

UAV を利用した自由空間量子鍵分配システム用ホログラフィック送受信機に関する研究

代表研究者	チン ヴィエット フック	東京大学生産技術研究所 特任助教
共同研究者	小島 駿	千葉大学大学院工学研究院 准教授

1 研究の背景と目的

本研究は、無人航空機（UAV）と地上ユーザー間において、限られた通信時間内でより長い秘密鍵を共有することを目的とし、自由空間量子鍵配送（QKD）システムに適した新規ホログラフィック送受信機の設計を行うものである。UAV を用いた自由空間 QKD は、地上インフラに依存しない柔軟な量子通信ネットワークを構築できる一方で、UAV の位置揺らぎ、大気乱流、ビーム広がり、ポインティング誤差などにより、受信光強度が大きく変動するという課題がある。特に、UAV と地上局の通信可能時間は限定されるため、短時間で効率的に秘密鍵を生成するための光ビーム制御技術が重要となる。

そこで本研究では、空間光変調器（SLM）および光再構成可能インテリジェントサーフェス（ORIS）を用いたホログラフィック送受信機に着目した。送信機側では、SLM 上に表示するホログラフィックパターンにより光学ビーム径や焦点距離を動的に制御し、UAV のランダムな動きや通信距離に応じた適応的なビーム形成を実現する。また、受信機側では、大気乱流によって生じる光学波面の歪みを SLM によって補正することで、受信光強度および秘密鍵生成率の改善を目指した。さらに、ORIS を通信リンク中間に配置することで、建物などによる見通し外環境を回避しつつ、反射ビームの方向および幅を制御する自由空間量子通信システムの構築を検討した。

2 研究方法

本研究では、まず Fresnel ゾーンプレート（FZP）を用いたホログラフィックビーム制御の理論モデルを構築した。FZP は、透明領域と不透明領域が同心円状に配置されたホログラフィックパターンであり、所望の波面、焦点距離、ビーム径、およびパワー密度分布を持つ回折ビームを生成することができる。本研究では、MATLAB を用いて FZP パターンを設計し、特定の伝搬距離において所望のビームサイズを実現するための計算モデルを構築した。

次に、生成した FZP パターンを SLM 上に表示し、実験的な検証を行った。実験では、波長 635 nm のコリメートされた赤色レーザー光を SLM に照射し、SLM からの反射光をビームプロファイラで測定した。これにより、FZP パターンの設計を変えることで、観測面におけるビーム径および焦点距離を制御できることを確認した。この結果は、UAV-地上間自由空間光通信において、通信距離やチャネル状態に応じたビーム制御が可能であることを示すものである。

さらに、大気チャネルを伝搬する光ビームが受ける波面歪みを考慮するため、位相スクリーン（PS）を用いた大気乱流の模擬について検討した。SLM 上にランダムな位相スクリーンを表示し、レーザー光の反射ビームをビームプロファイラで観測することで、大気乱流に起因する空間的な強度揺らぎを再現した。これにより、送信側のビーム径制御だけでなく、受信側の波面補償を組み合わせることで、自由空間 QKD リンクの安定化が期待できることを確認した。

また、SLM を送受信機内部に統合するだけでなく、通信リンク中間に配置された反射素子として用いる構成についても検討した。特に、建物屋上などに設置された大規模 ORIS を用いることで、HAP、UAV、衛星などの空中プラットフォーム間における自由空間 QKD リンクを支援するシステムモデルを構築した。ORIS の反射位相設計として、線形位相シフトおよび二次位相シフトを検討し、反射ビームの進行方向およびビーム幅を制御することで、受信開口に到達する光強度を改善する手法を解析した。

3 研究成果

2024 年度には、FZP を用いた SLM ベースのホログラフィックビーム制御の基礎検討を行い、理論設計および実験検証の両面から、ビーム径および焦点距離を柔軟に制御できることを確認した。また、大気乱流による波面歪みを模擬するための位相スクリーンの生成実験を行い、SLM による波面操作が自由空間光通信チャネルの評価および補償に有効であることを示した。

さらに、ORIS を用いた自由空間 QKD システムの性能評価を行った。HAP から UAV への QKD リンクを対象として、ORIS の反射位相制御、大気乱流、ポインティング誤差、幾何損失、受信開口径などを考慮したチャネルモデルを構築した。数値解析により、ORIS による適応的な反射ビーム制御は、UAV の位置揺らぎや大気乱流が存在する場合にも受信光強度の低下を緩和し、秘密鍵生成率を向上させることを明らかにした。この成果は、IEEE Journal on Selected Areas in Communications 誌に掲載された。

また、ORIS を用いた量子空・宇宙・地上統合ネットワーク (Quantum SAGIN) に関する研究を進めた。本研究では、ORIS が HAP, UAV, 衛星などを含む将来の量子ネットワークにおいて、見通し外通信の支援、光ビーム制御、および量子通信リンクの安定化に有効であることを整理した。この成果は、IEEE Network 誌に掲載された。

2025 年度には、これまでに得られた ORIS 支援型 QKD および SLM ベースのホログラフィックビーム制御の成果を発展させ、同時古典・量子通信への応用可能性を検討した。将来の SAGIN では、大容量古典通信と QKD による秘密鍵共有を同一の空間光リンクで同時に実現することが期待される。そこで、光周波数帯における同時古典・量子通信の研究動向を整理し、実用化に向けた主要課題として、古典通信と量子通信のレート不整合、有限鍵長効果、および古典信号に起因する量子信号への雑音・漏れ込みの影響を検討した。この成果は、国際共同研究者との議論を通じて取りまとめられ、IEEE Network 誌に掲載された。

さらに、ORIS を用いた自由空間光通信の応用範囲を広げ、UAV 通信における同時光情報・電力伝送 (SLIPT) への適用を検討した。地上局から UAV への自由空間光リンクにおいて、ORIS を用いて光ビームを制御し、UAV 側で情報検出とエネルギーハーベスティングを同時に行うシステムモデルを構築した。このモデルでは、大気乱流、ポインティング誤差、受信開口における光結合効率、および ORIS の位相制御を考慮し、ORIS によるビーム制御が情報伝送性能およびエネルギーハーベスティング性能に与える影響を評価した。その結果、ORIS による適応的なビーム制御により、UAV の移動やポインティング誤差による受信光強度の低下を緩和できることを確認した。これらの成果は、国内学会および国際会議において発表予定である。

4 まとめと今後の展望

本研究により、SLM 上に表示した FZP パターンによって光ビームの焦点距離およびビーム径を柔軟に制御できることを示した。また、位相スクリーンを用いた大気乱流の模擬により、SLM が自由空間光通信チャネルの評価および補償に有効であることを確認した。さらに、ORIS の反射位相設計により、自由空間 QKD リンクにおける受信光強度および秘密鍵生成率を改善できることを明らかにした。

本研究で得られた ORIS/SLM ベースの適応的光ビーム制御技術は、UAV-地上間 QKD に限らず、HAP, UAV, 衛星を含む量子 SAGIN, 同時古典・量子通信、および SLIPT 対応自由空間光通信にも拡張可能である。したがって、本研究成果は、将来の量子ネットワークおよび次世代自由空間光ネットワークの実現に向けた重要な基盤技術となることが期待される。

【参考文献】

- [1] **Phuc V. Trinh**, Shinya Sugiura, Chao Xu, and Lajos Hanzo, “Toward Quantum SAGINs Harnessing Optical RISs: Applications, Advances, and the Road Ahead,” IEEE Network, vol. 39, no. 3, pp. 215-222, May 2025. DOI: 10.1109/MNET.2025.3536848.

- [2] **Phuc V. Trinh**, Shinya Sugiura, Chao Xu, and Lajos Hanzo, “Optical RISs Improve the Secret Key Rate of Free-Space QKD in HAP-to-UAV Scenarios,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 43, no. 8, pp. 2747-2764, August 2025. DOI: 10.1109/JSAC.2025.3568050.
- [3] **Phuc V. Trinh**, Shinya Sugiura, Carlo Ottaviani, Chao Xu, and Lajos Hanzo, “Simultaneous Classical and Quantum Communications: Recent Progress and Three Challenges,” IEEE Network, in press. DOI: 10.1109/MNET.2025.3643793.
- [4] Luna Sugiyama, **Phuc V. Trinh**, and Shinya Sugiura, “Evaluation of SLIPT System with ORIS,” 2025 IEICE General Conference, Kyushu Sangyo University, Fukuoka, March 9-13, 2026.
- [5] Luna Sugiyama, **Phuc V. Trinh**, and Shinya Sugiura, “SLIPT-Enabled Ground-to-UAV FSO Systems with Optical Reconfigurable Intelligent Surfaces,” in Proc. of the 2026 IEEE International Conference on Communications (ICC’ 26), Glasgow, Scotland, UK, May 24-28, 2026.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Toward Quantum SAGINs Harnessing Optical RISs: Applications, Advances, and the Road Ahead	IEEE Network	2025 年 5 月
Optical RISs Improve the Secret Key Rate of Free-Space QKD in HAP-to-UAV Scenarios	IEEE Journal on Selected Areas in Communications	2025 年 8 月
Simultaneous Classical and Quantum Communications: Recent Progress and Three Challenges	IEEE Network	2025 年
Evaluation of SLIPT System with ORIS	2025 IEICE General Conference	2026 年 3 月
SLIPT-Enabled Ground-to-UAV FSO Systems with Optical Reconfigurable Intelligent Surfaces	2026 IEEE International Conference on Communications	2026 年 5 月