

可視光通信を用いた交通信号における画像処理

荒井 伸太郎* (愛知工科大学), 山里 敬也 (名古屋大学), 小沢 慎治 (愛知工科大学)

Image Processing for Visible Light Communication Using LED Traffic lights
 Shintaro Arai* (Aichi University of Technology), Takaya Yamazato (Nagoya University)
 Shinji Ozawa (Aichi University of Technology)

In this paper, we focus on a road-to-vehicle visible light communications using LED traffic light (transmitter) and an in-vehicle camera (receiver). As advantages using the camera, the recognition of objects as well as their locations can easily be realized and the reception of LED modulated data is also possible at the same time. Unfortunately, if the receiver is far from the transmitter, the received data pattern degrades due to reduction of pixel size and defocusing of the LED data pattern. This paper discusses these problems from image processing approaches.

キーワード: ITS, 可視光通信, LED, 車載カメラ
 (ITS, Visible Light Communication, LED, In-Vehicle Camera)

1. はじめに

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持つため, 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LEDを点滅させて情報を表すことで, 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. ITS分野における可視光通信に関する研究も行われている^{(4)–(9)}. LED信号機のLEDを高速に制御することで通信機器として利用し, 信号機としての役割と同時に, 車両や歩行者に道路情報提供の役割を付加することが可能となる.

LED信号機を用いた可視光通信に関する研究はいくつか行われているが, 受信機に用いる受光素子によって, 大きく2つの方式に分類することができる. 1つはフォトダイオード(PD)を用いた方式^{(4) (7) (8)}, もう1つはカメラを用いた方式^{(5) (6)}である. 前者はPDの高速応答性から高速通信が期待できるが, 十分なSNRを確保するためには受信機の視野角を狭くする必要があるのであるため, 画像の空間解像度を十分に得られない. そのため, 機械的な首ふりによって受信機を信号機に向ける操作を必要とする. 一方, 後者のカメラ方式は, 画像の空間解像度が高く, 広角で撮影を行った後, 画像処理でLED信号機部分を見つけ出すことができ, 機械的な

首ふりの必要がない. また, 複数の光源からの信号を同時に受信することが可能なため, LED信号機の各LEDに別々の信号を載せて, 復調することが出来る. しかし, その反面, カメラの応答速度の遅さにより通信速度が制限される. また, 受信画像の劣化による, 通信品質の減少も生じやすい.

本稿では, 画像の空間解像度が高く, 画像処理によって通信品質の向上が期待できることから, 受信機にカメラを用いた可視光通信に着目する. まず第2章で, Binaryの情報を各LEDの点灯と消灯で表すOn-Off-Keying (OOK)を用いたシンプルな可視光通信システムを述べ, 送信機でのLEDの輝度制御や, カメラでの輝度抽出の画像処理について説明する. 次に, 第3章で受信機にカメラを用いることで生じる特殊なチャンネル特性を述べ, そのチャンネル特性に着目して提案された階層的符号化⁽⁹⁾について述べる. 最後に, OOKや階層的符号化を用いた可視光通信の画像処理の検討を行う.

2. 路車間可視光通信システム

図1に想定する路車間可視光通信システムモデルを示す. 本稿では, 送信機として $N \times N$ 個のLEDをアレイ状に配置したLEDアレイ送信機, 受信機として車載カメラを用いている.

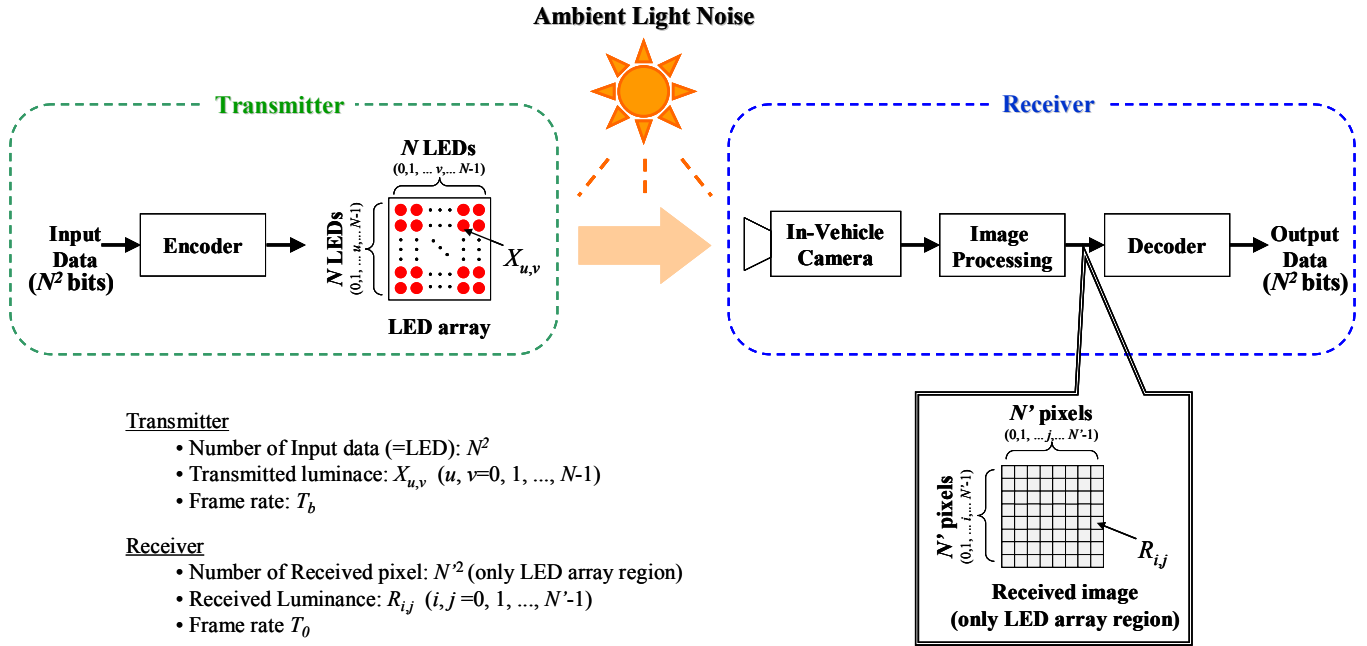


図 1: LED アレイと車載カメラを用いた路車間可視光通信システム。

Fig. 1: Road-to-vehicle visible light communication system using LED array and in-vehicle camera.

〈2・1〉 LEDアレイ送信機

送信機は $N \times N$ 個の LED アレイと符号化器で構成される。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、 $u, v=0 \sim N-1$ である。まず初めに、符号化器で N^2 bits の送信データの符号化と画像化を行い、LED アレイの各 LED と対応させる。送信データが Binary で、OOK で伝送を行う場合、情報“1”は LED を点灯(ON)、情報“0”は LED を消灯(OFF)で表す。この時、フレーム間隔(ビット間隔)を T_b とすると、各 LED は T_b 間点灯、もしくは消灯し続ける。この時、LED 1 つあたりのビットレート $R_b = 1/T_b$ [bps] となる。 N^2 個の LED 各々が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 $N^2 R_b$ [bps] となる。

〈2・2〉 受信機

受信機は車載カメラ、画像処理部、復号化器から成る。送信信号は空間を通過して受信機の手車載カメラで受信される。カメラは CMOS イメージセンサーを持ち、画像として出力する。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反映する。本稿では、受信画像に写された LED アレイの範囲内での、位置 (i, j) の画素値を $R_{i,j}$ とする。ここで、 i と j の取り得る範囲は $(0 \sim N' - 1)$ で、 N' は受信画像に写る LED アレイの 1 辺のピクセル数を表している。通信距離が近い場合、LED を表示させるために必要なピクセルサイズを十分に得られるが、距離が遠ざかるに従い、そのピ

クセルサイズは減少し、 N' が N より小さくなると、1 つのピクセルで LED を表示させることが出来なくなる。ここで、 N と N' の比を、式(1)のように γ で定義する。

$$\gamma = \frac{N'}{N} \quad (1)$$

$\gamma=1.0$ の時、送信機の LED の個数と受信画像が写した LED アレイのピクセル数が等しくなる。つまり、1 ピクセルが、1 個の LED を写すことが出来る限界を示すことになる。

また、受信機のフレーム間隔を T_0 とすると、送信信号と受信信号の関係は、図 2 のようになる。図 2(a) は送信信号の LED 点灯間隔、図 2(b) は受信側のカメラのフレーム間隔、図 2(c) は図 2(b) から決まる画素値を画像として示したものである。ここでは予め、 γ が十分に大きく、受信画像内で LED の位置が検出できていると仮定している。また、この例では、送信側の LED 点灯開始位置と受信側のカメラのフレーム開始位置は一致していないが、LED のビット間隔を $T_b=2T_0$ としている。つまり、位相は同期していないが、実際の LED の輝度の変化に対し、カメラは 2 フレーム撮影するので、偶数フレームと奇数フレームを比較し、適切な画像を選ぶことでサンプリングが可能となる。また、 γ が 1.0 よりも小さい場合、LED の数に対して、受信画像のピクセル数が少ないため、OOK では判断が困難となる。

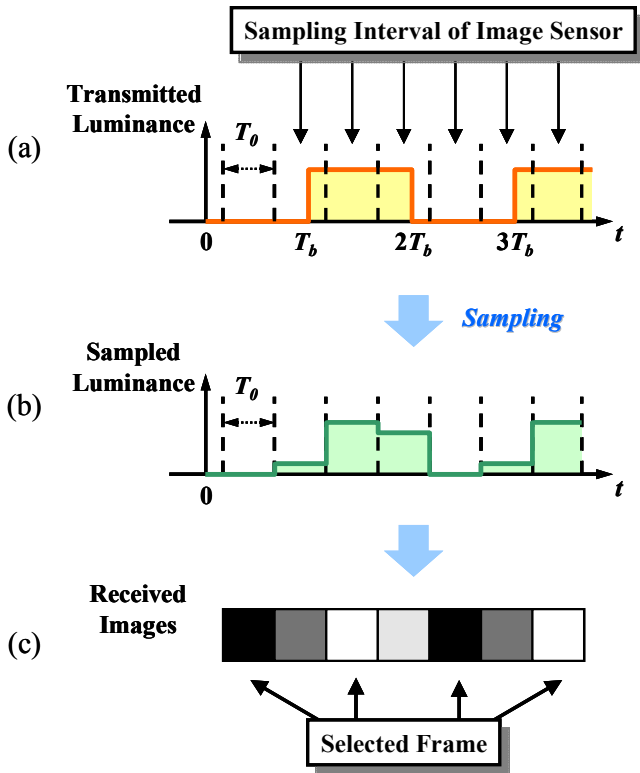


図 2: 輝度抽出のための画像サンプリング。

Fig. 2: Image sampling to retrieve the LED luminance.

〈2.3〉 数値例

上記のシステムを用いた実験による数値例を示す。表 1 は実験諸元である。実験では、焦点距離が 35mm のレンズを用いて、画角の広い画像を撮影している。これは、車両が信号機に接近した際に、画面から LED アレイ部分がはずれないように想定しているためである。また、本実験では車両は走行せず、静止環境で行い、通信距離 20m から 60m を 10m 間隔に測定している。

図 3(a)に通信距離とビット誤り率(BER)を示す。この図から明らかなように、通信距離が 20m($\gamma=2.06$)では誤りは発生せず、30m($\gamma=1.38$)以上から誤りが発生し始めるのが確認できる。これは、通信距離が遠くなるに従って、受信画像の LED アレイ部分にあたるピクセル数が減少し、さらに、フォーカスずれにより、隣接する LED が重なり合ってしまうため、個々の LED を区別することが困難となるからである。これを裏付けるデータとして、図 3(b)に通信距離と受信画像に写る LED サイズの関係を示す。この図において、 γ が 1.0 付近になる通信距離 40m($\gamma=1.06$)に注目する。つまり、1 ピクセルが 1 個の LED を写しているにも関わらず、誤りが生じている。これらの結果から、OOK を可視光通信に用いる場合、隣接する LED の光が影響しないように、送信機の LED 総数よりも十分に大きなピクセルサイズに LED アレイが写る必要がある。

この通信距離に依存した画像の劣化を、受信画像における空間周波数の高周波成分の減衰と捉えることもできる。

表 1: 実験諸元(OOK)

Table 1: Set up parameters (OOK)

LEDの半値角	約26度
データレート	128kbps
カメラの撮影速度	1000fps
レンズの焦点距離	35mm
レンズの絞り	11
レンズのピント	無限遠
撮影画像	モノクロ
通信距離	20m~60m

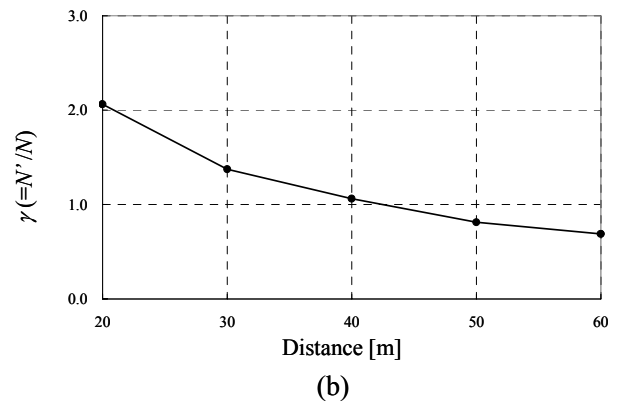
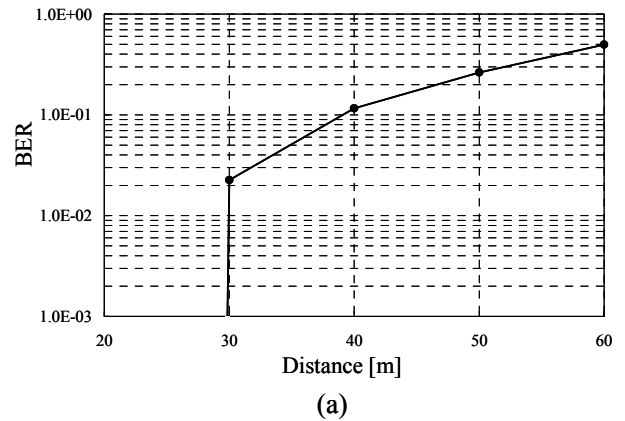


図 3: 実験結果: (a)BER 特性, (b)通信距離と受信画像に写る LED サイズの関係。

Fig. 3: Experimental results: (a)BER vs Distance, (b)Size of LED vs Distance.

これは言い換えると、低周波成分の劣化は比較的少なく、通信距離が遠くても画像の低周波成分はカメラに届くことを意味する。このような、カメラを用いることで生じる特殊なチャネル特性に着目した手法が、増田らによって提案された階層的符号化である⁹⁾。階層的符号化はデータを優先度に分け、優先度の高いデータを低周波成分に、優先度の低いデータを高周波成分に割り当てることで、通信距離が遠いときでも、低周波成分は取り出せるので、優先度の高

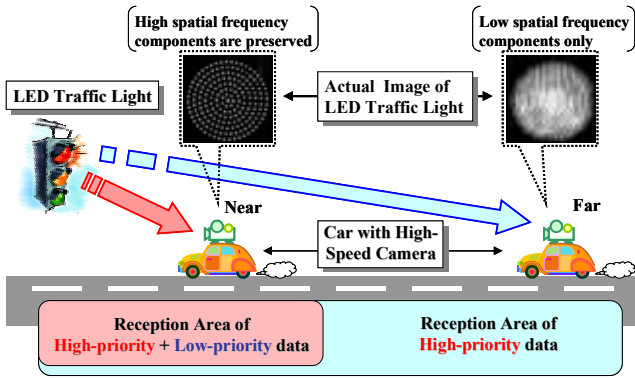


図 4: 階層的符号化を用いた路車間可視光通信システム。

Fig. 4: Road-to-vehicle visible light communication system using Hierarchical coding.

いデータを復号することができる。そして、送受信間が近付くにつれ、詳細なデータとして高周波成分のデータの受信が可能となる。階層的符号化の原理について、次章で述べる。

3. 階層的符号化

図 4 に階層的符号化を用いた可視光通信システムを示す。階層的符号化は、2 章で述べたとおり、情報に優先度をつけ、優先度が高い情報は画像の空間周波数の低周波成分に、優先度の低い情報は、高周波成分にそれぞれ割り当てる符号化である。これにより、重要な交通情報は通信距離が遠くても受信ができ、車両が信号機に近づくにつれて、信号機付近の詳細な交通情報を得ることができるということが可能となる。

階層的符号化を実現するためには、画像の持つ空間周波数を分離させなければならない。本稿では、周波数成分の分離を高速ハルウェーブレット変換(FHWT)で行う。FHWT を用いた階層的符号化を図 5 に示す。

〈3・1〉符号化

図 5(a)に符号化の流れを示す。階層的符号化は、優先度の割り当てから始まる。まず、 N^2 bits の入力データを Mapper で分割し、分割したデータに優先度を与える。この時、優先度ごとにローカルなラスタースキャンを行うことで、優先度ごとの画像ができる。ウェーブレットの基底に Haar を用いた場合、4 つの周波数成分に分離させることができるので、低周波成分のみ(D_{LL})の領域に優先度の高いデータを、高周波成分のみ(D_{HH})の領域に優先度の低いデータを割り当てる。残った領域(D_{LH} と D_{HL})には中間の優先度のデータを割り当てる。つまり、Haar を用いた場合、入力データを 3 段階の優先度に分けて送信することができる。入力データを優先度ごとに行列系に配置した式を、式(2)に示す。

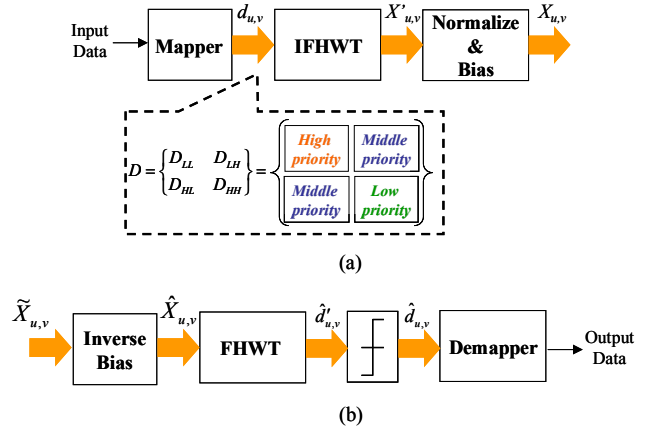


図 5: 階層的符号化: (a)符号化, (b)復号化。

Fig. 5: Block diagram of hierarchical coding scheme: (a) Encoder, (b) Decoder.

$$D = \begin{Bmatrix} D_{LL} & D_{LH} \\ D_{HL} & D_{HH} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d_{0,0} & \cdots & d_{0,N-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N-1,0} & \cdots & d_{N-1,N-1} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $d_{u,v} \in \{-1, 1\}$ である。この式(2)が Mapper の出力となり、式(2)に高速ハルウェーブレット逆変換(IFHWT)を施す。ここで、 u 行 v 列の位置のIFHWTの出力を $X'_{u,v}$ と定義する。ここで、 $X'_{u,v}$ の取り得る値の範囲は、 $(-2 \leq X'_{u,v} \leq 2)$ であり、これを 0 から 1 の範囲にするため、バイアスを加えた後に正規化し、その出力を $X_{u,v}$ と定義する。正規化後、 $X_{u,v}$ の取り得る値は $\{0, 1/4, 1/2, 3/4, 1\}$ の 5 階調となり、各LEDは割り当てられた値の輝度を点灯する。ここで、OOKと同様に、LED点灯のフレーム間隔を T_b 、受信側のカメラのフレーム間隔 $T_r = T_b/2$ とすると、5 階調の輝度は図 6 のように表すことができる。図 6 が示すように、OOKよりも 1 ビットの情報を送信するのに必要なフレーム間隔は長くなり、この場合、階層的符号化のデータレートはOOKの 1/4 になる。

〈3・2〉復号化

図 5(b)に復号化の流れを示す。受信画像が写したLEDアレイの範囲内での、 i 行 j 列の位置の輝度値 $R_{i,j}$ から、送信側のLED (u, v)に相当する輝度を算出する。算出された u 行 v 列の輝度を $\tilde{X}_{u,v}$ として定義し、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。

$$\hat{X}_{u,v} = \tilde{X}_{u,v} - b \quad (3)$$

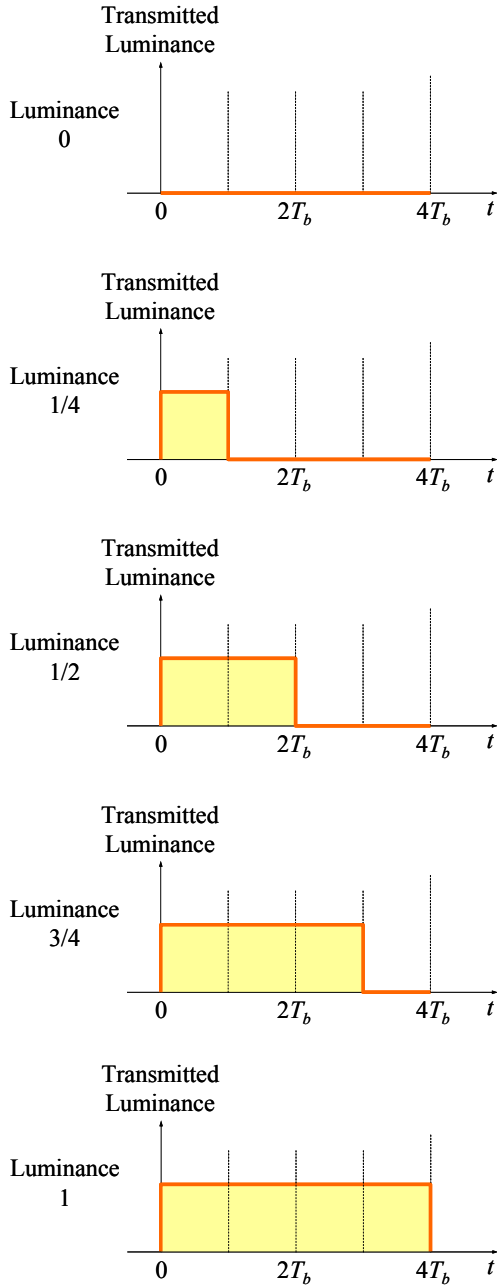


図 6: 階層的符号化の輝度の変化.

Fig. 6: Change of LED luminance of hierarchical coding.

ここで、バイアス値 b は $\tilde{X}_{u,v}$ の平均値から算出される。

次に、逆バイアスを加えたデータ行列にハルウェーブレット変換を行う。この操作により、受信輝度値から成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。

〈3.3〉 数値例

階層的符号化の有効性を実験より確認する。表 2 は実験より得られた通信距離と BER の関係を示す。この実験のパラメータは 2 章での数値例で示した表 1 とほぼ同じである。唯一異なる点は、データレートが階層的符号化の場合、OOK

表 2: 階層的符号化の BER.

Table 2: BER performance of hierarchical coding.

Distance	Hierarchical Transmission using FHWT			BER of OOK
	BER of Each Priority			
	High	Middle	Low	
20m	0.0	0.0	0.0	0.0
30m	1.88×10^{-3}	2.03×10^{-2}	2.34×10^{-2}	2.25×10^{-2}
40m	6.94×10^{-2}	1.27×10^{-1}	1.68×10^{-1}	1.16×10^{-1}
50m	5.91×10^{-2}	1.44×10^{-1}	2.04×10^{-1}	2.63×10^{-1}
60m	9.13×10^{-2}	2.82×10^{-1}	3.76×10^{-1}	4.98×10^{-1}

の 1/4 になり、表 1 の場合、32kbps となる。また、表 2 には比較対象として、OOK 方式の BER も示す。2 章で述べたとおり、LED 光が隣接 LED に影響を及ぼさない 20m では、符号化に依存せずエラーフリーとなり、30m 以上から誤りが発生し始めるのが確認できる。この表から明らかのように、階層的符号化の優先度の高いデータの BER は優先度の低いデータや OOK と比較して優れていることが分かる。ゆえに、階層的符号化を用いることで、画像の空間周波数の低周波成分に割り当てた優先度の高いデータほど離れた距離から受信できることが確認された。

本稿での数値例では、誤り訂正を施していないが、優先度の高いデータのみ、誤り訂正符号を施す用いることで、通信距離 60m ($\gamma=0.69$) で、優先度の高いデータのみエラーフリーで受信可能であることもすでに確認されている⁽¹⁴⁾。つまり、OOK では送信が困難な環境でも、階層的符号化と誤り訂正を用いれば、優先度の高い情報は通信距離が遠くてもエラーフリーで情報伝送可能であるので、階層的符号化は可視光通信システムに非常に有効であるといえる。

4. 今後の検討事項

3 章で述べたとおり、カメラを用いた可視光通信システムにおいて、階層的符号化は非常に有効である。しかしながら、実システムとして用いる場合には様々な検討課題が残っている。例えば、実環境では車両は走行しているため、走行時に LED 信号機のトラッキングといった動作の検討もその 1 つである。静止環境とは異なり、走行時には車の振動や、走行距離に応じて個々の LED を写す受信画像のピクセル数が動的に変化する。ゆえに、走行時の輝度抽出のロバスト性の向上の検討が必要である。

また、数値例では、1000fps の高フレームレートのカメラを用いているが、階層的符号化は低フレームレートでも実現可能である。しかし、一般的な 30fps のようなカメラよりも、1000fps のカメラは太陽光などの影響を受けにくいいため、低フレームレートのカメラを用いた場合、太陽光などの影響が非常に強くなる可能性があり、背景光に関する検討を行う必要があると考える。

5. むすび

本稿では、送信機に LED 信号機を、受信機に車載カメラを用いた可視光通信に着目し、交通信号における画像処理について述べた。また、受信機にカメラを用いることで生じる特殊なチャネル特性に着目して提案された階層的符号化について述べ、画像処理による改善策の検討を行った。

参考文献

- (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. Consumer Electronics, 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. Industry Application, Vol. 37, No. 2, pp. 534-540, Mar./Apr. 2003.
- (4) 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.
- (5) H.S. Liu and G. Pang: “Positioning beacon system using digital camera and LEDs”, IEEE Trans. Vehicular Technology, 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, vol.CS2004-18, pp.7-12, May 2004.
- (7) J.M. Kahn and J.R. Barry: “Wireless infrared communications”, Proc. of the 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, 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”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J90A, no. 9, pp. 696-704, Sep. 2007.
- (10) S. Arai, S. Mase, T. Yamazato, T. Endo, T. Fujii, M. Tanimoto, K. 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.
- (11) S. Iwasaki, T. Yendo, T. Fujii, M. Tanimoto and Y. Kimura: “High-Speed Image Processing System for Road-to-Vehicle Visible Light Communication”, Proc. of International Workshop on Advanced Image Technology, Jan. 2008.
- (12) 荒井伸太郎, 間瀬祥平, 山里敬也, 圓道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸, 木村好克: “LED アレイと高速度カメラを用いた階層的符号化の路車間可視光通信実験”, 電子情報通信学会 ITS 研究会技術報告, vol. 107, no. 486, ITS2007-61, pp. 151-156, Feb. 2008.
- (13) 山里敬也, 荒井伸太郎, 間瀬祥平, 圓道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸, 木村好克: “【特別講演】LED アレイと高速度カメラを用いた路車間可視光通信,” 電子情報通信学会, SIP 研究会技術報告, vol. 108, no. 163, SIP2008-76, pp. 47-52, Jul. 2008.
- (14) 間瀬祥平, 荒井伸太郎, 山里敬也, 圓道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸, 木村好克: “階層的符号化を用いた路車間可視光通信のロバスト性向上”, 電子情報通信学会 ITS 研究会技術報告, vol. 108, no. 171, ITS2008-11, pp. 19-24, Jul. 2008.
- (15) 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.