

車両走行時の路車間可視光通信のための LED アレー追跡手法

名倉 徹[†] 山里 敬也[†] 荒井伸太郎^{††a)} 岡田 啓[†]
圓道 知博^{†††} 藤井 俊彰[†]

LED Array Tracking Method for Road-to-Vehicle Visible Light Communications in the Driving Situation

Toru NAGURA[†], Takaya YAMAZATO[†], Shintaro ARAI^{††a)}, Hiraku OKADA[†], Tomohiro YENDO^{†††}, and Toshiaki FUJII[†]

あらまし 本論文では、LED 信号機に見立てた LED アレーを送信機に、車載高速度カメラを受信機に用いた路車間可視光通信システムについて考える。実環境における路車間通信では、車両が走行している場合でもロバストに LED 信号機 (LED アレー) の捕捉及び通信ができなければならない。本論文では、送信信号 (元信号) と送信信号を反転させた信号 (反転信号) を交互に伝送し、受信機でこれらの画像を加算することで全点灯画像を生成し、その画像を用いて送信機である LED アレーを追跡する手法を提案する。この手法では、加算画像が全点灯となるため輝度値が一様になり、ちらつきの軽減にもつながる。提案手法の有効性を確認するために、走行実験を行った。結果として、従来より優れた BER 特性となることが確認された。

キーワード ITS, LED, 可視光通信, 路車間通信, LED アレー追跡

1. ま え が き

LED は従来の白熱灯と比較して低消費電力、視認性の良さや長寿命といった利点がある。このような複数の特徴をもつ LED を用いた信号機 (LED 信号機) が普及しつつある。LED は半導体デバイスであるため、人の目には見えないほど高速に点滅させることによって照明光であると同時に、通信機器としての役割も果たすことが可能である [1]。ITS (Intelligent transport systems) の分野では LED 信号機を送信機として用いる可視光通信に関する研究が行われている [2]。既存の LED 信号機に通信機能を付加することで、新たなインフラ整備のコストをかけることなく、交通事故の発生率の高い場所である交差点において運

転支援情報を運転手に送信することができる。

本研究では、LED 信号機に見立てた LED アレーを送信機に、車載高速度カメラを受信機に用いた路車間可視光通信に着目する [3]。

可視光通信の受信デバイスとして広く用いられているフォトダイオードではなくカメラを用いる理由は、受信機の視野角を広くできる、送信機の位置を容易に見つけることができる、複数光源からの信号を同時に受信可能である、複数の LED を個別に変調することで LED の数だけ並列にデータを受信できる、などの利点があるためである [4]。

これまで私たちの研究グループでは、車両静止環境における通信可能距離の改善 [5] や伝送速度の改善 [6] 等がなされていた。しかし、実環境における路車間通信では車両は走行しているため、車両走行時の受信手法を検討する必要がある [7]。

そこで本論文では、車両走行時でも通信が行えるように、路車間可視光通信に適した車両走行時の受信手法を検討する。とりわけ、車両走行環境での LED アレーのロバストな追跡手法について検討する。

LED アレーの追跡について従来手法では、LED アレー追跡のための枠を点滅させ、受信側でテンプレ

[†]名古屋大学, 名古屋市

Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††}香川高等専門学校, 三豊市

Kagawa National College of Technology, 551 Kohda, Takuma-cho, Mitoyo-shi, 769-1192 Japan

^{†††}長岡技術科学大学, 長岡市

Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka-shi, 940-2188 Japan

a) E-mail: arai@cn.kagawa-nct.ac.jp

トマッチングを行うことで LED アレーの追跡を行っていた [5], [7]. しかし, この手法では枠の分だけ伝送レートが低下するだけでなく, 遠方では LED アレーの追跡が難しくなるという問題がある. 遠方での追跡が難しい理由は, 情報伝送には関係のないこの枠をあまり大きくしたくないためであり, 結果として枠の幅を大きく取れないためである. また, 受信画像の背景に映る特徴点から動きベクトルを計算して追跡する手法も提案されている [8]. この手法では伝送速度を低下させることなく LED アレー追跡が可能であるが, 背景光の光量が十分でない夜間には使うことができず, カメラの絞りを開くと画像がぼやけて通信誤りが増加するなどの問題点がある.

本論文では, これらの問題点を解決した手法を提案する [9]. 具体的には, LED アレーが常に全点灯となるように, 送信信号 (元信号) に対して送信信号を反転させた信号 (反転信号) を生成する. 受信機では, 元信号と反転信号の加算画像を用いて全点灯状態を作ることで, ロバストな LED アレー追跡を行う. 提案手法では, 加算画像の全点灯により輝度値が一樣になるため, ちらつきの軽減にもつながる. 実際に可視光通信のアプリケーションを想定すると, 送信機として用いる LED がちらつかないことは不可欠な条件である.

更に, 反転信号を LED アレー追跡だけではなく, 復号にも用いることを考える. 本論文で検討しているような複数の LED を個別に変調する並列光空間通信では, 隣り合う LED 同士が互いに干渉を与える. この干渉量は LED 輝度値が高いほど大きい. 逆に輝度値の高い信号の反転信号は輝度値が低くなり, よって周りの LED に与える干渉も小さくなる. つまり, 元信号と反転信号は輝度値分布が異なり, 周辺 LED へ与える干渉の影響も異なる. このため, 復号の際に, 元信号と反転信号の両者を用いることで輝度値のダイナミックレンジを広げ, 干渉の影響を緩和することが可能であると考えられる.

本論文は以下のように構成される. **2.** では送信機, 受信機のシステムモデルについて述べる. **3.** では提案受信手法について詳しく述べ, **4.** では走行実験により提案方式の評価を行う. **5.** はむすびである.

2. システムモデル

2.1 送信機

送信機について **3.** 及び **4.** で述べる実験で用いるシステムを例に説明する (図 1 参照). 送信機は 16×16

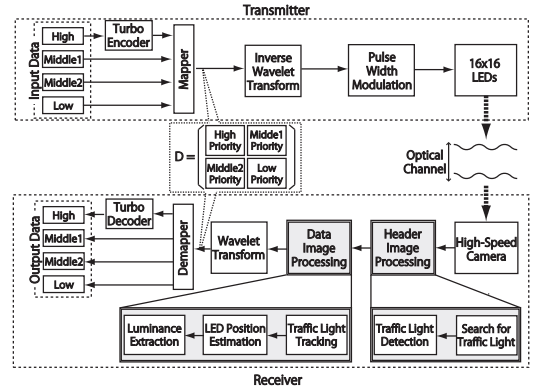


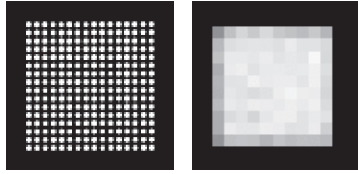
図 1 システムのブロック線図
Fig.1 System model.

の正方形列上に配置された 256 個の LED で構成された “LED アレー送信機” 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. 使用した LED の光度は 9000 mcd で, 半値角は 22.6° であり, 各 LED の素子間隔は 20 mm とした. これらのパラメータは日本で一般的に使用されている LED 信号機を参考に決めた値である. 実際に送信機として用いる LED の半値角としては狭い方が指向性が高くなり, 受信機側で撮影した画像において, 隣接する LED からの光の影響が小さくなるが, 本研究では実際の LED 信号機と同じ LED を採用し, 実環境と同じパラメータで通信特性を評価する.

送信機の各 LED は区間 T_b の非負の方形パルスが発生し, 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, LED 一つ当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 $256 R_b$ 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決定する係数であり, $0 \leq x_{u,v,k} \leq 1$ 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



(a) 通信距離 10 m (b) 通信距離 70 m

図 2 LED アレーの撮影画像

Fig. 2 Received image of LED array.

$x_{u,v,k} = \{0, 1\}$ 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方形パルスを表す関数である。

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

本論文では、増田らによって提案された階層的符号化[4]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2にLEDアレー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の(図2(a))、もう1枚は70mの距離から撮影したものである(図2(b))。2枚の画像を比較すると、図2(a)の画像ではLEDアレーの一つひとつのLEDが判別できるのに対し、図2(b)ではピクセル数の減少により粗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、言い換えると、空間周波数の高周波成分が失われた画像であるといえる。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増える低域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いかし、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ごとに分け、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、二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、優先度は三つ(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3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。

ここで、LEDの輝度を5値にした場合のビットレートの算出方法について述べる。本研究では図3に示すよ

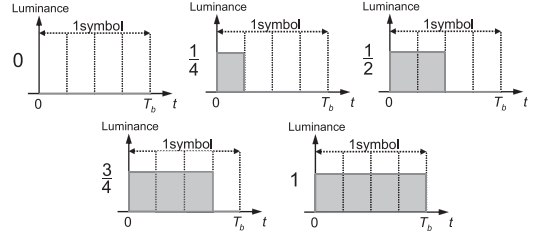


図 3 パルス幅変調

Fig. 3 Pulse width modulation.

うに、5値の輝度値を4回の点灯で表現するので、LED点灯周期は $T_b/4$ となる。3. 及び 4. で述べる実験で用いるシステムでは、LED点灯周波数が4kHzであるため、LEDの点灯周期は $T_b/4 = 0.25$ msである。4回の点灯で5値の輝度値を表現するため、1ビット区間の輝度値を表現するためには、4回 $\times 0.25$ ms = 1 ms = T_b の時間が必要となる。本システムでは受信機にカメラを用いているため、シャッターを開いている間に入って来る輝度値を積分するというカメラの性質を利用して、 T_b の間、カメラのシャッターが開いている状態にすることで輝度値を受信する。3. 及び 4. で述べる実験では、カメラの撮影速度を1000fpsに設定している。この場合、画像1枚当たり1msであるため、一つの1ビット区間の輝度値を表現している間、カメラのシャッターが開いている状態が実現できる。また、本研究ではサンプリング定理を満たすように、同じデータを2回繰り返して送信するので、一つのLED当りのビットレートは500bit/sとなる。本研究で用いるLEDアレー送信機のLED数は256個であるので、ビットレートは500bit/s \times 256個 = 128kbit/sとなる。

2.2 受信機

受信機では、まず、LEDアレー送信機を含んだ広範囲を高速度カメラによって撮影する。カメラはCMOSイメージセンサをもち、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. 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。

一つのLEDの光信号は画像内の一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、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二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。

3. 車両走行時の受信手法

本章では、図 1 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 アレー候補を探査し、LED アレー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 アレーの追跡を行い、各 LED の位置を推定、輝度の抽出を行う。

3.1 LED アレー候補探索

送信データを復調するためには、受信機はまずはじめに受信画像から LED アレー領域を探査する必要がある。LED アレー領域は二連続間画像の差分をとることで得ることができる。図 4 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 1000 fps 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分かる。背景光雑音を除去すると、LED アレー候補の領域を決定することができ、計算量の削減にもつながる。

3.2 LED アレー検出

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

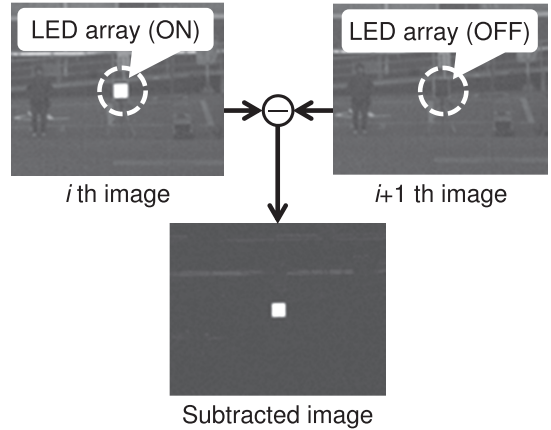


図 4 二連続間画像の差分処理結果
Fig. 4 Resulted image by subtracting two successive images.

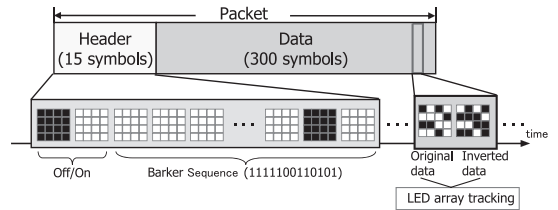


図 5 パケットフォーマット及びヘッダ部で用いる Baker 系列
Fig. 5 Packet format and the baker sequence used at the header.

る。誤った LED アレー検出をすると、次の LED アレー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 アレー検出が求められる。

そこで本論文では、優れた時間相関特性をもつ Barker 系列を用いて LED アレー検出を行う。使用した Barker 系列は図 5 に示した 13 bit の系列 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。

3.3 反転信号を用いた LED アレー追跡

車両走行時には、ヘッダ部を用いて検出した LED アレー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 アレー領域を補正し、LED アレー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 アレーが全点灯であれば、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。

本論文では、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 3 の $\frac{1}{4}$ の場合は、反転信号 (D*) は $\frac{3}{4}$ となる。これらの図は一例であり、実際には送信信号はデータに応じて全て異なるため、反転信号もそれに準じて異なるパターンとなる。また、反転信号の生成はデータ部のみで、全点灯及び全消灯信号を用いているヘッダ部では反転信号の生成は行っていない。

元信号と反転信号を足し合わせた加算画像によって全点灯信号を生成し、その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 LED アレーの追跡を行う。

ここで、提案手法と従来手法の LED アレー追跡性能の比較を行う。1. で述べたように、LED アレー追跡の従来手法として、「LED アレー追跡のための枠を点滅させ、受信側でテンプレートマッチングを行うことで LED アレーの追跡を行う手法」[5], [7] 及び「受信画像の背景に映る特徴点から動きベクトルを計算して追跡する手法」[8] の 2 種類が提案されている。文献 [5], [7] の手法では、図 7 に示すようにあらかじめ LED アレー追跡のための枠 (任意のパターン) を用いることで LED アレー追跡を実現している。LED アレー追跡精度は枠 (パターン) に大きく依存しており、この枠の占める大きさが大きいほど、遠方からでも追跡が容易になる。しかしながら、この枠を大きくすることは、情報伝送を行う領域 (図 7 の中央部分) が小さくなるため、伝送レートが低下してしまい、効率的ではない。文献 [8] では、LED アレーが正方形である、という特徴と背景の動きベクトル (オプティカルフロー) から LED アレーの追跡を行っている。この手法では、伝送速度を低下させることなく LED アレー追跡が可能であるが、オプティカルフローは夜間等の背景光が映らない条件等では用いることができない欠点に加えて、計算時間もかかるため、リアルタイム復号のためのアルゴリズムとしては適当ではないと考えている。

提案手法では、元信号と反転信号を足し合わせると非常にシンプルな手法で全点灯信号を生成しており、それを用いて LED アレーの追跡を行う。この全点灯信号は、LED アレーの LED 領域全体であり、これは文献 [5], [7] の手法の枠 (図 7 の外側部分) よりも大きい領域である。ゆえに、LED 領域全体が点灯

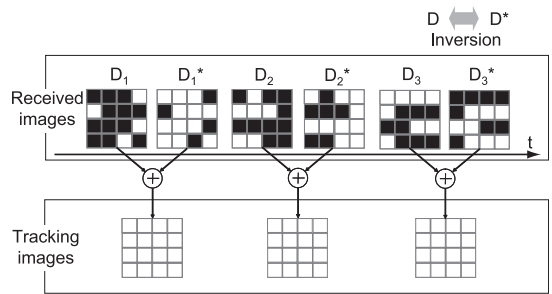


図 6 反転信号を用いた LED アレー追跡例
Fig. 6 Tracking method using inverted LED patterns.

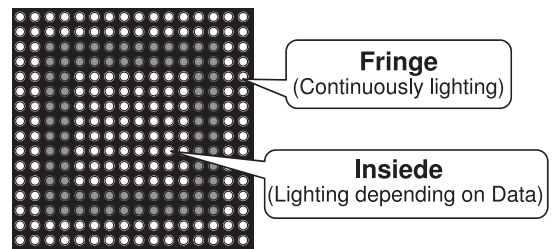


図 7 文献 [5], [7] の LED 点灯パターン
Fig. 7 LED lighting pattern of Ref. [5], [7].

している画像を作り出し、その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 アレーの位置を取得できるため、LED アレー追跡を容易に行うことができる。

また、本研究では元信号と反転信号を足し合わせることで、輝度は送信側での 5 値の輝度値 (図 3 参照) のうち、輝度 “1” となるが、元信号に対して輝度差が一定となるようなパターン信号を作成し、元信号との差分をとることで様々な輝度の全点灯画像を生成することが可能である。例えば、輝度 “ $\frac{1}{2}$ ” の全点灯画像を作成したい場合、5 値の輝度値 $\{0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1\}$ に対し、パターンをそれぞれ $\{\frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\}$ とすればよい。本研究では、輝度 “1” となる元信号と反転信号の足し合わせのみについて実験を行う。

3.4 反転信号を用いた特性改善

前節では、反転信号を用いた LED アレー追跡について述べた。本節では、反転信号を用いた特性改善、とりわけ、干渉抑制について述べる。

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シチ効果を図ることにより特性改善することを考える。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ることで、直流成分である定常雑音成分も減らすことができる。言い換えると、元信号と反転信号とで異なる干渉状況を作り出して合成することで、周辺 LED からの干渉を抑制している。

また、元信号の受信最大輝度値が高く、飽和して正しく復号できない場合に、その反転信号の受信輝度値は低く、飽和しない可能性が高いことが考えられる。

図 8 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、3.6 で述べる空間正規化後の分布である。

図 8(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 8(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。スレッショルド 0 を境に二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。

ここで、従来手法と提案手法を比較すると、1. 及び 3.3 で述べた二つの従来手法は連続する 2 画像ではそれぞれ別の情報を伝送しており、提案手法のように 2 画像を足し合わせることができず、ダイバーシチ効果を得ることはできない。ゆえに、本論文で提案した手法のダイバーシチ効果は提案手法特有の効果であるといえる。

また、本手法は個々の LED が情報伝送を行う場合における隣接 LED からの干渉抑制のみならず、3.5

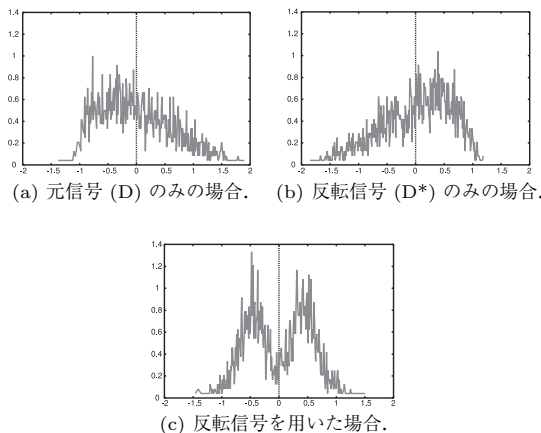


図 8 受信輝度値分布 (28 m)
Fig. 8 Received luminance distribution(28m).

で述べるような 2×2 の四つの LED で一つの情報を表す場合でも、周辺 LED (2×2 の LED の隣の 2×2 の LED) からの干渉を抑制する効果がある。

3.5 LED 位置推定

個々の LED の位置推定は、3.2, 3.3 で述べた元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、二つの隣接する LED を個別に識別できるかどうかである。

二つの隣接する 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 が一つの画素に入り込むことになり、復号できない。図 9 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。ここで、LED の素子間隔は、2.1 で述べたように 20 mm であることに留意する。グラフより、256 個ある各 LED を個別に点滅させた場合は 20 m で隣接 LED 間の画素数が 2 ピクセル以下になり、40 m で隣接 LED 間の画素数が 1 ピクセルを下回る。そこで、 2×2 の四つの LED で一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 45 m であり、80 m でも 1 ピクセルを下回ることはない。

また、車両の振動やカメラのブレは車両走行時に LED アレーの各 LED の位置を推定する際に大きく影響する。LED の点光源を光らせて時速 30 km/h で走行実験を行い、車両の振動による点光源の移動量を測定した。振動による移動した画素数の確率分布を図 10(a), (b) に示す。ここで、通信距離 50 m とは受信カメラが取得した画像に移ったポール（コース上に 10 m 間隔であらかじめ配置しておく）から読み取っ

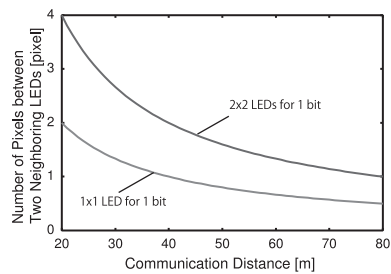


図 9 隣接 LED 間の画素数と通信距離の関係
Fig.9 Relation of the number of pixels between two neighboring LEDs and the communication distance.

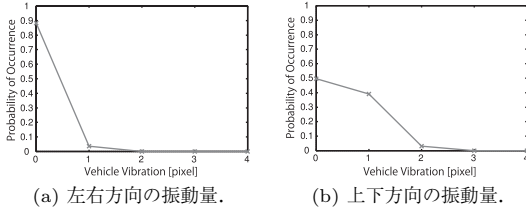


図 10 車両走行時の車の振動量 (30 km/h, 通信距離 50 m).

Fig. 10 Vehicle vibration in the received images in driving situation.

た目測での値で決めており、その読み取った距離から、50 m 付近の測定サンプルをグラフ化している。また、露光時間は二連続間画像の差分である 2 ms とした。実験結果より、左右方向はほぼ振動による影響がなく、上下方向は 1 画素程度移動量が生じる可能性があることが分かる。このことから、上記 2×2 の LED で一つの情報を表すことが適切であるといえる。

3.6 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。

正規化の方法としては、各 LED に対して時間方向の輝度値の平均値と分散値により正規化する時間正規化と、ある時間の平面に配置された各 LED の輝度値の平均値と分散値により正規化する空間正規化の二つ考えられる。車両走行時はカメラのブレ等により、輝度値の時間変化が大きいので、時間正規化に比べて空間正規化の特性がよいと考えられる。

空間正規化による輝度値の補正値は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \hat{x}_{u,v}(s) &= \frac{r_{u,v}(s) - E_s}{\sqrt{V_s}} \\ E_s &= \frac{\sum_{u=0}^{U-1} \sum_{v=0}^{V-1} r_{u,v}}{I} \\ V_s &= \frac{\sum_{u=0}^{U-1} \sum_{v=0}^{V-1} \{r_{u,v} - E_s\}^2}{I} \end{aligned} \quad (6)$$

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。各 LED の点滅はそれぞれ、5 値の輝度値 $\{0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1\}$ を正

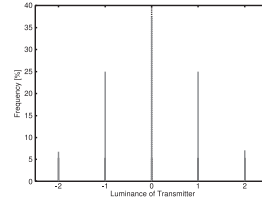


図 11 階層的符号化の送信輝度値分布

Fig. 11 Transmitted luminance distribution of hierarchical coding.

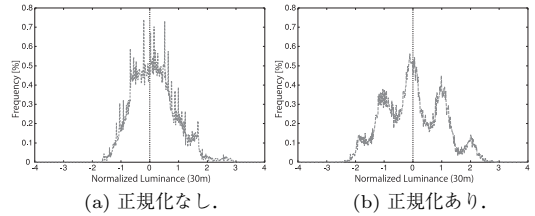


図 12 受信輝度値分布 (30 m)

Fig. 12 Received luminance distribution of hierarchical coding (30 m).

しく判定する必要があるため、輝度補正手法を用いる。階層的符号化を行ったときの、5 値の送信輝度値分布は送信データに偏りがなければ、図 11 に示すように 2 項分布に従う。

$$P(x) = {}_4C_{(x+2)} \left(\frac{1}{2}\right)^{(x+2)} \left(1 - \frac{1}{2}\right)^{(2-x)} \quad (7)$$

図 12 に通信距離 30 m で、実測によって求めた受信輝度値分布を示す。図 12 (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 12 (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とれるようになる。

4. 走行実験

4.1 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 13 に実験に使用した LED アレー送信機、図 14 に実験車両と受信機に用いた高速度カメラを示す。また、高速度カメラの仕様及び実験諸元を表 1 と表 2 にそれぞれ示す。送信機は 2.1 で述べた

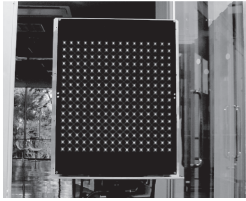


図 13 LED アレー送信機
Fig. 13 LED array transmitter.

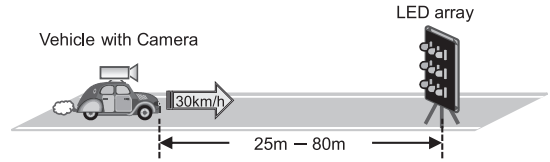


図 15 走行実験環境
Fig. 15 Experimental environment.



図 14 実験車両及び高速度カメラ
Fig. 14 Experimental vehicle and high-speed camera.

表 1 高速度カメラの仕様
Table 1 Specifications of high-speed camera.

カメラ型名	Photron 製 FASTCAM-1280PCI
レンズ型名	Nikon 製 Ai Zoom Nikkor
画像素子	CMOS イメージセンサ
焦点距離	35 mm~200 mm
シャッター速度	60~16000 fps
解像度	Max 1280×1024 pixel

表 2 実験諸元
Table 2 Experimental parameters.

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

ように、 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 アレーであり、各 LED の間隔、LED の光度及び半値角は、それぞれ実際の LED 信号機と同じ 20 mm、9000 mcd、 22.6° である。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。

本論文では、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。

ここで、ビットレートについて説明する。2.1 で算出方法を述べたように LED の点灯周波数 4 kHz、カメラのフレームレートが 1000 fps の場合、128 kbit/s となる。これは、3.3 で述べた反転信号及び 3.5 で述べた 2×2 の四つの LED で一つの情報を表さない条件でのビットレートである。これら二つの条件を付加した場合、反転信号を用いると同じ情報を 2 回送っているため、ビットレートが半分になり、更に、 2×2 の四つの LED で一つの情報を表しているため、静止実験のビットレートの $1/8$ となる。よってビットレートは 16 kbit/s となる。

また、走行実験のみ、誤り訂正符号としてターボ符号 [10] を用いた場合の特性評価も行う。これまでの研究で、本論文で用いている階層的符号化 [4] にターボ符号を適用した実験を行っており、ターボ符号によりエラーフリーの距離が伸びる効果があることを確認している [11]。本研究では文献 [11] と同じターボ符号を用いて実験を行った。なお、ターボ符号の符号化率は $\frac{1}{3}$ である。

図 15 に走行実験環境を示す。実験車両は 30 km/h の速さで走行し、通信距離が 80 m の付近から撮影を始め、25 m 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 アレー送信機以外の物体もカメラの画像上にはっきりと表れる環境で行った。

4.2 実験結果

図 16 と図 17 に静止実験と走行実験の通信誤り率特性（BER 特性）をそれぞれ示す。

はじめに、図 16 の静止実験の結果に着目する。静止実験では、受信画像から LED の位置を目測（Eye measurement）で決めて復号する方法と、提案手法（Proposed LED array tracking）の二つを行い、提案手法の LED 位置推定精度を確認する。また、比較のため、反転信号を用いず個々の LED で情報を表した信号（128 kbit/s）に対し、LED の位置を目測で決め

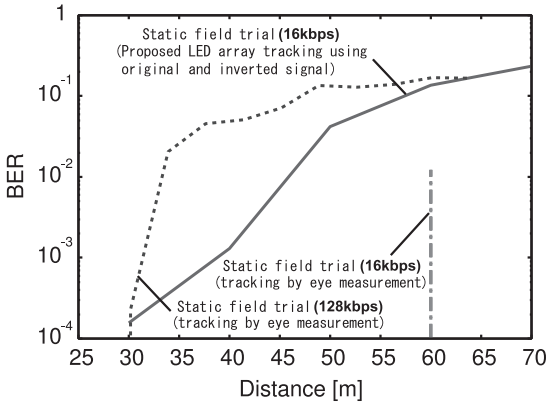


図 16 静止実験での BER 特性
Fig. 16 BER performance of static field trial.

て復号した結果も同図に示す。

図 16 より、目測で LED アレーの位置を決めた特性では、16 kbit/s のデータが 60 m を除いてエラーフリーとなった。このエラーは 60 m 特有のエラーではなく、60 m 以上でも状況次第では誤りが起こるものと考えている。16 kbit/s の目測の結果を 128 kbit/s のデータのそれと比較すると、16 kbit/s の方がよい結果となっていることが分かる。これは、元信号と反転信号を足し合わせるにより、輝度値のダイナミックレンジが広がったため、周辺 LED からの干渉を抑制する効果が表れたと考えられる。更に、目測の結果と提案手法の結果を比較すると、提案手法の方が BER が大きいことが確認できる。元信号と反転信号の合成により得られる全点灯画像を用いた提案手法の場合、合成された全点灯画像の輝度が高くなる。これは、LED アレーの外周の輝度も高くなることになるので、受信側で用意するテンプレートを大きめに選択する可能性が高くなる。すなわち、大きめのテンプレートを用いて、個々の LED の位置推定を行うため、位置推定誤差が生じ、その結果、BER が生じていると考えられる。以上のことから、LED アレー追跡時に用いるテンプレートと個々の LED の位置推定とは密接な関連があり、それが特性に影響を与えているといえる。

次に、図 17 の走行実験の結果に着目する。提案手法(元信号 + 反転信号: Original and inverted signal)の効果を確認するため、元信号のみ(Only original signal)を用いて復号した特性も同図に示す。本実験では、元信号のみを用いた復号及び反転信号を用いた復号のどちらも送信信号は元信号 + 反転信号で送られ

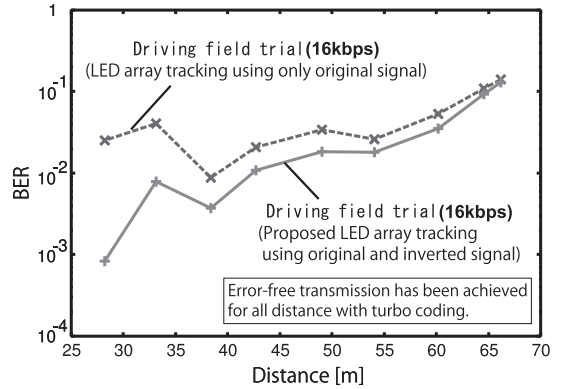


図 17 走行実験での BER 特性
Fig. 17 BER performance of driving field trial.

た信号を用いて復号している。ゆえに、元信号のみを用いた復号とは、提案手法で送られてきた送信信号を受信側で文字どおり“元信号のみ”を用いて復号していることを意味し、ビットレートは 16 kbit/s である。

まず、提案手法の復号特性と元信号のみを用いての復号特性を比較する。図 17 から分かるように、提案手法が全ての距離で誤り率特性が改善していることが確認できた。これは、静止実験の考察で述べたように、元信号と反転信号の足し合わせによって輝度値のダイナミックレンジが拡大し、干渉の影響を抑制したと考えられる。つまり、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が得られたといえる。

次に、ターボ符号による効果について述べる。図 17 にあるように、全ての距離において誤りのない通信(エラーフリー)を達成した。

ところで、我々が実験を行った範囲において、実験を開始する 80 m から 25 m までの区間では LED アレーの追従に失敗したことはなかった。これは、全ての実験において BER が得られたことから確認している。

5. む す び

本論文では、車両走行時でも通信が行えるように、路車間可視光通信に適した車両走行時の受信手法を提案し、その特性を評価した。とりわけ、反転信号を用いた LED アレーの追跡手法について述べた。この手法では、各 LED の送信データの信号 (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。反転信号を用いることで、車両走行時にロバストな LED アレー追跡を達成し、更に、輝度値のダイナミックレ

ンジの拡大によって周辺 LED からの干渉が抑制され、復号特性が向上したことから、反転信号を用いることによってダイバーシチ効果が得られることが確認できたといえる。今後の課題としては、実験車両の移動速度の変化による通信特性の変化や気象の影響等、実際の道路環境に近い環境での検討が挙げられる。

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教授片山正昭先生、助教小林健太郎先生に深く感謝する。本研究の一部は、科研基盤 (c) 及び JST A-STEP 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] 春山真一郎, “可視光通信,” 信学論 (A), vol.J86-A, no.12, pp.1284–1291, Dec. 2003.
- [2] M. Akanegawa, Y. Tanaka, and M. Nakagawa, “Basic study on traffic information system using LED traffic lights,” IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, vol.2, no.4, pp.197–203, Dec. 2001.
- [3] 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.
- [4] 増田恭一郎, 岡田 啓, 山里敬也, 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.
- [5] 山里敬也, “LED アレーと高速度カメラを用いた可視光通信の ITS への応用,” IEICE Fundamentals Review, vol.3, no.2, pp.45–53, Oct. 2009.
- [6] T. Nagura, T. Yamazato, M. Katayama, T. Yendo, T. Fujii, and H. Okada, “Improved decoding methods of visible light communication system for ITS using LED array and high-speed camera,” Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, May 2010.
- [7] 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,” Proc. 15th World Congress on ITS, Nov. 2008.
- [8] H.C.N. Premachandra, T. Yendo, M.P. Tehrani, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, and M. Tanimoto, “LED traffic light detection using high-speed-camera image processing for visible light communication system,” J. Institute of Television Engineers of Japan, vol.65, no.3, pp.354–360, Feb. 2011.
- [9] T. Nagura, T. Yamazato, M. Katayama, T. Yendo, T. Fujii, and H. Okada, “Tracking an LED array transmitter for visible light communications in the driving situation,” Proc. IEEE The Seventh International Symposium on Wireless Communication Systems, pp.765–769, Sept. 2010.
- [10] C. Berrou and A. Glavieux, “Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes,” IEEE

Trans. Commun., vol.44, no.10, pp.12611271, Oct. 1996.

- [11] S. Mase, S. Arai, T. Yamazato, T. Yendo, T. Fujii, M. Tanimoto, and Y. Kimura, “Error correcting scheme for road-to-vehicle visible light communication using LED array,” Proc. 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.1113–1117, Oct. 2008.

(平成 23 年 5 月 27 日受付, 9 月 21 日再受付)



名倉 徹 (正員)

平 21 名大・工・電子情報卒。平 23 同大大学院博士課程前期課程了。ITS 無線技術, 可視光空間通信の研究に従事。平 22 Young Researcher's Encouragement Award 受賞, IEEE 正員。



山里 敬也 (正員)

平 5 慶大大学院博士課程了。工博。同年名大・工・電子情報・助手。平 10 同大・情報メディア教育センター・助教授, 平 16 同大・エコトピア科学研究所・准教授, 平 22 同大・教養教育院・教授, 現在に至る。平 9 より平 10 まで, ドイツカイザースラウテルン大・客員研究員。センサネットワーク, 可視光通信, ITS, e ラーニングなどの研究に従事。映像情報メディア学会, IEEE 各会員。平 7 本会学術奨励賞受賞。平 17 本会基礎・境界ソサイエティ特別功労賞受賞。平 17, 平 19 本会通信ソサイエティ活動功労賞受賞。IEEE Communications Society 2006 Best Tutorial Paper Award 受賞。平 23 より通ソ副編集長, USN 研委員長。



荒井伸太郎 (正員)

平 16 徳島大・工・電気電子卒。平 18 同大大学院修士課程了。平 21 同大学院博士課程了。博士 (工学)。同年, 愛知工科大・ITS 研究所・研究員。平 23 香川高専・通信ネットワーク工学科・助教, 現在に至る。カオスの通信システムへの応用, 可視光通信システムの ITS への応用, マシンビジョン技術を用いた ITS に関する研究に従事。平 20 本会学術奨励賞受賞。IEEE 会員。



岡田 啓 (正員)

平 7 名大・工・電子情報学専攻卒。平 9 同大大学院博士課程前期課程了。平 11 同大大学院博士課程後期課程了。工博。同年日本学術振興会特別研究員。平 12 名大・助手。平 18 新潟大・超域研究機構・助教授。平 21 埼玉大・理工学研究科・准教授。平 23 年名大・エコトピア科学研究所・准教授。現在に至る。パケット無線通信, マルチメディアトラヒック, 符号分割多元接続方式, マルチホップネットワーク等の研究に従事。IEEE 会員。平 8 電気・電子情報学術振興財団・猪瀬学術奨励賞, 平 10 本会・学術奨励賞, 平 14, 平 18, 平 21 本会・通信ソサイエティ活動功労感謝状受賞。



圓道 知博 (正員)

平 8 東工大・工・制御工卒。平 10 同大大学院博士前期課程了。平 13 同博士後期課程了。博士(工学)。平 10 TAO・3D プロジェクト研究員。平 14JST・CREST 研究員。平 16 名大院・工学研究科助手。平 19 同助教。平 23 長岡技科大・電気系・准教授。三次元映像の撮影・表示, 可視光通信の研究に従事。平 23 船井情報科学振興財団・船井学術賞受賞。映像情報メディア学会, 日本 VR 学会, IEEE 各会員。



藤井 俊彰 (正員)

平 2 東大・工・電子卒。平 7 同大大学院博士課程了。同年, 名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻助手。平 15 同助教。平 20 東京工業大学大学院理工学研究科集積システム専攻准教授。平 23 名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻准教授三次元映像通信, 三次元映像システム・映像処理, その ITS への応用に関する研究に従事。平 8 年度本会学術奨励賞受賞。博士(工学)。映像情報メディア学会, IEEE 各会員。