

광무선 전력 전송을 위한 Pan-Tilt 카메라 스캔 시스템에서 다중 객체 추적 기법

이희준, 빈경민, 김수민, 김준수*

한국공학대학교

E-mail: {gmlwns2279, been1996, suminkim, *junsukim}@tukorea.ac.kr

Multi-Object Tracking Scheme in a Pan-Tilt Camera Scanning System for Optical Wireless Power Transmission

Hee June Lee, Gyoungmin Been, Su Min Kim, Junsu Kim*

Tech University Of Korea

요약

본 논문은 pan-tilt 구동 기반의 광무선 전력 전송 (OWPT) 시스템에서 수신부를 효율적으로 탐색하고 추적하기 위한 새로운 다중 객체 추적 기법을 제안한다. 기존 영상 기반 추적 기법들은 프레임 간 객체의 이동이 연속적이라는 가정하에 수행되므로, 넓은 범위를 탐색하기 위해 시점이 급격하게 변화하는 환경에서는 적용이 까다롭다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 스캔 경로를 활용한 데이터 연관 기법을 제안한다. 또한, 카메라 시점 변화에 따른 외형 왜곡에 강인하도록 타겟 관심영역 (ROI)을 균등 격자로 분할하여 색상 및 형태 특징을 추출하고, 헝가리안 알고리즘을 통해 전역매칭을 수행한다. 실내 환경에서의 실험 결과, 94.5%의 높은 정확도를 달성하여 레이저 전송시스템에서의 타겟 검출의 안정성을 입증하였다.

I. 서론

최근 IoT 센서 및 드론과 같은 모바일 디바이스의 전력 공급 문제를 해결하기 위해, 원거리에서 고출력 에너지를 전송할 수 있는 광무선 전력 전송 (OWPT, optical wireless power transmission) 기술이 주목받고 있다. 레이저를 매개체로 한 OWPT 시스템에서는 전력을 수신할 디바이스 (수신부)의 위치를 정확하게 파악하고 지속적으로 추적하는 기술이 필수적이다 [1]. 이를 위해 본 논문에서는 넓은 공간을 저비용으로 커버하면서, 카메라 각도를 빠르게 전환할 수 있어 조준, 정렬 등에서 적합한 pan-tilt 카메라를 객체 추적에 사용한다. Pan-tilt 카메라를 이용해 전역 스캔하여 데이터를 수집하는데 [2], 넓은 서비스 영역을 신속하게 커버하기 위해 높은 각도로 스캔할 경우, 프레임 간 타겟의 위치가 불연속적으로 변하는 문제가 발생한다. 대표적인 다중 객체 추적 (MOT, multi-object tracking) 알고리즘인 SORT는 객체의 이동이 연속적이고 프레임 간 IoU (intersection over union)가 존재한다고 가정한다 [3]. 따라서 스캔 각도가 커져 이전 프레임과 현재 프레임 간의 타겟 위치가 겹치지 않는 경우, 서로 다른 타겟으로 오인하거나 추적이 단절되는 한계가 존재한다. 본 논문에서는 이러한 스캔 환경에서의 한계를 극복하기 위해, 스캔 경로의 인접성을 활용한 새로운 다중 객체 추적 기법을 제안한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시스템은 그림 1과 같이 레이저 조준을 수행하는 송신부와 5-10m 거리 내에 무작위로 배치된 4개의 수신부로 구성된다. 송신부는 pan-tilt 구동부와 RGB 카메라, LED 모듈, 레이저 모듈이 결합된 형태이다. 수신부는 인식을 위한 빨간색 재귀반사필름과 에너지 전환을 위한 photovoltaic (PV)으로 구성되어 있다. 송신부는 영역을 커버하기 위해 부스트로페온 패턴을 따라 전역 스캔을 수행한다. Pan-tilt가 15° 단위로 이동하며 정지하면, 카메라는 해당 시점에서 송신부의 LED를 켜 프레임과 끈 프레임을 획득하여 두 프레임의 차이를 학습한 YOLOv11 모델을 통해 수신부를 인식한다. 인식된 수신부들을 이전 프레임 후보들과 비

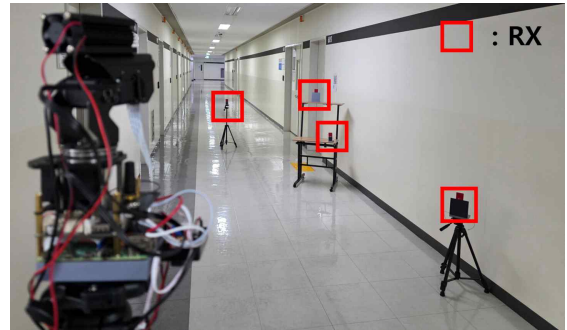


그림 1. 다중 객체 추적 실험 환경

교하여 동일 타겟 여부를 판별하고, ID를 부여하여 데이터를 저장한다.

III. 제안 다중 객체 추적 기법

제안 시스템은 15° 단위의 전역 스캔을 수행하므로, 프레임 간 시점 차이가 커져 타겟의 위치가 비연속적으로 변화한다. 이는 일반적인 IoU 기반 추적 알고리즘의 실패를 유발한다. 본 논문에서는 스캔 경로 기반 데이터 연관과 교사인 유사도를 통한 다중 객체 추적 알고리즘을 제안한다.

A. 스캔 경로 기반 데이터 연관

Pan-tilt가 15°씩 이동하며 전역 스캔을 수행할 경우, 시간적으로 연속된 프레임이라 하더라도 타겟의 좌표 변화가 매우 크고 비연속적이다. 이러한 한계를 극복하기 위해 스캔 경로의 논리적 인접성을 활용한다. 현재 스캔 위치의 인덱스를 $(Pan_t, Tilt_t)$ 라고 할 때, 데이터 연관을 위한 탐색 후보군 S 는 다음과 같다.

$$S = \{ (Pan_{t-1}, Tilt_t), (Pan_t, Tilt_{t-1}), (Pan_{t-1}, Tilt_{t-1}), (Pan_{t-2}, Tilt_t), (Pan_{t+1}, Tilt_{t-1}) \} \quad (1)$$

제안 다중 객체 추적 기법은 현재 위치에서 검출된 타겟을 S 에 포함된 이전 데이터들과 비교한다. 이를 통해 시야각 변화로 타겟의 프레임 내 좌표가 급격하게 변하더라도 타겟의 ID를 정확하게 비교할 수 있다.

B. 특징 추출 및 매칭

검출된 타겟의 재식별을 위해 색상 및 밝기 정보를 결합한 특징 벡터를 추출하고, 이를 기반으로 코사인 유사도를 산출하여 타겟간 연관성을 평가한다. 우선, 프레임 전체를 처리하는 대신, 사전 학습한 모델을 통해 검출된 타겟별 ROI (region of interest)를 기반으로 특징을 추출한다. ROI를 활용함으로써 배경 노이즈의 간섭을 줄이고, 특징 추출을 타겟 영역으로 제한시켜 연산량을 효율적으로 줄일 수 있다. 추출된 ROI 내에서 타겟의 고유 특징을 수치화하기 위해 HSV, grayscale 에서의 히스토그램을 추출한다. 이 때, 히스토그램은 공간 정보를 보존하기 위해 ROI를 균등한 격자로 분할하여 히스토그램을 추출한다. HSV 히스토그램은 색상 정보의 표현을 위해 H (hue)는 18개 S (saturation)는 25개의 bin으로 나누어 2차원 히스토그램을 추출하고, grayscale은 타겟의 형태적 특징 표현을 위해 25개의 bin 으로 나누어 히스토그램을 추출한다. 각 히스토그램은 정규화 과정을 거친다. 이를 통해 벡터 내 각 요소가 유사도 계산 시 균등한 기여도를 갖도록 보정할 수 있다. 정규화된 격자별 히스토그램을 순차적으로 결합 (concatenate)하여 타겟의 특징 정보를 담은 벡터 V 를 형성한다. 현재 프레임에서 인식된 타겟 A의 특징 벡터와 식(1)의 후보군 내 과거 타겟 B 와의 유사도는 코사인 유사도를 통해 다음과 같이 계산된다.

$$\text{Similarity (A,B)} = \frac{V_A \cdot V_B}{\|V_A\| \|V_B\|} \quad (2)$$

현재 프레임 에서의 검출된 타겟들과 후보군 내 과거 타겟들과의 모든 유사도를 계산한 후, 일반적인 다중 객체 추적과 마찬가지로 헝가리안 (Hungarian) 알고리즘을 사용하여 모든 검출 결과와 모든 기존 경로 간의 전역 최적화를 수행한다 [4]. 이 때, 일정한 유사도 값을 넘지 못했을 경우, 새로운 타겟으로 판단한다. 마지막으로 15° 단위의 스캔 특성상 타겟의 시점이 급격하게 변하여 외형이나 색상이 급격하게 변해 추적이 일시적으로 중단되어 새로운 ID가 부여되는 트랙 파편화 (fragmentation)가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 추적 완료 후 ID 병합 과정을 수행한다. 병합 과정은 각 ID의 pan, tilt 좌표가 각각 일치하는 경우를 우선적으로 샘플링하여 각 ID를 대표하는 특징 벡터 간 코사인 유사도를 계산하고, 이 값이 설정된 임계값을 초과하면 두 ID를 동일한 타겟으로 판단하여 통합한다.

IV. 성능 평가

제안 기법의 실제 운용 성능을 검증하기 위해 실내 환경에서 5-10m 거리에 수신부를 배치하여 획득한 데이터셋을 활용하였다.

표 1은 제안 시스템의 성능 평가 결과를 보여준다. 성능 지표로는 다중 객체 추적의 표준 지표인 MOTA (MOT accuracy)를 사용한다. MOTA는 오검출 (FP, false positive), 미검출 (FN, false negative), ID 스위칭 (IDSW)를 종합적으로 고려하는 지표다. 실험 결과, 6회의 ID 스위칭이 발생하였으나. 오검출은 0건으로 94.5%의 높은 MOTA 점수를 달성하였다. 또한, ID 순도 (ID purity)를 100% 기록하여, 생성된 모든 ID 내부에 같은 타겟이 아닌 다른 타겟이 섞이지 않았음을 확인하였다.

표 1. 검증 결과

파라미터	값
실제 타겟 수	4 개
식별 타겟 수	10 개
MOTA	94.5 %
IDSW	6 회
ID Purity	100 %

표 2는 추적된 타겟 ID와 실제 ID 간 매핑결과이다. 검출 프레임수가 20회 이상인 타겟 ID가 수신부 4개를 정확하게 추적하고 있음을 나타낸다.

표 2. 타겟 ID 결과

타겟 ID	실제 ID	검출 프레임 수
0	0	26
1	1	21
2	2	20
3	3	27
4	2	1
5	3	2
6	0	1
7	2	6
8	1	4
9	3	2

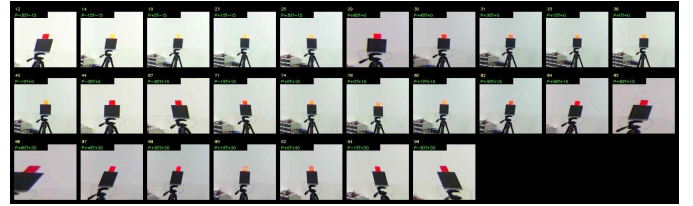


그림 2. 타겟 ID 3

그림 2는 가장 긴 프레임을 보인 타겟 ID 3의 추적 결과 예시이다. 타겟의 크기와 형태가 급격히 변화함에도 불구하고, 단일 ID로 안정적으로 추적되고 있음을 시각적으로 확인할 수 있다. 이는 스캔 경로 기반의 데이터 연관으로 후보군을 탐색하고, 격자 기반의 색상 및 형태 특징벡터가 타겟의 외형 변화에도 불구하고 오매칭을 효과적으로 배제했기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 pan-tilt 카메라를 활용한 레이저 기반의 무선 전력 전송 시스템에서 다중 객체 추적 기법을 제안하였다. 제안 기법은 기존의 칼만 필터 및 IoU 기반 추적 방식이 pan-tilt 카메라를 이용한 전역 스캔 방식에서의 대입이 어려운 점을 극복하기 위해 스캔 위치 인덱스 기반의 논리적 데이터 연관 방식을 도입하였고, 타겟의 ROI를 균등한 격자로 분할하여 색상 및 형태 히스토그램을 추출함으로써 카메라 시점 변화에 강인한 특징 매칭을 수행하였다. 실내 환경에서의 검증 결과, 제안 기법은 MOTA 94.5%의 높은 추적 정확도를 달성하여 그 우수성을 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원·학·석사 연계ICT핵심인재양성(IITP-2026-RS-2022-00156326, 100%)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] S. A. H. Mohsan, H. Qian, and H. Amjad, "A Comprehensive Review of Optical Wireless Power Transfer Technology," *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, vol. 24, no. 6, pp. 767-800, June 2023.
- [2] H. J. Lee, G. M. Been, S. M. Kim, and J. Kim, "Pan-Tilt Camera Control with Pixel-Angle Mapping for Laser Energy Transfer," in *Proc. KICS Fall Conf.*, Nov. 2025.
- [3] A. Bewley, Z. Ge, L. Ott, F. Ramos, and B. Upcroft, "Simple online and realtime tracking," in *Proc. IEEE ICIP*, Sep. 2016.
- [4] H. W. Kuhn, "The Hungarian method for the assignment problem," *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 2, no. 1-2, pp. 83-97, 1955.