

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

増田恭一郎^{†a)} 山里 敬也^{††} 岡田 啓[†] 片山 正昭^{††}

Hierarchical Coding Scheme for Optical Wireless Communication Using LED Traffic Light and High-Speed Camera

Kyoichiro MASUDA^{†a)}, Takaya YAMAZATO^{††}, Hiraku OKADA[†], and Masaaki KATAYAMA^{††}

あらまし 本研究では、LED 信号機と車載カメラを用いた ITS のための並列光空間通信について考える。本方式では受信機がカメラであるため、複数の LED から送信されたデータを個別に復調することが可能であり、LED の数を増やせばそれだけデータレートを向上させることができる。しかし、遠距離から送信機 LED を撮影した際に隣接する LED が画像内で干渉することが問題となる。そこで本論文では、この干渉に対する耐性をもった階層的符号化方式を提案・評価する。提案方式では、二次元高速ハールウェーブレット変換を用いて階層的符号化を実現する。性能評価は計算機シミュレーション、実装実験の両面からなされ、提案方式の有効性を示す。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

1. ま え が き

LED は従来の蛍光灯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もつため、次世代の光源として期待されている。それに伴い、LED を用いた可視光空間通信方式に関する研究も行われている [1]。LED は半導体デバイスであるため高速に輝度を制御することができる。そのため、人間の目には見えないほど高速に変調することで、照明光 [2] や LED ディスプレイ [3] などの役割を果たすと同時に通信機器としての使用も可能となる。

また、ITS 分野における可視光通信の研究も行われている [4], [5]。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。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、新たな機器設置のコストを節約することができる。

LED 信号機を用いた光空間通信における受信機はフォトダイオード (PD) を使用するのが一般的であるが [4]、十分な SNR を得るために受信機の視野角を狭める必要があるため、通信距離を伸ばすためには受信機の機械的な首振りを行わなければならないという欠点がある。しかし、受信機にカメラを用いることで、視野角を広くすることができ、機械的な首振りを行う必要なく通信距離を伸ばすことが可能となる [5]。また、カメラで撮影した画像に処理を加えることで、複数の光源からの信号を分離して復調することが可能となる。これにより、図 1 に示すように信号機のほかに LED 道路表示盤、LED ブレーキランプ等の信号も一つの受信機で同時に受信可能となるため、多様な ITS アプリケーションが考えられる。更に、信号機を構成する複数の LED を独立に変調すれば、受信機は信号機の点灯パターンを認識することにより LED の数だけ並列にデータを伝送することができ、データレートを向上させることができるといった利点もある。

このように独立に変調された複数の LED の信号をカメラで撮影することで並列に復調する方式は並列光

[†] 名古屋大学工学研究科電子情報システム専攻, 名古屋市
Department of Electrical Engineering and Computer Science, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††} 名古屋大学エコトピア科学研究所, 名古屋市
EcoTopia Science Institute, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

a) E-mail: masuda@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

空間通信方式と呼ばれ、主に LED 照明を送信機とした室内光空間通信への応用が考えられている [6]。しかし、LED 信号機を送信機とした ITS 用途の並列光空間通信に関する研究はほとんど行われていない。

我々は、送信機に LED 信号機、受信機に車載高速カメラを用いた並列光空間通信を提案している [9] ~ [11]。我々の考える ITS 用途の並列光空間通信と、従来の室内通信用途との大きな違いは、ITS 用途の通信では車両は走行しているために送受信機間の距離が時間的に変化する点である。もしも受信機が送信機から距離が離れた位置にあると、受信画像の信号機部分のピクセル数の減少や焦点ずれなどによって点灯パターンが劣化した形で受信される。この劣化により、複数の LED の光が受信画像において重なり合い、一つの光源からの光のように写る。このとき、隣り合う LED の光信号が互いに干渉を起こし、正しく復調を行うことができなくなるおそれがある。その詳細については 2.2 で詳しく述べる。

このチャンネル特性をモデル化するために、空間周波数の概念を導入することを考える。具体的には、送受信機間の距離の変化に伴う受信画像の劣化を受信画像における空間周波数高周波成分の減衰であり、低周波成分の劣化は比較的少ないという点に着目する。本論文では、そのようなチャンネル特性に適合した新しい階層的符号化方式を提案し、その性能を計算機シミュレーション [9]、実験 [10] の両面から評価する。提案方式では、二次元高速ハルウェーブレット変換 (2D FHWT) を利用して空間周波数上にデータを割り当て、低周波成分に割り当てたデータの誤り率劣化を防ぐことで階層的符号化を実現する。階層的符号化を用いることで、送信機のデータレートは一定としたまま通信距離に応じて受信側で適応的に復調データ量を変化させることができ、符号化を行わない場合に比して

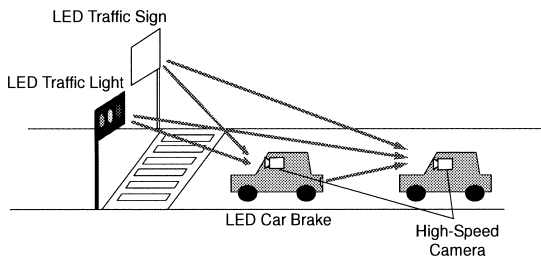


図 1 LED 信号機と車載カメラを用いた路車間通信
Fig.1 Road-to-vehicle communication using LED traffic light and high-speed camera.

要求誤り率を満たす通信距離を伸ばすことが可能となる。

本論文は以下のように構成される。2. では送信機、チャンネル、受信機のモデルについて述べる。3. では提案階層的符号化方式について詳しく述べる。4. では計算機シミュレーションによって提案方式の評価を行い、5. では実装実験によって提案方式の評価を行う。6. はむすびである。

2. システムモデル

本章では、本論文で着目するシステムのモデル化を行う。想定するシステムモデルを図 2 に示す。送信機、受信機のモデルについて説明するほか、受信機に二次元イメージセンサを用いることで起こる受信画像内での隣接する LED からの光信号の干渉についてもモデル化を行う。

2.1 送信機

送信機は 8×8 の正方形列上に配置された 64 個の LED、符号化器からなる。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、 $u, v = 1, 2, \dots, 8$ である。

送信機の各 LED は区間 T_b の非負の方形パルスを発生し、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、LED 一つ当りのビットレート $R_b = 1/T_b$ となる。送信機に設置される LED は 64 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 $64R_b$ となる。

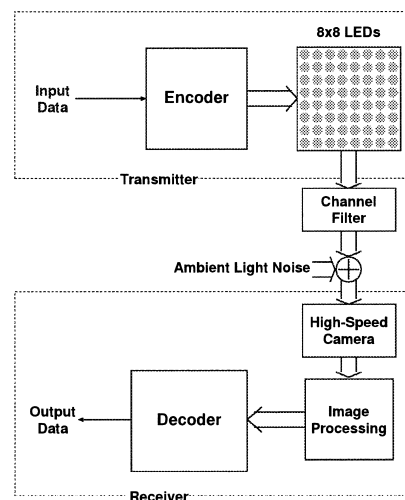


図 2 システムモデル
Fig. 2 Systemmodel.

LED(u, v) の時間 t における輝度は以下のように表せる .

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

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. 提案階層的符号化方式を使う場合については次章で詳しく説明する. A は LED 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 .

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

2.2 チャネルモデル

上に定義した送信信号は, 光空間チャンネルを通して受信される. チャンネルを伝搬した後, 受信機に至った信号は以下のようになる .

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

ここで $h_{u,v}$ はチャンネル利得であり, $n_{u,v}(t)$ は背景光から生じるショット雑音である. 背景光が強い強度をもっている場合, 背景光からのショット雑音は白色ガウス雑音で近似される [7]. 本論文では, $n_{u,v}(t)$ を両側電力スペクトル密度が $N_0/2$ である白色ガウス過程であるとする .

受信機に到達した光信号はカメラの CMOS イメージセンサにより電気信号に変換され, 受信機は結果を画像に出力する. 各 LED に割り当てられたピクセルの数が十分であり, それらの領域が十分に離れていれば各 LED から送られた信号は正しく受信することができる. しかし, 送受信機間の距離が離れることにより, LED 部分に割り当てられたピクセル数が不足し, 画像内の隣接する LED の信号が干渉するおそれがある .

図 3 に名古屋市内の路上で実際に撮影した LED 信号機の画像を示す. 受信機にはフォトロン社製の FASTCAM-1280PCI を用い, 撮影速度は 500 fps である. 連続した画像間の差分をとることで, 背景画像は容易に取り除くことができ, LED 信号機部分のみ

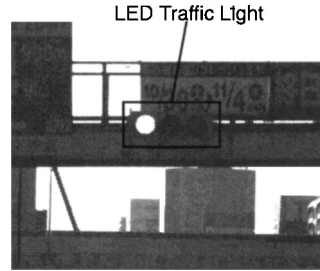


図 3 LED 信号機を含む受信画像
Fig. 3 Received whole image including LED traffic light.

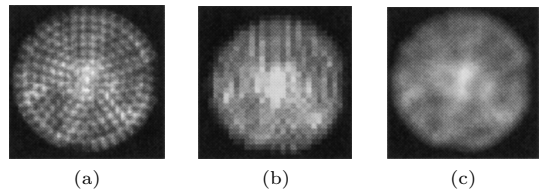


図 4 LED 信号機部分の画像; (a) 15 m の距離から撮影したもの, (b) 50 m の距離から撮影したもの, (c) (a) の画像にガウスフィルタをかけたもの

Fig. 4 Received image of LED traffic light; (a) 15 m distance, (b) 60 m distance, (c) Gaussian filtered image of (a).

を取り出すことが可能である [11].

図 4 に LED 信号機部分のみを抜き出した画像を示す. (a) は 15 m の距離から撮影したもので, (b) は 50 m の距離から撮影したものである. (a) の画像では信号機の一つひとつの LED が判別できる. 一方, (b) はピクセル数の減少により細かい部分の失われた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. 画像の細かい部分の情報が失われているということは, 画像の空間周波数の高周波成分が失われていると言い換えることができる. 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に変化する低域フィルタ (LPF) でモデル化可能であると考えられる .

ここで, このチャンネル特性を二次元 LPF の一種である 3×3 のガウスフィルタで近似する. 図 4 の (c) は (a) の画像にガウスフィルタを適用したものである. 画像内の隣接する LED の干渉を考慮して式 (3) を書き直すと以下ようになる .

$$Y_{u,v}(t) = \sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 G_{p,q} \cdot h_{u,v} \cdot x_{u+p,v+q}(t) + n_{u,v}(t) \quad (4)$$

ここで $G_{p,q}$ はガウスフィルタの畳込み係数であり、以下のように定義される。

$$G_{p,q} = \frac{1}{G_{sum}} \frac{\exp\left(-\frac{p^2+q^2}{2\sigma_g^2}\right)}{2\pi\sigma_g^2} \quad (5)$$

$$G_{sum} = \sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 \frac{\exp\left(-\frac{p^2+q^2}{2\sigma_g^2}\right)}{2\pi\sigma_g^2} \quad (6)$$

ここで $\sigma_g^2 (> 0)$ はガウスフィルタの分散である。以上のように、ガウスフィルタの分散をパラメータにすることで、チャンネルのカットオフ周波数を簡潔に表すことができる。

2.3 受信機

受信機は高速度カメラ、画像処理部、復号化器からなる。送信信号は光空間チャンネルを通して受信機の高速度カメラで受信される。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。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と、LED(u, v) からの信号を受信したすべてのピクセルの出力の合計値は以下のように書ける [8]。

$$R_{u,v,i} = c \int_{(i-1)T_b}^{iT_b} Y_{u,v}(t) \cdot f(t) dt \quad (7)$$

ここで、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。

$$f(t) = \sum_i g_{sh}(t - (i-1)T_b) \quad (8)$$

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

$$g_{sh}(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t < T_b) \\ 0 & (\text{ohterwise}) \end{cases} \quad (9)$$

イメージセンサでサンプリングされたあとの背景光雑音の電力は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= E \left[\left(c \int_0^{T_b} n_{u,v}(t) dt \right)^2 \right] \\ &= c^2 \cdot \frac{N_0}{2} \cdot T_b \end{aligned} \quad (10)$$

瞬時 SNR は以下のように定義する。

$$\text{SNR} = \frac{(AcT_b \cdot h_{u,v} \cdot x_{u,v,k})^2}{2\sigma^2} \quad (11)$$

3. 提案階層的符号化方式

本章では、提案する階層的符号化方式について述べる。符号化の項では、入力データに従って式 (1) における輝度係数 $x_{u,v,k}$ を決めるための操作について述べる。復号化の項では、式 (7) における受信輝度値 $R_{u,v,i}$ からデータを復元する方法について述べる。ここで、議論の簡単化のために、以下それぞれの記号の時間を表す添字 k, i を除いて、 $x_{u,v}$ 、 $R_{u,v}$ と表現し、それぞれの決め方について述べることにする。

入力データは 64 ビット同時に処理される。入力データを $d_{m,n}$ と表現する。ただし $m, n = 1, 2, \dots, 8$ である。

符号化を行うにあたり、入力データを以下に示すような 8×8 の行列形に配置する。

$$\begin{aligned} D &= \begin{Bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \cdots & d_{1,8} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \cdots & d_{2,8} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{8,1} & d_{8,2} & \cdots & d_{8,8} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで D_{11} 、 D_{12} 、 D_{21} 、 D_{22} はそれぞれ 4×4 の正行列である。また、 $d_{m,n} = \{-1, 1\}$ であり、入力データは互いに独立で同一の分布に従うものとする。

2D FHW T を用いた提案階層的符号化方式では、入力データは 3 段階の優先度に分けられる。式 (12) における D_{11} の部分が優先度が最も高く、この部分の合計のデータレートは $16R_b$ となる。 D_{12} と D_{21} が中間の優先度であり、データレートは $32R_b$ 、 D_{22} は優先度が最も低くデータレートは $16R_b$ となる。

3.1 符号化

図 5 に符号化の流れを示す。まず、式 (12) の形になった入力データにスケール 1 の二次元高速ハールウェーブレット逆変換 (2D IFHWT) を行う。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。逆変換後、入力と同じく 8×8 の行列が得られる。出力行列の各要素は以下ようになる。

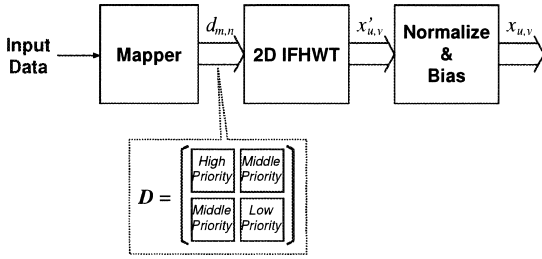


図 5 符号化器構成

Fig. 5 Block diagram of proposal encoder.

$$x'_{u,v} = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^8 d_{m,n} H_{n,v}^8 H_{m,u}^8 \quad (13)$$

ここで、 $H_{m,n}^8$ は以下に示すような 8×8 の行列 H^8 の m 行 n 列の要素を表す。

$$H^8 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$x'_{u,v}$ のとり得る値の範囲は $-2 \leq x'_{u,v} \leq 2$ である。これを 0 から 1 の範囲にするため、以下のようにバイアスを加えた後に正規化する。

$$x_{u,v} = \frac{(x'_{u,v} + 2)}{4} \quad (15)$$

この処理の結果、 $x_{u,v}$ のとり得る値は $\{0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1\}$ の 5 通りとなる。以上のように、本研究ではスケール 1 の 2D IFHWT により階層化を実現しているが、このスケールを更に大きくすることで階層を増やすことも可能である。しかしながら、階層が増えたと LED の輝度の階調も増え、符号化あるいは復号化の処理が複雑になる。

3.2 復号化

図 6 に復号化の流れを示す。受信画像から得られた $R_{u,v}$ を 8×8 の正方行列と考える。まず、以下のように行列のそれぞれの要素に逆バイアスを加える。

$$\hat{x}'_{u,v} = R_{u,v} - b \quad (16)$$

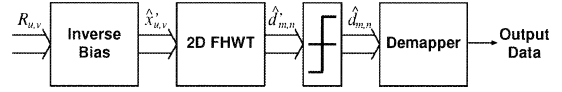


図 6 復号化器構成

Fig. 6 Block diagram of proposal decoder.

バイアス値 b は $R_{u,v}$ の平均値から算出される。適切なバイアス値を求めるには時間的に平均する必要もあるため、時間のパラメータ i を考慮して以下のように計算する。

$$b = \sum_i k \sum_u \sum_v R_{u,v,i} \quad (17)$$

次に、以下のように行列に 2D FHWT を行う。

$$\hat{d}'_{m,n} = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^8 \sum_{v=1}^8 \hat{x}'_{u,v} H_{n,v}^8 H_{m,u}^8 \quad (18)$$

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。もし $\hat{d}'_{m,n}$ が正の値であれば $d_{m,n}$ の推定値 $\hat{d}_{m,n}$ は 1、 $\hat{d}'_{m,n}$ が負の値であれば $d_{m,n}$ の推定値 $\hat{d}_{m,n}$ は -1 となる。

4. 数値例

本章では、計算機シミュレーションによって提案階層的符号化方式の性能を無符号化の場合の性能と比較する。比較対象とした無符号化方式とは、64 個の LED に独立に OOK (On-Off Keying) の変調を用いた方式である。このとき、ビットの 0, 1 は LED の On, Off で表現される。本研究で想定する LED 信号機を用いた通信においては、信号機としての機能を考えて LED の明るさを一定にして評価を行う。これは、LED の輝度値の時間平均値を一定にすることと等しい。しかし、式 (11) で定義した瞬時 SNR の時間平均値は、輝度値の 2 乗の時間平均値で決まるため、受信機での SNR は各方式ごとに異なる。そこで、以下の数値例では SNR_{OOK} というパラメータを一定にして評価することにする。これは、ビットレート、輝度の時間平均値を一定にした場合に無符号化方式 (OOK) を用いた場合の SNR を表す。

図 7 に $\sigma_g^2 \rightarrow 0$ 、つまり受信画像内で隣接する LED 同士の輝度値の干渉が全く存在しない場合の SNR_{OOK} 対 BER 特性を示す。比較のため、符号化なし (OOK) の場合の特性も示してある。隣接する LED の輝度値に干渉が生じない場合、階層的符号化の効果は現れず、

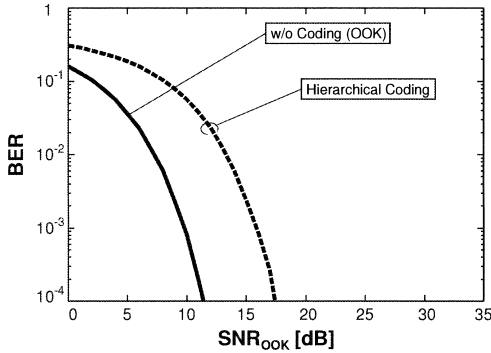


図 7 提案符号化方式の SNR_{OOK} 対 BER 特性 ($\sigma_g^2 \rightarrow 0$)
 Fig. 7 BER performance of the proposed hierarchical coding systems in AWGN channel ($\sigma_g^2 \rightarrow 0$) along with the conventional OOK.

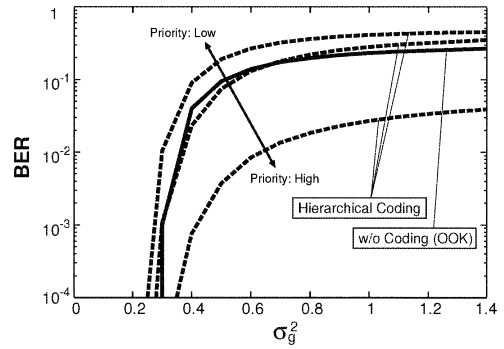


図 9 提案符号化方式の σ_g^2 対 BER 特性 ($SNR_{OOK} = 25$ dB)
 Fig. 9 BER performance of the hierarchical transmission system along with the conventional ($SNR_{OOK} = 25$ dB).

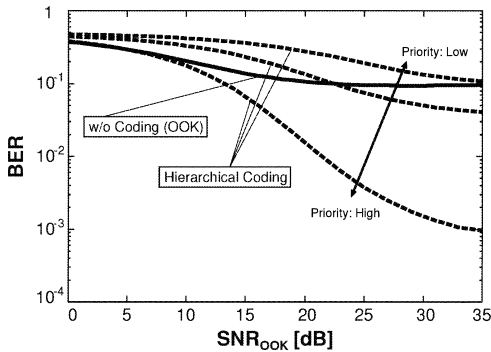


図 8 提案符号化方式の SNR_{OOK} 対 BER 特性 ($\sigma_g^2 = 0.5$)
 Fig. 8 BER performance of the hierarchical transmission system along with the conventional ($\sigma_g^2 = 0.5$).

すべての優先度において BER 特性は等しくなる。ここでの BER 特性は、従来方式の方が優れている。これは、輝度を多値にしたことにより輝度の 2 乗の時間平均値が減少し、SNR が劣化したためと考えられる。

次に、図 8 に $\sigma_g^2 = 0.5$ としたときの提案方式、無符号化方式の SNR_{OOK} 対 BER 特性を示す。図から、隣接する LED の輝度値に干渉が生じると提案階層的符号化方式の効果が現れることが分かる。2D FHWT を用いたとき、データは優先度により 3 段階に分けられるが、優先度の高いものほど BER の劣化の度合いが少なくなることが見て取れる。

また、図 9 は SNR_{OOK} を 25 dB と一定としたときに σ_g^2 と BER の関係を示す。これを見ると、提案階層的符号化方式の優先度最高のデータの誤り率は σ_g^2 が大きくなったとしても常に無符号化の場合の誤り率を

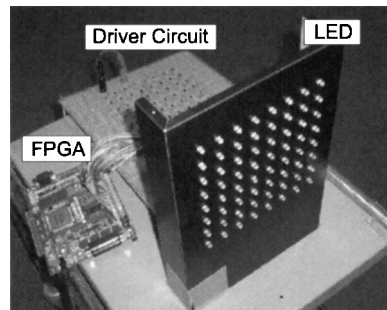


図 10 送信機全体の写真
 Fig. 10 Experimental transmitter.

表 1 LED 仕様
 Table 1 LED specifications.

型名	豊田合成社製 E1L52-SC1A2-03
色	青緑
放射角	23°
輝度値	2700 mcd (順方向電流 10 mA, 光軸上での値)

下回っていることが分かる。

5. 実験

提案階層的符号化方式を実装し、実験を行う。送信機の写真を図 10 に示す。送信機は縦横 2 cm 間隔で配置された 64 個の LED、変調用 FPGA、ドライバ回路からなる。実験に用いた LED の仕様は表 1 に示すとおりである。試作した LED 送信機は、実際に使用されている LED 信号機を参考に作製したものである。個々の LED は実際のものと同じのものを用いた。また、実際の信号機と比べ、LED の数は少なくなってい



図 11 高速度カメラの写真
Fig. 11 High-speed Camera.

表 2 高速度カメラ仕様
Table 2 High-speed camera specifications.

カメラ型名	フォトロン社製 FASTCAM-1280PCI
レンズ型名	ニコン社製 Ai Zoom Nikkor
撮像方式	CMOS イメージセンサ
撮影速度	60 ~ 16000 fps
画素数	最大 1280×1024 pixel

表 3 実験諸元
Table 3 Experimental parameters.

実験箇所	名古屋大学 IB 電子情報館北棟 9F 廊下
符号化方式	階層的符号化, 無符号化 (OOK)
送信機 LED の点灯周期	1/2000 s
データレート	114 kbit/s
送信系列	M 系列 (系列長 4095)
送信バケット数	54 (階層的符号化時) 27 (無符号化時)
高速度カメラの撮影速度	4000 fps (LED 点灯周波数の 2 倍)
高速度カメラの画素数	160 × 128 pixel
カメラレンズのフォーカス	無限遠
カメラレンズの焦点距離	35 mm
カメラレンズの絞り	3.5
通信距離	10 ~ 50 m

るが, LED の間隔 (2 cm) は実際の信号機の LED 配置と同じである。また, 受信機は高速度カメラ, データ処理用 PC からなる。図 11 に実験に用いた高速度カメラを示す。高速度カメラの仕様は表 2 のとおりである。

実験諸元を表 3 に示す。実験場所は室内であり, 部屋の蛍光灯はすべてつけた状態で実験を行う。階層的符号化方式の比較対象として無符号化 (OOK) の場合を考える。データレート, 平均輝度値は階層的符号化方式, 無符号化方式ともに等しい条件で実験を行う。送信機側, 受信機側ともにパラメータを一定とし, 通信距離のみを変化させて特性の変化を調べる。実験は

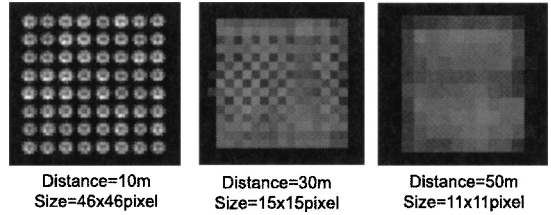


図 12 受信画像の例
Fig. 12 Examples of received images.

静止環境でのみ行う。実験のカメラの据付け角は 0 度 (地面と水平) とした。画像内の LED の位置は既知であるとして手動で LED に相当するピクセルを与え, 各 LED の輝度値を計算する。

図 12 に通信距離 10 m, 30 m, 50 m における受信画像を示す。図 12 の画像は, いずれも送信機の 64 個の LED がすべて最大輝度で点灯しているときに撮影したものである。なお, 図 12 の下に記載したサイズは画像内の LED 64 個の領域が占めるピクセル数である。例えば, 距離 30 m においては LED 64 個で 15×15 pixel となっているので, LED 一つ当たり約 2×2 pixel のサイズになる。実験では, カメラレンズのフォーカスを無限遠に設定し, ズームは固定のままにした。このため, 撮影する距離が遠くなれば, 画像内の LED のサイズは小さくなる。図 12 から分かるように実際のぼけは必ずしも全体として均一になっているわけではない。この原因は, 送信側 LED の傾き等による輝度のばらつき, 受信側のレンズのひずみによるものと想像される。このことより, 実際にはガウスフィルタに加え, LED の輝度のばらつき, レンズの光学的特性も加味しなければ, 真のチャネル特性は表現できないものと考えられる。

図 13 には通信距離とビット誤り率の関係を示す。通信距離が 30 m よりも短い場合には, いずれの方式においても誤りは発生しなかった。誤りが発生しない場合のうち, 最も距離が離れていた通信距離 28 m における受信画像内の送信機 LED のサイズは 16×16 ピクセルであった。通信距離が 30 m を超えたところから誤りが発生し始める。これは, このときの受信画像内の送信機 LED のサイズは 15×15 ピクセルであり, LED 間隔が 1 ピクセル以下になる箇所が出てくるために, 受信画像において隣り合う LED 同士の輝度の干渉が無視できなくなり始めたためだと考えられる。表 4 に実験で得られたヘッダ部の画像 (LED が最高輝度で光っているとき) の輝度値の平均, 分散が

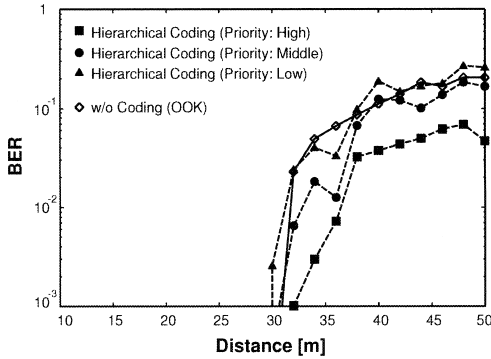


図 13 通信距離と BER の関係
Fig. 13 BER performance of experiment.

表 4 距離と SNR_{OOK} の関係
Table 4 Relation of distance and SNR_{OOK}

distance	SNR_{OOK}	distance	SNR_{OOK}
20 m	40.0 dB	36 m	37.4 dB
22 m	39.0 dB	38 m	37.5 dB
24 m	38.4 dB	40 m	37.5 dB
26 m	38.0 dB	42 m	36.9 dB
28 m	37.7 dB	44 m	37.2 dB
30 m	37.7 dB	46 m	36.0 dB
32 m	37.6 dB	48 m	36.5 dB
34 m	36.0 dB	50 m	36.3 dB

ら算出した SNR_{OOK} の値を示す。これより、実験時の SNR_{OOK} は常に 35 dB 以上あることが確認できる。それにもかかわらず、距離が長くなるに従い、誤り率が劣化している。特に、高い周波数成分で情報伝送を行う優先度の低いデータほど劣化が大きい。すなわち、距離が長くなるほど高周波成分が劣化していることが確認できる。

今回のシステムでは誤り訂正は行っていないため、要求ビット誤り率を 10^{-2} と設定する。このとき、無符号化の場合は通信距離 32 m でビット誤り率 2.3×10^{-2} となるため既に要求ビット誤り率を上回ってしまっている。一方、階層的符号化を行うことで、通信距離 32 m における優先度の最も高いデータのビット誤り率は 1.0×10^{-3} と低く抑えられている。階層的符号化を用いた場合、通信距離 36 m においても優先度の最も高いデータのビット誤り率は 7.2×10^{-3} であり、要求ビット誤り率を下回っている。図 13 を見ると、無符号化の場合はビット誤り率が 1×10^{-1} 付近で誤り率が飽和し出すが、階層的符号化の優先度最高のデータのビット誤り率が飽和するのは 5×10^{-2} 付近であることが分かる。

以上から、実験の面からも提案方式の有効性が確か

められた。また、実験によって得られた図 13 と計算機シミュレーションによって得られた図 9 と相似した曲線を描いている。これより、我々の考える二次元 LPF によるチャンネルのモデル化の妥当性も示されたとはいえる。

6. むすび

本論文では、LED 信号機と車載カメラを用いた路車間並列光空間通信のための階層的符号化方式を提案・評価した。

提案階層的符号化方式は、並列光空間通信のチャネル特性を二次元 LPF ととらえることができる点に着目し、二次元高速ハルウェーブレット変換 (2D FHWTT) を用いてデータを空間周波数上割り当てることで実現される。送受信機間の距離が離れても、空間周波数の低周波成分の劣化は比較的小さいので、低周波成分に割り当てたデータの誤り率は小さくなる。

計算機シミュレーション、実験の両面から提案方式の性能を評価した結果、無符号化の場合では要求ビット誤り率を満足できない位置においても、階層的符号化を用いることで一部のデータは要求ビット誤り率を満たす状態での通信が可能であることが確かめられた。

路車間通信への応用を考えた場合、提案する階層的符号化を用いることで、送信機側のデータレートは一定としたまま、通信距離に応じて受信機側で復号するデータ量を適応的に変化させることで要求ビット誤り率を達成する距離を伸ばすことができる。

謝辞 本研究に関して貴重な御意見を頂いた本学工学研究科藤井俊彰氏、圓道知博氏及び和田光広氏に深く感謝する。また、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (C) 及び文部科学省 21 世紀 COE プログラム「社会情報基盤のための音声・映像の知的統合」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。

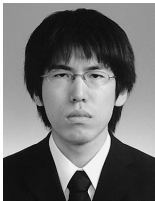
文 献

- [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] T. Komine and M. Nakagawa, “Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights,” IEEE Trans. Consum. Electron., vol.50, no.1, pp.100–107, Feb. 2004.
- [3] 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.
- [4] M. Akanegawa, Y. Tanaka, and M. Nakagawa, “Ba-

sic study on traffic information system using LED traffic lights," IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, vol.2, no.4, pp.197-203, Dec. 2001.

- [5] 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.
- [6] 宮内 聡, 小峯敏彦, 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, May 2004.
- [7] J.M. Kahn and J.R. Barry, "Wireless infrared communications," Proc. IEEE, vol.85, pp.265-298, June 1997.
- [8] W. Mao and J.M. Kahn, "Free-space heterochronous imaging reception of multiple optical signals," IEEE Trans. Commun., vol.52, no.2, pp.269-279, Feb. 2004.
- [9] 増田恭一郎, 山里敬也, 岡田 啓, 片山正昭, 藤井俊彰, "LED 信号機を用いた可視光伝送システムの階層的符号化に関する一検討," 第 27 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2004), vol.1, pp.187-190, Dec. 2004.
- [10] 増田恭一郎, 山里敬也, 岡田 啓, 片山正昭, "並列光空間通信における階層的符号化方式の実験," 信学技報, IT2005-77, March 2006.
- [11] M. Wada, T. Yendo, T. Fujii, and M. Tanimoto, "Road-to-vehicle communication using LED traffic light," Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2005, pp.601-605, June 2005.

(平成 18 年 3 月 28 日受付, 11 月 22 日再受付,
19 年 5 月 17 日最終原稿受付)



増田恭一郎 (正員)

平 16 名大・工・電子情報工卒。平 18 同大大学院博士課程前期課程卒。在学中は可視光空間通信の研究に従事。



山里 敬也 (正員)

昭 63 信州大・工・電子工卒。平 2 同大大学院修士課程了。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・助教教授, 平 16 同大・エコトピア科学研究機構, 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, 変復調理論, 誤り制御, e ラーニングなどの研究に従事。情報理論とその応用学会, 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 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。



岡田 啓 (正員)

平 7 名大・工・電子情報卒。平 9 同大大学院博士課程前期課程了。平 11 同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・PD。平 12 名大・情報メディア教育センター・助手。平 16 同大学・エコトピア科学研究機構・助手。平 18 新潟大学超域研究機構助教, 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などの研究に従事。情報理論とその応用学会, IEEE 各会員。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 本会通信ソサイエティ活動功労感謝状受賞。



片山 正昭 (正員)

昭 56 阪大・工・通信卒。昭 61 同大大学院博士課程了。工博。同年豊橋技術科学大助手。平元阪大・講師。平 4 名大・講師, 平 5 助教授, 平 13 教授。現在, 名大・エコトピア科学研究機構教授(工学研究科電子情報システム専攻兼任)。1995 年 10 月より 1996 年 4 月まで, 名大工学部との学術交流協定により, 米国ミシガン大学アンアール校工学部電気電子計算機科学科に滞在。信号伝送と変復調理論, 誤り制御, 多元接続方式, トラヒック制御, ソフトウェア無線技術などの研究に従事。情報理論とその応用学会, IEEE, 小型衛星研究会, 日本信頼性学会各会員。昭 61 本会篠原記念学術奨励賞受賞。平 11, 13, 18 本会通信ソサイエティ功労感謝状受賞。