

アクティブ光空間通信システムの通信特性の検討

Evaluation of Active Free Space Optics Transmission System



辻村 健 (Takeshi TSUJIMURA, Ph. D.)

佐賀大学 理工学部 機械システム工学科 教授

(Professor, Faculty of Science and Engineering, Saga University)

日本機械学会 計測自動制御学会 日本ロボット学会 精密工学会など

受賞：日本機械学会賞奨励賞 (1990 年) 計測自動制御学会学術奨励賞 (2005 年) Best Paper Award, SICE-ICCAS 2006 (2006 年)

Best Paper Award, OPTICS2014 (2014 年)

著書：Advances in Robotic Systems, Academic Press (1991)

Mobile Robots: New Research, Nova Science Publishers (2005)

Computational Intelligence in Electromyography Analysis, InTech (2012)

E-Business and Telecommunications, Springer-Verlag (2015)

研究専門分野：情報通信 ロボット工学

あらまし 簡易なブロードバンド通信や災害時のアドホックネットワーク技術の一つとして、レーザ光通信方式とロボット制御技術を組み合わせたアクティブ光空間通信の実現を目的に、レーザビーム光軸追従制御システムを設計して双方向通信系を構築し、通信システムとしての有効性を検証した。プロトタイプは2台のガルバミラーと圧電駆動式 2 次元ミラーを内蔵し、PSD によりレーザ位置誤差を検出しフィードバック制御を実行する。ターゲットとする受信器が揺動する場合を想定し、これに追従して通信を維持する制御プログラムを MATLAB/simulink を利用して作成した。実験の結果、ターゲットが 5 mm 変位した場合 0.2 秒以内で追従を完了することを確認した。また、空間伝送距離 35 m で通信実験を行った結果、ビットエラーレートが 10^{-11} 以下と良好な通信品質を維持して 1550 nm 赤外線レーザ光による 1 Gbps アクティブ光空間通信を提供できることを確認した。

1. はじめに

光空間通信 (Free Space Optics : FSO) とは、対向する端末間でレーザ通信光を空中に発射し光信号を交換する通信方式である [1]-[3]。高速広帯域である、秘匿性が高い、設置が比較的容易で低コストである等の

特長を持ち、光ファイバ通信／電波無線通信のオールタナティブとして研究が行われている [4]-[14]。安定な光空間通信のためには、送信側／受信側の光軸を常に一致させ、通信レーザ光が高効率で受信される状態を維持する必要がある。

著者らは送受信装置内にレンズやミラーなどの光学系を配し、能動的にレーザ光を制御するアクティブ光空間通信システムを提案して、上記の課題解決を試みている [15]-[30]。本稿では、当該通信装置の光学系・制御系設計、光軸制御実験、通信実験に関する検討結果を報告する。

2. アクティブ光空間通信装置

本システムでは、送信器(光源)－送信側コリメータレンズ間および受信器(受光素子)－受信側コリメータレンズ間を光ファイバで結び、有線伝送光をコリメータレンズにより平行空間光に変換する。したがって、当該装置の目的は、送信側・受信側コリメータレンズの光軸を一致させることである。一旦合わせた光軸も、大気の状態変化や通信装置設置点の振動・変形によってサブ秒から年単位まで様々なタイムスパンで誤差が生じ、結合損失の増大を招く。

これを補償する目的で、図 1 に示すような光軸調整を行うための光学系を設計した。双方向通信用の送受一体型光学系であり、異なる波長波長が同じ光軸上に逆方向に伝搬する。2 波長の分離融合は、本図の記載範囲外に設けた光カップラで行う。アクティブ光空間通信システムの本質は、図中破線で囲んだ光軸調整メカニズムにある。光軸の振動を補正するためには、レーザ光のピッチ角・ヨー角、上下・左右の並進位置の 4 自由度を調整する機構が必要であり、本設計では、これをコリメータレンズ近傍に設けた。2 自由度制御可能な反射鏡 2 枚を光路上に配置し、それぞれの動きを 2 次元 PSD (Position Sensitive Detector) を用いて検出する仕組みとした。

この設計方針に沿って、図 2 に示すようなアクティブ光空間通信装置を試作した。この装置では、並進位置補正のためサーボモータで駆動するガルバノミラー 2 台と、レーザ角度を補正するための圧電駆動式 2 次元ミラーを採用した。

アクティブ光空間通信システムの通信特性の検討

Evaluation of Active Free Space Optics Transmission System

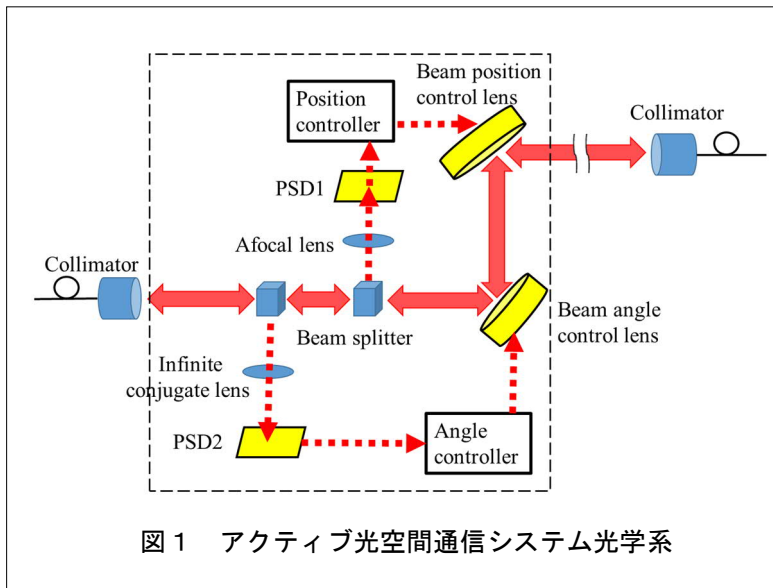


図1 アクティブ光空間通信システム光学系



図2 アクティブ光空間通信装置プロトタイプ

コリメータレンズによって空間平行ビームに変換された通信光は、2 台のガルバノミラーによって照射位置を調整したのち、圧電駆動式ミラーの中心へと導かれる。次に、圧電駆動式ミラーにより、レーザの入射方向を制御し対向するコリメータレンズに通信光が到達する。光路の途中にビームスプリッタを配置し、通信光を取り出し、各ミラーの位置決め指標とする。ビームスプリッタにより分光したレーザ光がアフォーカル光学系レンズを通過し到達した点を 2 次元 PSD で計測することによって、反射レーザ光の位置誤差のみを検出することが可能になる。同様に、無限共役比レンズを用いた光路では、反射レーザ光の角度誤差のみを評価することができる。2 つの PSD の情報を用いてフィードバック制御系を構成することにより、レーザ通信光を目標位置・角度に収束させることが可能となる。

次に、アクティブ光空間通信装置の実験のため、下記の構成で制御系を構築した。2 台のパソコンを用意し、1 台を Host PC、他方を Target PC とし、MATLAB/Simulink (Math Works 社製) を活用して Simulink Real-Time を用いたリアルタイムフィードバック制御を行った。PSD は、レーザ光の 2 次元受光平面内の照射位置情報と受光パワーを電圧出力し、A/D ボードを介して Target PC へ取り込む。パソコン内で制御指令値を計算した後、D/A ボードを介してガルバノミラー、圧電駆動式ミラーに制御入力を与える。

3. 特性評価実験

3.1 光軸制御実験

アクティブ光空間通信装置は、分光したレーザ光を PSD 原点に位置決めするリアルタイムフィードバック制御を実行することにより、対向するコリメータレンズに通信レーザ光を高効率で結合させるシステムである。制御システムとしての観点から、この装置のフィードバック特性を検証した。意図的にレーザ照射位置の偏差を外乱として与えた場合に、どのようにレーザ光位置・角度の補正を行うかを定量的に評価した。

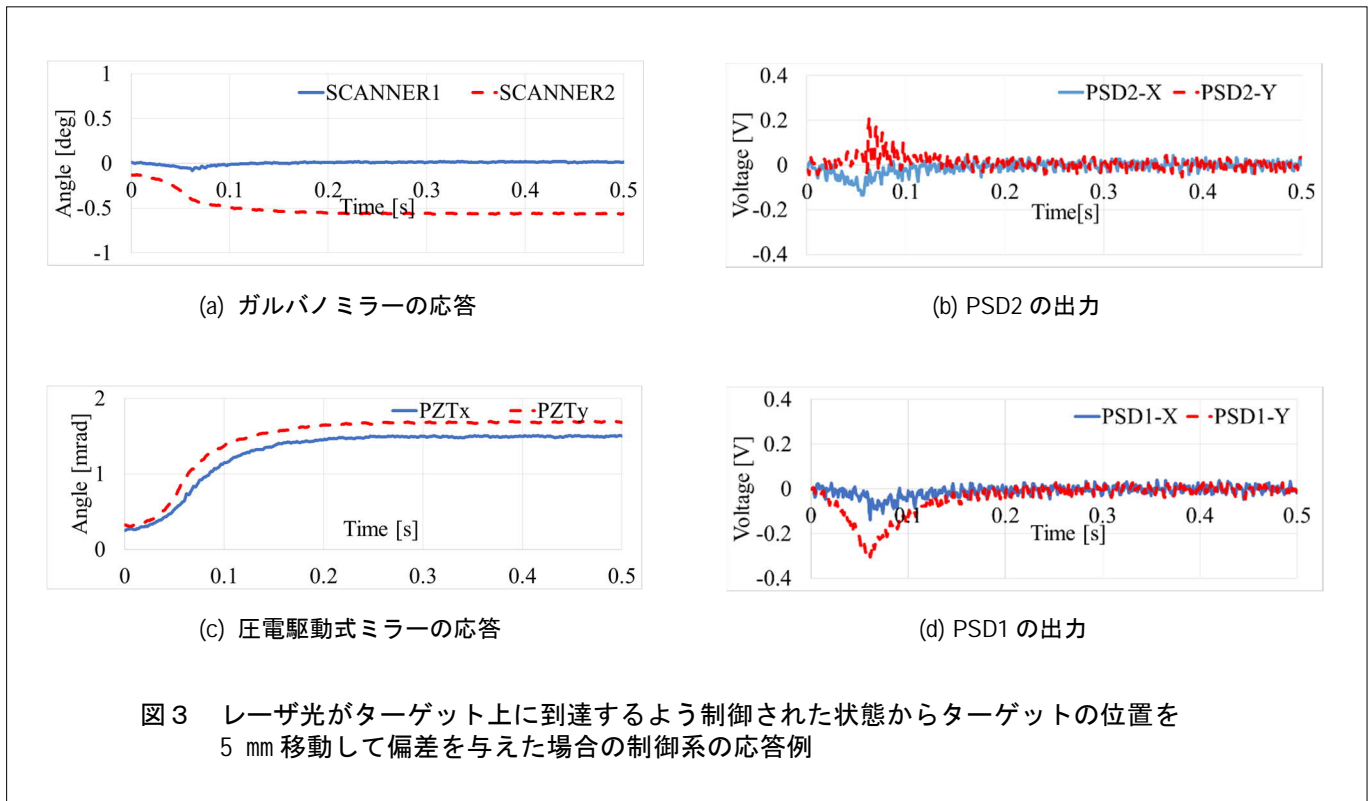
一例として、レーザ光がターゲット上に到達するよう制御された状態からターゲットの位置を 5 mm 移動して偏差を与えた場合の制御系の応答を図 3 に示す。

図 3(a)は、2 台のガルバノミラーの動作を表し、縦軸は反射鏡の角度、横軸は時間を表す。外乱を与えた時刻を 0.0 s とし、ガルバノミラー SCANNER1, SCANNER2 への角度指令値をそれぞれ実線、破線で示している。外乱発生後 0.1 秒程度でミラー角度が安定し、レーザ照射方向の補正を完了している。

レーザ照射位置は、Position Sensitive Detector, PSD2 で検出し、その誤差を電圧値として出力する。図 3(b)は、この時の 2 次元 PSD の出力電圧の変化を表し、縦軸は PSD2 の出力電圧、横軸は時間である。実線、破線は、それぞれ x 方向、y 方向のレーザ到達点の偏差を示す。外乱発生後 0.1 秒程度で目標値である

アクティブ光空間通信システムの通信特性の検討

Evaluation of Active Free Space Optics Transmission System



PSD2 の原点にレーザ到達点が維持され、光軸補正が正しく行われたことが確認できる。

図 3(c)は、圧電駆動式ミラーの動作を表し、縦軸は反射鏡の角度、横軸は時間を表す。外乱を与えた時刻を 0.0 s とし、圧電駆動式ミラー PZTx, PZTy への角度指令値をそれぞれ実線、破線で示している。外乱発生後 0.2 秒程度でミラー角度が安定し、レーザ照射位置の補正を完了している。

レーザ照射角度は、Position Sensitive Detector, PSD1 で検出し、その誤差を電圧値として出力する。図 3(d)は、この時の 2 次元 PSD の出力電圧の変化を表し、縦軸は PSD1 の出力電圧、横軸は時間である。実線、破線は、それぞれ x 方向、y 方向のレーザ到達点の偏差を示す。外乱発生後 0.2 秒程度で目標値である PSD1 の原点にレーザ到達点が維持され、フィードバック制御が正しく行われたことが確認できる。

以上の実験結果より、5 mm 程度の偏差であれば、0.2 秒以内に照射レーザ光の位置と角度の双方を補正して光軸調整を完了できることが確認できた。

3.2 通信実験

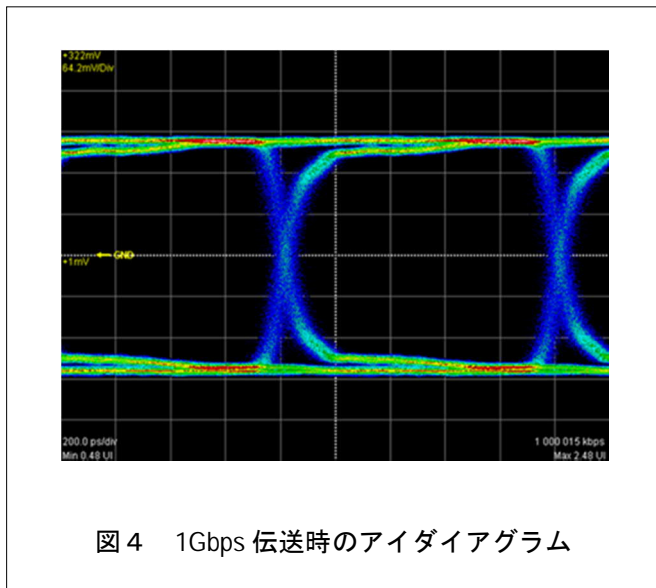
双方向アクティブ光空間通信システムプロトタイプを用いて通信実験を行い、伝送信号の品質評価を行った。設備上の制限から、大学建屋内に往復 150 m の通信ルートを設け、片道は光空間通信、もう片道は光ファイバを用いるハイブリッド型の伝送路とした。ただし、実質的な空間通信光路長は 35 m である。

ビット誤り率測定器 MP2101A (ANRITSU) を用いて 1 Gbps 疑似ランダムパターン光信号を送信したときのビットエラーレートを測定したところ、 10^{-11} 以下と極めて高品質の伝送特性が得られた。このとき空間通信区間での光信号の受信強度は -6.85 dBm であった。

また、アイパターンダイアグラムを計測したところ、図 4 のようにジッタが少なくクリアなパルス信号が観測できた。これからも、高品質のデジタル信号が伝送されていることが明らかとなった。

アクティブ光空間通信システムの通信特性の検討

Evaluation of Active Free Space Optics Transmission System



4. まとめ

アクティブ光空間通信システムを提案し、設計試作した。通信レーザ光の到達位置・角度の偏差を 2 次元 PSD で検出し、ガルバノミラーと圧電駆動式ミラーをコントロールするフィードバック制御系を設計した。制御特性を評価するために、揺動する受信端末を追従する実験を行い、制御系の応答を測定した。その結果、5 mm の偏差に対し 0.2 秒以内で送信系の光軸を調整できることが分かった。また、光ファイバ/光空間通信ハイブリッド伝送路を構築し、通信特性を評価した。1 Gbps 光信号を伝送してビットエラーレートを測定した結果、 10^{-11} 以下と極めて高品質の通信が可能であることを確認した。また、アイパターンの観測結果もこれを裏付けた。

今後は、実用的な空間通信距離である 1 km を目指して、システムのブラッシュアップを図る予定である。

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 To-day'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] Wang, J., Kahn, J. M.: Acquisition in short-range free-space optical communication, Optical Wireless Communications V, Proc. SPIE, Vol.4873, 2002, pp. 121-132 (2002)
[7] O'Brien, D.C., et al.: Integrated transceivers for optical wireless communications, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol.11, no.1, 2005, pp.173-183 (2005)
[8] Minch, J.R., et al.: Adaptive Transceivers for Mobile Free-Space Optical Communications, IEEE Military Communications Conference, 2006, pp.1-5 (2006)
[9] Ghimire, R., Mohan, S.: Auto tracking system for free space optical communications, 13th International Conference on Transparent Optical Networks, pp.1-3 (2011)
[10] Yamashita, T., et al.: The new tracking control system for Free-Space Optical Communications, International Conf. on Space Optical Systems and Applications, pp.122-131 (2011)
[11] Vitasek, J., et al.: Misalignment loss of Free Space Optic link, 16th International Conf. on Transparent Optical Networks, pp. 1-5 (2014)
[12] 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)
[13] 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)
[14] 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)
[15] Tsujimura, T., Yoshida, K.: Active free space optics systems for ubiquitous user networks, 2004 Conf. on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices (2004)

アクティブ光空間通信システムの通信特性の検討

Evaluation of Active Free Space Optics Transmission System

- [16] K. Tanaka, T. Tsujimura, K. Yoshida, K. Katayama, and Y. Azuma, Frame-loss-free Line Switching Method for In-service Optical Access Network using Interferometry Line Length Measurement, Optical Fiber Communication Conference/postdeadline paper PDPD6 (2009).
- [17] K. Yoshida and T. Tsujimura, Seamless Transmission Between Single-mode Optical Fibers Using Free Space Optics System, SICE J. of Control Measurement and System Integration, 3, .2, pp.94-100 (2010).
- [18] T. Tsujimura, K. Yoshida, and K. Tanaka: Length measurement for optical transmission line using interferometry, Interferometry/ Book 2, ISBN 978-953-308-459-6, InTech (2012).
- [19] T. Tsujimura, S. Muta, and K. Izumi : Transmission line switching technique based on active free-space optics system, 39th Annual Conf.of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4492-4497 (2013)
- [20] K. Yoshida, K. Tanaka, T. Tsujimura, and Y. Azuma, Assisted Focus Adjustment for Free Space Optics System Coupling Single-Mode Optical Fibers, J. IEEE Trans. Industrial Electronics/Vol. 60/5306 – 5314 (2013).
- [21] T. Tsujimura, S. Muta, Y. Masaki, K. Izumi: Initial Alignment Scheme and Tracking Control Technique of Free Space Optics Laser Beam, Int.Conf. on Optical Communication Systems, pp. 83-88 (2014)
- [22] T. Tsujimura, K. Izumi and K. Yoshida, "Optical Axis Adjustment of Laser Beam Transmission System", Fifth International Conference on Digital Information Processing and Communications, pp. 13-18, ISBN:978-1-4673-6831-5 (2015).
- [23] Y. Shimada, Y. Tashiro, K. Izumi, K. Yoshida, and T. Tsujimura : Primary Alignment Technique for Free Space Optics Laser Beam, 20th Microoptics Conference (2015).
- [24] T. Tsujimura, K. Izumi, and K. Yoshida, "Transmission Laser Beam Control Techniques for Active Free Space Optics Systems", "Lecture Notes" (CCIS) , Springer-Verlag (2015).
- [25] Y. Shimada, Y. Tashiro, K. Izumi, K. Yoshida, and T. Tsujimura: Initial Alignment Method for Free Space Optics Laser Beam, Japanese Journal of Applied Physics Volume 55, Number 8S3 (2016).
- [26] T. Tsujimura, and K. Izumi : Active Spatial Interface Projecting Luminescent Augmented Reality Marker, 2016 IEEE Int.Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 499-504 (2016).
- [27] Y. Tashiro, Y. Suito, Y. Shimada, K. Izumi, K. Yoshida, T. Tsujimura: Transmission quality of bilateral free space optics system, 2017 IEEE International Conference on Mechatronics, Churchill, Australia (2017).
- [28] Y. Tashiro, Y. Shimada, K. Izumi, T. Tsujimura, K. Yoshida : Optical Axis Identification Technique for Free Space Optics Transmission, Int. J.of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems, Vol 6, No 2 (2017).
- [29] T. Tsujimura, Y. Suito, K. Yamamoto, K. Izumi: Spacial Laser Beam Control System for Optical Robot Intercommunication, 2018 IEEE Int.Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, 2919-2924 (2018).
- [30] T. Tsujimura, K. Izumi, K. Yoshida : Collaborative All-Optical Alignment System for Free Space Optics Communication, 10-th Int.Conf. on Intelligent Networking and Collaborative Systems, 146-157 (2018).

この研究は、平成26年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成27～29年度に実施されたものです。