

LED アレーと高速度カメラを用いた路車間可視光通信における遠距離データと近距離データの重畳符号化

西本早耶香^{†a)} 山里 敬也[†] 岡田 啓[†] 藤井 俊彰[†]
圓道 知博^{††} 荒井伸太郎^{†††}

Overlay Coding of Long Range Data and Short Range Data for Road-to-Vehicle Visible Light Communication Using LED Array and High-Speed Camera

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

あらまし 本論文では送信機に LED アレー、受信機に高速度カメラを用いた可視光通信を考える。送受信機間の距離が遠くなるほど受信画像の解像度が劣化する問題に対して、画像の空間周波数の高周波成分と低周波成分にそれぞれ異なるデータを割り当てる階層的符号化を用いている。これにより送受信機間の距離が遠い場合にも画像の空間周波数の低周波成分に割り当てたデータの情報を取得することを可能にしている。その際に従来用いていたウェーブレット変換では、データを割り当てる LED の数や配置に制限があるため信号機などの送信機に常に適応しているわけではなかった。この制限を解決するために、「重畳符号化」という符号化方式を提案する。提案方式では直交変換を用いず、複数の LED に同一のデータを割り当て、それを一つの LED とみなす。このときの同一のデータを割り当てる LED の数を変化させることで各空間周波数成分に情報を割り当てる。異なる二つのデータを単に“重畳”させることによって符号化を行うため、データを割り当てる LED の配置や数に制限のない方式が実現できる。

キーワード LED, 可視光通信, 路車間通信, 階層的符号化

1. ま え が き

LED の普及とともに LED を用いた可視光通信が注目され、様々な研究が行われている [1]~[3]。その応用の一つとして、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 [4]~[7]。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節約することができる。

LED 信号機を用いた可視光通信についての研究は

いくつか行われており、受信機としてフォトダイオードを用いる方式 [4], [5] と、受信機にカメラを用いる方式 [6], [7] に分けられる。受信機にフォトダイオードを用いる場合では、フォトダイオードの高速応答性から高速通信が期待できる一方、屋外で十分な SNR を確保するためには背景光雑音を除去するために受信機の視野角を狭くする必要があり、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 [8]。受信機にカメラを用いる場合では、カメラは視野角を広く取ることができ、受信機を送信機へ向ける機械的操作の必要がない。また、LED 信号機だけでなくブレーキランプ等の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。一方でカメラの応答速度の遅さにより通信速度が制限されるが、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、撮影速度を上げなくても通信速度を上げられる。以上よりカメラを用いた場合の方がフォトダイオードを用いた場合と比べて優れている。そのため、本研究

[†]名古屋大学, 名古屋市

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

^{††}長岡技術科学大学, 長岡市

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

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

では送信機に LED アレー、受信機に高速カメラを用いた可視光通信を考える。

図 1 に本研究で検討する路車間可視光通信の概念図を示す。本論文では個々の LED からそれぞれ個別の情報を伝送する。この場合、図 1 に示すように、カメラ（受信機）が LED アレー（送信機）に近い位置にある状況では LED を個別に識別することが可能であり、LED から複数の情報を取得することができる。ところが、カメラが LED アレーから遠い位置にある状況では、受信画像がぼやけた画像となり、各 LED を個別に識別することが難しくなる。これは各 LED に割り当てられるピクセル数の減少により、隣接する LED が干渉することによって起こるもので、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。このとき、各 LED を個別に判定することができず、一様に誤りが生じる。そこで現在、階層的符号化が用いられている [9]。

階層的符号化は、送受信機間の距離が遠くなるほど失われやすい画像の空間周波数の高周波成分と、送受信機間の距離が遠くても多く残る空間周波数の低周波成分に、それぞれ異なるデータを割り当てる符号化である。これにより、送受信機間の距離が遠い場合でも画像の空間周波数の低周波成分に割り当てたデータは取得が可能となる。そのため、画像の空間周波数の低周波成分に割り当てる遠距離データ (long range data) として遠距離まで通信を行うデータを、画像の空間周波数の高周波成分に割り当てる近距離データ (short range data) として近距離において通信を行うデータを用いる。

これまで各データを空間周波数へ割り当てる方法として、二次元高速ハルウェーブレット方式が用いられてきた [9]。ところが、この従来手法では、データ

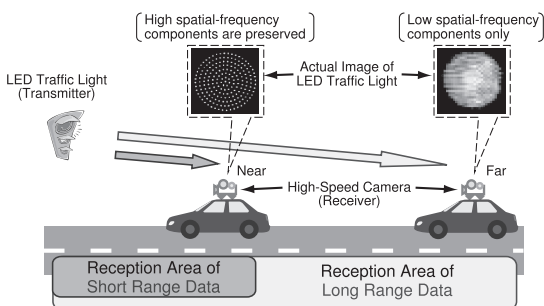


図 1 路車間可視光通信
Fig. 1 Image of visible light communication.

を割り当てる LED は正方形行列配置で数が 4 の累乗といった制限があるため、送信機が円形の LED 信号機の場合などには適応できない。

これらの制限を解決するために、送信機の形状に左右されない、データを割り当てる LED の配置や数に制限のない符号化方式として「重畳符号化」を提案する。提案方式では直交変換を用いず、遠距離データと近距離データを単純に“重畳”させることによって符号化を行うため、データを割り当てる LED の配置や数に制限のない方式が実現できる。一方でこの非直交な符号化方式では、遠距離データが近距離データへ、反対に近距離データが遠距離データへ、互いに干渉し影響を及ぼし合う。よって復号化を行う際にはこの影響を取り除く工夫が必要となる。そこで提案方式では先に遠距離データを復調し、それを受信信号から減算する干渉除去を行うことで、干渉の影響を低減する。

本論文は以下のように構成されている。2. では送信機、受信機のモデルについて述べる。3. では従来方式である二次元高速ハルウェーブレット変換を用いた階層的符号化の利点と欠点について述べる。4. で「重畳符号化」という新しい符号化方式を導入し、その符号化・復号化の方法と利点と欠点について述べる。5. で実験により提案方式をビット誤り率 (BER) とスループット特性を用いて評価し、6. はむすびである。

2. システムモデル

本論文で想定するシステムモデルを図 2 に示す。まず送信機、受信機のモデルについて説明する。

2.1 送信機

送信機は平面上に配置された個別に点滅が可能な複数の LED と符号化器からなる。ここでは 5. で述べ

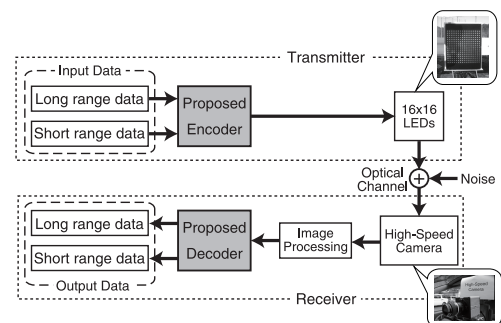


図 2 システムモデル
Fig. 2 System model.

る実験で用いるシステムを例に説明する．送信機は 16×16 の正方形行列状に 256 個の LED が配置されている．また，隣接する LED 間の距離は 20 mm である．これは日本で一般的に使用されている LED 信号機の LED 間距離と等しい．入力データとして，遠距離まで通信を行いたい情報をもつ遠距離データと近距離まで通信を行いたい情報をもつ近距離データの二つのデータを入力する．遠距離データを空間周波数の低周波成分に，近距離データを空間周波数の高周波成分に割り当てるように符号化を行う．本論文で提案する部分はこの符号化の部分であり，詳しくは **4.2.1** で説明する．

情報の送信は LED の輝度に情報を載せることで行う．送信機の LED は 16×16 の正方形行列状に配置されており，以下， u 行 v 列の位置に配置されている LED を $LED_{u,v}$ ($u, v = 1, 2, \dots, 16$) と表す．送信機の個々の LED は ON/OFF によって最大点灯区間 T_s の非負の方形パルスが発生することができる． T_s はビット区間を示す．区間 T_s 内でのパルス幅を操作することによって LED の輝度値を変化させる．時間 t における LED アレーの u 行 v 列の LED の輝度は以下のように表せる．

$$X_{u,v}(t) = \sum_i x_{u,v,i} \cdot A \cdot g(t - (i - 1)T_s) \quad (1)$$

ここで i 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． $x_{u,v,i}$ は LED の輝度を定める係数であり， $0 \leq x_{u,v,i} \leq 1$ である． A は LED 点灯時の輝度である．例えば，情報変調に On-Off Keying (OOK) を用いる場合， $x_{u,v,i} = \{0, 1\}$ となり， $g(t)$ は以下に示すような方形パルスを表す関数である．

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

また，4 段階の輝度で情報を表した場合の例を図 3 に示す．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くる光量を積分するというカメラの性質を利用して，一つの輝度値を表現しているビット区間 T_s の間カメラのシャッターが開いている状態にし，その区間内で LED の点灯時間の長さを 4 段階に変化させることによって 4 段階の輝度値を受信する．このとき，LED 点灯周期を $T_s/3$ に設定すれば，4 段階の輝度を 3 回の点灯で表現できる．

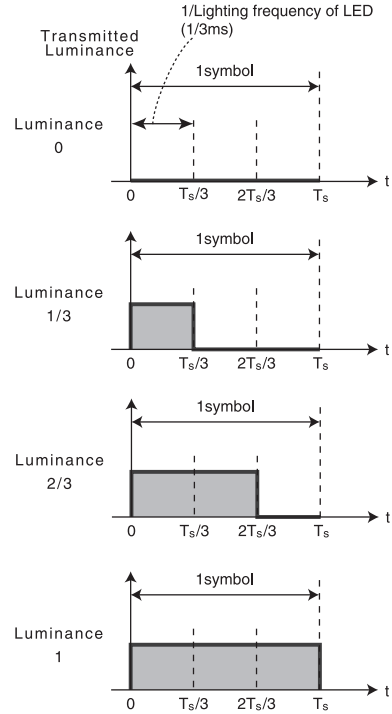


図 3 輝度：点灯パターン
Fig. 3 Luminance: Pattern of lighting.

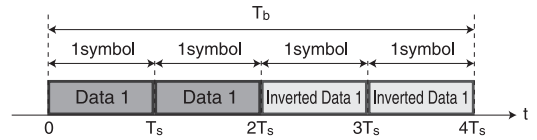


図 4 実際の送信データフレーム
Fig. 4 Actual transmission data frame of one data.

例えば **5**. で述べる実験で用いるシステムでは，LED 点灯周波数が 3 kHz であるため，LED の点灯周期は 1/3 ms である．3 回の点灯で輝度を表現するため，一つの輝度値を表現するためには，3 回 $\times 1/3 \text{ ms} = 1 \text{ ms}$ の時間が必要となる．このときカメラの撮影速度を 1000 fps に設定すると，画像 1 枚当り 1 ms であるため，一つ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．実際の送信データフレームを図 4 に示す．サンプリング定理を満たすように，同じデータを 2 度送信している．更に，主に LED アレーの検出とトラッキングのために，データフレームの後半では反転符号を用いている．これらの詳細は文献 [10] と [11] で述べられている．したがって，送信機の LED アレー上にある 256 個の LED そ

それぞれに 1 bit の異なるデータを載せた場合のデータレートは $256/4T_s = 256/T_b = 256R_b$ である。ここで R_b は各 LED に 1 bit の異なるデータを載せた場合の LED 一つ当りのビットレートである。

2.2 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。各 LED より送信された信号は光空間チャ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、その解像度は 128×128 pixel である。送信信号は CMOS イメージセンサによって光量に応じた電気信号に変換され、画像として出力される。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。画像処理を行い、受信画像から送信機の個々の LED の位置と輝度値を得る。 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_s 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。

$$f(t) = \sum_k g_{sh}(t - (k-1)T_s) \quad (4)$$

ここで、 $k = 1, 2, \dots$ は露光区間が何番目かを表す。ただし、送信機と受信機の時間同期が完全である場合、 i 番目の LED 全体の表示パターンは i 番目の露光区間で露光されるため、 i と k は一致する。 $g_{sh}(t)$ は以下のようなパルス関数である。

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

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。

$$r_{u,v,k} = c \int_{(k-1)T_s}^{kT_s} y_{u,v}(t) \cdot f(t) dt \quad (6)$$

ここで c は光電変換効率を表す定数である。このピクセル出力を用いて、受信画像から送信機の個々の LED の輝度値を得る。

得られた輝度値をもとに復号を行うことで、出力データを取得する。復号については 4.2.2 で詳しく述べる。

3. 二次元高速ハルウェーブレット変換を用いた階層的符号化の利点と欠点

提案方式を説明する前に、従来方式である二次元高速ハルウェーブレット変換について紹介する。符号化、復号化の詳細は文献 [9] で述べられている。ここでは二次元高速ハルウェーブレット変換を用いた場合の利点と欠点を述べる。

利点としては、二次元高速ハルウェーブレット変換は直交変換であるため、遠距離データと近距離データが互いに影響を及ぼし合うことがなく独立に復号が可能となるという点が挙げられる。

一方で欠点としては、各データの基底を直交にするために、LED の配置が正方形行列型、数が 4 の累乗に制限がされるという点が挙げられる。ところが、実際に送信機として用いる LED 信号機等に用いられる LED は、必ずしも正方形行列型の配置ではなく、LED の数も 4 の累乗とは限らない。実際に現在日本で用いられている LED 信号機には、192 個の LED が同心円状に円形に配置されたものなどがある。また、各データが等しい伝送速度である場合しか適用できない。

本論文では送信機の形状が異なる場合にも階層的符号化を実現するような設計の自由度が高い符号化方式として、重畳符号化を提案する。

4. 重畳符号化

この章では、提案方式である重畳符号化を説明する。提案方式を説明する前に、エラーフリー通信領域と受信画像中の隣接 LED 間のピクセル距離の関係から述べる。この隣接 LED 間のピクセル距離は各 LED を識別するためのガイドラインとなる。

4.1 隣接 LED 間のピクセル距離

受信画像における二つの隣接する LED 間のピクセル数をピクセル距離と定義する。また、 2×2 のような、複数の LED に同一のデータを割り当て、それを一つの LED とみなしたときは、隣接する一つとみなされた LED のままとりの中心間のピクセル数をピクセル距離とする。

図 5 は実測によって求めた隣接 LED 間のピクセル距離と送受信機間距離の関係を表す。LED 間距離は 20 mm であり、高速度カメラの解像度は 128×128 pixel であり、焦点距離 35 mm のレンズを用いた。その他の実験諸元の詳細は 5.1 で述べる。図 5 において、20 mm は各 LED に異なるデータを

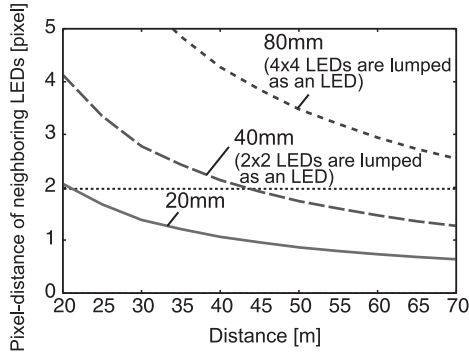


図 5 隣接 LED 間のピクセル距離と送受信機間距離の関係 (LED 間距離は 20 mm)

Fig. 5 Pixel-distance of neighboring LEDs versus transmitter-receiver distance, where the LED spacing is 20 mm.

割り当てた場合、40 mm は 2×2 個の LED に同一のデータを割り当てそれを一つの LED とみなした場合、80 mm は 4×4 個の LED に同一のデータを割り当てそれを一つの LED とみなした場合におけるピクセル距離の送受信機間距離との関係を表す。二つの隣接する LED を個別に識別するためには、隣接 LED 間のピクセル距離は少なくとも 2 pixel 必要である。この図から、各 LED に異なるデータを割り当てたとき、ピクセル距離が 2 pixel となるのは送受信機間距離が 20 m 以下である。したがってエラーフリーの伝送を達成できるのは送受信機間距離が 20 m 以下のときであるといえる。また、 2×2 個の LED に同一のデータを割り当てそれを一つの LED とみなしたときは、ピクセル距離が 2 pixel となる送受信機間距離が 45 m まで延長する。

この議論をもとに、重畳符号化を提案する。

4.2 提案する重畳符号化

4.2.1 符号化

符号化方式を図 6 に示す。提案方式ではデータを遠距離データと近距離データの二つに分けて送信する。遠距離データにおける、同一のデータを割り当てる LED の数を設定する。この LED の数は、4.1 での議論に基づき、要求するエラーフリー通信領域において隣接 LED 間のピクセル距離が 2 pixel 以上になるように設定する。

遠距離データにおいて同一のデータを割り当てる LED 領域 (遠距離データの LED 領域) を D_m^L 、近距離データにおいて同一のデータを割り当てる LED 領域 (近距離データの LED 領域) を D_n^S で表し、それぞ

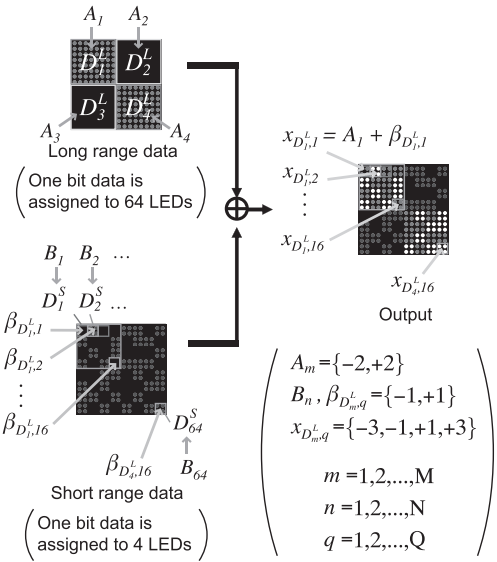


図 6 符号化方式

Fig. 6 Illustrated figure of the coding process.

れの領域数を M と N とする ($m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$). D_m^L の領域内の各 LED には $\{-2, +2\}$ のデータが、 D_n^S の領域内の各 LED には $\{-1, +1\}$ のデータが割り当てられる。例えば $M = 1$ の場合は、 D_1^L の領域内の LED 数は $256 (= 16 \times 16)$ 個となり、その LED 全てに、同一の遠距離データが与えられる。このとき、同時に一つデータが送信される。また、 $M = 4$ とした場合、 D_1^L の領域内の LED 数は $64 (= 8 \times 8)$ 個となり、同時に四つのデータが送信される。LED 一つ当りのビットレートを R_b とすると、遠距離データのデータレートは MR_b 、近距離データのデータレートは NR_b と表現できる。

k 番目のシンボルにおける u 行 v 列の $LED_{u,v}$ に着目する。遠距離データを $A_m[k]$ 、 $LED_{u,v}$ に割り当てられる遠距離データ信号を $a_{u,v}[k]$ とする。遠距離データ $A_m[k]$ を遠距離データの領域 D_m^L に割り当てる。同様に、近距離データを $B_n[k]$ 、 $LED_{u,v}$ に割り当てられる近距離データ信号を $b_{u,v}[k]$ とする。近距離データ $B_n[k]$ を近距離データの領域 D_n^S に割り当てる。つまり、データの割り当ては以下の式で表される。

$$\begin{cases} a_{u,v}[k] = A_m[k] & (LED_{u,v} \in D_m^L) \\ b_{u,v}[k] = B_n[k] & (LED_{u,v} \in D_n^S) \end{cases} \quad (7)$$

k 番目のシンボルにおける遠距離データの領域 D_m^L について考える。この領域に含まれる近距離データの

領域 D_n^S の数を Q とする. D_m^L に含まれる近距離データを $\beta_{D_m^L, q}[k] (q = 1, 2, \dots, Q)$ と置き換える. 遠距離データと近距離データを重畳させると, 各 LED の出力信号 $x_{D_m^L, q}[k]$ を得られ, 以下の式で表される.

$$x_{D_m^L, q}[k] = A_m[k] + \beta_{D_m^L, q}[k] \quad (8)$$

本論文では, 遠距離データには $\{-2, +2\}$, 近距離データには $\{-1, +1\}$ の 1 bit 情報を割り当てるため, それらを足し合わせた, すなわち“重畳”させた情報は, $\{-3, -1, +1, +3\}$ の 4 段階の値で表現することができ, 式 (1) における $x_{u, v, k}$ に対応する LED の輝度を定める係数 $x'_{D_m^L, q}[k]$ は

$$x'_{D_m^L, q}[k] = \frac{x_{D_m^L, q}[k] + 3}{6} \quad (9)$$

となり, $\{0, 1/3, 2/3, 1\}$ の 4 値をとる. したがって図 3 に示すように, LED の点灯時間により 4 値の輝度値を表現 (パルス幅変調) し, 式 (1) と同様にして, k 番目のシンボルにおける遠距離データの領域 D_m^L 内の q 番目の近距離データの領域 D_n^S 内の LED の輝度は以下のように表せる.

$$X_{D_m^L, q}(t) = \sum_k x'_{D_m^L, q}[k] \cdot A \cdot g(t - (k-1)T_s) \quad (10)$$

遠距離データと近距離データを重畳したデータレートは $(M+N)R_b$ である.

4.2.2 復号化

送信信号は光空間チャンネルを通して高速度カメラ (受信機) によって受信される. 受信機は受信信号を CMOS イメージセンサで光量に応じた電気信号に変換し, 画像を出力する. 復号化を行う際には, このカメラで撮影した画像から受信輝度値をあらかじめ抽出する必要がある. k 番目のシンボルにおける遠距離データの領域 D_m^L 内の q 番目の近距離データの領域 D_n^S を考える. この領域 D_n^S 内の LED からの信号を受信したピクセルの輝度値 $Y_{D_m^L, q}[k]$ は式 (3)~(6) と同様にして

$$Y_{D_m^L, q}[k] = c \int_{(k-1)T_s}^{kT_s} y_{D_m^L, q}(t) \cdot f(t) dt \quad (11)$$

である. ただし $y_{D_m^L, q}(t)$ は

$$y_{D_m^L, q}(t) = h_{D_m^L, q} \cdot X_{D_m^L, q}(t) + n_{D_m^L, q}(t) \quad (12)$$

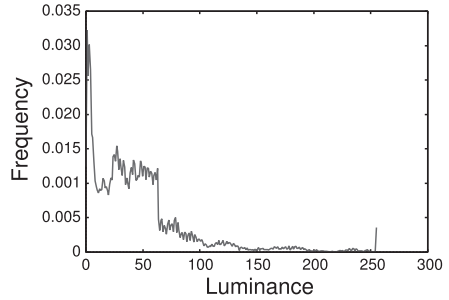


図 7 正規化前の受信輝度値分布 (通信距離 30 [m])
Fig. 7 Distribution of received luminance before normalization.

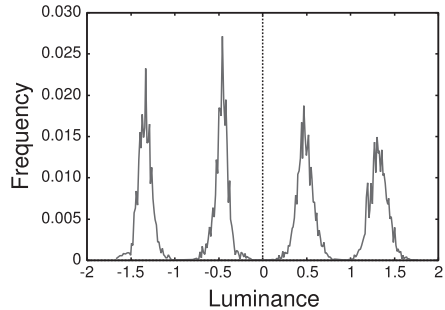


図 8 正規化後の受信輝度値分布 (通信距離 30 [m])
Fig. 8 Distribution of received luminance after normalization.

であり, c は光電変換効率を表す定数, $h_{D_m^L, q}$ はチャネル利得, $n_{D_m^L, q}(t)$ は背景光雑音である. 受信輝度値は送受信機間の距離や LED 同士の干渉により個々の LED ごとで異なる分布をもつため, 復号するとき異なる分布に対し同様の処理ができるよう, 輝度値を補正する必要がある. そのため, 各画像から輝度値 $Y_{D_m^L, q}[k]$ を取得したあと, 取得した輝度値 $Y_{D_m^L, q}[k]$ の平均 $E_{D_m^L, q}$ と分散 $V_{D_m^L, q}$ を用いて, 各 LED ごとに輝度値を正規化する [12] (式 (13)~(15) 参照). 実測によって求めた正規化前後の受信輝度値分布を図 7, 図 8 に示す. これらの図から, 正規化を行うことで輝度値分布は四つの山が確認できるようになり, 受信側で 4 段階の輝度が区別しやすくなり正しく復号できることが期待される. ただし, 雑音の影響を除去する効果はない.

$$E_{D_m^L, q} = \frac{\sum_{k=1}^K Y_{D_m^L, q}[k]}{K} \quad (13)$$

$$V_{D_m^L, q} = \frac{\sum_{k=1}^K (Y_{D_m^L, q}[k] - E_{D_m^L, q})^2}{K} \quad (14)$$

$$\hat{Y}_{D_m^L, q}[k] = \frac{Y_{D_m^L, q}[k] - E_{D_m^L, q}}{\sqrt{V_{D_m^L, q}}} \quad (15)$$

この正規化された輝度値 $\hat{Y}_{D_m^L, q}[k]$ を用いて復号化を行う。

k 番目のシンボルの遠距離データの領域 D_m^L における q 番目の近距離データの領域 D_n^S に着目する。まず、領域 D_m^L 内において、正規化された輝度値の平均をとる。これは以下の式で表される。

$$\frac{\sum_q \hat{Y}_{D_m^L, q}[k]}{Q} = \tilde{A}_m[k] + \frac{\sum_q \tilde{\beta}_{D_m^L, q}[k]}{Q} \quad (16)$$

式 (16) において、右辺第 1 項目は領域 D_m^L における遠距離データを表し、第 2 項目は領域 D_m^L における近距離データの平均を表す。遠距離データは以下の式で得られる。

$$\tilde{A}_m[k] = \frac{\sum_q \hat{Y}_{D_m^L, q}[k]}{Q} - \frac{\sum_q \tilde{\beta}_{D_m^L, q}[k]}{Q} \quad (17)$$

送信された近距離データが -1 若しくは $+1$ の値をとるのに対して遠距離データは -2 若しくは $+2$ の値をとるため、遠距離データに対して近距離データが与える影響は小さい。更に、送信された近距離データが -1 と $+1$ の二項分布で近似でき、遠距離データの領域 D_m^L に含まれる近距離データの領域 D_n^S の数 Q が十分大きいとき、式 (17) の右辺第 2 項は零に収束する。したがって、遠距離データは以下の式で近似できる。

$$\tilde{A}_m[k] \simeq \frac{\sum_q \hat{Y}_{D_m^L, q}[k]}{Q} \quad (18)$$

遠距離データ $\tilde{A}_m[k]$ をしきい値処理をし、正ならば $+2$ に、負ならば -2 と判定する。

送信データは遠距離データと近距離データが重畳されているので、近距離データは遠距離データを用いて再生することができる。

$$\tilde{\beta}_{D_m^L, q}[k] = \hat{Y}_{D_m^L, q}[k] - \tilde{A}'_m \quad (19)$$

このとき、遠距離データに対する近距離データの影響を更に小さくするために、正規化された輝度値 $\hat{Y}_{D_m^L, q}[k]$ から引き去る遠距離データの値 \tilde{A}'_m として、領域 D_m^L 内だけでなく、全送信シンボル中において $\tilde{A}_m[k]$ のしきい値判定結果が同じ領域内で、正規化された輝度値 $\hat{Y}_{D_m^L, q}[k]$ の平均をとる。全送信シンボル中の遠距離データが $+2$ と判定された近距離データの領域数を

$(M \cdot K)_+$ 、遠距離データが -2 と判定された近距離データの領域数を $(M \cdot K)_-$ とすると、正規化された輝度値 $\hat{Y}_{D_m^L, q}[k]$ から引き去る遠距離データの値 \tilde{A}'_m は以下の式で表される。

$$\tilde{A}'_m = \begin{cases} \frac{\sum_{m, k \in \{m, k | \tilde{A}_m[k] > 0\}} \sum_q \hat{Y}_{D_m^L, q}[k]}{(M \cdot K)_+ \cdot Q} & (\tilde{A}_m[k] > 0) \\ \frac{\sum_{m, k \in \{m, k | \tilde{A}_m[k] \leq 0\}} \sum_q \hat{Y}_{D_m^L, q}[k]}{(M \cdot K)_- \cdot Q} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (20)$$

近距離データ $\tilde{\beta}_{D_m^L, q}[k]$ に対してそれぞれしきい値処理をし、正ならば $+1$ に、負ならば -1 と判定する。

4.2.3 利点と欠点

重畳符号化を用いた場合の利点と欠点を述べる。

利点としては、従来方式で問題になっていた LED の配置と数に制限がないことが挙げられる。円形 LED アレーでも通信が可能であることを確認するために、5.において、装置の關係上送信機として 16×16 の正方向行列状に 256 個の LED が配置された LED アレー上で円形配置になるような 192 個の LED を用いて実験を行う。2. や 4. でも送信機として 16×16 の LED が正方向行列上に配置された LED アレーを用いていたが、例えば、実際に現在日本で用いられている LED 信号機と同様の 192 個の LED が同心円状に円形配置された場合でも適用できる。このときの遠距離データと近距離データを割り当てる領域の分割の仕方の一例を図 9 に示す。画像処理の段階で各 LED の位置の特定と、その輝度の抽出が可能であれば、4.2.2 の方法で復号が可能である。更に、各データが異なる伝送速度の場合にも適用できる。ただし、遠距離データを近距離データよりも遠くまで通信可能にする場合、近距離データ以上に遠距離データに同一のデータを割り当てる LED 領域を大きくする必要がある。同一のデータを割り当てる LED 領域の大きさが大きいほど伝送速度は遅くなるため、近距離データの伝送速度は遠距離データの伝送速度以上である必要がある。

一方で欠点としては、提案方式は式 (8) にあるように各データは単純に足し合わされている非直交な符号化方式であるため、各データが互いに干渉し影響を及ぼし合う。復号化を行う際には互いの影響を取り除く必要がある。遠距離データの領域 D_m^L に含まれる近距離データの領域 D_n^S の数 Q が十分大きいとき、式 (17) は式 (18) に近似でき、近距離データが遠距離データ

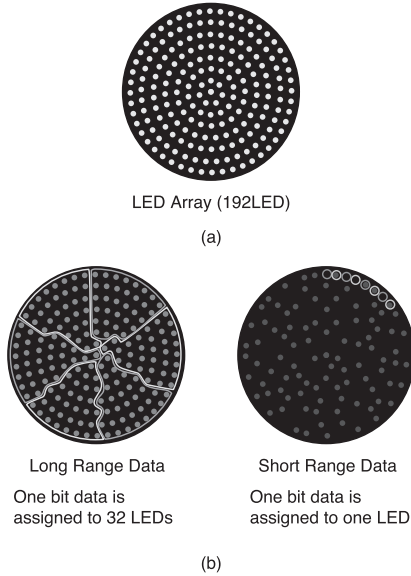


図 9 192 個の LED が同心円上に円形配置された場合の LED アレーの区分の一例 (a) LED アレー, (b) LED アレーの区分
 Fig. 9 An example of the division of LED array that 192 LED are spaced in a concentric circle. (a) LED array, (b) Division of LED array.

に与える影響をなくすことができ、式 (19) によって近距離データに対する遠距離データの影響を取り除くことができると考えられるが、実際にはこの非直交な方式では干渉の影響を完全に取り去ることは難しい。このため、ビット誤り率 (BER) 特性が良くなることはない。一方、設計の自由度が向上するため、近距離ではより高速に、遠距離でもある程度の伝送速度での通信を行うなどの設計ができるようになる。以上を確認するため、従来方式及び提案方式を用いて実験を行い BER 特性とスループット特性を評価する。

5. 実験

5.1 実験のパラメータ

提案する重畳符号化の特性を評価するため、通信距離を 25 m から 70 m まで 5 m 置きに変え、静止環境で実験を行った。BER 特性とスループット特性によって評価を行う。受信機の仕様を表 1 に示し、実験諸元を表 2 と表 3 に示す。これらの諸元は撮影距離によらず一定であり、本実験におけるレンズの絞り等のカメラの設定は、遠距離において LED の 4 段階の輝度値が判別でき、かつ、近距離においてなるべく輝度値の飽和が生じない値を選択した。

表 1 高速度カメラの仕様

Table 1 High-speed camera specifications.

カメラ型名	フォトン社製 FASTCAM-1024PCI 100K
撮像素子	CMOS イメージセンサ
レンズ型名	ニコン社製 NIKKOR 35 mm f/1.4
焦点距離	35 mm
ND フィルタ	キャノン社製 Screw-in Filter ND4-L/4x

表 2 実験諸元

Table 2 Experimental parameter.

	ウェーブレット変換	重畳符号化
LED 点灯周波数	4 kHz	3 kHz
カメラの撮影速度	1000 fps	
カメラの焦点距離	35 mm	
レンズのピント	無限遠	
レンズの絞り	11	
レンズのフィルタ	ND4L フィルタ	
解像度	128×128 pixel	
撮影距離	25 m ~ 70 m	
	5 m 間隔	
撮影環境	静止	

本実験では LED アレーの区分として表 3 の条件をもつ三つのパターンを用いた。この LED アレーの区分の概略図を図 10 に示す。各パターンの表記において、L につく数字は遠距離データにおける 1 シンボル当りのビット数を、S につく数字は近距離データにおける 1 シンボル当りのビット数を表す。提案方式は遠距離データと近距離データの伝送速度が同じ必要はないが、従来方式はそれらが同じでなくてはならない。そのため本実験では、提案方式として L16_S64 のパターンを用いて従来方式と比較を行うものとし、遠距離データにおいて従来方式と提案方式の伝送速度をそろえている。一方で近距離データでは遠距離データよりも提案方式の伝送速度を高くし、従来方式と提案方式の 1 bit を表す LED の数を揃えて比較を行っている。

5.2 実験結果

提案方式である重畳符号化を用いた場合と、従来方式であるウェーブレット変換を用いた場合での、BER 特性を図 11、スループット特性を図 12 にそれぞれ示す。

図 11 において、遠距離データは提案方式では 25 ~ 55 m においてエラーフリーを達成し、従来方式では 25 ~ 60 m においてエラーフリーを達成した。従来方式は直交変換を用いており、周辺 4 bit 分の LED から 1 bit 分のデータが算出される。一方で提案方式では従来方式の 4 bit 分の数の LED を用いて 1 bit を表現し

表 3 LED アレーの区分と伝送速度
Table 3 Division of LED array and data rate.

データ	ウェーブレット変換		重畳符号化					
	遠距離	近距離	L16_S64		正方形 (L1_S196)		円形 (L1_S192)	
1 bit を表す LED の数	4 個	4 個	16 個	4 個	196 個	1 個	192 個	1 個
1 シンボル当りのビット数	16 bit	16 bit	16 bit (M=16)	64 bit (N=64)	1 bit (M=1)	196 bit (N=196)	1 bit (M=1)	192 bit (N=192)
伝送速度	4 kbit/s	4 kbit/s	4 kbit/s	16 kbit/s	0.25 kbit/s	49 kbit/s	0.25 kbit/s	48 kbit/s

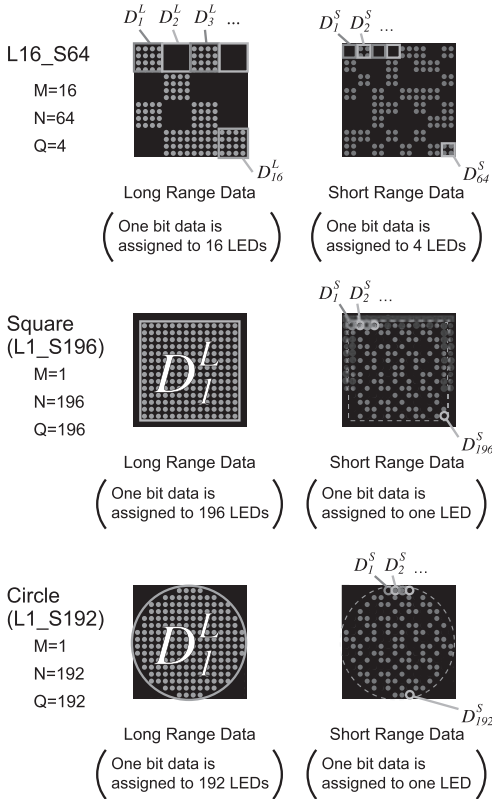


図 10 LED アレーの区分
Fig. 10 Division of LED array.

ている。1 bit を算出するために用いる LED の数が等しいため、遠距離データにおいて従来方式と提案方式の BER 特性は同じような特性となると考えられる。

近距離データは提案方式の方が伝送速度が高く、提案方式では 25~35 m においてエラーフリーを達成したのに対して、従来方式では 25~45 m, 55~60 m においてエラーフリーを達成し、従来方式と提案方式を比較すると、従来方式の方が BER 特性が良い。これは、提案方式が非直交な符号化方式で各データが互いに干渉影響を及ぼし合うのに対し、従来方式は直交

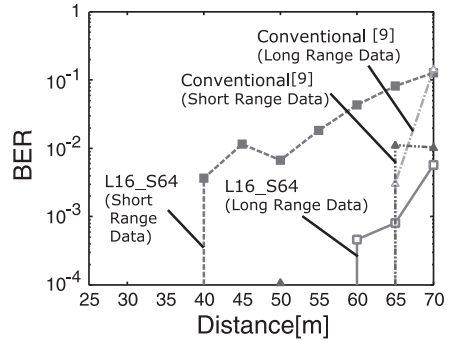


図 11 BER 特性
Fig. 11 BER performance.

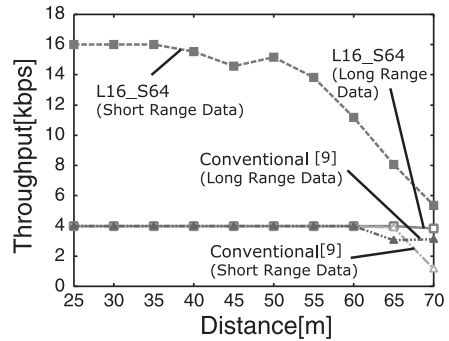


図 12 スループット特性
Fig. 12 Throughput performance.

変換を用いており、直交性が保たれている場合には各データ同士が互いに影響を及ぼし合うことなく復号が可能なためである。このように、遠距離データも近距離データも通信距離が長くなるほど BER が悪化する。また、提案方式において 40 m と 45 m での BER が高くなっているのはモアレの影響であると考えられる。モアレとは、画像の画素解像度と撮影される模様との周波数のずれが原因で生じる縞模様である。通信距離によって LED アレーの撮影画像上での大きさが異なるため、通信距離に応じてモアレが生じる場合と生じな

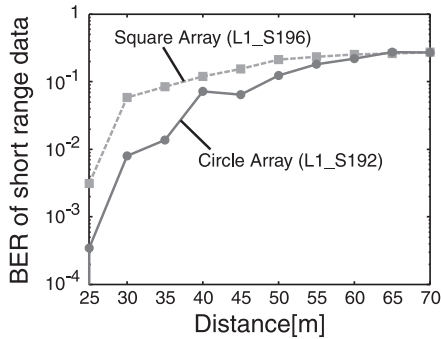


図 13 円形 LED アレーでの近距離データの BER
Fig. 13 BER performance with circle LED array.

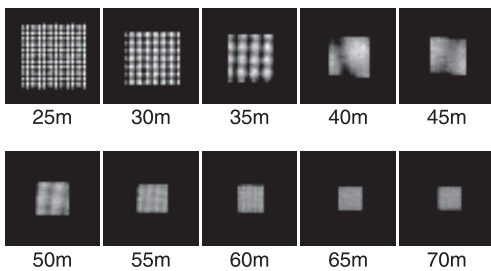


図 14 各通信距離における全点灯状態の LED アレーの撮影画像
Fig. 14 Captured images of all lighting LED array in each communication distance.

い場合が存在する．図 14 に、全点灯状態の LED アレーを実際に各通信距離において撮影した画像を示す．図 14 より、40 m と 45 m において実際に受信画像にモアレが生じていることが確認された．モアレが生じることにより、各 LED で正しい輝度値が取得できなくなり BER 特性が劣化する．

一方で図 12 に示されたスループット特性においては遠距離データ、近距離データともに提案方式の方が特性が良い．特に近距離データに関しては、25～55 m において従来方式の約 4 倍のスループットを達成している．45 m においてスループットが低下しているのは、上記にあるようにモアレによって BER が低下したためである．この結果から、提案方式では各データの伝送速度が異なる場合にも適用でき、遠距離データよりも速い伝送速度の近距離データを重畳することが可能であることが確かめられた．

また、提案方式は LED の配置と数に制限がない．この利点を示すために、図 13 に円形 LED アレーを用いた場合の近距離データの BER を示す．また比較対象として、円形 LED アレーと LED の個数を近づ

けた 14×14 個 (= 196 個) の LED が正方形列状に配置された LED アレーを用いた場合の BER も示す．図 13 より、実験装置の都合上 LED が同心円状に円形配置されたものではないが、実験に用いた LED が 192 個の円形 LED アレーでも正方形アレーと同じように提案方式が適用できることが分かる．したがって、提案方式を適用する状況として、任意の数や配置の LED をもつ送信機を用いる場合や各データの伝送速度が異なる場合が適している．

6. むすび

本論文では可視光通信に対する階層的符号化を実現する新しい符号化方式として「重畳符号化」を提案し、これを用いて静止環境での実験を行った．この実験により、BER 特性は直交変換を用いた従来方式の方が優れているが、提案方式では送信機に円形 LED アレーを用いた場合でも適用が可能であることが確認された．また、提案方式では各データの伝送速度が異なる場合にも適用可能であり、近距離での近距離データのスループットが向上することが確認できた．したがって、任意の数や配置の LED をもつ送信機を用いる場合や各データの伝送速度が異なる場合、提案方式が有効である．

謝辞 本研究を進めるにあたり、適切なアドバイスと有意義な議論を頂いた名古屋大学エコトピア科学研究科片山正昭教授及び小林健太郎助教に感謝する．本論文の一部は科研基盤 (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] 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] S. Rajagopal, R.D. Roberts, and S.-K. Lim, “IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support,” IEEE Commun. Mag., vol.50, no.3, pp.72–83, March 2012.
- [4] G. Pang, T. Kwan, H. Liu, and C.-H. Chan, “LED wireless,” IEEE Industry Applications Magazine, vol.8, no.1, pp.21–28, Jan./Feb. 2002.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] 山里敬也, “LED アレー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, Oct. 2009.
- [8] 岡田賢詞, 圓道知博, 山里敬也, 岡田 啓, メヒルダトパナヒプル テヘラニ, 藤井俊彰, 谷本正幸, “LED 信号機通信のための追尾機構を備えた車載受信機,” 信学技報, CS2009-64, Dec. 2009.
- [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,” 信学論 (A), vol.J90-A, no.9, pp.696–704, Sept. 2007.
- [10] 名倉 徹, 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 アレーと高速度カメラを用いた可視光通信システムの高速化,” 2009 信学総大, A-17-18, March 2009.
- [11] 名倉 徹, 山里敬也, 荒井伸太郎, 岡田啓, 圓道知博, 藤井俊彰, “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,” 信学論 (B), vol.J95-B, no.2, pp.326–336, Feb. 2012.
- [12] 荒井伸太郎, 間瀬祥平, 名倉 徹, 山里敬也, 圓道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸, 木村好克, “LED アレーと高速度カメラを用いた路車間可視光通信のための輝度補正,” 2009 信学総大, A-17-19, March 2009.

(平成 24 年 5 月 24 日受付, 9 月 28 日再受付)



西本早耶香 (学生員)

平 23 名大・工・電子情報工卒. 現在, 同大学院博士課程前期課程在学中. ITS 無線技術, 可視光空間通信の研究に従事. IEEE 学生員.



山里 敬也 (正員)

昭 63 信州大・工・電子工卒. 平 2 同大学院修士課程了. 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・助教授, 平 16 同大・エコトピア科学研究機構, 平 19 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, ドイツカイザーセラウテルン大・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.



岡田 啓 (正員: シニア会員)

平 7 名大・工・電子情報学専攻卒. 平 9 同大学院博士課程前期課程了. 平成 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. 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フィック, 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, ACM 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, 平 18, 平 21, 平 23, 平 24 本会・通信ソサイエティ活動功労感謝受賞.



藤井 俊彰 (正員)

平 2 東大・工・電子卒. 平成 7 同大学院博士課程了. 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 同助教授. 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システム専攻准教授. 平 24 同大・教授, 現在に至る. 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, 情報処理学会, IEEE 各会員.



圓道 知博 (正員)

平 8 東工大・工・制御卒. 平 10 同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 14 JST・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.



荒井伸太郎 (正員)

平 16 徳島大・工・電気電子卒. 平 18 同大学院修士課程了. 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.