

LED アレイ送信機追跡のための反転信号を用いた 路車間可視光通信の特性改善

名倉 徹[†] 山里 敬也[†] 圓道 知博[†]

藤井 俊彰^{††} 岡田 啓^{†††}

[†]名古屋大学 〒464-8603 名古屋市千種区不老町

^{††}東京工業大学 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

^{†††}埼玉大学 〒338-0825 さいたま市桜区下大久保 255

E-mail: [†]nagura@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp, [†]{yamazato,yendo}@nuee.nagoya-u.ac.jp,

^{††}fujii@it.ss.titech.ac.jp, ^{†††}okada@ees.saitama-u.ac.jp,

あらまし 本稿では LED アレイを送信機に、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ついて考える。路車間可視光通信において受信車両は走行しているため、LED アレイ送信機をカメラで追跡しながら、送信された情報を復号する必要がある。筆者らはこれまで、反転信号を用いた信号機追跡手法を提案することで LED アレイの追跡を実現した。本稿では、反転信号を信号機追跡だけではなく、復号にも用いることにより、雑音を軽減し誤り率特性を改善できることを示す。また、反転信号を用いることで、LED アレイのちらつきを軽減できることを定量的に評価する。

キーワード ITS, LED, 可視光通信, 路車間通信, 信号機追跡

Performance Improvement with the Inverted Signal to Track an LED Array Transmitter on Road-to-Vehicle Visible Light Communications

Toru NAGURA[†], Takaya YAMAZATO[†], Tomohiro YENDO[†],

Toshiaki FUJII^{††}, and Hiraku OKADA^{†††}

[†] Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, JAPAN

^{††} Tokyo Institute of Technology 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, JAPAN

^{†††} Saitama University 255, Shimookubo, Sakura-ku, Saitama 338-0825, JAPAN

E-mail: [†]nagura@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp, [†]{yamazato,yendo}@nuee.nagoya-u.ac.jp,

^{††}fujii@it.ss.titech.ac.jp, ^{†††}okada@ees.saitama-u.ac.jp,

Abstract In this paper, we consider road-to-vehicle visible light communication systems on driving situation using a LED array transmitter and a high-speed camera receiver. In our previous research, we have proposed inverted signal to track an LED array transmitter. We propose decoding method with inverted signal to improve BER performance. Furthermore, we confirm that we can suppress the flicker of LED in PDF.

Key words ITS, LED, Visible Light Communications, Road-to-Vehicle Communications, Traffic Light Tracking

1. はじめに

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り、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。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 [1]–[4]。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出来る。

本研究では、送信機に LED アレイを、受信機に車載高速度カメラを用いた路車間可視光通信に着目する。フォトダイードを用いる方法と比較してカメラを用いる利点は、受信機の視野角を広くできる点、送信機の位置を容易に見つけることができる点、複数光源からの信号を同時に受信可能である点、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点などが挙げられる。

これまでの研究では静止環境において、可視光通信チャンネルが空間周波数のローパスフィルタであることを用いて、距離減衰に強い空間周波数の低周波成分に優先度の高いデータを割り当てる階層的符号化方式の提案 [6] や、輝度値の正規化や輝度抽出ピクセル数を可変にすることによる誤り率特性改善 [7] を行った。

本研究では、車両走行環境においても LED 信号機をカメラで追跡しながら復号するための反転信号を用いた手法について検討する。ある送信信号 (元信号) に対して送信信号を反転させた信号 (反転信号) を生成することで、復号の際に全点灯の加算画像を受信することができ、ロバストな信号機追跡が容易になった。また、加算画像の全点灯により輝度値が一様になるため、ちらつきの軽減に繋がる。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。

さらに、反転信号を信号機追跡だけでなく、復号にも用いることを考える。元信号と反転信号は輝度値分布が異なり、周辺 LED との干渉の影響も異なる。このため、双方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。反転信号を復号に用いた有効性を調べるために、走行実験を行い、輝度値分布、平均二乗誤差 (MSE)、ビット誤り率 (BER) により評価を行う。

2. システムモデル

図 1 にシステムモデルを示す。

2.1 送信機

送信機は 16×16 の正方行列上に配置された 256 個の LED、パルス幅変調器、階層的符号化器から成る。送信信号は最大点灯区間 T_b のパルス幅変調を行うことで情報を載せ、各 LED の ON/OFF 点灯により表す。LED 1 つ当りのビットレートを $R_b (= 1/T_b)$ とすると、各 LED はそれぞれ異なるビットを送るので、送信機全体のビットレートを $256R_b$ とする。時間 t における LED アレイの u 行 v 列の LED の輝度は以下のように表せる。

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

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 の輝度を定める係数であり、 $0 \leq x_{u,v,k} \leq 1$ である。 A は LED 点灯時の輝度値である。例えば、情報変調に On-Off Keying(OOK) を用いる場合、 $x_{u,v,k} = \{0, 1\}$ と

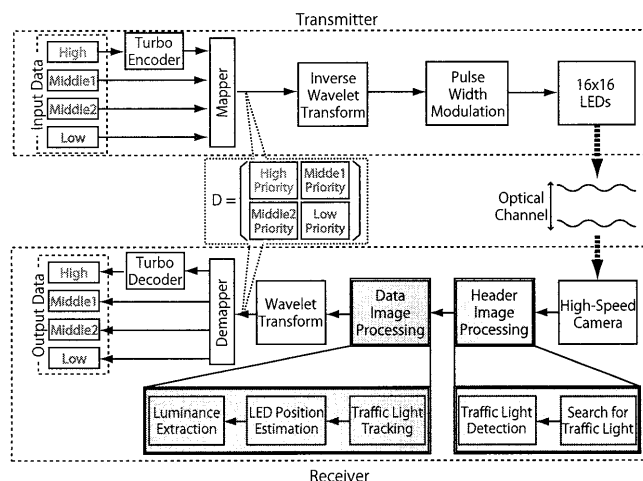


図 1 システムモデル

なる。 $g(t)$ は以下に示すような矩形パルスを表す関数である。

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

2.2 受信機

受信機は高速度カメラ、画像処理部、階層的復号器から成る。送信信号は光空間チャンネルを通して受信される。カメラの CMOS イメージセンサにより、送信信号は光の強さによって電気信号に変換される。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。 u 行 v 列の LED の受信信号は次のように表せる。

$$Y_{u,v}(t) = h_{u,v} \cdot X_{u,v}(t) + n_{u,v}(t) \quad (3)$$

ここで、 $h_{u,v}$ はチャンネル利得であり、 $n_{u,v}(t)$ は背景光雑音である。送信機と受信機の時間同期が完全であるとする。受信機のサンプリング周期を T_b とすると、イメージセンサの露光時間は以下のように表せる。

$$f(t) = \sum_i g_{sh}(t - (i-1)T_b) \quad (4)$$

ここで、 $i = 1, 2, \dots$ は露光区間が何番目かを表す。 $g_{sh}(t)$ は以下のようなパルス関数である。

$$g_{sh}(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t < T_b) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5)$$

これらから、LED(u, v) からの信号を受信したピクセルの出力は以下のように書ける。

$$R_{u,v,i} = c \sum_{u'=u-s}^{u+s} \sum_{v'=v-s}^{v+s} \int_{(i-1)T_b}^{iT_b} Y_{u',v'}(t) \cdot f(t) dt \quad (6)$$

ここで c は光電変換効率を表す定数である。

3. 階層的符号化

図 2(a) に LED アレイと高速度カメラ間の通信距離が 10m の

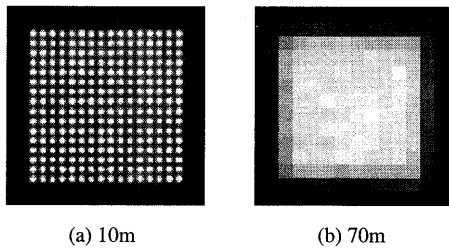


図2 受信画像

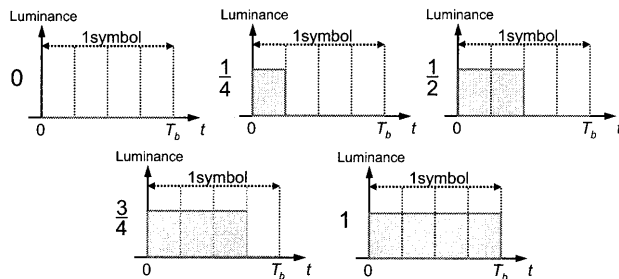


図3 パルス幅変調

ときの受信画像を、同図 (b) に通信距離 70m での受信画像を示す。通信距離 10m では、撮影画像において1つ1つのLEDが区別できる。しかし、通信距離 70m では、各LED重なりあっているため、1つ1つのLEDを区別することはできない。これは送受信機間の距離が長くなると、受信画像の空間周波数の高周波成分が失われ、低周波成分が多く残るためである。

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に割り当てる符号化である。

まず、データの優先度ごとの割り当てについて説明する。256個のLEDの送信データをそれぞれ $i_{m,n}$ ($m, n = 1, 2, \dots, 16$) と表現する。符号化を行うにあたり、送信データを式 (7) に示すような 16×16 の行列形に配置する。

$$I = \begin{Bmatrix} I_{11} & I_{12} \\ I_{21} & I_{22} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} i_{1,1} & i_{1,2} & \dots & i_{1,16} \\ i_{2,1} & i_{2,2} & \dots & i_{2,16} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_{16,1} & i_{16,2} & \dots & i_{16,16} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $I_{11}, I_{12}, I_{21}, I_{22}$ は 8×8 の行列である。また $i_{m,n} = \{-1, 1\}$ である。2次元高速ハルウェーブレット変換を用いると、図1にも示した通り、優先度は3つに分かれる。 I_{11} が優先度の高い部分、 I_{12}, I_{21} が中間の優先度部分、 I_{22} が優先度の低い部分にある。

3.1 符号化

階層的符号化器では、各優先度に分けた入力データをマッパーで式 (7) の行列形にし、ウェーブレット逆変換を施す。この操作により、優先度の高いデータを空間周波数の低周波成分へ、優先度の低いデータを空間周波数の高周波成分へ割り当てることができる。逆変換後、入力と同じく 16×16 の行列となる。

り、出力行列の各要素は以下ようになる。

$$x'_{u,v} = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{16} \sum_{n=1}^{16} i_{m,n} H_{n,v}^{16} H_{m,u}^{16} \quad (8)$$

ここで、 $H_{m,n}^{16}$ は以下に示す 16×16 の行列 H^{16} の m 行 n 列の要素を表す。

$$H^{16} = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & -1 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

この結果、 $x'_{u,v}$ は $\{0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1\}$ の5値の輝度値をとる。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。このため図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。

3.2 復号化

受信画像から輝度値の位置推定を行い、推定された位置から輝度を抽出する。得られた輝度値 $R_{u,v}$ を 16×16 の正方行列と考える。その行列の値を正規化した後のデータ行列にウェーブレット変換を行う。

$$\hat{i}_{m,n} = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^{16} \sum_{v=1}^{16} \hat{x}'_{u,v} H_{n,v}^{16} H_{m,u}^{16} \quad (10)$$

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。最後にスレッショルド判定を行い、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. 信号機追跡手法

走行受信時にもロバストに追跡するためには毎フレーム信号機の位置を補正することが不可欠である。信号機追跡の方法として以下の手法が考えられる。

- (1) 枠を既知の点滅にすることにより追跡する手法
- (2) 背景の動きベクトルを用いることにより追跡する手法
- (3) 反転信号により生成される全点灯を追跡する手法

手法 (1) は枠を追跡することで容易に信号機の位置補正ができるが既知の点滅をする枠の部分では情報を送信することができない。このため、伝送速度が大きく低下する問題点がある。手法 (2) は背景の動きベクトルを用いるため、伝送速度を低下させることなく信号機追跡が可能であるが、背景光の光量が十分でない夜間やカメラレンズの絞りを絞っている場合には用いることができない。

本稿では手法 (1), (2) の問題点を解決した手法 (3) を用い

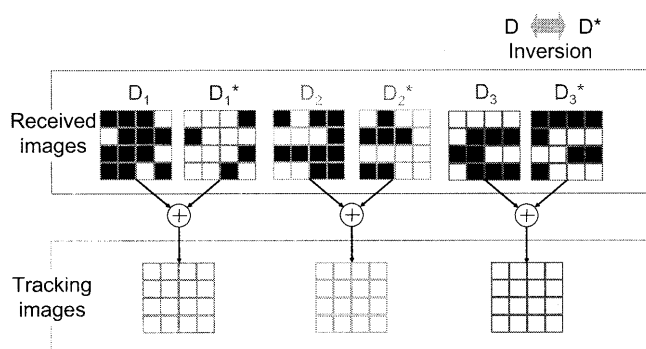


図4 反転信号を用いた信号機追跡例

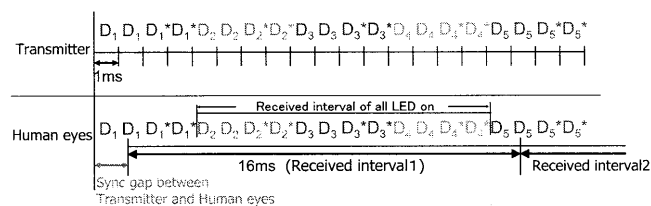


図5 送信機と人の目の同期ずれ

る。反転信号を用いた信号機追跡手法は画像全体を情報伝送に用いることができるため、手法(1)よりも伝送速度を高くすることができる。また毎フレーム送信データを用いて信号機追跡を行うため、手法(2)で問題となった夜間や絞りを絞った場合でも使用することができる。

手法(3)では図4に示したように各LED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*)を生成し、各データ間に挿入する。D₁, D₁*, D₂, D₂*の順に受信を行う際に、元画像Dと反転画像D*をそれぞれ加算することで全点灯画像を生成することができる。得られた加算画像と全点灯のテンプレートとの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、信号機追跡を行うことができる。

本研究では反転信号によるちらつき軽減を定量的に評価する。まず、人間の目の応答周波数の限界は50-70Hzであるためここでは簡単のため66.7Hzと仮定する。つまり人間の目は16ms毎に輝度を積分する受光装置と見なすことができる。反転信号を用いた場合、この積分範囲に全点灯を複数個含むため、ちらつきが軽減されると考えられる。

ちらつきを評価するために確率密度関数(PDF)を用いる。図5に示すように人の目とLEDアレイ送信機は同期していないため、ランダム時間の同期ずれを考え、ある時間の人の目の受信輝度とその次の受信輝度との差分をちらつきの大きさと定義する。図6にちらつきの確率密度関数を示す。図6より、OOKに比べるとwavelet変換をしているだけでもちらつきの軽減が見られることがわかる。これは送信輝度分布がwaveletの方が中心に偏っているためであると考えられる。ちらつきの分散はOOK, wavelet変換をした場合, wavelet変換に反転信号を加えた場合でそれぞれ, 370, 23.4, 2.00であり反転信号を用いることでちらつきを大きく軽減できていることがわかる。

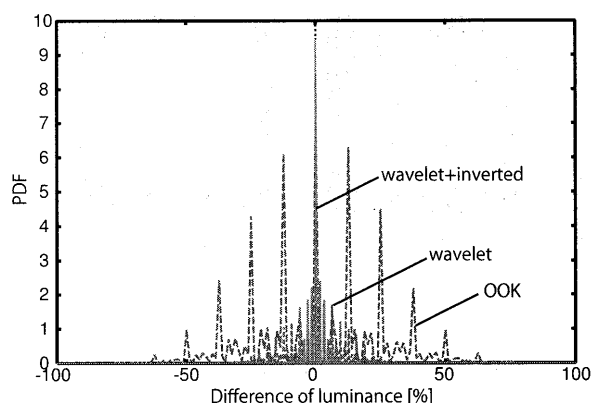
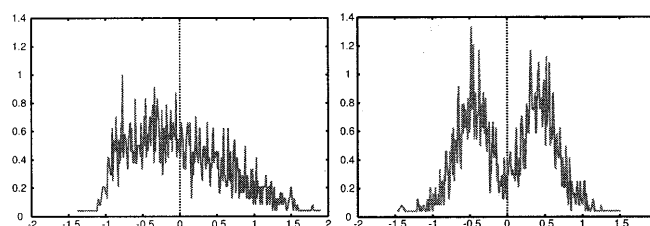


図6 ちらつきの確率密度関数



(a) 反転信号を用いない場合 (b) 反転信号を用いた場合

図7 受信輝度分布(28m)

5. 反転信号を用いた特性改善

これまでの研究では反転信号は信号機追跡のためにのみ用いていた。しかし、反転信号を受信最大輝度値から引いた信号からも元信号と同様なデータが得られる。そこで本研究では、反転信号を復号にも用いることにより特性改善することを考える。

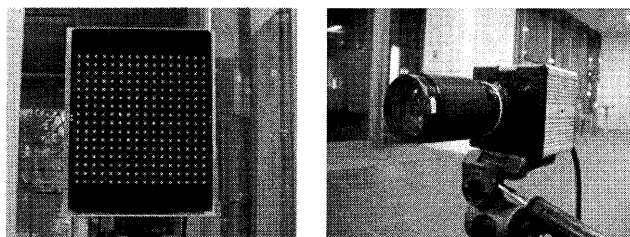
元信号と受信最大輝度値から反転信号を引いた信号を足し合わせることで、定常な背景光雑音成分を減らすことができる。

また、元信号の受信輝度値が高く、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。輝度値の飽和の軽減については輝度値分布を用いて詳しく検討する。図7(a), 図7(b)に近距離の受信輝度分布を示す。近距離では輝度値の飽和が起こっているため、図7(a)のように反転信号を用いない場合の受信輝度分布は劣化しているが、反転信号を用いることにより、送信された2値が正しく受信できていることがわかる。

同様に、元信号の周辺LEDの輝度値が高く、元信号への干渉の影響が大きい場合に、その反転信号の周辺LEDからの干渉は小さくなるため、反転信号を復号に用いることで干渉の影響も軽減することができる。

6. 実験結果

提案した信号機追跡手法の効果を実証するために走行実験を行った。図8(a), (b)に実験に使用した送信機, 受信機を示す。送信機の各LEDの間隔は2cmであり、半値角が22.6°のLEDを用いた。受信機の仕様を表1に示す。また、実験諸元を表2に示す。



(a) LED アレイ送信機 (b) 高速度カメラ

図8 実験装置

表1 高速度カメラ仕様

カメラ型名	フォトロン社製 FASTCAM-1024PCI 100K
レンズ型名	ニコン社製 Nikkor 50mm f/1.4
撮像素子	CMOS イメージセンサ
焦点距離	50mm
撮影速度	60~16000fps
解像度	Max 1280×1024 pixel

図9に反転信号を復号に用いた場合のBER特性を、図10に平均二乗誤差特性を示す。平均二乗誤差は送受信側の5値の輝度値をそれぞれ正規化して比較したものである。グラフより反転信号を用いることによってすべての距離で特性が改善していることがわかる。特性改善した要因としては、背景光雑音を打ち消せたこと、近距離では輝度値の飽和を軽減したこと、遠距離では干渉の影響を軽減できたこと3点であると考えられる。

7. まとめ

本稿では、信号機追跡のために用いていた反転信号を復号に用いることで、輝度値の飽和や周辺LEDからの干渉を低減し、特性改善できることを、輝度値分布、平均二乗誤差、ビット誤り率を用いて示した。各優先度、各距離について信号機追跡手法を用いた際の誤り率特性を調べた。また、ウェーブレット変換や反転信号を用いることにより、LEDのちらつきを軽減できることを確率密度関数を用いて示した。

謝辞 日頃ご指導戴く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、愛知工科大学ITS研究所荒井伸太郎研究員、実験場所を提供して頂いた中部日本自動車学校に感謝する。なお本研究の一部は、総務省SCOPE及び科

表2 実験諸元

LED点灯周波数	4kHz
伝送速度R	16kbps
カメラの撮影速度	1000fps
レンズのピント	無限遠
レンズの絞り	16
撮影画像	モノクロ
解像度	1024 × 512pixel
送信シンボル数	304
通信距離	25m-80m
車両速度	時速 30km
通信時間	6.4s
実験場所	中部日本自動車学校

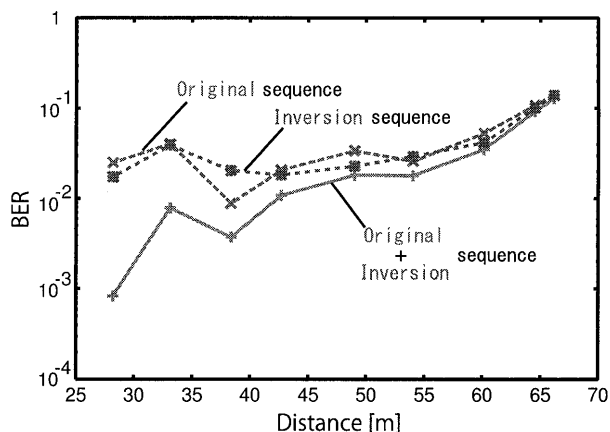


図9 反転信号を復号に用いた BER 特性

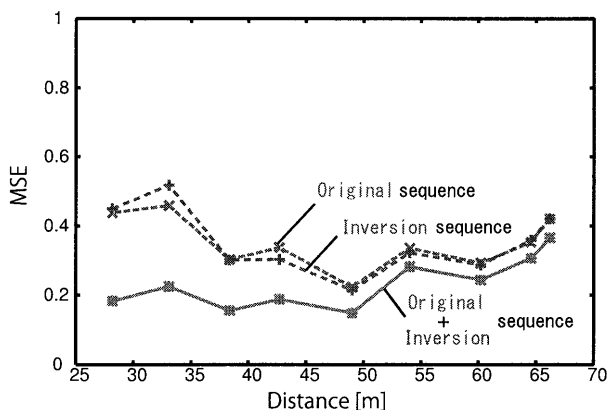


図10 反転信号を復号に用いた MSE 特性

研基盤(c)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] M. Akanegawa, Y. Tanaka, and M. Nakagawa, "Basic Study on Traffic Information System Using LED Traffic Lights", IEEE Trans. on Intelligent Transportation System, vol. 2, no. 4, pp. 197-203, Dec. 2001.
- [2] G. Pang, C. Chan, and T. Kwan, "Tricolor Light Emitting Dot Matrix Display System With Audio Output", IEEE Trans. on Industry Application, vol. 37, no. 2, pp. 534-540, Mar./Apr. 2003.
- [3] H. S. Liu and G. Pang, "Positioning Beacon System Using Digital Camera and LEDs", IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 52, no. 2, pp. 406-419, Mar. 2003.
- [4] T. Komine, J. H. Lee, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Adaptive Equalization System for Visible Light Wireless Communication Utilizing Multiple White LED Lighting Equipment", IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 8, no. 6, pp. 2892-2900, Jun. 2009.
- [5] M. Wada, T. Yendo, T. Fujii and M. Tanimoto, "Road-to-vehicle communication using LED traffic light", Proc. of IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2005.
- [6] S. Arai, S. Mase, T. Yamazato, T. Yendo, T. Fujii, M. Tanimoto, T. Kidono, Y. Kimura, and Y. Ninomiya "Experiment on hierarchical transmission scheme for visible light communication using LED traffic light and high-speed camera", Proc. of 1st IEEE International Symposium on Wireless Vehicular Communications, Sep. 2007.
- [7] T. Nagura, T. Yamazato, M. Katayama, T. Yendo, T. Fujii, H. Okada "Improved Decoding Methods of Visible Light Communication System for ITS using LED Array and High-Speed Camera", Proc. of IEEE 71st Vehicular Technology Conference, May. 2010.
- [8] T. Nagura, T. Yamazato, M. Katayama, T. Yendo, T. Fujii, H. Okada "Tracking an LED Array Transmitter for Visible Light Communications in the Driving Situation", Proc. of IEEE The Seventh International Symposium on Wireless Communication Systems, Sep. 2010.