

3차원 직교좌표 정보를 활용한 FSM 기반 무선 광통신 빔 정렬(PAT) 기법

차홍설, 고영채

고려대학교

<chahongseol, koyc>@korea.ac.kr

FSM-Based FSO PAT using 3D Cartesian Coordinate Information

Hong-Seol Cha, Young-Chai Ko

Korea Univ.

요약

본 논문은 무선 광통신 환경에서 FSM을 사용한 빔 정렬 기법을 제시한다. 보다 구체적으로는 송·수신기의 3차원 직교좌표 정보를 활용하여 초기 빔 조향을 위한 FSM 회전 각도를 계산하고, 이후 QPD를 통한 실시간 피드백을 통해 정밀 정렬을 진행한다. 제안한 빔 정렬 기법의 성능 검증을 위해 정적 실내 테스트베드 구축 및 실험적 검증을 진행한다.

I. 서론

무선 광통신은 고용량, 장거리 무선 링크를 가능하게 하는 기술로 차세대 무선 통신의 활용 방안으로 주목받고 있다 [1-2]. 그러나 광 레이저의 좁은 빔 발산으로 인하여 송·수신 단 사이의 빔 정렬 오류가 시스템의 성능을 좌우하는 아주 중요한 요인이다 [3]. 이를 해결하기 위해 포인팅, 획득 및 추적(PAT; Pointing, Acquisition and Tracking) 기술은 무선 광통신 설계에 있어서 필수적인 요소이다 [4]. 빠르고 정밀한 각도 제어가 가능한 고속 조향 거울(FSM; Fast Steering Mirror)은 미세 빔 조향에 널리 사용되는 장치로, 기존 FSM 기반 PAT 기술은 대략적인 정렬이 맞춰진 환경에서 실시간 피드백을 통한 미세 정렬을 맞추는 방향으로 주로 연구되었다. 본 연구에서는 송·수신기의 3차원 직교좌표를 사용하여 초기 빔 조향을 위한 FSM 회전 각도를 계산하고 미세 정렬을 위해 사분할 광검출기(QPD; Quadrant Photo-detector) 실시간 피드백을 사용하는 완전한 FSM 기반 PAT 알고리즘을 제안한다. 이후 제안된 기법의 성능 검증을 정적 실내 테스트베드를 통해 실험적으로 진행한다.

II. 본론

1. 좌표 기반 FSM PAT 모델링

본 논문에서 제안하는 PAT 알고리즘은 3D 데카르트 좌표 정보와 FSM을 사용한 빔 정렬 기법이다. 좌표 정보를 토대로 FSM의 회전 각도를 계산하여 빔을 조향하고 이후 정밀 정렬을 위해 QPD 신호를 사용하는 폐루프 PID 제어 시스템을 구현한다. 송신기와 수신기의 위치 정보는 이미 알려져 있다고 가정하고, 통신을 진행할 송·수신기 쌍의 정보를 토대로 필요한 초기 FSM 조향각(방위각(ϕ)과 고도각(θ))을 계산하며, 이는 FSM의 회전의 중심을 기준으로 하여 송신기에서 수신기까지 반사된 레이저 빔의 기하학적 경로를 풀어 도출한다.

그림 1과 같이 조향 각도는 FSM의 회전축과 FSM의 표면 중심 사이의 기계적 오프셋을 고려하며, FSM의 조향 각도에 대한 FSM 표면에서의 빔 반사 지점 및 빔의 반사 각도를 사용한다. 송신기는 FSM의 중심을 바

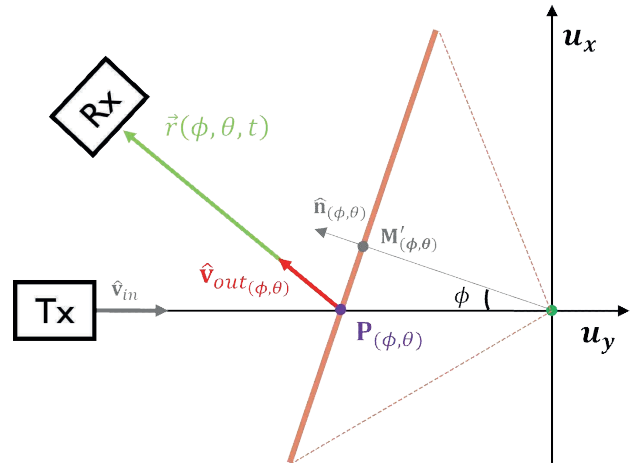


그림 1좌표 기반 FSM 초기 조향 각도 도출을 위한 평면도

라보고 있다고 가정되어 있다. 이러한 가정을 활용하여 도출한 직선 방정식 위에 수신기가 위치하도록 하는 방정식을 도출하고, 이후 수치적 접근법을 사용하여 빔 반사 방정식을 풀이한다. 좌표 기반 환경에서 송·수신기 좌표 입력을 통해 FSM의 제품 성능 및 크기에 대한 반사 제약 조건을 충족하는 조향각(ϕ , θ)을 결정한다.

이후 정밀 조정을 위해 QPD를 통해 수신된 빔 정렬 오차를 사용한다. QPD는 사분할 된 각 검출기 영역에 수신된 신호의 세기의 차를 이용하여 빔 정렬 오차를

측정하는 센서이다. QPD에서 검출된 오차 정보를 t_s 의 시간 간격으로 빔 정렬 오차 정보를 제어부에 전달하여 빔 미세 정렬을 진행한다. 제어부에서는 QPD에서 전달받은 빔 정렬 오차와 FSM과의 거리를 사용하여 FSM의 조향각(ϕ , θ) 조절을 위한 각도 보정을 진행한다. 추가로 시간 간격마다 수신 받은 신호의 제어 수렴 성능을 향상하기 위하여 PID 제어 기법을 추가하여 FSM의 조향각(ϕ , θ) 보정 과정을 가진다.

2. 정적 실내 테스트베드 환경

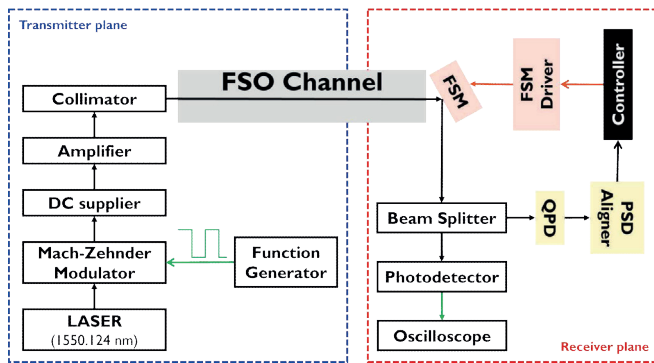


그림 2 FSM 기반 FSO PAT 테스트베드 블록 다이어그램

그림 2에서 볼 수 있듯이, 마하젠더 변조기(MZM: Mach-Zehnder Modulator)를 사용하여 1 kHz 사각파로 변조된 1550.124 nm 레이저는 증폭기를 통해 증폭되고 콜리메이터를 통해 송신된다. 송신된 빔은 FSM (Optotune MR-E-3)를 통해 반사되어 50:50 빔 분할기를 통과하며, 송신된 레이저는 통신 경로와 추정 경로로 분리된다. 통신 경로의 레이저는 광검출기(PD, Thorlabs DET10C2)를 향하고, PD는 신호를 실시간으로 모니터링하고, 이는 연결된 오실로스코프를 통해 확인할 수 있다. 추정 경로로 분리된 레이저 빔은 QPD(Newport CONEX-PSD10GE)를 향하게 되고, QPD는 제어기에 실시간으로 피드백을 제공한다. 제어기는 알고리즘 시작 단계에 송신기 좌표를 입력받아 초기 FSM 조향 각도를 계산한다. 이후 QPD를 통해 0.5초 제어 간격으로 수신받은 피드백 정보를 사용하여 PID 제어를 통해 실시간 추적을 수행하며, 제어기에서의 실험 구현은 Python으로 진행된다.

3. 정적 실내 환경에서의 빔 정렬 시연 및 결과

그림 3의 오실로스코프 결과를 통해 수신기에 수신된 사각파를 확인할 수 있으며, 초기 빔 정렬을 위한 좌표 기반 FSM 조향 각도를 사용하여 조정된 빔이 수신기에 정확하게 도달함을 확인할 수 있다. 그림 4는 시간에 따른 QPD 오차값을 나타내는 결과로, 4번의 반복 작업 내에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 연속적인 반복 과정에서 오차는 점차 0에 가까워지며, 이는 PID 기반 피드백 메커니즘의 안정성과 효율성을 보여준다. 이는 PID 제어기가 초기 정렬 불량을 효과적으로 보정할 수 있음을 보여주며 실제 구현 시 발생할 수 있는 좌표 오차 역시 정밀 보정 가능함을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문은 QPD 기반 실시간 피드백을 사용하는 3차원 직교좌표 기반 FSM-PAT 시스템을 제시하고 실내 환경 구축을 통한 실증을 포함한다. 빠르게 조향각 조절이 가능한 FSM을 사용하여 좌표 기반 환경에서 적은 지연 시간으로 빔 정렬을 맞출 수 있는 기법을 제안하고 실제 구축을 통해 이 성능을 확인하였다. 정적 실내 환경에서 FSM을 통한 초기 정렬과 정밀 추적을 모두 가능하게 하고 FSO 시나리오에서 시스템의 효율성을 확인시켜 준다는 이점이 있다.

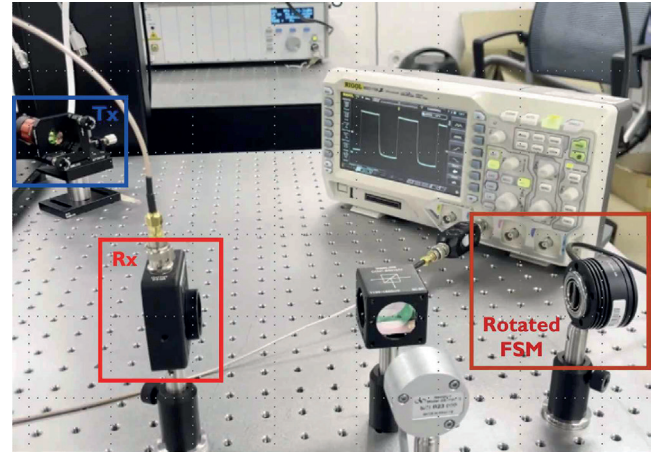


그림 3 FSM 기반 FSO PAT 테스트베드 시연 모습

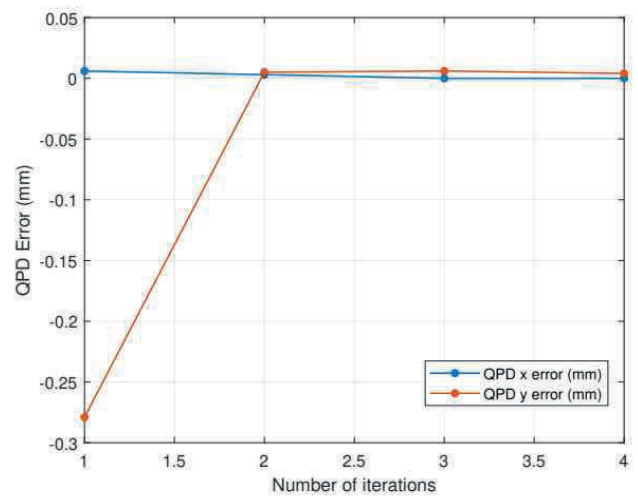


그림 4 실시간 QPD 피드백 기반 빔 정렬 오차 수렴

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021-0-00260, 저궤도 군집 소형 위성 간 통신 기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®. CRC press, 2019.
- [2] M. Uysal, C. Capsoni, Z. Ghassemlooy, A. Boucouvalas, and E. Udvary, Optical Wireless Communications: An Emerging Technology. Springer, 2016.
- [3] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on free space optical communication: A communication theory perspective," IEEE Commun. Surv. Tutor, vol. 16, no. 4, pp. 2231 - 2258, 2014
- [4] 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 communications surveys & tutorials, vol. 20, no. 2, pp. 1104 - 1123, 2018.