

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^{1,2} · 강 태 원^{1,2} · 서 지 원^{1,2*}

¹연세대학교 글로벌융합공학부

²연세대학교 글로벌융합기술원

Halim Lee^{1,2} · Taewon Kang^{1,2} · Jiwon Seo^{1,2*}

¹School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon 21983, Korea

²Yonsei 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

1. 서론

최근 민간항공 분야에서 무인항공기(UAV; unmanned aerial vehicle)의 수요가 증가하면서[1] 무인기교통관리시스템(UTM; unmanned aircraft system traffic management)의 필요성이 강조되고 있다[2]. UTM 이란 지상 400 ft 이내 저고도 공역에서 다수의 소형 무인항공기의 안전한 운항을 지원하기 위한 관리 시스템이다[3]. UTM은 인구 및 건물이 밀집한 도심지역에서 충돌 회피[4]에 활용될 수 있다.

무인항공기를 관제하기 위해서는 무인항공기의 위치를 파악하는 항법 기술이 선행되어야 한다. 일반적으로 위성 신호의 가용성을 확보할 수 있는 open-sky 환경의 경우 위성항법시스템을 사용하여 위치와 시각을 정밀하게 파악할 수 있다[5]-[10]. 그러나 도심지역의 경우 밀집된 건물의 영향으로 인해 위성항법시스템 신호의 다중경로(multipath)와 비가시성(NLOS; non line-of-sight) 문제가 빈번히 발생하여 측위의 정확도와 가용성을 보장할 수 없다[11]. 이에 도심지역에서 기타 센서 혹은 지도 융합 등을 이용한 측위 기술[12]-[15]이 개발되었으나, 데이터 베이스 구축에 비용이 많이 소모되며 다중센서로 인해 기체 크기가 증가한다는 단점이 있다.

따라서 소형 무인항공기의 위치를 파악하기 위해서는 eLoran과 같은 보완항법시스템[16]-[18]을 사용하거나, long-term evolution (LTE)[19],[20], WiFi[21] 등 이미 편제된 기회 신호(SOP; signals of opportunity)와 저가의 경량 수신기를 사용하는 방식이 적절하다. 이 중 LTE 신호의 경우 기지국이 도심지역에 다수 분포하며 고정되어있고, 수신 신호 세기가 강하며 대역폭이 크다는 장점이 있다[19]. 이에 따라 본 연구에서는 무인항공기의 위치를 추정하는 기술로써 LTE 신호 기반 측위를 가정하였다.

본 연구에서는 LTE 신호를 기반으로 무인항공기의 위치를 추정하고, 이를 바탕으로 도심지역 무인항공기 간의 충돌 방지에 활용할 수 있는 도구를 개발하였다. 개발된 도구에서는 실제 도심 3D 지도 상에서 안전거리, 즉 무인항공기 위치 추정치의 신뢰 범위인 보호 수준(PL; protection level)을 가시화할 수 있다. 또, 사용자는 도구 상에서 기지국과 무인항공기의 개수 및 지리적 분포를 설정할 수 있으며, 고장 신호의 개수와 항행 요구조건을 조정할 수 있다. 본 도구에서 수평 추정 위치 및 수평 보호 수준은 LTE 신호를 기반으로 결정되며, 수직 추정 위치

및 수직 보호 수준은 LTE 신호와 기압고도계를 기반으로 결정된다.

본 연구팀은 [22]에서도 외부에서 거리측정 오차의 분산이 주어진 경우를 가정하여 보호 수준 가시화 도구를 개발한 바 있다. 그러나 [22]의 모델은 거리측정 오차의 바이어스가 존재하지 않는다고 가정한 경우로, 본 연구에서는 이를 확장하여 다중 경로, NLOS에 의한 거리측정 바이어스를 고려하여 보호 수준을 계산하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 본 논문의 II장에서는 충돌을 방지하기 위한 안전거리 생성 방법을 서술하였으며, III장에서는 3D 지도 생성 방법과 시뮬레이션을 위한 파라미터 설정을 다루었다. 또, IV장에서는 제작된 도구 상에서 고장 신호의 개수를 변인으로 하는 안전거리 생성 시뮬레이션을 진행하였다. 마지막으로 V장에서는 본 논문의 내용을 종합하였다.

II. 충돌방지 안전거리 생성

2-1 안전거리의 정의

본 연구에서는 충돌방지 안전거리인 보호 수준 계산을 위해 [23]-[26]에서 소개된 multiple hypothesis solution separation (MHSS) 방식을 활용하였다. 보호 수준은 무인항공기의 위치가 특정 확률 이상으로 포함된다고 신뢰할 수 있는 범위를 나타내며, 해당 확률값은 신뢰도 요구 수준에 의해 결정된다[23]. MHSS 방식에서 보호 수준은 고장이 발생한 신호의 개수에 따라 계산할 수 있는 모든 조합의 보호 수준을 포함한 범위로 정의된다[23]. [26]의 그림 5-15를 참고하여 보호 수준을 도식화하면 그림 2와 같다.

본 연구에서는 [23]을 참고하여 식 (1)과 같이 다중 경로, NLOS의 영향으로 의사거리(pseudorange)에 일정 수준 이상의 바이어스(bias)가 발생한 신호를 고장 신호로 정의하고, 그 외의 신호를 정상 신호라고 정의하였다.

$$E_k \sim N(b_k, \sigma_k^2) \tag{1}$$

이때, 확률변수 E_k 는 k 번째 기지국과 사용자 사이의 거리측정 오차이며, b_k 와 σ_k 는 각각 거리측정 오차의 평균과 표준편차이다. Nominal 상태의 최대 거리측정 바이어스를 $b_{max,k}$ 라고 할 때, $b_k > b_{max,k}$ 인 경우 고장 신호이며, $b_k < b_{max,k}$ 인 경우 정상 신호이다[23].

Fault-mode (FM)과 fault-free (FF)는 각각 고장 신호를 하나 이상 포함한 위치 추정치와 고장 신호를 포함하지 않는 위치 추정치를 뜻한다[23]. 최종 보호 수준 솔루션은 FF와 FM 각각에서 도출한 보호 수준 부분 집합의 최댓값이다. 본 논문 II장의 수식은 모두 [23]에 제시된 GNSS (global navigation satellite system) 관련 수식을 LTE 기지국과 기압고도계를 고려하여 변

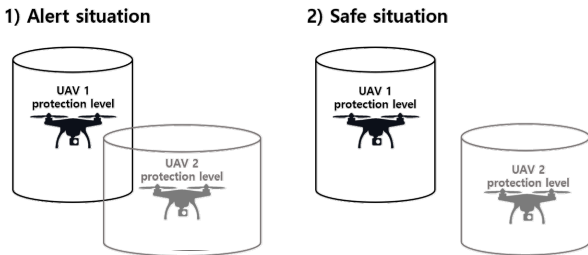


그림 1. 안전거리를 이용한 무인항공기 관제 예시
Fig. 1. Example of UAV surveillance based on safety distance.

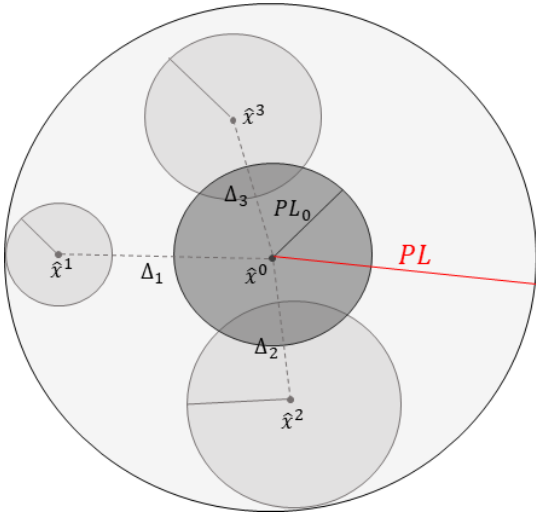


그림 2. MHSS 방식에서 보호수준의 정의
Fig. 2. Definition of protection level in the MHSS method.

형한 것이다.

2-1 FF 위치 추정치와 보호 수준 계산

FF의 위치 추정치 \hat{x}^0 는 식 (2)과 같이 가중최소자승법 (WLS; weighted least-squares)로 계산된다.

$$\hat{x}^0 = S^0 \cdot y \tag{2}$$

이때, 투영행렬(projection matrix) S^0 은 식 (3)과 같다. 또한, 행렬 y 의 k 번째 행 y_k 는 식 (4)와 같다.

$$S^0 = (G_{BS+Alt}^T W G_{BS+Alt})^{-1} G_{BS+Alt}^T W \tag{3}$$

$$y_k = [r_k^2 - r_n^2 - x_k^2 - y_k^2 - z_k^2 + x_n^2 + y_n^2 + z_n^2] \tag{4}$$

이때, n 은 측위에 참여하는 기지국 중 마지막 기지국의 인덱스(index)이며, 각 기지국의 인덱스는 임의로 정해질 수 있다. r_k 는 k 번째 기지국과 무인항공기의 의사거리, x_k, y_k, z_k 는 직교 좌표계 상에서 k 번째 기지국의 위치를 나타낸다. 식 (3)에서 기하행렬(geometry matrix) G_{BS+Alt} 와 가중행렬(weighting matrix) W 는 각각 식 (6), (7)과 같이 정의된다. 또한, 기압고도계의 측정치를 제외하고 LTE 기지국만을 고려한 기하행렬 G_{BS} 의 k 번째 행 $G_{BS,k}$ 는 식 (5)와 같다. EL_k 와 Az_k 는 각각 유저로부터 k 번째 기지국까지의 고도각(elevation angle)과 방위각(azimuth angle)을 뜻한다. 식 (7)에서 σ_k^2 ($1 \leq k \leq n$)는 기지국과 무인항공기의 의사거리 측정 오차의 분산이며, σ_{Alt}^2 는 기압고도계의 고도 측정 오차의 분산이다.

$$G_{BS,k} = [-\cos EL_k \sin Az_k - \cos EL_k Az_k - \sin EL_k \ 1] \tag{5}$$

$$G_{BS+Alt} = \begin{bmatrix} G_{BS} \\ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$W^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & & & \\ \vdots & & \ddots & & \\ 0 & \dots & 0 & \sigma_n^2 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \sigma_{Alt}^2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

FF에서 모든 의사거리를 고려한 보호 수준은 식 (8)의 방법으로 계산된다. 보호 수준 (PL_0)는 거리측정의 바이어스와 노이즈를 모두 포함하는 범위이며, q 의 값이 1, 2, 3인 경우는 각각 동쪽, 북쪽, 위쪽을 나타낸다.

$$(PL_0)_q = K_q^0 \cdot \sigma_{0,q} + \sum_{k=1}^{N_{BS+Alt}} |s_{q,k}^0| \cdot b_{\max,k} \tag{8}$$

여기서 N_{BS+Alt} 는 기지국 개수에 기압고도계 측정값을 고려하여 1을 더한 값이며, $s_{q,k}^0$ 은 투영행렬 S^0 의 q 행 k 열이다. 또한, east-north-up (ENU) 좌표계에서 측위 오차 $\sigma_{0,q}$ 는 식 (9)와 같다.

$$\sigma_{0,q} = \sqrt{(G_{LTE+Alt}^T W G_{LTE+Alt})_{q,q}^{-1}} \tag{9}$$

스케일 팩터 K_q^0 는 식 (10), (11)과 같이 신뢰도 요구조건에 의하여 결정된다[23]. 신뢰도를 나타내는 확률 P_{HML_HOR} 과 P_{HML_VER} 는 각각 수평, 수직 hazardously misleading information (HMI)이 발생할 확률이다[23]. Q 는 표준정규분포의 꼬리확률이고, N_{\maxsub} 는 식 (12)와 같이 정의된다.

$$K_1^0 = K_2^0 = -Q^{-1} \left(\frac{P_{HML_HOR}}{4 \cdot (N_{\maxsub} + 1)} \right) \tag{10}$$

$$K_3^0 = -Q^{-1} \left(\frac{P_{HML_VER}}{4 \cdot (N_{\maxsub} + 1)} \right) \tag{11}$$

2-2 FM 위치 추정치와 보호 수준 계산

FM 위치 추정치 및 보호 수준 솔루션의 가짓수는 고장 신호의 최대 개수인 N_{\maxfault} 에 의해 결정된다. N_{\maxfault} 이하의 고장 신호가 발생하였다고 가정하면, 식 (12)에 따라 N_{\maxsub} 개의 보호 수준 부분 집합을 구할 수 있다.

$$N_{\maxsub} = \sum_{n=1}^{N_{\maxfault}} \binom{N_{BS+Alt}}{n} \tag{12}$$

i 번째 부분 집합 위치 추정치는 식 (13)과 같이 계산된다.

$$\hat{x}^i = S^i \cdot y \quad (13)$$

여기서 투영행렬 S^i 는 식 (14)과 같다. M_i 는 고장 신호의 인덱스에 해당하는 대각 원소가 0인 ($N_{BS+Alt} \times N_{BS+Alt}$) 크기의 단위행렬(identity matrix)이다.

$$S^i = (G_{BS+Alt}^T M_i W G_{BS+Alt})^{-1} G_{BS+Alt}^T M_i W \quad (14)$$

이에 따라, solution separation 항인 $\Delta_{i,q}$ 와 보호 수준 (PL_i)은 식 (15), (16)과 같이 정의된다.

$$\Delta_{i,q} = \left| \hat{x}_q^i - \hat{x}_q^0 \right| \quad (15)$$

$$(PL_i)_q = \Delta_{i,q} + K_q^i \cdot \sigma_{i,q} + \sum_{k=1}^{N_{BS+Alt}} \left| s_{q,k}^i \right| \cdot b_{\max,k} \quad (16)$$

스케일 팩터 K_q^i 는 식 (17), (18)과 같이 계산된다. $P_{f_r}^i$ 는 i 번째 FM이 발생했다고 가정했을 때, 무결성 실패 (integrity failure) 사건이 일어날 확률이다.

$$K_1^i = K_2^i = -Q^{-1} \left(\frac{P_{HML_HOR}}{4 \cdot P_{f_r}^i \cdot (N_{\maxsub} + 1)} \right) \quad (17)$$

$$K_3^i = -Q^{-1} \left(\frac{P_{HML_VER}}{4 \cdot P_{f_r}^i \cdot (N_{\maxsub} + 1)} \right) \quad (18)$$

2-3 최종 보호 수준 도출

모든 보호 수준 부분 집합을 포함하는 최종 보호 수준 솔루션은 식 (19)과 같다.

$$PL_q = \max((PL_0)_q, \max((PL_i)_q)) \quad (19)$$

PL_0 와 PL_i 는 각각 식 (8), (16)에서 도출된 값이다. 이에 따라 수평, 수직 방향에 대한 보호 수준 HPL , VPL 은 각각 식 (20), (21)과 같다.

$$HPL = \sqrt{(PL_1^2 + PL_2^2)} \quad (20)$$

$$VPL = PL_3 \quad (21)$$

III. 3D 기지국 지도 제작 및 파라미터 설정

3-1 도심지역 3D 기지국 지도 제작

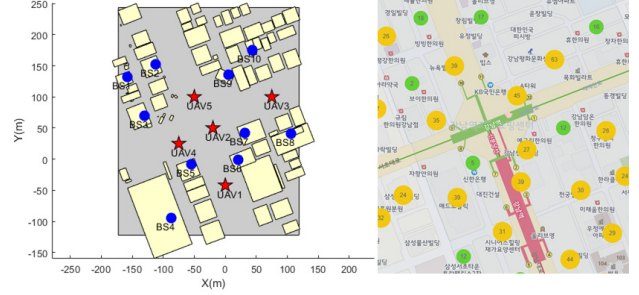


그림 3. 3D 지도(왼쪽)와 실제 도심 지역(오른쪽)의 무인항공기와 LTE 기지국 배치도

Fig. 3. The layouts of UAVs and LTE base stations in our 3D city map (left) and real urban area (right).

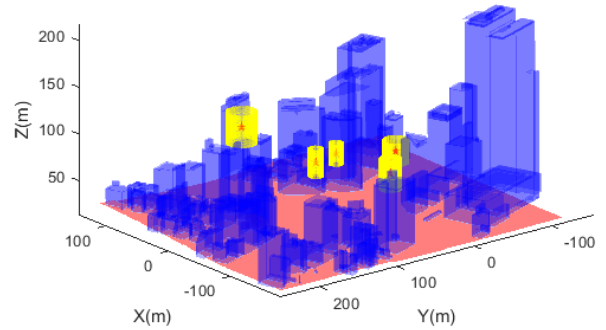


그림 4. 안전거리(보호 수준) 가시화 예시

Fig. 4. Example of safety distance (protection level) visualization.

본 연구에서는 [27]에 소개된 방법을 이용하여 강남역 인근의 3D 지도를 구현하였다. 지도 제작에는 국토교통부에서 제공하는 VWorld 오픈 application programming interface (API)[28]를 이용하였다. 또한, 그림 3과 같이 지도상에서 실제 LTE 기지국 위치와 유사한 지점에 기지국을 표시하였다. LTE 기지국 위치는 한국방송통신전파진흥원에서 제공하는 무선기지국 위치 정보[29]를 통해 파악하였다. 그림 4는 그림 3의 기지국 및 무인항공기 배치에 따라 보호 수준을 가시화한 모습을 나타낸다.

3-2 시뮬레이션 파라미터 설정

표 1은 환경 및 항행 요구조건에 부합하도록 설정된 파라미터이다. P_{HML_HOR} 과 P_{HML_VER} 의 경우 HMI가 발생할 확률로, 신뢰도 요구 수준에 따라 변경될 수 있다. P_f 는 고장 신호가 발생할 확률로, 환경에 따라 변화하며 본 연구에서는 모든 기지국 신호에 대하여 같은 값을 가진다고 가정하였다. N_{LTE} 는 LTE 기지국의 개수를 뜻하며, 그림 3에서 보이는 바와 같이 10개로 설정하였다. 또한, $b_{\max,k}$ 는 0.5m으로 설정하여 해당 값 이상의 바이어스를 가진 신호는 고장 신호로 간주하였다. LTE 신호와 기압고도계 거리측정 오차의 표준편차 σ_{LTE} 와 σ_{Alt} 는 각각 [19], [30]에 제시된 실측값과 동일하게 설정하였다. 시뮬레이

표 1. 시뮬레이션을 위한 파라미터 설정값
Table 1. Parameter settings for simulation.

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|----------------|-----------|----------------|----------|
| P_{HML_HOR} | 10^{-5} | $b_{max,k}$ | $0.5m$ |
| P_{HML_VER} | 10^{-5} | σ_{LTE} | $2.90m$ |
| P_f | 10^{-6} | σ_{Alt} | $11.73m$ |
| N_{LTE} | 10 | | |

선에서 기지국과 무인항공기의 의사거리는 실제 거리에 $N(0, \sigma_{LTE}^2)$ 을 따르는 정규분포 난수를 더한 값으로 생성하였다. 또한, 기압고도계가 측정한 무인항공기의 고도는 실제 고도에 $N(0, \sigma_{Alt}^2)$ 을 따르는 정규분포 난수를 더한 값으로 생성하였다.

IV. 시뮬레이션 결과

표 1과 같이 파라미터가 정해졌을 때, 보호 수준의 크기는 NLOS, 다중 경로에 의한 고장 신호 개수에 따라 변화한다. 본 논문의 IV장에서는 제작된 안전거리 시각화 도구를 이용하여 고장 신호 개수 $N_{maxfault}$ 에 의한 수평 및 수직 보호 수준 변화를 시뮬레이션하였다.

그림 5, 6은 각각 다중 경로에 의한 고장 신호 개수인 $N_{maxfault}$ 에 대한 수평 및 수직 보호 수준의 변화를 나타낸다. 각각의 $N_{maxfault}$ 값에 대하여 100회씩 시뮬레이션을 진행하였으며, 결과에 따른 박스 플롯(box plot)을 나타내었다. 1회의 시뮬레이션마다 오차가 정규분포를 따르는 의사거리 난수와 고도가 재생성된다. 각 그래프에서 파란색 박스는 제 1사분위수와 제 3사분위수 사이 범위를 나타내며, 빨간색 가로줄은 중앙값(median)을 나타낸다. 상자와 점선으로 이어진 위아래 검은색 가로줄은 각각 아웃라이어(outlier)를 제외한 값 중 최댓값과 최솟값을 나타낸다. 빨간색 + 표시는 아웃라이어를 나타내며, 제 3사분위수와 제 1사분위수의 차이인 사분위수 범위의 1.5배를 넘는 값을 아웃라이어로 정의했다.

예상한 바와 같이 각 그래프에서 고장 신호의 개수 ($N_{maxfault}$)가 증가함에 따라 보호 수준의 크기가 증가하는 경향을 보인다. 고장 신호의 개수가 많은 경우는 도시 협곡(urban canyon) 환경과 같이 다수의 LTE 신호가 NLOS 혹은 다중 경로 신호인 환경에 해당한다. NLOS 혹은 다중 경로 신호로부터 추정된 의사거리에는 상당한 바이어스가 포함될 수 있으므로, 추정된 위치의 신뢰도가 낮다. 이에 따라, 무인항공기의 안전거리인 보호 수준의 크기가 커진다.

그림 5와 6을 비교하면, 수직 보호 수준이 수평 보호 수준보다 더 큰 값을 가진다. 그 원인은 기지국의 지리적 분포와 기압고도계의 큰 고도 측정 오차에 기인한다. 기지국은 일반적으로 건물 옥상에 설치되어있기 때문에, 수평 방향으로의 고른 분포

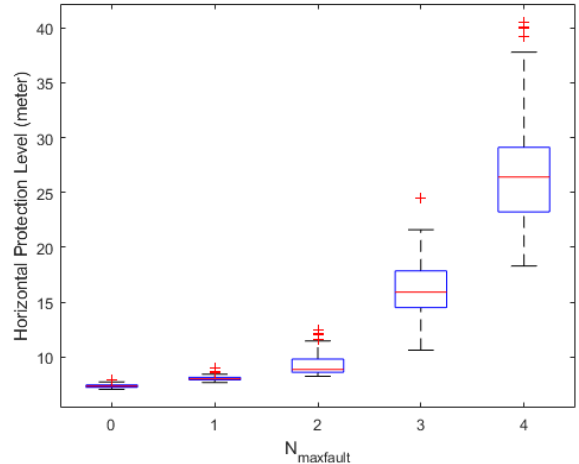


그림 5. 고장 신호 개수에 따른 수평 보호 수준 변화
Fig. 5. Variation of horizontal protection level according to the number of faulty signals.

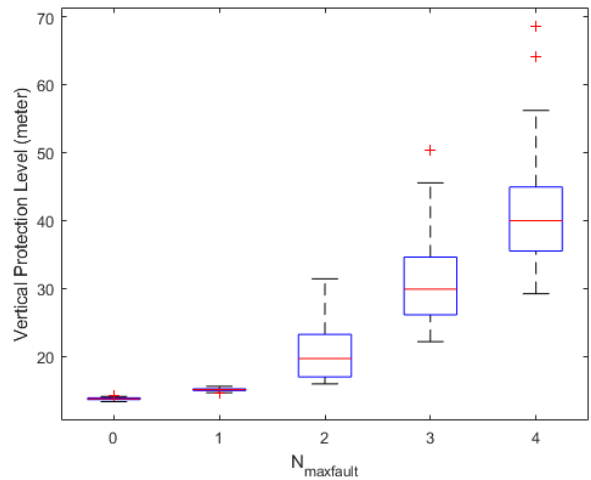


그림 6. 고장 신호 개수에 따른 수직 보호 수준 변화
Fig. 6. Variation of vertical protection level according to the number of faulty signals.

를 띄지만, 수직 방향으로의 분포된 영역이 제한적이고 고르지 않다. 따라서, 기지국과 무인항공기의 의사거리로부터 추정된 수직 방향의 위치 오차가 수평 방향의 위치 오차보다 크다. 또한, 무인항공기의 수직 위치는 기지국뿐만 아니라 기압고도계를 고려하여 결정되는데, 표 1과 같이 기압고도계 고도 측정 오차의 표준편차는 기지국과 무인항공기 의사거리 측정 오차의 표준편차보다 약 4배 정도 크게 설정되었다. 이로 인해 수직 위치 추정치는 수평 위치 추정치보다 더 낮은 신뢰도를 가지게 되므로 보호 수준은 상대적으로 크게 나타난다.

V. 결론

본 연구에서는 도심 지역 무인항공기의 충돌 방지를 위한 안

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

- implementation,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 17, No. 4, pp. 2173-2189, 2018.
- [20] K. Shamaei and Z. M. Kassas, “LTE receiver design and multipath analysis for navigation in urban environments,” *Navigation*, Vol. 65, No. 4, pp. 655-675, 2018.
- [21] A. Masiero, F. Fissore, A. Guarnieri, F. Pirotti, and A. Vettore, “UAV positioning and collision avoidance based on RSS measurements,” *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 40, No. 1, pp. 219, 2015.
- [22] H. Lee, T. Kang, and J. Seo, “Development of Confidence Bound Visualization Tool for LTE-Based UAV Surveillance in Urban Areas,” in *Proceedings of the ICCAS 2019*, 2019.
- [23] 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 ION GNSS 2012*, pp. 2828-2849, 2012.
- [24] V. Kropp, B. Eissfeller, and G. Berz, “Optimized MHSS ARAIM user algorithms: assumptions, protection level calculation and availability analysis,” in *Proceedings of the IEEE/ION PLANS 2014*, pp. 308-323, 2014.
- [25] J. Blanch, T. Walter, and P. Enge, “Exclusion for advanced RAIM: requirements and a baseline algorithm,” in *Proceedings of the ION ITM 2014*, pp. 99-107, 2014.
- [26] M. Mink, Performance of receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) for maritime operations, Ph.D. dissertation, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, 2016.
- [27] W. Kim, T. Kang, and J. Seo, “Software-based model of urban canyon effect on GPS signals using 3D map data,” in *Proceedings of the 79th IRES*, Art. No. 2656, 2016.
- [28] VWorld Open API, [Internet] Available: <http://dev.vworld.kr>
- [29] KCA Spectrum map. [Internet] Available: <https://spectrummap.kr/index.do#>.
- [30] 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.



이 하 림 (Halim Lee)

2019년 2월 : 연세대학교 글로벌융합공학부 (공학사)
 2019년 2월 ~ 현재 : 연세대학교 글로벌융합공학부 석박사통합과정
 ※ 관심분야 : 항법시스템, LTE 등 기뢰신호 기반 측위



강 태 원 (Taewon Kang)

2016년 2월 : 연세대학교 글로벌융합공학부 (공학사)
 2016년 9월 ~ 현재 : 연세대학교 글로벌융합공학부 석박사통합과정
 ※ 관심분야 : 대체항법시스템, 위성항법시스템



서 지 원 (Jiwon Seo)

2002년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 (공학사)
 2004년 9월 : Stanford University 항공우주공학과 (공학석사)
 2008년 6월 : Stanford University 전기공학과 (공학석사)
 2010년 6월 : Stanford University 항공우주공학과 (공학박사)
 2010년 7월 ~ 2012년 1월 : Stanford University 항공우주공학과 (박사후연구원)
 2012년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 글로벌융합공학부 (부교수)
 ※ 관심분야 : 항법시스템, 지능형무인시스템