

해상 풍력 발전기 안전관리를 위한 UAV 활용 방안

김민진, 김유정, 김수진, 김태민, *정성윤
영남대학교 전자공학과

jina980717@yu.ac.kr, zowha989@yu.ac.kr, sujin38@yu.ac.kr, dst05054@ynu.ac.kr, *syjung@ynu.ac.kr
(*:교신저자)

A study on the safety management of offshore wind generator with UAV

Min-Jin Kim, Yu-Jeong Kim, Su-Jin Kim, Tae-Min Kim, *Sung-Yoon Jung
(*:corresponding author)
Dept. of EE, Yeungnam Univ.

요약

최근 화석 에너지를 대체할 친환경 에너지 사업에 대한 관심이 늘고 있다. 그 중 해상 풍력발전기는 해안에서 멀어질수록 발전이 유리하지만, 접근성이 떨어져서 지속적인 관리가 비효율적이다. 따라서 본 논문은 FSO 와 OCC 기술을 적용한 UAV 를 기반으로 해상 풍력발전기의 상태 파악 및 안전관리를 위한 체계를 제안하고 이와 관련된 동향 조사 및 연구 방향을 도출하였다.

I. 서론

최근 지구 온난화로 인한 이상기후가 생태계 파괴를 야기했고 이를 해결하기 위해 화석 에너지를 대체할 친환경 에너지 사업이 각광받고 있다. 다양한 친환경 에너지 사업 중 대표적으로 풍력발전이 있다. 풍력 발전은 단위 면적 당에 대한 발전량을 크게 확보할 수 있다. 일반적으로 해상 풍력 발전은 육상 풍력보다 입지 제약에 있어서 비교적 자유롭다. 해상 풍력 중에서도 부유식 해상 풍력 발전은 깊은 수심에서도 설치가 가능하고 해상 풍력 단지의 규모 확대가 가능하다. 뿐만 아니라 해안에서 멀어질수록 풍속이 높고 바람이 균일해 진다는 점에서 에너지 발전이 유리하다. 하지만, 해안에서 멀어질수록 풍력발전기로의 접근이 어려워져 상태 파악 및 안전관리가 힘들어진다.

이에 따라 본 논문에서는 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)을 이용하여 풍력 발전기에 접근한 후 내장된 카메라 등을 이용하여 발전기의 상태를 확인하고 이 정보를 수신 받기 위해 FSO(Free Space Optics) 와 OCC(Optical Camera Communication) 기술을 결합한 풍력발전기 관리 체계(Operation and Maintenance ; O&M)를 제안한다.

II. 본론

그림 1 은 제안된 체계를 도식화하였다. 해상 풍력 발전기를 관리하기 위해서 주기적으로 드론이 발전기 단지를 순회하도록 한다. 드론은 순회를 하는 동안에 OCC 를 이용해서 문제가 있는 풍력 발전기의 위치와 문제 유무에 대한 정보를 얻는다. 이 정보를 기반으로 문제가 있는 발전기 주변으로 다가가 내장된 카메라로 문제(균열, 도색 벗겨짐 등)가 있는 발전기의 상태를 확인한다. 드론이 카메라로 얻은 문제점을 FSO 를 이용하여 드론에서 발전기로 정보를 전송한다. 발전기는 받은 정보를 PLC(Power Line Communication) 를 이용하여 BBU(Base-Band Unit)로 전달한다. PLC 는 전력전송선을 통해서 전력뿐 아니라 데이터도 FSK(Frequency Shift Keying) 을 이용하여 함께 전송하는 기술이다. 이때 전송되는 신호는 풍력발전기의 제어장치(터빈의 속도제어 장치, 브레이크, Pitch 시스템 등)와 발전장치, 그리고 센서 이상에 대한 정보 및 발전량에 대한 정보를 포함한다.

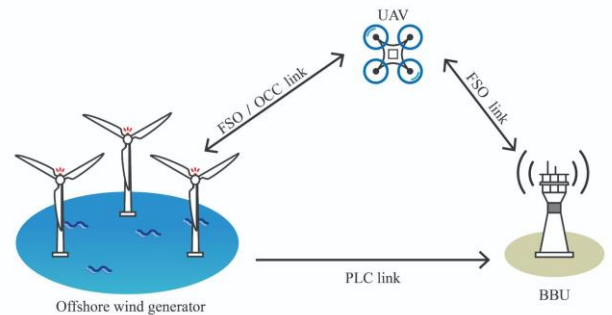


그림 1. UAV 기반 FSO & OCC 네트워크 구성도

1. OCC

OCC (Optical Camera Communication)는 LED 를 송신, 카메라를 수신단으로 하는 통신이다. 가시광 영역의 파장을 사용하기 때문에 기존의 주파수 할당의 문제가 없다. 가로등, 차량의 램프 등과 같은 LED 기반의 기존 인프라들의 기능을 유지하면서 사용하기에 비용적인 측면에서 좋고, 저 전력 소비에 수명이 길다는 장점이 있다[1,3]. 발전기의 LED 의 고속 플리커를 이용해 켜지면 1, 꺼지면 0 인 것을 이용한다. 또 OCC 는 LED 의 위치와 카메라 센서 크기 등을 고려하여 거리를 측정할 수 있다[1]. 드론이 풍력 발전기에 너무 가까이 접근하는 것을 방지할 수 있고, 발전기들의 위치를 추정할 수도 있다[2-4].

이러한 LED 를 검출하기 위해 딥러닝 기술을 도입할 수 있다. 마스크의 유무를 확인하는 것과 유사하게 small target detection 기술을 이용하여 LED 를 검출한 후 LED 의 On/OFF 을 확인할 수 있다[5]. OCC 를 기반으로 한 V2V (Vehicle-to-Vehicle) 통신에서 광신호는 LED 어레이를 이용하여 전송되고 카메라를 이용하여 수신되는데, 복잡한 장면에서 실시간으로 LED 를 정확하게 감지하고 인식하는 것이 어렵다. 따라서 딥러닝을 통해 LED 어레이 위치를 실시간으로 정확하게 감지하고 모션 블러를 동시에 완화할 수 있다[6-7].

다음으로 [8-9]는 OCC 의 수신신호로부터 원신호를 복원할 때 측정 신호가 down-sampled 되더라도 정확하고 효율적으로 데이터 복원이 가능하다는 것을 제안한다. 최대 주파수보다 최소 2 배 이상의 높은 표본화 주파수를 사용해야 원신호

복원이 가능하다는 기존 Nyquist-shannon sampling 이론과는 달리 압축센싱(compressed sensing)은 원신호가 sparse 하다면 더 적은 표본화 주파수로도 손실없이 신호 복원이 가능하다는 이론이다. 송신단의 LED에서는 매우 빠른 속도로 sparse한 PN code(Pseudorandom Noise Code)가 보내지며 수신단의 카메라는 Nyquist rate보다 더 낮은 샘플링률에서 안정적으로 원 데이터를 잘 검출한다.

ADR(Achievable Data Rate)은 통신 성능의 지표로써 단위 시간당 달성할 수 있는 최대의 데이터 비트 수를 나타내며, 이 값이 높을수록 통신 성능이 좋다. OCC 수신단에서 ADR(Achievable Data Rate)을 높이기 위한 세가지 방법을 제안한다[10-14]. 첫번째로, CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 이미지 센서를 탑재한 rolling shutter camera를 이용한 방법이다[10-12]. 전체 pixel row를 한번에 노출시키는 global shutter와는 다르게 rolling shutter는 각각에 대한 row의 time을 달리 두어 top-bottom 방향으로 순차적으로 노출시킨다. 송신단의 주사율에 비해 수신단의 프레임율을 높게 두면 rolling shutter effect가 발생하는데 이를 이용해 수신율을 증가시킬 수 있다. 송신단은 다양한 변조기법을 기반으로 다양한 레벨의 LED dimming에 따라 심볼을 송신하고 수신단은 CMOS 카메라의 롤링셔터 현상을 사용하여 LED의 ON/OFF 신호를 읽고 데이터를 획득한다. 두번째로, D2C(Display-to-Camera) link에서 사용하기 쉬운 short-range communication인 CCB-OCC(Complimentary Color Barcode-OCC)이다[13]. 보색 관계를 가지는 색들로 디자인된 컬러바코드에 데이터를 인코딩한 후 이를 송신하게 되면, 사람의 눈은 인식할 수 없으나 카메라가 탑재된 디바이스들은 감지할 수 있다는 특성을 이용하였다. 만약 풍력발전기의 LED를 color pattern으로 보낼 수 있다면 발전기의 이상 상태 정보를 더욱 더 다양하게 표현할 수 있을 것이다.

마지막으로 딥러닝 기반의 관심 영역(Region-of-Interest ; ROI) 검출기를 이용하면 OCC 기반 V2I의 데이터 패킷 수신율을 향상시킬 수 있다. V2I(Vehicle-to-Infrastructure) 환경에서 길가의 신호등은 OCC 데이터를 전송하는 송신기 역할을 하는 ROI이며 수신 카메라에서 감지되어야 한다. ROI 디렉터가 딥러닝 모델을 활용하면 실제 운전 중에 데이터를 안정적으로 추출할 수 있다. 딥러닝 기반 ROI 검출 기법을 이용하면 데이터 패킷 수신률이 기존의 영상 미분 기반 방식보다 우수한 성능을 낼 수 있다[14].

2. FSO

FSO는 Free Space Optical Communication의 약자로, 에너지가 높은 Laser Diode와 반응성이 높은 Photo Diode를 이용해서 통신하는 것으로, RF가 아닌 가시광선 영역대를 주로 이용한다는 특이점이 있다. Laser를 이용함에 따라 좁은 범위에서만 인식이 가능하다는 특징이 있는데, 이러한 점은 여러개의 풍력발전기가 모여있는 상황에서 간섭에 의한 통신 성능 저하를 방지할 수 있다는 장점이 될 수 있다. 해상 풍력발전기 주변에서의 통신은 날씨를 고려하는 것이 필수적인데, UAV를 통신의 주체로 이용함에 따라 그에 따른 바람의 영향에 따른 통신의 정렬(alignment)을 일반적인 용도에 비해 더 많이 고려할 필요가 있다. 해상 환경의 경우 일반적으로 강수량이 높고, 대기중의 습도가 높다. 따라서 이러한 환경에 대한 통신 성능 저하에 대한 대응책이 필요하다. 또한 앞서 언급한 부유식 풍력발전기의 경우 해류의 흐름에 따라 풍력발전기의 통신 터미널이 움직인다는 것을 고려할 필요가 있다. 다른 광 통신에 비해서 통신매개체로 레이저를 이용하므로 송신단에서 수신단으로 데이터를 전달했을 때의 단면적이 좁기 때문에 정렬을 맞추는 것이 특히나 더 중요하다. 이를 해결하기 위해서 두가지 방법이 있을 수 있는데, 지속적인 움직임에 대해서 송신단에서 지속적으로 변하는 수신단의 위치에 따라 신호를 다른 곳으로 보내는 것과, 처음 위

치를 잡은 이후 주변환경에 따라 지속적으로 위치가 변하는 수신단이 원래의 자기 위치로 되돌아오는 것이다. 먼저 송신단에서 수신단으로 정확하게 보내기 위해서는 드론의 실시간으로 위치를 검출할 필요가 있다. 실시간 드론 검출을 위해 딥러닝 기술을 이용한다면 다양한 환경에서도 검출을 가능하게 할 수 있다. 이때 많은 양의 훈련 이미지 및 구체적으로 드론을 더 잘 수용할 수 있는 YOLO 기법을 이용하여 실시간 드론 검출을 가능케 한다[15]. [16]에서 수신단인 UAV가 여러 개의 FSO 링크를 이용해서 기기 자체의 회전 정도, 이동 정도에 대한 정보를 수집하고 사전에 입력해 놓은 모터의 출력과 장치의 무게중심 정보를 이용해서 자동으로 정렬을 맞추는데 필요한 모터의 제어를 할 수 있음을 보인다.

이 두가지를 이용해서 송/수신단의 정렬을 보다 정확하게 맞출 수 있을 것으로 기대된다. 날씨와 관련해서는 일반적으로 비가 오는 환경에서의 신호 감쇠를 고려할 수 있다. 이러한 환경은 빛의 산란 혹은 굴절 등에 의해서 신호의 감쇠가 발생하기 쉬울 수 있다[17]. 극단적으로 150 mm/h의 폭우가 내리는 경우에는 약 20dB의 신호 감쇠가 발생할 수 있다. 이에 대응하기 위해 SDM(Space Division Multiplexing)을 이용할 수 있다. 해당 통신 방식은 서로 다른 공간적 특성을 띄는 레이저를 이용하여 각각의 통신 성능이 떨어지는 상황에 대해서 보완해 줌으로써 채널의 SINR(Signal to Interference & Noise Ratio)이 25dB 아래로 떨어지지 않게 해줄 수 있다. 또 이를 통해서 기존의 통신 방식에 비해서 BER(Bit Error Rate)을 38~55% 정도 향상시킬 수 있다 [18]. 추가로 안개의 경우 안개 입자의 크기가 FSO 신호의 파장과 비슷하여 Mie 이론에 따라 큰 신호 감쇠가 발생할 수 있다[19]. 이에 따라 너무 먼 거리에 대한 FSO를 지상 기지국과 드론 사이에 구성하기에는 어려움이 있을 것으로 고려되어 아직은 RF대역을 이용한 통신이 적합할 것으로 보인다. 하지만, 드론과 풍력발전기 사이의 거리는 도착했을 때 기준 그다지 멀지 않기 때문에 그런 문제점들이 크게 작용하지 않고, 에너지를 효과적으로 전달할 수 있어 무선 충전을 원활하게 할 수 있기 때문에 드론과 풍력발전기 사이의 통신에는 FSO를 이용하는 것이 적합할 수 있다. FSO를 통해 에너지 전달을 하기 위해서는 별도의 에너지 수확 모듈을 수신기에 추가해야 하는데, 패시브 소자인 쇼트키다이오드와 저역통과필터가 포함되고, 추가적인 알고리즘 없이 회로 기법만으로 DC 전류를 얻을 수 있다. 이러한 에너지는 채널의 상태, 정렬에 의한 손실, 변조기법 등을 고려해야 할 필요가 있다. 앞의 두가지의 경우 앞서 제안한 여러 방법을 통해서 높일 수 있고 변조기법의 경우는 일반적으로 많이 쓰이는 OOK(On-Off Keying) 변조 기준으로 OFF에 해당하는 신호를 전달할 때 0의 신호가 아닌, 피크 에너지 보다 작은 에너지를 가진 신호를 전달함으로써 에너지 수확량을 늘릴 수 있게 된다. 다만 이러한 에너지 수확은 거리가 증가함에 따라 기하급수적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있기에 적당한 합의점을 찾을 필요가 있다[20].

III. 결론

본 논문은 사람이 직접 가지 않고 풍력발전기의 상태를 확인하기 위해서 UAV를 이용한 새로운 안전 관리 시스템을 제안한다. 우선 OCC를 이용하여 문제가 있는 발전기의 위치를 파악하고, 드론에 내장된 카메라를 통해 얻은 문제 정보를 FSO를 이용하여 풍력발전기로 전달한다. 특히 이러한 문제 정보들을 딥러닝 기술을 활용해 검출할 때 강한 광점, 그림자 및 매우 얇은 균열 등 다양한 조건에서의 훈련 이미지를 사용한다면 실제 상황에서 더 정확하게 균열 등의 문제를 찾을 수 있다.

본 논문의 본문에서는 OCC는 발전기의 LED를 통해 위치를 추정할 때 이용할 수 있고, small target detection 기술을 이용해 LED 검출을 향상시킬 수 있다. 그리고 압축센싱을 기반으로 한 데이터 검출 기법 및 ADR을 높일 수 있는 세가지 방

법들을 소개하였다. 첫 번째는 CMOS 이미지 센서를 탑재한 rolling shutter camera 를 이용한 방법, 두 번째는 D2C link 에서 사용하기 쉬운 CCB-OCC 이다. 마지막으로 딥러닝 기반의 관심 영역 ROI 검출기를 이용하면 OCC 기반 V2I 의 데이터 패킷 수신율을 향상시킬 수 있다.

FSO 는 앞서 카메라를 이용하여 얻은 문제 정보들을 풍력 발전기로 전달해 준다. 인식 범위가 좁은 FSO 를 유동적인 움직임의 UAV 를 이용해서 구성함에 따라 주변 환경의 변화에 능동적으로 대응하여 정렬을 유지시킬 필요가 있다. 따라서 이를 구현하기 위한 기반 기술들을 소개하였고, 나아가 바다 위라는 상황적 특성을 고려해서 비가 많이 오는 경우에 대한 FSO 성능 향상을 위한 방법을 알아보았다. 또 고에너지의 레이저를 사용하는 FSO 를 사용할 때 쇼트키다이오드를 적용해서 전달되는 레이저 신호의 에너지의 일부를 저장하는 방식을 활용함에 따라 SLIPT(Simultaneous Light-wave Information and Power Transfer)를 구현할 수 있음을 확인하였다. 이를 이용한다면, 상황에 따라 장기간 비행해야 하는 경우 FSO link 를 통해서 비상 충전이 가능하게 할 수 있다. 만약 송전선을 통한 정보 전송에 문제가 있을 시, 풍력발전기에서 드론 쪽으로 통신에 문제가 있다는 정보를 FSO link 를 통해서 에너지와 함께 전송하고 BBU 와의 FSO 통신을 시도해본다. 수신도가 별로 좋지 않을 경우 드론은 기지국으로 복귀하여 이러한 비상 상황에 대처할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022 년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0017011, 2022 년 산업혁신인재성장지원사업)이며 산업통상자원부(MOTI E)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(20214000000010, 경북지역 풍력에너지 클러스터 인재양성사업) 및 2022 학년도 대학혁신지원사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참 고 문 헌

- [1] Yun, S.K.; Jeon H. J.; Jung, S.Y. "Inter-vehicular Distance Estimation Scheme Based on VLC using Image Sensor and LED Tail Lamps in Moving Situation" The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers 2017, Vol. 66, No. 6, pp. 935-941.
- [2] Kim, B.W.; Song, D.W.; Lee, J.H.; Jung, S.Y. "VLC Based Positioning Scheme in Vehicle-to-Infra(V2I) Environment" The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences 2015, 15-03 Vol.40 No.03.
- [3] Jeon, H.J.; Yun, S.K.; Jung, S.Y.; Kim, B.W. "Optical Camera Communication Based Lateral Vehicle Position Estimation Scheme Using Angle of LED Street Lights" The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers 2017, Vol. 66, No. 9, pp. 1416-1423.
- [4] P. Singh.; Jeon, H.J.; Yun, S.K.; Kim, B.W.; and Jung, S.Y. "Vehicle positioning based on optical camera communication in v2i environments, " Computers, Materials & Continua, vol. 72, no.2, pp. 2927-2945, 2022.
- [5] Zhao, Yu, Yuanbo Shi, and Zelong Wang. "The Improved YOLOV5 Algorithm and Its Application in Small Target Detection." International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Springer, Cham, 2022.
- [6] Sun, X.; Shi, W.; Cheng, Q.; Liu, W.; Wang, Z.; Zhang, J. "An LED Detection and Recognition Method Based on Deep Learning in Vehicle Optical Camera Communication" IEEE Access 2021, 9, 80897-80905
- [7] Cheng, Qing, Haitao Ma, and Xu Sun. "Vehicle LED detection and segmentation recognition based on deep learning for optical camera communication" Optoelectronics Letters 18.8 (2022): 508-512.
- [8] Kim, B.W.; Jung, S.Y. "Novel flicker-free optical camera communications based on compressed sensing" IEEE Commun. Lett. 2016, 20, pp. 1104-1107.
- [9] Kim, B.W.; Jung, S.Y. "Dimming control technique for compressed sensing-based optical camera communications" Photonic Network Communications, 2018, 36, pp. 165-173.
- [10] Kim, B.W.; Jung, S.Y. "Transition-based Data Decoding for Optical Camera Communications using a Rolling Shutter Camera" Curr. Opt. Photonics 2018, 2, pp. 422-430.
- [11] Kim, B.W.; Yoo, J.H.; Jung, S.Y. "Design of Streaming Data Transmission Using Rolling Shutter Camera-Based Optical Camera Communications" Electronics 2020, 9, 1561.
- [12] Kim, C.Y.; Heo, J.H.; Jung, S.Y. "LED Broadcasting System Based on Rolling Shutter Effect" KICS, 2019, 44, pp. 1686-1689.
- [13] Jung, S.Y.; Lee, J.H.; Nam, W.; Kim, B.W. "Complementary Color Barcode-Based Optical Camera Communications" Wirel. Commun. Mob. Comput. 2020, 2020, 3898427.
- [14] Choi, D.N et al. "Deep learning technique for improving data reception in optical camera communication-based V2I. " 2019 28th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN). IEEE, 2019.
- [15] Wu, Manjia, et al. "Real-time drone detection using deep learning approach." International Conference on Machine Learning and Intelligent Communications. Springer, Cham, 2018.
- [16] A. Kaadan; H. H. Refai; P. G. LoPresti, "Multielement FSO Transceivers Alignment for Inter-UAV Communications, " in Journal of Lightwave Technology, vol. 32, no. 24, pp. 4785-4795, 15 Dec.15, 2014, doi: 10.1109/JLT.2014.2364795.
- [17] D. Kedar; S. Arnon, "Urban optical wireless communication networks: the main challenges and possible solutions, " in IEEE Communications Magazine, vol. 42, no. 5, pp. S2-S7, May 2004, doi: 10.1109/MCOM.2004.1299334.
- [18] E. Verdugo; R. Nebuloni; L. Luini; C. Riva; L. d. S. Mello; G. Roveda, "Rain Effects on FSO and mmWave Links: Preliminary Results from an Experimental Study, " 2020 29th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/WOCC48579.2020.9114936.
- [19] S. A. Al-Gailani et al., "A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks, " in IEEE Access, vol. 9, pp. 7353-7373, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048049.
- [20] Álvarez-Roa, C.; Álvarez-Roa, M.; Martín-Vega, F.J.; Castillo-Vázquez, M.; Raddo, T.; Jurado-Navas, A. "Performance Analysis of a Vertical FSO Link with Energy Harvesting Strategy" Sensors 2022, 22, 5684. <https://doi.org/10.3390/s22155684>