

컴퓨터 비전 기반 빔 정렬 기법을 적용한 무선 광통신 시스템의 성능 분석

김종민, 박기홍*, 고영채, Mohamed-Slim Alouini*

고려대학교, *King Abdullah University of Science and Technology
{botboy0441, koyc}@korea.ac.kr, *{kihong.park, slim.alouini}@kaust.edu.sa

Free Space Optical Communication Utilizing a Computer Vision-Based Beam Pointing Method

Jong-Min Kim, Ki-Hong Park*, Young-Chai Ko, Mohamed-Slim Alouini*

Korea Univ., *King Abdullah University of Science and Technology

요약

본 논문은 카메라가 장착된 무선 광통신 시스템에서 카메라만을 이용하여 빔 정렬 오차를 보정하는 방법을 제안한다. 실시간 영상 분석을 위하여 컴퓨터 비전 분야에서 널리 사용되는 KLT(Kanade-Lucas-Tomasi) 트래커 기법을 적용한다. 임의의 움직임이 존재하는 샘플 영상을 제작하여, 이를 KLT 트래커 기법으로 추적하는 무선 광통신 상황을 가정한다. 그 결과, 모터 제어가 이상적으로 동작하고 다른 채널 손실 요인이 없는 조건에서 신호 대 잡음비 마진을 약 15dB 개선하는 우수한 빔 추적 성능을 확인한다.

I. 서론

무선 광통신 시스템은 1,550nm 레이저를 이용한 통신으로, 기존 RF (radio frequency) 통신과 달리 주파수 사용권의 제한을 받지 않는다. 이로 인해 통신 비용을 획기적으로 절감할 수 있으며, 넓은 대역폭을 자유롭게 활용할 수 있어 초고속 통신이 가능하다는 장점이 있다. 그러나, 레이저 빔은 수 cm 수준의 매우 좁은 빔 폭을 가지기 때문에 송수신기의 빔 정렬 성능이 시스템 전체 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되어 왔다. 따라서 안정적인 무선 광통신 시스템 구축을 위해서는 고성능의 빔 정렬 기술이 필수적이다 [1].

무선 광통신의 일반적인 빔 정렬 과정은 크게 CP(coarse pointing)와 FP(fine pointing) 두 단계로 나뉜다. CP는 넓은 범위에서의 대략적인 빔 정렬을 수행하는 단계로, 카메라 또는 GPS 등을 활용해 송수신기의 상대적 위치를 계산하고 2축 짐벌을 이용하여 빔을 정렬한다. FP는 좁은 영역에서 미세한 떨림이나 오차를 보정하는 과정으로, 주로 고속 조정 거울(fast steering mirror)과 4분할 광 검출기(quadrant photodetector)를 사용해 구현된다. 이러한 짐벌과 고속 조정 거울 기반의 CP 및 FP 기술은 우수한 안정성을 제공하지만 구축 비용이 높고 시스템의 전체 부피를 증가시키는 단점이 있다.

이에 본 논문에서는 카메라가 장착된 무선 광통신 송수신기를 가정하고, 고속 조정 거울이 없는 환경에서 카메라만으로 CP와 FP를 동시에 수행할 수 있는 빔 정렬 기법을 제안하여 이를 시뮬레이션 기반으로 분석하였다. 카메라 영상 분석에는 컴퓨터 비전 분야에서 널리 사용되는 KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) 트래커를 적용하였다. 분석 결과는 빔 정렬 오차 보정 성능이 수신 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)에 미치는 영향을 무선 통신 관점에서 평가하였다.

II. 본론

1. 시스템 모델

그림 1과 같이 본 논문에서는 카메라가 장착된 무선 광통신 시스템을 가정한다. 광 세기 변복조(intensity modulation and direct detection)와 가우시안 빔 세기를 가정한다. 본 연구에서는 빔 정렬 성능만을 고려하기 위하

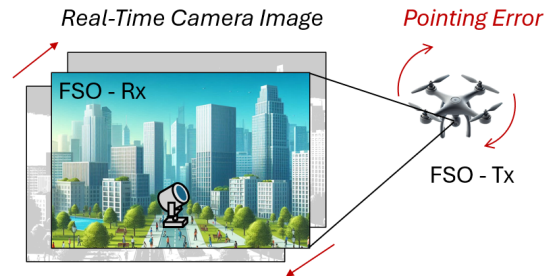


그림 1 컴퓨터 비전 기반 무선 광통신 시스템 모델.

여 대기 난류로 인한 채널 페이딩과 경로 감쇠 손실은 고려하지 않는다. 수신기에서 수신되는 신호는 $y = h_p x + n$ 와 같이 정의되며, x 은 송신 신호, n 은 분산이 N_0 인 AWGN (additive white Gaussian noise)이고, h_p 는 다음과 같이 정의되는 기하학적 채널 손실이다 [2].

$$h_p = A_0 \exp \left(-2 \frac{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}{w_{z,eq}^2} \right) \quad (1)$$

(1)에서, $A_0 = (erf(v))^2$, $v = \sqrt{\pi} r_a / \sqrt{2} w_z$, $w_{z,eq}^2 = w_z^2 \frac{\sqrt{\pi} erf(v)}{(2v \exp(-v^2))}$, $erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-x^2) dx$ 로 정의 된다. 또한, 그림 2와 같이 r_a , w_z , (x_p, y_p) 는 수신 렌즈의 반지름, 수신 빔의 반지름, 수신 렌즈와 수신 빔 사이의 상대좌표(빔 정렬 오차)를 의미한다. x_p 와 y_p 는 각각 $N(\mu_{x_p}, \sigma_{x_p}^2)$ 와 $N(\mu_{y_p}, \sigma_{y_p}^2)$ 의 가우시안 분포를 따른다. 따라서, 수신 신호 대 잡음비 γ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\gamma = \bar{\gamma} h_p^2 \quad (2)$$

이때 $\bar{\gamma}$ 는 채널을 고려하지 않은 신호 대 잡음 비로 $\bar{\gamma} = E[x^2]/N_0$ 로 정의된다.

2. KLT 트래커 기반 빔 정렬 기법

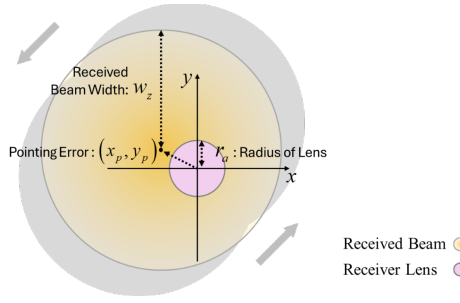


그림 2 수신 렌즈와 수신된 빔 모델.

송신기에 장착된 카메라로 실시간 획득되는 이미지를 활용하여 송신기의 빔 정렬 오차를 계산하기 위해서는, 먼저 카메라 이미지의 움직임 방향을 분석할 수 있어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 컴퓨터 비전 분야에서 널리 사용되는 KLT 트래커를 적용하였다.

KLT 트래커는 특징점 검출(feature detection) 과정과, 옵티컬 플로우(optical flow) 계산을 통한 특징점 이동 예측 과정으로 구성된다 [3]. 본 연구에서는 각 프레임에서 얻어진 이미지의 이동 픽셀 수를 계산하여 빔 정렬 오차 (x_p, y_p) 를 매 프레임마다 추정하였다.

3. MATLAB 기반 시뮬레이션 환경 설정

본 시뮬레이션에서는 샘플 영상 제작을 위해 30fps의 카메라를 가정하고, 영상의 크기는 533x533 픽셀로 설정하였다. 시뮬레이션 대상은 그림 3과 같이 약 800m 거리에 위치한 2.4m 너비의 건물로 설정하였으며, 따라서 영상 1 픽셀은 실제 15 cm에 해당한다고 가정하였다. 또한, 대상 건물 상단에 무선 광통신 수신 렌즈가 설치되어 있다고 가정하고, 수신기의 중심 좌표를 원점으로 설정하였다. 빔 정렬 오차 추정 정확도 향상을 위해, 실제 샘플 영상 제작에는 13배 확대된 이미지를 사용하였다.

시뮬레이션에서는 가우시안 프로세스를 기반으로 한 임의의 빔 정렬 오차 $(x_p(t), y_p(t))$ 를 매 t 프레임마다 생성하고, 준비된 이미지를 이에 따라 이동시켜 샘플 영상을 제작하였다. 시간 상관성이 있는 연속적인 가우시안 프로세스를 생성하기 위해 시간 t_i 와 t_j 사이 상관계수 커널 함수를 다음과 같이 정의하였다 [4].

$$k(t_i, t_j) = \exp\left(-\frac{(t_i - t_j)^2}{2l^2}\right) \quad (3)$$

이때 상관정도를 나타내는 변수 l 은 6 프레임으로 설정하였다. 영상의 현실성을 높이기 위하여 MATLAB 내장 함수를 사용하여 임의의 색 노이즈를 추가하였다. 제작된 영상은 총 300 프레임(10초 분량)이고, 이는 1GHz 샘플링 속도를 가정할 경우 10^7 개 샘플에 대응된다. 시뮬레이션 변수는 [2]의 설정을 참고하여 각각 $r_a = 10\text{cm}$, $w_z = 100\text{cm}$, $\mu_x = \mu_y = 0\text{cm}$, $\sigma_{x_p} = \sigma_{y_p} = \sigma_p = 30\text{cm}$ 로 설정하였다.

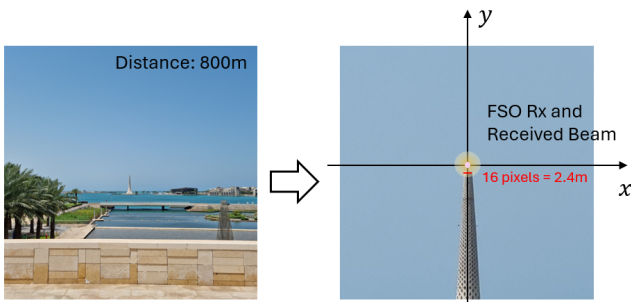


그림 3 샘플 카메라 영상 제작 과정: (좌) 1배율, (우) 13배율.

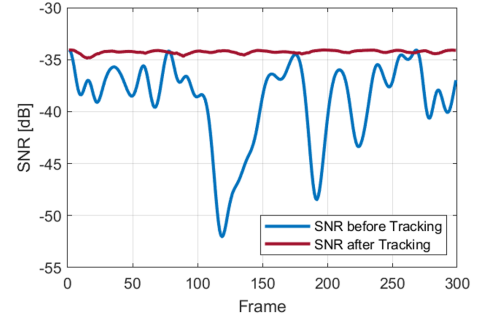


그림 4 시간에 따른 신호 대 잡음비 변화.

4. 시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션에서는 카메라를 통해 판단된 빔 정렬 오차를 기반으로 송신기의 집별을 조정할 때, 시간 지연이나 모터의 움직임 오차가 없는 이상적인 조건을 가정하였다. 따라서 매 프레임마다 카메라 영상으로 판단된 위치로 송신기의 방향이 완벽히 보정된다고 가정하였다. 수신기의 통신 성능 평가는 신호 대 잡음비를 기준으로 수행하였으며, 식 (2)에서 $\bar{\gamma} = 0\text{dB}$ 로 설정하였다.

그림 4는 시뮬레이션에서 생성된 빔 정렬 오차에 따른 신호 대 잡음비 변화를 나타낸 그래프로, KLT 트래커 기반의 빔 정렬 보정 전후의 신호 대 잡음비 차이를 함께 보여준다. 보정이 이루어지기 전에는 수신 신호 대 잡음비가 약 -35 dB에서 최소 -50 dB까지 감소되어 약 15 dB의 링크 마진이 필요함을 확인 할 수 있다. 반면, 보정 후에는 신호 대 잡음비가 약 -35dB 수준으로 안정적으로 유지됨을 확인하였다.

III. 결론

본 논문은 카메라만을 이용해 CP와 FP를 동시에 수행하는 무선 광통신 빔 정렬 기법을 제안한다. KLT 트래커 기반 빔 추적 시뮬레이션을 통해 수신 신호 대 잡음비를 안정적으로 유지하는 성능을 확인하였으며, 이는 모터 제어와 채널 난류 손실이 없는 이상적인 조건에서 도출된 결과이다. 이를 통해 제안한 빔 정렬 기법이 이상적인 통신 조건에서 높은 정확도로 동작함을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-[2023-00242396](tel:202300242396)).

참 고 문 헌

- [1] Y. Kaymak, R. Rojas-Cessa, J. Feng, N. Ansari, M. Zhou and T. Zhang, "A Survey on Acquisition, Tracking, and Pointing Mechanisms for Mobile Free-Space Optical Communications," IEEE Commun. Surv. Tutor., vol. 20, no. 2, pp. 1104-1123, 2018.
- [2] A. A. Farid and S. Hranilovic, "Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links With Pointing Errors," J. Light. Technol., vol. 25, no. 7, pp. 1702-1710, July 2007.
- [3] R. Szeliski, "Computer Vision: Algorithms and Applications," 2nd ed. Springer, 2022.
- [4] Y. Tang, W. Guo, and J. Gao, "Efficient model selection for Support Vector Machine with Gaussian kernel function," in Proc. 2009 IEEE CIDM, Nashville, TN, pp. 40-45, 2009.