

레이저 기반 에너지 전송을 위한 픽셀-각도 맵핑 방식의 Pan-Tilt 카메라 제어

이희준, 빈경민, 김수민, 김준수*

한국공학대학교

gmlwns2279@tukorea.ac.kr, been1996@tukorea.ac.kr, suminkim@tukorea.ac.kr, *junsukim@tukorea.ac.kr

Pan-Tilt Camera Control with Pixel-Angle Mapping for Laser Energy Transfer

Hee June Lee, Gyoungmin Been, Su Min Kim, Junsu Kim*
Tech University Of Korea

요약

레이저를 매개로 한 에너지 전송 시스템은 레이저를 수신부에 정확히 조준하는 기술이 핵심이다. 따라서 본 논문은 정밀한 제어를 위해 pan-tilt 카메라를 제어해 타겟을 프레임 내 임의의 조준점에 신속·안정하게 수렴하는 알고리즘을 제안한다. 고차원의 추정 없이 데이터 기반의 단순 선형 회귀만으로 조준을 수렴시키는 전역 스캔, 초기위치 추정, 추가 보정 3단계 기법을 제안하며, 제안된 기법을 통해 실제 pan-tilt 카메라가 타겟이 지정한 픽셀 오차 범위 안으로 수렴함을 확인할 수 있으며, 이를 통해 레이저 기반 에너지 전송에서 사용 가능성을 확인할 수 있다.

I. 서론

최근 무선 센서네트워크에서는 배터리 의존도를 줄이기 위한 에너지 전송이 핵심 기술로 부상하고 있다[1]. 본 연구는 무선 전력 전송에서 RF가 아닌 레이저를 매개로 한 에너지 전송 시스템 구축을 목표로 하며, 수신부에 레이저를 조준하는 기법을 제안한다. 레이저를 매개로 한 에너지 전송에서 송신부(레이저)와 수신부는 정확히 조준하는 것이 성능에 영향을 많이 끼친다[2]. 정밀한 제어를 위해 사용하는 pan-tilt 카메라는 넓은 공간을 저비용으로 커버하면서, 카메라 각도를 빠르게 전환할 수 있어 조준, 정렬 등에서 적합하다. 그러나 사용자가 원하는 좌표에 빠르고 안정적으로 조준하려면, 픽셀-각도 변환, 지연 등을 고려해야 한다. 본 논문에서는 정적 타겟의 콜드스타트 상황에서 데이터 기반으로 조준을 수렴하는 기법을 제안한다. pan-tilt 카메라로부터 얻은 데이터를 기반으로 타겟의 초기위치를 추정하고, 이후 추가 보정을 통해 오차 내의 조준점으로 타겟을 조준점에 수렴하게 한다.

II. 시스템 모델

본 논문의 시스템 모델은 그림 1의 (a)와 같이 pan-tilt 카메라와 타겟 그리고 데이터를 처리하는 서버로 구성되어 있다. 타겟은 재귀 반사 필름을 사용하여 더욱 인식이 쉬워지게 한다. 송신부의 동작은 pan-tilt 카메라를 이용한 전역 스캔으로 그림 1의 (b)와 같은 객체 인식을 통해 이미지 데이터를 수집한 뒤 서버로 데이터를 보내고, 서버에서 전송된 데이터를 바탕으로 수신부의 초기위치를 추정하고 송신부를 초기위치로 제어한 후 추가로 정밀보정하는 단계로 구성된다. 스캔 단계에서 카메라는 pan, tilt를 각각 15° 각도의 간격으로 조정하여 프레임을 획득한다. 이후 저장된 프레임을 이용한 객체 탐지를 통해 타겟의 중심을 산출한다. 초기위치 추정 단계에서는 스캔으로 얻은 데이터를 바탕으로 pan, tilt의 변화량이 각각 픽셀의 가로, 세로 변화량과 선형관계를 가정하여 기울기와 절편을 추정한다. 추정한 기울기와 절편을 바탕으로 사용자가 지정한 조준점에 대응되는 pan, tilt 값을 역산하여 초기위치 추정을 진행한다. 추가 보정 단계에서는 추정한 초기위치에서 조준점과 초기위치에서 인식한 타겟의 중심을 이용하여 추정한 기울기와 절편을 기반으로 추가 보정을 진행한다.

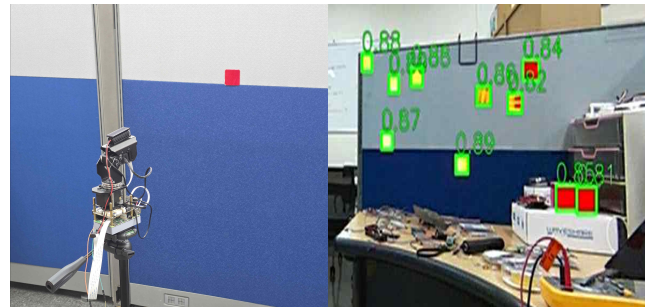


그림 1. 시스템 모델과 객체 인식.

III. 제안하는 기법

본 절에서는 전역 스캔으로 데이터 수집한 뒤, 수집한 데이터를 바탕으로 기울기와 절편을 추정한 후, 이를 이용해 초기위치 추정과 추가 보정으로 이어지는 절차를 자세히 설명한다. 그림 2는 전역 스캔을 통해 획득한 데이터를 기반으로, 각 pan 값을 고정한 상태에서 tilt 변화에 따른 타겟의 위치를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 tilt 값에 따라 타겟의 위치 변화가 일정한 비율로 증가하거나 감소하는 선형적인 경향을 확인할 수 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 선형성을 활용하여 tilt - pixel 간 관계를 선형 회귀 모델로 근사화하는 방법을 적용하였다.

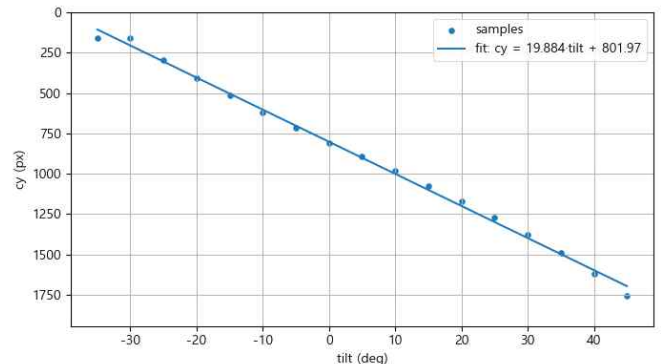


그림 2. tilt 값에 따른 cy값 변화 그래프.

A. 전역 스캔과 데이터 수집

전역 스캔은 pan-tilt 범위를 15° 의 간격으로 스캔을 진행한다. 스캔 패턴은 효율을 위해 boustrophedon 패턴을 채택하고, pan, tilt의 범위는 $-180^\circ \leq \theta_{\text{Pan}} \leq 180^\circ$, $-30^\circ \leq \theta_{\text{Tilt}} \leq 90^\circ$ 로 주어져 총 225개의 스캔 지점을 획득한다[3]. 카메라는 각 스캔 지점에서 프레임을 촬영하고, 프레임을 획득할 때마다 학습된 객체 탐지기로 타겟을 검출한다. 객체 탐지기는 YOLOv8을 사용한다[4]. 타겟이 검출되면 pan-tilt의 각도 $(\theta_{\text{Pan}}, \theta_{\text{Tilt}})$, Bounding box의 중심 픽셀 좌표 (cx, cy) , 타겟의 신뢰도 s 를 수집하여 저장한다.

B. 초기위치 추정

전역 스캔으로 얻은 데이터 중 의미 있는 데이터만 사용하기 위해 $s \geq 0.5$ 를 만족하는 데이터만 사용한다. cx 는 pan, cy 는 tilt 기준으로 각각 따로 처리하며, 데이터 개수로 가중 평균하여 최종 기울기와 절편 계수를 추정한다. 이때 계수 추정은 pan, tilt 중 한 동작만 사용한다. 유효한 데이터 중 같은 tilt에서 pan과 cx 의 관계식은 다음과 같다.

$$cx = a_{\text{Pan}}^{\theta_{\text{Tilt}}} \theta_{\text{Pan}} + b_{\text{Pan}}^{\theta_{\text{Tilt}}} \quad (1)$$

식(1)을 통해 선형 회귀방식으로 회귀하여 기울기와 절편인 $a_{\text{Pan}}^{\theta_{\text{Tilt}}}$ 과 $b_{\text{Pan}}^{\theta_{\text{Tilt}}}$ 을 각각 구할 수 있다. 각 tilt 별로 구한 후, 각 tilt 별 데이터의 수만큼 가중평균하여 최종 a_{Pan} 과 b_{Pan} 을 구할 수 있다. 이와 동일하게 유효한 데이터 중 같은 θ_{Pan} 에서 tilt와 cy 의 관계식은 다음과 같고

$$cy = a_{\text{Tilt}}^{\theta_{\text{Pan}}} \theta_{\text{Tilt}} + b_{\text{Tilt}}^{\theta_{\text{Pan}}} \quad (2)$$

이를 통해 최종적으로 a_{Tilt} 과 b_{Tilt} 을 구할 수 있다.

마지막으로 추정된 계수를 바탕으로 사용자가 지정한 조준점 (w^*, h^*) 에 대응되는 초기 위치인 θ_{Pan}^* , θ_{Tilt}^* 값을 다음을 통해 구할 수 있다.

$$\theta_{\text{Pan}}^* = \frac{w^* - b_{\text{Pan}}}{a_{\text{Pan}}}, \theta_{\text{Tilt}}^* = \frac{h^* - b_{\text{Tilt}}}{a_{\text{Tilt}}} \quad (3)$$

C. 추가 보정

계산한 초기위치로 이동한 뒤 타겟을 재검출 하여 조준점을 향해 추가 보정을 수행한다. 재검출 한 타겟의 bounding box의 중심 픽셀 좌표 (cx', cy') 와 (w^*, h^*) 의 차이를 이용하여 추가 보정을 진행한다. 초기위치 추정에서 구한 계수를 바탕으로 추가 보정치 $\Delta\theta_{\text{Pan}}$, $\Delta\theta_{\text{Tilt}}$ 은 다음과 같다.

$$\Delta\theta_{\text{Pan}} = \frac{(w^* - cx') - b_{\text{Pan}}}{a_{\text{Pan}}}, \Delta\theta_{\text{Tilt}} = \frac{(h^* - cy') - b_{\text{Tilt}}}{a_{\text{Tilt}}} \quad (4)$$

식(4)를 통해 얻은 값으로 $\sqrt{(w^* - cx')^2 + (h^* - cy')^2} \leq K$ 를 N 프레임 이 만족 할 때까지 반복한다. K와 N은 각각 사용자가 지정하는 허용 픽셀 오차의 합과 허용 픽셀 오차를 만족하는 프레임 개수이다.

IV. 성능 평가

본 절에서는 제안하는 기법을 검증하며, 표1의 파라미터를 사용한다. 조준점은 사용한 pan-tilt 카메라 프레임의 최대 크기인 2592, 1944의 중앙 값인 1296, 972로 지정한다.

표 1. 실험 파라미터.

파라미터	값
허용 픽셀 오차 (K)	5
프레임 개수 (N)	4
조준점 (w^*, h^*)	1296, 972

그림 3는 초기위치 추정과 추가 보정에서의 픽셀 오차 결과를 시간별 픽

셀 오차값으로 보여준다. 시간은 초기위치를 추정한 후 추정된 pan, tilt 값으로 제어 명령 이후부터 측정하였다. 초기위치 추정 결과로는 24.6의 픽셀 오차가 나타났고 제어까지 걸린 시간은 총 0.809초가 걸렸다. 이후 추가 보정 구간에서 허용 픽셀 오차인 5 근처에서 진동하다가 추가보정 종료 조건인 픽셀 오차값 미만이 4번 반복함에 따라 초기 위치추정 이후 16.25초에 종료되었고, 픽셀 오차값은 점차 줄어들다가 보정이 끝난 후 bounding box의 값이 미세하게 바뀔에 따라 2와 3 사이에 수렴한 것을 확인할 수 있다.

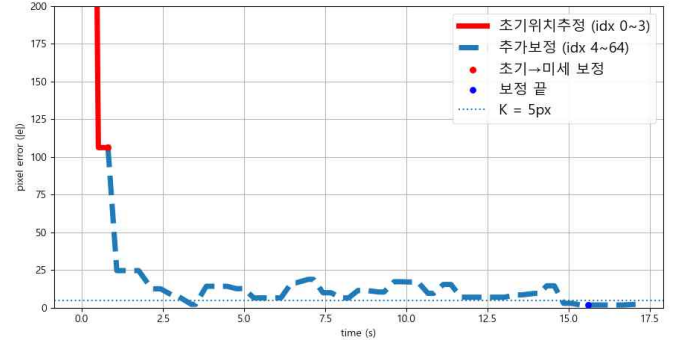


그림 3. 시간별 픽셀 오차 그래프.

V. 결론

본 논문에서는 레이저를 매개로 하는 에너지 전송 시스템에서 성능에 가장 큰 영향을 미치는 레이저와 타겟의 조준 문제를 해결하기 위해 3단계로 나누어 사용자가 원하는 픽셀에 타겟의 위치를 만족시키는 pan, tilt 값을 구하는 기법을 제안했다. 각 단계는 전역 스캔과 데이터 수집, 초기위치 추정, 추가 보정으로 이루어져 있다. 제안하는 기법은 일정 각도 만큼 pan, tilt를 제어해 전역 스캔 후, YOLO를 이용한 객체 탐지를 하여 인식된 타겟을 데이터화 했다. 이후 유효한 데이터를 통하여 사용자가 원하는 픽셀에 타겟이 위치하는 pan, tilt 값을 선형 회귀를 통해 역산하고 추가 보정을 통해 보다 세밀하게 픽셀 오차를 수렴시켰다. 그 후 실제 환경에서 pan-tilt 카메라를 제어하였으며 이를 통해 레이저를 매개체로 하는 에너지 전송 시스템에서 정밀한 조준의 유효성과 실시간 적용 가능성을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 과학사업(ICT핵심 인재양성 지원(IIMP-2025-RS-2022-00156326, 50%))과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2021R1A2C1013150, 50%)을 받아 수행된 연구임

참고 문헌

- [1] C. R. Valenta and G. D. Durgin, "Harvesting Wireless Power: Survey of Energy-Harvester Conversion Efficiency in Far-Field, Wireless Power Transfer Systems," in IEEE Microwave Magazine, vol. 15, no. 4, pp. 108-120, June 2014
- [2] J. Kang, X. Liu and L. Sun, "Enhancing Alignment Accuracy in Laser Wireless Power Transmission Systems Using Integrated Target Detection and Perturbation - Observation Method," Photonics, vol. 11, no. 11, Art. no. 1094, Nov. 2024.
- [3] Choset, H., Pignon, P. (1998). Coverage Path Planning: The Boustrophedon Cellular Decomposition. In: Zelinsky, A. (eds) Field and Service Robotics. Springer, London.
- [4] <https://docs.ultralytics.com/ko/models/yolov8/>