

군집 비행을 이용한 불법 드론 추적 기법

김륜우¹ · 송홍종² · 반태원^{3*}

An Illegal Drone Tracking Scheme Using Swarming Flight

Ryun-Woo Kim¹ · Hong-Jong Song² · Tae-Won Ban^{3*}

¹Graduate Student, Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam, 53064 Korea

²Senior Research Engineer, 4th Industrial ICT Team, National Radio Research Agency, Jeonnam, 58323 Korea

^{3*}Professor, Department of Intelligent Communication Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam, 53064 Korea

요 약

최근 드론 관련 기술의 급격한 발전으로 드론이 여러 분야에서 널리 이용되고 있으며, 이로 인해 다양한 문제점들이 발생하고 있다. 불법 드론이 방송하는 통신 신호를 이용해 목표물을 추적하는 기술이 이러한 문제점들을 해결하기 위한 안티드론 시스템의 요소 기술 중 하나로 연구되고 있다. 본 논문에서는 단일 드론으로 구성된 기존 추적 시스템의 기술적 한계점을 해결하기 위하여 다수의 소형 드론들로 구성된 군집 비행 기반의 불법 드론 추적 시스템을 연구한다. 그리고, 군집 내 소형 드론들의 이격거리를 채널 환경에 따라서 적응적으로 제어할 수 있는 기법을 제안한다. 다양한 환경에서의 시뮬레이션을 통하여 제안 방식의 성능을 목표물 추적 성공률과 이동 횟수 관점에서 분석하였다. 제안 방식은 기존 방식 대비 목표물 추적 성공률과 이동 횟수를 약 170%와 63%씩 개선할 수 있었다.

ABSTRACT

Drones have been widely used in various fields due to the rapid development of drone-related technologies, which causes various problems. The schemes which can track target drones by using signal transmitted by target drones have been investigated as a key technology for anti-drone systems to solve these problems. In this paper, we investigate an illegal drone tracking system based on swarming flight that consists of multiple small drones in order to resolve the limitations of a conventional system that consists of a single drone. In addition, we also propose a scheme with which we can adaptively adjust the separation distance between small drones in a swarm according to channel situations. We analyzed the performance of the proposed scheme in terms of success ratio and the number of movements. The proposed scheme can improve the success ratio and the number of movements by 170% and 63% respectively, compared to the conventional scheme.

키워드 : 안티 드론, 다중 안테나, 소형 드론, 군집 비행, 추적

Keywords : Anti-Drone, Multiple Antennas, Small drone, Swarming Flight, Tracking

Received 5 May 2022, Revised 21 May 2022, Accepted 24 May 2022

* Corresponding Author Tae-Won Ban(E-mail:twban35@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9177)

Professor, Department of Intelligent Communication Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam, 53064 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.6.943>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© 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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근 드론의 비행시간과 비행 거리가 급격히 증가하면서 드론이 농업 분야부터 군사적 용도에 이르기까지 다양하게 이용되고 있다 [1-3]. 드론의 폭발적 증가로 다양한 안전사고도 증가하고 있으며, 테러에 악용되는 경우도 빈번하게 발생하고 있다 [4]. 이에 따라서 불법 비인가 드론에 대응하기 위한 안티드론 시스템을 향한 관심이 급증하고 있고, 관련 시장의 규모는 2021년부터 2026년까지 31% 성장하여 2026년에 35억 2,700만 달러에 이를 것으로 추정된다 [5-6]. 현재 대부분의 안티 드론 시스템은 비인가 드론의 확인 및 추적을 위해 레이더와 전파방해와 같은 군사용 기술을 사용하고 있으나, 도심의 인구 밀집 지역에서 소형 불법 드론 추적 용도로 사용하기에는 한계가 있다 [7-9]. 최근에는 불법 드론과 조종기 사이에서 발생하는 통신 신호를 이용해 불법 드론의 위치를 예측하여 이를 추적하는 방식이 대안으로 연구되고 있다 [10]. 이 방식에서는 드론 제어기와 드론이 근거리 통신망을 이용하는 환경에서 드론에서 방송 (Broadcast) 되는 통신 신호를 수신하여 이를 이용해 불법 드론의 위치를 추적하고 추적한다 [10-11].

기존 방식에서 추적기는 불법 드론으로부터 방송되는 신호를 수신하기 위해서 90도 간격으로 배치된 네 개의 안테나를 이용하였다. 추적기와 불법 드론의 거리가 먼 상황에서는 수신 안테나들의 이격거리가 클수록 유리하며, 추적기가 불법 드론에 가까워질수록 정교한 분해능이 요구되므로 수신 안테나들의 이격거리가 작을수록 유리하다. 그러나, 기존 방식은 추적기 드론의 크기 문제로 수신 안테나들의 이격거리를 일정 수치 이상 높일 수 없을 뿐만 아니라, 수신 안테나들의 위치가 고정되어 있으므로 추적기와 불법 드론 사이의 거리에 따라서 적응적으로 변경할 수도 없다. 또한, 수신 안테나의 수가 많을수록 불법 드론의 위치를 좀 더 정확하게 추정할 수 있음에도 불구하고 기존 방식에서는 추적 드론의 물리적 제약으로 수신 안테나의 수를 늘리기가 매우 어렵다. 따라서, 기존 방식에서는 채널 변화가 많고 추적기와 불법 드론의 거리가 큰 경우에 추적 성능이 열화되는 문제가 있다.

본 논문에서는 이러한 기존 연구의 한계점을 극복하기 위해서 단일 수신 안테나를 탑재한 다수의 소형 드론들을 이용한 불법 드론 추적 시스템을 연구한다. 다수의

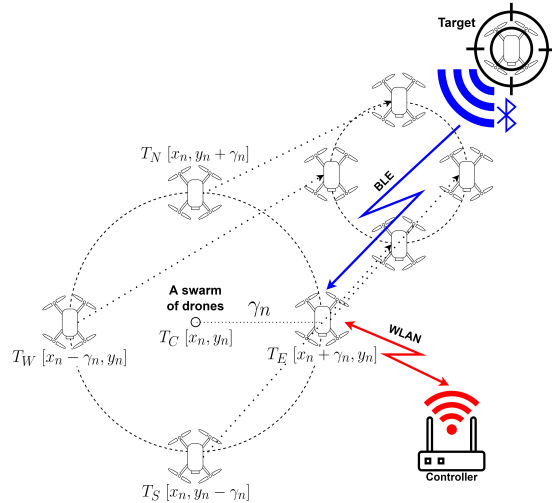


Fig. 1 A conceptual illustration of a swarm of drones for tracking illegal drones

소형 드론들로 구성된 군집 비행 기술을 이용함으로써 수신 안테나를 물리적 제약 없이 증가시킬 수 있다. 그리고, 추적기와 불법 드론 사이의 거리에 따라서 군집 내의 추적 드론들의 간격을 적응적으로 제어하여 추적 성능을 개선하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 다양한 시뮬레이션을 통한 성능 검증 결과에 따르면, 제안 방식은 기존 방식 대비 추적 성공률을 최대 약 170% 개선시키고 추적에 필요한 이동 횟수를 최대 약 63% 줄일 수 있다. 본 논문의 나머지 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 연구하는 불법 드론 추적 시스템과 제안하는 불법 드론 추적 방식을 설명한다. III장에서 다양한 환경에서 시뮬레이션을 통해서 기존 방식과 제안하는 방식의 성능을 추적 성공률과 최대 이동 횟수 측면에서 분석한다. 마지막으로, IV장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델 및 제안 방식

그림 1은 본 논문에서 연구하는 군집 비행을 이용한 불법 드론 추적 시스템을 보여준다. 다수의 드론이 군집을 구성하여 불법 드론을 추적하며, 본 논문에서는 90도 간격으로 배치된 4대의 드론을 이용하여 원형 군집을 구성하였다. 원형 군집의 지름은 $2\gamma_n$ [m]로 가정하고 중심점 T_C 의 좌표는 (x_n, y_n) 로 표시하였다. 여기서, n 은

추적 시스템이 목표물의 추적을 시작한 후 이동한 횟수를 나타낸다. 각 추적 드론은 북, 남, 동, 서의 방위에 따라 T_N, T_S, T_E, T_W 로 표기되며 좌표는 각각 $(x_n, y_n + \gamma_n), (x_n, y_n - \gamma_n), (x_n + \gamma_n, y_n), (x_n - \gamma_n, y_n)$ 로 표시한다. 모든 추적 드론은 하나의 수신 안테나를 탑재하고 있다. 원형의 군집을 형성하는 드론들은 제어기와 근거리무선통신망 (Wireless Local Area Network: WLAN)으로 연결되어 있다. 추적 드론들은 자신이 수신한 정보를 제어기로 전송하고, 제어기는 추적 드론들로부터 수신한 정보를 이용하여 추적 드론들의 위치를 제어한다. $k \in \{N, S, E, W\}$ 일 때, 각 추적 드론 k 와 불법 드론인 목표물과의 거리를 d_k^n , 목표물이 발신하는 신호의 세기가 P_{tx} 라고 할 때, 추적기 k 에서 수신되는 목표물 신호의 세기는 식 (1)과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} R_k^n[\text{dB}] &= P_{tx} - L_k^n & (1) \\ &= P_{tx} - L_0 - 10\tau \log_{10} \left(\frac{d_k^n}{d_0} \right) - X_\sigma \\ &= R_0 - 10\tau \log_{10} \left(\frac{d_k^n}{d_0} \right) - X_\sigma \end{aligned}$$

식 (1)에서 τ 는 경로 손실 지수, d_0 [m]는 기준 거리, L_0 는 기준 거리 d_0 에서 측정된 경로 손실 값, R_0 는 기준 거리 d_0 에서 수신되는 수신 전력을 나타내며 $P_{tx} - L_0$ 로 계산된다. 그리고, X_σ 는 음영 손실 값을 나타내고 평균 0dB 와 표준 편차 σ [dB] 인 로그 정규분포를 따른다. 본 논문에서는 $d_0 = 1$ [m], $\tau = 2.6$, $R_0 = -50$ dBm 으로 가정한다.

$$L_k^n[\text{dB}] = 10\tau \log_{10} \left(\frac{d_k^n}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2)$$

L_k^n 를 식 (2)와 같이 가정하면, 식 (1)은 식 (3)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$R_k^n[\text{dB}] = R_0 - L_k^n \quad (3)$$

각 추적 드론을 추적을 시작한 후 n 번 움직인 상황에서 음영 손실에 의한 수신 전력의 변동성을 제거하기 위해서 목표물로부터 수신되는 신호를 50번 수신하여 평균값 \hat{R}_k^n 을 구한 후 그 값을 제어기로 전송한다. 제어기는 추적기들로부터 수신한 \hat{R}_k^n 값과 식 (1)을 이용하여

각 추적기 k 와 목표물 사이의 예측 거리를 식 (4)와 같이 계산한다.

$$\hat{d}_k^n = 10^{\frac{(R_0 - \hat{R}_k^n)}{10\tau}} \quad (4)$$

식 (4)에서는 \hat{R}_k^n 를 충분히 많은 표본에서 얻어진 평균값인 것으로 가정하고 음영 손실은 더 이상 고려하지 않는다. 제어기는 추적 시스템의 중심점과 목표물 사이의 최종 예측 거리 \hat{d}_C^n 와 예측 각도 $\hat{\theta}_n$ 을 식 (5)와 (6)과 같이 계산할 수 있다[10].

$$\hat{d}_C^n = E_{k \in \{N, S, E, W\}}[\hat{d}_k^n] = \frac{1}{4} \sum_{k \in \{N, S, E, W\}} \hat{d}_k^n \quad (5)$$

$$\hat{\theta}_n = \arccos \left(\frac{\gamma_n^2 + (\hat{d}_C^n)^2 - (\hat{d}_h^n)^2}{2\gamma_n \cdot \hat{d}_C^n} \right) \quad (6)$$

제어기는 식 (5)와 (6)에서 계산된 예측 거리와 예측 각도를 이용해서 추적 드론들을 $\hat{\theta}_n$ 방향으로 $\min(\beta, \hat{d}_C^n)$ 만큼 이동시킨다. 제어기는 원형 군집의 중심점을 기준으로 추적 드론들의 이격거리를 적응적으로 제어한다. 추적 드론들과 목표물 사이의 거리가 상대적으로 큰 초기 추적 단계에서는 추적 드론들의 이격거리가 클수록 추적에 유리하며, 추적 드론들과 목표물 사이의 거리가 가까워질수록 높은 분해능을 얻기 위해서 추적 드론들의 이격거리가 가까워질 필요가 있다. 제안 방식에서 추적 드론들의 이격거리는 각 추적기에서 수신한 이전 RSSI 값들의 평균과 현재 RSSI 값들의 평균 차를 이용해 아래 식 (7)와 같이 계산된다.

$$\gamma_n[m] = \min(\gamma_{\max}, \exp(\alpha \cdot 10^{\frac{G_n}{10}})) \quad (7)$$

식 (7)에서 G_n 은 각 추적기에서 수신한 이전 RSSI 값들의 평균과 현재 RSSI 값들의 평균 차를 나타내며 식 (8)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} G_n &= E_{k \in \{N, S, E, W\}}[\hat{R}_k^{n-1} - \hat{R}_k^n] & (8) \\ &= \frac{1}{4} \sum_{k \in \{N, S, E, W\}} \hat{R}_k^{n-1} - \frac{1}{4} \sum_{k \in \{N, S, E, W\}} \hat{R}_k^n \end{aligned}$$

그리고, γ_{\max} 와 α 는 γ_n 의 최댓값과 γ_n 의 증가 속도

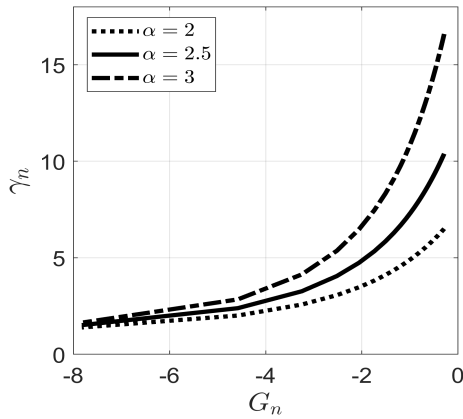


Fig. 2 γ_n for varying G_n and α .

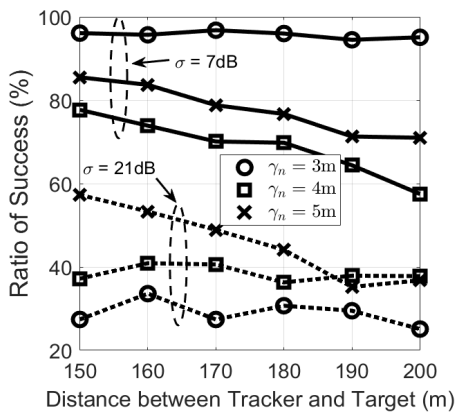


Fig. 3 Success ratio of the conventional scheme using constant γ_n values.

를 제어하기 위한 제어변수를 각각 나타낸다. 본 논문에서 $\gamma_{max} = 15m$ 를 가정하였으며, γ_{max} 와 G_n 이 주어질 때 α 에 따른 γ_n 의 변화는 그림 2에서 확인할 수 있다. 같은 G_n 에 대하여 α 값이 커질수록 γ_n 이 커짐을 확인할 수 있으며, 본 논문에서는 $\alpha = 2.5$ 를 가정하였다.

III. 성능 분석

이 장에서는 시뮬레이션을 통해 제안 방식의 목표물

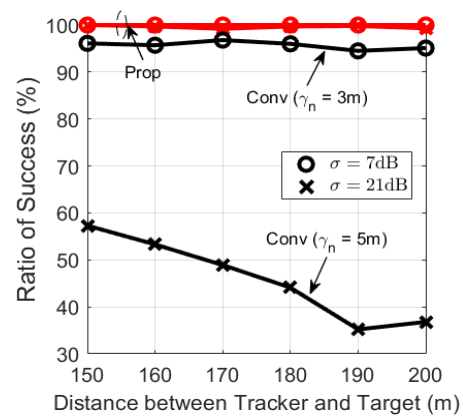


Fig. 4 Success ratio of the conventional scheme with $\gamma_n = 5m$ and the proposed scheme with $\gamma_{max} = 15$ and $\alpha = 2.5$.

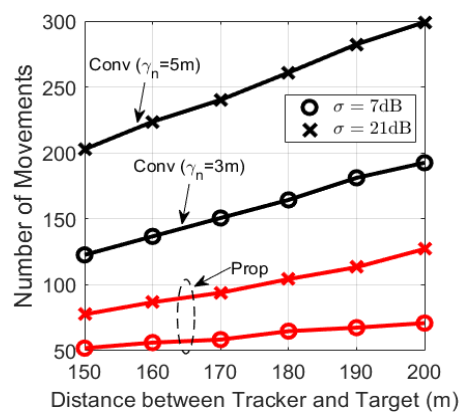


Fig. 5 The number of movements for the proposed and conventional schemes when $\gamma_{max} = 15$, $\alpha = 2.5$ for the proposed scheme and $\gamma_n = 5m$ for the conventional scheme.

추적 성공률과 추적에 필요한 추적기의 이동 횟수 등을 분석하고 이를 기존 방식과 비교한다. 기존 방식에서는 각 안테나 간의 이격거리 γ_n 이 3m 또는 5m로 고정된 네 개의 수신 안테나를 탑재한 단일 드론을 추적기로 사용한다. 추적 시스템의 복수 드론 중에서 목표물과의 실제 거리가 $D_s[m]$ 보다 작은 드론이 존재할 경우, 추적 시스템은 목표물 추적에 성공한 것으로 간주하며, 성능 분석에는 $D_s = 2[m]$ 로 가정한다. 시뮬레이션을 위해서 추적 시스템 T_C 와 목표물 사이의 거리는 150m~200m로 다양하게 설정하였고, 음영 손실 값의 표준 편차 σ 는

7dB 또는 21dB로 설정하였다.

그림 3은 추적 드론들의 이격거리 γ_n 이 고정된 기존 방식의 추적 성공률을 보여준다. $\sigma=7\text{dB}$ 일 때, γ_n 이 3m인 경우가 가장 높은 추적 성공률을 보인다. 그리고 음영 손실의 표준 편차가 $\sigma=21\text{dB}$ 일 경우에는 γ_n 이 5m인 경우가 높은 추적 성공률을 보여준다. 이는 채널의 변동성에 따라서 추적 드론의 이격거리에 대한 최적값이 달라짐을 나타낸다. 그림 4에서는 γ_n 을 적응적으로 설정하는 제안 방식의 추적 성공률을 기존 방식과 비교하였다. 제안 방식은 σ 값에 상관없이 100%에 가까운 추적 성공률을 보이는데, 기존 방식은 $(\sigma, \gamma_n)=(7\text{dB}, 3\text{m})$ 인 경우에 약 95%의 성공률을 보이고 $(\sigma, \gamma_n)=(21\text{dB}, 5\text{m})$ 인 경우에 약 35%~58% 정도의 성공률을 나타낸다. 기존 방식은 채널 변동성이 커졌을 경우, 추적 성공률이 급격히 낮아지는데, 제안 방식은 채널 변동성과 관계없이 추적에 성공하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 제안 방식과 기존 방식의 추적 성공까지 추적 드론이 이동한 횟수를 나타낸다. 두 방식 모두 추적 시스템과 목표물의 거리가 멀어질수록 추적 성공을 위한 이동 횟수가 증가하지만, 제안 방식은 σ 값과 관계없이 기존 방식 대비 현저히 낮은 이동 횟수만으로 추적에 성공함을 알 수 있다. 기존 방식에서는 추적 시스템과 목표물과의 거리가 200m이고 σ 가 7dB 또는 21dB일 때, 평균 이동 횟수가 각각 192.56과 299.18로 나타났으며, 제안 방식에서는 평균 이동 횟수가 각각 70.94와 127.14로 크게 낮아짐을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 불법 드론에서 방출되는 무선 신호를 이용하여 불법 드론을 추적하는 추적 시스템을 연구하였다. 기존의 추적 시스템은 단일 드론에 복수의 수신 안테나를 탑재하였다. 따라서, 추적 드론의 크기 제한으로 탑재할 수 있는 수신 안테나 개수에 제한이 있을 뿐만 아니라, 수신 안테나들의 이격거리가 고정됨으로써 추적 성능이 떨어지는 문제점이 있었다. 본 논문에서는, 이러한 기존 연구의 문제점을 해결하기 위하여 단일 수신 안테나를 탑재한 복수의 군집 드론을 이용한 불법 드론 추적 시스템을 제안하였다. 그리고, 수신되는 무선 전파의 강도에 따라서 각 드론의 이격거리를 적응적

로 조절하는 방법도 제안하였다. 200m 떨어진 불법 드론에 대하여, 제안 시스템은 추적 성공률을 기존 방식 대비 최대 170% 개선할 수 있으며 이동 횟수를 최대 63% 감소시킬 수 있었다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the ICT R&D program of MSIT/IITP. [2019-0-00499, Development of identification and frequency management technology of small drones at low altitude]

REFERENCES

- [1] K. Nonami, "Present state and future prospect of autonomous control technology for industrial drones," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 6-11, Nov. 2019.
- [2] Goldman Sachs. Drones Reporting for Work [Internet]. Available: <https://www.goldmansachs.com/insights/technology-drivinginnovation/drones/>.
- [3] Statista. Estimated Worldwide Production Volume for Unmanned Aerial Vehicles (Military Drones) from 2013 to 2022 [Internet]. Available: <https://www.statista.com/statistics/428911/global-production-volume-forecast-for-unmanned-aerial-systemsor-drones/>.
- [4] M. Ritchie, F. Fioranelli, and H. Borrión, "Micro UAV crime prevention: Can we help princess Leia?," in *Crime Prevention 21st Century*, Singapore: Springer, pp. 359-376, 2017.
- [5] 5. ANTI-DRONE MARKET - GROWTH, TRENDS, COVID-19 IMPACT, AND FORECASTS (2022 - 2027) [Internet]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/anti-drone-market>.
- [6] A. Zavadzich and I. Ilyushenka, "Agricultural drone market : forecast and prospects to Belarus," in *8th Interuniversity Research Student Conference*, Minsk, Belarus, pp. 47-49, 2021.
- [7] A. H. Abunada, A. Y. Osman, A. Khandakar, M. E. H. Chowdhury, T. Khattab, and F. Touati, "Design and Implementation of a RF Based Anti-Drone System," in *2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT)*, Doha, Qatar, pp. 35-42,

- 2020.
- [8] F. L. Chiper, A. Martian, C. Vladeanu, I. Marghescu, R. Cracinescu, and O. Fratu, "Drone Detection and Defense Systems: Survey and a Software-Defined Radio-Based Solution," *Sensors* 2022, vol. 22, no. 4, p. 1453, Feb. 2022.
- [9] S. P. Hwang and D. H. Kim, "A Study on the Establishment of Anti-Drone system for the Protection of National Important Facilities," *Journal of Digital Convergence*, vol. 18, no. 11, pp. 247-257, Nov. 2020.
- [10] J. M. Shin, Y. -S. Kim, T. -W. Ban, S. Choi, K. -M. Kang, and J. -Y. Ryu, "Position Tracking Techniques Using Multiple Receivers for Anti-Drone Systems," *Sensors* 2021, vol. 21, p. 35, Dec. 2020.
- [11] R. W. Kim, J. -Y. Ryu, and T. W. Ban, "A New Scheme Based On Multiple Antennas For Tracking Illegal Small Drones," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 25, no. 7, pp. 1000-1003, Jul. 2021.



김륜우 (Ryun-Woo Kim)

2021년 2월 경상국립대학교 정보통신공학과 학사
2021년 3월~현재 경상국립대학교 석사과정
※관심분야: Drone security, Reinforcement Learning, 차세대 이동통신



송홍종 (Hong-Jong Song)

1992년 2월, 전남대학교 물리학과 (이학사)
1994년 2월, 전남대학교 전자공학과 (공학석사)
2004년 8월, 연세대학교 전기·전자공학과 (박사수료)
2011년 8월, 서울과학기술대학교 방송·정보통신 융합공학과 (공학박사)
1994년 1월~1998년 4월, 현대전자 정보통신연구소
2000년 11월~현재, 과학기술정보통신부 국립전파연구원 4차산업기술팀
※관심분야: 드론, IoT, AI, 주파수특성 분석 등



반태원 (Tae-Won Ban)

1998년 2월 경북대학교 전자공학과 학사
2000년 2월 경북대학교 전자공학과 석사
2010년 2월 KAIST 전기및전자공학과 박사
2000년 2월 ~ 2012년 8월 KT 네트워크 부문
2012년 9월 ~ 현재 경상국립대학교 정보통신공학과 교수
※관심분야: 이동통신, 자원관리, 간섭관리, 협력 및 중계통신, 인지통신, 주파수 공유, 차세대 이동통신 시스템