|----------|
| SCI(E)급 학술지 게재(2점) | 2건 (4점) | 1건 (2점)  | 1건 (2점)  |
| 일반학술지게재(1점)        | 2건 (2점) | 3건 (3점)  | 2건 (2점)  |
| 특허출원(1점)           | 3건 (3점) | 2건 (2점)  | 1건 (1점)  |
| 특허등록(2점)           |         |          |          |
| 디자인 등록(1점)         |         |          |          |
| 소프트웨어(1점)          |         |          |          |
| 하드웨어(1점)           |         |          |          |
| 기타(1점)             |         |          |          |
| 소계(점수)             | 9점      | 7점       | 5점       |

< 성과지표별 점수 >

| 성과지표                                         | 점수 |
|----------------------------------------------|----|
| 국내학술지, 국토교통분야 IF평균('16년 기준) 미만 SCI(E)급 학술지게재 | 1점 |
| 국토교통분야 IF평균('16년 기준) 이상 SCI(E)급 학술지* 게재      | 2점 |
| 특허출원                                         | 1점 |
| 특허등록                                         | 2점 |

(3) 성과점검기준표

- 총괄

| 구분 | 핵심성과<br>(CTE) |                                                  | 단위성과 |                                                  | 성과점검기준           |             |             |                   |                                                    |           | 양적 성과       |                                                        |
|----|---------------|--------------------------------------------------|------|--------------------------------------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|----------------------------------------------------|-----------|-------------|--------------------------------------------------------|
|    |               |                                                  |      |                                                  | 질적<br>성 과 지<br>표 | 목표치         | 달성치         | 측정방법              | 검증방법                                               | 가중치       | 건수<br>(달성치) |                                                        |
| 주관 | 1             | 무인항공기<br>충돌방지를<br>위한<br>안전거리<br>예측<br>알고리즘<br>개발 | 1-1  | 측위 신뢰도와<br>3D 도심 모델<br>연동을 통한<br>충돌방지<br>안전거리 생성 | ①                | 안전거리<br>신뢰도 | 99.99<br>9% | 99.99<br>9%<br>이상 | 위치측정<br>오차와<br>protection<br>bound 비교              | 시뮬레이<br>션 | 50          | 특허: 출원 2 건<br>등록 1 건<br>논문: 2 건<br>사제품: 1 건<br>SW: 1 건 |
| 공동 | 2             | 도심<br>저고도<br>무인항공<br>기 관제를<br>위한<br>MLAT         | 2-1  | 기지국<br>최적화를<br>통한 MLAT<br>측위 정확도                 | ①                | 측위<br>정확도   | 10m         | 8m<br>이하          | DOP 및<br>Signals of<br>Opportunit<br>y 거리측정<br>정확도 | 시뮬레이<br>션 | 50          | 특허: 출원 1 건<br>등록 1 건<br>논문: 2 건<br>사제품: 1 건<br>SW: 1 건 |

|   |  |                         |  |  |  |  |  |  |     |                                                                                                                                   |
|---|--|-------------------------|--|--|--|--|--|--|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |  | 측위<br>시스템<br>아키텍처<br>개발 |  |  |  |  |  |  |     |                                                                                                                                   |
| 계 |  |                         |  |  |  |  |  |  | 100 | 특허: <a href="#">출원 3 건</a><br>등록: <a href="#">건</a><br>논문: <a href="#">4 건</a><br>사업품: <a href="#">건</a><br>SW: <a href="#">건</a> |

- 1차년도

| 구분 | 핵심성과<br>(CTE) |                                                                     | 단위성과                                                      | 성과점검기준                                                       |     |     |                                    |                         |     | 양적 성과<br>건수<br>(달성치)                                                                                                            |
|----|---------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----|-----|------------------------------------|-------------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |               |                                                                     |                                                           | 질적<br>성과지<br>표                                               | 목표치 | 달성치 | 측정방법                               | 검증방법                    | 가중치 |                                                                                                                                 |
| 주관 | 1             | 무인항공기<br>충돌방지를<br>위한<br>안전거리<br>예측<br>알고리즘<br>개발                    | 1-1<br>3D 도심 모델<br>구축                                     | ①<br>특정<br>도심<br>지역의<br>3D 모델링                               | -   | -   | 모델링<br>코드 운영                       | 실제 도심<br>지형과의<br>유사도    | 50  | 특허: <a href="#">출원 건</a><br>등록: <a href="#">건</a><br>논문: <a href="#">건</a><br>사업품: <a href="#">건</a><br>SW: <a href="#">건</a>   |
| 공동 | 2             | 도심<br>저고도<br>무인항공<br>기 관계를<br>위한<br>MLAT<br>측위<br>시스템<br>아키텍처<br>개발 | 2-1<br>Signals of<br>Opportunity<br>기반 MLAT<br>아키텍처<br>구축 | ①<br>핵심<br>요소기술<br>파악<br>(<br>시각동기<br>화<br>정확도,<br>측위엔<br>진) | -   | -   | MLAT<br>측위엔진<br>시물레이<br>션 코드<br>운영 | MLAT<br>측위<br>정확도<br>분석 | 50  | 특허: <a href="#">출원 건</a><br>등록: <a href="#">건</a><br>논문: <a href="#">1 건</a><br>사업품: <a href="#">건</a><br>SW: <a href="#">건</a> |
| 계  |               |                                                                     |                                                           |                                                              |     |     |                                    |                         | 100 | 특허: <a href="#">출원 건</a><br>등록: <a href="#">건</a><br>논문: <a href="#">1 건</a><br>사업품: <a href="#">건</a><br>SW: <a href="#">건</a> |

- 2차년도

| 구분 | 핵심성과<br>(CTE) |                | 단위성과                       | 성과점검기준         |             |             |             |           |     | 양적 성과<br>건수                                         |
|----|---------------|----------------|----------------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----|-----------------------------------------------------|
|    |               |                |                            | 질적<br>성과지<br>표 | 목표치         | 달성치         | 측정방법        | 검증방법      | 가중치 |                                                     |
| 주관 | 1             | 무인항공기<br>충돌방지를 | 1-1<br>측위 신뢰도와<br>3D 도심 모델 | ①<br>안전거리      | 99.99<br>9% | 99.99<br>9% | 위치측정<br>오차와 | 시물레이<br>션 | 50  | 특허: <a href="#">출원 2 건</a><br>등록: <a href="#">건</a> |

|    |   |                                                                     |                                         |   |           |     |          |                                                    |           |                                                                                                |
|----|---|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---|-----------|-----|----------|----------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |   | 위한<br>안전거리<br>예측<br>알고리즘<br>개발                                      | 연동을 통한<br>충돌방지<br>안전거리 생성               |   | 신뢰도       |     | 이상       | protection<br>bound 비교                             |           | 논문: <u>2 건</u><br>사제품: <u>건</u><br>SW: <u>건</u>                                                |
| 공동 | 2 | 도심<br>저고도<br>무인항공<br>기 관제를<br>위한<br>MLAT<br>측위<br>시스템<br>아키텍처<br>개발 | 2-1<br>기지국<br>최적화를<br>통한 MLAT<br>측위 정확도 | ① | 측위<br>정확도 | 10m | 8m<br>이하 | DOP 및<br>Signals of<br>Opportunit<br>y 거리측정<br>정확도 | 시물레이<br>션 | 50<br><br>특허: 출원 <u>1 건</u><br>등록 <u>건</u><br>논문: <u>1 건</u><br>사제품: <u>건</u><br>SW: <u>건</u>  |
| 계  |   |                                                                     |                                         |   |           |     |          |                                                    |           | 100<br><br>특허: 출원 <u>3 건</u><br>등록 <u>건</u><br>논문: <u>3 건</u><br>사제품: <u>건</u><br>SW: <u>건</u> |

#### (4) 핵심 연구 성과별 설명

| 연번 | 핵심성과<br>(CTE)                                          | 핵심성과 설명                                                                   | 성과유형<br>1) | 연구기관 | 해당<br>연차 | TRL |
|----|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------|------|----------|-----|
| 1  | 무인항공기<br>충돌방지를 위한<br>안전거리 예측<br>알고리즘 개발                | MLAT 측위 신뢰도,<br>무인항공기간의 거리측정, 도심<br>3D 모델을 이용하여 무인항공기<br>충돌방지를 위한 안전거리 예측 | 시스템        | 연세대  | 2        | 3   |
| 2  | 도심 저고도<br>무인항공기<br>관제를 위한<br>MLAT 측위<br>시스템 아키텍처<br>개발 | 도심 3D 모델과 최적화 된 기지국<br>분포 형태로 10 미터의 MLAT 측위<br>정확도 달성 목표                 | 시스템        | 홍익대  | 2        | 3   |

| 핵심성과 1 |                                                                                                                        |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 정의     | Signals of Opportunity 기반 MLAT 측위, UWB를 활용한 cooperative positioning을 수행하여 관제 측위 정확도를 향상시키며 충돌방지를 위한 안전거리를 예측하는 알고리즘 개발 |
| 목적     | 무인항공기 비행 시 주변 무인항공기나 건축물과의 충돌을 방지하기 위한 안전거리 유지 정보 생성이 목적                                                               |

|                                |                                                                                       |                              |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 성능목표                           | 기존 기술의 경우, 달성한 성능 수준이 현재 존재하지 않음.<br>개발할 기술의 경우, 99.999%의 안전거리 신뢰도를 가지는 성능 수준을 목표로 함. |                              |
| 성과달성<br>책임자<br>(소속기관)          | 서지원 (연세대)                                                                             |                              |
| 소요기간                           | ' 18.04 ~ ' 19.12 (1년9개월)                                                             |                              |
| 성과달성<br>확인방법                   | 한국 도심 지형, MLAT, cooperative positioning의 시뮬레이션으로 생성된 안전거리 유지 정보가 충돌을 방지할 수 있는 확률을 산정  |                              |
| 성과달성에<br>따른 정량적<br>성과<br>(달성치) | 특허 출원/등록                                                                              | 출원: 2건                       |
|                                | 논문                                                                                    | 학술지: 2건                      |
|                                | 저작                                                                                    | 0건                           |
|                                | S/W                                                                                   | 0건                           |
|                                | 신기술                                                                                   | 0건                           |
|                                | 기타                                                                                    | 국내외 학술대회논문: 8건, 인력양성(박사): 2명 |

|                       |                                                                                                                                                                            |         |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| <b>핵심성과 2</b>         |                                                                                                                                                                            |         |
| 정의                    | Signals of Opportunity 기반 MLAT 아키텍처 구축, 측위엔진 기법, 도심 기지국 최적화 분포 형태 개발로 무인항공기 관제에 필요한 측위 정확도 달성.                                                                             |         |
| 목적                    | 최근 국내외에서 연구개발 중인 저고도 무인항공기 관제 시스템(UTM)의 성공적인 운용은 도심에서의 안정적인 측위 없이는 불가능하다. 제안된 Signals of Opportunity 기반 MLAT 측위 시스템은 저고도 무인항공기 관제에서 요구되는 위치측정 정확도를 저가의 센서로 제공하는 것을 목표로 한다. |         |
| 성능목표                  | 기존 기술의 경우, 달성한 성능 수준이 현재 존재하지 않음.<br>개발할 기술의 경우, 10 미터의 측위정확도를 가지는 성능 수준을 목표로 함.                                                                                           |         |
| 성과달성<br>책임자<br>(소속기관) | 김의호 (홍익대)                                                                                                                                                                  |         |
| 소요기간                  | ' 18.04 ~ ' 19.12 (1년9개월)                                                                                                                                                  |         |
| 성과달성<br>확인방법          | 한국 도심 지형과 Signals of Opportunity 거리측정 정확도를 이용한 MLAT 시뮬레이션으로 위치 정확도 예측                                                                                                      |         |
| 성과달성에<br>따른 정량적       | 특허 출원/등록                                                                                                                                                                   | 출원: 1건  |
|                       | 논문                                                                                                                                                                         | 학술지: 2건 |

|             |     |                |
|-------------|-----|----------------|
| 성과<br>(달성치) | 저작  | 0건             |
|             | S/W | 0건             |
|             | 신기술 | 0건             |
|             | 기타  | 국내외 학술대회논문: 9건 |

(5) 연구개발성과(해당되는 성과만 기재)

(가) 국내외 논문 게재

| 번호 | 논문명                                                                                                     | 학술지<br>명   | 주저<br>자명 | 호  | 국명  | 발행<br>기관 | SCI 여부<br>(SCI/비SCI) | 게재일        | 등록<br>번호         |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------|----|-----|----------|----------------------|------------|------------------|
| 1  | Analysis of DME/DME Navigation Performance and Ground Network Using Stretched-Front-Leg Pulse-Based DME | Sensors    | 김의호      | 18 | 스위스 | MDPI     | SCI                  | 2018.9.29  | 1424-8220 (ISSN) |
| 2  | Feasibility Analysis of LTE-Based UAS Navigation in Deep Urban Areas and DSRC Augmentation              | Sensors    | 김의호      | 19 | 스위스 | MDPI     | SCI                  | 2019.9.27  | 1424-8220 (ISSN) |
| 3  | LTE 신호의 CRS를 이용한 TOA 기반 거리 측정 방법                                                                        | 한국항공학회 논문지 | 강태원      | 23 | 한국  | KISS     | 비SCI                 | 2019.10.24 | 1226-9026 (ISSN) |
| 4  | 도심 지역 LTE 측위 기반 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘 연구 및 시각화 도구 개발                                                       | 한국항공학회 논문지 | 이하림      | 23 | 한국  | KISS     | 비SCI                 | 2019.10.24 | 1226-9026 (ISSN) |

- 위의 정량 실적 중 1번 SCI 논문은 Distance Measuring Equipment(DME)와 같이 ranging을 제공하는 지상 기지국 네트워크를 최적화하는 알고리즘을 포함함. Ranging 센서를 이용한 항공기 관제 및 방법은 공통적으로 지상 기지국 네트워크를 보강해야 하는 문제를 포함하고 있으며 궁극적으로는 이미 설치된 기지국을 최대한 사용하며 새로 설치해야 할 기지국을 최소화하는 효율적인 기지국 분포를 찾는 최적화 방법을 고안해야 함. 본 논문에서 제안한 binary integer linear programming은 이러한 문제를 해결하는 optimizer로 논문에서 제시한 DME 지상기지국 네트워크 뿐만 아니라 본 과제의 LTE 및 DSRC 네트워크 최적 설치 지역을 파악하는 문제에도 동일하게 적용될 수 있기 때문에 본 과제의 실적으로 기재하였음.

(나) 국내 및 국제학술회의 발표

| 번호 | 회의 명칭                  | 발표자 | 발표 일시      | 장소       | 국명    |
|----|------------------------|-----|------------|----------|-------|
| 1  | IAIN WC 2018           | 강태원 | 2018.11.29 | Chiba    | 일본    |
| 2  | ICCE-Asia 2018         | 이하림 | 2018.06.25 | 제주       | 한국    |
| 3  | ION GNSS+ 2018         | 신유진 | 2018.09.27 | Miami    | 미국    |
| 4  | 2018년 한국항행학회<br>종합학술대회 | 강태원 | 2018.11.02 | 서울       | 한국    |
| 5  | 2018년 한국항행학회<br>종합학술대회 | 이하림 | 2018.11.02 | 서울       | 한국    |
| 6  | 2018년 한국항행학회<br>종합학술대회 | 신유진 | 2018.11.02 | 서울       | 한국    |
| 7  | 2018년 한국항행학회<br>종합학술대회 | 김종호 | 2018.11.02 | 서울       | 한국    |
| 8  | ICCAS 2019             | 강태원 | 2019.10.17 | 제주       | 한국    |
| 9  | ICCAS 2019             | 이하림 | 2019.10.17 | 제주       | 한국    |
| 10 | ITC-CSCC 2019          | 한승재 | 2019.06.26 | 제주       | 한국    |
| 11 | IEEE IRC 2019          | 신유진 | 2019.02.26 | Naples   | Italy |
| 12 | ICNS Conference 2019   | 김의호 | 2019.04.09 | Virginia | 미국    |
| 13 | ISGNSS 2019            | 신유진 | 2019.10.31 | 제주       | 한국    |
| 14 | ISGNSS 2019            | 송재영 | 2019.10.31 | 제주       | 한국    |
| 15 | 2019년 한국항행학회<br>종합학술대회 | 강태원 | 2019.11.01 | 서울       | 한국    |
| 16 | 2019년 한국항행학회<br>종합학술대회 | 신유진 | 2019.11.01 | 서울       | 한국    |
| 17 | 2019년 한국항행학회<br>종합학술대회 | 신유진 | 2019.11.01 | 서울       | 한국    |

(다) 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

| 번호 | 지식재산권 등<br>명칭<br>(건별 각각 기재) | 국명 | 출원            |                |                         |           | 등록      |         |          |       | 기<br>여<br>율 |
|----|-----------------------------|----|---------------|----------------|-------------------------|-----------|---------|---------|----------|-------|-------------|
|    |                             |    | 출원<br>인       | 출원<br>일        | 출원번<br>호                | 등록번호<br>* | 등록<br>인 | 등록<br>일 | 등록번<br>호 | 등록번호* |             |
| 1  | 측위 신호 선택<br>장치 및 방법         | 한국 | 연세<br>대학<br>교 | 2019.1<br>2.13 | 10-2019<br>-016705<br>9 |           |         |         |          |       | 100<br>%    |

|   |                                                           |    |                                |                 |                         |  |  |  |  |  |          |
|---|-----------------------------------------------------------|----|--------------------------------|-----------------|-------------------------|--|--|--|--|--|----------|
|   |                                                           |    | 산학<br>협력<br>단                  |                 |                         |  |  |  |  |  |          |
| 2 | LTE 신호에서<br>추정된 채널 진폭<br>정보를 이용한<br>인공 신경망 기반<br>거리 추정 방법 | 한국 | 연세<br>대학<br>교<br>산학<br>협력<br>단 | 2019.1<br>2.20  | 10-2019<br>-017210<br>1 |  |  |  |  |  | 100<br>% |
| 3 | 항공기의 온보드<br>포지셔닝 시스템<br>및 이를 이용한<br>항공기의 운항 제<br>어장치      | 한국 | 홍익<br>대학<br>교<br>산학<br>협력<br>단 | 2019.0<br>7.26. | 10-2019<br>-009070<br>3 |  |  |  |  |  | 100<br>% |

(라) 전문 연구 인력 양성

| 번호 | 분류          | 기준<br>연도 | 현황  |    |    |    |   |   |         |         |         |         |    |
|----|-------------|----------|-----|----|----|----|---|---|---------|---------|---------|---------|----|
|    |             |          | 학위별 |    |    | 성별 |   |   | 지역별     |         |         |         |    |
|    |             |          | 박사  | 석사 | 학사 | 기타 | 남 | 여 | 수도<br>권 | 충청<br>권 | 영남<br>권 | 호남<br>권 | 기타 |
| 1  | 박사학위자<br>배출 | 2019     | 2   |    |    |    | 2 |   | 2       |         |         |         |    |

(6) 기술적 성과

도심 저고도 환경은 위성항법신호가 불안정하여 UTM을 실현하기에 가장 어려운 지역이다. 본 과제를 통해 초기 제안서에서 계획했던 대로 Signals of Opportunity 및 V2I/V2V 기반 Multilateration 시스템을 개발하고, 측위에 최적화된 도심 지역 기지국 분포를 계산하는 알고리즘을 연구하였다. 또한 무인항공기의 측위 신뢰도 요구조건을 바탕으로 3D 도심 모델과 결합한 UAV 충돌방지 안전거리 생성 시뮬레이터를 성공적으로 제작하였다. 본 과제에서 개발한 Multilateration 측위 시스템은 시뮬레이션 결과로 볼 때 10 m 측위 정확도와 99.999% 신뢰도 조건을 무난히 달성하였다.

본 과제에서 연구한 도심 저고도 무인항공기 관제를 위한 MLAT 시스템은 유인항공기 관제의 기본 측위 원리와 유사하지만 LTE 등 Signals of Opportunity를 이용하는 방식에서 차별화되며, V2I 기반 MLAT 위치 정보와 무인항공기 간의 V2V 거리측정 정보를 융합한 정밀측위기법 개발은 기존 선행연구에서 시도되지 않은 독창적인 방식이다. 또한 측위 신뢰도(Integrity)와 도심 3D 모델을 바탕으로 한 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘은 국내외에서 개발된 적이 없는 아주 창의적인 결과이다.

#### (7) 경제적 성과

본 과제를 통해 도심 저고도 비행 무인항공기 관제 핵심원천기술을 연구하였으며 관련 지적재산권을 확보하였다. 이와 같은 기초 연구의 경제적 성과가 단기간에 가시화 되는 것은 아니지만, 향후 실용화 과제 등을 통하여 본 연구팀이 제안한 시스템이 실제로 상용화 된다면 무인항공기 상업화를 도심 지역까지 확대할 수 있어 무인항공기 산업 활성화에 크게 기여할 것이다. 또한 향후 5G 통신과 무인항공기 위치 정보와 관련된 수많은 파생 서비스 산업이 발전할 수 있을 것이다.

---

### 3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

#### 가. 목표

| 구분    | 내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 최종 목표 | 도심 저고도 (500 ft 미만) 비행 무인항공기 관제 지원을 위한 LTE, 5G 등 Signals of Opportunity 및 UWB 기반 MLAT 무인항공기 측위 시스템 아키텍처를 개발하며 MLAT 측위, V2V/V2I, 3D 도심 모델을 이용한 무인항공기 충돌방지 안전거리 생성 알고리즘을 연구한다.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 세부 목표 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 도심 저고도(500 ft 미만) 무인항공기 관제 시스템 지원을 위한 Signals of Opportunity와 V2V/V2I 기반 MLAT 무인항공기 측위 시스템 아키텍처를 연구하고 Matlab 시뮬레이터를 구현한다.</li> <li>- V2V/V2I 및 무인항공기간의 거리측정을 이용하여 MLAT에서 제공된 위치 정보의 정확도를 향상시키는 센서융합 알고리즘을 개발한다.</li> <li>- 국토부의 VWorld를 활용하여 국내 대표적 도심환경의 3D 모델을 구축하며 제안된 방식의 MLAT 측위 정확도를 현실적인 기지국 분포를 고려하여 계산한다.</li> <li>- 도심에서 소형 무인기 관제에 필요한 위치측정 정확도를 얻기 위한 기지국 네트워크 형태를 결정한다.</li> <li>- 위치측정 신뢰도와 3D 도심 모델을 적용하여 각 비행 고도별, 도심 지역별 충돌방지 안전거리를 예측한다.</li> </ul> |

#### 나. 목표 달성여부

| 성과 목표       | 자체 평가                                                                                                                                                                                                            |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 선행연구 사례조사   | 1차년도 계획한 선행연구 범위에는 충돌 방지 (Collision Avoidance), LTE 및 5G 표준동향, V2V 거리측정 센서 시제품, MLAT 아키텍처 및 cooperative positioning 알고리즘이 포함되어 있으며, 향후 무인항공기 안전거리 확보 및 충돌 방지 시뮬레이션에 사용할 수 있도록 해당 내용의 조사를 완료하였으므로 계획대로 목표를 달성하였다. |
| 3D 도심 모델 구축 | 1차년도에 계획한 3D 도심 모델 구축과 관련하여, 국토부에서 제공하는 공간정보 오픈플랫폼인 VWorld의 API를 이용하여 대표적인 도심 지역의 표고 데이터 및 건물 데이터를 Matlab을 통해 3차원 모델로 구                                                                                          |

|                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                            | <p>현하는 데 성공하였다. 성과점검기준인 “실제 도심 지형과의 유사도” 파악을 위하여, 본 3D 도심 모델을 구글 및 네이버와 같은 상용 지도 서비스와 교차 검증한 결과 매우 높은 유사도를 보였기 때문에 질적 성과지표를 달성하였다.</p>                                                                                                                                                                                                                                   |
| 전파특성 모델 조사                 | <p>1차년도 계획한 전파특성 모델 조사에는 LTE, 5G 신호의 도심 전파손실, 다중 경로, NLOS 등의 특성 모델링 기법 조사가 포함되어 있으며, 향후 관제에 필요한 측위 정확도를 제공하는 기지국 보강 네트워크 개발에 도움이 될 수 있도록 해당 내용의 조사를 완료하였기에 해당 성과 목표를 달성하였다.</p>                                                                                                                                                                                          |
| MLAT 아키텍처 구축 및 도심 측위 성능 연구 | <p>1차년도에 계획한 Signals of Opportunity 기반 MLAT 아키텍처 구축을 위해 LTE 및 5G, DSRC 기지국 위치에 따른 도심 저고도 MLAT 관제 아키텍처와 측위 알고리즘을 개발하였다. 본 MLAT 아키텍처의 성능 검증을 위해 LTE/5G 수신기, DSRC 기지국, 주변 UAV 분포를 달리하여 Matlab 시뮬레이션을 실행하였으며 각 측위 조건에 따른 MLAT 측위 정확도를 제시하고 분석함으로써 질적 성과지표를 달성하였다.</p> <p>또한 1차년도에는 짧은 연구기간으로 인해 SCI 논문 출판을 계획하지 않았으나 좋은 연구결과를 얻어 SCI 논문 1편을 출판하였고 국제 학술대회에서 연구결과를 발표하였다.</p> |
| 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘 연구      | <p>2차년도에 계획한 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘 연구를 통하여 MHSS 방식을 응용한 알고리즘을 개발하였다. 안전거리 생성을 위해 공역에 따라 신뢰도 있는 거리측정원을 구분하고, 거리 측정치로부터 보호 수준을 계산하였다. 또한, 기존 알고리즘과는 달리 cooperative positioning 기법 또한 안전거리 생성에 반영함으로써 해당 성과 목표를 달성하였다. 개발된 알고리즘은 line-of-sight 신호뿐만 아니라, multipath에 의한 bias 신호까지 고려할 수 있어 활용성이 높다.</p>                                                                         |
| 무인항공기 안전거리 생성 시뮬레이터 구현     | <p>2차년도에 계획한 무인항공기 안전거리 생성 시뮬레이터 구현을 완료했으며, 해당 시뮬레이터에는 본 과제를 통해 개발한 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘을 반영하였다. 시뮬레이터 상의 기존 LTE 기지국</p>                                                                                                                                                                                                                                                   |

|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         | <p>의 위치는 전파누리 데이터베이스를 활용하였고, 추가 DSRC 송신기의 위치는 최적화 알고리즘을 통해 결정하였으며, cooperative positioning에 의한 거리측정치까지 반영하였다. 또한, 100만 epoch 이상의 시뮬레이션을 통하여, 개발된 안전거리 생성 기법이 신뢰도 목표치였던 99.999% 이상을 달성함을 검증함으로써 질적 성과지표를 만족하였다.</p>                                                                                                                                        |
| MLAT 기반 cooperative positioning 알고리즘 개발 | <p>2차년도에 계획한 LTE/DSRC 최적화 네트워크를 이용하는 무인항공기 사이의 cooperative positioning 연구를 통해 backward time propagation 방식으로 측정값을 적용하는 Kalman filter를 설계하였다. 이 방식은 기존 MLAT 측위 알고리즘과 신호처리 프로세스를 그대로 유지하면서 signals of opportunity와 cooperative positioning 알고리즘을 후처리로 추가할 수 있다는 장점이 있다. 개발된 cooperative positioning 알고리즘을 통해 향상된 무인항공기의 측위 정확도를 분석함으로써 해당 성과 목표를 달성하였다.</p> |
| 기지국 분포 보강 최적화                           | <p>2차년도에 계획한 도심 측위 정확도 향상을 위한 기지국 분포 보강 최적화 연구를 통해, 기존 LTE 기지국망을 보강할 수 있는 DSRC 송수신기 최적 위치를 이진 정수 선형계획법 기반 알고리즘을 통해 계산하였다. 개발된 알고리즘을 이용하여 강남역 사거리 도심 지역에서 무인항공기 위치측정 정확도(95%)를 4 m, 6 m, 8 m 수준으로 제공할 수 있는 DSRC 송수신기 최적 배치를 각각 도출함으로써 해당 성과 목표를 달성하였다.</p>                                                                                                 |

## 다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- 당초 계획대로 연구를 수행했기에 미달성한 사항 없음.

## 4. 연구개발성과의 활용 계획 등

---

도심 본 과제에서 연구한 Signals of Opportunity 기반 MLAT 측위 시스템은 기존의 LTE 기지국을 최대한 활용하고, 설치가 아주 간단한 DSRC 센서를 추가적으로 설치하여 도심 무인항공기 관제에 필요한 측위를 가능하게 한다. 특히, 추가로 설치할 DSRC 송수신기의 최적 배치를 위하여 최적화 알고리즘을 개발하였기 때문에 최소한의 추가적인 투자로 개발된 기술이 활용될 수 있다는 장점이 있다. 그리고 무인항공기 간의 V2V 거리측정 센서를 추가로 활용하여 측위 정확도를 더욱 향상시킬 수 있는 기법도 제시하였다. 이와 더불어, 무인항공기 충돌방지 안전거리 계산 알고리즘을 개발하였고, 이를 도심 3D 지도 내에서 가시화할 수 있는 시뮬레이터까지 개발하였기 때문에 실제 관제 시스템에 활용될 수 있다.

도심 저고도 비행 무인항공기 관제는 현재 미국 NASA를 위주로 활발히 연구되고 있으며 미래 저고도 비행 무인항공기 관제의 국제표준으로 사용될 예정이다. 도심 저고도 환경은 위성항법신호가 불안정하여 UTM을 실현하기에 기술적인 난제가 가장 많은 지역으로 분류되고 있다. 본 과제를 통해 도심 저고도 비행 무인항공기 관제 핵심원천기술을 연구하였으며 관련 지적재산권을 확보하였다. 이와 같은 기초 연구의 경제적 성과가 단기간에 가시화 되는 것은 아니지만, 향후 실용화 과제 등을 통하여 본 연구팀이 제안한 시스템이 실제로 상용화된다면 무인항공기 상업화를 도심 지역까지 확대할 수 있어 무인항공기 산업 활성화에 크게 기여할 것이다. 또한 향후 차세대 통신과 무인항공기 위치 정보와 관련된 수많은 파생 서비스 산업이 발전할 수 있을 것이다.

본 연구의 대표 성과인 측위 신뢰도와 3D 도심 모델을 통한 충돌방지 안전거리 생성 알고리즘 및 시뮬레이터, 기지국 최적화 알고리즘, V2I/V2V 기반 cooperative positioning 알고리즘은 기술이전을 통한 상용화가 가능한 독자적인 성과이다. 특히, 개발된 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘 및 시뮬레이터의 경우, 일반적인 LOS 상황뿐만 아니라 multipath, NLOS에 의해 예기치 못하게 발생하는 거리측정 bias까지 고려할 수 있기 때문에 향후 도심 지역 저고도 교통관리 체계 구축 사업의 요소기술로 이용될 수 있다. 본 연구과제 성과의 상용화를 위해서는 기술의 성숙도를 보다 높일 필요가 있는데, 이를 위해서 과학기술정보통신부나 산업통상자원부, 국토교통부에서 기획 중인 무인이동체 분야 연구개발 과제에 공동참여하고, 다양한 도심 지역 선택과 전파환경 및 비행환경 모델링 등을 통하여 본 과제의 결과와 성과를 확대하기 위하여 노력할 예정이다.

---

## 붙임. 참고문헌

- [1] Incheon Air Traffic Control Center, Jurisdiction Airspace, Retrieved Sept., 30, 2013, from [http://acc.molit.go.kr/USR/WPGE0201/m\\_16182/LST.jsp](http://acc.molit.go.kr/USR/WPGE0201/m_16182/LST.jsp)
- [2] S. Fischer, “Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE,” Qualcomm, San Diego, CA, USA, White Paper, 2014.
- [3] K. Shamaei, J. Khalife, and Z. Kassas, “Exploiting LTE signals for navigation: Theory to implementation,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 17, no. 4, pp. 2173–2189, April 2018.
- [4] L. J. Glabb, C. V. Dolph, S. D. Young, N. C. Coffey, R. G. McSwain, M. J. Logan, and D. E. Harper, “Small unmanned aerial system (UAS) flight testing of enabling vehicle technologies for the UAS traffic management project,” NASA Technical Memo 2018-219816, April 2018.
- [5] N. Shabbir, M. T. Sadiq, H. Kashif, and R. Ullah, “Comparison of radio propagation models for long term evolution (LTE) network,” arXiv preprint arXiv:1110.1519, October 2011.
- [6] Access, Evolved Universal Terrestrial Radio, “Base Station (BS) radio transmission and reception, 3GPP TS 36.104,” V14.3, 2009.
- [7] A. R. Jiménez Ruiz and F. Seco Granja, “Comparing Ubisense, BeSpoon, and DecaWave UWB Location Systems: Indoor Performance Analysis,” in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66, no. 8, pp. 2106–2117, Aug. 2017. doi: 10.1109/TIM.2017.2681398
- [8] Time Domain PulsOn 440 Data Sheet/User Manual
- [9] Cheon, Jeonghyeon et al. “IEEE 802.15.4 ZigBee-Based Time-of-Arrival Estimation for Wireless Sensor Networks” Sensors (Basel, Switzerland) vol. 16,2 203. 5 Feb. 2016, doi:10.3390/s16020203
- [10] 김태식, 장재원. “다변측정 (Multilateration) 항공감시 시스템 기술 동향.” 항공우주산업기술동향 11.2 (2013): 24-32.
- [11] A. Dammann, R. Raulefs, and S. Zhang, “On prospects of positioning in 5G.” Communication Workshop (ICCW), 2015 IEEE International Conference on, pp.1207 – 1213, Jun. 2015.
- [12] U. Niesen, V. N. Ekambaram, J. Jose and X. Wu, “Intervehicle Range Estimation From Periodic Broadcasts,” in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 12, pp. 10637–10646, Dec. 2017
- [13] W.H.L Neven, T.J. Quilter, R. Weedon, R.A. Hoggendoorn, “Wide Area Multilateration Report on EATMP TRS 131/04,” Eurocontrol, Aug. 2005.
- [14] A. I. Sulyman, A. T. Nassar, M. K. Samimi, G. R. MacCartney, T. S. Rappaport, and A. Als

- anie, “Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz millimeter-wave bands,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 9, pp. 78–86, September 2014.
- [15] Cooperative Localization of Unmanned Aerial Vehicles Using GNSS, MEMS Inertial, and UWB Sensors
- [16] S. I. Roumeliotis and G. A. Bekey, “Distributed multirobot localization,” in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, pp. 781–795, Oct. 2002. doi: 10.1109/TRA.2002.803461
- [17] P. Thevenon et al., “Positioning using mobile TV based on the DVB-SH standard,” *Navigation*, Vol. 58, No. 2, pp. 71–90, Jun. 2011.
- [18] Shirer, Heywood O. “The US Federal Radionavigation Plan.” *IEEE PLANS 92 Position Location and Navigation Symposium Record*. IEEE, 1992.
- [19] Tossaint, M., et al. “The Stanford-ESA Integrity Diagram: A New Tool for The User Domain SBAS Integrity Assessment.” *Navigation* 54.2 (2007): 153–162.
- [20] J. Blanch, T. Walter, P. Enge, Y. Lee, B. Pervan, M. Rippl, and A. Spletter, “Advanced RAIM user algorithm description: integrity support message processing, fault detection, exclusion, and protection level calculation,” in *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, pp. 2828–2849, 2012.
- [21] V. Kropp, B. Eissfeller, and G. Berz, “Optimized MHSS ARAIM user algorithms: assumptions, protection level calculation and availability analysis,” *2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, pp. 308–323, 2014.
- [22] J. Blanch, T. Walter, and P. Enge, “Exclusion for advanced RAIM: requirements and a baseline algorithm,” in *Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, pp. 99–107, 2014.
- [23] M. Mink, Performance of receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) for maritime operations, Ph.D. dissertation, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, 2016.
- [24] 이하림, 강태원, and 서지원. “도심 지역 LTE 측위 기반 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘 연구 및 시각화 도구 개발.” *한국항행학회논문지* Vol. 23, No. 5, pp. 408–414, 2019.
- [25] Blanch, Juan, Todd Walter, and Per Enge. “Protection level calculation using measurement residuals: Theory and results.” *Proceedings of ION GNSS*. Vol. 2005. 2005.
- [26] SC, RTCA, “Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment,” RTCA/DO-229C, 2001.
- [27] S. S. Jan, D. Gebre-Egziabher, T. Walter, and P. Enge, “Improving GPS-based landing system performance using an empirical barometric altimeter confidence bound,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 44, No. 1, pp. 127–146, 2008.

- [28] Tossaint, M., et al. "The Stanford-ESA Integrity Diagram: A New Tool for The User Doma in SBAS Integrity Assessment." *Navigation* 54.2, pp. 153-162, 2007.

# 연구개발성과 활용계획서

## A. 과제 일반정보

|                      |                                                                                                |       |                        |                                                                                                   |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 사 업 명                | 국토교통기술촉진연구사업                                                                                   |       | 과학기술표준분류               |                                                                                                   |
| 과 제 유 형              | <input checked="" type="checkbox"/> 기초 <input type="checkbox"/> 응용 <input type="checkbox"/> 개발 |       | 실용화대상여부                | <input type="checkbox"/> 실용화 <input checked="" type="checkbox"/> 비실용화                             |
| 연구과제명                | 도심 저고도 무인항공기 관제와 충돌방지 지원을 위한 Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반 Multilateration 시스템 기초연구      |       | 과 제 구 분                | <input checked="" type="checkbox"/> 일 반 <input type="checkbox"/> 연구단 <input type="checkbox"/> 사업단 |
| 주관연구기관               | 연세대학교 산학협력단                                                                                    |       | 연구책임자                  | 서 지 원                                                                                             |
| 세 부 과 제 명            |                                                                                                |       |                        |                                                                                                   |
| 협동연구기관               |                                                                                                |       | 연구책임자                  |                                                                                                   |
| 총 연구기간               | 2018 년 4 월 17 일 ~ 2019 년 12 월 31 일 (21개월)                                                      |       |                        |                                                                                                   |
| 총 연구개발비<br>(단위 : 천원) | 정부출연금                                                                                          | 민간부담금 | 합계                     |                                                                                                   |
|                      | 370,000                                                                                        |       | 370,000                |                                                                                                   |
| 공동연구기관               | 홍익대학교 산학협력단                                                                                    |       |                        |                                                                                                   |
| 참 여 기 업              |                                                                                                |       |                        |                                                                                                   |
| 구 분                  | 성과활용책임자                                                                                        |       | 성과활용실무자                |                                                                                                   |
| 성 명                  | 서지원                                                                                            |       | 조민주                    |                                                                                                   |
| 소속기관/부서              | 연세대학교/글로벌융합공학부                                                                                 |       | 연세대학교/글로벌융합기술원         |                                                                                                   |
| E-mail               | jiwon.seo@yonsei.ac.kr                                                                         |       | minju.cho@yonsei.ac.kr |                                                                                                   |
| 연락처                  | 032-749-5833                                                                                   |       | 032-749-5861           |                                                                                                   |

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제34조(연구개발성과의 보고) 제2항에 의거 연구개발성과 활용계획서를 제출합니다.

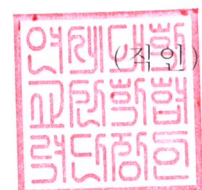
붙임 1. 성과총람 원고 1부.

2. 기술소개자료 각 1부(기술별).

2020 년 1 월 16 일

주관(협동) 연구기관장 : 이 원 용

국토교통과학기술진흥원장 귀하



## B. 요소기술 정보

### □ 요소기술 총괄

| 과제명<br>(세부과제명)                                                                                                             | 해당<br>기관명         | 핵심연구성과                                              | 요소기술*                                          | 정부출연금<br>(백만원) | 기술실시계약<br>대상여부** | 비고 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------|------------------|----|
| 도심 저고도<br>무인항공기<br>관제와<br>충돌방지<br>지원을 위한<br>Signals of<br>Opportunity<br>및 V2V/V2I<br>기반<br>Multilateration<br>시스템<br>기초연구 | 주관 :<br>연세대<br>학교 | 무인항공기<br>충돌방지를<br>위한 안전거리<br>예측 알고리즘<br>개발          | 1-가. 측위신뢰도와 3D<br>도심 모델 연동을 통한<br>충돌방지 안전거리 생성 | 200            | 비대상              |    |
|                                                                                                                            | 공동 :<br>홍익대<br>학교 | 도심 저고도<br>무인항공기<br>관제를 위한<br>MLAT 측위<br>시스템<br>아키텍처 | 1-나. 기지국 최적화를<br>통한 MLAT 측위 정확도<br>향상          | 170            | 비대상              |    |
| 소 계                                                                                                                        |                   |                                                     |                                                | 370            |                  |    |
| 2세부 :                                                                                                                      | 협동 :              |                                                     |                                                |                |                  |    |
|                                                                                                                            |                   |                                                     |                                                |                |                  |    |
|                                                                                                                            |                   |                                                     |                                                |                |                  |    |
|                                                                                                                            | 공동 :              |                                                     |                                                |                |                  |    |
|                                                                                                                            |                   |                                                     |                                                |                |                  |    |
|                                                                                                                            |                   |                                                     |                                                |                |                  |    |
|                                                                                                                            | 공동                |                                                     |                                                |                |                  |    |
|                                                                                                                            |                   |                                                     |                                                |                |                  |    |
|                                                                                                                            |                   |                                                     |                                                |                |                  |    |
|                                                                                                                            |                   |                                                     |                                                |                |                  |    |
|                                                                                                                            | 공동                |                                                     |                                                |                |                  |    |
| 소 계                                                                                                                        |                   |                                                     |                                                |                |                  |    |
| 연구단 운영비                                                                                                                    |                   |                                                     |                                                |                |                  |    |
| 합 계                                                                                                                        |                   |                                                     |                                                | 370            |                  |    |

\* 요소기술 : R&D 성과물을 구성하는 단위기술로서, 기술이전이나 활용의 대상이 되는 단위 성과물

\*\* 기술실시계약 대상여부 :

- 대상 : 실용화 대상으로 분류된 연구개발기술로 참여기업 등과 기술실시계약 체결 또는 직접 실시 대상이 되는 기술
- 비대상 : 실용화 대상으로 분류되지 않은 연구개발기술, 기초연구단계의 연구개발 성과물 등 과제 특성에 따라 기술실시계약이 불필요 하다고 전문기관의 장이 인정하는 경우 등 「국토교통기술 연구 개발사업 관리지침」 제51조(기술실시계약) 제2항에 해당되어 기술실시계약 대상에서 제외되는 기술

- 귀 기관의 R&D를 통해 창출된 주요 요소기술 정보를 작성해 주십시오.
- 요소기술이 2개 이상인 경우, 해당 양식을 추가하여 작성해 주십시오.(요소기술 수만큼 기재)
- 요소기술: R&D 성과물을 구성하는 단위기술로서, 기술이전이나 활용의 대상이 되는 단위 성과물

| 구 분      | 1-가                                                                                                                                                                                                                         |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 요소기술명    | 측위신뢰도와 3D 도심 모델 연동을 통한 충돌방지 안전거리 생성                                                                                                                                                                                         |
| 기술개요     | 측위신뢰도 요구조건과 측위에 사용되는 거리측정 센서에 따라, 무인항공기 비행 시 주변 무인항공기나 건축물과의 충돌을 방지하기 위한 안전거리 정보 생성                                                                                                                                         |
| 관련 키워드   | 충돌방지, 안전거리 예측                                                                                                                                                                                                               |
| 기술 분류    | (첨부한 기술분류표를 참조하여 세분류를 기재하십시오.)                                                                                                                                                                                              |
| 성과물 유형*  | <input checked="" type="checkbox"/> 공법/기법 <input type="checkbox"/> 장비/장치 <input type="checkbox"/> 재료/자재 <input type="checkbox"/> SW <input type="checkbox"/> 시스템 <input type="checkbox"/> 기준/지침 <input type="checkbox"/> 기타 |
| 기술수명주기** | <input checked="" type="checkbox"/> 기술도입기 <input type="checkbox"/> 기술성장기 <input type="checkbox"/> 기술성숙기 <input type="checkbox"/> 기술쇠퇴기                                                                                      |

| 구 분      | 1-나                                                                                                                                                                                                                         |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 요소기술명    | 기지국 최적화를 통한 MLAT 측위 정확도 향상                                                                                                                                                                                                  |
| 기술개요     | 저고도 무인항공기 관제에서 요구되는 위치측정 정확도를 최소한의 추가 기지국 설치만으로 제공하기 위해 기지국 보강 최적 위치 계산                                                                                                                                                     |
| 관련 키워드   | MLAT 측위, DSRC, 중계기 분포 네트워크                                                                                                                                                                                                  |
| 기술 분류    | (첨부한 기술분류표를 참조하여 세분류를 기재하십시오.)                                                                                                                                                                                              |
| 성과물 유형*  | <input checked="" type="checkbox"/> 공법/기법 <input type="checkbox"/> 장비/장치 <input type="checkbox"/> 재료/자재 <input type="checkbox"/> SW <input type="checkbox"/> 시스템 <input type="checkbox"/> 기준/지침 <input type="checkbox"/> 기타 |
| 기술수명주기** | <input checked="" type="checkbox"/> 기술도입기 <input type="checkbox"/> 기술성장기 <input type="checkbox"/> 기술성숙기 <input type="checkbox"/> 기술쇠퇴기                                                                                      |

\* 본 보고서는 R&D 성과물의 유형을 아래와 같이 분류하고 있습니다. 내용을 충분히 숙지하시고 귀 기관이 수행한 R&D 과제에 해당하는 것을 선택해 주십시오.

| 번호 | 구분       | 내용                                      | 예시                              |
|----|----------|-----------------------------------------|---------------------------------|
| 1  | 공법/기법    | 기존 장비와 자재 등을 활용하되, 새로운 절차 및 방법을 제시      | 시공방법, 설계기법, 분석/평가기법             |
| 2  | 장비/장치    | 새로운 기계적 구조나 작동원리를 활용하여 기존 장치와 설비를 대체    | 기계, 로봇, 부품, 측정장치                |
| 3  | 재료/자재    | 새로운 원료, 재료를 활용하여 기존의 것을 대체              | FRP, 강화 콘크리트, 철강재료              |
| 4  | S/W      | 새로운 Data Base, 해석 및 설계 방법을 적용한 컴퓨터 프로그램 | 설계 프로그램, 사업관리시스템, 데이터베이스        |
| 5  | 시스템      | 다양한 장치와 S/W가 결합하여 일체로 활용되는 유형           | 고속철도, 경량전철, 공조시스템               |
| 6  | 기준/지침(안) | 각종 법령, 건설공사기준, 지침 등                     | 건설교통 법령, 설계기준, 시공기준<br>안전기준, 표준 |
| 7  | 기 타      | ( )                                     | 인프라구축, 정책기획 등                   |

\*\* 아래 기술수명주기 분류를 참조하시어 해당되는 단계를 선택해 주십시오.

| 번호 | 구분    | 내용                                                                        |
|----|-------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 기술도입기 | 기술의 잠재적 가능성만 있는 단계                                                        |
| 2  | 기술성장기 | 기술개발국 및 일부 선진국에서 활용되고 있는 단계                                               |
| 3  | 기술성숙기 | 선진국 사이에서 활발한 기술이전이 일어나며, 기술의 표준화가 되어가는 단계                                 |
| 4  | 기술쇠퇴기 | 선진국에서 개도국으로 기술이전이 활발하게 일어나고, 선진국에서는 기술의 가치가 저하되나, 개도국에서는 아직 시장의 가치가 높은 기술 |

## C. 성과활용 네트워크 정보

- 귀 기관의 R&D를 통해 개발된 기술을 활용하기 위해 필요한 시험·검증, 현장적용 및 수요기업 정보를 작성해 주십시오.
- 요소기술이 2개 이상인 경우, 해당 양식을 추가하여 작성해 주십시오.(요소기술 수만큼 기재)

| 요소기술 구분                        | 1-가 | 요소기술명 | 측위신뢰도와 3D 도심 모델 연동을 통한 충돌방지 안전거리 생성 |
|--------------------------------|-----|-------|-------------------------------------|
| 구 분                            |     | 주체명   |                                     |
| 연구개발성과 시험·검증기관                 |     |       |                                     |
| 연구개발성과 수요기업                    |     | 미정    |                                     |
| 연구개발성과 현장적용<br>기관·업체           |     |       |                                     |
| 연구개발성과 추가 R&D(사업비)<br>투자·자문 기관 |     |       |                                     |

| 요소기술 구분                        | 1-나 | 요소기술명 | 기지국 최적화를 통한 MLAT 측위 정확도 향상 |
|--------------------------------|-----|-------|----------------------------|
| 구 분                            |     | 주체명   |                            |
| 연구개발성과 시험·검증기관                 |     |       |                            |
| 연구개발성과 수요기업                    |     | 미정    |                            |
| 연구개발성과 현장적용<br>기관·업체           |     |       |                            |
| 연구개발성과 추가 R&D(사업비)<br>투자·자문 기관 |     |       |                            |

## D. 성과 정보

- 귀 기관의 성과 정보에 대한 자료 수집을 위한 것입니다.
- 본 과제를 통해 발생한 성과를 기재해 주십시오.

### 1. 특허등록

| No. | 요소기술<br>구분 | 특허명칭 | 등록번호 | 등록일 | 출원인<br>(등록권리자) |
|-----|------------|------|------|-----|----------------|
| A-1 | 1-가        |      |      |     |                |
| A-2 | 1-나        |      |      |     |                |

### 2. 학술지 게재

| No. | 요소기술<br>구분 | SCI/<br>일반 | 논문명                                                                                                                          | 학술지명          | ISBN<br>ISSN            | 주저자명 | Vol.<br>(No) | 시작<br>페이지 | 끝<br>페이지 | 게재<br>일자       |
|-----|------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------|------|--------------|-----------|----------|----------------|
| B-1 | 1-가        | 일반         | LTE 신호의 CRS를<br>이용한 TOA 기반<br>거리 측정 방법                                                                                       | 한국항행학회논<br>문지 | 1424-82<br>20<br>(ISSN) | 강태원  | 23           | 437       | 443      | 2019.10.<br>24 |
| B-2 | 1-가        | 일반         | 도심 지역 LTE 측위<br>기반 무인항공기<br>안전거리 생성<br>알고리즘 연구 및<br>시각화 도구 개발                                                                | 한국항행학회논<br>문지 | 1424-82<br>20<br>(ISSN) | 이하림  | 23           | 408       | 414      | 2019.10.<br>24 |
| B-3 | 1-나        | SCI        | Analysis of<br>DME/DME<br>Navigation<br>Performance and<br>Ground Network<br>Using<br>Stretched-Front-Leg<br>Pulse-Based DME | Sensors       | 1424-82<br>20<br>(ISSN) | 김의호  | 18           | 3275      | 3293     | 2018.9.2<br>9  |
| B-4 | 1-나        | SCI        | Feasibility Analysis<br>of LTE-Based UAS<br>Navigation in Deep<br>Urban Areas and<br>DSRC Augmentation                       | Sensors       | 1424-82<br>20<br>(ISSN) | 김의호  | 19           | 4192      | 4206     | 2019.9.2<br>7  |

### 3. 소프트웨어 등록

| No. | 요소기술<br>구분 | SW명칭 | 창작일 | 저작자명 | 등록일 | 등록번호 | 저작권자명 |
|-----|------------|------|-----|------|-----|------|-------|
| E-1 | 1-가        |      |     |      |     |      |       |
| E-2 | 1-나        |      |     |      |     |      |       |

#### 4. 신기술 지정

| No. | 요소기술<br>구분 | 명칭 | 출원일 | 고시일 | 보호기간 | 지정번호 |
|-----|------------|----|-----|-----|------|------|
| F-1 | 1-가        |    |     |     |      |      |
| F-2 | 1-나        |    |     |     |      |      |

#### 5. 시제품 제작

| No. | 요소기술<br>구분 | 시제품명 | 출시/제작일 | 제작업체명 | 설치장소 | 이용분야 |
|-----|------------|------|--------|-------|------|------|
| C-1 | 1-가        |      |        |       |      |      |
| C-2 | 1-나        |      |        |       |      |      |

#### 6. 현장시험\*

| No. | 요소기술<br>구분 | 현장시험명 | 시험일 | 시험장소 | 주요내용 |
|-----|------------|-------|-----|------|------|
| D-1 | 1-가        |       |     |      |      |
| D-2 | 1-나        |       |     |      |      |

\* 현장시험: 개발기술의 보완이나 검증을 위하여 실험현장에 최초로 시험·적용하는 행위

#### 7. 표준/인증

| No. | 요소기술<br>구분 | 인증번호<br>(규격번호) | 인증명 | 취득일 | 취득기관 | 관리기관 |
|-----|------------|----------------|-----|-----|------|------|
| K-1 | 1-가        |                |     |     |      |      |
| K-2 | 1-나        |                |     |     |      |      |

#### 8. 정책채택

| No. | 요소기술<br>구분 | 구 분 | 정책명 | 관련기관<br>(담당부서) | 시행일시 | 채택내용 |
|-----|------------|-----|-----|----------------|------|------|
| L-1 | 1-가        |     |     |                |      |      |
| L-2 | 1-나        |     |     |                |      |      |

## 9. 법령 반영

| No. | 요소기술<br>구분 | 구분 | 활용구분<br>(신규/개선) | 명 칭 | 해당조항 | 시행일시 | 관리부처 | 제정/개선내용 |
|-----|------------|----|-----------------|-----|------|------|------|---------|
| M-1 | 1-가        |    |                 |     |      |      |      |         |
| M-2 | 1-나        |    |                 |     |      |      |      |         |

## 10. 설계기준, 시방서, 지침에 반영

| No. | 요소기술<br>구분 | 구 분<br>(설계기준/시방서/지침) | 활용구분<br>(신규/개선) | 설계기준/시방서/지침<br>명칭 | 반영일시 | 반영내용 |
|-----|------------|----------------------|-----------------|-------------------|------|------|
| J-1 | 1-가        |                      |                 |                   |      |      |
| J-2 | 1-나        |                      |                 |                   |      |      |

## 11. 기술실시계약

| No. | 요소기술<br>구분 | 계약명 | 실시기업명 | 계약체결일 | 기술사용<br>시작일 | 기술사용<br>종료일 | 징수일자 | 징수금액<br>(천원) | 계약<br>유형 |
|-----|------------|-----|-------|-------|-------------|-------------|------|--------------|----------|
| G-1 | 1-가        |     |       |       |             |             |      |              |          |
| G-2 | 1-나        |     |       |       |             |             |      |              |          |

## 12. 사업화/제품화

| No. | 요소기술<br>구분 | 사업화명 | 사업화내용 | 업체명 | 사업자<br>등록번호 | 매출액(천원) | 매출발생년도 | 고용실적(명) |
|-----|------------|------|-------|-----|-------------|---------|--------|---------|
| H-1 | 1-가        |      |       |     |             |         |        |         |
| H-2 | 1-나        |      |       |     |             |         |        |         |

## 13. 현장적용(시공)\*\*

| No. | 요소기술<br>구분 | 발주기관명 | 시공업체명 | 적용현장명 | 공사시작일 | 공사종료일 | 공사금액(천원)*** |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| I-1 | 1-가        |       |       |       |       |       |             |
| I-2 | 1-나        |       |       |       |       |       |             |

\*\* 현장적용(시공): 사업화주체(기업)가 개발기술을 실제 공사현장(수주)에 적용하여 매출이 발생하는 경우

\*\*\*공사금액: 당해 기술이 적용된 공사의 총공사금액

## E. 성과활용 정보

- 귀 기관의 성과활용 정보에 대한 자료 수집을 위한 것입니다.
- 요소기술이 1개 이상인 경우, 해당 양식을 추가하여 작성해 주십시오.(요소기술 수만큼 기재)

| 구분                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1-가                                                                                  | 요소기술명                                              | 측위신뢰도와 3D 도심 모델 연동을 통한 충돌방지 안전거리 생성 |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------|----|-----------------|---------|---|----------|----------------------------|----------------------------------------|----|-------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|----------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------|----|---------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <p>※ 본 보고서에서 사용하는 “성과의 활용”이란 용어는 아래와 같은 의미를 가지고 있습니다.</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p style="text-align: center;"><b>“국토교통 R&amp;D 성과의 활용”이란?</b></p> <p>국토교통 R&amp;D 성과가 산업적 활용을 통해 부가가치를 창출하거나 공공적 활용을 통해 공익에 기여하는 경우에 대해 &lt;활용되었다&gt;고 판단합니다. 본 조사에서는 사업화/기업화에 의한 제품의 매출발생, 입찰 및 발주 절차를 거친 공법 등의 실제 공사 현장적용을 성과 활용으로 분류하고 있습니다. 다만 R&amp;D의 목적이 법/기준/지침 마련인 경우, 법/기준/지침의 반영을 성과 활용으로 분류합니다.</p> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                      |                                                    |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
| <p>1. 위 내용을 고려하였을 때 현재시점(R&amp;D 종료)에서 귀 기관의 R&amp;D 성과물은 그 성과가 활용되었습니까? ( 2 )</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <span>1. 예, 활용되었습니다.</span> <span>2. 아니요, 활용되지 않았습니다.</span> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                      |                                                    |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
| <p>2. 귀 기관이 수행한 건설교통 R&amp;D 사업의 종료 후, 성과물이 활용되기까지 거쳐야 하는 프로세스를 &lt;보기&gt;와 같은 단계로 정의하였습니다. 귀 기관의 R&amp;D 성과물의 활용프로세스 상 현재 단계를 표시하여 주십시오.</p> <p style="text-align: center;">&lt;보기&gt; R&amp;D사업 종료 후 성과 활용에 이르는 단계</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>단계</th><th>단 계 명(R&amp;D 종료시점)</th><th>단 계 정 의</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">I</td><td>기술 개발 단계</td><td rowspan="2" style="text-align: center;">국가 R&amp;D 사업을 통해 연구개발이 완료된 단계</td></tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/>완료</td></tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">II</td><td>기술 검증·보완 단계</td><td rowspan="2" style="text-align: center;">시제품 제작, 현장시험적용 등을 통해 기술을 검증하고 보완하여 기술적 완성도를 높이는 단계</td></tr> <tr> <td><input type="checkbox"/>준비   <input type="checkbox"/>진행중   <input type="checkbox"/>완료</td></tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">III</td><td>실용화 추진 단계(마케팅)</td><td rowspan="2" style="text-align: center;">제품판매 및 공사수주를 위한 마케팅(제안·홍보·입찰 등) 단계</td></tr> <tr> <td><input type="checkbox"/>준비   <input type="checkbox"/>진행중</td></tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">IV</td><td>시장수용 단계</td><td rowspan="2" style="text-align: center;">제품 판매나 공사 수주를 통해 실제 매출이 발생하는 단계</td></tr> <tr> <td><input type="checkbox"/>초기발생   <input type="checkbox"/>지속발생</td></tr> </tbody> </table> |                                                                                      |                                                    |                                     | 단계 | 단 계 명(R&D 종료시점) | 단 계 정 의 | I | 기술 개발 단계 | 국가 R&D 사업을 통해 연구개발이 완료된 단계 | <input checked="" type="checkbox"/> 완료 | II | 기술 검증·보완 단계 | 시제품 제작, 현장시험적용 등을 통해 기술을 검증하고 보완하여 기술적 완성도를 높이는 단계 | <input type="checkbox"/> 준비 <input type="checkbox"/> 진행중 <input type="checkbox"/> 완료 | III | 실용화 추진 단계(마케팅) | 제품판매 및 공사수주를 위한 마케팅(제안·홍보·입찰 등) 단계 | <input type="checkbox"/> 준비 <input type="checkbox"/> 진행중 | IV | 시장수용 단계 | 제품 판매나 공사 수주를 통해 실제 매출이 발생하는 단계 | <input type="checkbox"/> 초기발생 <input type="checkbox"/> 지속발생 |
| 단계                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 단 계 명(R&D 종료시점)                                                                      | 단 계 정 의                                            |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
| I                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 기술 개발 단계                                                                             | 국가 R&D 사업을 통해 연구개발이 완료된 단계                         |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <input checked="" type="checkbox"/> 완료                                               |                                                    |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
| II                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 기술 검증·보완 단계                                                                          | 시제품 제작, 현장시험적용 등을 통해 기술을 검증하고 보완하여 기술적 완성도를 높이는 단계 |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <input type="checkbox"/> 준비 <input type="checkbox"/> 진행중 <input type="checkbox"/> 완료 |                                                    |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
| III                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 실용화 추진 단계(마케팅)                                                                       | 제품판매 및 공사수주를 위한 마케팅(제안·홍보·입찰 등) 단계                 |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <input type="checkbox"/> 준비 <input type="checkbox"/> 진행중                             |                                                    |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
| IV                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 시장수용 단계                                                                              | 제품 판매나 공사 수주를 통해 실제 매출이 발생하는 단계                    |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <input type="checkbox"/> 초기발생 <input type="checkbox"/> 지속발생                          |                                                    |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
| <p>3. 위 2에서 I~III단계라고 응답한 경우, R&amp;D 성과물을 활용하기 위해 지속적인 활동을 진행하실 예정입니까?( 1 )</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <span>1. 예, 계속 활용을 추진할 예정입니다.</span> <span>2. 아니요, 활용추진을 중단하였습니다.</span> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                      |                                                    |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |
| <p>4. 귀 기관이 위 2번에서 응답한 단계까지 수행한 주요 활동내용을 구체적으로 설명해 주십시오.</p> <p>※ 만약 귀 기관이 위 2번에서 III단계라고 응답한 경우, I 단계, II 단계, III 단계의 주요 활동내용(주체, 시기, 산출물이나 공사명 등을 구체적으로 기입)을 작성해 주십시오.</p> <p>※ 수행한 주요 활동내용을 기재하시고 B. 성과 및 활용정보에서 기재한 활용성과 번호를 함께 기재해 주십시오.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                      |                                                    |                                     |    |                 |         |   |          |                            |                                        |    |             |                                                    |                                                                                      |     |                |                                    |                                                          |    |         |                                 |                                                             |

| 단계  | 단계명         | 주요 활동내용               |
|-----|-------------|-----------------------|
| I   | 기술 개발 단계    | 연구개발 목표 달성 (B-1, B-2) |
| II  | 기술 검증·보완 단계 |                       |
| III | 실용화 추진 단계   |                       |
| IV  | 시장 수용 단계    |                       |

|    |     |       |                            |
|----|-----|-------|----------------------------|
| 구분 | 1-나 | 요소기술명 | 기지국 최적화를 통한 MLAT 측위 정확도 향상 |
|----|-----|-------|----------------------------|

※ 본 보고서에서 사용하는 “성과의 활용”이란 용어는 아래와 같은 의미를 가지고 있습니다.

## “국토교통 R&D 성과의 활용”이란?

국토교통 R&D 성과가 산업적 활용을 통해 부가 가치를 창출하거나 공공적 활용을 통해 공익에 기여하는 경우에 대해 <활용되었다>고 판단합니다. 본 조사에서는 사업화/기업화에 의한 제품의 매출 발생, 입찰 및 발주 절차를 거친 공법 등의 실제 공사 현장 적용을 성과 활용으로 분류하고 있습니다. 다만 R&D의 목적이 법/기준/지침 마련인 경우, 법/기준/지침의 반영을 성과 활용으로 분류합니다.

1. 위 내용을 고려하였을 때 현재시점(R&D 종료)에서 귀 기관의 R&D 성과물은 그 성과가 활용되었습니까? ( 2 )
1. 예, 활용되었습니다. 2. 아니오, 활용되지 않았습니다.
2. 귀 기관이 수행한 건설교통 R&D 사업의 종료 후, 성과물이 활용되기까지 거쳐야 하는 프로세스를 <보기>와 같은 단계로 정의하였습니다. 귀 기관의 R&D 성과물의 활용프로세스 상 현재 단계를 표시하여 주십시오.

〈보기〉 R&D사업 종료 후 성과 활용에 이르는 단계

| 단계 | 단 계 명(R&D 종료시점)                                                                      | 단 계 정 의                                            |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Ⅰ  | 기술 개발 단계                                                                             | 국가 R&D 사업을 통해 연구개발이 완료된 단계                         |
|    | <input checked="" type="checkbox"/> 완료                                               |                                                    |
| Ⅱ  | 기술 검증·보완 단계                                                                          | 시제품 제작, 현장시험적용 등을 통해 기술을 검증하고 보완하여 기술적 완성도를 높이는 단계 |
|    | <input type="checkbox"/> 준비 <input type="checkbox"/> 진행중 <input type="checkbox"/> 완료 |                                                    |
| Ⅲ  | 실용화 추진 단계(마케팅)                                                                       | 제품판매 및 공사수주를 위한 마케팅(제안·홍보·입찰 등) 단계                 |
|    | <input type="checkbox"/> 준비 <input type="checkbox"/> 진행중                             |                                                    |
| Ⅳ  | 시장수용 단계                                                                              | 제품 판매나 공사 수주를 통해 실제 매출이 발생하는 단계                    |
|    | <input type="checkbox"/> 초기발생 <input type="checkbox"/> 지속발생                          |                                                    |

3. 위 2에서 I~III단계라고 응답한 경우, R&D 성과물을 활용하기 위해 지속적인 활동을 진행하실 예정입니까?( 1 )
1. 예, 계속 활용을 추진할 예정입니다.                      2. 아니요, 활용추진을 중단하였습니다.

4. 귀 기관이 위 2번에서 응답한 단계까지 수행한 주요 활동내용을 구체적으로 설명해 주십시오.
- ※ 만약 귀 기관이 위 2번에서 Ⅲ단계라고 응답한 경우, Ⅰ단계, Ⅱ단계, Ⅲ단계의 주요 활동내용(주체, 시기, 산출물이나 공사명 등을 구체적으로 기입)을 작성해 주십시오.
  - ※ 수행한 주요 활동내용을 기재하시고 B. 성과 및 활용정보에서 기재한 활용성과 번호를 함께 기재해 주십시오.

| 단계 | 단계명         | 주요 활동내용               |
|----|-------------|-----------------------|
| Ⅰ  | 기술 개발 단계    | 연구개발 목표 달성 (B-3, B-4) |
| Ⅱ  | 기술 검증·보완 단계 |                       |
| Ⅲ  | 실용화 추진 단계   |                       |
| Ⅳ  | 시장 수용 단계    |                       |

|            |
|------------|
| F. 성과활용 계획 |
|------------|

- 귀 기관의 성과활용 계획에 대한 자료 수집을 위한 것입니다.
- 요소기술이 1개 이상인 경우, 해당 양식을 추가하여 작성해 주십시오.(요소기술 수만큼 기재)

|    |     |       |                                        |
|----|-----|-------|----------------------------------------|
| 구분 | 1-가 | 요소기술명 | 측위신뢰도와 3D 도심 모델 연동을 통한<br>충돌방지 안전거리 생성 |
|----|-----|-------|----------------------------------------|

1. 동 연구개발성과의 향후 5년간(활용보고서 제출 기간) 성과활용 목표·계획을 표기해 주십시오.

| 단계  | 종료 후 1년                                                                                               | 종료 후 2년                                                                                               | 종료 후 3년                                                                                               | 종료 후 4년                                                                                               | 종료 후 5년                                                                                    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| I   | 기술 개발 단계                                                                                              | 기술 개발 단계                                                                                              | 기술 개발 단계                                                                                              | 기술 개발 단계                                                                                              | 기술 개발 단계                                                                                   |
|     | <input type="checkbox"/> 완료                                                                           | <input type="checkbox"/> 완료                                                                           | <input type="checkbox"/> 완료                                                                           | <input type="checkbox"/> 완료                                                                           | <input type="checkbox"/> 완료                                                                |
| II  | 기술 검증·보완 단계                                                                                           | 기술 검증·보완 단계                                                                                           | 기술 검증·보완 단계                                                                                           | 기술 검증·보완 단계                                                                                           | 기술 검증·보완 단계                                                                                |
|     | <input checked="" type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중<br><input type="checkbox"/> 완료 | <input type="checkbox"/> 준비<br><input checked="" type="checkbox"/> 진행중<br><input type="checkbox"/> 완료 | <input type="checkbox"/> 준비<br><input checked="" type="checkbox"/> 진행중<br><input type="checkbox"/> 완료 | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중<br><input checked="" type="checkbox"/> 완료 | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중<br><input type="checkbox"/> 완료 |
| III | 실용화 추진 단계<br>(마케팅)                                                                                    | 실용화 추진 단계<br>(마케팅)                                                                                    | 실용화 추진 단계<br>(마케팅)                                                                                    | 실용화 추진 단계<br>(마케팅)                                                                                    | 실용화 추진 단계<br>(마케팅)                                                                         |
|     | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중                                           | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중                                           | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중                                           | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중                                           | <input checked="" type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중                     |
| IV  | 시장수용 단계                                                                                               | 시장수용 단계                                                                                               | 시장수용 단계                                                                                               | 시장수용 단계                                                                                               | 시장수용 단계                                                                                    |
|     | <input type="checkbox"/> 초기발생<br><input type="checkbox"/> 지속발생                                        | <input type="checkbox"/> 초기발생<br><input type="checkbox"/> 지속발생                                        | <input type="checkbox"/> 초기발생<br><input type="checkbox"/> 지속발생                                        | <input type="checkbox"/> 초기발생<br><input type="checkbox"/> 지속발생                                        | <input type="checkbox"/> 초기발생<br><input type="checkbox"/> 지속발생                             |

2. 귀 기관이 위 1번에서 응답한 활용계획의 주요 활동내용(예정/기회)을 구체적으로 설명해 주십시오

| 단계  | 단계명         | 주요 활동내용 |           |         |                      |
|-----|-------------|---------|-----------|---------|----------------------|
|     |             | 주체*     | 성과물**/개수  | 시기      | 내용                   |
| I   | 기술 개발 단계    | -       | 특허출원/2건   | R&D종료시점 | R&D 기간 내 완료          |
| II  | 기술 검증·보완 단계 | 미정      | 시제품/1건    | ~종료후 4년 | 실험실 환경에서 검증 후 시제품 제작 |
| III | 실용화 추진 단계   | 미정      | 기술실시계약/1회 | ~종료후 5년 | 연구개발성과 기술이전          |
| IV  | 시장 수용 단계    |         |           |         |                      |

\* 주체: 연구주관기관(연구책임자)과 함께 Co-Work을 진행하는 기업/기관명  
\*\* 성과물: 각 단계별 성과활용 과정에서 발생한 성과물(예: 시험적용, 시제품, 현장적용 등)

3. 귀 기관의 R&D 성과물을 활용하기 위해서는 기준이나 지침의 제·개정이 필요합니까? ( 2 )

1. 예, 필요합니다.                      2. 아니오, 필요하지 않습니다.

4. 위 3에서 1번이라고 응답한 경우, 향후 기준/지침 채택을 위한 세부적인 활동 계획을 설명해 주십시오.

| 구 분<br>(설계기준/시방서/지침) | 활용구분<br>(신규/개선) | 내용 |
|----------------------|-----------------|----|
|                      |                 |    |

| 구분 | 1-나 | 요소기술명 | 기지국 최적화를 통한 MLAT 측위<br>정확도 향상 |
|----|-----|-------|-------------------------------|
|----|-----|-------|-------------------------------|

1. 동 연구개발성과의 향후 5년간(활용보고서 제출 기간) 성과활용 목표·계획을 표기해 주십시오.

| 단<br>계 | 종료 후 1년                                                                                    | 종료 후 2년                                                                                               | 종료 후 3년                                                                                               | 종료 후 4년                                                                                               | 종료 후 5년                                                                                    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| I      | 기술 개발 단계                                                                                   | 기술 개발 단계                                                                                              | 기술 개발 단계                                                                                              | 기술 개발 단계                                                                                              | 기술 개발 단계                                                                                   |
|        | <input checked="" type="checkbox"/> 완료                                                     | <input type="checkbox"/> 완료                                                                           | <input type="checkbox"/> 완료                                                                           | <input type="checkbox"/> 완료                                                                           | <input type="checkbox"/> 완료                                                                |
| II     | 기술 검증·보완 단계                                                                                | 기술 검증·보완 단계                                                                                           | 기술 검증·보완 단계                                                                                           | 기술 검증·보완 단계                                                                                           | 기술 검증·보완 단계                                                                                |
|        | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중<br><input type="checkbox"/> 완료 | <input checked="" type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중<br><input type="checkbox"/> 완료 | <input type="checkbox"/> 준비<br><input checked="" type="checkbox"/> 진행중<br><input type="checkbox"/> 완료 | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중<br><input checked="" type="checkbox"/> 완료 | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중<br><input type="checkbox"/> 완료 |
| III    | 실용화 추진 단계<br>(마케팅)                                                                         | 실용화 추진 단계<br>(마케팅)                                                                                    | 실용화 추진 단계<br>(마케팅)                                                                                    | 실용화 추진 단계<br>(마케팅)                                                                                    | 실용화 추진 단계<br>(마케팅)                                                                         |
|        | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중                                | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중                                           | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중                                           | <input type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중                                           | <input checked="" type="checkbox"/> 준비<br><input type="checkbox"/> 진행중                     |
| IV     | 시장수용 단계                                                                                    | 시장수용 단계                                                                                               | 시장수용 단계                                                                                               | 시장수용 단계                                                                                               | 시장수용 단계                                                                                    |
|        | <input type="checkbox"/> 초기발생<br><input type="checkbox"/> 지속발생                             | <input type="checkbox"/> 초기발생<br><input type="checkbox"/> 지속발생                                        | <input type="checkbox"/> 초기발생<br><input type="checkbox"/> 지속발생                                        | <input type="checkbox"/> 초기발생<br><input type="checkbox"/> 지속발생                                        | <input type="checkbox"/> 초기발생<br><input type="checkbox"/> 지속발생                             |

2. 귀 기관이 위 1번에서 응답한 활용계획의 주요 활동내용(예정/기획)을 구체적으로 설명해 주십시오.

| 단<br>계 | 단계명         | 주요 활동내용 |           |         |                      |
|--------|-------------|---------|-----------|---------|----------------------|
|        |             | 주체*     | 성과물**/개수  | 시기      | 내용                   |
| I      | 기술 개발 단계    | -       | 특허출원/1건   | R&D종료시점 | R&D 기간 내 완료          |
| II     | 기술 검증·보완 단계 | 미정      | 시제품/1건    | ~종료후 4년 | 실험실 환경에서 검증 후 시제품 제작 |
| III    | 실용화 추진 단계   | 미정      | 기술실시계약/1회 | ~종료후 5년 | 연구개발성과 기술이전          |
| IV     | 시장 수용 단계    |         |           |         |                      |

\* 주체: 연구주관기관(연구책임자)과 함께 Co-Work을 진행하는 기업/기관명

\*\* 성과물: 각 단계별 성과활용 과정에서 발생한 성과물(예: 시험적용, 시제품, 현장적용 등)

3. 귀 기관의 R&D 성과물을 활용하기 위해서는 기준이나 지침의 제·개정이 필요합니까? ( 2 )

1. 예, 필요합니다.

2. 아니요, 필요하지 않습니다.

4. 위 3에서 1번이라고 응답한 경우, 향후 기준/지침 채택을 위한 세부적인 활동 계획을 설명해 주십시오.

| 구 분<br>(설계기준/시방서/지침) | 활용구분<br>(신규/개선) | 내용 |
|----------------------|-----------------|----|
|                      |                 |    |

# 국토교통연구개발사업 성과총람 원고

|         |             |
|---------|-------------|
| 주관연구기관명 | 연세대학교 산학협력단 |
| 연구책임자명  | 서 지원        |

## I. 과제 기본정보

|             |                                                                                           |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 사업명         | 국토교통기술촉진연구사업                                                                              |
| 최상위과제명      | 도심 저고도 무인항공기 관제와 충돌방지 지원을 위한 Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반 Multilateration 시스템 기초연구 |
| (핵심,세부) 과제명 |                                                                                           |
| 연구책임자 정보    | (성 명) 서 지 원<br>(전 화) 032-749-5833<br>(이메일) jiwon.seo@yonsei.ac.kr<br>(소 속) 연세대학교          |

## II. 연구개발 배경 및 목표

### 1. 연구배경

- 도심에서의 정밀측위는 아직 뚜렷한 해결책이 없는 기술적 난제이며 무인항공기의 상업적 운영의 가장 큰 장애물이다. 도심 무인항공기의 성공적인 관제를 위한 측위 방법은 위성항법시스템에 전적으로 의존하지 않으며, 도심 다중경로 전파에 강인하고, 저가의 경량 센서를 활용한 방법이 이상적이다.
- 본 연구팀이 제안하는 LTE, 5G 등 Signals of Opportunity 및 UWB 기반 Multilateration (MLAT) 측위 방법은 이러한 조건을 만족시키는데, 먼저 도심의 밀집된 이동통신 기지국은 안정된 신호 및 기하학적 분포(geometry)로 일관성 있는 위치측정을 가능케 한다. LTE 및 5G 통신을 이용한 측위도 다중경로 전파의 영향을 받을 수 있지만 UWB와 같은 센서를 활용한 무인항공기 간 거리측정 기반 cooperative positioning 기법으로 다중경로파의 영향을 대폭 줄일 수 있어 관제에 필요한 위치측정 정확도를 제공할 수 있을 것이다. 또한, 5G와 UWB 모듈은 소형 드론에 장착하기 쉬운 정도의 작은 크기이며 저가의 센서라는 장점이 있다. 특히, 본 제안과제의 MLAT 정밀측위 기법은 도심 기지국 위치가 고정적이기 때문에 도심의 각 지역마다 예측 가능한 측위 정확도를 보인다는 특징이 있다.
- 기지국의 위치를 도심 건물 3D 모델과 연동하면 각 도심 고도 및 지역 별로 무인항공기 충돌방지를 위한 안전거리 정보 생성이 가능하여 도심 관제에 큰 도움을 줄 것으로 예상된다. 현재 5G 통신 표준이 완성되지 않았지만 10여 미터 정확도 이상의 거리측정 기능이 포함될 것으로 예상되며 이를 가정한 5G 기반 위치측정 연구들이 국외에서는 이미 활발히 진행 중이다. 따라서 도심 무인항공기 관제와 5G 측위 원천기술의 확보를 위해 국내에서도 관련 연구 시작의 필요성이 매우 높다고 할 수 있다.

## 2. 연구목표

도심 저고도 (500 ft 미만) 비행 무인항공기 관제 지원을 위한 LTE, 5G 등 Signals of Opportunity 및 UWB 기반 MLAT 무인항공기 측위 시스템 아키텍처를 개발하며 MLAT 측위, V2V/V2I, 3D 도심 모델을 이용한 무인항공기 충돌방지 안전거리 생성 알고리즘을 연구한다. 본 제안 과제 세부 목표는 아래와 같다.

- 도심 저고도(500 ft 미만) 무인항공기 관제 시스템 지원을 위한 Signals of Opportunity와 V2V/V2I 기반 MLAT 무인항공기 측위 시스템 아키텍처를 연구하고 Matlab 시뮬레이터를 구현한다.
- V2V/V2I 및 무인항공기 간의 거리측정을 이용하여 MLAT에서 제공된 위치정보의 정확도를 향상시키는 센서융합 알고리즘을 개발한다.
- 국토부의 VWorld를 활용하여 국내 대표적 도심환경의 3D 모델을 구축하며 제안된 방식의 MLAT 측위 정확도를 현실적인 중계기 분포를 고려하여 계산한다.
- 도심에서 소형 무인기 관제에 필요한 위치측정 정확도를 얻기 위한 중계기 네트워크 형태를 결정한다.
- 위치측정 신뢰도와 3D 도심 모델을 적용하여 각 비행 고도별, 도심 지역별 충돌방지 안전거리를 예측한다.

## III. 연구개발 내용 및 성과물

### 1. 주요 연구내용

#### (1) 3D 도심 모델 구축 및 LTE, 5G 신호 및 표준 기초조사

- 특정 지역의 3D 도심 모델 구축
- 가상 구역 설정
- 현실적인 중계기 위치 설정
- LTE 및 5G 거리측정에 관한 표준 동향 조사

#### (2) MLAT 아키텍처 구축 및 도심 측위 성능 연구

- MLAT 측위 엔진 알고리즘 구축
- MLAT 수신기 시각 동기화 방법 연구
- 기지국 분포를 이용한 MLAT 측위 성능 연구

#### (3) 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘 연구, 시뮬레이터 구현

- 도심 5G 전파 특성 연구
- 측위 신뢰도 생성 알고리즘 연구
- 도심 구역별 안전거리 생성 알고리즘 연구

#### (4) MLAT 기반 cooperative positioning 알고리즘 개발 및 기지국 분포 최적화

- MLAT 측위 정보와 UWB/DSRC를 이용한 cooperative positioning 알고리즘 개발
- 기지국 분포 보강 최적화 알고리즘 개발
- 측위 정확도에 따른 기지국 분포 보강 형태 개발

## 2. 연구개발 성과

※ 관련사진을 반드시 첨부하고, 캡션으로 설명

### (1) 무인항공기 충돌방지를 위한 안전거리 예측 알고리즘 개발

#### (가) 측위 신뢰도와 3D 도심 모델 연동

단위성으로 제시한 ‘측위 신뢰도와 3D 도심 모델 연동을 통한 충돌방지 안전거리 생성’을 위해 관련 알고리즘을 연구하고 3D 도심 모델에서 안전거리를 가시화 할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다.

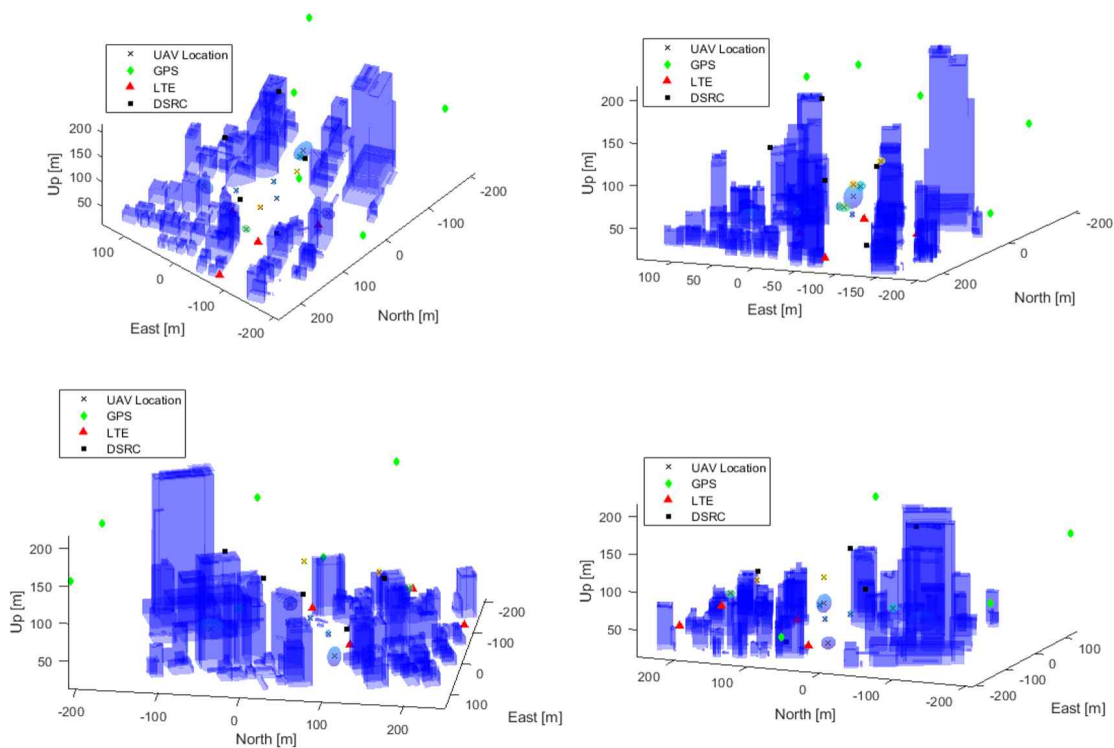


그림 1. 제작된 시뮬레이터의 출력 예시. 무인항공기(UAV), GPS, LTE, DSRC의 위치가 3D 도심 모델 상에 표시되어있음

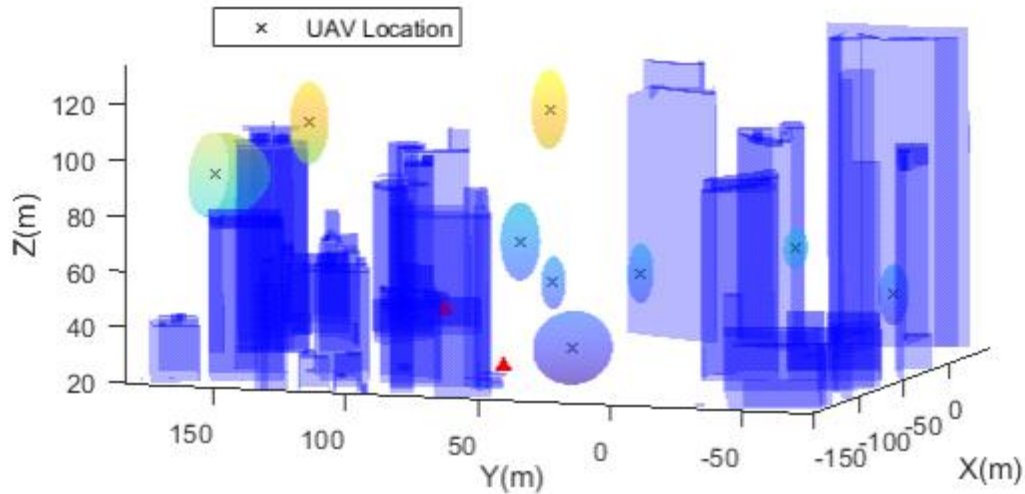


그림 2. 측위 신뢰도와 3D 도심 모델 연동을 통해 계산한 충돌방지 안전거리를 3차원 타원체(confidence ellipsoid)로 표시함

#### (나) 안전거리 신뢰도 검증

단위성과의 측정방법인 ‘위치측정 오차와 protection bound 비교’를 위해, 그림 3, 4와 같이 수평, 수직 방향 오차와 protection bound를 비교하는 Stanford diagram을 도식화하였다. 각 그래프의 세로축은 수평, 수직 방향 protection bound를 나타내고, 가로축은 수평, 수직 방향 측위 오차를 나타낸다. 두 경우 모두 1,050,710 epoch의 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 3, 4에서  $n$ 은 점의 개수를 의미하며,  $\log(n)$ 이 클수록 점의 밀도가 더 높다. 수평, 수직 두 방향 모두에 대하여 99.999% 이상의 확률로 시스템은 nominal operations 상태임을 알 수 있다. 즉, 무인항공기의 실제 위치는 99.999% 이상의 확률로 안전거리 안으로 바운딩 되었음을 알 수 있다. 따라서 개발된 안전거리 생성 기법이 단위성과 목표치인 99.999%의 안전거리 신뢰도 조건을 만족하였다.

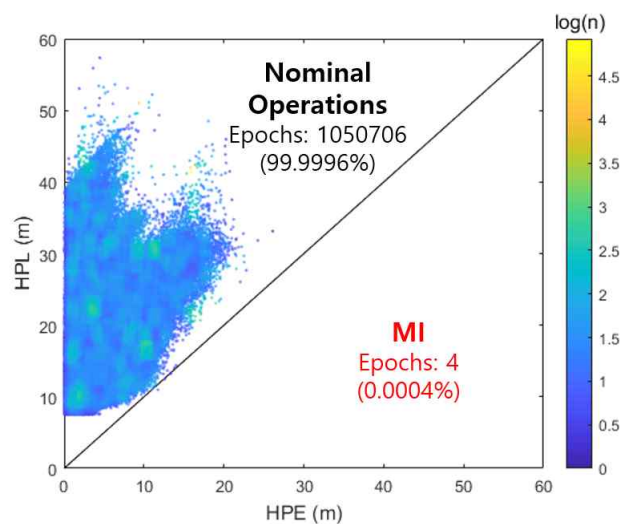


그림 3. 거리 측정치에 bias가 없는 경우의 수평 Stanford Diagram (99.9996%의 확률로 수평 안전거리가 수평 측위 오차를 바운딩함)

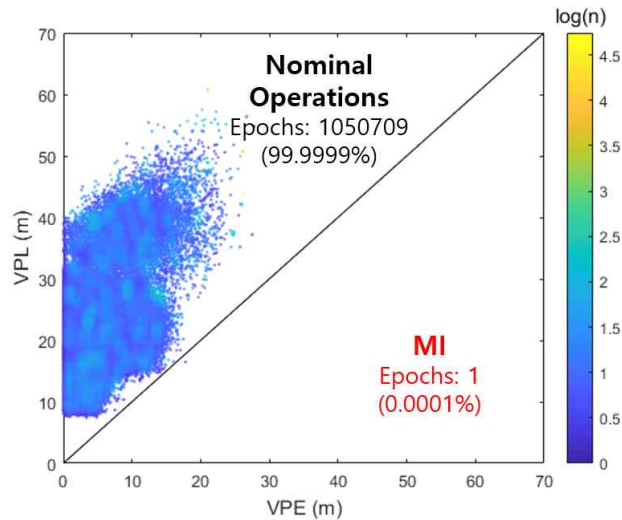
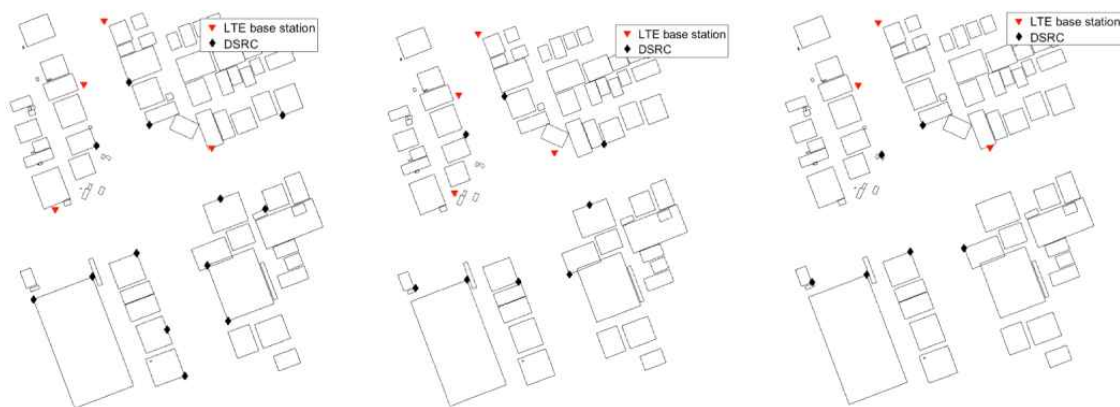


그림 4. 거리 측정치에 bias가 없는 경우의 수직 Stanford Diagram (99.9999%의 확률로 수직 안전거리가 수직 측위 오차를 바운딩함)

## (2) 도심 저고도 무인항공기 관제를 위한 MLAT 측위 시스템 아키텍처 개발

(가) 이진 정수 선형 계획법을 이용한 DSRC 기지국 분포 보강 최적화 알고리즘 개발

단위성과인 ‘중계기 최적화를 통한 MLAT 측위 정확도’계산을 위하여, 기존에 설치된 LTE 기지국에 DSRC 송수신기를 추가로 설치하여 목표하는 측위 정확도를 제공하는 기지국 분포를 이진 정수 선형 계획법을 이용하여 최적화하였다. 모든 비행 가능 구역에서 무인 항공기의 측위 시  $2\sigma(95\%)$  각각 4, 6, 8 m 측위 정확도를 제공하도록 이진 정수 선형 계획법을 이용하여 기지국 분포를 최적화하여 계산하였다.



|                                             |     |                                             |     |                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|---------------------------------------------|-----|---------------------------------------------|-----|
| Required Positioning Accuracy ( $2\sigma$ ) | 4 m | Required Positioning Accuracy ( $2\sigma$ ) | 6 m | Required Positioning Accuracy ( $2\sigma$ ) | 8 m |
| Number of LTE base stations                 | 4   | Number of LTE base stations                 | 4   | Number of LTE base stations                 | 3   |
| Number of new DSRC transceivers             | 13  | Number of new DSRC transceivers             | 8   | Number of new DSRC transceivers             | 6   |

그림 5. 각각의 요구 측위 정확도( $2\sigma$ , 95% 기준)와 최적 측위 네트워크 구성 결과

그림 6는 Dilution of Precision (DOP) 및 예측된 거리측정 정확도를 사용하여 비행 지

역의 측위 정확도를 나타내었으며 중계기 최적화를 통하여 3개의 LTE, 6개의 DSRC 기지국 네트워크로 8 m의 측위 정확도를 제공할 수 있다. 즉, 제안서에서 제시한 10 m 측위 정확도 요구조건을 만족함을 알 수 있다.

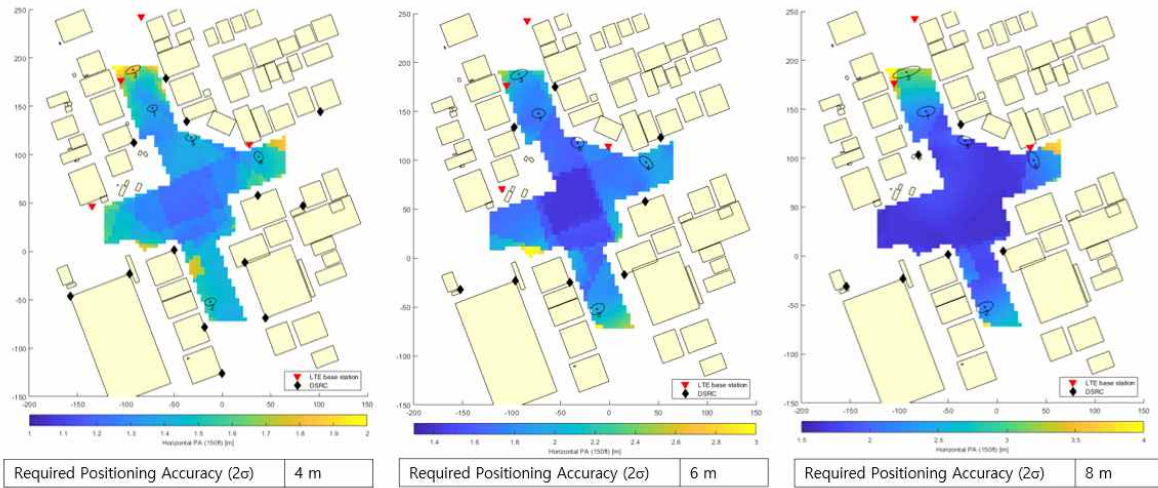


그림 6. 측위 네트워크의 위치추정 정확도. 각각의 그래프에 나타나 있는 5개의 타원은 해당 위치에서의 무인 항공기 confidence ellipse를 나타냄 (5σ, 99.999%)

#### (나) Cooperative Positioning을 이용한 측위 및 정확도 개선

무인항공기 비행구역에서 4 m(95%)의 측위 정확도를 갖도록 구성된 최적 네트워크 구성 결과를 가지고 8대의 무인기를 측위 하는 상황을 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이때, 측위 인프라만을 사용한 무인항공기 측위 결과(V2I)와 무인항공기 간의 상대거리를 측정하여 수행한 Cooperative Positioning(V2V), 무인항공기 간의 상대거리와 측위 네트워크를 모두 사용한 측위 결과(V2I+V2V)를 비교하여 나타내었다. 또한, 무인항공기가 DSRC 송수신기를 탑재하고 지상의 기지국과 주변 무인항공기와의 상대거리를 측정하는 경우와 무인항공기가 UWB 거리측정 센서를 탑재하고 무인항공기 간의 상대거리를 측정하는 경우를 모두 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 보면 DSRC를 이용한 cooperative positioning은 3 m 이상, UWB 기반 cooperative positioning은 10 cm 이상의 측위 정확도를 제공할 수 있음을 알 수 있다.

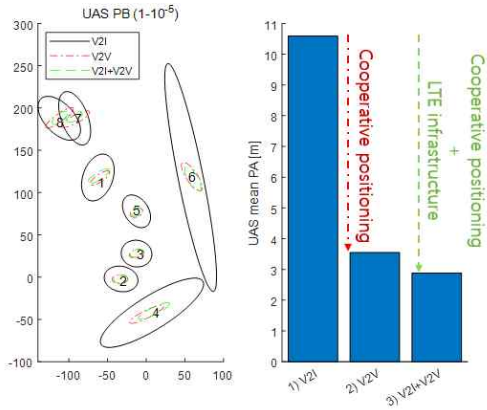


그림 7. 기존의 LTE 기지국을 무인항공기의 측위 네트워크로 사용한 경우 (무인기 간 상대 거리 측정에는 DSRC를 이용)

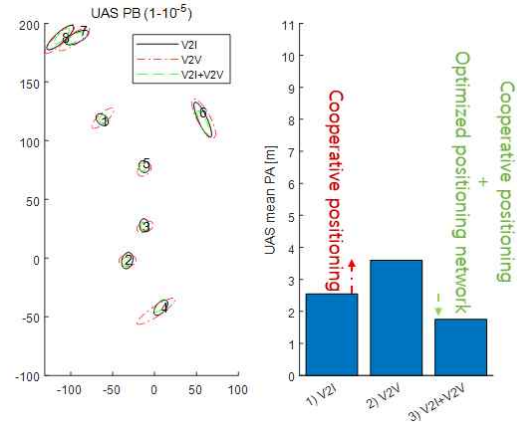


그림 8. 4 m(95%)의 측위 정확도를 갖도록 구성된 최적 네트워크를 사용한 경우 (무인기 간 상대 거리 측정에는 DSRC를 이용)

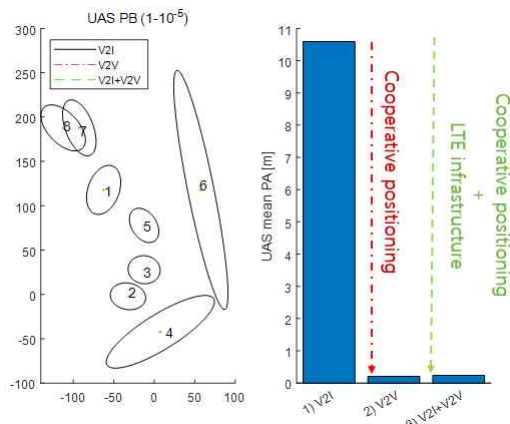


그림 9. 기존의 LTE 기지국을 무인항공기의 측위 네트워크로 사용한 경우 (무인기 간 상대 거리 측정에는 UWB를 이용)

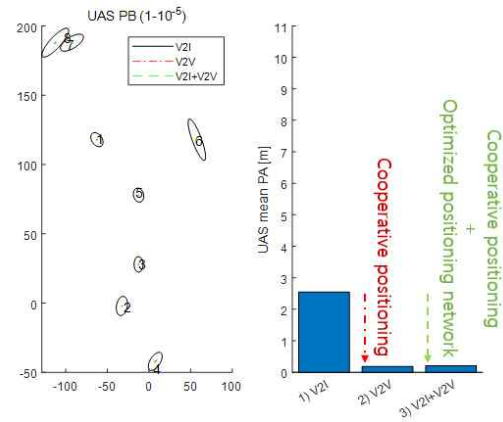


그림 10. 4 m(95%)의 측위 정확도를 갖도록 구성된 최적 네트워크를 사용한 경우 (무인기 간 상대 거리 측정에는 UWB를 이용)

### 3. 연구개발 성과

#### (1) 공공적 성과

○ 본 연구에서 제시한 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘을 통해 향후 증대될 무인항공기 산업에서 자칫 우려가 될 수 있는 실생활에서의 무인항공기에 의한 안전사고를 줄일 수 있다. 이는 무인항공기 안전사고로 인해 생길 수 있는 산업적 손해를 줄이는 것뿐만 아니라 사람이 많은 도심 지역에서의 무인항공기 운용 시 생길 수 있는 사회적 불안감 해소에도 도움을 줄 것이다.

#### (2) 기술적 성과

○ 도심 저고도 환경은 위성항법신호가 불안정하여 UTM을 실현하기에 가장 어려운 지역이다. 본 과제를 통해 초기 제안서에서 계획했던 대로 Signals of Opportunity 및 V2I/V2V 기반 Multilateration 시스템을 개발하고, 측위에 최적화된 도심 지역 기지국 분포를 계산하는 알고리즘을 연구하였다. 또한 무인항공기의 측위 신뢰도 요구조건을 바탕으로 3D 도심 모델과 결합한 UAV 충돌방지 안전거리 생성 시뮬레이터를 성공적으로 제작하였다. 본 과제에서 개발한 Multilateration 측위 시스템은 시뮬레이션 결과로 볼 때 10 m 측위 정확도와 99.999% 신뢰도 조건을 무난히 달성하였다.

○ 본 과제에서 연구한 도심 저고도 무인항공기 관제를 위한 MLAT 시스템은 유인항공기 관제의 기본 측위 원리와 유사하지만 LTE 등 Signals of Opportunity를 이용하는 방식에서 차별화되며, V2I 기반 MLAT 위치 정보와 무인항공기 간의 V2V 거리측정 정보를 융합한 정밀측위기법 개발은 기존 선행연구에서 시도되지 않은 독창적인 방식이다. 또한 측위 신뢰도(Integrity)와 도심 3D 모델을 바탕으로 한 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘은 국내외에서 개발된 적이 없는 아주 창의적인 결과이다.

### (3) 학술적 성과

○ 본 과제를 통해 연구한 MLAT 측위, 안전거리 예측, signals of opportunity 기반 측위 등 다양한 학술적 연구결과를 SCI급 국제학술지 2편, 일반학술지 2편, 국제 학술대회 10편, 국내 학술대회 7편 등으로 발표하였다. 향후 5G 신호나 V2X 기술의 개선에 따라 무인항공기의 측위 정확도나 측위 방식에 대한 더욱 다양한 연구가 진행될 것으로 기대된다.

### (4) 경제적 성과

○ 본 과제를 통해 도심 저고도 비행 무인항공기 관제 핵심원천기술을 연구하였으며 관련 지적재산권을 확보하였다. 이와 같은 기초 연구의 경제적 성과가 단기간에 가시화 되는 것은 아니지만, 향후 실용화 과제 등을 통하여 본 연구팀이 제안한 시스템이 실제로 상용화 된다면 무인항공기 상업화를 도심 지역까지 확대할 수 있어 무인항공기 산업 활성화에 크게 기여할 것이다. 또한 향후 5G 통신과 무인항공기 위치 정보와 관련된 수많은 파생 서비스 산업이 발전할 수 있을 것이다.

### (5) 기타 성과

○ 본 과제를 통한 인력양성 성과로 박사학위자 2명을 배출하였다.

## IV. 활용계획 및 기대효과

### 1. 활용계획

○ 본 과제에서 연구한 Signals of Opportunity 기반 MLAT 측위 시스템은 기존의 LTE 기지국을 최대한 활용하고, 설치가 아주 간단한 DSRC 센서를 추가적으로 설치하여 도심 무인항공기 관제에 필요한 측위를 가능하게 한다. 특히, 추가로 설치할 DSRC 송수신기의 최적 배치를 위하여 최적화 알고리즘을 개발하였기 때문에 최소한의 추가적인 투자로 개발된 기술이 활용될 수 있다는 장점이 있다. 그리고 무인항공기 간의 V2V 거리측정 센서를 추가로 활용하여 측위 정확도를 더욱 향상시킬 수 있는 기법도 제시하였다. 이와 더불어, 무인항공기 충돌방지 안전거리 계산 알고리즘을 개발하였고, 이를 도심 3D 지도 내에서 가시화할 수 있는 시뮬레이터까지 개발하였기 때문에 실제 관제 시스템에 활용될 수 있다.

### 2. 기대효과

○ 도심 저고도 비행 무인항공기 관제는 현재 미국 NASA를 위주로 활발히 연구되고 있으며 미래 저고도 비행 무인항공기 관제의 국제표준으로 사용될 예정이다. 도심 저고도 환경은 위성항법신호가 불안정하여 UTM을 실현하기에 기술적인 난제가 가장 많은 지역으로 분류되고 있다. 본 과제를 통해 도심 저고도 비행 무인항공기 관제 핵심 원천기술을 연구하였으며 관련 지적재산권을 확보하였다. 이와 같은 기초 연구의 경제적 성과가 단기간에 가시화 되는 것은 아니지만, 향후 실용화 과제 등을 통하여 본 연구팀이 제안한 시스템이 실제로 상용화 된다면 무인항공기 상업화를 도심 지역까지 확대할 수 있어 무인항공기 산업 활성화에 크게 기여할 것이다. 또한 향후 차세대 통신과 무인항공기 위치 정보와 관련된 수많은 파생 서비스 산업이 발전할 수 있을 것이다.

### 3. 선진 기술수준과의 기술격차 해소

※ 구체적인 수치로 설명(예:년,%)

○ GPS 신호는 신호 세기가 미약하고 건물 외벽 등에 막혀서 신호가 수신기에 도달하지 않거나 신호가 반사되어 수신기에 부정확한 의사거리(pseudorange)를 제공할 수 있기 때문에 도심 지역에서는 평활 지역에서보다 위치 오차가 증가하게 된다. GPS 위성과 수신기 사이의 직선 경로를 통해 수신된 GPS 신호(line-of-sight, LOS)와 반사되어 들어온 신호(non-line-of-sight, NLOS)가 공존하는 환경을 multipath 환경이라 한다. 이러한 환경에서 발생하는 multipath 오차를 줄이기 위해서 저주파 multipath signal을 추출하거나, multipath 신호들의 신호 대 잡음비(SNR)를 비교하는 방식 등이 연구되었으나 각각 원하는 신호를 정확히 구별해 내기 어렵고 SNR 측

정 방식이 수신기마다 달라 상용화되기 어렵다는 단점이 있다. 한편, Multipath 환경과 다르게 LOS 신호가 수신되지 않고 NLOS 신호만 수신되는 환경을 NLOS 환경이라 하는데, 이 경우 가장 정확한 의사거리를 측정할 수 있는 신호가 수신된 신호 중에 없기 때문에 단순히 LOS 신호판별로는 정확한 위치를 찾을 수 없다. 이에 수신기 주변의 3D 지도와 비교해 가려지는 위성 신호와 반사되어 들어오는 위성 신호를 통해 수신기의 위치를 파악하는 shadow matching 방법이 연구된 바 있다. 그 외에도 초광대역(Ultra-Wide Band, UWB) 레이더 신호와 GPS 신호를 복합적으로 사용하여 위치 오차를 줄이려는 연구 등 GPS 수신에 어려운 지역에서의 항법 성능을 향상시키기 위한 여러 연구가 진행되어 왔다. 하지만 GPS 신호가 원활히 수신되지 않는 도심 지역에서의 측위는 기술적으로 어려운 문제여서 아직까지 특별한 해결책이 없는 상황이다. 본 연구과제에서는 도심 지역에서 Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반 MLAT 시스템을 개발하였으며, 이를 통해 8 m 미만의 측위 정확도를 달성할 수 있음을 보였다.

○ V2V 기반 무인항공기 간 거리 측정에 관한 연구의 경우, UWB 레이더를 이용하거나, Microwave Doppler 레이더를 이용하는 등 다양한 방법이 제시되었다. 특히 UWB 레이더의 경우, 장점이 많음에도 불구하고 최근에 와서야 소형화 및 경량화가 이루어져 소형 무인항공기 탑재가 가능해졌기 때문에 앞으로의 활용범위가 확대될 전망이다. 하지만 이와 같은 국외의 연구사례들은 무인항공기 간 상대 거리 측정을 통한 항공기 충돌 회피에 초점이 맞추어져 있으며, 아직 V2V 기반 측위 기술과 V2I 기반 측위 기술 간의 융합을 통한 복합측위 기술 개발에 관한 연구가 이루어진 사례가 없다. 본 연구팀이 제안하는 측위 신뢰도 정보와 도심 3D 모델을 바탕으로 한 무인항공기의 비행 안전거리 정보 생성 기술은 국내외에서 제안된 바가 없다. 본 연구팀이 제안한 안전거리 생성 알고리즘을 활용하면 각 무인항공기가 99.999% 이상의 확률로 존재할 수 있는 범위를 계산하여 충돌회피에 활용할 수 있다.

## 기술소개자료(SMK : Sales Material Kit)

# 도심 저고도 무인항공기 관제와 충돌방지를 위한 Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반 MLAT 시스템

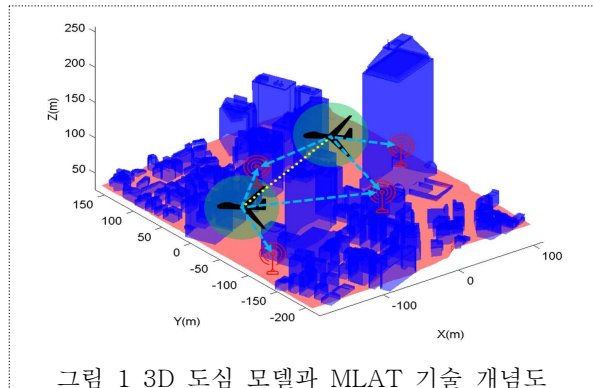
## I. 개요

### 1. 개발 배경 및 필요성

현재 무인항공기 시장의 발전 및 군사·민간 산업에서의 무인항공기 사용의 증가에 따라 무인항공기 관제 시스템(Unmanned Aircraft System Traffic Management, UTM)의 필요성이 대두되고 있다. UTM이 가능하려면 비행 중인 무인항공기의 위치를 파악하는 것은 필수적이다. 그러나 도심에서의 정밀측위는 아직 뚜렷한 해결책이 없는 기술적 난제이며 무인항공기의 상업적 운영의 가장 큰 장애물이다. 도심 무인항공기의 성공적인 관제를 위한 측위 방법은 위성항법시스템에 전적으로 의존하지 않으며, 도심 다중경로 전파에 강인하고, 저가의 경량 센서를 활용한 방법이 이상적이다. 본 연구팀이 개발한 Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반 MLAT 시스템은 안정적인 이동통신 신호와 저가의 센서를 활용한다는 점에서 이러한 조건을 충족시킨다.

### 2. 기술 개요

본 연구팀은 LTE, 5G와 같은 Signals of Opportunity를 이용한 측위 및 무인항공기 간 cooperative positioning을 이용하여 도심 저고도 지역에서의 관제 위치정확도를 높이는 방법을 제시하였다. 더불어 MLAT 측위 알고리즘과 실제 3D 도심지도를 연계하여 주어진 신뢰도 조건 하에서 안전거리를 계산하는 알고리즘을 개발하였다. 이를 통해 각 무인항공기가 해당 확률로 존재할 수 있는 범위를 계산하여 충돌회피에 활용할 수 있다.



## II. 기술의 특징점

### 1. 기존 기술 대비 차별성

본 연구팀이 제안하는 도심 저고도 무인항공기 관제를 위한 MLAT 시스템은 유인항공기 관제의 기본측위 원리와 유사하지만 LTE, 5G 등 Signals of Opportunity를 이용하는 방식에서 차별화되며 MLAT 위치 정보와 무인항공기 간의 거리측정을 정보를 융합한 정밀측위기법 개발은 기존 선행연구에서 시도되지 않은 독창적인 방식이다. 또한, 측위 신뢰도(Integrity)와 도심 3D 모델을 바탕으로 한 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘은 국내외에서 개발된 적이 없는 아주 창의적인 결과이다.

### 2. 기술 경쟁력

UTM은 현재 미국 NASA를 위주로 활발히 연구되고 있으며 미래 저고도 비행 무인항공기 관제의 국제표준으로 사용될 예정이다. 본 연구팀은 MLAT 측위 시스템과 안전거리 생성 알고리즘을 개발하여 도심 저고도 비행 무인항공기 관제 관련 경쟁력을 확보하였다.

### 3. 경제적 효과

본 기술을 통해 UTM의 관제 능력을 도심에 까지 확대하고 V2V/V2I 기반 MLAT 시스템으로 무인항공기 측위 정확도를 대폭 향상시켰다. 이는 무인항공기 산업 활성화뿐만 아니라 통신 산업과의 시너지 효과를 통해 무인항공기 위치 정보와 관련된 다양한 서비스 산업이 파생될 것으로 기대된다.

### III. 시장성

#### 1. 시장규모 및 성장성

미국의 경우 2021년까지 국립과학재단 무인기 분야 기초연구 지원 규모 400억 원 가량이다. 국내 민수용 드론 기술의 수준은 초기 단계에 머물러 가치평가가 어렵지만, 8대 핵심 부품은 선진국 대비 약 10~50%의 격차가 존재한다. 특히 서비스 분야는 물류·충돌방지 서비스 기술 연구개발 중으로 시장은 아직 활성화되지 않은 상황이다.

#### 2. 응용분야(수요처)

본 과제를 통해 UWB와 LTE, 5G 등 Signals of Opportunity를 이용한 MLAT 측위 시스템, 무인항공기 간의 V2V 상대 측위 등을 통하여 도심지역 무인기에 적합한 최적의 복합측위 기법을 제시하였다. 이는 도심지역 저고도 교통관리 체계를 구축하는데 요소기술로 이용될 수 있다.

### IV. 연구성과 정보

#### 1. 지재산 현황

| 발명의 명칭                                        | 출원번호            | 권리현황 |
|-----------------------------------------------|-----------------|------|
| 측위 신호 선택 장치 및 방법                              | 10-2019-0167059 | 출원   |
| LTE 신호에서 추정된 채널 진폭 정보를 활용한 인공 신경망 기반 거리 추정 방법 | 10-2019-0172101 | 출원   |
| 항공기의 온보드 포지셔닝 시스템 및 이를 이용한 항공기의 운항 제어 장치      | 10-2019-0090703 | 출원   |

#### 3. 기술준비도(TRL)

- ☒ 기술개념확립
- ☐ 연구실환경검증
- ☐ 시제품제작
- ☐ 실제환경검증
- ☐ 신뢰성평가
- ☐ 상용품 제작

#### 2. 시공실적 및 시제품 현황

해당사항 없음

#### 4. R&D 수행이력

|           |                                                                                           |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 사업명       | 국토교통기술촉진연구사업                                                                              |
| 과제명       | 도심 저고도 무인항공기 관제와 충돌방지 지원을 위한 Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반 Multilateration 시스템 기초연구 |
| 연구기간      | 2018.04.17. - 2019.12.31. (21개월)                                                          |
| 연구비 (백만원) | 370                                                                                       |

### V. 문의

#### 기술문의

- 연세대학교/글로벌융합공학부
- 서지원 (032-749-5833)
- jiwon.seo@yonsei.ac.kr

#### 총괄문의

- 국토교통과학기술진흥원 사업부서명
- 전화번호
- 이메일

## Article

# Analysis of DME/DME Navigation Performance and Ground Network Using Stretched-Front-Leg Pulse-Based DME

Euiho Kim

Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, 04066 Seoul, Korea; euihokim@hongik.ac.kr

Received: 16 August 2018; Accepted: 27 September 2018; Published: 29 September 2018



**Abstract:** Global navigation satellite systems (GNSS) have become a primary navigation means for aircraft. However, the signal power of GNSS is very weak, and its service can be disrupted at any time when there is interference or jamming. For this reason, the Federal Aviation Administration (FAA) in the United States has recently chosen a distance measuring equipment (DME)-based aircraft navigation technique, called DME/DME, as an alternative aircraft navigation means for use by around 2030. The reason that the FAA plans to use DME/DME in such a short duration, by around 2030, is presumed to be because the ranging accuracy of DMEs is between 70 to 300 m, which is about 7 to 30 times worse than that of GNSS. Thus, a significant loss of positioning performance is unavoidable with current DMEs. To make DME/DME a more competent alternative positioning source, this paper proposes an advanced DME that could provide a ranging accuracy of around 30 m by employing a recently developed Stretched-Front-Leg (SFOL) pulse. The paper introduces optimal ground station augmentation algorithms that help to efficiently transform the current DME ground network to enable a DME/DME positioning accuracy of up to 0.3 nm or 92.6 m with a minimal number of new ground DME sites. The positioning performance and augmented ground network using the proposed SFOL pulse-based DME are evaluated in two regions which have distinct terrain conditions.

**Keywords:** DME; GNSS jamming; APNT

## 1. Introduction

Global navigation satellite systems (GNSS) have been widely used for aircraft navigation, and their role will be more important in future air traffic control. For example, the USA Next Generation Air Transportation System (NextGen) and Single European Sky ATM Research (SESAR) in Europe heavily depend on GNSS to meet future air traffic demands. However, it is well known that the GNSS signal can be easily lost in the presence of interference and jamming because of its weak signal power. In fact, South Korea experienced Global Positioning System (GPS) outages in 2010 and 2012 due to the strong GPS jamming signal transmitted from North Korea [1]. These events caused serious safety issues for aircraft and ships using GPS as a primary navigation source.

In fact, GNSS outages due to interference or jamming were expected before the events in South Korea. The Federal Aviation and Administration (FAA) in the USA started an Alternative Position, Navigation, and Timing (APNT) program in 2010 to develop a GNSS back-up system for possible GNSS outages [2,3]. The envisioned APNT system by the FAA should have resilience such that it is difficult to interfere with. In addition, it must be able to continuously operate without being dependent on GNSS, and it should be able to serve various users such as commercial airliners, as well as general aviation. Another important APNT system requirement is that its service should be compatible with the legacy users, as well as future users such as unmanned aircraft systems.

**Funding:** This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (NRF-2017R1D1A1B03028146). This research was also supported by a grant (18CTAP-C143427-01) from the Technology Advancement Research Program, funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of the Korean government.

**Conflicts of Interest:** The author declares no conflict of interest.

## References

1. Faria, L.A.; Silvestere, C.A.M.; Correia, M.A.F. GPS-dependent systems: Vulnerabilities to electromagnetic attacks. *J. Aerosp. Technol. Manag.* **2016**, *8*, 423–430. [[CrossRef](#)]
2. Narins, M.; Eldredge, L.; Enge, P.; Harrison, M.; Kenagy, R.; Lo, S. Alternative position, navigation, and timing: The need for robust radionavigation. In *Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering*; Royal Institute of Navigation—NAV 10; The National Academies Press: Washington, DC, USA, 2012.
3. Lo, S.; Enge, P.; Niles, F.; Loh, R.; Eldredge, L. Preliminary assessment of alternative navigation means for civil aviation. In Proceedings of the 2010 ION ITM, San Diego, CA, USA, 25–27 January 2010.
4. Kelly, R.J.; Cusick, D.R. Distance measuring equipment and its evolving role in aviation. In *Advances in Electronics and Electron Physics*; Hawkes, P.W., Ed.; Academic Press, Inc.: Cambridge, MA, USA, 1986; Volume 68, pp. 73–75.
5. Lilley, R.; Robert, E. *DME/DME for Alternative Position, Navigation, and Timing (APNT)*; APNT White Paper; Federal Aviation Administration: Washington, DC, USA, 2012.
6. Pelgrum, W.; Li, K.; Smearcheck, M.; Van Graas, F. eDME architecture development and flight-test evaluation. In Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), Nashville, TN, USA, 17–21 September 2012; pp. 812–825.
7. Kim, E. Improving DME performance for APNT using alternative pulse and multipath mitigation. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **2017**, *53*, 877–887. [[CrossRef](#)]
8. Kim, E.; Seo, J. SFOL pulse, a high accuracy DME pulse for alternative aircraft position and navigation. *Sensors* **2017**, *17*, 2183. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
9. Kim, O.-J.; Kim, C.; Song, J.; Yun, H.; Kim, D.; Kee, C.; Lee, T. A new concept of APNT: MOSAIC/DME 3-D positioning with a single DME station. In Proceedings of the 2012 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Newport Beach, CA, USA, 1–30 January 2012; pp. 142–150.
10. Thiasiriphet, T.; Shutin, D.; Schnekenburger, N. Application of bayesian filtering for multipath in LDACS1-based APNT applications. In Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Tampa, FL, USA, 8–12 September 2014; pp. 3065–3075.
11. Helfrick, A. *Principles of Avionics*, 6th ed.; Avionics Communications Inc.: Leesburg, VA, USA, 2010; pp. 55–56.
12. FAA. *Performance-Based Navigation (PBN) National Airspace System (NAS) Navigation Strategy 2016*; U.S. Department of Transportation: Washington, DC, USA, July 2016.
13. FAA. *Performance Specification Distance Measuring Equipment (DME)*; FAA-E-2996; U.S. Department of Transportation: Washington, DC, USA, 2008; pp. 7–16.
14. RTCA Special Committee-149. *Minimum Operation Performance Standards (MOPS) for Airborne Distance Measuring Equipment (DME) Operating within the Radio Frequency Range of 960–1215 MHz*; RTCA DO-189; RTCA Inc.: Washington, DC, USA, 1985; p. 18.
15. Kim, E. Investigation of APNT optimized DME/DME network using current state-of-art DMEs: Ground station network, accuracy, and capacity. In Proceedings of the IEEE/ION PLANS 2012, Myrtle Beach, SC, USA, 24–26 April 2012.
16. Kim, E. A Coverage analysis methodology for APNT pseudolite ground network. In Proceedings of the 2011 ION GNSS, Portland, OR, USA, 20–23 September 2011.
17. Farahani, R.Z.; Hekmatfar, M. *Facility Location Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*; Physica-Verlag: Heidelberg, Germany, 2009; pp. 1–4.
18. Dasgupta, S.; Papadimitriou, C.; Vazirani, U. *Algorithms*, 1st ed.; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, 2006; pp. 247–278.

## Article

# Feasibility Analysis of LTE-Based UAS Navigation in Deep Urban Areas and DSRC Augmentation<sup>†</sup>

Euiho Kim<sup>1,\*</sup> and Yujin Shin<sup>2</sup><sup>1</sup> Mechanical and System Design Engineering Dept., Hongik University, Seoul 04066, Korea<sup>2</sup> Autonomous Vehicle & Intelligent Robotics Program., Hongik University, Seoul 04066, Korea; syj3558@naver.com

\* Correspondence: euihokim@hongik.ac.kr; Tel.: +82-2-320-1636

<sup>†</sup> This paper is an extension of conference paper in proceeding of the 2019 Integrated Communication, Navigation, and Surveillance Conference, Herndon, VI, USA, 9–11 April 2019.

Received: 28 July 2019; Accepted: 25 September 2019; Published: 27 September 2019



**Abstract:** The current autonomous navigation of unmanned aircraft systems (UAS) heavily depends on Global Navigation Satellite Systems (GNSS). However, in challenging environments, such as deep urban areas, GNSS signals can be easily interrupted, so that UAS may lose navigation capability at any instant. For urban positioning and navigation, Long Term Evolution (LTE) has been considered a promising signal of opportunity due to its dense network in urban areas, and there has recently been great advancement in LTE positioning technology. However, the current LTE positioning accuracy is found to be insufficient for safe UAS navigation in deep urban areas. This paper evaluates the positioning performance of the current network of LTE base stations in a selected deep urban area and investigates the effectiveness of LTE augmentations using dedicated short range communication (DSRC) transceivers through the optimization of the ground LTE/DSRC network and cooperative positioning among UAS. The analysis results based on simulation using an urban canyon model and signal line of sight propagations show that the addition of four or five DSRC transceivers to the existing LTE base station network could provide better than 4–6 m horizontal positioning accuracy (95%) in the selected urban canyon at a position of 150 ft above the ground, while a dense LTE network alone may result in a 15–20 m horizontal positioning error. Additionally, the simulation results of cooperative positioning with inter-UAS ranging measurements in the DSRC augmented LTE network were shown to provide horizontal positioning accuracy better than 1 m in most flight space, assuming negligible time-synchronization errors in inter-UAS ranging measurements.

**Keywords:** unmanned aircraft systems; Global Navigation Satellite Systems; LTE

## 1. Introduction

The signals of Global Satellite Navigation Systems (GNSS) are unreliable indoors and in urban areas, and the development of alternative positioning methods for these areas still remains a challenging problem while the demands on the positioning technologies in GNSS-denied environments escalate in various applications including public safety assurance in disastrous situations [1,2], smart parking systems [3,4], and operations of unmanned systems, to name a few. In a relatively small area such as a parking lot or a shopping mall, Radio Frequency Identification (RFID) and Ultra Wideband (UWB) sensors have been successfully deployed to track cars or humans [5,6]. For the problem of urban navigation, various kinds of vision-based techniques have also been introduced and most of them are based on optical-flows, feature extractions, and feature matching algorithms [7,8]. Recently, Long Term Evolution (LTE)-based positioning has been considered as one of the promising signals of opportunities (SOP) due to its extensive existing network in urban areas [9–13]. Therefore, the LTE positioning

atmospheric pressure change with altitudes in urban areas, and this assumption will be verified in future studies.

**Author Contributions:** Y.S. and E.K. both participated in developments of algorithms and simulations and wrote the paper.

**Funding:** This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (NRF-2017R1D1A1B03028146). This research was also supported by a grant (18CTAP-C143427-01) from the Technology Advancement Research Program, funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of the Korean government.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Baldini, G.; Karanasios, S.; Allen, D.; Vergari, F. Survey of Wireless Communication Technologies for Public Safety. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **2014**, *16*, 619–641. [[CrossRef](#)]
2. Tsiropoulou, E.; Koukas, K.; Papavassiliou, S. A socio-physical and mobility-aware coalition formation mechanism in public safety networks. *EAI Endorsed Trans. Future Internet* **2018**, *3*, e4. [[CrossRef](#)]
3. Tsiropoulou, E.E.; Baras, J.; Papavassiliou, S.; Sinha, S. RFID-based smart parking management system. *Cyber Phys. Syst.* **2017**, *3*, 22–41. [[CrossRef](#)]
4. Rahman, M.S.; Park, Y.; Kim, K.D. Relative location estimation of vehicles in parking management system. In Proceedings of the 2009 11th International Conference on Advanced Communication Technology, Phoenix Park, Korea, 15–18 February 2009; Volume 1.
5. De Angelis, A.; Nilsson, J.; Skog, I.; Carbone, P. Indoor positioning by ultrawide band radio aided inertial navigation. *Metrol. Meas. Syst.* **2010**, *17*, 447–460. [[CrossRef](#)]
6. Ingram, S.J.; Harmer, D.; Quinlan, M. Ultrawideband indoor positioning systems and their use in emergencies. In Proceedings of the PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No. 04CH37556), Monterey, CA, USA, 26–29 April 2004.
7. Hrabar, S.; Sukhatme, G.S.; Corke, P.; Usher, K.; Roberts, J. Combined optic-flow and stereo-based navigation of urban canyons for a UAV. In Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, AB, Canada, 2–6 August 2005.
8. Sasiadek, J.Z.; Walker, M.J.; Krzyzak, A. Feature matching for UAV navigation in urban environments. In Proceedings of the 2010 15th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzyzdroje, Poland, 23–26 August 2010; pp. 164–169.
9. Khalife, J.; Shamaei, K.; Kassas, Z. A software-defined receiver architecture for cellular CDMA-based navigation. In Proceedings of the IEEE/ION Position, Location, and Navigation Symposium, Savannah, GA, USA, 11–14 April 2016; pp. 816–826.
10. Hofer, M.; McEachen, J.; Tummala, M. Vulnerability analysis of LTE location services. In Proceedings of the 2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences, Waikoloa, HI, USA, 6–9 January 2014; pp. 5162–5166.
11. Knutti, F.; Sabathy, M.; Driusso, M.; Mathis, H.; Marshall, C. Positioning using LTE signals. Proceedings of the Navigation Conference in Europe, Bordeaux, France, 7–10 April 2015.
12. Driusso, M.; Babich, F.; Knutti, F.; Sabathy, M.; Marshall, C. Estimation and tracking of LTE signals time of arrival in a mobile multipath environment. In Proceedings of the 2015 9th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, Zagreb, Croatia, 7–9 September 2015; pp. 276–281.
13. del Peral-Rosado, J.A.; López-Salcedo, J.A.; Zanier, F.; Seco-Granados, G. Position Accuracy of Joint Time-Delay and Channel Estimators in LTE Networks. *IEEE Access* **2018**, *6*, 25185–25199. [[CrossRef](#)]
14. Mahyuddin, M.F.M.; Isa, A.A.M.; Zin, M.S.I.M.; Afifah Maheeran, A.H.; Manap, Z.; Ismail, M.K. Overview of Positioning Techniques for LTE Technology. *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng.* **2017**, *9*, 43–50.
15. Wang, C.; Wang, J.; Shen, Y.; Zhang, X. Autonomous Navigation of UAVs in Large-Scale Complex Environments: A Deep Reinforcement Learning Approach. *IEEE Trans. Veh. Technol.* **2019**, *68*, 2124–2136. [[CrossRef](#)]
16. Wang, X.; Wang, W. Nonlinear Signal-Correction Observer and Application to UAV Navigation. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2019**, *66*, 4600–4607. [[CrossRef](#)]

## LTE 신호의 CRS를 이용한 TOA 기반 거리 측정 방법

## TOA-Based Ranging Method using CRS in LTE Signals

강 태 원<sup>1,2</sup> · 이 하 림<sup>1,2</sup> · 서 지 원<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 글로벌융합공학부

<sup>2</sup>연세대학교 글로벌융합기술원

Taewon Kang<sup>1,2</sup> · Halim Lee<sup>1,2</sup> · Jiwon Seo<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon 21983, Korea

<sup>2</sup>Yonsei Institute of Convergence Technology, Yonsei University, Incheon 21983, Korea

### [요 약]

본 논문에서는 LTE 기지국 (BS; base station)과 단말기 (UE; user equipment) 간의 거리를 신호 도달 시간 (TOA; time-of-arrival)을 이용해 계산하는 알고리즘을 소개하였다. 먼저, 수신된 신호를 발신한 기지국을 판별하기 위해 primary synchronization signal (PSS)와 secondary synchronization signal (SSS)를 이용하여 셀 아이디를 취득하였다. 제시된 알고리즘에서는 상용 LTE 신호에 포함된 기준 시퀀스인 cell-specific reference signal (CRS)를 구축된 자원 그리드에서의 2차원 상호 상관을 통해 지연 시간을 계산하였다. 지연 시간의 변화는 신호 도달 시간의 변화로 계산되어 알려진 BS의 위치로부터 UE와의 거리를 계산하는 과정에 사용할 수 있다. 제시된 알고리즘의 성능은 실제 환경에서의 상용 LTE 신호를 이용한 거리 계산 실험에 사용되어 평가되었다.

### [Abstract]

In this paper, a new algorithm for the calculation of the range between an LTE base station (BS) and a user equipment (UE) using time-of-arrival (TOA) measurements of LTE signals is proposed. First, the cell identity (cell ID) of the received signal is acquired using the primary synchronization signal (PSS) and secondary synchronization signal (SSS) to identify the BS transmitted the signal. The proposed algorithm exploits the cell-specific reference signal (CRS), the reference sequence inserted in commercial LTE signals, to estimate the time delay using 2D cross-correlation. The obtained TOA estimations can be used to calculate the range employed from the known BS location. The performance of the proposed algorithm is evaluated with the experiment performed using real LTE signals transmitted from the commercial BS.

**Key word** : LTE, Signals of opportunity, Resilient PNT, Time-of-arrival (TOA), Ranging.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.5.437>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 25 September 2019; Revised 4 October 2019

Accepted (Publication) 24 October 2019 (30 October 2019)

\*Corresponding Author : Jiwon Seo

Tel: +82-32-749-5833

E-mail: [jiwon.seo@yonsei.ac.kr](mailto:jiwon.seo@yonsei.ac.kr)

에 따른 LTE 신호 기반 거리측정 오차와 거리 오차의 누적 확률 분포 함수를 그린 그래프이다. 지연 시간 계산은 1 프레임 (10 ms)마다 이루어졌으며 연속적인 5 프레임 (50 ms)마다 지연 시간 변화의 평균을 계산하여 거리로 환산하였다. 본 실험에서는 5 초 동안 수집한 LTE 신호 안에서 100 회의 연속적인 거리 계산이 이루어졌다. 표 2는 거리 계산 결과의 평균 제공근 오차와 표준편차, 최대 오차를 계산한 결과이다.

본 논문에서 보인 거리 오차 정확도인 약 20 m는 PRS의 측위 정확도인 약 50 m[28], TOA를 구하기 위해 채널 임펄스 응답을 이용한 결과인 약 43 m[29]보다 좋으며, 채널 추정이나 신호 추적 (tracking), 추가적인 SIB (signal information block) 디코딩[27]의 필요 없이 좋은 성능의 거리 계산이 가능함을 확인하였다.

## V. 결 론

본 논문에서는 실제 상용 LTE 신호로 거리 측정을 할 수 있는 알고리즘에 대해 소개하고 알고리즘을 이용해 실제 LTE 신호를 수신하여 거리를 계산하였다. 논문에서 연구된 알고리즘

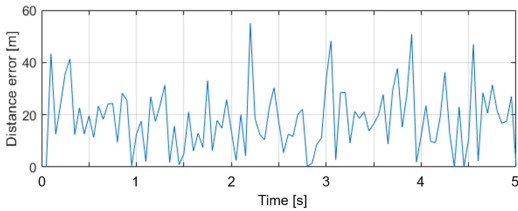


그림 7. 실험 시간 동안의 거리 오차  
Fig. 7. Distance error during the experiment.

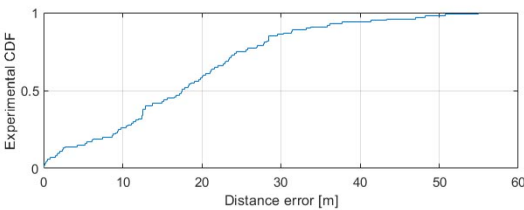


그림 8. 거리 오차의 누적 확률 분포 함수  
Fig. 8. Experimental CDF of the distance error.

표 2. BS와 UE 간 거리 계산 결과  
Table 2. Calculation result of the range between BS and UE.

|                        |           |
|------------------------|-----------|
| Root-mean-square-error | 20.05 (m) |
| Standard deviation     | 14.59 (m) |
| Maximum error          | 55.92 (m) |

은 LTE 신호 내의 자원 그리드를 구성하여 그 안의 CRS와 2차원 상호 상관을 통해 지연 시간 및 거리를 계산하였다. 제안된 알고리즘에는 복잡한 채널 추정과 필터링 과정이 포함되어 있지 않아 연속적인 거리 계산에 유리하다. 본 논문의 알고리즘을 사용한 실험에서 연속적인 거리측정 오차 약 20 m를 달성하였으며, PRS나 채널 추정 기법을 활용한 결과보다 높은 성능을 보임을 확인하였다.

## Acknowledgments

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18CTAP-C143427-01)에 의해 수행되었습니다.

## References

- [1] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Revised 2nd ed. Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2011.
- [2] M. Kim, J. Seo, and J. Lee, "A comprehensive method for GNSS data quality determination to improve ionospheric data analysis," *Sensors*, Vol. 14, No. 8, pp. 14971-14993, Aug. 2014.
- [3] J. Seo and T. Walter, "Future dual-frequency GPS navigation system for intelligent air transportation under strong ionospheric scintillation," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, No. 5, pp. 2224-2236, Apr. 2014.
- [4] J. Seo, T. Walter, T. Y. Chiou, J. Blanch, and P. Enge, "Evaluation of deep signal fading effects due to ionospheric scintillation on GPS aviation receivers," in *Proceedings of the ION GNSS 2008*, Savannah: GA, pp. 2397-2404, Sep. 2008.
- [5] T.-Y. Chiou, J. Seo, T. Walter, and P. Enge, "Performance of a Doppler-aided GPS navigation system for aviation applications under ionospheric scintillation," in *Proceedings of the ION GNSS 2008*, Savannah: GA, pp. 490-498, Sep. 2008.
- [6] T. Kos, I. Markezic, and J. Pokrajcic, "Effects of multipath reception on GPS positioning performance," in *Proceedings of the ELMAR-2010*, Zadar, Croatia, pp. 399-402, Sep. 2010.
- [7] K. Park, D. Lee, and J. Seo, "Dual-polarized GPS antenna array algorithm to adaptively mitigate a large number of interference signals," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 78, pp. 387-396, Jul. 2018.
- [8] E. Kim and J. Seo, "SFOL pulse: A high accuracy DME

## 도심 지역 LTE 측위 기반 무인항공기 안전거리 생성 알고리즘 연구 및 시각화 도구 개발

### Safety Distance Visualization Tool for LTE-Based UAV Positioning in Urban Areas

이 하 립<sup>1,2</sup> · 강 태 원<sup>1,2</sup> · 서 지 원<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 글로벌융합공학부

<sup>2</sup>연세대학교 글로벌융합기술원

Halim Lee<sup>1,2</sup> · Taewon Kang<sup>1,2</sup> · Jiwon Seo<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon 21983, Korea

<sup>2</sup>Yonsei Institute of Convergence Technology, Yonsei University, Incheon 21983, Korea

#### [요 약]

본 연구에서는 도심지역의 무인항공기 충돌 방지를 위한 관제 도구를 개발하였다. 개발된 도구에서 사용자는 실제 도심지역 3D 지도상에 기지국과 무인항공기를 배치한 뒤, 안전 거리를 가시화할 수 있다. 이 때, 무인항공기의 위치는 long-term evolution (LTE) 신호를 기반으로 계산된다고 가정하였다. 또한, 무인항공기의 안전 거리는 거리 측정 오차의 바이어스가 발생한 신호를 포함하도록 정의되었다. 이러한 안전거리 계산 방식은 다중 경로에 의해 바이어스 신호가 빈번히 발생하는 실제 도심환경의 특성을 반영한다. 개발된 도구 상에서 실측값을 바탕으로 파라미터를 설정하고 고장 신호 개수에 따른 안전거리의 변화를 시뮬레이션하였다. 그 결과 고장 신호의 개수가 증가함에 따라 안전거리가 증가하는 정상적인 결과가 출력됨을 확인하였다.

#### [Abstract]

We developed a surveillance tool for collision avoidance of unmanned aerial vehicles (UAVs) in urban areas. In our tool, users can visualize the safety distance on the actual 3D map of urban area. The estimated positions of UAVs are assumed to be obtained based on the long-term evolution (LTE) signals. The safety distance is defined to include two or more signals with bias. The safety distance calculation method used in this paper enables simulation similar to the actual urban areas where signals are frequently biased due to multipath. In the simulation, the parameters were set based on the measured values, and the change of the safety distance according to the number of faulty signals was simulated. As a result, increasing the number of faulty signals led to a longer safety distance as expected.

**Key word :** LTE, Positioning, Safety distance, Signals of opportunity (SOPs), UAV surveillance.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.5.408>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 13 August 2019; Revised 4 October 2019

Accepted (Publication) 28 October 2019 (30 October 2019)

\*Corresponding Author : Jiwon Seo

Tel: +82-32-749-5833

E-mail: [jiwon.seo@yonsei.ac.kr](mailto:jiwon.seo@yonsei.ac.kr)

전거리 가시화 도구를 개발하였다. 이때, 무인항공기의 위치는 LTE 신호와 기압고도계를 통해 결정된다고 가정하였다. 현실적인 시뮬레이션을 위해 실제 LTE 기지국의 위치가 반영된 강남역 인근의 3D 지도를 구현하였다. 또한, 본 연구에서는 실제 도심 지역에서 빈번히 발생하는 다중 경로에 의해 상당한 바이어스가 발생한 고장 신호를 고려하여 보호 수준을 계산하였다. 시뮬레이션 결과, 고장 신호 개수가 증가함에 따라 보호 수준 또한 증가함을 확인하였다.

## Acknowledgments

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18CTAP-C143427-01)에 의해 수행되었습니다.

## References

- [1] F. Kendoul, "Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems," *Journal of Field Robotics*, Vol. 29, No. 2, pp. 315-378, 2012.
- [2] A. Puri, "A survey of unmanned aerial vehicles (UAV) for traffic surveillance," *Department of Computer Science and Engineering, University of South Florida*, pp. 1-29, 2005.
- [3] P. Kopardekar, J. Rios, T. Prevot, M. Johnson, J. Jung, and J. E. Robinson, "Unmanned aircraft system traffic management (UTM) concept of operations," in *Proceedings of the 16th AIAA*, 2016.
- [4] A. Rucco, P. B. Sujit, A. P. Aguiar, J. B. De Sousa, and F. L. Pereira, "Optimal rendezvous trajectory for unmanned aerial-ground vehicles," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 54, No. 2, pp. 834-847, 2018.
- [5] J. Lee, Y. T. Morton, J. Lee, H.-S. Moon, and J. Seo, "Monitoring and mitigation of ionospheric anomalies for GNSS-based safety critical systems," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 34, No. 5, pp. 96-110, 2017.
- [6] H.-J. Seok, D.-H. Yoon, C.-S. Lim, and B.-W. Park, "Suggestion on the SBAS augmentation message providing system for the low-cost GPS receiver of drone operation," *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 21, pp. 272-278, 2017.
- [7] J. Seo, T. Walter, T.-Y. Chiou, J. Blanch, and P. Enge, "Evaluation of deep signal fading effects due to ionospheric scintillation on GPS aviation receivers," in *Proceedings of the ION GNSS 2008*, pp. 2397-2404, 2008.
- [8] J. Seo and T. Walter, "Future dual-frequency GPS navigation system for intelligent air transportation under strong ionospheric scintillation," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, No. 5, pp. 2224-2236, 2014.
- [9] K. Park, D. Lee, and J. Seo, "Dual-polarized GPS antenna array algorithm to adaptively mitigate a large number of interference signals," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 78, pp. 387-396, 2018.
- [10] M. Kim, J. Seo, and J. Lee, "A comprehensive method for GNSS data quality determination to improve ionospheric data analysis," *Sensors*, Vol. 14, No. 8, pp. 14971-14993, 2014.
- [11] P. Xie and M. G. Petovello, "Measuring GNSS multipath distributions in urban canyon environments," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64, No. 2, pp. 366-377, 2014.
- [12] J. H. Kim, J.-W. Kwon, and J. Seo, "Multi-UAV-based stereo vision system without GPS for ground obstacle mapping to assist path planning of UGV," *Electronics Letters*, Vol. 50, No. 20, pp. 1431-1432, 2014.
- [13] H. Qi and J. B. Moore, "Direct Kalman filtering approach for GPS/INS integration," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 38, No. 2, pp. 687-693, 2002.
- [14] J. S. Greenfeld, "Matching GPS observations to locations on a digital map," in *Proceedings of the 81th Annual Meeting of the TRB*, Vol. 1, No. 3, pp. 164-173, 2002.
- [15] Y. H. Shin, S. Lee, and J. Seo, "Autonomous safe landing-area determination for rotorcraft UAVs using multiple IR-UWB radars," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 69, pp. 617-624, 2017.
- [16] P.-W. Son, J. H. Rhee, and J. Seo, "Novel multichain-based Loran positioning algorithm for resilient navigation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 54, No. 2, pp. 666-679, 2018.
- [17] P.-W. Son, J. H. Rhee, J. Hwang, and J. Seo, "Universal kriging for Loran ASF map generation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 55, No. 4, pp. 1828-1842, 2018.
- [18] E. Kim, and J. Seo, "SFOL pulse: A high accuracy DME pulse for alternative aircraft position and navigation," *Sensors*, Vol. 17, No. 10, pp. 2183, 2017.
- [19] K. Shamaei, J. Khalife, and Z. M. Kassas, "Exploiting LTE signals for navigation: Theory to

관 인 생 략

# 출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자 2019.12.13

특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무)

출 원 번 호 10-2019-0167059 (접수번호 1-1-2019-1292500-25)

출 원 인 명 칭 연세대학교 산학협력단(2-2005-009509-9)

대 리 인 성 명 민영준(9-2001-000101-8)

발 명 자 성 명 서지원 강태원

발 명 의 명 칭 측위 신호 선택 장치 및 방법

## 특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.  
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.  
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.  
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드>  
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내  
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.  
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.

【심사청구】 청구

【공지예외적용대상증명서류의 내용】

【공개형태】 논문공개

【공개일자】 2019.10.17

【이 발명을 지원한 국가연구개발사업】

【과제고유번호】 18CTAP-C143427-01

【부처명】 국토교통부

【연구관리전문기관】 국토교통과학기술진흥원

【연구사업명】 국토교통기술연구개발

【연구과제명】 (주관)도심 저고도 무인항공기 관제와 충돌방지 지원을

위한 Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반

Multilateration 시스템 기초 연구(1/2)

【기여율】 1/1

【주관기관】 연세대학교 산학협력단

【연구기간】 2018.04.17 ~ 2018.12.31

위와 같이 특허청장에게 제출합니다.

대리인 민영준

(서명 또는 인)

【수수료】

【기본출원료】 0 면 46,000 원

【가산출원료】 26 면 0 원

【우선권주장료】 0 건 0 원

【심사청구료】 10 항 583,000 원

【합계】 629,000 원

【감면사유】 전담조직(50%감면)[1]

【감면후 수수료】 314,500 원

【첨부서류】 1.공지예외적용대상(신규성상실의예외, 출원시의특례)규정을  
적용받기 위한 증명서류\_1통

2.공지예외적용대상(신규성상실의예외, 출원시의특례)규정을

관 인 생 략

# 출원번호통지서

출원일자 2019.12.20  
특기사항 심사청구(무) 공개신청(무)  
출원번호 10-2019-0172101 (접수번호 1-1-2019-1322875-79)  
출원인명칭 연세대학교 산학협력단(2-2005-009509-9)  
대리인성명 민영준(9-2001-000101-8)  
발명자성명 서지원 이하림  
발명의명칭 LTE 신호에서 추정된 채널 진폭 정보를 이용한 인공 신경망 기반 거리 추정 방법

## 특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.  
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.  
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.  
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>-특허마당-PCT/마드리드  
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내  
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.  
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법

【주소】 경기도 구리시 경춘북로 252, 806동 2703호(갈매동,  
갈매역아이파크)

【출원언어】 국어

【이 발명을 지원한 국가연구개발사업】

【과제고유번호】 18CTAP-C143427-01

【부처명】 국토교통부

【연구관리전문기관】 국토교통과학기술진흥원

【연구사업명】 국토교통기술연구개발

【연구과제명】 (주관)도심 저고도 무인항공기 관제와 충돌방지 지원을  
위한 Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반  
Multilateration 시스템 기초 연구(2/2)

【기여율】 1/1

【주관기관】 연세대학교 산학협력단

【연구기간】 2019.01.01 ~ 2019.12.31

위와 같이 특허청장에게 제출합니다.

대리인 민영준 (서명 또는 인)

【수수료】

【기본출원료】 0 면 46,000 원

【가산출원료】 10 면 0 원

【우선권주장료】 0 건 0 원

【심사청구료】 0 항 0 원

【합계】 46,000 원

【감면사유】 전담조직(50%감면)[1]

【감면후 수수료】 23,000 원

## 출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자 2019.07.26  
특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(P190333)  
출 원 번 호 10-2019-0090703 (접수번호 1-1-2019-0768763-78)  
출 원 인 명 칭 홍익대학교 산학협력단(2-2006-051462-3)  
대 리 인 성 명 김정수(9-2008-000523-0)  
발 명 자 성 명 김의호  
발 명 의 명 칭 항공기의 온보드 포지셔닝 시스템 및 이를 이용한 항공기의  
운항 제어 장치

## 특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.  
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.  
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.  
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>-특허마당-PCT/마드리드  
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내  
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

**【이 발명을 지원한 국가연구개발사업】****【과제고유번호】** 18CTAP-C143427-01**【부처명】** 국토교통부**【연구관리 전문기관】** 국토교통과학기술진흥원**【연구사업명】** 국토교통기술촉진연구사업 창의도전연구분야**【연구과제명】** 도심 저고도 무인항공기 관제와 충돌방지 지원을 위한  
Signals of Opportunity 및 V2V/V2I 기반 Multilateration  
시스템 기초연구**【기여율】** 1/1**【주관기관】** 연세대학교 산학협력단**【연구기간】** 2018.04.01 ~ 2019.12.31**【취지】** 위와 같이 특허청장에게 제출합니다.

대리인 김정수

(서명 또는 인)

**【수수료】****【출원료】** 0 면 46,000 원**【가산출원료】** 19 면 0 원**【우선권주장료】** 0 건 0 원**【심사청구료】** 5 항 363,000 원**【합계】** 409,000 원**【감면사유】** 전담조직(50%감면)[1]**【감면후 수수료】** 204,500 원

# eNodeB Selection Algorithm for LTE-based Positioning

Taewon Kang and Jiwon Seo

School of Integrated Technology

Yonsei University

Incheon, Korea

taewon.kang@yonsei.ac.kr, jiwon.seo@yonsei.ac.kr

**Abstract**—Positioning using long-term evolution (LTE) signals has drawn attention as an alternative solution when Global Positioning System (GPS) signals are not available. When using LTE positioning while moving, an LTE signal receiver can experience signal fading. In this paper, we propose an algorithm that selects appropriate LTE downlink signals for positioning based on their reference signal received quality (RSRQ). We performed a simulation of LTE positioning using the proposed algorithm and calculated the position of a moving receiver. The simulation results obtained with and without using the algorithm are provided in the paper.

**Keywords**—signals of opportunity; long-term evolution (LTE); positioning; signal fading;

## I. INTRODUCTION

The global positioning system (GPS) [1]–[3] is and has been widely used throughout the world for positioning, navigation, and timing purposes, providing geolocation and time information to GPS receivers anywhere on or near the Earth. However, due to the low strength of GPS signals, they are vulnerable to interference, spoofing, and obstruction [4]–[7]. Anomalous ionospheric conditions can also degrade the performance of GPS [8]–[12]. To overcome the inherent weaknesses of GPS, signals and sensors that can assist positioning systems in GPS-denied environments have been utilized, including inertial measurement units (IMUs) and radars [13]–[16]. IMU sensors measure only changes in position, which means that they require good position solutions during initialization. In accordance with their operating principle, their measurement errors increase greatly over time, and thus they are only useful for assisting short GPS signal gaps. Radar devices can form an independent positioning system, but its accuracy is uncertain in urban areas due to the issues such as multipath and clutter [17].

Thus, methods that use signals of opportunity (SOPs) for position estimation have been proposed [18]–[22]. SOPs are radio frequency (RF) signals, such as Wi-Fi, cellular, and digital television transmissions, which are not originally for positioning purposes but can be used to track locations using appropriate techniques. By exploiting the properties of existing SOPs, they can be used to form their own positioning systems. Among the various existing SOPs, cellular SOPs have drawn a lot of attention owing to the fact that they are abundant in the air, have a high transmission power, and are easy to access. Recently, long-term evolution (LTE) became the fourth-generation (4G) standard for high-speed wireless communications in mobile

devices. LTE systems have high bandwidths and data rates, which are sufficient for forming a positioning system [20].

The main connection in LTE systems is a wireless connection between the user equipment (UE) and an evolved Node B (eNodeB or eNB). The UE is an LTE signal receiver, which receives downlink signals from multiple eNodeBs, also known as LTE base stations. To allow for the coherent demodulation of LTE signals, reference signals are inserted into the orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) time grid. Reference signals do not deliver any specific information, but because their structure and location in the time grid is known, we can calculate a signal's time of arrival (TOA) by correlating the received signal with the generated reference signal.

When the UE is moving, it can experience signal fading due to changes in the distance between itself and the eNodeB. For the successful positioning of the UE, the continuous selection of the appropriate signals for positioning must be carried out. We propose an algorithm that selects the appropriate signals based on their reference signal received quality (RSRQ), which will be described in Section II. We performed a simulation of a moving UE with and without the proposed algorithm, assuming an environment where signal fading occurs. The simulation results are presented in Section III. In Section IV, the conclusion of our paper is presented.

## II. METHOD

To estimate position based on multilateration, at least three ineffective signals are required. Our method selects certain LTE downlink signals out of all the received signals based on their RSRQ. RSRQ is the ratio of the received reference signal power to the received signal power. A multipath propagation causes intersymbol interference (ISI) in LTE signal [23], and RSRQ is more capable of identifying ISI than the reference signal received power (RSRP) [24]. Thus, we used RSRQ for selecting appropriate signals for positioning under multipath environment. The detailed procedure is described below:

- 1) The UE receives all downlink signals from eNodeBs. The received signals are then distinguished from each other by performing a multi-cell search.
- 2) The RSRQ of the received signals are measured. Signals are selected if they meet a minimum RSRQ threshold. Position estimation is possible when there are three or more selected signals.
- 3) The UE generates a reference signal and correlates it with each of the selected signals. The first peak of the correlation is considered as the TOA of the signal.

multipath with and without the signal selection algorithm). The result shows that our signal selection algorithm provides a similar accuracy with the no multipath case even in the multipath environment because the algorithm discards signals with high multipath.

TABLE I. AVERAGE POSITION ERROR COMPARISON UNDER DIFFERENT SITUATIONS

|                   | Without multipath | With multipath without the signal selection algorithm | With multipath with the signal selection algorithm |
|-------------------|-------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Average error [m] | 31.70             | 41.22                                                 | 32.37                                              |

This positioning accuracy would be degraded in the real signal propagation environment because eNodeBs are not at the same altitude in reality, which is assumed in our simulation, and uncertainty exists in the time synchronization between eNodeBs, which is not considered in the simulation.

#### IV. CONCLUSION

This paper presents an algorithm for selecting appropriate signals for LTE positioning. A method for selecting signals based on their RSRQ is proposed. This algorithm is useful in high-multipath environments in which UE can experience signal fading. We performed simulations of the proposed LTE positioning method in which the UE is moving through a path where various signals that exceed or lack in RSRQ can be received. We showed that performing an appropriate selection among received signals can contribute for improving positioning accuracy when the originally tracked signals fade and new appropriate signals are needed.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant (18CTAP-C143427-01) from the Technology Advancement Research Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government. This research was also supported by the Ministry of Science and the ICT (MSIT), Korea, under the "ICT Consilience Creative Program" (IITP-2018-2017-0-01015), supervised by the Institute for Information & Communications Technology Promotion (IITP).

#### REFERENCES

- [1] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press, Lincoln, MA, USA, 2011.
- [2] D. Yoon, C. Kee, J. Seo, and B. Park, "Position accuracy improvement by implementing the DGNSS-CP algorithm in smartphones," *Sensors*, vol. 16, art. no. 910, 2016.
- [3] J. Seo and T. Walter, "Future dual-frequency GPS navigation system for intelligent air transportation under strong ionospheric scintillation," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, pp. 2224-2236, 2014.
- [4] D. S. De Lorenzo, S. C. Lo, J. Seo, Y.-H. Chen, and P. K. Enge, "The WAAS/L5 signal for robust time transfer: Adaptive beamsteering antennas for satellite time synchronization," *Proceedings of the ION GNSS 2010*, pp. 2106-2116, Sep. 2010.

- [5] K. Park, D. Lee, and J. Seo, "Dual-polarized GPS antenna array algorithm to adaptively mitigate a large number of interference signals," *Aerospace Science and Technology*, vol. 78, pp. 387-396, Jul. 2018.
- [6] T. E. Humphreys, B. M. Ledvina, M. L. Psiaki, B. W. O'Hanlon, and P. M. Kintner Jr, "Assessing the spoofing threat: Development of a portable GPS civilian spoofer," *Proceedings of the ION GNSS 2008*, pp. 1198-1209, Sep. 2008.
- [7] P. D. Groves, "Shadow matching: A new GNSS positioning technique for urban canyons," *Journal of Navigation*, vol. 64, pp. 417-430, Jul. 2011.
- [8] A. Coster and A. Komjathy, "Space weather and the global positioning system," *Space Weather*, vol. 6, art. no. S06D04, 2008.
- [9] J. Seo, T. Walter, and P. Enge, "Availability impact on GPS aviation due to strong ionospheric scintillation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 47, pp. 1963-1973, 2011.
- [10] T.-Y. Chiou, J. Seo, T. Walter, and P. Enge, "Performance of a Doppler-aided GPS navigation system for aviation applications under ionospheric scintillation," *Proceedings of the ION GNSS 2008*, pp. 490-498, 2008.
- [11] Y. Jiao and Y. T. Morton, "Comparison of the effect of high-latitude and equatorial ionospheric scintillation on GPS signals during the maximum of solar cycle 24," *Radio Science*, vol. 50, pp. 886-903, 2015.
- [12] J. Lee, Y. T. Morton, J. Lee, H.-S. Moon, and J. Seo, "Monitoring and mitigation of ionospheric anomalies for GNSS-based safety critical systems," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 34, pp. 96-110, 2017.
- [13] F. Caron, E. Duflos, and P. Vanheeghe, "GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: introduction of contextual aspects," *Information fusion*, vol. 7, pp. 221-230, Jun. 2006.
- [14] P.-W. Son, J. H. Rhee, and J. Seo, "Novel multichain-based Loran positioning algorithm for resilient navigation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, pp. 666-679, Apr. 2018.
- [15] Y. H. Shin, S. Lee, and J. Seo, "Autonomous safe landing-area determination for rotorcraft UAVs using multiple IR-UWB radars," *Aerospace Science and Technology*, vol. 69, pp. 617-624, Oct. 2017.
- [16] E. Kim and J. Seo, "SFOL pulse: A high accuracy DME pulse for alternative aircraft position and navigation," *Sensors*, vol. 17, art. no. 2183, Oct. 2017.
- [17] D. Tahmouss, J. Silvius, and B. Bender, "Radar surveillance in urban environments," *Proceedings of the 2012 IEEE Radar Conference*, May 2012.
- [18] V. Moghtadaiee, S. Lim, and A. G. Dempster, "System-level considerations for signal-of-opportunity positioning," *Proceedings of the International Symposium on GPS/GNSS*, Oct. 2010.
- [19] A. R. Jimenez, F. Zampella, and F. Seco, "Light-matching: A new signal of opportunity for pedestrian indoor navigation," *Proceeding of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Oct. 2013.
- [20] K. Shamaei, J. Khalife, and Z. M. Kassas, "Exploiting LTE signals for navigation: Theory to implementation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, pp. 2173-2189, Jan. 2018.
- [21] Z. M. Kassas, J. Khalife, K. Shamaei, and J. Morales, "I hear, therefore I know where I am: Compensating for GNSS limitations with cellular signals," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 34, pp.111-124, Sep. 2017.
- [22] J. Khalife and Z. M. Kassas, "Precise UAV navigation with cellular carrier phase measurements," *Proceedings of the IEEE/ION PLANS 2018*, pp.978-989, Apr. 2018.
- [23] N. Monteiro, A. Mihovska, A. Rodrigues, N. Prasad, and R. Prasad, "Interference Analysis in a LTE-A HetNet Scenario: Coordination vs. uncoordination," *Proceedings of the Wireless VITAE 2013*, Jun. 2013.
- [24] D. Rosigkeit, S. V. Baumgartner, and A. Nottensteiner, "Usability of long term evolution (LTE) in DLR's research aircraft," *Proceedings of the German Microwave Conference*, Mar. 2015.

# Simulation of UWB Radar-based Positioning Performance for a UAV in an Urban Area

Halim Lee, Woohyun Kim, Jiwon Seo

Yonsei University, South Korea

halim.lee@yonsei.ac.kr, crimy00@yonsei.ac.kr, jiwon.seo@yonsei.ac.kr

## Abstract

*In an urban canyon environment, the positioning accuracy of global navigation satellite systems (GNSSs) decreases. In this paper, we consider an ultra-wideband (UWB) radar-based positioning method for unmanned aerial vehicles (UAVs) as a complement to GNSS in an urban canyon environment. The positioning accuracy of the UWB radar-based system is simulated based on the error statistics from actual range measurements. For a realistic simulation, we created a 3D map of an actual urban canyon environment in Seoul, deployed UWB radars on the map, and evaluated the positioning accuracy of a UAV at a single location.*

**Keywords:** UWB radar-based positioning, multilateration, UAV navigation, urban canyon

## 1. Introduction

Research interest in the autonomous flight of unmanned aerial vehicles (UAVs) has increased recently. Moreover, studies on navigation systems that are indispensable for autonomous UAV flight are being actively pursued [1-3].

Unlike the indoor environment, where positioning is accomplished using various infrastructure components such as Wi-Fi, radio frequency (RF) beacons, and ultra-wideband (UWB) radars, positioning using global navigation satellite systems (GNSSs) is most common in the outdoor environment. However, GNSS has a disadvantage in that the errors increase due to the influence of multipath and non-line-of-sight (NLOS) signals in urban canyons, where demand for autonomous UAV flight is high. In addition, GNSS is vulnerable to radio frequency interference [4-7] and ionospheric anomalies [8, 9].

Therefore, positioning technology that can complement GNSS in the urban environment has been proposed [10, 11], and UWB radar has the advantages of low energy consumption and low computational complexity [12, 13]. Further, similar to the urban canyon environment, UWB positioning has been shown to perform better than other methods in an

indoor environment where objects can create many signal interruption [14].

In this paper, we consider a multilateration (MLAT) method using UWB distance sensors for UAV positioning in an urban canyon. Its performance is analyzed by realistic simulation based on the error models of the UWB sensors [15] and a 3D map of a real urban area [16].

## 2. Positioning method

In this study, the UAV position was obtained through MLAT based on UWB radar distance measurements.

### A. Distance measurement error model

We used the standard deviation of distance measurement errors from the UWB radar at the outdoor medium distance range (10-90 m) environment for the simulation. The error model obtained in [15] is graphically shown in Fig. 1.

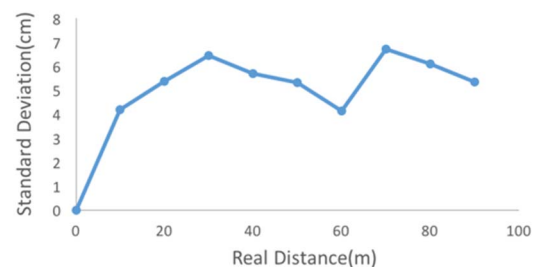


**Fig. 1: Standard deviation of distance measurement errors in an outdoor environment**

### B. RLS-based MLAT algorithm

For MLAT positioning, the recursive least squares (RLS) algorithm introduced in [17] was used. This algorithm has low complexity and can be useful for real-time positioning.

## 3. 3D model of urban areas

For a realistic performance simulation, we constructed a 3D urban map reflecting the actual terrain.

#### A. Building a 3D urban model

By the method proposed in [16], we constructed a 3D map for an urban area in Seoul, Korea using a 3D elevation model and 3D building data from VWorld's open API [18].

#### B. Placement of UWB radars

UWB radars were placed on the street-facing facade of six buildings around Teheran Street for the simulation. The UWB radars were placed on buildings 43, 44, 45, 63, 65, and 71, shown in Fig. 2. The 3D locations of the deployed UWB radars and of a UAV are shown in Fig. 3.

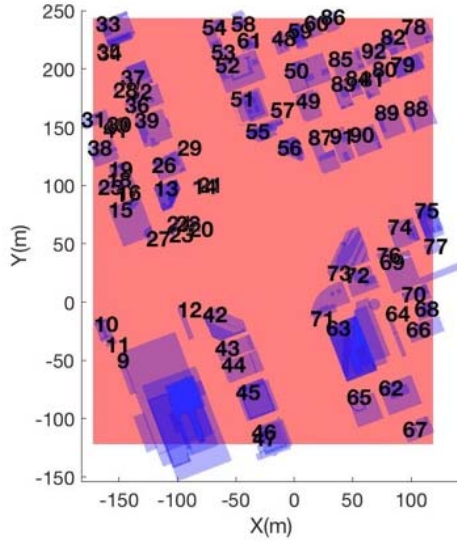


Fig. 2: Projected view

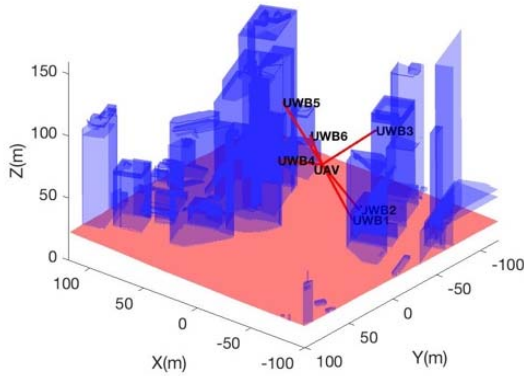


Fig. 3: Locations of a UAV and UWB radars

## 4. Simulation results

The MLAT algorithm in Section 2 was repeated 1000 times to obtain the position of the UAV in the simulation environment formed in Section 3. The positioning error is calculated for each axis as the difference between the calculated UAV location considering the error model of the UWB radars and the actual UAV location.

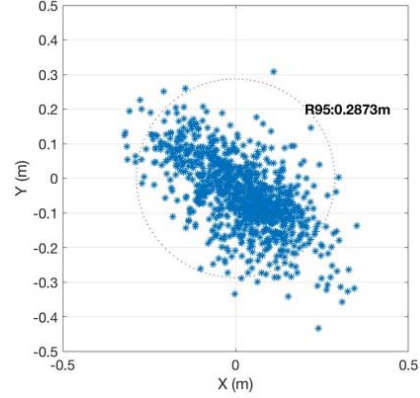


Fig. 4: 2D positioning error on xy-plane

The position estimation on the xy-plane is plotted in Fig. 4. The 2D positioning accuracy on the xy-plane was 0.2873 m (95%). Along the z-axis, the mean and standard deviation of the positioning error were 0.0090 m and 0.0995 m, respectively.

## 5. Conclusion

In order to complement GNSS in the urban canyon environment, we considered a UWB radar-based positioning method and simulated its performance based on the actual error model of the UWB radar and a 3D urban map. The UWB radar-based UAV positioning accuracy was approximately 0.29 m (2D, 95%) under the conditions of the simulation. Because this work is a preliminary result based on simulations, field tests using actual UWB radars and UAVs are planned as a future work.

## Acknowledgement

This research was supported by a grant (18CTAP-C143427-01) from Technology Advancement Research Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government. This research was also supported by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Korea, under the "ICT Consilience Creative Program" (IITP-2018-2017-0-01015) supervised by the Institute for Information & Communications Technology Promotion (IITP).

## References

- [1] A. Rucco, P. B. Sujit, A. P. Aguiar, J. B. D. De Sousa, and F. L. Pereira, "Optimal rendezvous trajectory for unmanned aerial-ground vehicles," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 2, pp. 834-847, 2018.
- [2] J. H. Kim, J.-W. Kwon, and J. Seo, "Multi-UAV-based stereo vision system without GPS for ground obstacle mapping to assist path planning of UGV," *Electronics Letters*, vol. 50, no. 20, pp. 1431-1432, 2014.

# PF-DOP Hybrid Path Planning for Safe and Efficient Navigation of Unmanned Vehicle Systems

Yujin Shin, Euiho Kim, *Hongik University*

## BIOGRAPHY (IES)

Yujin Shin is undergraduate student at Hongik University. She is majoring in Mechanical & System Design Engineering. She is interested in operation of unmanned vehicles.

Euiho Kim received the Bachelor's degree from the Department of Aerospace Engineering, Iowa State University, Ames, IA, USA, and the Ph.D. and Master's degree from the Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, Stanford, CA, USA.

He is currently an Assistant Professor in the Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, South Korea. Prior to this, he was a Research Associate in the Department of Aerospace Engineering, University of Kansas; and the Technical Lead of the ground-based augmentation system of GPS and FAA's alternative position, navigation, and timing programs. His current research interests include satellite-based navigation, aircraft navigation using ground nav-aids, indoor navigation, and robotics

## ABSTRACT

Potential Field is one of the widely used path planning methods in robotics. This method assumes that a robotic system knows its current position and where the goal is. The location of obstacles is also known in advance for global path planning, or it can be detected from sensing in local path planning. Although the potential field method provides a convenient and simple way of generating paths, most previous approaches do not incorporate uncertainty of a platform position while it is moving. Unlike satellite-based navigation systems, a user positioning accuracy may significantly change in a local area if a positioning system basis on Ultra Wideband (UWB) or LTE/5G is used. Because the positioning accuracy varies while a vehicle navigates, an unmanned vehicle or a robot following a given path may experience dithering movement. In addition, this problem may lead to unnecessary oscillation and increase the probability of collision which is a critical treat for a safe navigation. To overcome the drawbacks, this paper proposes the PF-DOP hybrid path planning algorithms, which is a variant of potential field that takes into account a user positioning accuracy. A user positioning accuracy (UPA) in an interested navigation area can be conveniently represented by Dilution of Precision (DOP) field. From the mixture of the potential and DOP fields, the proposed approach generates a hybrid directional flow that is able to guide an unmanned vehicle to the safer and more efficient paths. The hybrid directional flow is made by mixing the two fields with weighting factors which is also used in traditional potential field method as a coefficient. The weighting factors will vary depending on the user locations, but as the positioning accuracy can be derived from the user location, the user positioning accuracy is also associated. The paper will describe the systemic procedure in generating the PF-DOP hybrid path and how to avoid local minimum by using this algorithm.

## INTRODUCTION

There have been several studies on planning algorithm in robotics [1-4]. For motion planning, space is often narrowed down to Configuration Space (CS) to find a connected sequence of points. The ultimate goal of motion planning is to link points starting from the initial location to the goal in collision free spaces. Reference [1] classified motion planning environment into four class : stationary, time-varying, constrained, movable object. From the environment, the algorithm for motion planning is also divided into four categories : skeleton, cell decomposition, potential field, and mathematical programming. As

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (NRF-2017R1D1A1B03028146). This research was also supported by a grant (18CTAP-C143427-01) from the Technology Advancement Research Program, funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of the Korean government.

## REFERENCES

1. Yong K.Hwang. and Narendra Ahuja., "Gross motion planning-a survey", *ACM Computing Surveys (CSUR)*, Volume 24 Issue3, Sept. 1992, pp. 219-291
2. P. Raja. and Pugazhenthil., "Optimal path planning of mobile robots: A review", *International Journal of Physical Sciences*, Vol.7(9), February 2012, p.1314~1320
3. Kunchev V., Jain L., Ivancevic V., Finn A., "Path Planning and Obstacle Avoidance for Autonomous Mobile Robots: A Review.", *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. KES 2006. Lecture Notes in Computer Science*, vol 4252. Springer, Berlin, Heidelberg
4. C. Goerzen., Z. Kong., B. Mettler., "A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance", *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* Volume 57 Issue1-4, Jan 1 2010, pp. 65-100
5. Y. K. Hwang, N. Ahuja, "Potential field approach to path planning", *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 8, pp. 23-32, 1992.
6. S.S. Ge, Y.J. Cui, "Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method", *Autonomous Robots*, 2002, Volume 13, Number 3, pp 207-222
7. Rezaee, H.; Abdollahi, F., "Adaptive artificial potential field approach for obstacle avoidance of unmanned aircrafts," *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2012 IEEE/ASME International Conference* , vol., no., 11-14 July 2012, pp.1-6
8. Kaustubh Pathak and Sunil K. Agrawal, "An Integrated Path-Planning and Control Approach for Nonholonomic Unicycles Using Switched Local Potentials", *IEEE Transactions on robotics*, vol. 21, no. 6, DECEMBER 2005, pp.1201-1208
9. Nurbaiti Wahid, Hairi Zamzuri, Mohd Azizi Abdul Rahman, Satoshi Kuroda, Pongsathorn Raksincharoensa, "Study on Potential Field Based Motion Planning and Control for Automated Vehicle Collision Avoidance Systems", *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, Feb 2017
10. Y. Koren and J. Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation*, 1991, pp. 1398-1404
11. X. Yun and K. Tan, "A wall-following method for escaping local minima in potential field based motion planning," *8th International Conference on Advanced Robotics. Proceedings. ICAR'97. IEEE*, 1997, pp. 421-426
12. J. Lee, Y. Nam, and S. Hong, "Random force based algorithm for local minima escape of potential field method," in *11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV). IEEE*, 2010, pp. 827-832
13. M.H. Mabrouk, C.R. Mcinnes, "Solving the potential field local minimum problem using internal agent states", *Robot. Auton. Syst*, 56 (12) (2008) 1050-1060
14. Cetin, O., Zaglil.,Yilmaz, G., "Establishing obstacle and collision free communication relay for UAVs with Artificial Potential Fields", *Journal of Intelligent and robotics systems*, Volume 69, Issue 1~4, January 2013,pp.361-372
15. Yong-bo Chen, Guan-chen Luo, Yue-song Mei, Jian-qiao Yu & Xiao-long Su , "UAV path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory", *International Journal of Systems Science*, 47:6, 2016 ,pp. 1407-1420
16. Ulises Orozco-Rosas, Oscar Montiel, Roberto Sepúlveda, "Pseudo-Bacterial Potential Field Based Path Planner for Autonomous Mobile Robot Navigation", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Volume 12, issue 7.
17. Shuzhi Sam Ge and Yan Juan Cui., "New potential functions for mobile robot path planning.", *IEEE Transactions on robotics and automation*, 16(5), 2000, pp.615-620
18. Bekhti, M., Abdennebi, M., Achir, N., et al., "Path planning of unmanned aerial vehicles with terrestrial wireless network tracking", *Wireless Days (WD)*, 2016, pp.1-6.
19. Chao, H., Cao, Y. & Chen, Y. Int. J., "Autopilots for Small Unmanned Aerial Vehicles : A Survey", *International Journal of Control, Automation, and Systems* , 8(1), 2010 ,pp.36-44
20. Alarifi, Abdulrahman, Ed. Lyudmila Mihaylova, Byung-Gyu Kim, and Debi Prosad Dogra. , "Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances ." *Sensors (Basel, Switzerland)* 16.5 (2016): 707. PMC. Web. 30 June 2018.
21. B. Denis, J. Keignart, and N. Daniele, "Impact of NLOS propagation upon ranging precision in UWB systems," in *Proc. IEEE Conf. Ultra Wideband Syst. Technol.*, 2003, pp. 379-383.

## Analysis of the Maximum Correlation Peak Value and RSRQ in LTE Signals According to Frequency Bands and Sampling Frequencies

Taewon Kang<sup>1,2</sup>, Halim Lee<sup>1,2</sup>, and Jiwon Seo<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Integrated Technology, Yonsei University,  
Incheon, 21983, Korea (taewon.kang@yonsei.ac.kr, halim.lee@yonsei.ac.kr, jiwon.seo@yonsei.ac.kr)

<sup>2</sup> Yonsei Institute of Convergence Technology, Yonsei University,  
Incheon, 21983, Korea

\* Corresponding author

**Abstract:** Attempts to organize a new positioning system with signals of opportunity (SOPs) has drawn attention as a substitute for when the global navigation satellite system (GNSS) is unavailable. Among various kinds of SOPs, long-term evolution (LTE) is considered a suitable candidate for a positioning system owing to its high transmission power compared to GNSS signals, high bandwidth, and high data rates. To distinguish LTE signals from each other and to recognize the base transceiver station that transmits each LTE signal, also known as eNodeB, cell identity (cell ID) must be determined. To organize a high-reliability positioning system, the maximum correlation peak value of reference signals and reference signal received quality (RSRQ) can be considered the criteria by which to evaluate the reliability of a determined LTE cell ID. This paper shows the analyzed results of real LTE signals acquired in commercial frequency bands and sampled. The correlation peak value and RSRQ are measured and compared at different spectral and sampling frequencies.

**Keywords:** Long-term evolution (LTE), positioning, reference signal, RSRQ

### 1. INTRODUCTION

The global navigation satellite system (GNSS) [1-3] is considered the most popular positioning and navigation system today, owing to its accurate positioning and timing information, as well as its convenience. However, performance issues can occur with the GNSS when its signals become unavailable. The performance of GNSS can be degraded by anomalous ionospheric conditions [4-7], signal reflection/blockage [8, 9], and can also be affected by interference and obstruction owing to the low strength of GNSS signals [10-13].

Recently, signals of opportunity (SOPs) have drawn significant attention for use in organizing a new form of positioning system [14-17]. SOPs are radio frequency (RF) signals that are not originally provided for positioning purposes, including Wi-Fi, TV, radio, and mobile phone signals. SOPs have the advantages of transmission power and coverage compared to GNSS signals, thus they could be used as complementary positioning signals when GNSS signals are unavailable. Among various kinds of SOPs, long-term evolution (LTE) signals are considered one of the most suitable candidates use as positioning system signals owing to its high bandwidth and data rates [18, 19].

To utilize LTE signals for positioning purposes, special algorithms are needed to identify which base transceiver station, also known as eNodeB, transmitted the signal and the time of arrival (TOA) of the signal [20]. In an LTE system, signals from baseband data can be distinguished from each other by detecting a system-information parameter called cell identity (cell ID). Cell ID can be used to identify the eNodeB that transmitted the signal. Cell ID is determined from two kinds of reference signal sequences inserted in the time-frequency grid: the Primary Synchronization Sequence (PSS) and the Secondary Synchronization Sequence (SSS). The

detection of a correct cell ID directly leads to the reliability of an LTE-based positioning system [21-23]. To organize a high-reliability positioning system, an analysis of the correlation peak value of reference signals and reference signal received quality (RSRQ) must be provided, because these are considered useful criteria by which to evaluate the reliability of cell ID estimation [24-26].

This paper shows the results of analysis of real LTE signals acquired from available commercial frequency bands at two different sampling frequencies. We compared the correlation peak value of the reference signals and the RSRQ in each frequency band and for each sampling frequency. Section 2 provides an explanation of LTE frame structure and the method used for signal acquisition. Section 3 presents the experimental process and results. Conclusions are offered in Section 4.

### 2. LTE FRAME STRUCTURE AND CELL ID ACQUISITION

In this section, first, the structure of an LTE frame is discussed. Then, a method to acquire the LTE cell ID and parameters that are related to the cell ID estimation accuracy (i.e., maximum correlation peak values and RSRQ) are explained.

#### 2.1 LTE frame structure

In an LTE downlink transmission, by which an eNodeB transmits an LTE signal to user equipment (UE), data transmission is organized in the form of multiple radio frames. As shown in Fig. 1, each radio frame has a length of 10 ms; furthermore, each radio frame is divided into 10 subframes each of which has equal length (1 ms).

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant (18CTAP-C143427-01) from the Technology Advancement Research Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government. This research was also supported by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Korea, under the “ICT Consilience Creative Program” (IITP-2019-2017-0-01015) supervised by the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP).

## REFERENCES

- [1] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press, Lincoln, MA, USA, 2011.
- [2] D. Yoon, C. Kee, J. Seo, and B. Park, “Position accuracy improvement by implementing the DGNS-CP algorithm in smartphones,” *Sensors*, Vol. 16, Art. No. 910, 2016.
- [3] J. Seo and T. Walter, “Future dual-frequency GPS navigation system for intelligent air transportation under strong ionospheric scintillation,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, pp. 2224-2236, 2014.
- [4] A. Coster and A. Komjathy, “Space weather and the global positioning system,” *Space Weather*, Vol. 6, Art. No. S06D04, 2008.
- [5] J. Seo, T. Walter, and P. Enge, “Availability impact on GPS aviation due to strong ionospheric scintillation,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 47, pp. 1963-1973, 2011.
- [6] T.-Y. Chiou, J. Seo, T. Walter, and P. Enge, “Performance of a Doppler-aided GPS navigation system for aviation applications under ionospheric scintillation,” *Proc. of the ION GNSS 2008*, pp. 490-498, 2008.
- [7] Y. Jiao and Y. T. Morton, “Comparison of the effect of high-latitude and equatorial ionospheric scintillation on GPS signals during the maximum of solar cycle 24,” *Radio Science*, Vol. 50, pp. 886-903, 2015.
- [8] T. Kos, I. Markezic, and J. Pokrajacic, “Effects of multipath reception on GPS positioning performance,” *Proc. ELMAR-2010*, pp. 399-402, 2010.
- [9] C. Ma, G.-I. Lee, G. MacGougan, and G. Lachapelle, “GPS signal degradation modeling,” *Proc. of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, pp. 882-893, 2001.
- [10] D. S. De Lorenzo, S. C. Lo, J. Seo, Y.-H. Chen, and P. K. Enge, “The WAAS/L5 signal for robust time transfer: Adaptive beamsteering antennas for satellite time synchronization,” *Proc. of the ION GNSS 2010*, pp. 2106-2116, 2010.
- [11] K. Park, D. Lee, and J. Seo, “Dual-polarized GPS antenna array algorithm to adaptively mitigate a large number of interference signals,” *Aerospace Science and Technology*, Vol. 78, pp. 387-396, 2018.
- [12] T. E. Humphreys, B. M. Ledvina, M. L. Psiaki, B. W. O’Hanlon, and P. M. Kintner Jr, “Assessing the spoofing threat: Development of a portable GPS civilian spoofer,” *Proc. of the ION GNSS 2008*, pp. 1198-1209, 2008.
- [13] P. D. Groves, “Shadow matching: A new GNSS positioning technique for urban canyons,” *Journal of Navigation*, Vol. 64, pp. 417-430, 2011.
- [14] V. Moghtadaiee, S. Lim, and A. G. Dempster, “System-level considerations for signal-of-opportunity positioning,” *Proc. of the International Symposium on GPS/GNSS*, 2010.
- [15] A. R. Jimenez, F. Zampella, and F. Seco, “Light-matching: A new signal of opportunity for pedestrian indoor navigation,” *Proc. of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 2013.
- [16] K. Shamaei, J. Khalife, and Z. M. Kassas, “Exploiting LTE signals for navigation: Theory to implementation,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 17, pp. 2173-2189, 2018.
- [17] Z. M. Kassas, J. Khalife, K. Shamaei, and J. Morales, “I hear, therefore I know where I am: Compensating for GNSS limitations with cellular signals,” *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 34, pp. 111-124, 2017.
- [18] J. Khalife and Z. M. Kassas, “Precise UAV navigation with cellular carrier phase measurements,” *Proc. of the IEEE/ION PLANS 2018*, pp. 978-989, 2018.
- [19] K. Shamaei, J. Khalife, and Z. M. Kassas, “A joint TOA and DOA approach for positioning with LTE signals,” *Proc. of the IEEE/ION PLANS 2018*, pp. 81-91, 2018.
- [20] K. Shamaei, J. Khalife, and Z. M. Kassas, “Ranging precision analysis of LTE signals,” *Proc. of Eur. Signal Process. Conf. (EUSIPCO)*, pp. 2719-2723, 2017.
- [21] J. A. del Peral-Rosado, J. A. Lopez-Salcedo, and G. Seco-Granados, “Downlink synchronization of LTE base stations for opportunistic ToA positioning,” *2015 International Conference on Location and GNSS (ICL-GNSS)*, pp. 1-6, 2015.
- [22] J. I. Kim, J. S. Han, H. J. Roh, and H. J. Choi, “SSS detection method for initial cell search in 3GPP LTE FDD/TDD dual mode receiver,” *2009 9<sup>th</sup> International Symposium on Communications and Information Technology*, pp. 199-203, 2009.
- [23] T. Kang and J. Seo, “eNodeB Selection Algorithm for LTE-based Positioning,” *Proc. of the 16<sup>th</sup> IAIN World Congress*, IAIN, 2018.
- [24] N. Monteiro, A. Mihovska, A. Rodrigues, N. Prasad, and R. Prasad, “Interference Analysis in a LTE-A HetNet Scenario: Coordination vs. uncoordination,” *Proc. of the Wireless VITAE 2013*, 2013.
- [25] F. A. de Figueirido, F. A. C. M. Cardoso, R. M. Vilela, and K. G. Lenzi, “Multi-stage based cross-correlation peak detection for LTE random access

## Development of Confidence Bound Visualization Tool for LTE-Based UAV Surveillance in Urban Areas

Halim Lee<sup>1,2</sup>, Taewon Kang<sup>1,2</sup>, and Jiwon Seo<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Integrated Technology, Yonsei University,  
Incheon, 21983, Korea (halim.lee, taewon.kang, jiwon.seo@yonsei.ac.kr)

<sup>2</sup> Yonsei Institute of Convergence Technology, Yonsei University,  
Incheon, 21983, Korea

\* Corresponding author

**Abstract:** We have developed a tool to visualize a situation of estimating the positions of unmanned aerial vehicles (UAVs) using long-term evolution (LTE) signals in an urban area. In our visualization tool, true positions of UAVs and evolved Node Bs (eNodeBs), estimated positions of UAVs, and the calculated horizontal and vertical protection levels (HPLs and VPLs) are displayed in a 3D city map. For a realistic simulation, the 3D city map is generated using real buildings and terrain data of Gangnam, Seoul, Korea. Users can directly specify the locations of UAVs and eNodeBs to simulate these cases. Error variances are added to the true range between UAVs and eNodeBs in the developed tool. Next, the position and the HPL and VPL of each UAV are calculated and displayed on the map. Using the developed visualization tool, we observed changes in the estimated positions and confidence bounds of UAVs by adjusting the number of eNodeBs transmitting LTE signals. Simulation results show that the size of confidence bounds decreases as the number of eNodeBs increases.

**Keywords:** LTE, integrity, protection level, urban area, UAV

### 1. INTRODUCTION

Recently, as demand for unmanned aerial vehicles (UAVs) has increased in the private industries [1, 2], the need for unmanned aircraft system traffic management (UTM) has emerged [3]. UTM is a system that manages the flight paths and operations of small UAVs within 150 m of ground in low-altitude airspace [4]. In a UTM system, the development of a reliable navigation technology is actively studied to support safe and efficient operation of UAVs [5–8]. The navigation technology can be used in situations such as collision avoidance [9] and electronic toll collection (ETC) [10].

As an example of a navigation system, the global navigation satellite systems (GNSSs) such as the Global Positioning System (GPS) provide accurate position and timing information [11–17]. However, in some challenging areas, because of the weak signals of GNSS and environmental problems, it is necessary to develop other navigation systems that assist GNSS. Accordingly, alternative navigation technologies such as long-range navigation (Loran) were studied for maritime navigation [18, 19].

For use in urban areas, navigation system using cellular signals has advantages of high signal strength and geometric diversity [20]. Consequently, many studies using long-term evolution (LTE) downlink signals have begun to emerge [21–23]. In recent studies, the positioning accuracy using LTE signals was reported at the meter level [24, 25].

In this study, we developed a visualization tool to display the horizontal confidence bounds, also known as horizontal protection levels (HPLs), of LTE-based positioning solutions for the surveillance of UAVs in a realistic 3D city map to support the management of the traffic of UAVs in urban areas. Furthermore, we

displayed the vertical protection levels (VPLs) derived from the pseudorange error variances of both barometric altimeter [26] and LTE signals [23, 24]. In our tool, we created a map of an actual urban area, Gangnam, Seoul, Korea. Users can place the Evolved Node Bs (eNodeBs) and UAVs on the map and simulate the various deployments. As a result of the simulation, the true and estimated positions, HPLs, and VPLs of UAVs are visualized on the map. In this paper, we conducted a simulation while adjusting the number of eNodeBs.

This paper is organized as follows: Section 2 introduces the calculation method of the HPL and VPL. Section 3 describes the settings, such as map generation and placement of eNodeBs and UAVs, for simulation. Section 4 shows the simulation results achieved by changing the number of eNodeBs. Finally, in Section 5, we concluded the paper.

### 2. PL CALCULATION METHOD

The VPL and HPL are computed using methods described in [27, appendix J]. In addition, we utilized the method used in [26] for the addition of external altitude measurements from barometric altimeter. It is assumed that LTE signals are used to calculate the HPL, and both LTE signals and barometric altimeter are used to calculate the VPL.

In fault-free case, the HPL and VPL can be derived from two steps [28]: converting pseudorange domain variance to position domain variance, and scaling position variance as per the integrity requirement.

#### 2.1 Conversion to position domain variance

We assumed the pseudorange error from the  $i$ th eNodeB or barometric altimeter as zero mean, normal

to 8, respectively. Also, the mean values of VPLs are 47.50 m , 39.32 m , and 33.60 m with eNodeB numbers ranging from 1 to 4, 1 to 6, and 1 to 8, respectively. As expected, the simulation results show that the size of the HPL and VPL tends to decrease as the number of eNodeBs increases.

Table 3 HPLs of UAVs depending on the number of eNodeBs (unit: m)

|           |   | eNodeB Number |        |        |
|-----------|---|---------------|--------|--------|
|           |   | 1 to 4        | 1 to 6 | 1 to 8 |
| UAV Index | 1 | 43.48         | 35.90  | 27.61  |
|           | 2 | 13.64         | 11.92  | 10.25  |
|           | 3 | 26.43         | 25.35  | 25.15  |
|           | 4 | 18.96         | 14.68  | 12.36  |
|           | 5 | 12.47         | 11.31  | 9.10   |
| Mean      |   | 23.00         | 19.83  | 16.89  |

Table 4 VPLs of UAVs depending on the number of eNodeBs (unit: m)

|           |   | eNodeB Number |        |        |
|-----------|---|---------------|--------|--------|
|           |   | 1 to 4        | 1 to 6 | 1 to 8 |
| UAV Index | 1 | 48.45         | 29.28  | 25.58  |
|           | 2 | 46.81         | 38.24  | 30.75  |
|           | 3 | 47.78         | 45.69  | 43.99  |
|           | 4 | 49.07         | 40.88  | 32.86  |
|           | 5 | 45.37         | 42.49  | 34.81  |
| Mean      |   | 47.50         | 39.32  | 33.60  |

## 5. CONCLUSION

We have developed a visualization tool for LTE-based surveillance of UAVs in an urban area. User can select the number and position of UAVs and eNodeBs in the developed tool. We have calculated the estimated positions, HPLs, and VPLs of UAVs, and plotted them on an actual urban map. In addition, we have shown through simulation that the PL size tends to decrease as the number of eNodeBs increases as expected.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant (18CTAP-C143427-01) from the Technology Advancement Research Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government. Also, this research was supported by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Korea, under the "ICT Consilience Creative Program" (IITP-2019-2017-0-01015) supervised by the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation

(IITP).

## REFERENCES

- [1] F. Kendoul, "Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems," *Journal of Field Robotics*, Vol. 29, No. 2, pp. 315-378, 2012.
- [2] K. Nonami, F. Kendoul, S. Suzuki, W. Wang, and D. Nakazawa, "Autonomous flying robots: unmanned aerial vehicles and micro aerial vehicles," *Springer Science & Business Media*, 2010.
- [3] A. Puri, "A survey of unmanned aerial vehicles (UAV) for traffic surveillance," *Department of Computer Science and Engineering, University of South Florida*, pp. 1-29, 2005.
- [4] P. Kopardekar, J. Rios, T. Prevot, M. Johnson, J. Jung, and J. E. Robinson, "Unmanned aircraft system traffic management (UTM) concept of operations," *16<sup>th</sup> AIAA Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference*, 2016.
- [5] A. Rucco, P. B. Sujit, A. P. Aguiar, J. B. De Sousa, and F. L. Pereira, "Optimal rendezvous trajectory for unmanned aerial-ground vehicles," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 54, No. 2, pp. 834-847, 2018.
- [6] J. H. Kim, J.-W. Kwon, and J. Seo, "Multi-UAV-based stereo vision system without GPS for ground obstacle mapping to assist path planning of UGV," *Electronics Letters*, Vol. 50, No. 20, pp. 1431-1432, 2014.
- [7] Y. H. Shin, S. Lee, and J. Seo, "Autonomous safe landing-area determination for rotorcraft UAVs using multiple IR-UWB radars," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 69, pp. 617-624, 2017.
- [8] H. Lee, W. Kim, and J. Seo, "Simulation of UWB radar-based positioning performance for a UAV in an urban area," *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia)*, pp. 206-212, 2018.
- [9] Y. K. Kwag and C. H. Chung, "UAV based collision avoidance radar sensor," *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2007.
- [10] D. Salós, A. Martineau, C. Macabiau, B. Bonhoure, and D. Kubrak, "Receiver autonomous integrity monitoring of GNSS signals for electronic toll collection," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, No. 1, pp. 94-103, 2013.
- [11] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press, Lincoln, MA, USA, 2011.
- [12] J. Lee, Y. T. Morton, J. Lee, H.-S. Moon, and J. Seo, "Monitoring and mitigation of ionospheric anomalies for GNSS-based safety critical systems," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 34, No. 5, pp. 96-110, 2017.
- [13] D. Yoon, C. Kee, J. Seo, and B. Park, "Position accuracy improvement by implementing the DGNSS-CP algorithm in smartphones," *Sensors*,

# Smartphone Application to Estimate Distances from LTE Base Stations Based on Received Signal Strength Measurements

Seungjae Han, Taewon Kang, Jiwon Seo

Yonsei University, South Korea

jay0118@yonsei.ac.kr, taewon.kang@yonsei.ac.kr, jiwon.seo@yonsei.ac.kr

## Abstract

Positioning based on long-term evolution (LTE) signals has been introduced as an alternative positioning method when Global Positioning System (GPS) is unavailable. One option for positioning based on LTE signals is to utilize received signal strength (RSS) measurements. There is a relationship between the distance from user equipment (UE) to an LTE base station (BS) and the measured LTE RSS. In this paper, we analyzed the aforementioned relationship and developed an application that can measure LTE RSS and return the predicted distance from a UE to a BS in an Android smartphone environment.

**Keywords:** LTE, RSS, distance calculation, Android

## 1. Introduction

The use of Global Positioning System (GPS) [1] is widespread for positioning and navigation purposes. However, the low strength of GPS signals makes it vulnerable to radio frequency interference [2-4] and ionospheric scintillations [5-7]. Researchers have suggested signals of opportunity (SOPs) as an option to mitigate this weakness [8-10]. Similar to GPS, positioning by SOPs must measure the distance from the signal transmitter, which is known as the base station (BS), to the signal receiver, which is known as user equipment (UE). We can extract useful information related to the position of the UE from the received LTE signals, such as the received signal strength (RSS) [11, 12]. In this paper, we applied RSS-based distance measurement to a smartphone receiver and developed a corresponding Android application.

Recently, long-term evolution (LTE) signals have garnered attention owing to their high bandwidths and data rates, which are suitable for forming a positioning system [13]. When an LTE receiver receives LTE signals from several BSs, each LTE signal contains information about each signal, including mobile country code (MCC), mobile network code (MNC), location area code (LAC), and cell ID (CID). Among these, CID contains the most detailed information regarding the BS [14].

Considering the accessibility of information in a mobile environment, we utilize LTE RSS as a distance-related parameter. Our application calculates and displays the following information:

- 1) LTE signal information used by the smartphone (MCC, MNC, LAC, CID);
- 2) LTE signal information received, but not used, by the smartphone;
- 3) predicted distances from the UE to the BS, returned in real time and calculated by our method.

## 2. Method

### A. Real-Time LTE Data Collection Setup

For real-time LTE data collection, we developed an Android application. The information on the telephony services of the smartphone can be extracted using the public class 'TelephonyManager'. The MCC and MNC can be extracted using the 'getNetworkOperator()' method. It returns a string (MCC+MNC) of the current operator. Subsequently, we learn the CID and LAC by using the 'getCid()' and 'getLac()' methods, respectively.

By using the 'getAllCellInfo()' method, we collect all signal information received by the smartphone. This method returns a list of all observed signal information, including the main and neighboring signals. The application execution screen is shown in Figure 1.

| OpenCellLocation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | OpenCellLocation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Main Cell</b><br>MCC : 450<br>LAC : 24617<br>MNC : 06<br>CID : 51561992<br>Elapsed Real time Nanos : 748326513416383                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | [Info]<br>1th Cell : CellInfoLte:(mRegistered=YES<br>mTimeStampType=oeem_rll<br>mTimeStamp=141035152039580ns CellIdentityLte:(<br>mMcc=450 mMnc=6 mCid=51561992 mPci=175<br>mTac=24617 mEarfcn=2600) CellSignalStrengthLte:<br>ss=20 rsrp=-102 rsrq=-11 rsrq=-11 rsrq=-105<br>cqi=2147483647 ta=2147483647)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>All Cell(s)</b><br>Total : 13 Cell(s)<br>dBm = -102 MCC = 450 MNC = 6<br>TAC = 24617 CID = 51561992 Earfcn = 2600<br>Pci = 175<br>dBm = -105 MCC = 2147483647 MNC = 2147483647<br>TAC = 2147483647 CID = 2147483647 Earfcn = 2600<br>Pci = 448<br>dBm = -105 MCC = 2147483647 MNC = 2147483647<br>TAC = 2147483647 CID = 2147483647 Earfcn = 2600<br>Pci = 12<br>dBm = -107 MCC = 2147483647 MNC = 2147483647<br>TAC = 2147483647 CID = 2147483647 Earfcn = 2600<br>Pci = 221 | [Info]<br>2th Cell : CellInfoLte:(mRegistered=NO<br>mTimeStampType=oeem_rll<br>mTimeStamp=141035152039580ns CellIdentityLte:(<br>mMcc=2147483647 mMnc=2147483647<br>mCid=2147483647 mPci=448 mTac=2147483647<br>mEarfcn=2600) CellSignalStrengthLte: ss=16 rsrp=-105<br>rsrq=-15 rsrq=-2147483647 cqi=2147483647<br>ta=2147483647)<br>[Info]<br>3th Cell : CellInfoLte:(mRegistered=NO<br>mTimeStampType=oeem_rll<br>mTimeStamp=141035152039580ns CellIdentityLte:(<br>mMcc=2147483647 mMnc=2147483647<br>mCid=2147483647 mPci=12 mTac=2147483647<br>mEarfcn=2600) CellSignalStrengthLte: ss=17 rsrp=-105<br>rsrq=-15 rsrq=-2147483647 cqi=2147483647<br>ta=2147483647)<br>[Info]<br>4th Cell : CellInfoLte:(mRegistered=NO |

Figure 1. Application execution screen showing cell information.

## B. Experimental Setup

Figure 2 shows the location of the BS (green dot) and the movement path of the UE during the experiment. The UE used in our experiment is a Samsung Galaxy On7 (SM-G610), which supports 4G LTE-FDD signal reception.



**Figure 2. Location of the BS (green dot) and movement path of the UE (blue line).**

The LTE signal information, especially primary received RSS, was acquired by our real-time LTE data collection Android application. We monitored RSS for one minute at different distances and calculated the average value.

## 3. Results

Figure 3 shows the acquired RSS value in relation to the distance between the BS and the UE. In accordance with the data, we plotted a logarithmic trend line. The R-squared value of the trend line is 0.9372.

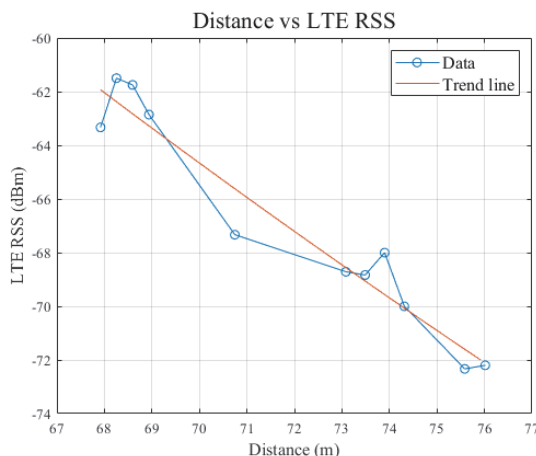


**Figure 3. (Blue line) Measured LTE RSS value from the distance between the BS and the UE. (Orange line) Trend line fitted to the data.**

We applied this relationship of the RSS and the distance value. Based on the experimental results, our application generated the estimated distance from the UE to the BS by measuring LTE RSS information in real

time. The application execution screen is shown in Figure 4. The position of the UE can be estimated by trilateration based on these distance estimates to the three BSs at known locations. A minimum of three distance estimates to three BSs is required to unambiguously determine the two-dimensional position of the UE.

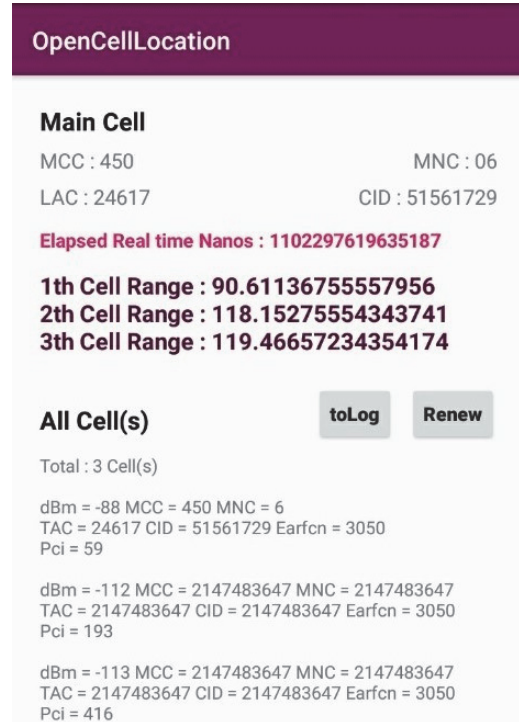


**Figure 4. Application execution screen showing the estimated distances from the UE to the three BSs.**

## 4. Conclusion

We performed distance calculation by using LTE RSS in a smartphone environment with an Android application. The application displayed all LTE signal information received by the smartphone. After conducting experiments, we acquired the relationship between the LTE RSS and the distance from a UE to a BS at a specific test site. Using this relationship, we developed the application to estimate the current distance from a UE to a BS in real time. Because the relationship between the LTE RSS and the distance is site specific, a similar experiment is necessary to utilize the developed application at a different site.

## Acknowledgement

This research was supported by a grant (18CTAP-C143427-01) from the Technology Advancement Research Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government. This research was also supported by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Korea, under the "ICT Consilience Creative Program" (IITP-2019-2017-0-01015) supervised by the Institute of Information &

# Primitive Path Generation for a UWB Network based Auto Landing System

Yujin Shin, Euiho Kim

Mechanical & System Design Engineering, Hongik University  
Seoul, South Korea

Email: syj3558@naver.com, euihokim@hongik.ac.kr

**Abstract**— In this paper, an overall systemic procedure of autonomous-landing system is provided, where positioning system basis on Ultra-wideband (UWB). Using the UWB positioning network, positioning precision can be characterized by the user (UAV)-to-ranging source (UWB anchor) geometry and often quantified as Dilution of Precision (DOP) value. To minimize the probability of collision with the ground or other UAVs during landing procedure, positioning accuracy should be considered. Therefore, we developed a path planning algorithm considering DOP value by modifying Artificial Potential field method. In addition, this paper will also provide a systematic procedure to land multiple UAVs with minimal collision probability while sharing a single UWB network.

**Keywords** – ultra-wideband (UWB); unmanned aerial vehicle (UAV); landing; path planning; artificial potential field (APF)

## I. INTRODUCTION

As the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) has become wider, it is also important to land an UAV safely after the UAV has successfully completed its mission. Therefore, research on landing UAV safely has been a recent interest. A Research on developing a landing system using ultrasonic sensor onboard which only enables collision avoidance in horizontal direction was done in [1]. A landing system utilizing multiple sensors such as the module of Ultra-wideband (UWB) radar, retro reflector, GPS receiver and autopilot module on board with ground control system including Pan/Tilt Unit (PTU), camera, UWB, laser pointer and controller for sensor fusion of data on ground was proposed in [2]. But the most challenging part in developing an autonomous-landing system for an UAV lies on the GPS-denied environment.

With the enhancement of image processing technology, most of the previous studies were focused on vision-based approach for an automatic landing system [3], [4]. However, such systems using the vision-based data are highly susceptible to the surrounding environment and are particularly vulnerable to weather conditions, e.g. cloudy day.

Thus, an automatic landing system which relies solely on UWB positioning network has been developed. In this paper, an overall systemic procedure of autonomous-landing system is presented including UWB anchor placement, a single UAV landing path planning algorithm with experimental result and a scenario for landing of multiple UAVs.

## II. GENERATION OF LANDING ROUTE OF AN UAV

As positioning system is based on UWB network, we have to construct a positioning network consisting of UWB anchors nearby the landing site. In previous research [5], a UWB positioning network was developed to assist the automatic landing of UAVs. The network consists of ten UWB anchors and provides positioning accuracy up to 10 cm in vertical direction around the touchdown point or landing flare.

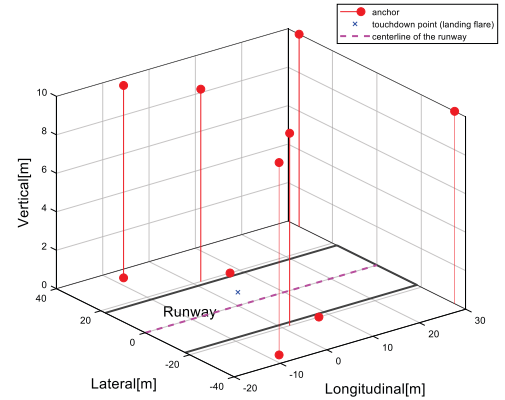


Figure 1. UWB positioning network to assist autonomous landing of UAV

### A. Landing route for an UAV

In order to generate a landing route for an UAV, two things must be considered. First, we have to minimize the probability of collision with the ground. Therefore, we computed the UPA at the estimated position ( $\delta\hat{\mathbf{x}}$ ) from the product of the DOP and the UWB range error, and then calculated the range where the true position in the vertical direction could exist at a probability of 99.999%. (1) To meet the probability of 99.999%  $\beta$  will be 4.42 from the Gaussian normal distribution. When the calculated range (VPR) and the ground meet or intersect, the next path point of the UAV route is generated in the upper direction.

$$VPR = \delta\hat{\mathbf{x}} \pm \beta\sigma_{URE}DOP_z = \delta\hat{\mathbf{x}} \pm \beta UPA_z \quad (1)$$

Second, the overall shape for a landing path for a fixed-wing UAV should be aligned with the centerline of the runway at first, and then taken to descend along the glideslope. Thus, a concave shaped TDOA-based lateral DOP field was added to the existing Artificial Potential field (APF) method. [6]

Landing route for an UAV will be generated in the descending direction of the slope in the hybrid artificial potential field. Then the hybrid field is the sum of attractive field of the APF, TDOA-based lateral DOP field and the repulsive potential field of APF if obstacles exist within the landing site.

### B. Experiment on an UAV Landing Route

Experiments were conducted on the landing path generation of an UAV using a flight test bed in a reduced scale with eight UWB anchors. A Crazyfly, which is a small size quadcopter with UWB based positioning system was used for the experiment. [7]



Figure 2. Experiment on a fixed-wing UAV landing route using a test bed for flight test. A Crazyfly (quadcopter) is located around the center of the circle.

- 1) take-off 2) align with the centerline of the runway
- 3) descend along the glideslope 4) landed on the ground (left to right)

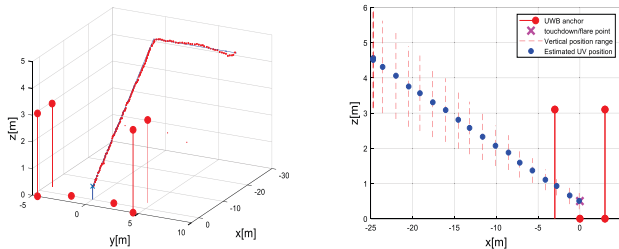


Figure 3. Logged data during the landing experiment. Generated landing route (blue line), estimated position (red dots) with eight UWB anchors are shown on the figure on the left side. Estimated position (blue dots) using the UWB network with its estimated true position range (red dotted-line) are shown on the right side of the figure. In this case, there was no overlap with the ground.

### III. SCENARIO FOR LANDING OF MULTIPLE UAVS

Suppose several drones attempt to land at the same time with a single UWB positioning configured network. The best approach is to land multiple UAVs at touchdown/flare point with a time difference, maintaining a sufficient altitude between each other. An adequate clearance gap can be ensured by checking each other's VPR. If a sufficient distance cannot be obtained in vertical direction, a horizontal protection range (HPR) must be checked using the DOP matrix in x, y direction. HPR is an ellipse computer from its horizontal positioning

error covariance (DOP) matrix with its major axis's direction corresponds to the eigenvector of larger eigenvalue. Among the two eigenvalues, the larger eigenvalue represents the size of semi-major axis and the smaller one represents the size of semi-minor axis.

If two elliptical HPRs are overlapped along with each VPR, there is a possibility of collision with specific probability. Consequently, in order to minimize the probability of collision in multiple UAVs landing procedure, VPR should be checked in advance. And if VPR overlaps, then HPR should be additionally checked. When an additional intersection points are identified from the two HPRs, a path pushing away each other from the center of the intersection points should be generated for both UAVs.

### IV. CONCLUSION

This paper provided an overall systemic procedure of autonomous-landing system for UAVs with UWB based positioning network. From the established UWB positioning network, a landing route is created using the modified artificial potential field method. Furthermore, a scenario for landing of multiple UAVs is presented using the covariance matrix of positioning error computed from the estimated UAV's position.

### ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (NRF-2017R1D1A1B03028146). This research was also supported by a grant (18CTAP-C143427-01) from the Technology Advancement Research Program, funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of the Korean government.

### REFERENCES

- [1] U. Papa and G. Del Core, "Design of sonar sensor model for safe landing of an UAV", *2015 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, Benevento, 2015, pp. 346-350.
- [2] KONG, Weiwei; ZHANG, Daibing; ZHANG, Jianwei. A ground-based multi-sensor system for autonomous landing of a fixed wing UAV. In: *Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015. p. 1303-1310.
- [3] JIAN, Zhou; XIN-MIN, Wang; XIAO-YAN, Wang. Automatic landing control of uav based on optical guidance. *Industrial Control and Electronics Engineering (ICICEE)*, 2012 International Conference on. IEEE, 2012. p. 152-155.
- [4] LANGE, Sven; SUNDERHAUF, Niko; PROTZEL, Peter. A vision based onboard approach for landing and position control of an autonomous multirotor UAV in GPS-denied environments, *Advanced Robotics*, 2009. ICAR 2009. International Conference on. IEEE, 2009. p. 1-6.
- [5] E. Kim and D. Choi, "A UWB positioning network enabling unmanned aircraft systems Autoland", *Aerospace science and Technology*, 58 (2016), pp.418-426.
- [6] Y. Shin and E. Kim, "PF-DOP Hybrid Path Planning for Safe and Efficient Navigation of Unmanned Vehicle Systems", *ION GNSS+ 2018 conference*, in press.
- [7] J. Kim, Y. Shin and E. Kim, "Development of a Testbed for UWB-based UAV Flight Test", *Korea Navigation Institute Conference 2018*, in press

# ANALYSIS OF THE SIGNALS OF OPPORTUNITY AND COOPERATIVE BASED POSITIONING FOR UAS NAVIGATION IN DEEP URBAN AREA

*Euiho Kim and Yujin Shin, Hongik University, Seoul, South Korea*

## Abstract

Autonomous navigation of most unmanned aircraft systems (UAS) is entirely dependent on GNSS. However, in deep urban area, the weak signal of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) can be easily lost, thus UAS has no other reliable means of navigation. For this reason, autonomous navigation or surveillance like Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) in deep urban area remains as a challenging problem. To tackle this problem, there have been great interests in positioning using signals of opportunity (SOP) including such as Long Term Evolution (LTE). More recently, a software defined radio for LTE positioning demonstrated a successful UAS flight test with a few LTE base stations.

Although there are usually plentiful LTE base stations in urban area, they are primarily deployed to provide coverage to mobile communication users such that the base station network layout is subject to be suboptimal for positioning. And, it is not certain that SOP based on LTE could provide an appropriate positioning performance to safely navigate in deep urban area. This paper investigates the positioning performance of the current network of LTE base stations and the required augmentation of the SOP network to meet desired positioning accuracy in deep urban area of Seoul, South Korea. The paper also considers DSRC as another possible SOP ranging source and looks into the benefit of cooperative positioning with nearby UAS.

## Introduction

It is well known that Global Satellite Navigation Systems (GNSS) signals are not reliable in indoors and urban area, and there has been active research on developing alternative positioning means to enable positioning service during GNSS outage. Among many possible alternatives, the Long Term Evolution (LTE) based positioning has recently been considered as a promising signals of opportunity (SOP) [1-5] due to a large number of LTE base stations and novel technologies that overcame the drawback of

positioning reference signal (PRS) by using cell-specific reference signal (CRS). The ranging accuracy with the CRS-based time of arrival extraction technique has shown to be around 10 meters.

The Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) considers LTE as a communication channel, which would justify the use of LTE as an alternative positioning means. In addition to LTE, researchers of UTM proposed to use a Dedicated Short Range Communication (DSRC) at 5.9 GHz for ground-to-air and/or air-to-air communications [6]. The DSRC has been used as a communication device in automobile industry, and there have been efforts in using DSRC as ranging sources for positioning as well [7,8]. The obtainable ranging accuracy using DSRC was claimed to be up to a couple of meters from several tens of meters depending on ranging methods and signal-to-noise ratio. The coverage of a DSRC transceiver is reported to be around 1000 m, which seems to be adequate coverage range in urban area [9].

Therefore, UAS in the future may be equipped with LTE and DSRC, and those can serve as a positioning sensor. Although LTE and/or DSRC-based positioning is possible, it is necessary to check if they are practical and reasonable solutions for UAS navigation and surveillance in deep urban area. For this analysis, the paper evaluates the positioning accuracy using the current deployment of LTE network and how much augmentation is needed to meet a certain positioning accuracy in virtual city modelling environment in Seoul, South Korea. For the augmentation of the LTE network, this paper will use DSRC transceivers because their ranging accuracy is higher than LTE with a lower cost. Additional DSRCs will be placed in optimal locations through our sensor network optimizer tools. In addition, the benefits of cooperative positioning based on a DSRC or Ultra Wideband (UWB) ranging between neighboring UAS will be investigated.

The paper will first review the state of the arts in LTE and DSRC positioning. Then, the virtual

Networks", Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing, Vol. 22, 2011, pp. 117-129

[8] U. Niesen, V. N. Ekambaram, J. Jose and X. Wu, "Intervehicle Range Estimation From Periodic Broadcasts," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 12, pp. 10637-10646, Dec. 2017.

[9] Bettisworth, Caitlin, et al. Status of the Dedicated Short-Range Communications Technology and Applications: report to Congress. No. FHWA-JPO-15-218. United States. Department of Transportation. Intelligent Transportation Systems Joint Program Office, 2015.

[10] Kapoor, Rohan, et al. "UAV Navigation using Signals of Opportunity in Urban Environments: A Review." Energy Procedia 110 (2017): 377-383.

[11] Peral-Rosado et al. "Software-Defined Radio LTE Positioning Receiver Towards Future Hybrid Localization Systems." 31st AIAA International Communications Satellite Systems Conference. 2013

[12] Shamaei, Kimia, et al. "Computationally Efficient Receiver Design for Mitigating Multipath for Positioning with LTE Signals." (2017).

[13] Sivers, Mstislav, and Grigoriy Fokin. "LTE Positioning Accuracy Performance Evaluation." Conference on Smart Spaces. Springer, Cham, 2015.

[14] Mautz, Rainer, et al. "3DWireless Network Localization from Inconsistent Distance Observations." Ad Hoc & Sensor Wireless Networks 3.2-3 (2007): 141-170.

[15] Euiho Kim, Analysis of DME/DME Navigation Performance and Ground Network Using Stretched-Front-Leg Pulse-Based DME, Sensors 2018, 18, 3275.

## Acknowledgements

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (NRF-2017R1D1A1B03028146). This research was also supported by a grant (18CTAP-C143427-01) from the Technology Advancement Research Program, funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of the Korean government.

*2019 Integrated Communications, Navigation,  
and Surveillance (ICNS) Conference  
April 9-11, 2019*

# Demonstration Of Local Path Planning Algorithm Supporting Autonomous Navigation of UAV In A Positioning Network

Yujin Shin<sup>1</sup>, Jae-Young Song<sup>2</sup>, Euiho Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Autonomous Vehicle & Intelligent Robotics Program, Hongik University, Seoul 04055, Korea,

<sup>2</sup> Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, Seoul 04055, Korea

\*Corresponding Author

E-mail: euihokim@hongik.ac.kr

## ABSTRACT

This paper demonstrates a local path planning algorithm that considers positioning accuracy to prevent a UAV from colliding with surrounding obstacles with a certain amount of probability. A path planning procedure for successful navigation of UAV in a positioning network is presented and autonomous indoor flight experiment have been conducted to verify the proposed path planning algorithm in a UWB positioning network.

Keywords: UWB positioning system, path planning, UAV

## 1. INTRODUCTION

Several studies on path planning algorithms supporting autonomous navigation of unmanned vehicles have been conducted (Hwang & Ahuja 1992). Adopting a local positioning network as a UAV positioning system, positioning uncertainty may significantly vary depending on the number of ranging sources in view and its geometry. As proper amount of controller inputs is computed from the position estimate, it is important to avoid the area with low positioning accuracy and to avoid obstacles securely with consideration on positioning accuracy. Thus, this paper proposes a path planning algorithm that considers positioning accuracy at the estimated UAV location to generate a safe and efficient local path to guide a UAV to the target point. Section 2 introduces UWB based localization system with its positioning accuracy analysis, and Section 3 explains proposed path planning algorithm with flight experiment results.

## 2. UWB BASED LOCALIZATION SYSTEM

### 2.1 UWB Positioning Network

Ad hoc positioning network, such as UWB positioning system, can be a good alternative to support autonomous navigation of UAV in GNSS-denied environments (Bensky 2016). Using UWB positioning network, range measurements are collected by received time of flight (TOF) record and multiplying it by the speed of light. Multiple range measurements received from anchors at the known position enable the user to estimate its position.

### 2.2 Positioning Uncertainty

Adopting ad hoc UWB network as a positioning system with time-of-arrival (TOA) approach, the positioning error can be modeled as Eq. (1) by linearization (Choi et al. 2016).

$$\delta\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{G}\delta\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (1)$$

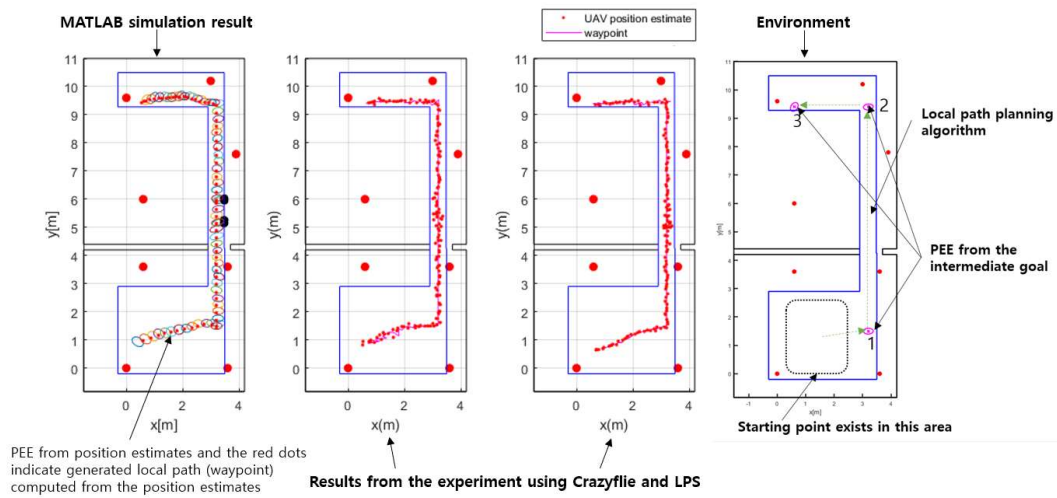


Fig. 1. Resultant path from the proposed algorithm (three figures on the left) and experiment environment (right-most figure). At the left-most figure which is the result from MATLAB simulation, black dots represent overlaps between PEE and surrounding environment. In this case repulsive force is activated to make UAV away from the collision risk.

#### 4. CONCLUSIONS

This paper demonstrates a local path planning algorithm which considers positioning accuracy to prevent an UAV from collision with certain amount of probability. Autonomous indoor flight experiments have been conducted to verify the proposed path planning algorithm using Crazyflie and its UWB based loco positioning system (LPS).

#### ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (NRF2017R1D1A1B03028146). This research was also supported by a grant (18CTAP-C143427-01) from the Technology Advancement Research Program, funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of the Korean government.

#### REFERENCES

- Bensky, A. 2016, Wireless positioning technologies and applications (Boston: Artech House)
- Choi, H. H., Jin, M. H., Lim, D. W., Lee, S. J., & Park, C. 2016, Dilution of Precision Relationship between Time Difference of Arrival and Time of Arrival Techniques with No Receiver Clock Bias, Journal of Electrical Engineering and Technology, 11, 746-750. <https://doi.org/10.5370/jeet.2016.11.3.746>
- Hwang, Y. K. & Ahuja, N. 1992. Gross motion planning—a survey, ACM Computing Surveys (CSUR), 24, 219-291. <https://doi.org/10.1145/136035.136037>

# Experimental Test of Heterogeneous Robot Swarming in a UWB Positioning System

Jae-Young Song, Myeong-Hak Lee, Euiho Kim<sup>\*</sup>

Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, Seoul 04055, Korea

\*E-mail: euihokim@hongik.ac.kr

## ABSTRACT

In environment where GPS signals cannot be continuously received during swarm flights, the range of operations for flights will be limited. This paper investigates methods of using a moving Ultra Wide Band (UWB) positioning network for heterogeneous robot swarming in GPS-denied area. For the demonstration of the proposed concept, two different type of UWB anchors will be installed in Unmanned Ground Vehicles (UGV) to create an ad-hoc moving UWB network and range UGVs distance, and several Unmanned Aerial Vehicles (UAV) will localize their position using the UWB network and fly following the given paths. In this circumstance, we also compare the errors of the different UWB frequency distractions.

Keywords: UWB, heterogeneous, swarming, frequency distractions

## 1. INTRODUCTION

Swarm robots operate multiple robots at the same time, performing tasks for the same purpose. This swarm robot's position-sensitivity method applies RTK-GPS technology, which calculates the relative distance and angle from time to time based on a fixed point (Moon et al. 2016). However, there is a limit to the fact that it is not possible to swarm in GPS-denied area. Conversely, there is a way to create an indoor geometrical network using a wireless communication technology called Ultra Wide Band (UWB)(Lee et al. 2007). In this study, it uses mobile robots to create a positioning network with different UWB communication technology to swarm heterogeneous robots and drones. We will compare the errors of the different UWB frequency distractions in the swarm heterogeneous process.

## 2. HARDWARE

### 2.1 Crazyflie2.0

The crazyflie2.0 provided by Bitcraze is a lightweight, 27g quadcopter model that flies using Python-based Open Source Code. It is a model developed for simple experiments using drones and provides the right tools for flying on Windows/Mac OSX/Linux computers. The built-in sensors include IMU (3 Axis Gyro, 3 Axis accelerator, 3 Axis magnetometer, high precision pressure sensor), which is equipped with basic sensors for flight, and are further designed for use with various expansion decks. In addition, two way ranging (TWR) and time difference of Arrival (TDoA) communication can be used by connecting a Crazyradio or Crazyradio PA to the computer and utilizing dwm1000 decks that operates at 3.2 ~ 7 GHz (Kolakowski & Djaja-Josko 2016).

### 2.2 Turtlebot3 Burger

For UGV, we used turtlebot3 burger provided by Robotis. As It moves on the basis of the ROS platform, which is the most commonly used in the world. High Extensibility is the strength of a turtlebot3. In order to control four objects with one core, the namespace was divided into four so that each object could be controlled independently.

We tried to show the values of total 6 Time Domain UWB range by activating four Crazyflie LPS anchor and four Time Domain UWB together, or by activating only four Time Domain UWB. Crazyflie & Time Domain UWB for standard deviations, tended to increase out due to disturbance. In addition, comparing this as a coefficient of variation shows that Crazyflie & Time Domain UWB are more unstable when used together.

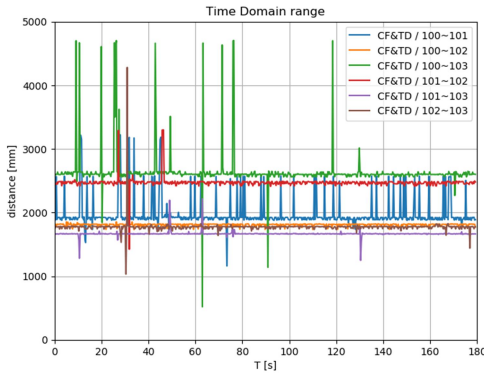


Fig. 3. Using Crazyflie & Time Domain UWB.

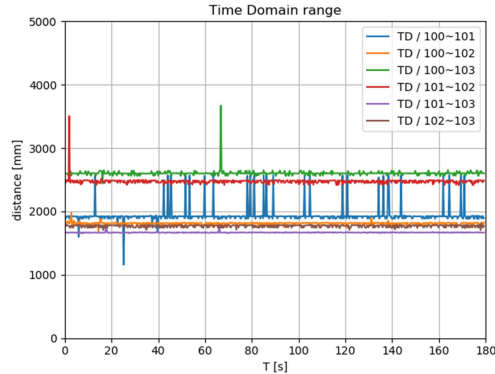


Fig. 4. Using Time Domain UWB.

Table 2. Standard deviation and average of Range between time domain UWB.

| Crazyflie & Time domain |          |          |          |          |          |          |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                         | 100~101  | 100~102  | 100~103  | 101~102  | 101~103  | 102~103  |
| standard deviation      | 251.0908 | 19.79081 | 316.7726 | 81.61133 | 41.17328 | 108.6479 |
| average                 | 1981.247 | 1808.909 | 2644.453 | 2473.265 | 1668.597 | 1774.696 |
| Time domain             |          |          |          |          |          |          |
|                         | 100~101  | 100~102  | 100~103  | 101~102  | 101~103  | 102~103  |
| standard deviation      | 141.7232 | 20.54047 | 47.65051 | 46.26346 | 6.387041 | 17.17901 |
| average                 | 1942.765 | 1810.036 | 2603.781 | 2474.369 | 1667.753 | 1771.109 |

## 5. CONCLUSIONS

In this paper, we create ad-hoc moving UWB network for heterogeneous robots swarming. Then we check and compare the measurement results for frequency disturbance between two different UBWs. Crazyflie & Time Domain UWB found that there is a tendency to increase outlier due to disturbance of frequency, but not significantly impact. Therefore we focus on an algorithm to eliminate or reduce outliers will be needed to create a network of measures.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (NRF2017R1D1A1B03028146). This research was also supported by a grant (18CTAP-C143427-01) from the Technology Advancement Research Program, funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of the Korean government.

## REFERENCES

- Kolakowski, M. & Djaja-Josko, V. 2016, TDOA-TWR based positioning algorithm for UWB localization system, In 2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON), pp.1-4, IEEE.

# LTE 기반 측위시 동시 수신 신호 수 한계 시뮬레이션

강 태 원<sup>1,2</sup> · 서 지 원<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 글로벌융합공학부

<sup>2</sup>연세대학교 글로벌융합기술원

## Simulation Study on the Limited Number of Received Signals for LTE-based Positioning

Taewon Kang<sup>1,2</sup> · Jiwon Seo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Integrated Technology, Yonsei University

<sup>2</sup>Yonsei Institute of Convergence Technology, Yonsei University

### Abstract

In this paper, we showed the limitation of LTE signal reception that the number of LTE signals that the LTE receiver can simultaneously use for positioning is limited. We performed a simulation of LTE signal reception with the condition that LTE receiver can receive several signals simultaneously. The simulation results that shows the limitation are provided.

### I. 서 론

위성 신호를 수신하여 위치를 측정하는 위성항법시스템(GPS)은 현재 세계적으로 가장 널리 쓰이는 측위 방법이다 [1]~[3]. 그러나 GPS에 쓰이는 위성 신호의 세기가 매우 낮기 때문에 GPS 신호는 간섭에 취약하고, 특히 도심 환경에서는 건물들에 신호가 가려거나 반사되어 multipath나 non-line-of-sight (NLOS) 효과가 크게 나타나게 되어 GPS의 정확도가 떨어지게 된다 [4]~[7].

이러한 GPS의 단점을 보완하기 위해 최근 signals of opportunity(SOPs)를 이용한 측위 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중이다 [8]~[12]. SOP란 원래 측위 용도의 RF 신호가 아니지만 적절한 절차를 취했을 때 측위 용도로 활용 가능한 신호들을 일컫는다. Wi-Fi, CDMA와 같은 다양한 SOP 중 long-term evolution (LTE) 신호는 광대역 신호이자 높은 비트 레이트를 지닌 신호이기에 자체적인 측위 시스템을 구성할 수 있는 요건을 갖추었다 [10].

LTE 시스템의 연결은 LTE 신호의 발신기 역할을 하는 evolved Node B(eNodeB)와 수신기 역할을 하는 user equipment(UE)의 조합으로 이루어진다. UE에 대한 측위가 이루어지려면 UE가 최소 세 개의 서로 다른 eNodeB에서 발신된 상이한 LTE 신호를 수신하여 신호의 자원 블록 내 자원 요소들

에 부여된 기준 신호(reference signal)를 찾아내야 한다. 그러나 LTE 수신기가 측위를 위해 동시에 처리할 수 있는 기준 신호 수는 제한적이다 [13]. 이를 확인하기 위해 본 논문에서는 MATLAB 시뮬레이션을 통해 여러 LTE 신호가 혼재하는 환경에서 UE가 동시에 수신할 수 있는 기준 신호 수에 한계가 있음을 보였다. 2절에서는 시뮬레이션에서 구현한 상황 및 환경에 대해 설명하였고, 3절에서는 시행된 시뮬레이션의 결과에 대해 설명하였다. 4절에서는 본 논문의 결론을 정리하였다.

### II. 시뮬레이션 환경

본 시뮬레이션은 2D 환경에서 eNodeB와 UE에 대한 두 가지 수신 환경을 가정하고 진행되었다. 첫 번째 상황은 그림 1과 같이 UE의 북·동·서 방향 500 m 지점에 eNodeB를 위치시키고 세 지점에서 LTE 신호를 발신하는 상황을 구현하였다. 신호 손실은

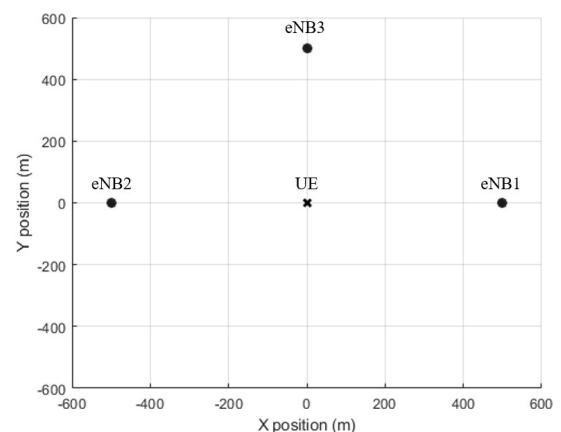


그림 255. 3개의 LTE 신호에 대한 수신 상황.

Rayleigh fading을 가정하였고 신호 정보는 cell ID를 제외하고는 모두 같다. UE는 발신된 세 개의 신호에 대해 수신하려 할 것이다.

두 번째 상황은 그림 2와 같이 그림 1에서 구현한 상황에 남쪽 500 m 지점에 eNodeB 하나를 추가하여 총 네 개의 LTE 신호를 발신하는 상황을 구현하였다. 신호 설정은 첫 번째 상황과 같다.

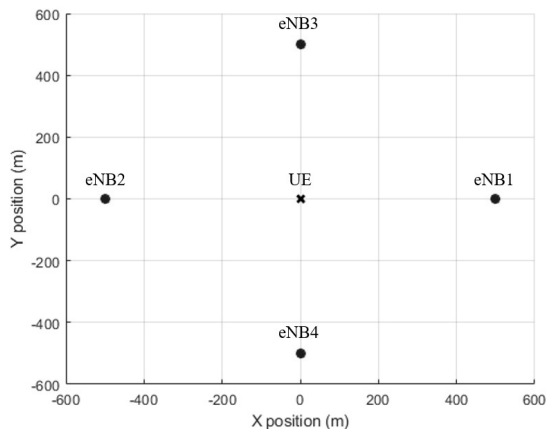


그림 256. 4개의 LTE 신호에 대한 수신 상황.

### III. 시뮬레이션 결과

UE가 수신할 수 있는 신호가 세 개일 때의 각 신호들에 대한 수신 환경을 알아보기 위해 기준 신호에 대한 correlation을 진행하였다. Correlation에 쓰인 기준 신호로는 secondary synchronization signal(SSS)를 사용하였다. 그림 3은 시간에 따른 SSS의 correlation level을 eNodeB 1에서 나온 신호에 대해 측정한 그래프이다. 빨간 선은 측정된 SSS로 신호의 cell ID를 알아낼 수 있는가에 대한 경계를 나타낸다. 세 신호 모두 그림 3과 비슷한 수준의 correlation level을 보이고, 세 신호에 대한 cell ID 모두 정상적으로 취득 가능했다.

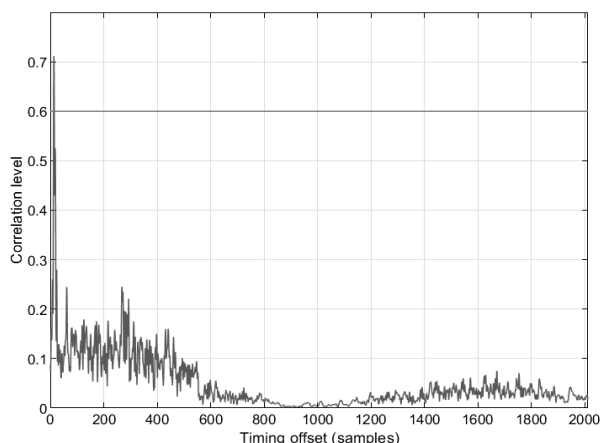


그림 257. 3개의 LTE 신호 수신 상황에서 eNodeB 1의 시간에 따른 SSS correlation level.

반면 한 개의 신호가 추가된 네 개의 신호 취득 상황에서는 상황이 달랐다. 앞서 원래 취득 가능했던 세 신호에 대해서는 그림 3에서 나타난 correlation level과 비슷한 정도로 수신 가능했지만, 추가된 eNodeB 4에서 나온 신호에 대해서는 그림 4와 같이 낮은 correlation peak를 보였다. 또한 eNodeB 4에서 나온 신호에 대해 cell ID를 취득하려 할 때 지정했던 cell ID와 다른 cell ID 값이 취득됨을 확인하였다.

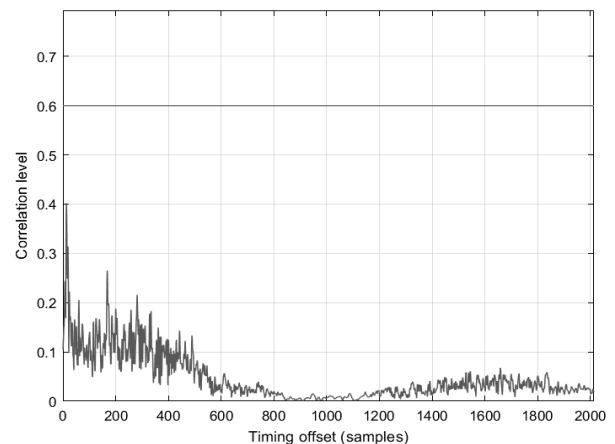


그림 258 4개의 LTE 신호 수신 상황에서 eNodeB 4의 시간에 따른 SSS correlation level.

### IV. 결 론

본 논문에서는 LTE 수신기가 측위를 위해 동시에 처리할 수 있는 기준 신호 수가 제한적임을 MATLAB 시뮬레이션을 통해 확인하였다. LTE 신호를 이용한 측위를 위해 SSS와 같은 기준 신호는 특정 개수 이상 동시에 처리할 수 없기 때문에 다른 기준 신호를 이용한 측위 방법이 여러 신호의 혼재 상황에서 유리할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(18CTAP-C143427-01)에 의해 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] P. Misra and P. Enge, Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance, Ganga-Jamuna Press, Lincoln, MA, USA, 2011.
- [2] D. Yoon, C. Kee, J. Seo, and B. Park, "Position accuracy improvement by implementing the DGNSS-CP algorithm in smartphones," Sensors, vol. 16, art. no. 910, 2016.

# LTE 기반 측위를 위한 대역폭 감지

이 하 림<sup>1,2</sup> · 강 태 원<sup>1,2</sup> · 서 지 원<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 글로벌융합공학부

<sup>2</sup>연세대학교 글로벌융합기술원

## Bandwidth Detection for LTE-based Positioning

Halim Lee<sup>1,2</sup> · Taewon Kang<sup>1,2</sup> · Jiwon Seo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Integrated Technology, Yonsei University

<sup>2</sup>Yonsei Institute of Convergence Technology, Yonsei University

### Abstract

In this paper, we propose downlink process in which a signal is transmitted from a base station, eNodeB, to a user equipment (UE). As a result of simulation, bandwidth information of long term evolution (LTE) signal is obtained. In addition, we obtained important parameters for positioning such as cell ID, bandwidth, and frame start time of LTE signal. Based on the simulation method in this paper, LTE-based positioning can be done in an actual urban environment.

치가 네트워크에 공개되고 추가 대역폭을 할당해야 하는 등의 단점 [12]이 있다. 따라서 본 논문에서는 주로 CRS 기반 측위 기술을 다룬다.

본 연구에서는 eNodeB에서 UE로 신호가 무선 전송되는 하향링크 (downlink) 과정을 시뮬레이션하였으며, 이를 통해 LTE 신호의 대역폭 정보를 획득하는 것을 목표로 하였다. 본 논문의 2절에서는 하향링크된 LTE 신호에서 채널을 추출하여 정보를 얻는 방법을 서술하며, 3절에서는 이에 따른 시뮬레이션 결과를 다룬다. 마지막으로 4절에서는 종합적인 결론을 제시하고자 한다.

### I. 서 론

최근 무인항공기의 수요가 증가함에 따라 다양한 환경에서의 무인항공기 관제 지원을 위한 측위 시스템에 관한 연구 또한 활발히 진행되고 있다 [1]–[3]. 이 중 도심 지역의 경우, 건물 외벽에 인한 multipath [4], none-line-of-sight (NLOS) [5]의 영향으로 Global Positioning System (GPS) [6]–[8]의 측위 오차가 증가한다는 환경적 특징을 가진다. 이에 따라 도심 지역에서 GPS의 한계를 극복하기 위해 shadow matching 방법 [9], 초광대역 (Ultra-Wide Band, UWB) 레이더 신호를 사용하는 방법 [10] 등의 기술이 제안되었다.

GPS의 보완재로서 특히 fourth generation (4G) LTE를 이용한 signals of opportunity (SoPs) 기반 측위 기술은 도심 환경에서의 실용화 가능성을 보였다 [11]. 또한, LTE 신호의 높은 데이터 전송률과 넓은 대역폭은 항법 시스템으로서의 장점을 갖는다.

현재까지 LTE 시스템을 이용한 측위 방식으로는 포지셔닝 참조 신호 (positioning reference signal, PRS) 기반 측위와 셀 특정 기준 신호 (cell-specific reference signal, CRS) 기반 측위가 제안되었다. 이 중 PRS 기반 측위의 경우 사용자의 위

### II. 시뮬레이션 방법

본 연구는 하향링크된 LTE 신호를 수신한 뒤, 셀 탐색 및 동기화 과정을 거쳐 대역폭 정보를 얻는 순서로 이루어진다. 또한, MATLAB에서 제공하는 오픈소스 [13]를 사용하였다.

#### 1. LTE 신호 수신

LTE 신호는 시간축과 주파수축을 가지는 2차원의 프레임으로 구성된다. 주파수 분할 이중통신(frequency division duplex, FDD)의 경우 한 프레임은 10 ms에 할당되며, 0.5 ms로 할당된 20 개의 슬롯으로 구성된다. 또한 서브프레임의 경우 두 개의 연속적인 슬롯으로 구성된다.

LTE 프레임에서 서브캐리어는 일반적으로 15 KHz의 폭을 가지며 총 개수는 시스템의 대역폭에 의해 결정된다.

본 연구에서는 MATLAB의 Instrument Control Toolbox에서 제공하는 LTE 신호를 사용하였다. 신호는 eNodeB에서 2개의 송신 안테나를 통해 전송되었으며, 단일 안테나로 수신되었다. 이 때 신호는 10 MHz까지의 대역폭을 모두 샘플링할 수 있도록 하기 위하여 15.36 Msamples/s로 수신하였다.

## 2. 셀 탐색

UE는 동기화 과정을 포함한 셀 탐색을 통해 LTE 시스템에 접근한다. 이 때 수신된 신호의 시간 축과 주파수 축을 동기화하기 위해서 각각 primary synchronization signal(PSS)과 secondary synchronization signal(SSS)을 사용한다.

본 연구에서 사용한 LTE 신호에서 PSS와 SSS는 가운데 72개의 서브캐리어에 위치한다. PSS의 경우 Zadoff-Chu 시퀀스로 cross-correlation으로 검출하였으며, SSS의 경우 검출에 앞서 주파수 오프셋을 보정하였다. 주파수 오프셋은 cyclic prefix의 correlation 평균을 이용해 추정할 수 있다. 검출된 PSS와 SSS 정보는 신호가 송신된 eNodeB의 cell ID를 추측할 때에도 사용하였다.

## 3. 대역폭 정보 획득

대역폭 정보는 master information block(MIB)을 통해 알아낼 수 있다. MIB는 LTE 하향링크 신호를 구성하는 채널 중 physical broadcast channel(PBCH)에 의해 전송된다. 채널을 추정하기 위해서 4개의 CRS가 있다고 가정함으로써 모든 안테나 포트에서 전송을 가능하게 하였으며, 수신된 신호의 첫 번째 subframe을 이용해 채널을 추측하였다.

## III. 시뮬레이션 결과

수신된 LTE 신호의 스펙트럼은 다음과 같다.

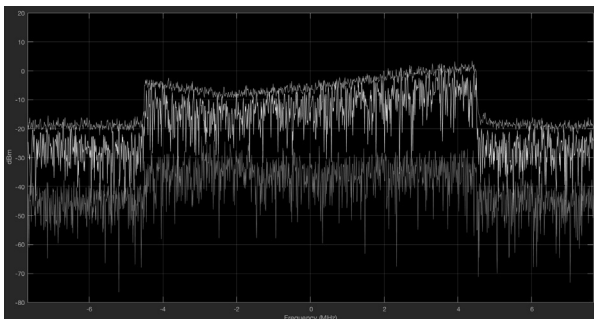


그림 269. 수신된 LTE 신호의 frequency에 따른 magnitude.

수신된 신호에서 PSS를 검출하기 위해 cross-correlation했을 때, 481번째 샘플에서 peak가 나타났다. 이를 통해 481번째 프레임이 시작 지점인 것을 알 수 있었다. 또한 PSS와 SSS 검출을 통해 cell ID가 17임을 알 수 있었다.

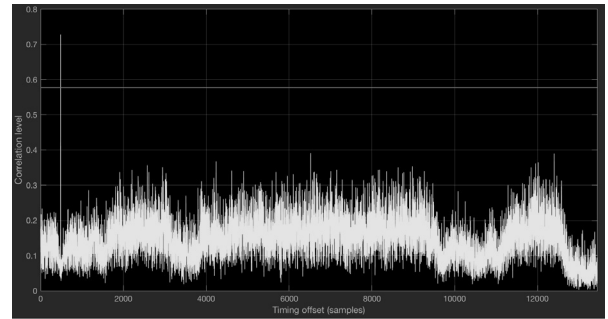


그림 270. LTE 신호 수신 상황에서 eNodeB의 시간에 따른 PSS correlation level.

이를 통해 LTE 신호를 동기화한 뒤 MIB에서 대역폭 정보를 얻은 결과 수신된 LTE 신호는 10 MHz임을 알 수 있었다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 MATLAB에서 제공하는 LTE 신호 데이터베이스를 기반으로 하향링크 과정을 시뮬레이션하였다. 그 결과 cell ID, 대역폭, LTE 신호의 프레임 시작 지점 등 측위에 중요한 파라미터를 획득할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(18CTAP-C143427-01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] Y. H. Shin, S. Lee, and J. Seo, "Autonomous safe landing-area determination for aircraft UAVs using multiple IR-UWB radars," *Aerospace Science and Technology*, 69, pp. 617-624, 2017.
- [2] J. H. Kim, J. -W. Kwon, J. Seo, "Multi-UAV-based stereo vision system without GPS for ground obstacle mapping to assist path planning of UGV," *Electronics Letters*, 50(20), pp. 1431-1432, 2014.
- [3] J. Khalife and Z. M. Kassas, "Precise UAV navigation with cellular carrier phase measurements," *Proceedings of the IEEE/ION PLANS 2018*, pp.978-989, Apr. 2018.
- [4] A. A. Saleh and R. Valenzuela, "A statistical model for indoor multipath propagation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 5(2), pp. 128-137, 1987.
- [5] P. D. Groves, Z. Jiang, L. Wang, and M. K. Ziebart, "Intelligent urban positioning using multi-constellation GNSS with 3D

# Ad hoc UAV 측위시스템을 이용한 지하 공간 탐사에 관한 기초연구

신 유 진 · 차 형 도 · 김 의 호

홍익대학교 기계시스템디자인공학과

## Preliminary analysis of subterranean space exploration using ad hoc UAV positioning network

Yu-Jin Shin · Hyeong-Do Cha · Eui-Ho Kim  
Mechanical & System Design Engineering, Hongik University

### Abstract

In this paper, a preliminary study of subterranean space exploration using ad hoc UAV positioning network is provided. UWB based positioning network is provided for subterranean space exploration and its positioning accuracy is shown by calculating the Dilution of Precision (DOP) value. Utilizing the UWB based positioning network, a drone mothership or drones with multi-laser sensors navigate the subterranean space. Multi-laser sensors' data with its reference position is sent to the master computer. Then, the combined data will be used to build a map of subterranean space. This research can further be used for mapping and monitoring the environment in GPS-denied environment including subterranean space.

### I. 서 론

동굴, 터널, 폐 광산과 같은 복잡한 지하 공간 탐사는 군사 및 민간 모두에게 아직 해결되지 못한 과제로 남아있다. 대부분 인간이 직접 들어가 지도를 작성하기 어렵고, 재난 상황이나, 구조 상황 시에는 상황이 급변하기 때문에 로봇이나 드론과 같은 무인시스템을 활용한 지하 공간 탐사의 필요성이 제시되었다. [1] 최근 국내에서는 도심에서의 지하 공간 활용도가 증가함에 따라, 지하철, 지하보도와 같은 지하공간을 건설하던 중 도로 하부에 공동이 확장되는 것을 방지하기 위한 사전 공동 탐지 연구가 진행되었다. [2],[3]. 앞으로 늘어날 도심지역의 지하 공간 혹은 폐 광산의 유지보수, 동굴, 터널의 탐사를 위해서는 주위 환경을 파악하기 위한 레이저센서, 초음파센서, 라이다 혹은 비전과 같은 센서를 가진 무인 시스템이 지하공간에 투입되어야 한다.

산악 지대, 해상지역에서 재난이나 재해가 발생하였을 때, 무인 시스템인 드론 여러 대와 라즈베리 파이2를 탐색시스템과 컨트롤 타워로 한 GPS를 사용한 조난자 탐색 시스템에 관한 연구

[4], 토목시공 현장에서 무인기의 GPS 비행 로그 정보를 사용한 측량에 관한 연구[5]가 진행되었으나, GPS 신호가 잡히지 않는 지하공간에서는 해당 시스템을 적용하기 어렵다는 한계가 존재한다. GPS 및 지자기 센서를 사용할 수 없는 밀폐구조물인 발전소의 보일러 튜브를 점검하기 위한 6축 정밀 거리센서를 탑재한 드론 기반 시스템 연구[6]가 진행되었으나, 지상제어기가 미리 보일러 내부를 실측하여 만든 3D 맵을 가지고 있어야 하므로 사전에 공간정보가 존재하지 않는 동굴이나 터널에서는 사용하기 어렵다.

이에 본 논문에서는 GPS신호를 사용할 수 없는 지하공간에서, UWB 네트워크 기반의 UAV 측위 시스템을 이용한 탐사에 대한 기초연구를 진행하였고, 해당 네트워크가 제공할 수 있는 위치 측정 정확도가 함께 분석되었다. 본 연구는 지하공간을 포함한 모든 GPS를 사용할 수 없는 환경에서의 지도 작성 및 주변 환경 모니터링에 활용될 수 있다.

### II. Ad hoc UWB 측위 시스템 구성

동굴, 터널, 도심 지하 공간(지하철, 지하주차장, 지하보도/차로, 지하상가, 상하수도관)과 같은 GPS- denied 환경에서 무인기를 운용하고, 여러 센서 데이터들을 취합하기 위해서는 기준 좌표계가 필요하다. 지하 공간 탐사를 위해 UWB 기반의 기준좌표계와 측위 시스템은 다음과 같이 구성된다.

#### 1. UWB 좌표계 구축

UWB 앵커 네트워크를 이용하여 위치 측위를 하기 위해서는, 드론과 같이 측위 하고자 하는 대상 (Tag)을 제외한, 정확한 위치를 알고 있는 고정된 UWB 앵커 3~4개를 최소로 필요로 한다. 해당 기준 앵커의 위치를 사용하여, 앵커와 태그간의 거리를 이용하여 태그의 위치는 계산되게 된다. 이에 따라, 지하 공간 탐색에 앞서 입구 부분에 앵커를 가장 간단한 형태인 정사각형 모

## 2. Ad hoc UAV 측위시스템 기반 탐사 시나리오

먼저, 터널, 도심 지하 공간, 동굴과 같은 지하공간의 입구에 4개의 기준 앵커를 배치한다. 기준 앵커로부터의 range 값을 사용하여 탐사 및 지도 작성을 위한 레이저나 비전, 라이더와 같은 별도의 센서를 탑재한 드론 mothership 혹은 여러 대의 드론이 주변 환경과의 충돌을 회피하며, 지하 공간 안으로 진입한다. 이때, 원하는 수준의 UPA에 도달할 때까지 지하 공간에 Ad hoc UAV가 추가된다. Ad hoc UAV 측위 시스템이 구성된 이후, 해당 Ad hoc 측위시스템 기반의 드론 위치정보와 주변 환경 정보가 지도 작성을 위한 데이터를 수집하는 서버 (map-server)로 전송되고, 해당 서버 혹은 서버를 지닌 컴퓨터에서 지하공간의 지도가 작성된다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 GPS신호를 사용할 수 없는 지하공간에서, UWB 네트워크 기반의 UAV 측위 시스템을 이용한 탐사를 위한 기초 연구가 제시되었다. Ad hoc UAV를 사용한 UWB 네트워크 구성과, 해당 UWB 네트워크가 제공할 수 있는 위치 측정 정확도가 함께 분석되었다. Ad hoc UAV 측위 시스템이 구성되면, 해당 측위 시스템을 사용한 위치 정보와 드론이 지닌 센서로부터의 주변 환경 데이터가 하나의 서버로 전송되고, 지도가 작성되게 된다. 본 연구는 지하공간을 포함한 모든 GPS를 사용할 수 없는 환경에서의 지도 작성 및 주변 환경 모니터링에 여러 방향으로 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(18CTAP-C143427-01)에 의해 수행되었습니다. 또한 이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2017R1D1A1B03028146)

## 참고 문헌

- [1] "DARPA Subterranean (SubT) Challenge"  
<https://www.darpa.mil/program/darpa-subterranean-challenge>
- [2] 류기정, 한유식, 기정석. "지하공동 탐사를 위한 GPR 장비의 기술수준 고찰." 대한토목학회 학술대회, (2015.10): 39-40.
- [3] 현승엽. "매설관 주변 지하 공동 탐지를 위한 지하 탐사 레이더의 모의실험." 한국전자과학회논문지 27.2 (2016):

131-137.

- [4] 이승진, et al. "집단 드론을 활용한 네트워크 기반 조난자 탐색 시스템." 한국통신학회 학술대회논문집 (2016): 432-433.
- [5] 남선민, et al. "토목시공현장 드론기반 공간정보 활용." 한국지형공간정보학회 학술대회 (2018): 135-136.
- [6] 이영진, et al. "드론을 적용한 발전소 보일러 튜브 점검 및 감시 시스템개발." 대한전기학회 학술대회 논문집 (2018): 1271-1272.
- [7] Gholami, Mohammad Reza, Erik G. Ström, and Mats Rydström. "Indoor sensor node positioning using UWB range measurements." Signal Processing Conference, 2009 17th European. IEEE, 2009.

# Crazyflie를 이용한 UWB 기반 무인항공기 비행 실험 테스트베드 구축

김 중 호 · 신 유 진 · 김 의 호

홍익대학교 기계시스템디자인공학과

## Development of a Testbed for UWB-based UAV Flight Test using Crazyflie

Jong-Ho Kim · Yu-Jin Shin · Eui-Ho Kim

Mechanical & System Design Engineering, Hongik University

### Abstract

In this paper, a testbed for UWB-based UAV flight test is developed. Established testbed is based on Crazyflie, a small size quadcopter, manufactured by Bitcraze.

### I. 서 론

무인항공기 (드론)는 본래 군사적 목적으로 개발되었지만, 관련 부품 생산 기술, 센서 소형화 기술의 발달로 최근 들어 여러 산업과 연구 분야에 널리 사용되고 있다. [1] 재난상황 시 구조, 다목적 영상 촬영 및 정찰, 배달 용 드론 등 다양한 수요가 사회와 산업에 존재함에 따라 해당 수요를 충족하기 위한 다양한 센서와 장비들이 드론에 장착되게 된다.[2],[3] 드론의 활용도를 더욱 넓히기 위해서는 드론의 안정적인 제어가 필수적이다. 이에 따라 해당 센서와 장비들을 사용한 목적에 맞는 알고리즘 개발 및 안정적인 제어를 위한 다양한 제어 모델[4],[5] 및 센서 융합[6]에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

다른 무인시스템과 달리 드론은 실제에 근사한 다이나믹스 모델을 시뮬레이션 상에 구현하기 어렵고, GPS, UWB와 같은 통신을 기반으로 한 위치 추정이나, IMU, 비전과 같은 센서를 사용하는 경우 해당 통신 네트워크 혹은 센서가 가지는 오차를 실제 환경과 유사하게 모델링하는 것이 어려울뿐더러 과도한 가정을 내포할 여지가 존재한다. 이에 따라, 실제 드론을 사용한 실험을 위해 비전을 기반으로 한 여러 대의 카메라를 사용한 실내 소형 무인기 테스트베드[7], 아두파일럿 기반의 교육용 무인기 테스트베드[8]와 같이 다양한 플랫폼이 개발되어 왔다.

본 논문에서는 UWB-환경에서, 개발된 경로 생성 알고리즘의 검증에 위한 테스트 베드 구축 방법이 제공된다. 2장(II.)에서는 테스트 베드 구축에 사용된 bitcraze사의 Crazyflie의 위치 추정 방법을 소개하고, 3장(III.)에서는 Python과 matlab을 사용한 테스트베드 구축 과정을 자세히 기술하였다.

### II. UWB기반 Local positioning System

#### 1. Two Way Ranging 모드(TWR)와 Time Difference of Arrival 모드(TDoA)

Crazyflie는 제작사 bitcraze사가 제공하는 Loco positioning system을 사용하여 positioning을 수행한다. [9]. Crazyflie에 내장된 DW1000 chip을 사용하여 Local Positioning System (LPS)의 앵커와의 송,수신 시각 차이(timestamp)로부터 거리를 계산하고 위치를 추정한다. Crazyflie의 LPS는 TWR, TDOA 두 가지 모드를 지원한다. TWR 모드는 tag인 crazyflie와 앵커들 간의 상호 패킷 교환시 소요된 시간과 그로부터 계산된 거리로 위치를 추정한다. TWR 모드는 앵커로 둘러싸여져 있는 환경 바깥에서도 크지 않은 오차로 위치를 측정하는 점이 장점이지만, 여러 대를 하나의 라디오로 운영하기 위해서는 tag가 추가되기 때문에 더 넓은 라디오 대역폭을 요구한다. 실험적으로 여러 대를 동시에 운용하기 위한 TDMA 모드를 추가로 지원하기는 하지만, 아직은 한 대의 Crazyflie의 측위만 안정적으로 지원된다. TDOA 모드의 경우 앵커는 일정한 간격으로 패킷을 Crazyflie에 송신한다. Tag는 이를 수신하여 2개의 앵커들과의 상대위치를 계산하고, 거리를 추정한다. TDOA 모드의 경우에는 tag가 앵커들로부터 패킷을 일방적으로 수신하기 때문에 하나의 라디오로 여러 대의 Crazyflie를 운용하는 것이 어렵지 않다. 하지만 TDOA는 하나의 synchronized 된 앵커 시스템을 가지고 있기 때문에 8대로 고정되어 있는 앵커 개수를 변경하는 것이 어렵고, 앵커로 둘러싸여져 있는 지형 바깥에서는 위치 추정이 매우 불안정하다.[10] TWR 모드의 경우엔 원하는 개수의 앵커를 TDOA 모드의 경우엔 8개의 앵커를 배치하고, 이를 참조 위치로 사용한다. 라디오 전파를 태그와 앵커가 주고 받으며 시스템은 각각의 앵커와의 거리를 측정하고 모든 정보는 Crazyflie의 loco positioning deck에서 수집되어 On-board로 주어진 앵커 환경에서의 Local 위치를 계산한다.



그림 5 경로생성 알고리즘 검증을 위한 비행 실험

무인 항공기의 자동 착륙 알고리즘 검증 비행실험 중, Crazyradio로 수신한 Crazyflie의 추정 위치(빨간 점)와 알고리즘에서 생성한 경로(파란 선)를 그림 6에 함께 나타내었다.

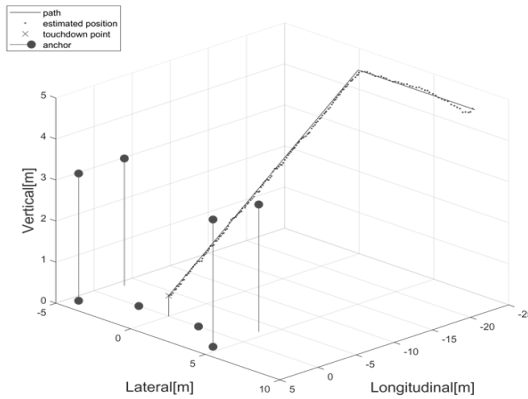


그림 6 Crazyflie 추정위치 (빨간 점)와 생성된 비행경로 (파란 선)

## V. 결 론

본 논문에서는 UWB기반 무인항공기 비행 실험을 위한 테스트베드 구축 방식이 제시되었다. 우선, 테스트베드에 사용될 플랫폼인 bitcraze사의 Crazyflie의 UWB를 사용한 위치 추정 방식 (TWR/TDMA, TDoA)이 소개되었다. bitcraze에서 제공한 Crazyflie PC client를 사용하여 range 로그 데이터 값을 확인하고, 해당 range 데이터만을 사용한 측위 결과와 EKF를 통해 추정한 위치 값의 차이를 비교해보았다. LPS 위치 추정 방식을 기반으로 한 경로 생성 알고리즘 검증을 위한 테스트베드 구축 방식이 제시되었고, bitcraze에서 제공하는 Python 언어 기반의 경로 생성 알고리즘이 아닌 MATLAB 언어로 작성된 경로 생성 알고리즘도 MATLAB에서 제공하는 Python용 MATLAB Engine API를 통해 연동하여 비행실험을 진행 할 수 있도록 하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(18CTAP-C143427-01)에 의해 수행되었습니다. 또한 이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2017R1D1A1B03028 146)

## 참고 문헌

- [1] 최영철, 안효성. "드론의 현재와 기술 개발 동향 및 전망." 전기의세계, 64.12 (2015.12): 20-25.
- [2] 백승현, 윤한기, 강봉철, 박창용. "GPS, 기압센서, 적외선센서를 이용한 드론의 안정적인 자동 착륙기능 개발." 한국생산제조학회 학술발표대회 논문집, (2015.10): 282-282.
- [3] 이제호, 채희태, 민준기, 신상윤. "초음파 센서를 이용한 자율주행 탐사 드론." 한국정보과학회 학술발표논문집, (2016.12): 254-256.
- [4] Castillo, Pedro, Rogelio Lozano, and Alejandro E. Dzul. Modelling and control of mini-flying machines. Physica-Verlag, 2006.
- [5] Bristeau, Pierre-Jean, et al. "The navigation and control technology inside the ar. drone micro uav." 18th IFAC world congress. Vol. 18. No. 1. Milano Italy, 2011.
- [6] García, Sergio, et al. "Indoor SLAM for micro aerial vehicles control using monocular camera and sensor fusion." Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), 2016 International Conference on. IEEE, 2016.
- [7] Won, Dae-Yeon, et al. "Vision-based small UAV indoor flight test environment using multi-camera." Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 37.12 (2009): 1209-1216.
- [8] Jung, Dongwon, et al. "Design and development of a low-cost test-bed for undergraduate education in UAVs." Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC'05. 44th IEEE Conference on. IEEE, 2005.
- [9] <https://www.bitcraze.io/getting-started-with-the-loco-positioning-system/>
- [10] <https://www.bitcraze.io/loco-pos-system/>
- [11] <https://github.com/bitcraze/crazyflie-lib-python>
- [12] 신유진, 김중호, 김의호. "UWB 기반 고정익 무인항공기 자동 착륙 시스템을 위한 포텐셜 필드 방식의 경로 생성 알고리즘", 한국항공학회 학술발표대회 논문집 (2018)

## RTL-SDR을 이용한 LTE 신호의 셀 ID 취득

강 태 원<sup>1,2</sup> · 서 지 원<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 글로벌융합공학부

<sup>2</sup>연세대학교 글로벌융합기술원

## Acquisiton of LTE Signal Cell ID Using RTL-SDR

Taewon Kang<sup>1,2</sup> · Jiwon Seo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Integrated Technology, Yonsei University

<sup>2</sup>Yonsei Institute of Convergence Technology, Yonsei University

### Abstract

In this paper, we present the LTE signal acquisition process using RTL-SDR. RTL-SDR is a low-cost commercial software defined receiver (SDR) used for scanning various RF signals. LTE signal on the air is received with RTL-SDR and processed to acquire reference sequence and cell ID of the signal. Cell ID can be used to acquire the location of the transmitted base station. The algorithm introduced through this paper is implemented in the real-world on-the-air LTE signal. The result of the acquired signal is presented in the paper.

### I. 서 론

위성 신호를 수신하여 위치를 측정하는 GPS(Global Positioning System)는 위성항법시스템(GNSS; Global Navigation Satellite System) 중 현재 세계적으로 가장 널리 쓰이는 시스템이다 [1]-[3]. 그러나 지면에서 수신되는 GPS 위성 신호의 세기가 매우 낮기 때문에 간섭이나 재밍과 같은 상황에 취약하고, 실내나 도심 일부 지역에서는 신호가 가리거나 반사되어 GPS의 정확도가 떨어지게 된다 [4]-[7].

GPS의 수신 세기가 약하거나 수신 불가능한 환경에서 사용하기 위해 최근 기회 신호(SOP; signal of opportunity)를 이용한 측위 시스템 구성을 위한 연구가 활발히 진행 중이다 [8]-[12]. 기회 신호란 라디오, Wi-Fi, TV 신호 등 원래 측위 목적의 신호가 아니지만 후처리를 통해 측위 용도로 활용 가능한 RF 신호들을 일컫는다. 기회 신호의 여러 종류 중 long-term evolution (LTE) 신호는 자체적인 측위 시스템을 구축할 수 있는 좋은 조건인 광대역 신호이자 높은 비트 레이트를 지닌 신호이기에 주목을 받고 있다.

RTL-SDR 이란 저가(약 25달러)의 USB 동글 형태의 컴퓨터 기반 RF 신호 스캐너로 500 kHz부터 1.75 GHz의 주파수 신호를

수집할 수 있다. RTL-SDR은 시중의 상용 소프트웨어 기반 수신기(SDR; software defined receiver) 중 저가 형태로 연구자들뿐만 아니라 일반인들에게도 널리 보급되어 접근성이 좋다는 장점이 있다. [13]

본 논문에서는 RTL-SDR로 공중의 LTE 신호를 수집하여 후처리를 통해 LTE 신호 기반 측위에 필요한 기준 시퀀스 및 셀 ID를 취득하는 방법을 연구하였다. 셀 ID는 매 하향링크 LTE 신호 및 신호를 발신하는 기지국과 대응되어 신호에서 셀 ID를 취득하는 것으로 신호의 발신 위치를 알 수 있다.

본 논문은 1장 서론에 이어 2장에서 LTE 신호를 취득하여 기준 시퀀스와 셀 ID를 취득하는 알고리즘에 대해 설명한다. 3장에서는 실제 LTE 신호를 RTL-SDR로 취득한 실험 결과를 설명한다. 마지막 4장에서는 본 논문을 요약하며 결론지었다.

### II. LTE 신호 취득 알고리즘

UE(user equipment)에 수신된 LTE 신호에는 신호 내 프레임 간 동기화를 위한 기준 시퀀스(reference sequence)가 존재한다 [14]. 이 중 PSS(primary synchronization signal)와 SSS(secondary synchronization signal)는 매 프레임의 특정 시간에 삽입되므로 UE는 수신된 LTE 신호의 프레임 시작 시간을 추정하기 위해 PSS와 SSS를 사용할 수 있다. PSS는 Zadoff-Chu 시퀀스 기반으로 짜여진 시퀀스로 3 가지의 서로 다른 시퀀스 중 하나로 표현되며, 각각의 시퀀스는  $N_{ID}^{PSS} \in \{0, 1, 2\}$  중 하나로 사전 지정되어 있다. SSS는 최장 수열 (m-sequence; maximum length sequence) 기반 기준 시퀀스로 PSS가 위치한 심볼(symbol)의 직전 심볼에 담겨 있다. SSS는 168 가지의 서로 다른 시퀀스 중 하나로 표현되며, 각각의 시퀀스는  $N_{ID}^{SSS} \in \{0, 1, \dots, 167\}$  중 하나로 사전 지정되어 있다. PSS와 SSS는 신호 내 서로 인접한 위치에 있고, PSS의 시퀀스는 SSS의 시퀀스보다 적은 가짓수를 가지기 때문에 수집된 신호의 시간 영역 전체에 대해 PSS 검출을 시도하고,

PSS 검출이 성공하면 PSS가 검출된 위치의 이전 심볼에서 SSS 검출을 시도한다. SSS 검출이 성공하면 두 시퀀스에서 번역한  $N_{ID}^{PSS}$ 와  $N_{ID}^{SSS}$ 로 셀 ID를 계산할 수 있다. 셀 ID  $N_{ID}^{Cell}$ 는

$$N_{ID}^{Cell} = N_{ID}^{PSS} + 3N_{ID}^{SSS} \tag{1}$$

로 계산된다. 이 때  $N_{ID}^{Cell} \in \{0, 1, \dots, 503\}$  이다.

III. 실험 결과

LTE 신호 수집을 위해 안테나에 연결된 RTL-SDR R820T2 RTL2832U USB dongle이 사용되었다. 그림 1은 실험에 사용된 RTL-SDR dongle의 사진이다. 신호 수집은 연세대학교 국제캠퍼스 교내에서 진행되었으며, 수신된 신호는 LG U+ 통신사의 889 MHz 중심 주파수 신호이다. 수집된 신호는 자체 개발된 MATLAB 코드를 통해 신호 내의 PSS 및 SSS를 검출하고 셀 ID를 취득하였다.



그림 1. 실험에 사용된 RTL-SDR dongle.

그림 2는 수신된 신호의 각 샘플에서 검출한 PSS의 correlation value이다. 신호 내 가장 높은 correlation value를 나타낸 샘플의 심볼에서  $N_{ID}^{PSS}=1$ 을 검출하였고, 그 이전 심볼에서  $N_{ID}^{SSS}=116$ 을 검출하였다. 이로부터 식 (1)을 이용해  $N_{ID}^{Cell}=349$ 를 취득하였다. 표 1에서 수신된 신호의 세부 정보를 정리하였다.

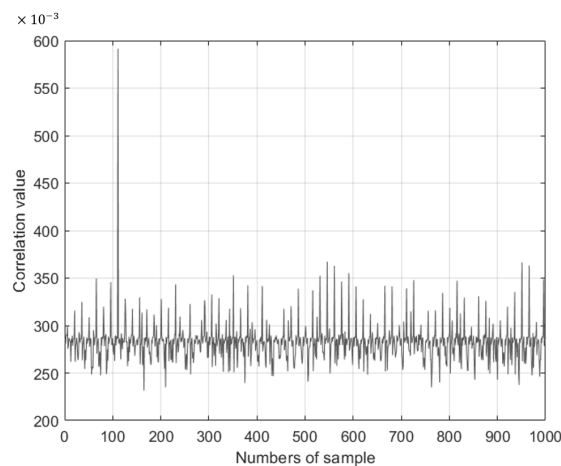


그림 2. 수신된 LTE 신호 샘플에서의 PSS correlation value.

표 1. 수신된 LTE 신호의 세부 정보.

| 이중 통신 방식                 | 주파수        |
|--------------------------|------------|
| Cyclic Prefix (CP)       | Normal     |
| 서브캐리어 (subcarrier) 간 주파수 | 15 (kHz)   |
| 중심 주파수                   | 889 (MHz)  |
| 전파 대역폭                   | 10 (MHz)   |
| 샘플링 주파수                  | 1.92 (MHz) |
| FFT 크기                   | 1024       |
| $N_{ID}^{PSS}$           | 1          |
| $N_{ID}^{SSS}$           | 116        |
| $N_{ID}^{Cell}$          | 349        |

IV. 결 론

본 논문에서는 저가형 상용 소프트웨어 기반 수신기인 RTL-SDR을 이용해 LTE 신호를 수집하고 측위에 필요한 기준 시퀀스 및 셀 ID를 검출하는 방법에 대해 연구하였다. RTL-SDR을 이용해 실제 LTE 신호를 수집한 후, 본 연구팀이 개발한 알고리즘이 성공적으로 동작함을 보였다. 본 알고리즘을 이용하면 저가형 수신기로도 충분히 LTE 신호의 발신 위치를 확인할 수 있고, 나아가 LTE 신호 기반 측위 알고리즘의 기초 알고리즘으로서 작용할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18CTAP-C143427-01)에 의해 수행되었습니다.

# DSRC/LTE 기반 측위 시스템을 이용한 도심 지역 무인 시스템의 3차원 위치 추정 성능 분석

신 유 진<sup>1</sup> · 김 의 호<sup>2</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 자율주행, 지능로봇

<sup>2</sup>홍익대학교 기계시스템디자인공학과

## Performance Analysis on Autonomous Vehicle 3D Positioning Accuracy with Augmented DSRC Network and LTE Base Station in Downtown Areas

Yujin Shin<sup>1</sup> · Euiho Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Autonomous Vehicle & Intelligent Robotics Program, Hongik University

<sup>2</sup>Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University

### Abstract

GNSS signals are easily lost and deteriorated due to signal blockage in downtown areas. Therefore, it still remains challenging to establish reliable positioning network in downtown areas that can provide appropriate positioning accuracy to support reliable autonomous navigation of unmanned vehicles. Dedicated Short Range Communication (DSRC) is reported to yield relatively accurate range measurements between transceivers and LTE base station has advantage on easy accessibility in urban areas. In this paper, we investigate 3D positioning accuracy of downtown areas provided by both LTE base stations and augmented DSRC network.

### 1. 서 론

최근 대다수의 무인이동체는 위성항법 신호를 기반으로 하여 위치를 추정하고, 이를 바탕으로 자율 주행하는 항법 시스템을 갖추고 있다. 이처럼 위성항법 신호를 기반으로 한 항법 시스템의 경우 장애물이 적은 환경에서는 신호를 수신하기 용이하여 안정적인 성능을 보여줄 수 있으나, 도심 지역의 경우 건물과 장애물들이 도로 근처로 밀집해 있어 사용자가 위성항법 신호를 쉽게 잃을뿐더러, 수신된 신호도 비교적 큰 다중경로 오차를 포함하고 있어 자율주행 시스템에 요구되는 수준의 정밀 측위를 지원하기 어렵다.

이에 따라, 도심 지역에서도 무인시스템의 안정적인 측위를 제공하기 위해 기존 도심 지역에 많이 설치되어 있는 LTE 기지국에서의 LTE 신호를 포함한 다양한 RF 신호 기반의 측위기법들이 연구되었다. Dedicated Short Range Communication (DSRC) 또한 1km 정도의 커버리지를 가지며 동시에 2m (95%) 정도의 비

교적 작은 상대거리 측정 오차를 가져[1] LTE와 더불어 도심 지역에서 무인이동체의 측위 지원 및 관제를 위한 상대거리 측정 신호로서 주목을 받고 있다. 또한, DSRC는 LTE보다 정밀한 상대 거리 측정값을 제공할 뿐만 아니라 도심 지역에 해당 인프라를 설치할 경우 LTE 기지국에 비해 적은 비용이 소요되어 경제적이기도 하다.

현재 도심 지역에 존재하는 LTE 기지국의 경우 이동통신 서비스 제공을 목적으로 설치되어 측위에는 최적화되지 않은 형태를 갖추고 있을뿐더러 수십 미터 정도의 비교적 큰 상대 거리 오차를 가지고 있어 LTE 네트워크에만 의존한 측위 시스템을 구성하는 것은 쉽지 않다. [2] 더불어, 이를 보완하기 위해 추가적인 LTE 기지국을 설치하는 것에는 많은 비용이 소요되기 때문에 경제적이지 않다.

따라서, 본 논문에서는 서울시 강남구 강남대로 396에 위치한 강남역 사거리 환경에서 기존에 설치되어 있는 LTE 기지국에 추가적으로 DSRC 측위 네트워크를 구성하고, 해당 측위 네트워크가 제공할 수 있는 3차원 위치정확도 성능을 검증해보고자 한다. 앞선 연구에서 해당 지역에 존재하는 LTE 기지국과 추가적인 DSRC 송수신기를 사거리 근처 빌딩 옥상에 설치하여 측위 네트워크를 구성하였을 때의 수평 방향 위치정확도에 관한 선행연구가 진행된 바 있다. [3] 본 논문에서는 해당 네트워크에, DSRC 송수신기를 도로 주변 바닥 높이에 추가로 설치하여 해당 측위 네트워크가 제공할 수 있는 3차원 위치정확도를 알아보하고자 한다.

본 논문의 II 장에서는 이진 정수 선형계획법을 이용하여 원하는 수평방향 위치정확도를 가진 네트워크를 구성하고, III 장에서는 향상된 수직 방향 위치정확도를 제공하기 위한 추가적인 DSRC 송수신기를 노면에 설치한 후, 해당 네트워크가 제공하는 수평, 수직 방향의 측위 성능을 알아본다. 이후 IV장 결론 부에서 앞서 계산한 DSRC 기반 도심 측위 네트워크 성능을 바

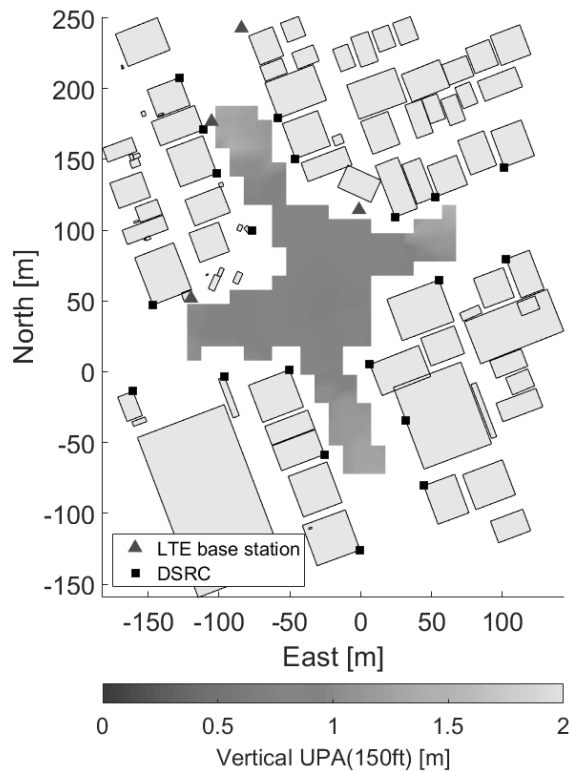


그림 6. DSRC 송수신기를 추가로 설치하여 구성한 고도 150ft에서 측위 네트워크의 수직 방향 측위 정확도

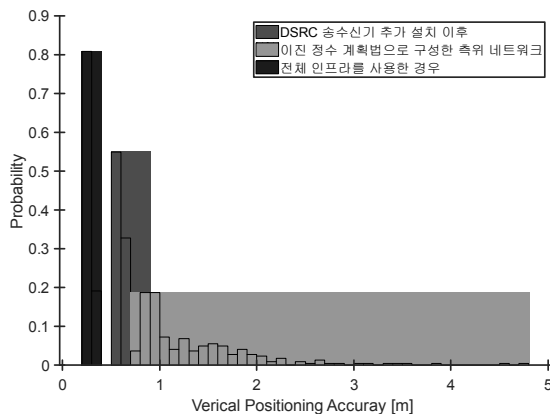


그림 7. 각 측위 네트워크가 제공하는 수직 방향 정확도 히스토그램

#### IV. 결 론

본 논문에서는 이진 정수 선형계획법을 이용하여 구성된 측위 네트워크에 향상된 수직 방향 위치정확도를 제공하기 위한 추가적인 DSRC 송수신기를 노면에 설치하고, 해당 네트워크가 제공하는 수평, 수직 방향의 측위 성능을 알아보았다.

이진 선형계획법을 통해 구성된 측위 네트워크의 수직 방향 정확도의 평균은 1.3722m (표준편차: 0.6608m), DSRC 송수신기

를 추가로 배치한 이후의 수직 방향 정확도의 평균은 0.6122m (표준편차: 0.0763m), 전체 DSRC 후보들과 LTE 기지국을 사용하여 (총 140개의 거리 측정원) 측위 성능을 계산한 결과 수직 방향 위치정확도의 평균이 0.2806m (표준편차: 0.0248m) 정도임을 알 수 있었다.

수평 방향의 위치정확도는 비교적 적은 개수의 인프라로 원하는 측위 성능을 제공할 수 있었다. 반면에, 여러 고도의 DSRC 송수신기를 노면 근처에 설치해서 얻을 수 있는 수직 방향 위치정확도는 한정적임을 알 수 있었으며, 도심 지역에 DSRC 송수신기를 다양한 고도로 추가하는 것은 제한적이기도 하다. 따라서, 무인 시스템의 고도 측정에는 DSRC 송수신기를 추가로 설치하는 것보다는 각 무인 시스템에 별도의 고도계를 사용하는 것이 경제적이라고 할 수 있다.

#### 감사의 말

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18CTAP-C143427-01)에 의해 수행되었으며, 이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (NRF-2017R1D1A1B03028

146)

#### 참고문헌

- [1] Niesen, U.; Ekambaram, V.N.; Jose, J.; Wu, X. Intervehicle Range Estimation from Periodic Broadcasts. IEEE Trans. Veh. Technol. 2017, 66, 10637–10646.
- [2] Kim, E.; Shin, Y. Analysis of the Signals of Opportunity and Cooperative Based Positioning for UAS Navigation in Deep Urban Area. In Proceedings of the 2019 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS), Herndon, VA, USA, 9–11 April 2019; pp. 1–8.
- [3] Kim, E., & Shin, Y. (2019). Feasibility Analysis of LTE-Based UAS Navigation in Deep Urban Areas and DSRC Augmentation. Sensors, 19(19), 4192.
- [4] “네이버 지도,” 네이버, 2019년 10월 21일 접속, <https://map.naver.com/>

# UWB 상대 거리 측정값을 이용한 수풀 속 GNSS 수신기의 위치 추정 정확도 향상에 관한 사례 연구

신 유 진<sup>1</sup> · 김 의 호<sup>2</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 자율주행, 지능로봇

<sup>2</sup>홍익대학교 기계시스템디자인공학과

## Case study of Positioning Accuracy improvement of GNSS receiver under foliage using UWB range measurements

Yujin Shin<sup>1</sup> · Euiho Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Autonomous Vehicle & Intelligent Robotics Program, Hongik University

<sup>2</sup>Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University

### Abstract

Positioning performance of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) receiver is often degraded under certain circumstances (e.g. under foliage, surrounded by high rise buildings), where GNSS signals are interrupted by surrounding environment. In order to tackle this problem, cooperative positioning method based on centralized kalman filter can be applied to enhance the positioning accuracy of GNSS receiver combined with UWB range measurements. This paper presents an experimental case of positioning performance enhancement of a GNSS receiver under foliage by using UWB range measurements.

### I. 서 론

대부분의 자율주행플랫폼의 경우 GPS, GLONASS와 같은 GNSS 위성 신호를 수신하며, 이를 해당 플랫폼의 항법 및 제어에 활용한다. 따라서 GNSS 수신기의 성능 및 GNSS 신호 수신 환경은 자율주행플랫폼의 주행성능에 많은 영향을 미치게 된다.

고층 건물이 밀집되어 있는 도심 지역이나, 나무와 같은 자연물이 우거진 수풀 아래에 위치한 GNSS 수신기의 경우 이러한 장애물들에 의해 상대적으로 적은 수의 위성 신호를 수신하게 되고, 수신한 신호에도 다중 경로 오차가 포함되어 있어 정밀한 위치추정이 어렵다. 이에 따라 GNSS 수신 환경에 강건한 위치 추정 기법에 관한 다양한 연구가 진행되었다.

본 논문에서는 중앙 집중 방식의 군집 협동 측위 기법(Centralized Cooperative Positioning)을 사용하여 수풀 아래에 위치한 GPS 수신기 성능을 향상시키고자 한다. 군집 협동 측위를 위해, GPS 수신기와 GPS 수신기 노드간의 상대거리 측정을 위

한 UWB 거리측정센서가 동시에 사용되었다. 총 3대의 GPS 수신기가 사용되었고, 이중 하나의 GPS 수신기가 수풀 아래에 위치하였으며, 각각의 GPS 수신기와, 수신기 주변에 총 6개의 UWB 거리측정센서가 사용되었다.

### II. IMU/GPS/UWB 센서를 사용한 중앙 집중 군집 협동 측위 시스템

#### 1. 상태벡터와 운동방정식 [1]

하나의 노드의 상태 벡터는 16차원의 벡터로, i번째 노드의 상태벡터는 아래와 같이 위치( $r_i$ ), 속도( $v_i$ ), 자세( $\alpha_i$ ), 가속도계 바이어스( $ba_i$ ), 자이로스코프 드리프트( $bg_i$ ), 수신기 시계오차( $cb_i$ )로 나타낼 수 있다.

$$x_i = [(r_i)^T, (v_i)^T, (\alpha_i)^T, (ba_i)^T, (bg_i)^T, (cb_i)^T]^T \quad (1)$$

위 식에서 T는 전치행렬을 의미하고, 총 3개의 노드로 구성될 경우 총 48개의 상태로 전체 상태벡터가 구성된다.

이때, 가속도계, 자이로스코프, 수신기 시계 바이어스에 랜덤 워크 모델을 적용하면, ECEF(지구 중심 고정) 좌표계에서 하나의 노드의 운동방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{r}_e &= v_e \\ \dot{v}_e &= R_{be} f_b - 2\Omega_e v_e + g_e \\ \dot{\alpha}_e &= R_{ae} w_{ib} \\ (bg)_{k+1} &= (bg)_k + (w_g)_k \\ (ba)_{k+1} &= (ba)_k + (w_a)_k \\ (cb)_{k+1} &= (cb)_k + (w_{cb})_k \end{aligned} \quad (2)$$

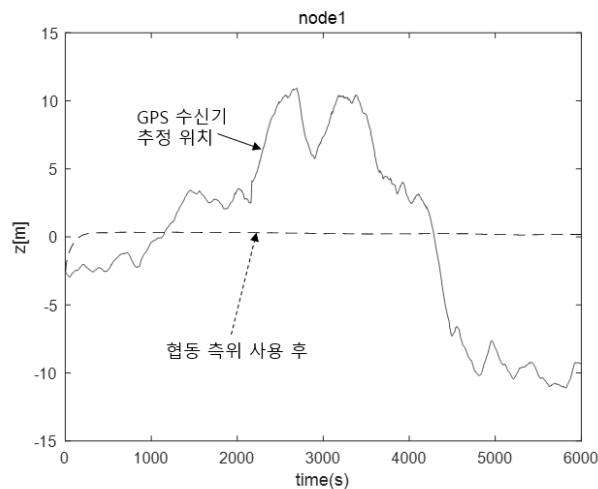


그림 7. node1 수직 방향 위치 계산 결과 (ENU 좌표계)

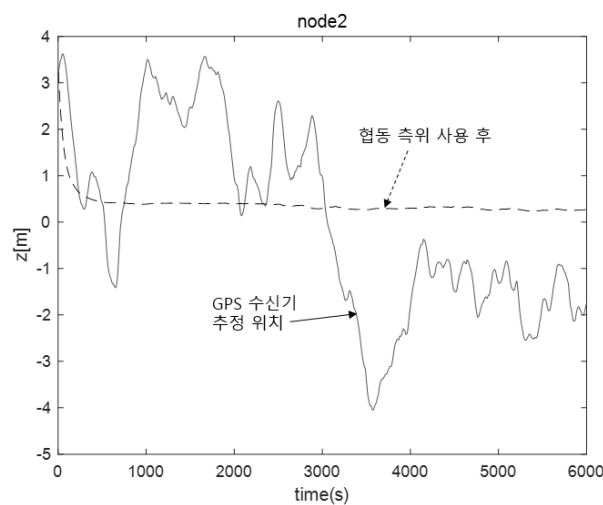


그림 8. node2 수직 방향 위치 계산 결과 (ENU 좌표계)

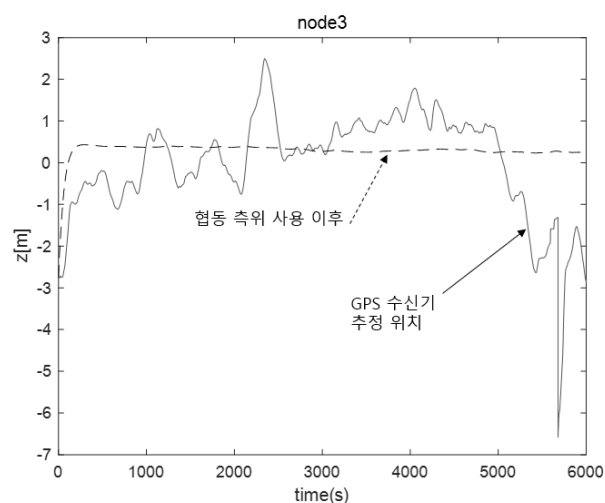


그림 9. node3 수직 방향 위치 계산 결과 (ENU 좌표계)

## IV. 결 론

본 논문에서는 확장 칼만 필터 기반의 중앙 집중 방식 군집 협동 측위 기법 (Centralized Cooperative Positioning)을 사용하여 수풀 아래에 위치한 GPS 수신기 성능을 향상시켰다. 3개의 노드가 수신한 GPS신호와 UWB 상대거리 측정값을 사용하여 수평 방향으로의 평균 3.2995m, 수직 방향으로의 평균 3.0935m 위치 추정 성능을 향상시킬 수 있었다.

## 감사의 말

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18CTAP-C143427-01)에 의해 수행되었으며, 이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (NRF-2017R1D1A1B03028146)

## 참고문헌

- [1] Goel, S., Kealy, A., Gikas, V., Retscher, G., Toth, C., Brzezinska, D. G., & Lohani, B. (2017). Cooperative localization of unmanned aerial vehicles using GNSS, MEMS Inertial, and UWB sensors. *Journal of Surveying Engineering*, 143(4), 04017007.
- [2] Simon, D. (2006). *Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches*. John Wiley & Sons.



## 학 위 수 여 증 명 서

제 CME052438 호

성                   명 : 손표웅  
생   년   월   일 : 1989. 4. 22.  
학                   번 : 2012324085  
학 과 및 과 정 : 글로벌융합공학과 통합 과정  
입 학 일 자 : 2012. 9. 1.  
학 위 수 여 일 : 2019. 2. 25.  
학   위           명 : 공학박사  
증 서 번 호 : 제 14027 호  
학 위 등 록 번 호 : 대학원(박)14027

위의 사실을 증명합니다.

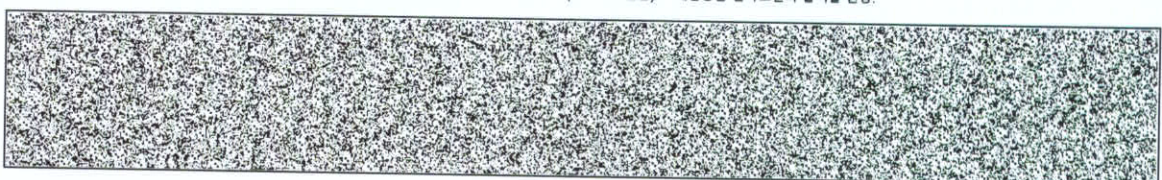
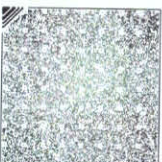
2019년 8월 30일

연 세 대 학 교 교 무 처 장



연 세 대 학 교 03722 서울시 서대문구 연세로 50 Tel (02)2123-2114 <http://www.yonsei.ac.kr>  
YONSEI UNIVERSITY 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea Tel (02)2123-2114 <http://www.yonsei.ac.kr>

\* 본 증명서는 인터넷으로 발급한 증명서로서, 연세대학교 제 증명 홈페이지에서 원본확인 문서번호를 통해 원본대조가 가능(발급후 1년간) \* 재출용은 컬러프린터 출력을 권장.





## 학 위 수 여 증 명 서

제 CME055646 호

성 명 : 이준효  
생 년 월 일 : 1990. 7. 3.  
학 번 : 2012324087  
학 과 및 과 정 : 글로벌융합공학과 통합 과정  
입 학 일 자 : 2012. 9. 1.  
학 위 수 여 일 : 2019. 8. 30.  
학 위 명 : 공학박사  
증 서 번 호 : 제 14380 호  
학 위 등 록 번 호 : 대학원(박)14380

위의 사실을 증명합니다.

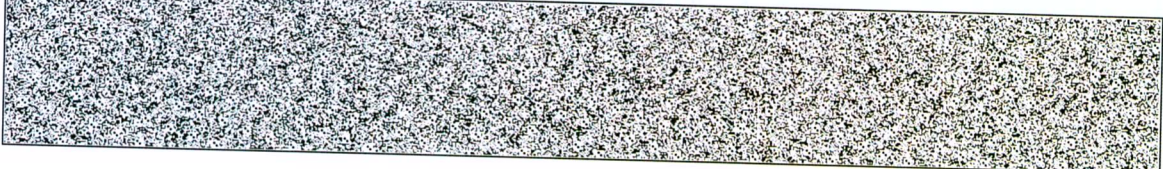
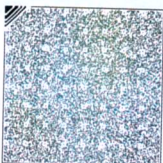
2019년 9월 2일

연 세 대 학 교 교 무 처 장



연 세 대 학 교 03722 서울시 서대문구 연세로 50 Tel (02)2123-2114 <http://www.yonsei.ac.kr>  
YONSEI UNIVERSITY 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea Tel (02)2123-2114 <http://www.yonsei.ac.kr>

\* 본 증명서는 인터넷으로 발급한 증명서로서, 연세대학교 제 증명 홈페이지에서 원본확인 문서번호를 통해 원본대조가 가능(발급후 1년간) \* 재출용은 칼라프린터 출력을 권장.



## 주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

비매품/ 무료



9 791195 900367

ISBN 979-11-959003-6-7