

空間光通信における移動体捕捉追尾実験装置の開発

森田 賢太^{*1}, 山下 泰輝^{*2}, 村山 彰大^{*2}, 森田 直樹^{*3}, 高山 佳久^{*4}

Development of an Acquisition and Tracking System for Free-Space Optical Communication

by

Kenta MORITA^{*1}, Hiroki YAMASHITA^{*2}, Akihiro MURAYAMA^{*2},
Naoki MORITA^{*3} and Yoshihisa TAKAYAMA^{*4}

(received on Sep.30, 2016 & accepted on Dec.19, 2016)

あらまし

近年、移動体を相手とする光通信の研究開発が盛んに行われている。我々は、移動体に反射率を変更できる再帰反射鏡を設置し、地上局が再帰反射鏡に照射するレーザー光を利用して移動体が保有するデータを地上局へ伝送する光通信回線の形成を目指している。これにより、移動体が地上局を捕捉追尾する必要がなくなるとともに、光回線形成のために地上局が照射する高強度のビーコン光の安全性の問題も回避できると考えている。

本稿では、地上局から照射する送信ビームの拡がり角を1mradとし制御系の実験を行うための装置を開発し、その装置について評価検討を行う。

Abstract

We introduce an experimental production of a gimbal system used for studies on basic technologies in free-space laser communications. The specifications of the gimbal system are determined to satisfy requirements of optics to continuously expose the area of the diameter of 1m in the distance of 1km. We show the design of the gimbal system and the assembled equipment with some images.

キーワード: 空間光通信, 地上局, 粗追尾, 捕捉追尾システム

Keywords: Free-Space optical communication, Ground Station, Coarse Pointing, Acquisition System, Tracking System

1. はじめに

近年、移動体を相手とする空間光通信の研究開発が盛んに行われ、衛星や航空機を相手とする実証実験や成功例が報告されている¹⁾²⁾³⁾。NICTの研究では、地上局と低軌道衛星との間で、衛星機上で撮影した画像の地上への光通信による伝送に成功している³⁾。

地上局と移動局が光通信回線を形成する手順は、地上局から移動局に高精度でビーコン光を照射し、移動局は地上局のビーコン光を追尾することにより、光回線を形成する。高速に移動する低軌道衛星や

UAV(Unmanned Aerial Vehicle)などの移動体とのレーザー通信には、地上局と移動局ともに高い捕捉追尾精度が必要である。我々は、光の入射角方向に光を反射する再帰反射鏡を移動体に設置し、地上局が再帰反射鏡に照射するレーザー光を利用して移動体が保有するデータを地上局へ伝送する光通信回線の形成を目指している。これにより、移動体が地上局を捕捉追尾する必要がなくなるとともに、光回線形成のために地上局が照射する高強度のビーコン光の安全性の問題⁴⁾も回避できると考えている。

レーザー光を用いた空間光通信において通信相手によって必要となる局設備は異なるが、基盤技術は共通である。光学系の実験に関しては大気の影響や距離の影響を無視できないが、制御系の実験に関しては大気の影響などを考慮する必要はない。また、カメラが捉える被写体の大きさは距離や光学レンズの倍率と関係があるので、1km離れた場所を時速60kmで飛行するUAVを地上局から見た回転角は、1m先の物体が秒速16.7mmで移動する回転角とほぼ等しい。よって制御系の基盤技術の研究開発においては、実際に衛星との高速な通信を行う装置を製作せずに、室内などで簡易で取り扱える実験装置を利用することでも技術の本質に焦点をあてた検討を行うことができる。

本研究の目的は、地上局から照射する送信ビームの拡がり角を1mradとして1km先のUAVにφ15mmの再帰反射鏡を搭載することを想定した際の制御系の実験を、

*1 情報通信学研究科情報通信学専攻 修士課程
Graduate School of Information and
Telecommunication Engineering, Course of
Information and Telecommunication Engineering,
Master's Program

*2 情報通信学部通信ネットワーク工学科
School of Information and Telecommunication
Engineering, Department of Communication and
Network Engineering

*3 情報通信学部通信ネットワーク工学科 准教授
School of Information and Telecommunication
Engineering, Department of Communication and
Network Engineering, Associate Professor

*4 情報通信学部通信ネットワーク工学科 教授
School of Information and Telecommunication
Engineering, Department of Communication and
Network Engineering, Professor

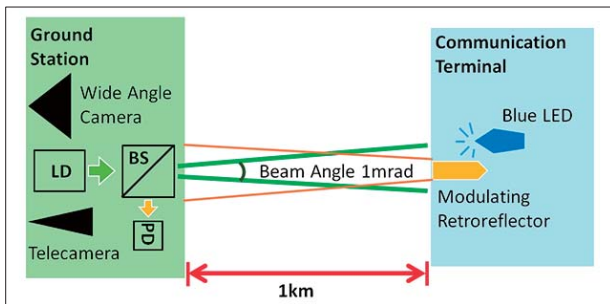


Fig.1 System Diagram

室内にて実施可能な実験装置の開発である。

2. 実験系の概要

我々が想定する条件は、地上局からの送信ビームの拡がり角を1mradとし、1km先にいる移動局の受信光の電力密度が $50 \mu \text{W}/\text{m}^2$ 以上の時に通信可能なことである。また、移動局の受信光の検出には受光面積が大きいフォトディテクタを利用して光軸の設計に余裕を持たせることで精追尾機能を必要としない構成とする。

我々が想定している通信モデルの概略図をFig.1に示す。地上局には、移動体を捉える望遠カメラと、望遠カメラの死角を補う広角カメラ、レーザー光源を配置する。移動局には、再帰反射鏡とそのマーカーとなるLEDを配置する。この通信モデルにおける光回線形成について説明する。まず、地上局はカメラを用いて移動局に配置されているLED光を発見する。通常このLED光の発見には望遠カメラを用いるが、望遠カメラの捕らえられる範囲外に移動体が移動してしまったときには、広角カメラを用いてLED光の発見を行う。地上局は移動局のLED光を発見すると、ジンバルを用いてLED光を発見した方向へレーザー光を照射する。レーザー光を照射された移動局は、反射率を変更できる再帰反射鏡を用いることで移動体が保有するデータを地上局へ伝送を行う。

本研究の目的は、地上局から照射する送信ビームの拡がり角を1mradかつ1km先の移動体に $\phi 15\text{mm}$ の再帰反射鏡を搭載した際の通信モデルにおける制御系の技術を得るために、室内にてレーザー光を照射してデータを地上局が受信する実験装置を開発することである。

本稿ではその一歩として、室内で実験するために想定する通信モデルを1kmから20mに縮小した際の地上局と移動体を開発し、その地上局が移動体を補足追尾できることを目的とする。

3. 開発した実験装置

本研究で開発した実験装置は、2軸のジンバル機構を持つ地上局、2軸のスライド機構を持つ移動局である。今回は実際にデータのやり取りを行わないため、 $\phi 15\text{mm}$ の再帰反射鏡の代わりに受光面積が $\phi 0.3\text{mm}$

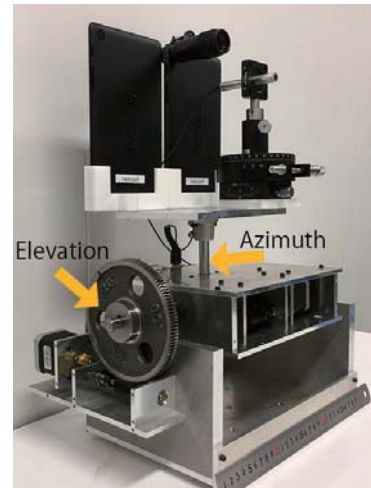


Fig.2 Gimbal System

フォトICダイオードを用い、レーザー光が再帰反射鏡の位置に当たるかを確認できる設計にした。

3.1 2軸のジンバル機構を持つ地上局

Fig.2は本研究で開発した地上局である。地上局はレーザー光を出す装置と移動局を撮影し発見するための2台のAndroidタブレット（望遠側：光学7倍×デジタル50倍、広角側：デジタル100倍）を搭載した回転ステージを持つ。レーザー光源の向きは、望遠側のタブレットが移動局のLED光をカメラの中央で捉えた時に、照射した光の中心が移動局のフォトICダイオードに当たるように設置する。また、地上局は2軸のジンバルにより回転ステージを駆動する。これにより上半球のどこでも移動局を発見しレーザー光を向けることができる。

本機では、方位角、仰角ともにアクチュエータにステッピングモータを用いる。ステッピングモータは、その特性から離散的な角度を取るため、ジンバルから放たれるビームが全天を満遍なく照射するには、ビームの拡がり角より小さな角度でジンバルを制御する必要がある。本機では、400stepで1回転するステッピングモータを用い、モータの回転を平衡車とウォームギアによって1:300に減速する。すなわち、モータ1stepの回転に対し回転ステージが 0.003° （約 0.05mrad ）回転する設計とした。これにより、1km先で光が照射する直径1mの円は、その直径の1/20で移動することができる。これは、送信先の光強度がガウス分布の場合には、思考方向の誤差に起因する光軸中心の強度変動量が、5%以下に抑えられることに相当する。

地上局による移動局の捕捉追尾の方法を説明する。最初に望遠側のAndroidタブレットのカメラを用いて撮影を行い、マーカーとなるLED光を基に移動局を発見する。望遠側のAndroidタブレットが移動局を発見できなかった場合は、広角側のタブレットが移動局を発見する。2台のタブレット間の通信はUDPを用いて移動局の発見状況などのやり取りを行っている。移動局を発見したAndroidタブレットは、カメラに映る中央

の位置と移動局のLED光との位置の差から動かす方向を算出し、ステッピングモータを制御する。ステッピングモータは、望遠側のタブレットがUSBにてマイコンと通信しモータドライバを制御する。ステッピングモータの回転数は、一度写真を撮り、100stepモータを回転させた時の写真と比較することにより、1ドット当たりのモータstep数を算出する。Androidタブレットにて移動局の発見からステッピングモータを制御するまでの流れを繰り返す行うことで、地上局は移動局を補足追尾することができる。

3.2 2軸スライド機構を持つ移動局

Fig. 3は本研究で開発した移動局である。移動局は $\phi 0.3\text{mm}$ のフォトICダイオードと、その位置を示すための $\phi 3\text{mm}$ の青色LEDを搭載した。これらは通信距離1kmで $\phi 15\text{mm}$ の再帰反射鏡を考慮したサイズである。また、青色のLEDを採用した理由は、カメラで撮影したときに他の色に比べはっきりと見えるからである。これらの移動局は2軸のスライド機構で移動する移動ステージに張り付いている。移動ステージにはゴムベルトが取り付けられており、 $\phi 31.8\text{mm}$ のプーリーを取り付けた200stepで1回転するステッピングモータにて駆動する。2つのステッピングモータを適切に動かすことにより、移動ステージは同一平面状を自由に移動することができる。なお、移動ステージの稼働域は600mm四方である。

4. LED光の位置を発見する手法

Fig. 4, Fig. 5は地上局ジンバルが駆動している時に移動局の青色LED光を撮影した写真である。Fig. 4は望遠側、Fig. 5は広角側で撮影した写真である。Fig. 4, Fig. 5に示すように露光の関係で青色のLED光は、中央付近は白色に近い色となり、さらに、周辺に分布する青色の写り方も異なる。また、カメラが移動しながらの撮影は、LEDの光源が丸であっても写真には丸では

なく楕円形のようないびつな形になる。これらにより、従来の画像処理術によるLED光の検出は困難である。

本研究では、さまざまな画像に対してLED光を認識するアルゴリズムを開発した。具体的には、対象のカメラが捉えた画像の中から特徴的な色を抽出し、その色が分布する座標の平均座標をLED光の中心とみなす方法である。ここでの特徴的な色とは、あらかじめLED光を撮影した画像中出现する多頻出な色である。特徴的な色の平均座標を求めるため、LED光のサイズや形にとらわれずにLED光の中心を求めることができる。

5. 実験

本章では、開発した地上局と移動局が想定している通信モデルを考慮した性能を有するかの確認と地上局が移動局を補足追尾できるのかを検証する。

5.1 2軸ジンバルの駆動性能

本地上局の駆動性能を確かめるために、最小回転精度、ギアのバックラッシュの影響、最大回転速度を実測する。

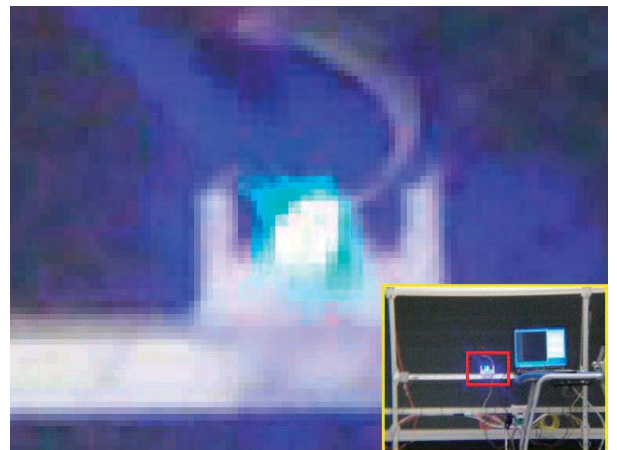


Fig.4 Image of Blue LED by Tele Camera

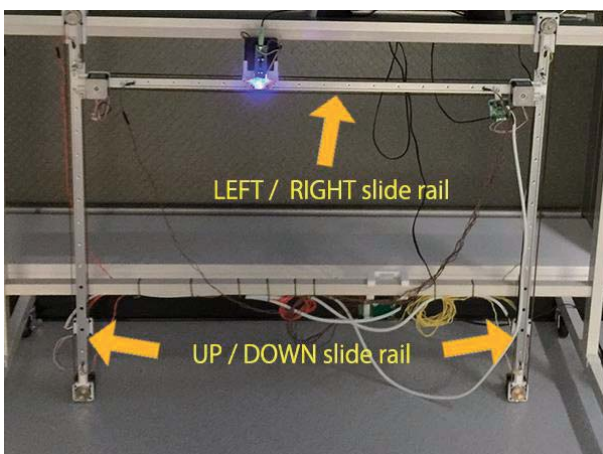


Fig.3 Communication Terminal System

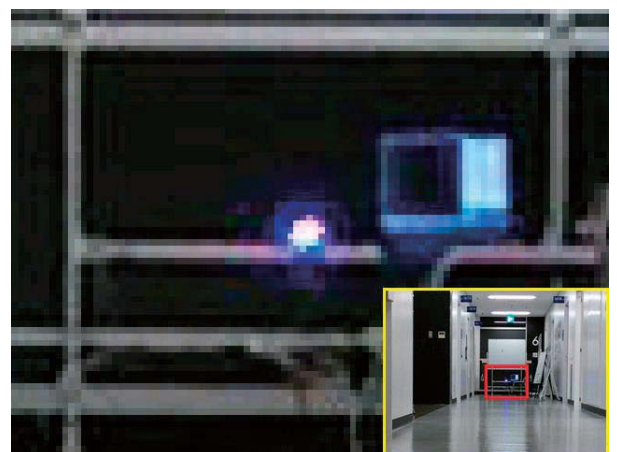


Fig.5 Image of Blue LED by Wide Angle Camera

5.1.1 最小回転精度

ジンバルの最小回転角の精度を確認するために、回転ステージにレーザ光源を設置し、50m離れた場所の光源の移動量が1step当たり2.6mmになるか実測する。

Fig. 6は、ジンバルを左方向に1stepずつ回転させた時の写真（1mm方眼紙を裏から撮影しているため光は右に動いているように写る）であり、Fig. 6Bは、Fig. 6Aに対して1step分回転させた時の写真であり、Fig. 6Cは、Fig. 6Aに対して10step分回転させた時の写真である。Fig. 6AとFig. 6Cの光軸の中心の差は、約26mmであった。なお、Fig. 6Aを基準に撮影した20step分のすべての区間において10step分の光軸の中心の差も、約26mmであった。また、ジンバルの仰角方向の計測も、同様の結果となった。これらにより、モータの回転角は0.05mradの駆動精度を満足していることを確認した。

5.1.2 ギアのバックラッシュの影響

ギアのバックラッシュの影響を確認するために、正転逆転を繰り返した時の光軸のずれの大きさを実測する。方位角方向は時計回りに360°回転させ、仰角方向は水平状態から上方に90°回転した後、下方に90°回転させ移動前と移動後の光軸の中心のずれを比較する。なお、正転逆転ともに1秒当たり3°回転する速さで、正転方向に0.3°、逆転方向に0.15°連続して回転を与えた。

Fig. 7は方位角方向に回転させた時の写真であり、Fig. 8は仰角方向に回転させた時の写真である。両図ともに図上が移動前、図下が移動後の写真である。方位角方向に正転逆転を繰り返した回数は、約4800回であり、仰角方向に正転逆転を繰り返した回数は、約2400回である。Fig. 7、Fig. 8より光軸の差はともに20mm以内であった。正転逆転1回あたりのバックラッシュの影響は、仰角方向で約0.15 μ rad相当、方位角方向で約0.08 μ rad相当となる。ビームの拡がり角の1mradに比べて非常に小さい値となったため、通信に影響しないと考える。なお、仰角方向のバックラッシュの影響が方位角方向の影響より大きくなった要因として、回転機構の重心移動の影響であると考ええる。

5.1.3 最大回転速度

ステッピングモータの回転速度は、パルス周波数に比例する。ある値を超えるとパルスの変動に追従できない脱調をおこし正確な回転が得られない。そのため、脱調する寸前のパルス周波数を求める。

結果、1.7kHzで脱調となった。そのため、許容最大周波数を1.6kHzとする。回転ステージの最大回転速度は、秒速4.8°、83mrad/sとなる。これは、地上局からみた1km先のUAVが時速約300kmで飛行する角速度と等しい。

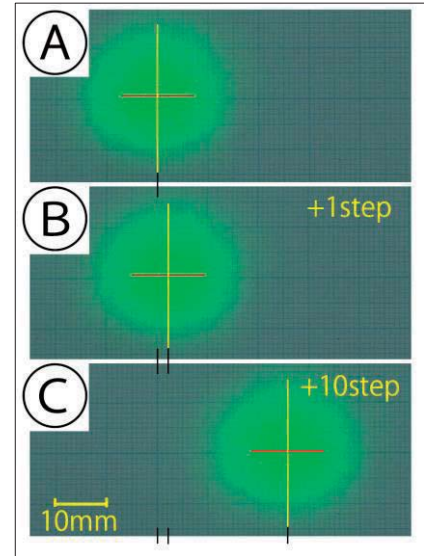


Fig.6 Measurement of Minimum Driving Angle in Azimuth Direction

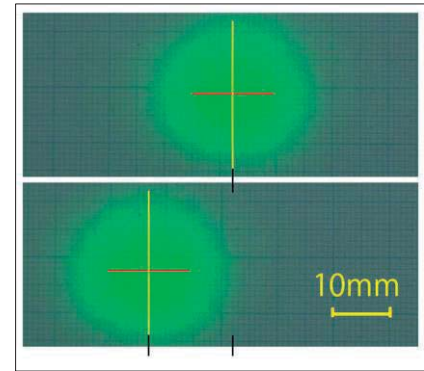


Fig.7 Motion of Beam Spot in Azimuth Direction

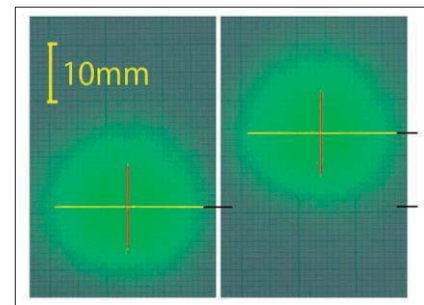


Fig.8 Motion of Beam Spot in Elevation direction

5.2 移動ステージの駆動性能

本移動ステージの駆動性能を確かめるために、最小移動量、ギア・ゴムベルトのバックラッシュ、最大移動量を実測する。

5.2.1 最小移動量

移動ステージが移動する同一平面と平行になるように紙をセットし、移動ステージにペンを取り付け、ペンの軌跡を分析する。

Fig. 9は10stepを上下左右に与えた時に1mm方眼紙に描いたペンの軌跡である。同図より、移動量は約5mmであることが確認できる。これにより、1step当たりの移動量は約0.5mmである。

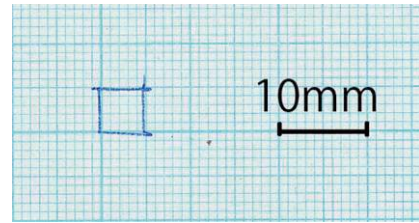


Fig.9 Trajectory of Stage Motion

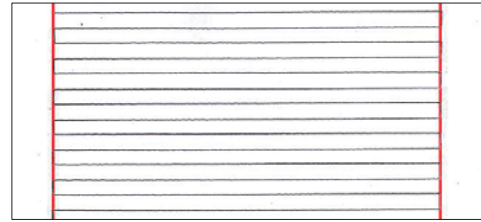


Fig.10 Backlash of the Rubber Belt

5.2.2 ギア・ゴムベルトのバックラッシュの影響

ギアとゴムベルトのバックラッシュの影響を確認するために、移動ステージを左右に行ったり来たりさせ、バックラッシュによるズレがないかを確認する。

Fig. 10は100Hzの周波数にて左右500step, 下20stepを数回与えた時のペンの軌跡である。移動ステージを左右に数回動かしても左右の位置は同じ場所になっているので、バックラッシュの影響は極めて小さいことを確認した。

5.2.3 最大移動速度

地上局同様に、移動ステージにおける脱調寸前のパルス周波数を求めた。

結果、900Hzで脱調となった。そのため、許容最大周波数を800Hzとする。停止した場所から1秒間に800step与えると、移動局は387mm移動した。よって、移動ステージの最大移動速度は、387mm/sであり、20m離れた地上局からみた角速度は19.8mrad/s相当となった。

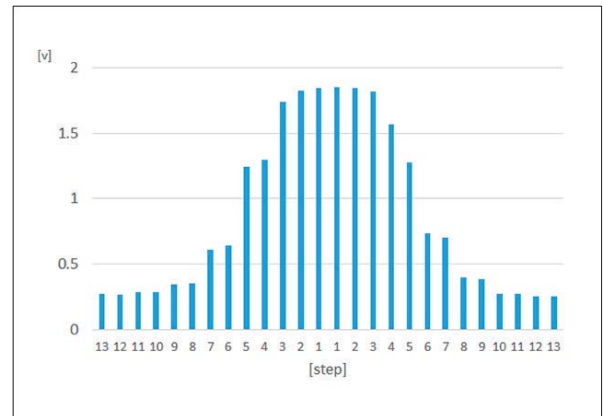


Fig.11 Output of Photo IC

5.3 レーザの拡がり角

Fig. 11は今回用いたレーザの拡がり角を測定した結果である。Fig. 11は受光面積φ0.3mmのフォトICダイオードに光軸の上下が中央に照射されるように合わせたレーザ光を左端から右端にかけ照射した時のセンサの受光電圧を測定した結果である。スペクトル半値を信号のスレッシュホールド電圧とするとその区間は10stepであるため、レーザの拡がり全角は約0.5mradであった。

5.4 地上局捕捉追尾性能

本実験でのジンバルの回転制御は、認識したLED光とカメラ中央とのピクセルの差が10ピクセル以内の時は1step/s（1秒あたり0.003°回転）、10ピクセル以上の時は10step/sとした。

初めに、移動局のLED光を認識し捕捉可能か実験した。広角カメラにはLED光が写るが望遠カメラにはLED光が映らない状態から、静止した移動体の捕捉実験を試みた。結果、望遠カメラの中央にLED光を捉えることに成功し、その時に照射したレーザがフォトICダイオードのスレッシュホールド以上の電圧になることを確認した。これにより、LED光の写り込み方が変わっ

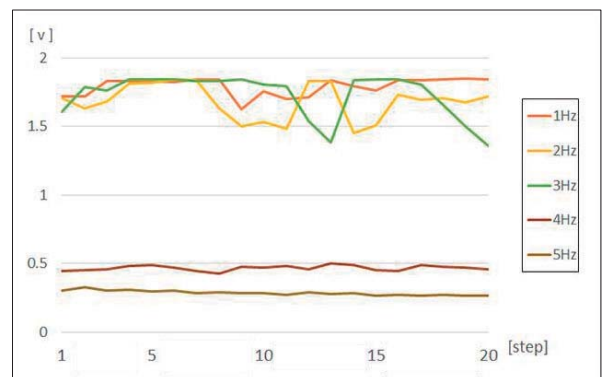


Fig.12 Tracking Characteristics of the Gimbal System

ても認識し正しい位置を算出できていること、広角カメラと望遠カメラの連携ができていることを確認した。

次に、移動体を左上に移動させ追尾可能か実験した。結果をFig. 12に示す。本実験では、移動体の動きが

3step/s (秒速1.5mm/s) まで、フォトICダイオードの受光電圧がスレッショールド以上の電圧になることを確認した。これ以上の速度を捕捉追尾するには、現在設定しているジンバルの回転制御を1step/sより速くすることにより対応可能である。これらの制御に関しては、今後の基盤技術の検討課題とする。

6. まとめと今後の課題

本研究では、地上局から照射する送信ビームの拡がり角を1mradとし室内において制御系の基盤技術の研究開発ができる実験装置、2軸ジンバル機構を持つ地上局、移動局に設置したLED光を捕捉追尾するためのアルゴリズム、2軸スライド機構を持つ移動局を開発した。

今後の課題として、UAVの飛行データをシミュレートするための移動局制御アルゴリズムを開発し、その移動体を捕捉追尾する制御アルゴリズムの開発があげられる。また、実際には大気擾乱による影響もあるため、それを踏まえた制御アルゴリズムも開発する必要がある。

参考文献

- 1) M. Shimizu et al., "A Free-Space Optical Communication between Ground Terminal and Mobile Terminal using In-orbit and Networked Optical Ground Stations Experimental Verification Advanced Testbed (INNOVA)", Proc. Ka and Broadband communications, navigations and earth observation conference, Ka 5, pp.1-9, 2014
- 2) 高山佳久, 豊嶋守生, 竹中秀樹, 門脇直人: 衛星光通信の現状と展望, 電子情報通信学会論文誌, B Vol. J94-B No. 11 pp. 1443-1451, 2011
- 3) <http://www.nict.go.jp/press/2015/06/03-2.html>
- 4) M. Toyoshima, "Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications" J. Optical Networks, vol. 4, pp. 300-311, 2005