

# 모바일 자유 공간 QKD 의 고속 빔 정렬을 위한 경계 적응형 Golden section search 알고리즘

김성민, 황재성, 박미주, 전현채  
인천대학교

sungmin7240@inu.ac.kr

## Boundary adaptive golden section search algorithm for fast converging mobile free-space QKD alignment

Sungmin Kim, Jae Seong Hwang, Mijoo Park, Hyunchae Chun

Incheon National Univ.

### 요 약

본 연구는 자유 공간 QKD 통신 중 효율적인 빔 정렬을 위해 기존 탐색 알고리즘과 경계 적응형 Golden Section search 알고리즘의 성능을 비교 분석하였다. 기존의 스캐닝 방식의 알고리즘 대비 뛰어난 수렴성을 실험적으로 확인하였다.

### I. 서 론

자유 공간 양자 키 분배(Free-Space Optical Quantum Key Distribution, FSO-QKD)는 광섬유 대신 대기 또는 진공과 같은 자유 공간을 전송 채널로 사용하여 양자 상태를 전달하고 암호 키를 생성하는 기술이다. 양자역학적 특성에 기반하여 도청을 원천적으로 탐지할 수 있어, 이동체 기반 네트워크에서 차세대 고보안 통신 기술로 주목받고 있다 [1].

그러나 FSO-QKD 의 통신 성능은 Pointing, Acquisition, and Tracking (PAT) 시스템의 정확도에 크게 의존한다. 자유 공간 광 통신에서는 좁은 빔 폭과 수  $\mu\text{rad}$  수준의 고정밀 광축 정렬이 요구되며, 이동체의 고속 이동이나 진동, 외란 등에 의해 광 정렬이 쉽게 붕괴되어 링크 단절이 발생할 수 있다. 특히 빔이 Position Sensitive Detector (PSD)의 유효 수광 영역을 벗어나는 빔 이탈(walk-off) 현상이 발생하면, 기존 미세 추적 알고리즘은 정상적으로 동작하지 못하므로 효율적인 링크 재획득(acquisition) 탐색 기법이 필수적이다.

본 연구에서는 기존 PAT 탐색 알고리즘을 비교·분석하고, 탐색 시간을 감소시키는 Adaptive Boundary Clipping Golden Section Search (CGSS) 알고리즘을 적용하여 FSO-QKD 환경에서의 정렬 성능을 평가한다.

### II. 본론

자유 공간 환경에서 안정적인 FSO-QKD 통신을 구현하기 위해서는 초기 광 링크 획득과 지속적인 정렬 유지를 위한 PAT 시스템이 필수적이다. 이를 위해 다양한 탐색(scan) 기반 PAT 알고리즘이 제안되어 왔으며, 대표적

인 방식으로 나선형 스캔(Archimedean Spiral Scan)과 로제트 스캔(Rosette Scan)이 있다.

나선형 스캔은 중심에서 시작하여 반지름을 점차 증가시키는 나선 형태로 탐색 영역 전체를 순차적으로 스캔하는 방식이다. 탐색 영역을 빠짐없이 커버할 수 있어 신뢰성이 높고 구현이 비교적 용이하여 산업 표준으로 널리 활용되고 있다. 그러나 초기 위치 오차가 큰 경우 탐색 시간이 급격히 증가하며, 목적함수가 복잡한 환경에서는 전체 영역을 모두 탐색해야 하는 한계가 존재한다.

로제트 스캔은 꽃잎 형태의 주기적인 궤적을 따라 회전하며 탐색을 수행하는 방식으로, 중심 영역을 반복적으로 통과하는 특성을 가진다. 이로 인해 빔 위치가 중심 근처에 존재할 확률이 높은 경우 나선형 스캔 대비 빠른 링크 획득이 가능하다. 반면, 탐색 패턴의 특성상 외곽 영역에 대한 탐색 성능이 제한되며, 패턴 설계 및 구현이 상대적으로 복잡하다는 한계가 있다.

한편, Golden Section Search (GSS)[2, 3]는 1 차원 unimodal 목적함수의 극값을 효율적으로 탐색하기 위한 구간 축소 기반 최적화 알고리즘이다. 초기 탐색 구간 내에서 황금비를 이용해 두 내부 점을 설정하고, 함수값 비교를 통해 탐색 구간을 반복적으로 축소함으로써 극값에 수렴한다. GSS 는 미분 정보가 필요 없고 구현이 간단하며 안정적인 수렴 특성을 가지나, 목적함수의 변화가 미미한 구간이 넓게 존재하는 경우에도 반복 탐색이 수행되어 탐색 시간이 증가하는 한계가 있다.

본 연구에서는 지상 이동체 기반 네트워크 환경의 특성을 고려하여 CGSS 기반 탐색 알고리즘을 제안한다. 또한 본 연구에서 고려하는 QKD 통신 환경에서는 센서의 dynamic range 가 제한되어 지역적이고 extreme 한 concave 형태의 목적함수가 형성되는 경우를 다룬다. 이

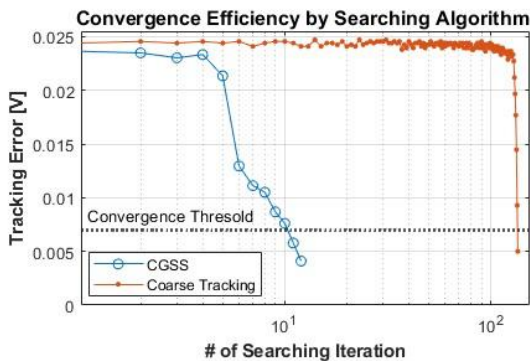
러한 특성에도 불구하고 기존 GSS 를 그대로 적용할 경우, 유의미한 신호 변화가 발생하지 않는 저감도 구간에서도 반복적인 탐색이 수행되어 전체 PAT 지연 시간이 증가하는 문제가 발생한다.

이를 해결하기 위해 제안하는 CGSS 알고리즘은 탐색 과정 중 수신 신호 변화가 미미한 구간을 clipping 기법을 통해 제거하고, 유의미한 신호 변화가 관측되는 구간으로 탐색 범위를 선별적으로 축소한 후 GSS 를 수행한다. 이를 통해 불필요한 탐색 반복을 최소화하고, 전체 탐색 효율을 향상시킨다.

[그림 1]은 일반적인 Coarse Tracking (CT) 방식과 제안하는 CGSS 방식의 성능을 비교한 결과를 나타낸다. 실험에서는 정면 입사가 아닌  $5^\circ$  각도로 입사하는 QKD 비콘 광에 대해 error tracking 성능을 측정하였다. 빔 정렬이 개선될수록 PSD 에서 검출되는 광전 전압이 증가하는 특성을 이용하여 error tracking 을 수행하였으며, error tracking 판단 지표로는 PSD 에서 비콘을 검출할 수 있는 최소 광전 전압( $7 \times 10^{-3}$  V) 과 측정된 광전 전압 간의 차이를 사용하였다.

[그림 1]에서 x 축은 탐지 횟수를 의미한다. 기존 CT 방식의 경우 약 140 회의 탐지가 요구되는 반면, 제안하는 CGSS 방식은 단 12 회의 탐지만으로 alignment point 를 획득함을 확인할 수 있다. 또한 CGSS 의 탐지 응답은 alignment point 근방에 도달한 이후 수신 신호가 급격히 threshold 로 수렴하는 특성을 보이며, 이는 탐색 과정에서 경계 적응형(clipping 기반)으로 탐색 범위를 효율적으로 축소했기 때문이다.

이러한 결과는 제안된 CGSS 알고리즘이 불필요한 저감도 구간 탐색을 제거하고, 유의미한 신호 변화가 존재하는 영역에 탐색 자원을 집중함으로써 탐색 효율을 크게 향상시킬 것을 의미한다. 이를 통해 기존 GSS 기반 PAT 탐색 기법의 한계를 보완하고, 초기 링크 획득 시간을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 실험적으로 검증하였다.



[그림 1. CGSS 와 CT 의 탐색 비교]

### III. 결론

본 연구에서는 자유공간 QKD 통신 환경에서 효율적인 빔 정렬을 위해 기존 탐색 기반 PAT 알고리즘들을 비교 분석하고, 일반적인 GSS 를 그대로 적용할 경우 탐색 방향 설정이 비효율적인 문제를 경계 적응형 경계 축소 탐색 기법으로 개선하였다. 이를 통해 불필요한 탐색 구간을 제거하고, PAT 탐색 시간을 효과적으로 단축함으로써

자유공간 QKD 시스템의 링크 획득 성능 및 실용성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 본 연구에서 가정한 1 차원 탐색 환경을 확장하여, CNN-BiLSTM-Attention 등의 머신러닝 모델을 활용한 고차원(2D/3D) 빔 정렬 및 추적 알고리즘에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by MSIT (No.RS-2023-00253346). Also, this research was supported by the MSIT, Korea, under the ITRC support program (IITP-2025-RS-2023-00259061) supervised by the IITP.

### 참 고 문 헌

- [1] A. Conrad et al., "Vehicle-to-Vehicle QKD," CLEO 2024.
- [2]. Antoniou, A. and Lu, W. S., Practical Optimization, Springer, pp. 92-95, 2007.
- [3]. Jones, D. and Grisso, R. D., "Golden section search as an optimization tool for spreadsheets," Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 7, No. 4, pp. 323-335, 1992