

ITSのための長距離高速可視光通信の基礎実験

原 俊樹[†] 圓道 知博[†] 藤井 俊彰[†] 谷本 正幸[†] 木村 好克^{††}

[†]名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8603 名古屋市千種区不老町

^{††}豊田中央研究所 〒480-1192 愛知県長久手町大字長久手字横道 41-1

E-mail: [†]harat@tanimoto.nuee.nagoya-u.ac.jp, ^{††}{yendo,fujii,tanimoto}@nuee.nagoya-u.ac.jp,

^{†††}YKimura@mosk.tytlabs.co.jp

あらまし LED 信号機の光(可視光)を通信に利用し、路車間通信を行う無線通信システムが提案されている。可視光通信分野では受信機として一般に、単一のフォトダイオード(PD)を用いたものとイメージセンサ(カメラ)を用いたものがある。前者はその高速応答性により高速通信が可能だが、背景光に弱く長距離通信に向かない。一方後者は背景光に強く長距離通信が可能だが、応答性が低いために通信が低速であるという問題があった。そこで本研究では、従来になかった新たな構成の車載用受信機を試作し、(1)屋外でのビットエラー率特性の計測と、(2)屋内での音楽伝送実験を行い、提案受信機の有効性と現状での問題を明らかにした。

キーワード 可視光通信, 路車間通信, LED 信号機, 受信機, 追尾機構

Basic experiment of long-distance and high-speed visible light communication for ITS

Toshiki HARA[†], Tomohiro YENDO[†], Toshiaki FUJII[†], Masayuki TANIMOTO[†], and Yoshikatsu KIMURA^{††}

[†] Graduate School of Engineering, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

^{††} Toyota Central R D Labs., Inc., 41-1, Aza Yokomichi, Oaza Nagakute, Nagakute-cyo, Aichi 480-1192, Japan

E-mail: [†]harat@tanimoto.nuee.nagoya-u.ac.jp, ^{††}{yendo,fujii,tanimoto}@nuee.nagoya-u.ac.jp,

^{†††}YKimura@mosk.tytlabs.co.jp

Abstract In this paper, we discuss road-vehicle communication using LED traffic signals. We use visible light as a communication method. Generally there are two kinds of receivers in the field of visible light communication. One is a receiver using only photodiode, and the other is a receiver using image sensor. However these receivers have problems such as weakness to background light and slowness of communication speed. Thus it is difficult to apply existing receiver to this type of communication. Here, we propose a new receiving system for visible light communication applied to the field of ITS. Then we had done a basic experiment and verified the effectiveness of our system.

Key words visible light communication, road-vehicle communication, LED traffic signal, receiver, tracking mechanism

1. ま え が き

LEDは従来の光源である蛍光灯などと比較して低消費電力、長寿命、視認性の高さ、発熱の少なさといった利点を持つため、次世代の光源として期待されている。さらにLEDには、蛍光灯や電球に比べて高速な応答が可能という特長がある。この高速応答性を利用し、人間のめには見えないほど高速に変調する

ことで、照明光やLEDディスプレイ[1],[2]などの役割を果たすと同時に通信機器としても使用可能になる。可視光通信は電磁ノイズに強く、高いセキュリティを確保できる。また、光の持つ特性から高速・広帯域の伝送路を経済的に実現可能で、隣接する無線ネットワークに干渉を与えないといった優れた特徴を持つ。そして現時点では電波法の規制適用範囲外であり、免許も必要なく自由に利用できる。

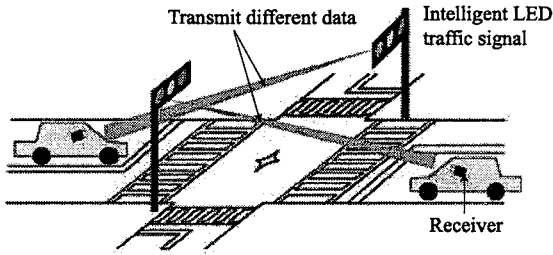


図1 LED信号機を用いた路車間通信

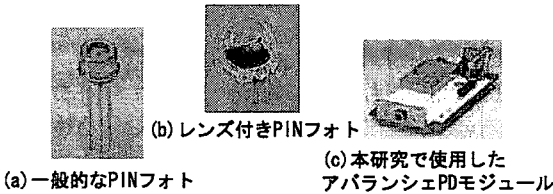


図2 フォトダイオード

こうした中、高度道路交通システム (ITS: Intelligent Transport Systems) 分野における可視光通信の研究も行われている [3]。これは、LED 信号機に通信機能を付加し、車両や歩行者に情報を伝送するというものである。例えばドライバーに信号の切り替わり時間、路面状況、周辺の交通状況、死角領域の画像情報などを提供することで運転支援を行うことできる。また、全国に多数設置されている既存の LED 信号機に、通信機能を付加することでそのまま情報送信機として利用できるため、新たな機器設置コストを節約することができる。本研究ではこの、LED 信号機を用いた可視光通信 (LED 信号機通信) に着眼している (図 1)。

ここで照明光などを用いた室内用途の通信と、我々の考える LED 信号機通信の違いについて考える。前者は室内での通信であるため、基本的に外乱光の少なく、通信距離も数 m と短い上に、送受信機間の位置関係は大きく変化しない (静的環境)、という好条件な環境で行われる。それに対し LED 信号機通信は、受信機を車載し、路車間で可視光通信を行うことを目的としているため、(1) 屋外にある様々な外乱光の影響を受ける、(2) 数十 m ~ 数百 m 程度の長距離通信が必要になる、(3) 送受信機間の位置関係が時間と共に変化する (動的環境)、という問題が挙げられる。こうした中、赤根川ら [4], [5] らによって LED 信号機通信の理論的解析が行われているが、現在までに長距離かつ高速な可視光通信を実際に行った事例は未だ報告されていない。そこで本研究では、LED 信号機を用いた「屋外の動的環境下で、長距離かつ高速な路車間通信」を行うため、従来にならぬ新たな構成の車載用受信機を構築し、基礎的な実験を行った。

本稿は以下のように構成される。2. で従来用いられてきた受信機について説明し、その後、本研究で提案する受信機について述べる。3. では試作機を用いた音楽通信と、ビットエラー率 (BER: Bit Error Rate) 計測の、2 つの実験について述べる。4. はむすびである。

2. 従来受信機と提案受信機

従来の可視光通信では光を電気信号に変換する受光素子として、フォトダイオード (PD: Photodiode) を用いて受信機が構築されている。また近年ではイメージセンサを受信機として用いる例もある。以下では両者の特徴と問題点についてふれ、それらの問題を解決する新たな構成の受信機を提案する。

2.1 フォトダイオード

光通信の分野ではフォトダイオードの中でも特に PIN 型、アバランシェ型が用いられる。以下で両者について説明し、フォトダイオードを用いた実験例を紹介する。

2.1.1 PIN フォトダイオード

PIN フォトダイオード (図 2(a)) は、P 層と N 層の間に、I 層 (低不純物濃度層) を作ることで、接合容量を小さくしたものである。接合容量とは PN 接合部に構成されるコンデンサの静電容量を指し、この値が小さいほどフォトダイオードの出力電流の立ち上がり特性は良くなる。つまり I 層を挿入することで、高速応答性を実現している。この高速応答性により、PIN フォトダイオードは光通信の受信機に一般的に用いられる。ただし、PIN フォトダイオードの出力電流は非常に小さいため、プリアンプを使って出力を増幅させる必要がある。

2.1.2 アバランシェフォトダイオード

これは、PN 接合に逆バイアスを加え、空乏層内に高電界を形成したものである。これにより、光キャリアが加速され、物質内の原子に次々と衝突し、二次キャリアを生成する、アバランシェ (なだれ) 現象が起こる。アバランシェフォトダイオードの大きな特徴は、光電流増幅作用を持ち、きわめて微弱な信号も検出可能だという点である。また、PIN フォトダイオードと同じく高速応答性を持ち、光通信の分野でよく用いられている。アバランシェフォトダイオードは、上述のように出力電流が増幅されるため、PIN フォトダイオードと違いプリアンプを必要としない。

2.1.3 フォトダイオードを用いた実験例

PIN フォトダイオードとアバランシェフォトダイオードは共に高速応答性を持っているため、高速通信に適しているが、外乱光の影響を受けやすい。そのため長距離通信には向いていない。

林ら [6] は、歩行者用 LED 信号機を情報送信機として用い、アバランシェフォトダイオードとレンズ、バンドパスフィルターを使用した屋外実験を行っている。9.6kHz に変調した方形波の送受信によって SNR を測定しているが、青色 LED を用いた場合の OSNR は 10m で約 15dB、20m で約 5dB となっている。

また、旭ら [7] によって図 2(b) のようなレンズ付き PIN フォトダイオードを用いた屋外実験が行われている。情報送信機は先ほどと同じく歩行者用 LED 信号機である。音声信号を FM 変調 (Frequency Modulation) し、SNR の測定を行っており、10m で約 26dB、18m で約 5dB となっている。

以上のようにフォトダイオードを用いた実験では通信距離がおおむね 10~20m 程度となっている。したがって室内照明光利用の可視光通信をはじめとする外乱光が少ない屋内の近距離

通信は、受信機としてフォトダイオードを適応できるが、LED 信号機通信による通信にそのまま応用することは難しい。

2.2 イメージセンサ

LED 信号機通信において、受信機にイメージセンサ(カメラ)を用いるシステムが提案されている [8], [9]。高速度カメラとよばれる高フレームレートで撮影可能なカメラを用い、取得した画像に処理を加えて情報を復号し、通信を行うシステムである。レンズによって外乱光と信号光が空間的に分離され、イメージセンサ上の各画素に入射する(図 5)ので外乱光の影響が低減し、通信距離を伸ばすことができる。増田らは階層的符号化という技術によって、通信距離が長くなっても優先度の高い情報を低ビットレートながら送信することで通信可能距離を伸ばしている。しかしイメージセンサを用いたこの方式でも通信距離は 30~40m 程度である。また、イメージセンサを用いた場合、解像度やフレームレートの限界から通信速度の向上が難しく、増田らの実験では通信速度が数十 kHz~百数十 kHz となっている。

2.3 新たな構成の提案受信機

2.1, 2.2 を踏まえ、本研究では従来にない新たな構成の受信機を提案する。以下では目標に対するアプローチを述べ、試作機の説明をする。最後にその試作機の動作について述べる。

2.3.1 長距離・高速伝送に対するアプローチ

本研究では屋外の動的環境で、長距離・高速伝送を行うために以下のようなアプローチをとった。

- (1) アバランシェフォトダイオードを受光素子として使用
- (2) 望遠レンズをフォトダイオードの前面に配置
- (3) フォトダイオードの視野を制御できるように送信機追尾機構を付加

イメージセンサ方式を用いた場合、現在の技術では高速伝送が難しい。そのため、受光素子としてフォトダイオードを用いることにした。PIN フォトダイオードでなくアバランシェフォトダイオードを用いた理由は、プリアンプを必要としないことと、手軽に利用できるモジュールが手に入りやすかったためである。次に (2) によって LED 光を集光すると共にフォトダイオードの視野角を狭め、外乱光の影響を低減させる。そして受信機側に送信機を追尾する機構を取り入れることで、送受信機間の位置関係が時間的に変化することに対応する。

2.3.2 提案受信機の試作

上記で示した内容を以下のように試作した。今回提案する受信機では追尾機構と信号光の集光を実現するのに (a) マイクロカメラ 2つ、(b) アクロマティックレンズ(口径 50mm, $f=100\text{mm}$)、(c) ガルバノメーターミラー(ジーエスアイ製 XY Series XY20) 一組、(d) キューブ型ハーフミラー(透過率:反射率=75:25)、(e) アバランシェフォトダイオードモジュール(図 2(c) 浜松ホトニクス製 C5460, 受光面直径 $\phi=1.5\text{mm}$ 。以下 PD モジュール) が用いられていて、それらが図 3 のように配置されている。また図 4 に試作機の構成図を示す。

ガルバノメーターミラーとはミラーをサーボモータの軸に取り付け、電気信号に応じてミラーの回転角を変えられるようにした偏向器であり、高速応答という特長がある。(a)~(c)

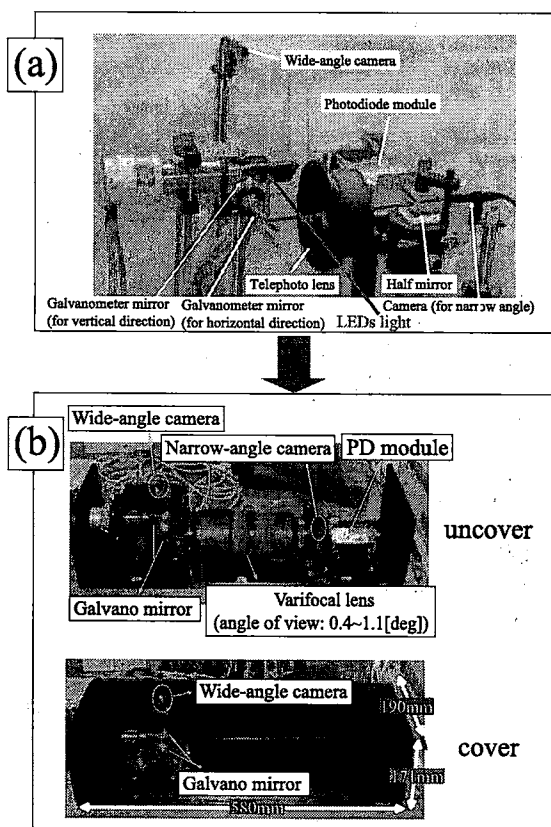


図 3 提案受信機の試作

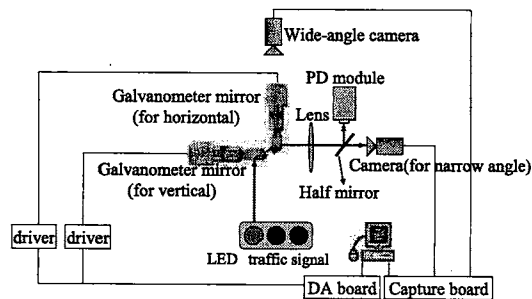


図 4 試作機の構成

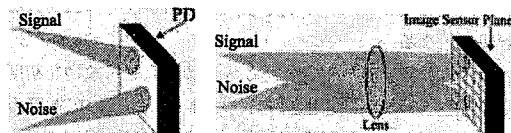


図 5 イメージセンサと PD の違い

の構成部品によって追尾機構が実現されており、レンズで集光された信号光はこの追尾機構によって (d) を介して常に (e) に入射する仕組みになっている。このとき、信号対雑音比を高めるために PD モジュールには光量の多いハーフミラー透過側の光を入射させている。また車載用に改良した 3(b) ではアク

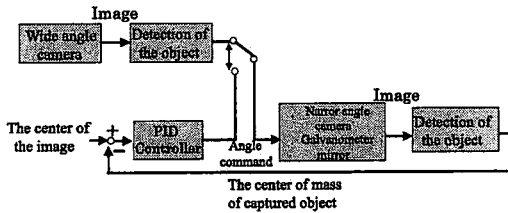


図 6 追尾制御のブロック図

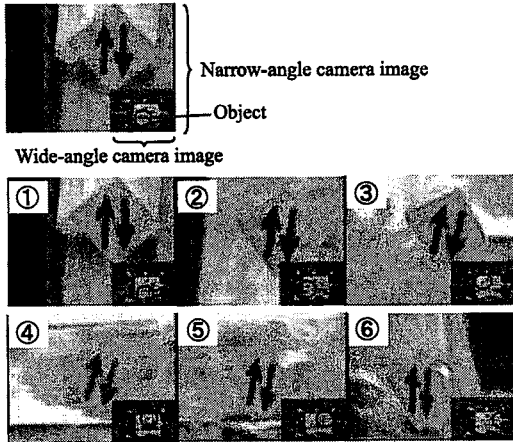


図 7 追尾デモの様子

ロマティックレンズの代わりにズームレンズ (Nikon 製 Ai AF ZoomNikkorED, $f=80\sim 200\text{mm}$) を用いている。

2.3.3 提案受信機による追尾方法

ここでは追尾機構の動作について説明する。1つ目のカメラである狭視野用カメラは、その前方に配置されたレンズと組み合わせて狭視野カメラとして機能している。狭視野カメラの前には回転軸を直交させたガルバノメーターミラーが配置されており、狭視野カメラ画像内の中心座標と追尾対象物の重心座標との差をゼロにするようミラーの回転角を制御することで、狭視野カメラ画像内で対象物を追尾することができる。この際、フィードバックループに PID 制御を用いている。PID 制御とは、入力値の制御を出力値と目標値との偏差、その積分、および微分の3つの要素によって行う方法のことである。制御の分野では一般的に用いられる手法であり、木目細かなでスムーズな制御が可能となる。

2つ目のカメラである広視野カメラは、追尾対象物を初期捕捉 (発見) するために使用される。つまり、はじめ広視野カメラによって対象物の位置情報を得てその方向に狭視野カメラを向け、次に狭視野カメラ画像情報をもとにフィードバック制御を行うことで対象物の追尾を行う。1つの信号機との通信を終え、次の信号機との通信を開始する際は、再び広視野カメラ情報を用いて新たな信号機の位置を把握し、その後狭視野カメラで追尾する、というのが一連の動作である。図6にこの制御のブロック図を示す。

この追尾機構の動作を確認するために標識をモデルにした追

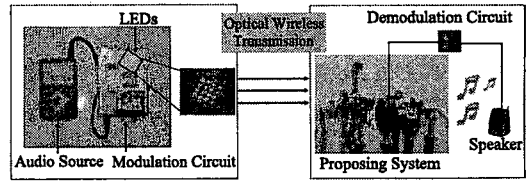


図 8 音楽伝送実験

Transmitter Proposing system



図 9 音楽伝送の実験の様子

尾対象物を用意し、追尾の実験を行った。その結果、広視野カメラでの発見とその後の追尾、一連の動作がスムーズに行えた。追尾の様子を図7に示す。

3. 通信実験

本研究で試作した受信機を用いて次の2つの実験を行った。一つ目は屋内の動的環境での音楽伝送実験、もう一つは屋外の静的環境下での BER 測定である。以下でこれらの実験について詳しく述べる。

3.1 音楽伝送実験

試作機の動作確認のため、そして送受信機間の位置関係が時間的に変化しながら通信が行えることを示すため、簡単な音声伝送の実験を行った。実験は屋内で行い、送信機として図8にあるような変調回路と16個のLEDアレーを一体化したものを用意した。そして送受信機間距離を数m保ち、送信機を手に持って動かす中で音楽が再生されるかどうかの確認をした。以下で送信機検出のための画像処理、変調方式について説明し、最後に実験結果を述べる。

3.1.1 画像処理による送信機の検出

本実験では送信機の検出に、輝度値によるしきい値処理のみを行った。LEDは非常に高輝度なので、室内ではLED以外の光源やその他様々な物体が存在していても、カメラのシャッター速度を速めることで、ほぼLED光のみを残すことができる。そしてわずかに残った背景光等を、輝度によるしきい値処理で2値化し、消去する。本研究はシステムの提案及びその構築が目的なので、画像処理に関して現段階ではこのような簡単なものを用いている。今後は屋外でLED信号機を検出するために高度なアルゴリズムを適用していくつもりである。

3.1.2 変調方式

本実験の音楽変調方式にはPWM(Pulse Width Modulation)を用いている。上述の通り、本実験の目的はシステムの動作を確認することなので、変調方式に関して深い検討を行う必要がなかった。そこで比較的手軽に回路を構成できることと、光強度の変化による通信への影響がないことから今回はPWMを使用した。

3.1.3 音楽伝送の実験結果

まず、ミラーによる追尾を行わない場合の伝送を行った。その結果、LED 光が PD モジュールに入射した一瞬のみ、音楽が出力された。これは PD の視野が 1deg 弱と、非常に狭いためである。

次に追尾をしながら伝送を行った。その結果、試作機の追尾可能範囲内 (水平・垂直各方向土約 24[deg]) において送信機を動かしても常に音楽が出力され、試作機が所望の動作をすることを確認できた (図 9)。

3.2 BER 測定実験

長距離通信を行う上での基礎実験として送受信機それぞれの位置を固定した、屋外の静的環境で BER を測定した。実験は 10 月の晴れた日の午後に大学構内 (屋外) にて行った。送信機は図 10 のように実際の信号機と同じもの (LED192 個) を用意し、FPGA ボードによって制御を行った。受信機は図 3(b) を使い、レンズの焦点距離は 200mm を選択した。このとき、レンズの焦点距離と PD の受光面直径の関係からフォトダイオードの視野角は約 0.4deg になっている。以下で変調方式を説明し、その後実験結果と考察を述べる。

3.2.1 変調方式

変調方式には 16QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation, 直交振幅変調) を使用し、直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を行っている。誤り訂正にはターボ符号を用いた。

16QAM は位相と振幅にそれぞれ 4 種類の値を持たせ、それらの組み合わせによって合計 16 通りの値 (4 ビットのデータ) を持たせるものである。直交周波数分割多重とは、無線などで用いられるデジタル変調方式の一つであり、地上波デジタル放送、IEEE802.11a などの無線 LAN、電力線モデムなどの伝送方式に採用されている。FDM (周波数分割多重) では高速なデータ信号を低速で狭帯域なデータ信号に変換し周波数軸上で並列に伝送するが、OFDM ではさらに直交性を利用し、周波数軸上でのオーバーラップを許容している。複数の搬送波を一部重なりあいながらも互いに干渉することなく密に並べることができることから、狭い周波数の範囲を効率的に利用した広帯域伝送を実現し、周波数の利用効率を上げているものである。また、ターボ符号は誤り訂正方式の一つであり、シャノンの法則で定まる最大転送速度に近い効率でデジタル通信を可能にする技術として注目を集めているものである。

また、本実験で送信するデータはランダムデータ系列である pn9 (Pseud Random Pattern, 擬似ランダムパターン) を使い、転送レートは 2Mbps とした。

3.2.2 BER 測定の結果と考察

実験結果を図 11 に示す。本研究では良好な通信を行うための BER の目安を 10^{-6} と設定している。30m 地点ではそれが達成されているが、100m 地点に至っては 10^{-2} と、良い結果を得ることができなかった。

以上の結果に対し、考察を行った。30m 以降での BER が伸びない大きな理由と考えられるのは、今回の実験にしようした PD モジュールのノイズレベルが高いことが考えられる。図 12

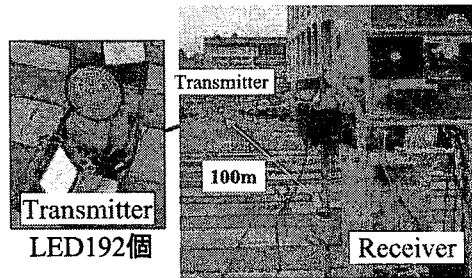


図 10 BER 測定の様子

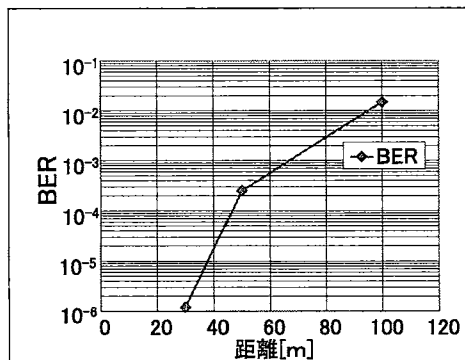


図 11 BER 測定の結果

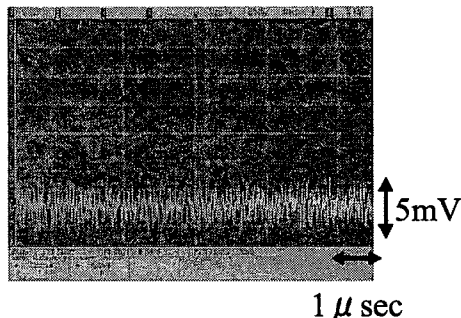


図 12 PD モジュールのノイズレベル

に示したのは PD モジュールに入射する光を完全に遮断した際の出力であるが、常時 5mV 程度の高周波ノイズが発生している。

解決策としてはローパスフィルタによって高周波ノイズを除去する、あるいはノイズレベルの低い PIN フォトダイオードを選定して高周波用低雑音増幅回路を作成し、それらを組み合わせる使用することが挙げられる。

4. むすび

本研究では従来困難だった長距離からの高速な可視光通信を可能にする車載用受信機を試作し、基礎的な 2 つの実験を行った。一つは屋内の動的環境における音楽伝送、もう一方は屋外の静的環境における BER 測定である。

前者の実験から、送受信機間の位置関係を変化させても試作

機が所望の動作をすることで通信が行えることを示した。また後者の実験では 30m 地点では BER が 10^{-6} という所望の値を得られたが、100m では 10^{-2} と、現在のところ良い結果を得ることができていない。

今後はまず静的環境下での BER 値向上を目指す。具体的には (1) ローパスフィルタによって高周波成分のノイズ除去を行うこと、(2) ノイズレベルの低い別のフォトダイオードを検討すること、(3) 変調方式を現在の 16QAM から QPSK にすることで SNR を向上させること、以上 3 点を行う。

その後屋外での LED 信号機検出アルゴリズムを検討・実装し、屋外長距離における動的環境下での通信実験を行っていく予定である。

謝 辞

本研究に関して貴重な御意見を頂いた名古屋大学エコトピア科学研究所准教授山里敬也氏に深く感謝する。また、本研究で使用した LED の一部を提供して頂いた豊田合成株式会社に謝意を表する。

文 献

- [1] 春山真一郎, "可視光通信," 信学論 (A), vol. J86-A, no. 1, pp1284-1291, Dec. 2003.
- [2] 小峯敏彦, 春山真一郎, 中川正雄, "白色 LED を用いた可視光通信における干渉および反射の影響," 信学技報, WBS2003-37, SAT2003-29, June. 2003.
- [3] 中川正雄, "可視光通信と ITS," 信学技報, ITS2006-14, July. 2006.
- [4] 赤根川雅子, 田中裕一, 中川正雄, "LED 式交通信号機を利用した交通情報システムの基礎検討," 信学技報, ITS2000-8, May. 2000.
- [5] 前原基芳, 春山真一郎, 中川正雄, "受信機に追尾機構を用いた LED 式交通信号機による情報提供システムの特性解析," 信学技報, ITS2001-2, May. 2001.
- [6] 林靖彦, 福原敏彦, 国安章男, 梅野正義, 村瀬真一, 河野敦史, "信号灯器を用いた可視光通信の検討," 信学技報, ITS2001-147, May. 2002.
- [7] 旭健作, 澤井佑介, 三好史泰, 青山泰弘, 小川明, "LED 交通信号機を用いた光空間通信方式の検討," 信学技報, ITS2007-14, July. 2007.
- [8] 宮内聡, 小峯敏彦, 後渾行, 吉村真一, 春山真一郎, 中川正雄, "高速 CMOS イメージセンサを用いた二次元送受信器による並列光空間通信の提案," 信学技報, CS2004-18, May. 2004.
- [9] 増田恭一郎, 山里敬也, 岡田啓, 片山正昭, "LED 信号機と車載カメラを用いた可視光空間通信における階層的符号化方式," 信学論 (A), vol. J90-A, no. 9, pp696-704, Sep. 2007.
- [10] 湊淳, 伊多波正徳, 小澤哲, 中川正雄, "PWM 変調と AM 受信で構成された簡易可視光通信システム," 信学論 (B), vol. J88-B, no. 12, pp2390-239, Dec. 2005.
- [11] 原俊樹, 圓道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸 "動的環境におけるカメラとフォトダイオードを用いたハイブリッド型長距離可視光通信システム," 信学論 (A), vol. J90-A, no. 11, pp83-884, Nov. 2007.