

指向性光無線通信端末の光軸制御方法

林 新[†] ○石川 翔一[‡] 広橋 一俊[†] 春山 真一郎[‡] 中川 正雄[‡]

[†] 株式会社中川研究所 〒105-0123 東京都品川区西五反田 2-15-9 ブルーベルビル 5F

[‡] 慶応義塾大学 〒223-85226 横浜市港北日吉 4-1-1

E-mail: [†] x.lin@naka-lab.jp, [‡] haruyama@sdm.keio.ac.jp

あらまし 室内光無線高速 LAN の移動端末として、双方向指向方式によるデータ伝送を行う小型赤外線通信デバイスを開発した。光軸の高精度制御と装置の小型化を図るために、4 分割高感度アバランシェフォトダイオードとボイスコイル形式の単軸制御ミラーアクチュエーターを用いて、1 点支持の方式による光軸の指向を空間全方位で制御する方法を提案し、この方法を使うことにより、移動している端末の光軸ずれを検出すること及び検出信号に基づく光軸指向性の自動的フィードバック制御を行うことが可能となる。また、この方法に基づき、指向型端末装置を実装し、光軸の指向と位置検出動作を確認した。

キーワード 指向性光無線通信, 光軸制御, 4 分割アバランシェフォトダイオード, ミラーコイルアクチュエーター

Control Technique of Optical Axis for Directional Optical Wireless Communication Terminal

Xin LIN[†] Syoichi ISHIKAWA[‡] Kazutoshi HIROHASHI[†] Shinichiro HARUYAMA[‡] and Masao NAKAGAWA[‡]

[†] Nakagawa Laboratories, Inc. Blue Bell Building 5F, 2-15-9 Nishi-Gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo 141-0031, Japan

[‡] Keio University 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, 223-8526 Japan

E-mail: [†] {x.lin, ikawa, hirohashi}@naka-lab.jp, [‡] haruyama@sdm.keio.ac.jp

Abstract A compact infrared communication device with bidirectional directed transmission function is developed as a mobile terminal for an indoor high-speed optical wireless LAN (local area network). In order to realize high-precision control for optical axis of the terminal and miniaturization of the terminal equipment, a spatial omnidirectional control method by one-point support technique to orient the optical axis using a four-quad APD (avalanche photodiode) with high sensitivity and a mirror coil actuator with single axis control is proposed. By using this method, the optical axis point on the four-quad APD can be searched and controlled servo-actionably. We also have implemented this terminal equipment, which has transmission speed of 100Mbps and evaluated its communication quality.

Keyword Directional optical wireless communications, Optical axis control, Four-quad avalanche photodiode, Mirror coil actuator

1. はじめに

近年、室内マルチメディア情報伝送用ネットワーク (LAN: local area network) の普及に伴い、LAN の新規構築や端末機器の追加・再配置などの場合に、複雑な配線が必要となるコストと時間が問題となる。これに対して、無線接続方式では、配線が不要で端末の追加や再配置が簡単に行えるため、LAN の柔軟性と拡張性の面から優れる方式と言える。一方、光波をキャリアとして構築される光無線 LAN は、電磁波を利用する方式に比べて、高耐干渉性や秘密性の物理的機能を持つと共に、周波数資源利用の競合がない応用的利点もあるため、閉空間近距離 End-to-User のネットワーク方

式として注目されている [1-2]。そこで我々は、光無線通信技術を活用し、システムの提案及び要素技術の検討について多角の研究を進めている [3-5]。

本論文では、これまで開発した拡散型光無線アクセスポイント (親機) [5] 用の指向型光無線通信端末 (子機) を検討し、4 分割高感度アバランシェフォトダイオード (APD) とボイスコイル形式の単軸制御ミラーアクチュエーターを用いることにより、端末の指向性を実現するための光軸の検出と制御方法を提案する。この方法に基づき、ビーコンから約 1m の範囲内で空間的に約 1s の光軸検出・制御速度を確保することができることを示す。

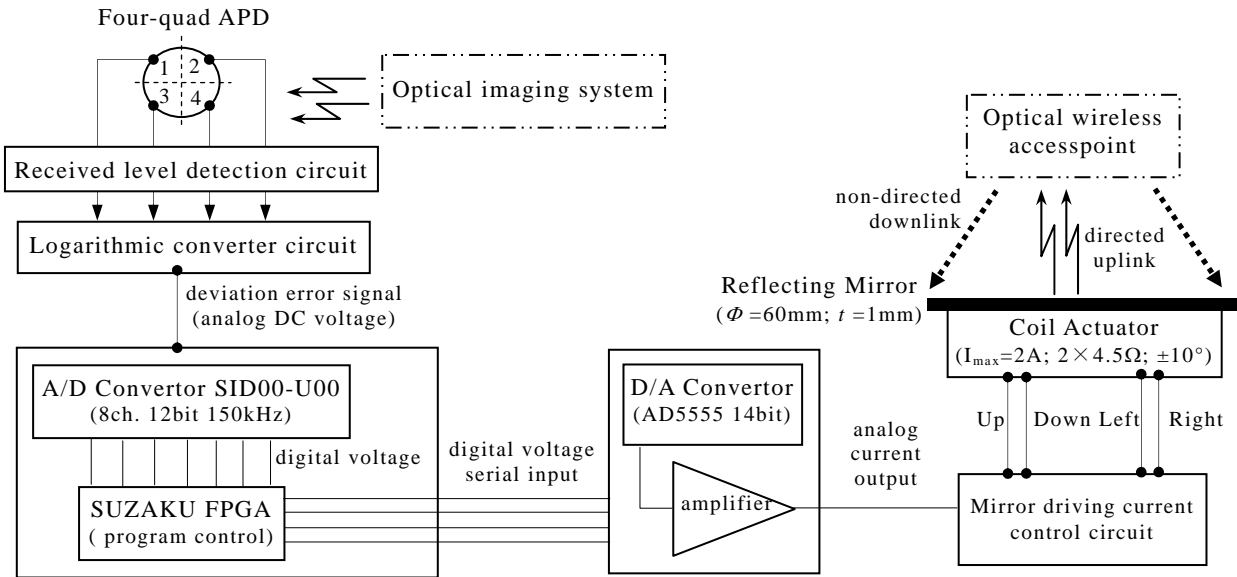


図1 指向型光無線端末の光軸制御原理

2. 原理と方法

指向性の光無線通信を実現するには、光軸の位置検出と調整を行う必要がある。また、移動端末として、装置の小型化も望ましい。そこで、高検出精度を有する4分割APDと小型単軸全方位ミラーアクチュエーターの組合せによる光軸制御の方法を提案した。

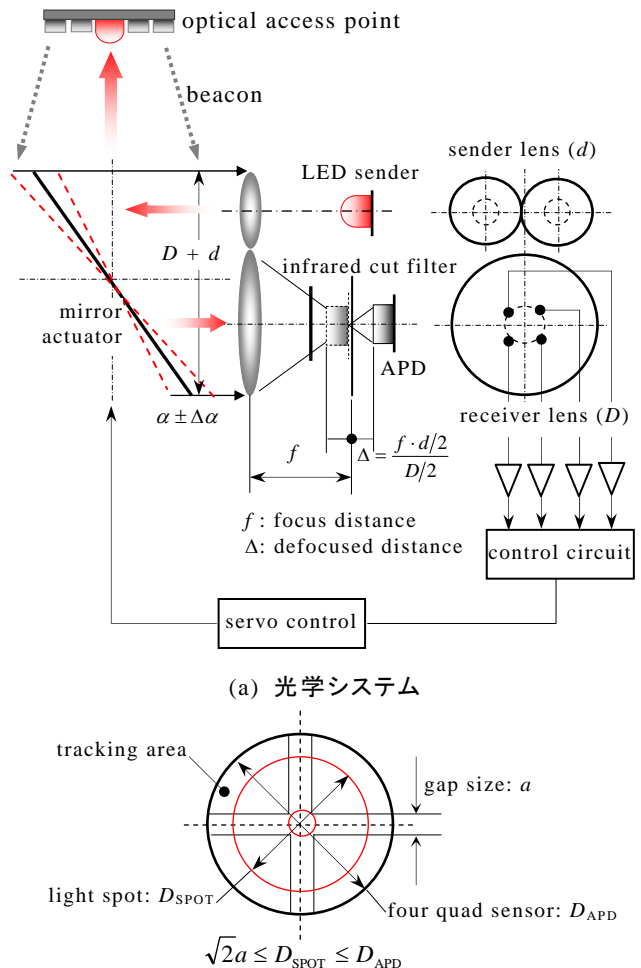
2.1. 基本構成

光軸制御装置の基本的構成を図1に示す。端末の光結像システムから光軸の離焦点像を4分割APDの受光範囲内に結像させ、APDの4ユニットはそれぞれ受信した光強度信号を4つの電気信号に変換し、オペアンプ対数演算回路の増幅と計算により、光軸位置の水平(X)と垂直(Y)偏移誤差を検出する。また、A/Dコンバータは検出したアナログ信号をデジタル信号に変換し、プログラミングすることができるFPGA(Field Programmable Gate Array)でサーボ制御を行い、出力結果はさらにD/Aコンバータにより変換され、ミラーアクチュエーターにフィードバックするここにより、光軸位置の自動的追尾を実現する。

次に、ハード(光学)とソフト(プログラム)両方から、光軸制御方法の原理を述べる。

2.2. 光学制御

図2は端末動作の光学系である。図2(a)に示すように、送信部には十分なC/N比(Carrier/Noise)を確保するために、赤外LED($\lambda=880\text{nm}$)・レンズ($d=15\text{mm}$)系を2個設置した。受信部には光アクセスポイントからのビーコン信号の発見、追尾及びビーコンを利用して光軸合わせの調整を行うために、4分割APD($\lambda_p=800\text{nm}$)・レンズ($D=25\text{mm}$, $f \approx 11\text{mm}$)系が考えられた。



(b) 追尾エリア内の最適光スポットサイズ

図2 光学制御の原理

4分割センサを利用した光検出/追尾系は離焦点結像系であり、光検出器面上のスポットサイズは、追尾制

御の精度やオフターゲット (off-target) 量に影響する。図 2 (b)に示すように、4 分割センサの視野内での光スポット (D_{SPOT})の運動範囲を追尾区域 (D_{APD})と定義すると、安定な追尾を実現するために、追尾区域の任意位置に、不変な D_{SPOT} ($\sqrt{2}a \leq D_{SPOT} \leq D_{APD}$) で結像を行う必要がある。 D_{SPOT} の大きさは、光学系の離焦点量による調整されることができる。

一方、望遠レンズを使用することにより、ビーコン信号はただ ± 3 度程度の狭い視角なので、最初から視野内でビーコンを発見できる可能性は低い。そのため最初はミラーによる広範囲のスキャンを行う必要がある。図 2 (a)の光学系に基づき、光量計算及び低駆動力の考慮により、受光直径 60mm, 厚さ 1 mm の大口径・軽型アルミ増反射平面ミラーを 45° の位置で設けた。このミラーは、400–1100nm の広帯域内に 95% 以上の高反射率を持ち、マイクロアクチュエーターの駆動により、上下左右の 4 方向で $\pm 10^\circ$ のスキャン角度がある。

2.3. ソフト制御

光学系による最初はミラーの広範囲スキャンでビーコンの発見、そして、4 分割センサにビーコン信号が入射し、各ユニットの光強度誤差制御信号が得られた後、ビーコンを追尾して光軸合わせるために、ソフトウェア制御は必須である。

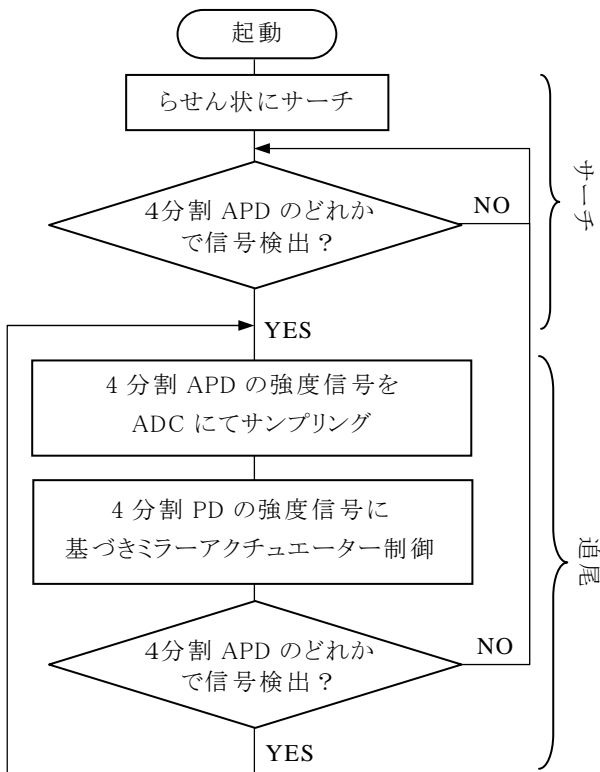


図 3 ソフト制御プログラムのフローチャート

そこで、図 1 に示すように、提案装置の対数変換演算増幅回路とミラーアクチュエーターの間に AD コンバータ (ADC), DA コンバータ (DAC) を持つ FPGA マイコンを配置し、プログラムによるデジタル電流制御を行った。4 分割 APD から対数変換回路を通った制御信号は ADC によってサンプリングされ、その値によって DAC の値を制御することでミラーアクチュエーターの制御を行う。

プログラムのフローチャートを図 3 に示す。端末の起動後、まずミラーアクチュエーターを中心点に移動させ、らせん状にサーチしつつ ADC で制御信号を監視する。APD からの 4 つの信号のうち一つでしきい値を超える信号が検出された場合、追尾に移行する。理論的に、しきい値の値は光検出センサの雑音特性に強く依存する。APD の場合に、熱雑音とショット雑音は両方とも主な雑音源であるので、しきい値は、二つの雑音の関数となる [6]。今回は、APD の入力電圧が約 1V の雑音電圧 (ビーコン光信号がない状態での A/D の出力) を少し超えるような 1.4V 程度の値と設定してある。

追尾では、4 分割センサからの 4 つの出力の差分を求め、その差分に比例して二軸の電流値をそれぞれ変化させる。このときの 4 分割センサ各ユニットからの入力 $d1 \sim d4$ と二軸それぞれの電流値の変化 $\Delta I_x, \Delta I_y$ の関係は、式 (1) と (2) で表現される [7]。

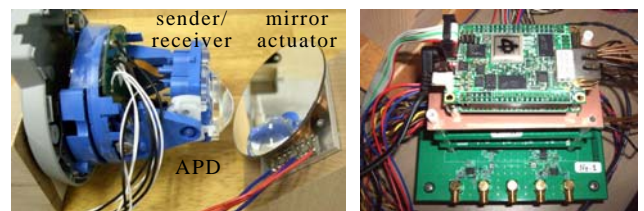
$$\Delta I_x = p \cdot [(d1+d2)-(d3+d4)] / (d1+d2+d3+d4) \dots (1)$$

$$\Delta I_y = p \cdot [(d1+d3)-(d2+d4)] / (d1+d2+d3+d4) \dots (2)$$

ここで p は APD センサの性能定数である。追尾中において、障害物や振動・端末の急激な移動等により制御信号を見失ってしまった場合、見失った位置から再びらせん運動を再開し、制御信号の検出を行う。

3. 実装と評価

提案方法の光軸制御動作を確認するために、図 4 に示すような端末装置を実装した。図 4 (a) は 4 分割 APD に装着した送受信機とミラーアクチュエーター、からなる光学機構であり、図 4 (b) は対数演算増幅回路や FPGA マイコンを含むすべての制御基板である。図 5 は実験用の 850nm 赤外 LED ビーコンである。



(a) 光学機構

(b) 制御基板

図 4 端末装置の実装例

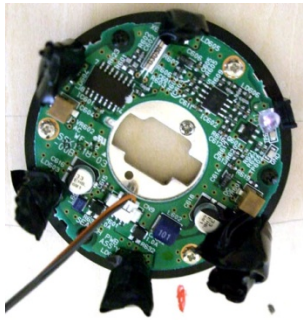
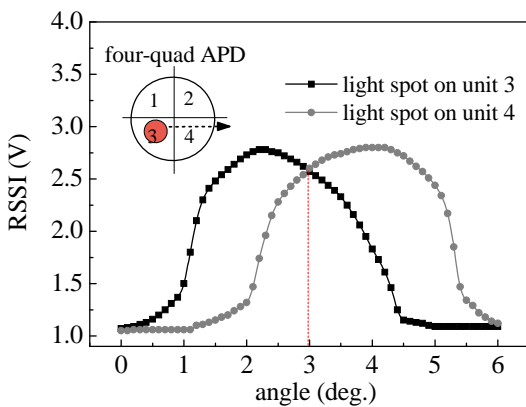


図5 実験用の赤外 LED ビーコン

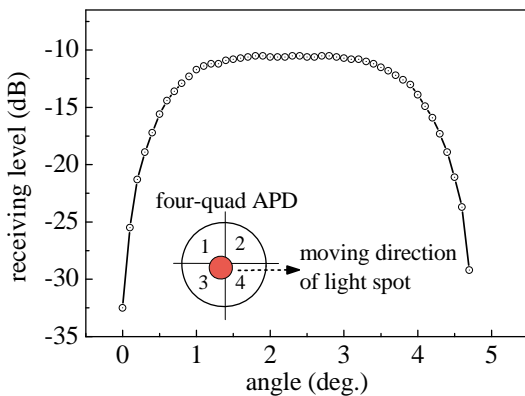
それぞれの動作機能の評価について以下に述べる。

3.1. 光学制御特性

光学制御特性としての4分割APDの受信感度の角度分解特性を調べた。実験では、APDとLEDビーコンの距離を2mに設定し、APDの受信角度を $0^\circ \sim 6^\circ$ まで変化させて受信レベルを測定した。



(a) 光スポットは追尾区域のユニット3から4に移動



(b) 光スポットは追尾区域の全域に移動

図6 4分割APDの受信感度の角度分解特性

図6(a)に光スポットが追尾区域のユニット3から4に移動させるときの測定結果を示す。横軸はAPD角

度の変化、縦軸はRSSI(受信信号強度)を表す。二つの曲線はそれぞれ光スポットがユニット3と4に当たる場合得られた信号強度の分布である。この図から分かる通り、各ユニット内の指向性は約 3° になることが見られる。

図6(b)に光スポットが追尾区域の全域に移動させるとき得られた合成の結果を示す。横軸は図6(a)と同じ、縦軸は受信レベルを表す。この図から4分割APDの合成指向分布は $1^\circ \sim 4^\circ$ 範囲(約 3°)であることがわかった。

3.2. ソフト制御特性

ソフトウェアによるミラーアクチュエーターを制御する動作を確認するために、まず、DACの値と実際のミラーの二軸それぞれの角度変化の関係を計測した。

実験では、ミラーのX、Y軸それぞれについて、DACの中心数値(8192)を基準として、6192~10992まで400刻みで変化させ、ミラーの角度を測定し、結果のグラフを図7にプロットした。これらの結果から、X、Y軸とも約 18° の稼働角を持っていることがわかった。

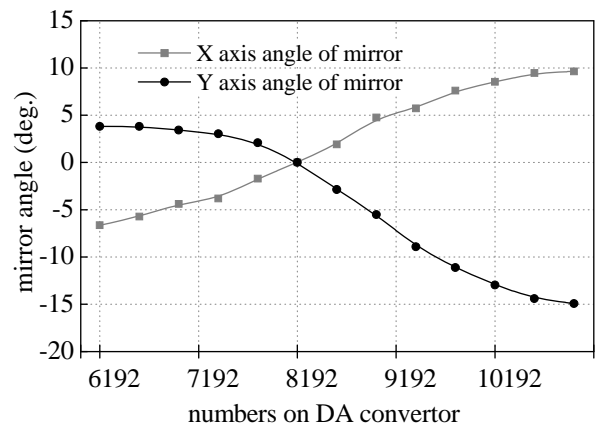
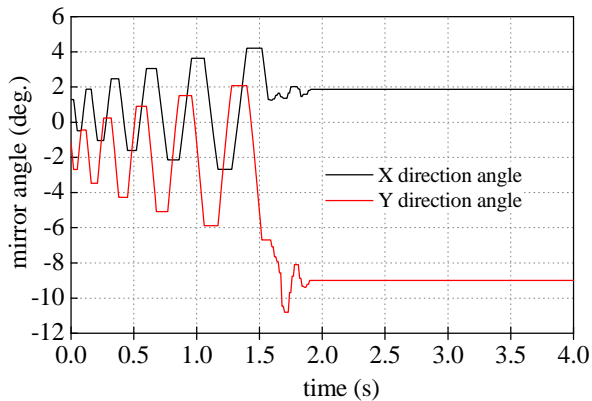


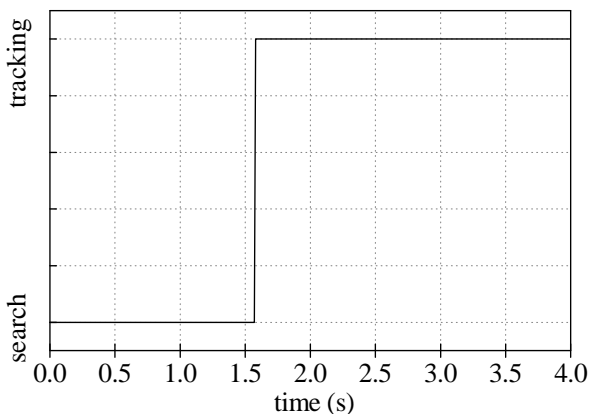
図7 DACの値と角度の関係

また、提案した方法のアルゴリズムに従い、実際にビーコンを追尾した場合のミラーの挙動を観察するために、LEDビーコンと端末装置の距離を約1mに設定し、実際にミラー制御を行った。実験では、プログラムを10秒動作させ、ADCとDACの出力の時間変化を記録し、DACの出力からミラーの角度を計算することにより、図8に示すような制御時間が経つミラーアクチュエーターの挙動を得た。

図8(a)はミラーの二軸の角度変化と制御時間の関係であり、図8(b)はサーチから追尾への制御モードの変化を表す。これらの図により、約1.5秒程度でサーチから追尾に移行しており、高速に光軸制御を行うことが可能であることがわかった。



(a) ミラー二軸の角度変化と動作時間の関係



(b) サーチから追尾への制御モードの変化

図8 光軸制御を行った際のミラーアクチュエーターの挙動

4. おわりに

本論文では、4分割高感度 APD とボイスコイル形式の単軸制御ミラーアクチュエーターを用いて、指向性光無線通信端末の光軸の制御方法をハードとソフト両方から提案した。この方法に基づき、実際の端末とビーコンを実装し、通信追尾回路を構築した。また、この回路と用い、APD の受信レベル及び、光軸制御を行った際のミラーアクチュエーターの動作を確認した。

今後は、実際のデータ信号を利用し、光無線通信を行うことにより、統合型光通信ネットワークを構築させていきたい。

謝 辞

本研究は、独立行政法人情報通信研究機関 (NICT) の委託研究「可視光通信による統合型通信ネットワークの実証」によるものです。

文 献

- [1] J. R. Barry, J.M. Kahn, E. A. Lee, and D. G. Messerschmitt, "High-speed nondirective optical communication for wireless network," IEEE Net.

Magazine, pp. 44-54, November 1991.

- [2] 宮本伸一, 森永規彦, "室内光無線通信システムの高速大容量化・広域化に関する検討," 電子情報通信学会, MWP98-5, pp.25-32, September 1998.
- [3] X. Lin and H. Itoh, "Video-based spatial optical communications method for wearable information terminal," Opt. Eng., Vol.45, No.6, pp. 064001-1-064001-6, June 2006.
- [4] 蛭田真人, 春山真一郎, 中川正雄, 石川翔一, "移動体追尾技術を用いた光無線列車通信システムの性能検討," 信学技報, Vol. 108, No. 309, pp. 19-23, November 2008.
- [5] 林新, 広橋一俊, 井川健一, "照明機能付き可視光無線 LAN アクセスポイントの開発," 信学技報, Vol.109 No. 243, pp. 63-68, October 2009.
- [6] A Selvarajan, S Kar, and T Srinivas: Optical Fiber Communication, McGraw-Hill, New York, 2002.
- [7] Steve Cowen, Susan Briest and James Dombrowski, "Underwater docking of autonomous undersea vehicles using optical terminal guidance," IEEE CNF, vol.2, pp.1143-1147, October 1997.