

アドホック光空間通信システムの研究

研究代表者	辻村 健	佐賀大学大学院工学系研究科 教授
研究分担者	泉 清高	佐賀大学大学院工学系研究科 准教授

1 はじめに

光空間通信 (FSO) は光ファイバまたは無線電波の代替技術であり、コリメートされたレーザービームを大気中に放出し対向する装置間で光信号を交換する技術である。FSO システムは光ファイバ通信と比較して、特に設置時での時間とコストを節約する [1-3]。また、盗聴のリスクに関して無線通信よりも安全性が高い。従来の FSO は固定端末間の 1 対 1 通信システムとして開発されているため、ユビキタス性がない [4-9]。

著者らは、ユビキタスなブロードバンドユーザネットワークに適用するためのアクティブ光空間通信 (a-FSO) 技術 [10-31] を新たに提案した。アクティブ光空間通信は、都市部の通信ネットワークのほかにも、ルーラルエリアネットワークや災害時のアドホックネットワークに供することができる。FSO はビル間通信などでブロードバンドネットワークに利用可能であり、アドホックネットワークは災害発生時でも自律的なアラインメント機能により簡易にブロードバンド通信を実現できる。

光空間通信は line of sight を維持することが重要であるため、従来の FSO 装置は、レーザービームが振動で乱されることを防ぐために、剛性フレームに取り付けられる。それにもかかわらず、対向する 2 つの装置間の相対的な位置は、風圧、交通による揺れ、太陽熱によるフレームの反りなどによって変化することがある。

アクティブ FSO システムの特徴の 1 つは、移動する FSO 受信器を追跡する機能である。筆者らは安定した FSO 伝送装置通信を維持するために、送信レーザービームのフィードバック制御などを研究している [32-40]。反射鏡をリアルタイム制御し大気中で受信器の方向に発射した細径レーザービームにより双方向伝送線路を確立した。

本研究では、モータ駆動のレンズを用いて双方向伝送レーザービームを独立に操縦するアクティブ FSO システムを新たに設計試作した。また、レーザー光位置決めと制御情報の交換の両方に通信レーザー光を用いる手法を提案し、無線や測量など補助的な手段を用いることなく、長波長レーザーのみで伝送路を開通するシステムを実現する。また、離散フォトダイオードのみでレーザー強度分布を推定し光軸を決定する方法を検討する。

2 アクティブ光空間通信システム

2-1 設計

設計したアクティブ光空間通信装置を図 1 に示す。この FSO システムは、波長 1550nm の 10mm 細径レーザービームを伝送し、ビットレート 1Gbit/s でブロードバンド通信を実現する。送信・受信に対応する 2 つの鏡筒にはコリメータレンズが内蔵されている。伝送光信号は光ファイバによって装置に導入され、一方のコリメータレンズから対向する FSO 装置に向けて放出される。その方向は、レーザーの経路上に設置されたモータ駆動のレンズによって制御される。レンズはボイスコイルモータ (VCM) に把持され、制御電圧を印加することによって二次元的に位置決めされる。受信側のコリメータレンズは、対向する装置から到着したレーザービームを捕捉する。レーザービームは鏡筒を通過してシングルモード光ファイバ (SMF) の出口に到達する。VCM に懸架されたレンズは、レーザーを SMF と高効率に結合するように、入射レーザービームの位置および向きを調整する。入射レーザーの一部は光路上に設置されたビームスプリッタにより 4 分割フォトダイオード (QPD) に導かれる。4 分割フォトダイオードは、4 つの個別要素を有し、それぞれの要素に入射するレーザービームの強度を検出する。ビームスプリッタによって分割されたレーザービームが QPD の中心に当たると、4 要素の出力電圧は同一になる。異なる場合には、出力強度比に基づいてレーザービーム軸のオフセットを推定することができる。VCM は、レーザービームが QPD の中央に維持するように制御される。このとき、主レーザービームは正確に SMF の出口に導かれる。

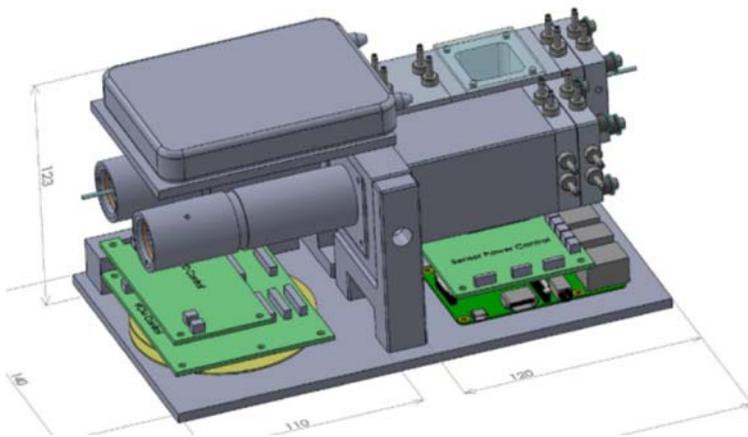


図1 光空間通信装置外観

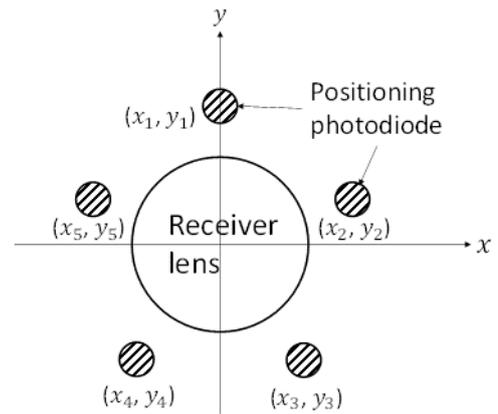


図2 粗調整用フォトダイオード

受信器には、拡散されたレーザービームの局所強度を測定するため受信器レンズの近くに分散配置した位置決め粗調整用フォトダイオードがある。本研究では、図2に示すような五角形の位置決めPDを設計した。これは、受光レンズを囲む1550nmの波長の強度を検出する5つのフォトダイオードで構成されている。測定されたデータは、対向するFSO装置のコントローラに送られVCMの制御コマンドを生成して受光レンズ領域内にレーザービームを案内する。

図3の写真は今回試作したアクティブな光空間通信システムのプロトタイプである。これは2つの鏡筒を備えており、右は送信器で直径10mmの1550nmのレーザービームを放射し、1Gビット/秒の広帯域データを送信する。光信号は単一モードファイバを介して供給される。レーザービームは、 7.54×10^{-6} m/vの位置決め精度を持つVCMによって 1.15×10^{-9} m/bitの分解能でコントロールされる。

左側は受信器で、到着したレーザービームを波長領域が1000~1600nmである5つのInGaAs PINフォトダイオードによって捕捉する。レーザービームは受信器鏡筒内の光学系により光軸制御され出力側のSMFに導かれる。VCMは、モードフィールド直径(MFD)が約 10×10^{-6} mであるSMFと正確に結合するように、レーザービームの位置および向きを調節する。試作したアクティブFSOシステムの仕様を表1に示す。

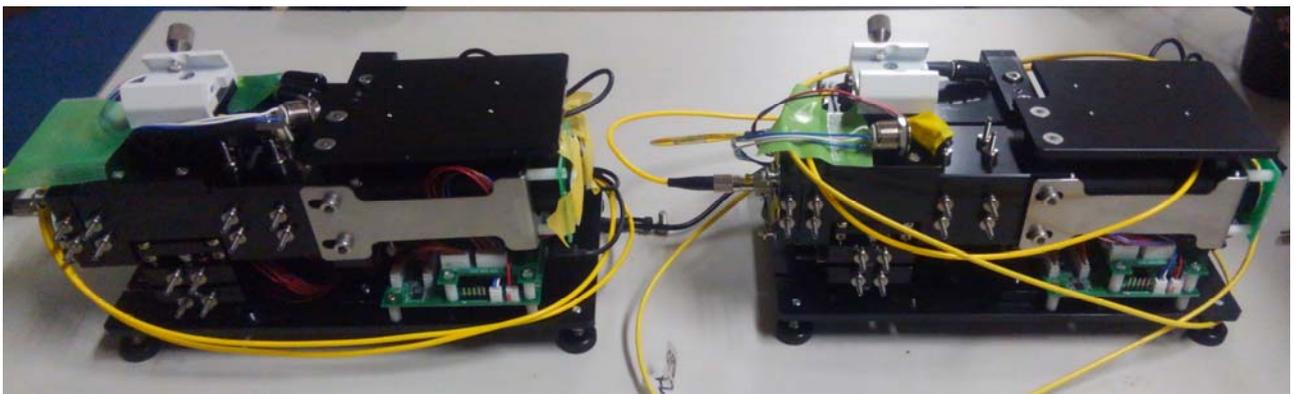


図3 光空間通信装置

表 1 試作装置仕様

Item	Parameter	Specification	
Optical system	Wavelength	1550nm	
	Communication distance	10m~100m	
	Communication speed	1G/10Gbps	
	Transmission	Output power	10dBm : 10mW
		Laser class	10mW : Class 1
		Beam angle	Maximum 1.2 degrees
		Lens diameter	25 mm Φ
		Collimator light	10 mm Φ
		Beam divergence	0.02 degrees
	Reception	Optical input power level	0dBm~-30dBm
		Telescopic QPD	Size : 3mm Φ
Field-of-view of data detector		1.2 degrees	
	External dimensions	140 mmx140 mmx250 mm	

2-2 基本特性

アクティブ FS0 装置の基本特性を確認するためにいくつかの実験を行った。

まず、受信器システムの光指向性を調べた。結合損失を評価するためにレーザビームの入射角を変えた時の受信光強度を測定した。実験結果を図 4 に示す。ここで、横軸は入射レーザビーム角度を、縦軸は受信光強度を示す。結合損失は 0.4 度以内で 5dB 未満であった。光学系を精密に調整することにより広い指向性を実現した。

次に、ボイスコイルモータの性能を評価した。透過レーザ光の光路を調整するために VCM を用いてレンズを高精度に位置決めする必要がある。図 5 は VCM の動作結果を表し、水平軸と垂直軸はそれぞれ VCM の入力電圧と変位である。入力電圧 -2~2V を印加したとき、変位は -16×10^{-6} から 16×10^{-6} m の間で良好な直線性を示すことを確認した。

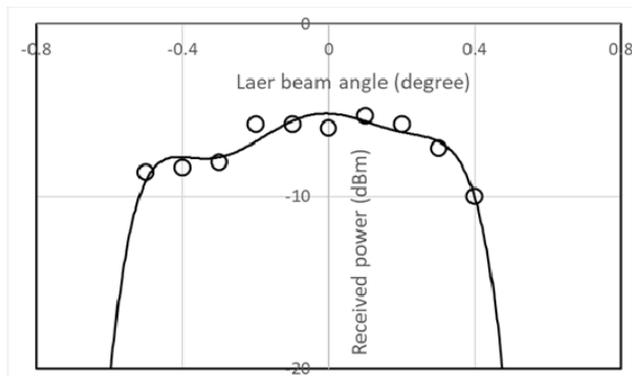


図 4 受信光学系の指向性

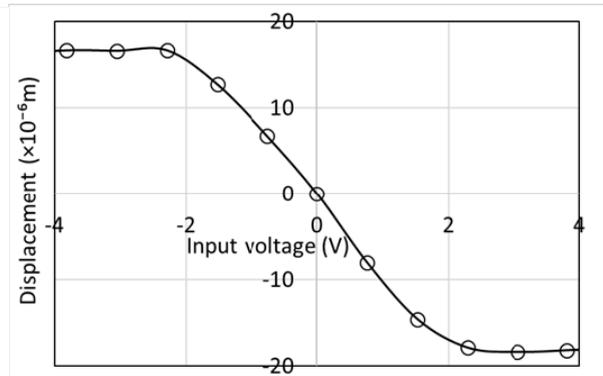


図 5 ボイスコイルモータの動作

3 光軸調整技術

レーザビームを相互に送信する双方向光空間通信のブロック図を図 6 に示す。各装置は、送信器と受信器とコントローラ PC とで構成される。広帯域通信は、送信器から対向する受信器に細径レーザビームを転送することによって実行する。レーザがドリフトしても受信レンズ内にレーザ到達点を保持する必要があり、送信鏡筒内に設置された VCM によって送信レーザビームの光路をフィードバック制御する仕組みになっている。レーザビームの方向は対向する位置決め用フォトダイオードの出力データに基づいて決定される。

受信器には2種類のレーザビームアライメントシステムが装備されている。粗調整システムは受信器近傍に到達したレーザの強度を計測する。分散配置された数個のPDによる局所情報のみに基づいてレーザ強度分布を推定することができる。PDの測定データは逆方向のレーザを介して相手側送信器のVCMに転送され、フィードバック制御コマンドに変換される。微調整システムは各装置内部で、VCMによりレーザ光軸の高精度調整を行う。ビームスプリッタによって入射レーザビームの約10%が分割され、QPDによってレーザビームの位置ずれを評価する。フィードバック制御アルゴリズムによってこのモニタ用のレーザビームがリアルタイムでQPDの中心に維持されるが、このとき本流のレーザビームは、結果的に常に出力側SMFに結合されることになる。

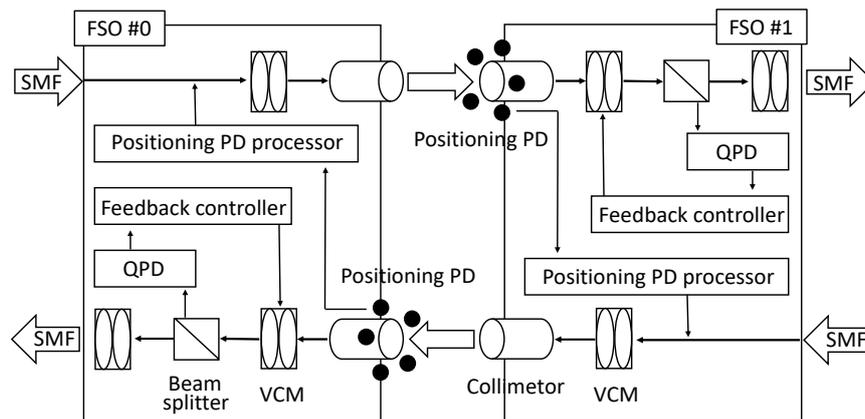


図6 双方向FSOシステムのブロック図

光軸粗調整は対向する送信器と受信器の間で以下の手順で実行される。FSO #0から発射されFSO #1に到達するレーザビームは最初に FSO #1 の受光レンズの周囲に取り付けられた位置決めフォトダイオードによって検出される。その出力データは、位置決めPD処理装置に転送され、FSO #1からFSO #0までの下流通信ラインを介して送信信号に重畳して伝送される。転送された情報は、FSO #0のPD処理装置で評価され、FSO #0の送信器のVCMへの制御コマンドに変換される。下流のレーザビームも同様に処理される。

このような処理系では逆向きの通信ラインが接続されている限りフィードバック制御が実行できる。もしいずれかの回線が中断された場合には、もう一方の回線も同時に切断される。

レーザビームアライメントのプロセスにおいて、FSO通信の状況を transient phase と steady phase の2段階に仮定する。最初は、レーザ光が受信系にうまく結合しないので、transient phase では通信路は未接続である。この場合後述する粗調整アルゴリズムに従いレーザ光を制御して受信器内に導く。一旦通信路が開通して steady phase に移れば、両方の受信器はトラッキング制御により対向する送信器からのレーザビームを捕捉し続ける。

レーザビーム光軸調整アルゴリズムを図7に示す。ネットワークの接続状況に応じて、レーザビームの2つの追跡技術、すなわち粗調整と微調整が適用される。FSO装置設置時にはレーザビームが受信器には到達していないため、通信は途絶状態である。これは steady phase に相当するので、対向する受信器を探索するために粗調整が実行される。

受信器があると推定される方向にレーザ光をスキャンし通信経路を探索することによりオフラインアライメントを実行する。位置決めPDにより到達レーザ光の離散地点における局所的強度を検出する。到着したレーザ発光の強度分布からレーザビームの位置決め誤差が推定できる。測定データを評価することにより、レーザビームの光軸が受光レ

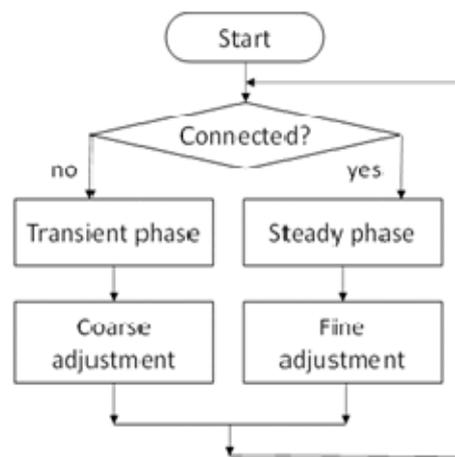


図7 光軸調整アルゴリズム

レンズの中心にくるようにレーザービームの方向を補正する。

レーザー光が受信器に到達した後で、微調整アルゴリズムによりセンサフィードバック制御を実行し揺動する受信器を自動追尾する。送信器と受信器との間の相対運動は QPD 出力によって測定される。レーザー光の方向は PID コントローラにより QPD の中心に当たるように制御される。双方向通信系の上流・下流双方に関してこの状態が維持される限り steady phase が継続する。

万一レーザー光が途切れることがあると、通信回線は中断されフィードバックループが完成しなくなるため受信器を追跡することができなくなる。その場合、状態は transient phase に変わり受信器の再探索を開始する。

3-1 光軸調整アルゴリズム

通信システムの初期設置時や再接続の場合、すなわち transient phase においては、対向する FSO 装置を発見し、通信レーザー光のみを用いた情報交換によって光通信路を成立する必要があるため、下記の協調動作による調整手順を実行する。

図 8 は互いに対向して遠隔に配置され通信装置 FSO #0 および #1 の動作状況をレーザービームの方向と制御情報の流れとして示しており、各装置は送信器・受信器・コントローラによって簡略的に表されている。

接続開始時に、レーザー光は反対の FSO 装置に向けて発射されるが、図 8 (1) に示すように受信器から逸れてしまうため いずれの伝送路も確立されていない。このとき FSO #1 に設けられた位置決め用 PD により、FSO #0 からターゲットを外れたレーザー光の強度を検出することができる。

次に、図 8 (2) に示すように、目標受信器の予想位置近傍をレーザー光で走査する。この時、レーザー光には送信器の方向データと位置決め PD の出力データの両方を重畳する。

走査の過程で図 8 (3) に示すようにレーザー光が偶然 受信器に当たった瞬間に、上記のデータを FSO #0 に転送する。FSO #0 のコントローラは、この時刻の FSO #1 の送信レーザー方向と PD の出力値を獲得することができる。

次の瞬間、図 8 (4) に示すようにレーザー光は受光ポイントを通過し再び受信器から外れる。FSO #0 のコントローラは FSO #1 の PD データ情報に基づいて送信器の方向を調整してレーザー光を目標受信器に導く。その結果、FSO #0 から #1 に至る下り伝送路が開通する。

これ以降下り回線は接続を維持するので、図 8 (5) に示すように、FSO #1 コントローラに FSO #0 位置決め PD のデータを転送する。これにより、FSO #1 コントローラは FSO #1 から #0 への上流伝送路を確立することができる。最終的には、図 8 (6) に示すように、双方向回線が安定的に開通する。

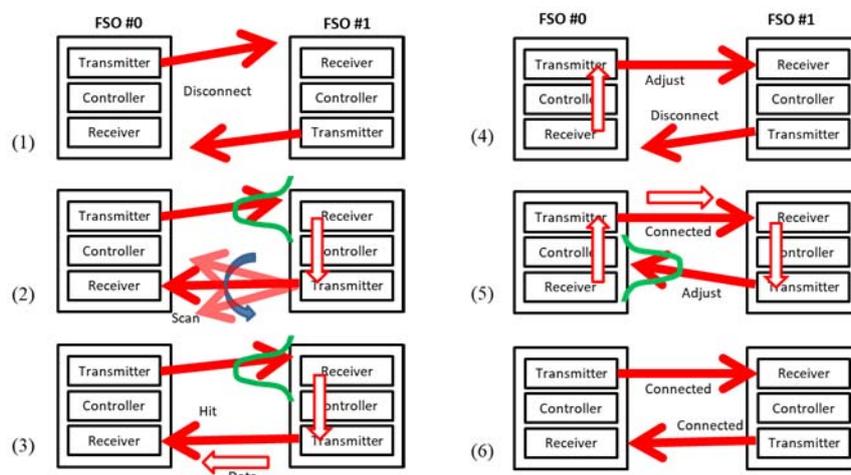


図 8 レーザービームアライメント手順

3-2 粗調整のためのレーザ光軸位置推定

transient phase では通信路が切断されているため、フィードバック制御を実行することができない。そこで、位置決め用フォトダイオード情報に基づくオフラインレーザ光到達位置推定方法を提案する。この方法は数個の位置決めPDを用いてレーザ強度の分布を推定し、その結果を利用してターゲット受信器にレーザ光を導く。

レーザビーム強度の分布形状が既知であることを前提とすれば、分散配置されたフォトダイオードによって検出した局所光強度データに基づいて、レーザビームの正確な位置を推定することができる。レーザ光がガウシアンビーム光学に従うと仮定すれば、レーザ光軸が解析的に推定でき、レーザ光を受信器に正確に導くための制御コマンドを生成することが可能となる。

ガウシアンビーム光学では通常レーザ強度は点対称だとしているが、今回用いた光学系ではレーザ光が偏平していることが実験的に確認された。そこで、本論文ではレーザ光の強度分布を正規分布の代わりに以下の修正式に従うものとして解析を行った。

光軸がz軸に平行であり、レーザビームがx-y平面上の点(a, b, 0)に到達したと仮定して、x-y-z座標系におけるレーザビームの定式化を考える。x-y平面上の(x, y)における修正ガウスビームの光強度 $E(x, y; E_0, n, m, a, b)$ は、

$$E(x, y; E_0, n, m, a, b) = E_0 \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{n^2} - \frac{(y-b)^2}{m^2}\right) \quad (1)$$

で表される。ここで、 E_0 はレーザ光の光軸上のレーザ強度を示す。パラメータaとbは光軸のx座標とy座標を表し、n、mはx方向とy方向の標準偏差である。

式(1)は5つの未知パラメータ E_0, n, m, a, b を含み、一般的な連立方程式を解くためには5つの独立した条件が必要である。

強度 $E(x, y; E_0, n, m, a, b)$ は、実際に位置決めフォトダイオードによって測定された出力電圧である。本論文では受光器を囲む5個の位置決め用フォトダイオードが用意されており、拡散したレーザ光について5か所の測定点で局所強度が測定される。その結果、5式からなる連立方程式が成立する。この連立方程式を解くことによりレーザ光軸の座標値(a, b)が解析的に求まる。

5つのフォトダイオードから5つのデータセット $(x_1, y_1, E_1), (x_2, y_2, E_2), (x_3, y_3, E_3), (x_4, y_4, E_4), (x_5, y_5, E_5)$ が与えられる。最初の2つの要素は各フォトダイオードのx座標とy座標を表し、最後の要素はレーザ強度に相当するフォトダイオード電圧を表す。

解析の結果、下記の解を得る。

$$a = \frac{a_1^u \log(E_1) + a_2^u \log(E_2) + a_3^u \log(E_3) + a_4^u \log(E_4) + a_5^u \log(E_5)}{a_1^d \log(E_1) + a_2^d \log(E_2) + a_3^d \log(E_3) + a_4^d \log(E_4) + a_5^d \log(E_5)} \quad (2)$$

$$b = \frac{b_1^u \log(E_1) + b_2^u \log(E_2) + b_3^u \log(E_3) + b_4^u \log(E_4) + b_5^u \log(E_5)}{b_1^d \log(E_1) + b_2^d \log(E_2) + b_3^d \log(E_3) + b_4^d \log(E_4) + b_5^d \log(E_5)} \quad (3)$$

以上により 到達レーザ光の光軸の推定値(a, b)が算出できる。

4 まとめ

本稿ではアクティブ光空間通信とその光軸調整技術についての研究成果を述べた。

著者らは、ボイスコイルモータに取り付けた光軸調整用光学系とレーザ強度分布測定用フォトダイオードセットを内蔵する双方向通信装置を設計した。アクティブFSOシステムのプロトタイプを試作しその基本特

性を実験的に評価した。

次に、アクティブ FSO システムの光軸調整技術について検討し、双方向遠隔レーザ伝送のための協調制御システムを設計した。光軸調整を目的として、粗調整のためのオフラインレーザビーム分布推定と微調整のためのレーザビームのフィードバックトラッキング制御との2つのシステムを提案した。これらは、通信回線の接続状態を transient phase と steady phase に区別したうえで、適応的に選択され実行される。また、transient phase において一対の FSO 装置間で実行される協調的光軸調整プロセスを構築した。さらに、ガウシアンビーム光学系に基づいて、離散的なレーザ強度分布データからレーザ光軸位置を解析的に推定する手法を確立した。

本システムが完成すれば、通信レーザ光だけで遠隔光空間通信伝送路を自動接続し、高品質の広帯域通信を実現することが期待できる。

【参考文献】

1. Pratt, W.K.: Laser communication systems, John Wiley & Sons, 1969, pp.196 (1969)
2. Ueno, Y., and Nagata, R.: An optical communication system using envelope modulation, IEEE Trans. COM-20, 4, pp.813 (1972)
3. Willebrand, H., Ghuman, B. S.: Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks, Sams Publishing (1999)
4. Nykolak, G., et al.: Update on 4x2.5 Gb/s, 4.4km free-space optical communications link: availability and scintillation performance, Optical Wireless Communications II, Proc.SPIE, Vol.3850, 1999, pp. 11-19 (1999)
5. Dodley, J.P., et al.: Free space optical technology and distribution architecture for broadband metro and local services, Optical Wireless Communications III, Proc.SPIE, Vol.4214, 2000, pp. 72-85 (2000)
6. Vitasek, J., et al.: Misalignment loss of Free Space Optic link, 16th International Conf. on Transparent Optical Networks, pp. 1-5 (2014)
7. Dubey, S., Kumar, S., and Mishra, R.: Simulation and performance evaluation of free space optic transmission system, International Conf. on Computing for Sustainable Global Development, pp. 850-855 (2014)
8. Wang, Q., Nguyen, T., and Wang, A. X.: Channel capacity optimization for an integrated wi-fi and free-space optic communication system, 17th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, pp. 327-330 (2014)
9. Kaur, P., Jain, V.K., and Kar, S.: Capacity of free space optical links with spatial diversity and aperture averaging, 27th Biennial Symposium on Communications, pp. 14-18 (2014)
10. Tsujimura, T., Yoshida, K.: Active free space optics systems for ubiquitous user networks, 2004 Conf. on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices (2004)
11. Tsujimura, T., Yano, T., Yoshida, K.: Transmission laser beam control method for ubiquitous free space optics, Proc. SICE Annual Conference 2004, 2004, pp. 599-604 (2004)
12. Yoshida, K., Yano, T., Tsujimura, T.: Automatic optical axis alignment for active free space optics. Proc. SICE Annual Conference 2004, pp. 2035-2040 (2004)
13. Tsujimura, T., Yoshida, K., Shiraki, K. and Sankawa, I.: 1310/ 1550 nm SMF-FSO-SMF No-repeater Transmission Technique with semi-active FSO Nodes, 33st European Conference and Exhibition on Optical Communication, pp. 189-190 (2007)
14. Tsujimura, T., Yoshida, K., Shiraki, K. and Kurashima, T.: Automatic Optical Axis Alignment System for Free-space Optics Transmission through Windowpane, SICE Annual Conference 2007, pp 2337-2341 (2007)
15. Yoshida, K., Tsujimura, T., Shiraki, K. and Sankawa, I.: A Free Space Optical System for Seamless Transmission between Single-mode Optical fibers, SICE Annual Conference 2007, pp. 2333-2336 (2007)

16. Tsujimura, T., Yoshida, K., Kurashima, T., and Mikawa, M.: Trans-window Free Space Optics Transmission System, International Conference on Instrumentation Control and Information Technology (2008)
17. Yoshida, K., Tsujimura, T., and Kurashima, T.: Seamless Transmission Between Single-mode Optical Fibers Using Free Space Optics System, International Conference on Instrumentation Control and Information Technology, pp. 2219-2222 (2008)
18. Tsujimura, T., Yoshida, K., Kurashima, T., and Mikawa, M.: Directly Coupled Optical Transmission with Single-Mode Fibre and Free-Space Optics System, 14th Microoptica Conference, pp. 286-287 (2008)
19. Tsujimura, T., Yoshida, K., Tanaka, K., Katayama, K., and Azuma, Y.: Interruption-free Shunt System for Fiber Optics Transmission Line, SICE Journal of Control Measurement and System Integration, vol. 8, no. 16, pp. 125 (2009)
20. Tanaka, K., Tsujimura, T., Yoshida, K., Katayama, K., and Azuma, Y.: Frame-loss-free Line Switching Method for In-service Optical Access Network using Interferometry Line Length Measurement, Optical Fiber Communication Conf., postdeadline PDPD6 (2009)
21. Yoshida, K., and Tsujimura, T.: Seamless Transmission Between Single-mode Optical Fibers Using Free Space Optics System, SICE Journal of Control Measurement and System Integration, pp. 2219 - 2222 (2009)
22. Tanaka, K., Tsujimura, T., Yoshida, K., Katayama, K., and Azuma, Y.: Frame-loss-free Optical Line Switching System for In-service Optical Network, Journal of Lightwave Technology, pp. 539 - 546 (2009)
23. Tsujimura, T., Tanaka, K., Yoshida, K., Katayama, K., and Azuma, Y.: Infallible Layer-one Protection Switching Technique for Optical Fiber Network, 14th European Conf. on Networks and Optical Communications (2009)
24. Tsujimura, T., Tanaka, K., Yoshida, K., Katayama, K., Azuma, Y., and Mikawa, M.: High-resolution optical measurement for fiber optics transmission line length, ICROS-SICE International Joint Conference, pp. 5576 - 5581 (2009)
25. Yoshida, K., Tanaka, K., Katayama, K., Tsujimura, T., and Azuma, Y.: Collimator Focus Adjustment for Free Space Optics System Using Single-mode Optical Fibers, ICROS-SICE International Joint Conference, pp. 1338 - 1341 (2009)
26. Katayama, K., Tsujimura, T., Yoshida, K., Tanaka, K., Azuma, Y., and Shimizu, M.: Study of Error-Free Optical Line Switching Method for High-Speed Ethernet Optical Access System, 15th Microoptica Conference (2009)
27. Tsujimura, T., Yoshida, K., Tanaka, K., and Azuma, Y.: Transmission length measurement for error-free optical fiber line switching system, Proc. Int. Conf. on Networked Sensing Systems, pp. 149-152 (2010)
28. Yoshida, K., and Tsujimura, T.: Seamless Transmission Between Single-mode Optical Fibers Using Free Space Optics System, SICE Journal of Control Measurement and System Integration, Vol.3, No.2, pp.94-100 (2010)
29. Yoshida, K., Tanaka, K., Tsujimura, T., Noto, K., Manabe, T., and Azuma, Y.: Toward the Compact Design of a Robotic Waveguide for Active Line Duplication, SICE Annual Conference, pp. 427-430 (2010)
30. Yoshida, K., Tanaka, K., and Tsujimura, T.: Robotic Waveguide by Free Space Optics, Advances in Mechatronics, ISBN 978-953-307-373-6, InTech (2011)
31. Tsujimura, T., Yoshida, K and Tanaka, K.: Length measurement for optical transmission line using interferometry, Interferometry, ISBN 978-953-308-459-6, InTech (2012)
32. Tsujimura, T., Muta, S., and Izumi, K.: Transmission line switching technique based on active free-space optics system, IECON2013 (2013)

33. Yoshida, K., Tanaka, K., Tsujimura, T., and Azuma Y.: Assisted Focus Adjustment for Free Space Optics System Coupling Single-Mode Optical Fibers, IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 60, pp. 5306-5314 (2013)
34. Muta, S., Tsujimura, T., Izumi, K.: Laser beam tracking system for active free-space optical communication, Proc. SII2013, pp.879-884 (2013)
35. Muta, S., Tsujimura, T., Izumi, K.: Distributed processing techniques of laser beam control for free space optics system, Proc. SICE2014, 2014, pp.1960-1965 (2014)
36. Tsujimura, T., Muta, S., Masaki, Y., and Izumi, K.: Initial Alignment Scheme and Tracking Control Technique of Free Space Optics Laser Beam, OPICS2014 (2014)
37. Takeshi Tsujimura, Kiyotaka Izumi, and Koichi Yoshida, “Transmission Laser Beam Control Techniques for Active Free Space Optics Systems”, E-Business and Telecommunications , Springer-Verlag, (2015)
38. Takeshi Tsujimura, Yuta Shimada, Yuki Tashiro, Kiyotaka Izumi, Koichi Yoshida: Optical Axis Adjustment System for Free Space Optics Transmission, 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, 731-734 (2016)
39. Shimada, Y., Tashiro, Y., Yoshida, K., Izumi, K. Tsujimura, T.: Initial Alignment Method for Free Space Optics Laser Beam, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 55, No. 8S3, (2016)
40. Yuki Tashiro, Yuta Shimada, Kiyotaka Izumi, Takeshi Tsujimura, Koichi Yoshida: Optical Axis Identification Technique for Free Space Optics Transmission, International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems, Vol 6, No 2 (2017)

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Optical Axis Identification Technique for Free Space Optics Transmission	International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems	2017年8月
Optical System Design for Laser Tracking of Free Space Optics	Proc. SICE Annual Conference 2017	2017年9月
Collaborative All-Optical Alignment System for Free Space Optics Communication	10-th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems	2018年9月 (予定)
Laser axis estimation method for long distance optical space communication	SICE Annual Conference 2018	2018年9月 (予定)
Spatial Laser Beam Control System for Optical Robot Intercommunication	2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics	2018年10月 (予定)