

[依頼講演] 可視光通信でできること，できないこと

LED アレイと高速度カメラを用いた路車間可視光通信の研究から分かったこと

山里 敬也†

† 名古屋大学教養教育院

〒 464-8603 名古屋市千種区不老町 C3-1 (631)

yamazato@m.ieice.org

あらまし 筆者等は，これまで LED 信号機に見立てた LED アレイからデータ伝送を行い，車輻に搭載した高速度カメラで取得した画像からデータ復調を行う，路車間可視光通信の研究を行ってきた。特徴としては，近距離と遠距離とでデータレートの異なる情報の重畳伝送ができる点である。これまで，110m 先からテキスト情報を交差点付近では音声情報の伝送に成功している。本稿では，筆者等がこれまで取り組んできた路車間可視光通信を紹介すると共に，電波を利用した無線通信との違いにフォーカスをあて，私見も交えて述べていく。

キーワード LED, ITS, 可視光通信, 並列光空間通信, 階層的符号化

[Requested Talk] What Visible Light Communication (VLC) can do, what VLC cannot do.

What I found from the research on VLC using LED array and High-Speed Camera.

Takaya YAMAZATO†

† Institute of Liberal Arts and Sciences, Nagoya University

C3-1, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8063 JAPAN

yamazato@m.ieice.org

Abstract We are conducting a study on visible light communications (VLC) using an LED traffic light and a high-speed camera equipped in a vehicle. Since we use the camera, we can capture and record surround images of the vehicle while receiving the data transmitted from the LED traffic light. This paper introduces the VLC system we are working on.

Key words LED, ITS, Visible Light Communication, Hierarchical Coding

1. ま え が き

可視光通信は，1998 年に慶應義塾大学理工学部の中川正雄教授により提唱された。2001 年から 2003 年までは本会第 3 種研究会「可視光空間通信研究会」の委員長として活躍された。中川氏は，可視光通信の研究，実用化，そしてその普及へと精力的に取り組んでおられるのは周知の通りである。2003 年には可視光通信コンソーシアム（現会長：慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授 春山 真一郎）を立ち上げ，可視光通信の研究，実用化，そしてその普及へと精力的に取り組んでいる [1]。現在，同コンソーシアムでは IEEE

を中心とした国際標準化活動も活発に展開しており [2]，これに歩調を合わせるように海外メディアでも可視光通信が取り上げられるなど [3]，世界的にブレイクする兆しがある。

可視光通信については，中川氏及び春山氏による優れた解説論文，記事などがあるので詳しくはそちらを参照してほしい [4], [5]。

本稿では，可視光通信の中でも ITS への応用，取り分け，LED 式交通信号機から車両へ情報伝送を行う路車間可視光通信にターゲットを絞り紹介していく [6]。

2. 可視光通信

2.1 可視光通信の特徴

目に見える可視光を用いた無線通信は、電波を利用する無線通信と比べて次のような特徴がある。

- 送信機（光源）が目に見えるため、どこからデータ伝送を行っているのか分かる。受信機からすれば、送信機（光源）が見えれば受信できる。
- 光源を利用するため、比較的大きなパワーを利用できる。特に照明器具を用いた可視光通信の場合、数ワットから数百ワットのパワーを送信電力として利用できる。
- データ伝送範囲が明確であるためセキュアな通信ができる。送信機で照射した範囲内でのみ通信が可能となり、その光を遮蔽すれば通信は完全に遮断できる。
- 電波の使用が制限されている場所でも利用できる。たとえば、病院、電車、飛行機などでも利用できる。また、工場やデータセンターなど電磁ノイズが多く電波の利用が難しい場所でも利用できる。
- 電波法で規制されることは無い。可視光は電磁波の波長が 350 nm から 800 nm であり、可視光の周波数は 375 THz から 857 THz となる。これは、電波法で規定している「3,000GHz(3THz) 以下の周波数の電磁波」では無いため電波法で規制されることは無い。

2.2 送信用デバイス

可視光通信で用いられる送信用デバイスの代表的なものとして、LED がある。LED は半導体デバイスであるため高速点滅させることが可能である。筆者らの測定では、2MHz 程度までは安定して動作する。

2.3 受信用デバイス

可視光通信で利用される受信デバイス（光受信器）の代表的なものとしてはフォトダイオード (PD) [9]~[12] とカメラ（イメージセンサ）がある [13], [14]。

PD は光通信において一般的な受信デバイスであり高速応答できる。しかしながら、屋外での利用を考えると、通常の PD は視野角が大きく外乱光の影響が無視できない。

一方、受信機にカメラを用いた方式は次の利点がある。カメラで撮影することにより、送信源である LED のみを背景光から分離、取り出すことができる。このため、背景光の影響を受けにくく、屋外でも利用できる。更に、複数の光源から送信される信号を並列に復調することができる。例えば、複数の LED を独立に変調するとする。このとき、受信機は LED の数だけ並列にデータを受信できるので、データレートを向上できる。このような二次元的な並列伝送は PD では実現不可能であり、カメラを受信機に用いたときのみ可能となる [14]。

2.4 可視光通信の ITS への応用

可視光通信の ITS への応用は、可視光通信が提案された当初から検討されている。代表的なものとしては、LED 式交通信号機から車輛あるいは歩行者に向かってデータ伝送を行うものがある [7], [8]。これ以外には、車輛の LED ヘッドライトや LED テールライトからデータ伝送を行うものがある。

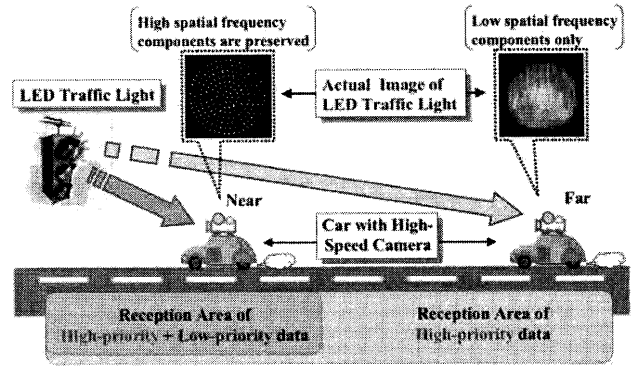


図 1 車両が遠方から信号機のある交差点へ進入するケースを想定した路車間可視光通信

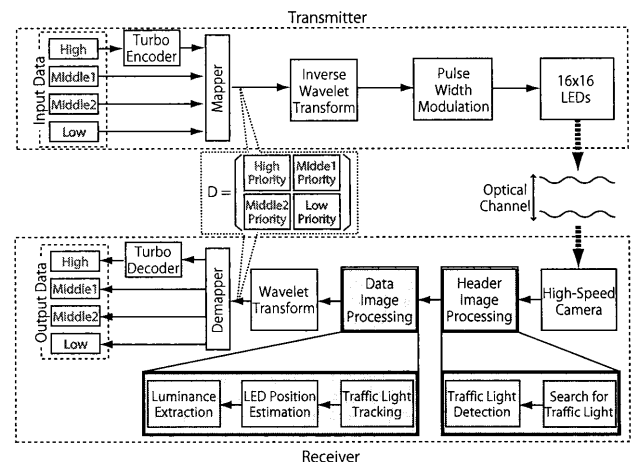


図 2 システムのブロック線図。

Fig. 2 System model.

3. LED アレーと車載高速度カメラを用いた路車間可視光通信

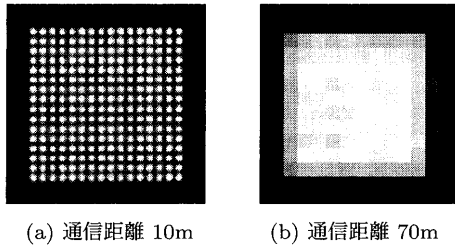
3.1 想定しているシナリオ

さて、筆者らは図 1 に示すように、車両が遠方から信号機のある交差点へ進入するケースを想定し、データ伝送装置として LED 式交通信号機、その受信装置として車両に搭載する高速度カメラを用いた路車間可視光通信システムの研究を行っている。LED 式交通信号機に通信機能を追加することで、運転者が視覚的に認識する信号情報に加えて安全運転支援情報も受信できるため、交差点事故の削減に寄与できるものと考えている。

3.2 送信機

送信機は 16 × 16 の正方形行列上に配置された 256 個の LED で構成された“LED アレイ送信機”を用いる。以下、 u 行 v 列の位置に配置されている LED を $LED(u, v)$ と呼ぶ。ただし、 $u, v = 1, 2, \dots, 16$ である。

送信機の各 LED は区間 T_b の非負の矩形パルスを発生し、LED の輝度に情報を載せる。ここで T_b はビット区間の長さであり、LED1 つあたりのビットレートは $R_b = 1/T_b$ となる。送信機に設置される LED は 256 個であり、各 LED はそれぞれ



(a) 通信距離 10m (b) 通信距離 70m

図 3 LED アレイの撮影画像。

Fig. 3 Received image of LED array.

れ異なるビットを送るので、送信機全体でのビットレートは $256R_b$ となる。LED(u, v) の時間 t における輝度は以下のように表せる。

$$X_{u,v}(t) = \sum_k x_{u,v,k} \cdot A_{u,v} \cdot g(t - (k-1)T_b) \quad (1)$$

ここで k は 1 以上の自然数であり、LED 全体の表示パターンが何番目であるかを示す。 $x_{u,v,k}$ は LED(u, v) の k のパターンにおける輝度を定める係数であり、 $0 \leq x_{u,v,k} \leq 1$ である。もし情報変調に On-Off Keying を用いる場合、ビットの $\{0,1\}$ に対応して $x_{u,v,k} = \{0,1\}$ となる。 $A_{u,v}$ は LED(u, v) の輝度値のピークである。また、 $g(t)$ は以下に示すような矩形パルスを表す関数である。

$$g(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t < T_b) \\ 0 & (\text{ohterwise}) \end{cases} \quad (2)$$

本稿では、増田らによって提案された階層的符号化 [15] を用いて、情報を優先度に分けて伝送する。ここで、階層的符号化の原理について説明する。図 3 に LED アレイ送信機部を撮影した 2 枚のカメラ画像を示す。1 枚は 10m の距離から撮影したもの (図 3(a))、もう 1 枚は 70m の距離から撮影したものである (図 3(b))。2 枚の画像を比較すると、図 3(a) の画像では LED アレイの 1 つ 1 つの LED が判別できるのに対し、図 3(b) ではピクセル数の減少により荒い画像となっており、隣接する LED が結合したように見える。これは、言い替えると、空間周波数の高周波成分が失われた画像であると言える。したがって、チャンネルの特性を距離によってカットオフ周波数が変化するローパスフィルタでモデル化可能であると考えられる。

階層的符号化はこのチャンネル特性を活かし、送信データを重要なデータとその付加情報といった優先度毎に分け、低周波成分には優先度の高いデータを、高周波成分には優先度の低いデータを割り当てる。データを空間周波数上に割り当てるためには、2次元高速ハルウェーブレット逆変換 (2D IFHWT) を用いる。この場合、優先度は 3 つ (High, Middle, Low) に分けられ、式 (1) における $x_{u,v,k}$ は $\{0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1\}$ の 5 値となる。LED の電圧を調節し、明るさで 5 値の輝度値を表現することは、LED の個体差等のため困難である。そこで、図 4 に示すように、LED の点灯時間により 5 値の輝度値を表現 (パルス幅変調) する。

3.3 受信機

受信機では、まず、LED アレイ送信機を含んだ広範囲を高

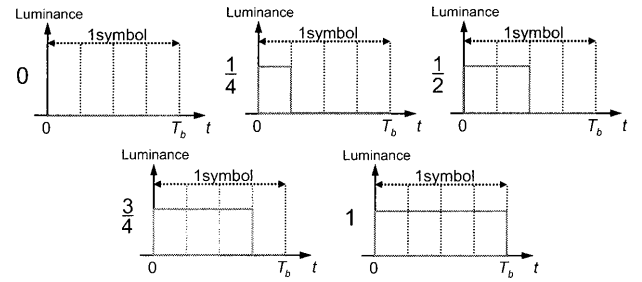


図 4 パルス幅変調。

Fig. 4 Pulse Width Modulation.

速度カメラによって撮影する。カメラは CMOS イメージセンサを持ち、これにより光信号を電気信号に変換し、結果を画像に出力する。その画像の中から送信機を見つけ、トラッキング、LED の位置推定、LED の輝度抽出を順に行う。これらの処理については 3 章で詳しく述べるとし、ここではデータの復号について述べる。

1 つの LED の光信号は画像内の 1 つまたは複数のピクセルに相当する。受信機のサンプリング周期を T_b とし、送受信機間の時間同期が完全であるとすると、LED(u, v) からの信号を受信した全てのピクセルの出力の合計値は以下のように書ける。

$$r_{u,v,i} = c \int_{(i-1)T_b}^{iT_b} Y_{u,v}(t) \cdot f(t) dt, \quad (3)$$

ここで、 c は光電変換効率を表す定数である。また、 $f(t)$ はイメージセンサの露光時間を表す関数であり、以下のように表せる。

$$f(t) = \sum_i g(t - (i-1)T_b) \quad (4)$$

ここで $i = 1, 2, \dots$ は露光区間が何番目かを表す番号である。得られた輝度値 $R_{u,v}$ を 16×16 の正方行列と考え、その行列の値を正規化した後のデータ行列に 2次元高速ハルウェーブレット変換 (2D FHWT) を用いて階層的復号化を行う。

$$\hat{i}'_{m,n} = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^{16} \sum_{v=1}^{16} \hat{x}'_{u,v} H_{n,v}^{16} H_{m,u}^{16} \quad (5)$$

ここで、 $\hat{x}'_{u,v}$ は $R_{u,v}$ を正規化した後の値を表す。この操作により、受信輝度値からなる行列は再び空間周波数成分へと変換される。最後にスレッシュホールド判定を行い、出力データを得る。 $\hat{i}'_{m,n}$ が正の値であれば $i_{m,n}$ の推定値は 1、 $\hat{i}'_{m,n}$ が負の値であれば $i_{m,n}$ の推定値は -1 となる。

4. 車両走行時の受信手法

本章では、図 2 のヘッダ画像処理部、データ画像処理部について説明する。まずヘッダ画像処理部では、受信画像から LED アレイ候補を探検し、LED アレイ検出によりデータの開始を見つける。その後、データ画像処理部では、LED アレイの追跡を行い、各 LED の位置を推定、輝度の抽出を行う。

4.1 LED アレイ候補探索

送信データを復調するためには、受信機はまず初めに受信画

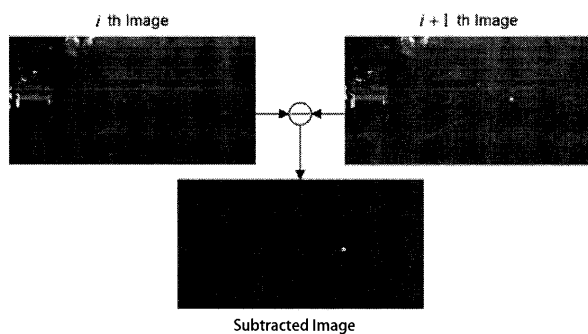


図 5 二連続間画像の差分処理結果.

Fig. 5 Resulted image by subtracting two successive images.

像から LED アレイ領域を探索する必要がある。LED アレイ領域は二連続間画像の差分を取ることによって得ることができる。図 5 に二連続間画像の差分を取った処理結果を示す。高速度カメラは 1000fps で撮影しているため、二連続間の差分を取ると背景光雑音の大部分は除去できていることがわかる。

4.2 LED アレイ検出

送信機と受信機は同期していないため、ヘッダ部を用いてデータの開始のタイミングを合わせる必要がある。誤った LED アレイ検出をすると、次の LED アレイ候補探索までのデータ通信を大きく誤ってしまうため、確実な LED アレイ検出が求められる。そこで優れた時間相関特性を持つ Barker 系列を用いて LED アレイ検出を行う。使用した Barker 系列は 1111100110101 であり、それぞれ全点灯または全消灯のパターンを時間方向に配置したものである。

4.3 反転信号を用いた LED アレイ追跡

車両走行時には、ヘッダ部を用いて検出した LED アレイ領域は通信距離の変化や車の振動などにより、大きさや位置が変化する。このためデータ部を用いて LED アレイ領域の補正し、LED アレイを追跡することが不可欠である。任意に点灯させることのできるヘッダ部のように、LED アレイが全点灯であれば、走行受信時でもロバストに追跡することができる。しかし、データ部では各 LED を個別に点灯しており、全点灯とはならない。

そこで、図 6 に示すように、各 LED の送信データの元信号 (D) に対してそれぞれ輝度値を反転させた反転信号 (D*) を作り、D と D* を加算することで全点灯画像を生成する。例えば、送信データの元信号 (D) が図 4 の $\frac{1}{4}$ の場合は、反転信号 (D*) は $\frac{3}{4}$ となる。

得られた加算画像と全点灯のテンプレートとの空間相関を取ることでロバストに LED アレイの位置を取得できるため、LED アレイ追跡を容易に行うことができる。

4.4 反転信号を用いた特性改善

前節までで提案した復号手法では、反転信号は LED アレイ追跡のためにのみ用いていた。本節では、反転信号を用いた特性改善について述べる。元信号と反転信号は同じ情報を送っているため、反転信号を受信最大輝度値から引いた信号と元信号のダイバーシチ効果を図ることにより特性改善することを考

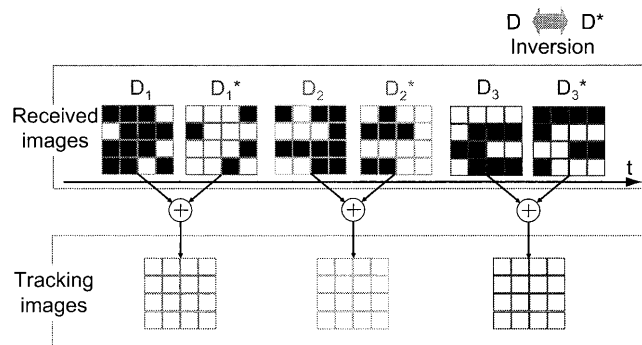
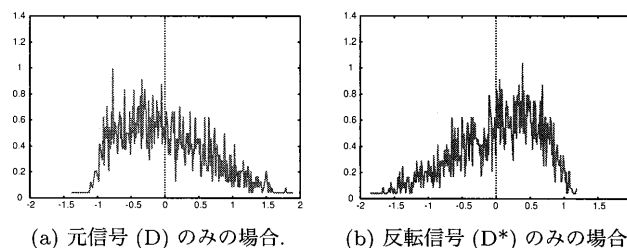


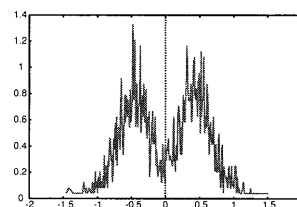
図 6 反転信号を用いた LED アレイ追跡例.

Fig. 6 Tracking method using inverted LED patterns.



(a) 元信号 (D) のみの場合.

(b) 反転信号 (D*) のみの場合.



(c) 反転信号を用いた場合.

図 7 受信輝度値分布 (28m).

Fig. 7 Received luminance distribution(28m).

える。

図 7 に近距離で撮影した画像 1 枚から求めた受信輝度値分布を示す。具体的には On-Off Keying の場合の輝度値について、4.6 で述べる空間正規化後の分布である。

図 7(a), (b) のそれぞれ元信号、反転信号のみの輝度値分布では受信輝度値分布は劣化しており、正しい判定は困難である。一方、図 7(c) は、元信号と受信最大輝度値から反転信号を引いた信号を足し合わせた場合の輝度値分布である。スレッシュホルド 0 を境に 2 つのピークが確認できる。これは、いわゆるダイバーシチ効果が得られているものと考えられ、受信特性の改善が期待できる。

4.5 LED 位置推定

個々の LED の位置推定は、3.2, 3.3 で述べた正信号と反転信号の合成により得られる全点灯画像に対し、テンプレートマッチングにより求めることができる。ここで重要になるのは各 LED をそれぞれ対応する画素で認識できるかどうかである。つまり、2 つの隣接する LED を個別に識別できるかどうかである。

2 つの隣接する LED を個別に識別するためには、隣接 LED 間の画素数が 2 ピクセルは必要であり、1 ピクセルを下回ると、隣り合う LED が 1 つの画素に入り込むことになり、復号でき

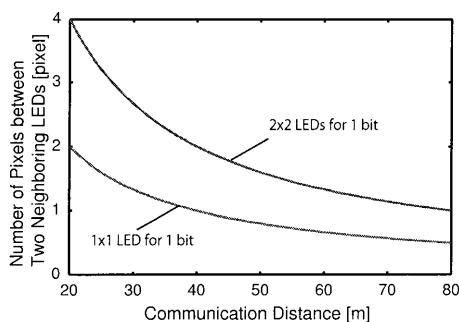


図 8 隣接 LED 間の画素数と通信距離の関係。

Fig. 8 Relation of the number of pixels between two neighboring LEDs and the communication distance.

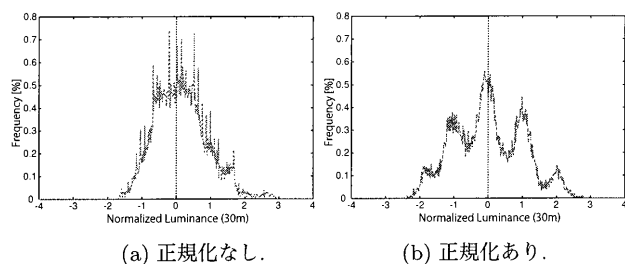


図 9 受信輝度値分布 (30m)。

Fig. 9 Received luminance distribution of hierarchical coding(30m).

ない。図 8 に実測により求めた隣接 LED 間の画素数と通信距離の関係を示す。グラフより、256 個ある各 LED を個別に点滅させた場合は 20m で隣接 LED 間の画素数が 2 ピクセル以下になり、40m で隣接 LED 間の画素数が 1 ピクセルを下回る。そこで、2×2 の 4 つの LED で 1 つの情報を表すことを考える。この場合、隣接 LED 間の画素数が 2 ピクセル以下となるのは 45m であり、80m でも 1 ピクセルを下回ることはいない。

4.6 輝度値抽出

LED の位置を推定した画素から輝度値を抽出する。その際に、各 LED や各画像毎で輝度値を補正することで、輝度値のばらつきや干渉などを抑えることができる。本研究で用いる輝度補正手法は、各 LED の輝度値の平均値、分散値を求め、正規化を行う [6]。

正規化による輝度値の補正值は以下のように表せる。

$$\hat{x}_{u,v}(s) = \frac{r_{u,v}(s) - E_s}{\sqrt{V_s}} \quad (6)$$

$$E_s = \frac{\sum_{u=0}^{U-1} \sum_{v=0}^{V-1} r_{u,v}}{I}$$

$$V_s = \frac{\sum_{u=0}^{U-1} \sum_{v=0}^{V-1} \{r_{u,v} - E_s\}^2}{I}$$

ここで、 I は受信画素数、 u と v は LED の位置、 $r_{u,v}$ は空間正規化を行う前の LED の輝度値、 E_s は輝度値の平均値、 V_s は輝度値の分散値、 $\hat{x}_{u,v}(s)$ は空間正規化を行った後の LED の輝度値を表している。

図 9 に通信距離 30m で、実測によって求めた受信輝度値分布を示す。同図 (a) は正規化を行わない場合であり、5 値の輝度値のピークが分からないため、もとの送信データを復号する

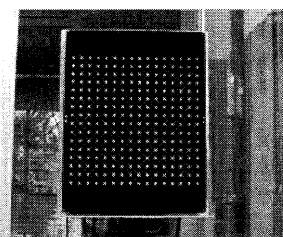


図 10 LED アレイ送信機。

Fig. 10 LED array transmitter.

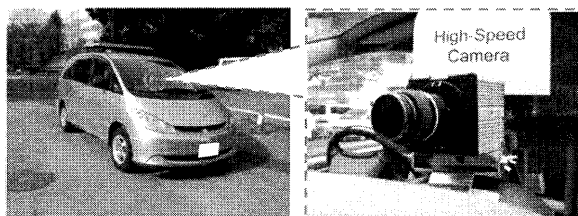


図 11 実験車両及び高速度カメラ。

Fig. 11 Experimental vehicle and high-speed camera.

ことは困難であると考えられる。

一方、輝度補正手法を用いた場合、図 9(b) の受信輝度値分布が得られた。輝度補正手法を用いることで 5 値の輝度値のピークをそれぞれ確認できる。つまり、輝度補正手法を行うことで各 LED の輝度値のばらつきも補正することができ、5 値の輝度値が正しく取れるようになる。

5. 走行実験

5.1 実験システム及び実験環境

提案した受信手法の特性を評価するために走行実験を行った。図 10 に実験に使用した LED アレイ送信機、図 11 に実験車両と受信機に用いた高速度カメラを示す。また、高速度カメラとしては、Photron 製 FASTCAM-1280PCI を持ちたい。実験諸元を表 1 に示す。送信機は 16 × 16 の正方形列上に配置された 256 個の LED で構成された LED アレイであり、各 LED の間隔は、実際の LED 信号機と同じ 2cm であり、半値角が 22.6° の LED を用いた。送信機は車両前方に、また、高速度カメラは車両内のダッシュボード上に設置し、それぞれの高さがほぼ水平となるようにした。

本稿では、車両が走行せず通信距離のみを変化させた実験 (静止実験: Static field trial) と、走行させた状態の実験 (走行実験: Driving field trial) の 2 種類を行った。

実験車両は 30km/h の速さで走行し、通信距離が 80m の付近から撮影を始め、25m 付近まで撮影する。本実験では、車両は直進走行のみを行った。また、本実験は晴天の昼間の時間帯を選び、LED アレイ送信機以外の物体もカメラの画像上にはつきりと表れる環境で行った。

5.2 実験結果

図 12 に静止実験と走行実験の通信誤り率特性 (BER 特性) を示す。比較のため、反転信号を用いない従来の手法を “Original” として、その特性も示す。図の走行実験の結果に着目すると、送受信機間の距離が近づくにつれ、BER が小さくなっていく

表 1 実験諸元.

Table 1 Experimental parameters.

	車両静止時	車両走行時
伝送速度 R	128kbps	16kbps
車両速度	—	30km/h
LED の点灯周波数	4kHz	
カメラの撮影速度	1000fps	
符号化率	1/3	
レンズの焦点距離	35mm	
レンズのピント	無限遠	
レンズの絞り	11	
解像度	1024×512pixel	
通信距離	25m-80m	

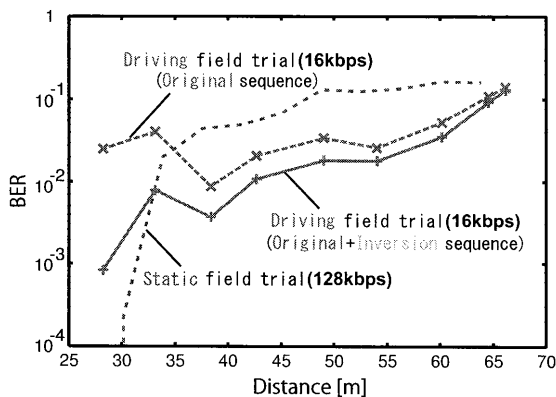


図 12 実験結果 (BER 特性).

Fig. 12 Experimental results (BER performance).

様子が分かる。これは、車両が走行しながら LED アレイを追跡し、同時に復号できていることを示しており、反転信号を用いた LED アレイ追跡手法の効果が得られていることを裏付けている。

さらに、反転信号を復号にも用いることによるダイバーシチ効果も、すべての距離で誤り率特性が改善していることから確認できた。加えて、誤り訂正符号であるターボ符号(符号化率 $\frac{1}{3}$)を用いることで、走行受信時に 70m まで誤りのない通信を実現した。

6. むすび

可視光通信の ITS への応用の一つとして、LED 式交通信号機から車両に向かってデータ伝送を行う路車間可視光通信について紹介した。可視光通信は”送信源が見えていれば”通信できる。電波を利用した無線通信との違いは、この点が大きい。見える、ということはカメラが利用できることであり、このため画像処理の様々な技術を通信用に用いることが可能である。逆も真である。画像計測や画像認識など、カメラを利用することで可能となる様々なアプリケーションがあるが、これらに通信機能を組み込みことで特性向上が期待できる。たとえば、LED 照明をマーカとして使うことで、高精度な位置推定ができることなど、画像計測ひとつとってみても、可視光通信の機能を追加する意義はある。画像認識についても、本稿で示したように、

空間相関による認識では無く、(バーカー符号による)時間相関を利用することでロバスト性が格段に向上する。つまり、通信技術が画像処理分野へ貢献できる。このように可視光通信では、通信と画像の両方の技術が必須である。研究の側面からみたときの可視光通信の魅力はここにある。

謝辞

本研究は、香川高専・荒井伸太郎氏、長岡技科大・圓道知博氏、名大・藤井俊彰氏、岡田啓氏らとともに進めている可視光通信に関する一連の成果をまとめたものである。本研究の一部は、科研基盤 (C) 及び総務省 SCOPE (092306004) の助成を受けて行われたものである。記して謝意を表する。

文 献

- [1] 可視光通信コンソーシアム (VLCC), <http://www.vlcc.net/>
- [2] IEEE 802.15 WPAN Visible Light Communication Interest Group (IGv1c), <http://www.ieee802.org/15/pub/IGv1c.html>
- [3] “Visible Light Communications Consortium Success in Long-Distance Visible Light Communication Experiment Using Image Sensor Communication,” Reuters, March 2009. <http://www.reuters.com/article/pressRelease/idUS122756+27-Mar-2009+BW20090327>
- [4] 春山真一郎, “可視光通信,” 信学論 (A), vol.J86-A no.12 pp.1284-1291, Dec. 2003.
- [5] 中川正雄, “ユビキタス可視光通信,” 信学論 (B), vol.J88-B no.2 pp.351-359, Feb. 2005.
- [6] 山里敬也, “LED アレイと高速度カメラを用いた可視光通信への応用,” 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ誌, Vol.3, No.2, pp.45-53, 2009 年 10 月.
- [7] G. Pang, T. Kwan, H. Liu, C.-H. Chan, “LED Wireless,” IEEE Ind. Appl. Mag., pp.21-28, Feb. 2002.
- [8] 湊, 伊多波, 小澤, 中川, “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, pp.2390-2393, Dec. 2005.
- [9] M. Akanegawa, Y. Tanaka, and M. Nakagawa, “Basic study on traffic information system using LED traffic lights,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 2, no. 4, pp. 197-203, Dec. 2001.
- [10] G. Pang, C. Chan, and T. Kwan, “Tricolor light emitting dot matrix display system with audio output”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 37, no. 2, pp. 534-540, March/April 2003.
- [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, pp.883-884, Nov. 2007.
- [12] 岡田賢詞, 圓道知博, 谷本正幸, 藤井俊彰, 木村好克, “長距離可視光通信のための車載受信機の振動軽減,” 信学技報, ITS2008-59, pp.145-149, Feb. 2009.
- [13] H.S. Liu and G. Pang, “Positioning beacon system using digital camera and LEDs,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.52, no.2, pp.406-419, March 2003.
- [14] 宮内 聡, 小峰敏彦, 後 輝行, 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機による並列光空間通信の提案,” 信学技報, CS2004-18, pp.7-12, May 2004.
- [15] 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, pp.696-704, Sept. 2007.
- [16] S. Arai, S. Mase, T. Yamazato, T. Yendo, T. Fujii, M. Tanimoto, and Y. Kimura, “Feasible study of road-to-vehicle communication system using LED array and high-speed camera,” Proceedings of the 15th World Congress on ITS, Nov. 2008.