

LED と高速度カメラを用いた可視光通信における劣化画像からの
信号復号手法大平 祐生^{†a)} 荒井伸太郎[†] 圓道 知博^{††} 山里 敬也^{†††}
岡田 啓^{†††} 藤井 俊彰^{†††} 鎌倉 浩嗣^{††††}Signal Demodulation Method from Degraded Image for Visible Light
Communication Using LED and High-Speed CameraYuki OHIRA^{†a)}, Shintaro ARAI[†], Tomohiro YENDO^{††}, Takaya YAMAZATO^{†††},
Hiraku OKADA^{†††}, Toshiaki FUJII^{†††}, and Koji KAMAKURA^{††††}

あらまし 本論文では LED 信号機 (送信機) と車載高速度カメラ (受信機) を使用した路車間可視光通信システムに注目する。受信機にカメラを用いた場合、送受信機間の通信距離が離れるにつれ、撮影画像のピクセル数の減少やピントのずれなどが起こり、各 LED は隣接する LED から光の干渉を受け、画像が劣化、特に画像がボケてしまう問題が起こる。そのため、輝度値を正しく認識できず、情報の復号に影響を及ぼしてしまう。本研究では、画像の“ボケ”を考慮した新たな信号復号方法を提案する。具体的には、撮影画像に写る各 LED の画素値は自身と隣接する LED 輝度値とその拡がりの係数との畳み込みの式で表され、これを LED の数だけ立てる事で、連立方程式により、未知の変数である送信データを導出することで情報復元を行う。シミュレーション及び実験により性能を評価した結果、提案手法は、従来の復号方式に比べ、優れた BER 特性をもつ事が確認できた。

キーワード LED、可視光通信、ITS、路車間可視光通信

1. ま え が き

LED は白熱灯に比べ低価格、高輝度で省電力、長寿命といった利点をもつため、LED 照明や LED ディスプレイ等、その利用が急速に広まっている。この LED の普及に伴い、LED を用いた新たな通信システム“可視光通信”が注目を集めている [1]~[4]。可視光通信とは、人の目に見える可視光線帯域の電磁波を利用した通信方式である。LED は半導体素子であるため、高

速に輝度を制御可能である。この特徴を利用することで、LED を用いた機器を通信機器としても利用できると期待されている。特に、本論文では高度道路交通システム (Intelligent transport systems: ITS) への可視光通信の応用に注目している [5]~[7]。具体的には、送信機として LED 信号機を、受信機に車載高速度カメラを用いた路車間可視光通信システムの構築を目的としている。LED 信号機を送信機として用いることで、信号機本来の役割を果たすと同時に、交通整理や道路情報等を提供する役割を付加できると考える。また既存の LED 信号機に LED 送信機としての機能を追加することで、新たに情報伝送用の装置を設置する必要がなく、低コストでの LED 可視光通信設備の設置が期待できる。

受信機に用いる高速度カメラは、LED の点滅を二次元の平面画像で捉える事が可能である。このとき、カメラのレンズを广角にすることで、視野角を拡大でき、車両前方の風景をより広く撮影できる。その広く撮影された画像の中から LED 信号機を検出すればよ

[†] 香川高等専門学校, 三豊市
National Institute of Technology, Kagawa College, 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

^{†††} 名古屋大学, 名古屋市
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-
8603 Japan

^{††††} 千葉工業大学, 習志野市
Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma,
Narashino-shi, 275-0016 Japan

a) E-mail: a14504@sr.kagawa-nct.ac.jp

いため、受信機を送信機に直接向ける機械的な首振り操作をする必要がない。更に、撮影画像内で、送信機とそれ以外の発光体を画像処理により容易に分離できる。この利点は、画像内に複数の送信機があった場合に、それぞれ独立した送信機として認識できることも意味している。上述のとおり、LED の普及に伴い、LED を用いた機器 (例: LED デジタルサイネージ等) は街中に無数に存在している。それらの LED 機器にも可視光通信の送信機能を追加することで、ITS のためのユビキタス通信の実現につながると期待している。一方で、通信速度はカメラの応答特性 (撮影速度) に依存して決まるといった問題点があるが、送信機上の複数の LED を個別に変調させて LED の数だけ並列にデータを送信するという並列光空間通信方式を採用することで通信速度を向上できる [8], [9]。

高速度カメラを用いた可視光通信システムが、一般的な電波を用いた通信システムと大きく異なるところは、受信機での画像処理部分が情報復号の際に非常に重要になるという点である。並列光空間通信方式を採用した場合、個々の LED の点滅を受信機で認識する必要がある。このとき、隣接する LED との間隔が十分離れている場合、受信機は容易に個々の LED の輝度値を取得できる。しかしながら、LED 信号機のように LED が密接に配置されている場合、画像の解像度によっては個々の LED の認識が困難になる。特に、路車間可視光通信では、送受信機間の距離が離れる場面も生じるため、距離に依存して撮影画像のピクセル数の減少やピントのズレなどが起こりえる。このとき、隣接する LED 同士が結合して見えるといった画像の劣化、いわゆるボケ画像が撮影されてしまう。これが起こると、撮影画像から個々の LED の輝度値を正しく認識することが困難になってしまい、信号復調で誤りが増加してしまう問題がある。つまり、送受信機間の距離が長くなるほど画像のボケが起こりやすく、信号復調に大きな影響を与えることを意味する。この問題を解決する方法として、これまで、階層的符号化方式や重畳符号化方式が提案されている。

階層的符号化方式は、画像の空間周波数の概念を導入した符号化である [9]。画像の空間周波数を高周波成分と低周波成分に分けて考えた場合、高周波成分は送受信機間の距離が長くなるに従って失われるが、低周波成分は長くなったとしても劣化が比較的少ないことが知られている。階層的符号化はこの特徴に着目し、画像の空間周波数成分にそれぞれ異なるデータを割

り当てることで、通信距離が長い場合でも、低周波成分に割り当てたデータの取得を可能としている。そして、送信機に接近するに従って、高周波成分に割り当てたデータが取得できるようになる。空間周波数成分へデータを割り当てる方法として、文献 [9] では二次元高速ハールウェーブレット変換を用いて実現しており、シミュレーションと実験の両面から階層的符号化の効果を実証している。しかしながら、この手法にはデータを割り当てる LED は正方行列配置で、なおかつ、その数を 4 の累乗にしなければならない制限があるため、LED 信号機のような円形の送信機への適応が困難といった問題点がある。

重畳符号化方式はこの階層的符号化の制限の問題を解決するために提案された、送信機の形状や LED の数に左右されない符号化である [10]。そのコンセプトは非常にシンプルで、遠距離用のデータと近距離用のデータを単純に重畳させている。このとき、それぞれのデータに割り当てる LED の個数を変えており、遠距離用データには近距離用データよりも多くの LED を割り当てる。これにより、通信距離が遠い場合でも、遠距離用データが割り当てられた複数の LED を受信機で容易に認識可能となる。実験結果よりその性能は確認され、遠距離用・近距離用、双方のデータ復調に成功している。特に、近距離用データのスループットは階層的符号化よりも向上することが文献 [10] より確認されている。これにより、送信機の形状や LED の個数によらない、画像が劣化する環境下における遠距離可視光通信の可能性が高まった。

これら二つの手法に共通しているのは、送信データレートを犠牲にして、画像劣化に対する問題を解決している点である。遠距離用と近距離用でデータの重みを変え、なおかつ、割り当てる LED の個数を変えているため、遠距離用のデータレートは個々の LED が変調されている場合よりも小さい。今後、ITS 技術の進歩により、道路上では様々な情報が飛び交うことが予想され、遠距離用・近距離用に分ける事なく、一律でかつ高いデータレートでの路車間可視光通信の実現が責務であると考えられる。そのためには、データレートを下げずに、劣化した画像からデータを取得する必要がある。そこで本研究では、階層的符号化方式や重畳符号化方式とは異なるアプローチで、データレートを変化させずに劣化画像、つまりボケ画像から正しいデータを復調する手法を検討する。具体的には画像のボケが受信機の撮像面で引き起こされると考え、そのボケ

の影響を利用した復号方式の提案を行う。今、隣接した二つの LED が点灯しており、それをカメラで撮影したとする。このとき、ピンツレ等が生じて画像がボケてしまい、互いの LED 光が干渉し合うと仮定すると、各 LED の像が結像される領域の画素値は自身の LED 輝度値と隣接する LED 輝度値の畳み込みで表すことができる。これは隣接する LED の数が増えたとしても同様である。ここで、各 LED の状態(点灯/消灯)を未知の変数で置くと、各 LED 画素値は畳み込みの式で記述できる。このとき、各 LED の像が結像される領域の画素値の中から任意の 1 画素に対する畳み込みの式を LED の数だけたてられれば、その連立方程式を解くことで、各 LED の状態を導くことができる。つまり、ボケによる画像の劣化が起こったとしても、データの復号を行える。

本論文は以下のように構成されている。2. では本論文で想定している送信機、受信機のシステムモデルについて述べる。3. では画像のボケの影響を利用した信号復号手法についての詳しい説明を行う。4. では提案した信号復号手法を用いてシミュレーションを行い、ビット誤り率 (BER) 特性を用いて評価する。5. では更に実験により提案手法の性能を評価する。6. はむすびである。

2. システムモデル

図 1 に本研究で想定するシステムモデルを示す。本システムモデルは、文献 [9] に基づいて、送信機に LED アレー、受信機に高速度カメラを採用している。以下、それぞれの動作について説明する。

2.1 LED アレー送信機

送信機は、 $M \times N$ 個の LED を正方行列状に配置した LED アレーと符号化器から成るシステムを想定

している。以下、アレー上の m 行 n 列の位置に配置されている LED を $\text{LED}(m, n)$ とする。ただし、 m と n はそれぞれ 0 以上の整数である。変調方式には On-Off-Keying (OOK) を採用し、データ 1 と 0 をそれぞれ LED の点灯・消灯状態で表す。また、並列光空間通信方式を採用し、各 LED にそれぞれ異なるデータを割り当てて変調させ、LED の個数分のデータを送信することにより、通信速度を向上させる。各 LED は点灯区間 T_b の非負の方形パルスで発生し、LED の輝度に情報を載せる。ここで T_b はビット区間を示しており、LED 一個あたりのビットレート R_b は $1/T_b$ で表せる。送信機に設置される LED は $M \times N$ 個であるので、送信機全体でのビットレートは $(M \times N)R_b$ となる。LED (m, n) の時間 t における輝度 $S_{m,n}(t)$ は以下のように表せる。

$$S_{m,n}(t) = \sum_i s_{m,n,i} \cdot A \cdot g(t - T_b), \quad (1)$$

ここで i は 0 以上の整数であり、LED 全体の表示パターンが何番目であるかを示す。 $s_{m,n,i}$ は LED (m, n) における輝度を定める係数で、OOK を用いる場合、ビットの 0,1 に対応して $s_{m,n,i} = (0, 1)$ となる。 A は LED の点灯時の輝度であり、 $g(t)$ は以下に示すような方形パルスを表す関数である。

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

2.2 高速度カメラ型受信機

受信機は、高速度カメラ、画像処理部、復号化器から成るシステムを想定している。各 LED より送信された光信号は、光空間チャネルを通り受信機の高速度カメラにより受信される。高速度カメラにより撮影された光送信信号は CMOS イメージセンサにより電気信号に変換され、画像として出力される。送信機に搭載されている各 LED から送信された光信号は、画像内の一つまたは複数のピクセルに相当する。ここで $M \times N$ 個の LED が $X \times Y$ 画素の領域で捉えられ、その時刻 t に当該画素が受光する光のエネルギーを $R'_{x,y}(t) (0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y)$ とすると、出力される画素値は次式で表される。

$$R_{x,y} = c \int_0^{T_b} R'_{x,y}(t) \cdot g(t - T_b) dt, \quad (3)$$

ここで c は光電変換効率を表す定数である。この出力

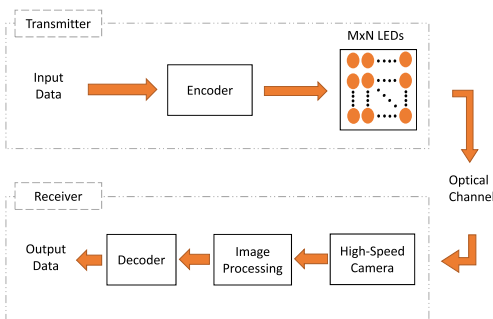


図 1 システムモデル
Fig. 1 System model.

された画素値を用いて、撮影画像から送信機の各 LED の輝度値を得て、情報の復号を行う。ある瞬間の LED 輝度値群 S から画素値群 R' への変換は LED の物理形状や輝度分布、伝搬空間中やカメラ光学系でのボケ、各画素での空間サンプリング等の特性を総合したものとなる。本研究ではこの部分で一つの画素が複数の LED からの光を受光する状態を想定し、この影響を考慮した複合方式を提案する。

3. 提案手法: 画像の劣化 (ボケ) の影響を考慮した情報復号

本章では本研究で提案する画像の劣化の影響、特にボケの影響を考慮した情報復号方式を説明する。

実環境において高速度カメラを用いた可視光通信を行う場合、1. で述べたとおり、通信距離に依存して撮影画像の画素数の減少やピントのズレなどが起こり、隣接する LED 同士が結合して見える画像の劣化 (画像のボケ) が生じてしまう。

そこで、この現象のモデル化を考える。まず、一つの LED を画像として撮影される場合を考えると、LED の発光部と画素の受光部はそれぞれ面積をもつため、一つの LED の像は一般に複数の画素に渡って結像される。焦点ボケやレンズ収差などの光学系の分解能の制約によって更に像は拡がりをもつ。これらの特性を総合すると、一つの LED からの光がある画素で受光される強度は撮像面上での LED 像と当該画素との距離をパラメータとした二次元ガウス関数で近似される [11]。

複数の LED を考えた場合、画素値は各 LED からの光の強度の和となる。このとき、送信機中の各 LED の大きさは同じとみなせるので、受光強度を表す関数は LED によらず同一のガウス関数で表現される。すなわち、送信側の LED 輝度値から受信画像の画素値への変換は、LED 輝度値列に単一のガウスカーネルを畳み込んだ空間フィルタリングとして表現される。

カーネル関数を以下のように定義する。

$$h_g(p, q) = \frac{1}{2\pi\sigma_g^2} \exp\left(-\frac{p^2 + q^2}{2\sigma_g^2}\right). \quad (4)$$

ここで $\sigma_g^2 (> 0)$ はガウス分布関数の分散、 p と q はそれぞれ注目画素からの縦軸と横軸方向の距離を表す。本研究では、この式に基づく 5×5 のカーネルサイズのガウスフィルタを用いて、受信機の撮像面でのボケを近似できると仮定する。また、 5×5 ガウシ

ンフィルタの係数を $G(p, q)$ で表す (図 2 参照)。

今、 $\sigma_g^2 = 1.0$ とした際の 5×5 ガウスフィルタの係数を図 3 に示す。ここで図 3 は、中心の係数 $G(0, 0)$ が 1 となるように正規化している。図 3 において、ガウスフィルタの係数の 4 隅に注目すると、その値は 0.02 となっている。これは、もしフィルタを施す前の LED 画素値が 255 であったとしても、フィルタの 4 隅に相当する画素はそれよりも遥かに小さい画素値となることを意味する。このことから、 5×5 よりも広いカーネルを考えなくてもよいと判断し、本研究では 5×5 ガウスフィルタのみを用いた。

以上のモデル化を踏まえ、本論文で提案する復号方法について説明する。説明を簡単にするため、図 4 (a) のような点灯している 1 個の LED が、受信機側で図 4 (b) のように撮影されると仮定する。今、送信機側の LED アレーが図 5 (a) のような 2×2 個の LED で構成されており、各 LED が左上から右に向かって走査する順で、 $\{1, 1, 0, 1\}$ のデータが送信される場合を考える。このとき、LED(1, 0) のみ消灯状態であり、それ以外の LED は全て点灯状態となる。これら

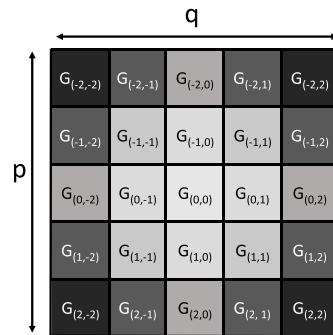


図 2 ガウスフィルタの係数 $G(p, q)$
Fig. 2 Output of Gaussian filter $G(p, q)$.

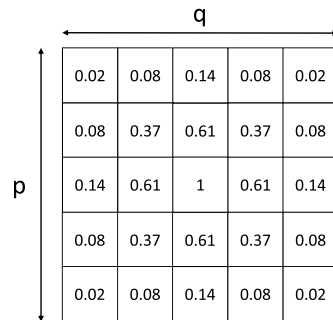


図 3 $\sigma_g^2 = 1.0$ のガウスフィルタの係数 $G(p, q)$
Fig. 3 Output of Gaussian filter $G(p, q)$ ($\sigma_g^2 = 1.0$).

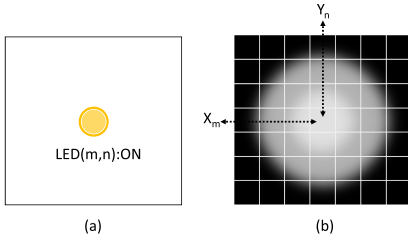


図 4 画像上での単独 LED の例: (a) LED (送信機側), (b) 受信画像

Fig. 4 Example of Single LED on Image: (a) LED (Transmitter side), (b) Received image (Receiver side).

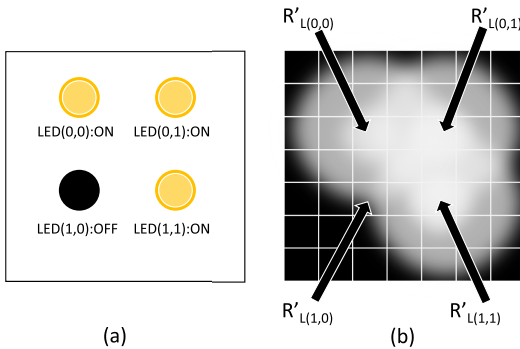


図 5 画像上での 2×2 LED の例: (a) 2×2 LED アレイ (送信機), (b) 受信画像

Fig. 5 Example of 2×2 LED Array on Image: (a) 2×2 LED Array (Transmitter), (b) Received image.

の LED 輝度値が受信機側で、図 5(b) のように、各 LED 画素値群の中心画素と隣接 LED 画素値群のそれとの間に 1 画素分のギャップをもつ LED アレー送信機が撮影されたとする。この図から分かるように、1 画素分のギャップがあったとしても、各 LED 画素群は周辺 LED からの影響を受ける。隣接する LED 同士が自身のもつ輝度値に応じた影響を画素へ与え合う。そのため実際の環境では、到達し撮影された各送信機 LED の輝度値は一つの画素が複数の LED からの光を受光することでこのような画像劣化が生じ、隣接する LED 同士が互いに影響を与え合い、LED 同士が結合して見えてしまう状況では、各 LED の輝度値を正しく認識できず、データ復調の誤りが増加してしまう。ここで、各 LED の輝度値にばらつきがなく、なおかつ、画像の劣化をガウシアンフィルタで近似できると仮定する。このとき、ガウシアンフィルタの係数 $G(p, q)$ を推定できたとすると、そのフィルタ係数を用いる事で各 LED 画素値は、自身と周辺 LED 輝度

値による畳み込みの式で記述可能となる。

例として、図 5(b) の LED(0, 1) に注目する。ここで、LED(m, n) の像が結像された画素値群の中の任意の画素を $R'_L(m, n)$ で表すと、LED(0, 1) の画素値 $R'_L(0, 1)$ は、自身と周辺 LED 輝度値 $S'_{m, n}$ 、フィルタ係数 $G(p, q)$ を用いて次のように導出できる。LED(0, 1) の左に位置する LED(0, 0) の中心座標は、撮影画像上で見ると、その中心との距離が横軸方向に 2 ピクセル離れている。ゆえに、LED(0, 0) が持つフィルタの係数は、図 2 より $G(0, 2)$ である。同様に LED(1, 0) が持つフィルタ係数は $G(-2, 2)$ 、LED(1, 1) は $G(-2, 0)$ となるが、LED(1, 0) は消灯状態であるため LED(0, 1) は輝度値を持たないので、無視することができる。また、LED(0, 1) 自身の中心は $G(0, 0)$ となる。つまり、画像劣化による LED(0, 1) の画素値 $R'_L(0, 1)$ は、フィルタ係数と各 LED 輝度値から $S'_{0, 0} \cdot G(0, 2) + S'_{0, 1} \cdot G(0, 0) + S'_{1, 1} \cdot G(-2, 0)$ となる。他の画素値 $R'_L(m, n)$ についても同様の方法で決定される。この例では、説明を簡単にするために各 LED の輝度値 $S'_{m, n}$ を既知として画素値を表したが、実際の通信環境では $S'_{m, n}$ は未知である。ゆえに、LED(m, n) の画素値 $R'_L(m, n)$ は以下の式で表せる。

$$R'_L(m, n) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} S'_{u, v} G_{p_m(u), q_n(v)}, \quad (5)$$

$$p_m(u) = X_u - X_m, \quad (6)$$

$$q_n(v) = Y_v - Y_n. \quad (7)$$

ここで、 X_m と Y_n は LED(m, n) の像が結像された画素値群の中の任意の 1 画素の座標を表している。送信機の LED 数は $M \times N$ 個であるので、未知の送信データ $S'_{m, n}$ の総数も $M \times N$ 個である。つまり、各 LED の像が結像される領域の画素値の中から任意の 1 画素に対する式 (5) を $M \times N$ 個立てることができ。例として、図 5(a) のような 2×2 LED アレー送信機の場合の式を以下に示す。

$$R'_L(0, 0) = S'_{0, 0} \cdot G_{p_0(0), q_0(0)} + S'_{0, 1} \cdot G_{p_0(0), q_0(1)} + S'_{1, 0} \cdot G_{p_0(1), q_0(0)} + S'_{1, 1} \cdot G_{p_0(1), q_0(1)} \quad (8)$$

$$R'_L(0, 1) = S'_{0, 0} \cdot G_{p_0(0), q_1(0)} + S'_{0, 1} \cdot G_{p_0(0), q_1(1)} + S'_{1, 0} \cdot G_{p_0(1), q_1(0)} + S'_{1, 1} \cdot G_{p_0(1), q_1(1)} \quad (9)$$

$$R'_L(1, 0) = S'_{0, 0} \cdot G_{p_1(0), q_0(0)} + S'_{0, 1} \cdot G_{p_1(0), q_0(1)}$$

$$+ S'_{1,0} \cdot G_{p_1(1),q_0(0)} + S'_{1,1} \cdot G_{p_1(1),q_0(1)} \quad (10)$$

$$R'_{L(1,1)} = S'_{0,0} \cdot G_{p_1(0),q_1(0)} + S'_{0,1} \cdot G_{p_1(0),q_1(1)} \\ + S'_{1,0} \cdot G_{p_1(1),q_1(0)} + S'_{1,1} \cdot G_{p_1(1),q_1(1)} \quad (11)$$

このように、ガウシアンフィルタの係数 $G(p, q)$ のような画像の劣化具合が推定できれば、 $G(p, q)$ と各 LED 輝度値 $S'_{m,n}$ による畳み込みの式を LED の数 ($M \times N$ 個) 立てられ、その連立方程式を解くことで、各 LED 輝度値 $S'_{m,n}$ を導くことができる。

最終的に、算出された $S'_{m,n}$ を 0 ~ 1 の範囲で正規化し、しきい値判定することで、LED(m, n) からの送信データを決定する。連立方程式を解いた場合、送信側が送ったデータが 1 であれば正規化された $S'_{m,n}$ の解は 1 に、0 であれば解は 0 に限りなく近づく。ゆえに、本研究ではしきい値を 0.5 とし、 $S'_{m,n}$ が 0.5 以上であれば復号データを 1 と判定し、それ以下は 0 と判定する。本論文では、変調方式に非常にシンプルな OOK を用いて提案手法による情報復号方法を説明したが、1. で述べた階層的符号化や重畳符号化等の他の変調方式にも提案手法を適用することができ、それぞれの符号化の復調性能を向上できる [3]。

4. シミュレーションによる提案手法の評価

提案した信号復号手法の情報復号性能を計算機シミュレーションにより評価する。シミュレーション諸元を以下に記す。送信機の LED アレーとして、 16×16 個の正方形行列に配置された装置を想定する。送信データとしてランダムデータを想定し、そのデータは OOK により変調される。この場合、送信データレートは $16 \times 16 = 256R_b$ [bps] となる。また、LED の輝度に個体差はなく、均一なものとする。受信機では、送信機側の LED の点滅を高速度カメラで撮影したと仮定し、受信画像を生成する。各 LED の画素値群は、その輝度値に 5×5 ガウシアンフィルタをかけて決定されるものとし、また、各 LED の画素値群の中心画素と隣接する LED のそれとの間には画素によるギャップはないものとする。フィルタ処理後、受信機内の熱雑音によって画像の画素値に雑音が印加されると仮定し、本研究では熱雑音として加法的白色ガウス雑音 (AWGN) を想定する。また、各 LED の画像上での位置は既知であるとする。図 6 にシミュレーションによ

り作成した出力画像の例を示す。

本研究では、条件の異なる三種類のシミュレーションを行う。一つ目は、送信された LED の輝度と熱雑音の比 (SNR) を一定とし、ガウシアンフィルタの分散 σ_g^2 を変化させたときの BER を測定する。二つ目は、一つ目とは反対に、 σ_g^2 を一定とし、SNR を変化させたときの BER を測定する。三つ目は、受信機側で各 LED の画像上での位置 (座標) の取得誤りに対する提案手法のロバスト性をシミュレーションで調査する。いずれもパラメータごとのシミュレーションの試行回数を 10,000 回とする。

4.1 SNR 一定での σ_g^2 に対する BER 特性

図 7 に一つ目のシミュレーション結果である、SNR 一定での σ_g^2 に対する BER 特性を示す。この図において、 σ_g^2 が大きくなるほど、ガウシアンフィルタによる画像の劣化の影響が強くなることに注意する。比較のため、従来の OOK 復号方法 (画像の劣化を考慮しない、単純なしきい値判定) での BER 特性も従来方法として図 7 に示す。本シミュレーションにおいて、SNR は 15dB, 5dB の二つを用いた。

図 7 から分かるように、従来方式では SNR によらず、エラーフリーを達成するのは $\sigma_g^2 = 0.5$ 付近までで、それ以降、急激に誤りが生じている。それに対し、提案手法では、SNR=15dB では $\sigma_g^2 = 0.8$ まで、5dB



図 6 出力画像の例 ($\sigma_g^2 = 0.7$)
Fig. 6 Example of Output Image ($\sigma_g^2 = 0.7$).

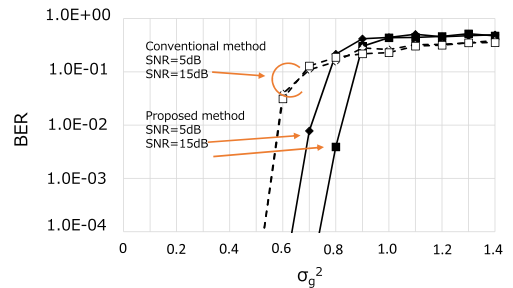


図 7 ガウシアンフィルタの分散 σ_g^2 対 BER 特性 (SNR 一定)

Fig. 7 σ_g^2 vs. BER.

では $\sigma_g^2 = 0.65$ までエラーフリーを達成している。また、 σ_g^2 が 0.8 ~ 1.1 付近まで、提案手法が従来方式よりも BER 特性が上回っている。これらは、提案手法の有効性を示す結果であり、画像のボケの影響を復号に利用したことによる情報復号能力の向上が確認できたとと言える。

しかしながら、 σ_g^2 が 0.8 ~ 1.1 を超えると、わずかではあるが、提案手法と従来方式の BER 特性が逆転していることも確認できる。これは、 σ_g^2 が大きくなったことで画像がボケすぎてしまったため、各 LED の輝度値が周囲のピクセルの輝度値と均一になってしまったことが原因である。このため、画素に印可される雑音の影響が相対的に強くなったことで、受信機が立てた連立方程式を正確に解けなくなってしまったことで誤りが増加したと考える。実際には、LED の点灯・消灯による画像の濃度が完全に失われ、雑音の影響が強すぎる状況では、LED 信号機はおろか、画像に写る送信機以外の物や風景も判別できなくなるほどに画像が劣化してしまう。ゆえに、可視光通信を行う状況としてはあまり現実的ではない。以上を踏まえ、あまりにボケの影響と雑音が強くと、カメラに何も写らない状況でない限り、提案手法の情報復号性能は優れていると考える。

4.2 σ_g^2 一定での SNR 対 BER 特性

図 8 に二つ目のシミュレーション結果である、 σ_g^2 一定での SNR に対する BER 特性を示す。4.1 と同様、比較のため、従来方式での BER 特性も図 8 に示す。本シミュレーションにおいて、一定にする σ_g^2 は 0.6, 0.8 の 2 パターンとした。

図 8 から分かるように、 $\sigma_g^2 = 0.6$ 及び 0.8 のどちらも提案手法が従来方式よりも優れた BER 特性を示している。特に、 $\sigma_g^2 = 0.6$ では、従来方式でエラーにフロアが生じているにもかかわらず、提案手法で

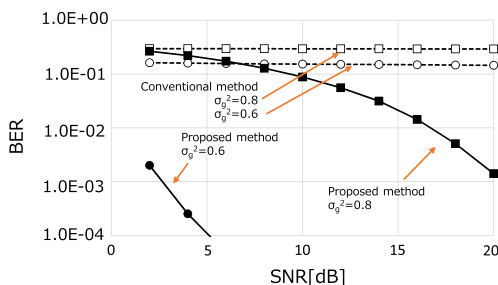


図 8 SNR 対 BER 特性 (σ_g^2 一定)
Fig. 8 SNR vs. BER.

はフロアが生じることなく、5dB を超えると BER は 1.0×10^{-4} 以下となる。つまり、 σ_g^2 の増加によって画像の劣化が起こる場合、雑音よりも隣接する LED からの干渉の方が情報復号性能に与える影響が大きいことを意味する。この結果から、提案手法のように画像のボケの影響を考慮して情報復号を行うことが有効であると言える。

4.3 各 LED の画像上での位置 (座標) の取得誤りに対する提案手法のロバスト性の調査

4.1 及び 4.2 では LED の位置が既知であるという条件のもと BER 測定を行った。しかし、実環境で路車間可視光通信を行う際、LED 送信機及び送信機がもつ LED の位置は未知であり、受信機側で想定している LED の位置と実際の位置が、車の移動に伴う振動などの影響でずれてしまう場合も十分有り得る。そこで、受信機側で各 LED の画像上での位置 (座標) の取得誤りが起こったと仮定し、提案手法のロバスト性をシミュレーションにより調査する。具体的には、全ての LED 画素群の中心とフィルタ係数 $G(p, q)$ の中心を x 軸方向に 0.1 ずつずらした状態で、提案手法及び従来手法を用いたデータ復調を行う。図 9 に、SNR=30dB 及び $\sigma_g^2 = 0.6, 0.8$ 一定としたときの、LED 画素群の中心とフィルタ係数 $G(p, q)$ の中心とのずれに対する BER 特性を示す。図 9 から分かるように、提案手法は、わずかに 0.2 画素ずれてしまうだけで、正しく情報を復調することが困難となるのが分かる。これは、受信機が想定する送信機の位置と実際の送信機の位置がずれてしまったことで、各 LED 輝度値とフィルタ係数によって立てられた畳み込みの式で連立方程式の解を正確に求めることが困難になったと考えられる。そのため、本手法を実環境で用いるためには、送信機の位置を正確に把握しておくことが必要である

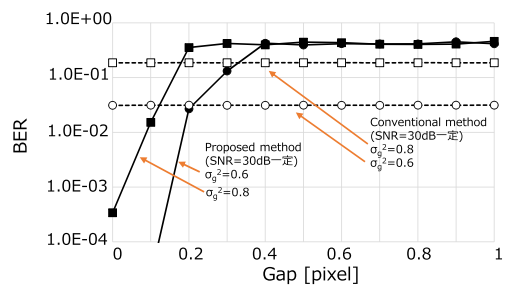


図 9 LED 画素群の中心とフィルタ係数 $G(p, q)$ の中心とのずれに対する BER 特性
Fig. 9 Gap between center of LED pixels' group and center of $G(p, q)$ vs. BER.

と言える。

5. 実験

提案手法の有効性を更に確認するため、提案手法を実装し、静止環境で実験を行った。実験用に作製した LED アレー送信機を図 10 (a) に、受信機に用いた高速カメラを図 10 (b) にそれぞれ示す。また、送信機と高速カメラの仕様及び実験諸元を表 1 から表 3 にそれぞれ示す。作製した送信機は、 3×3 LED アレー

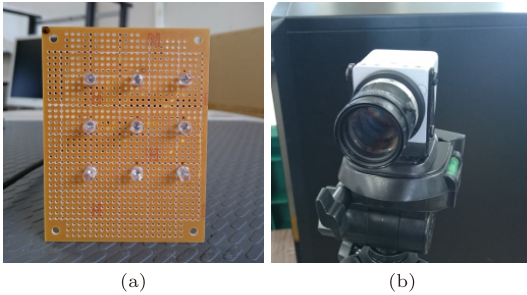


図 10 実験装置：(a) LED アレー送信機、(b) 高速カメラ

Fig. 10 Experimental equipments: (a) LED array transmitter, (b) High-speed camera.

表 1 LED アレー送信機の仕様
Table 1 LED array transmitter specifications.

LED の色	Red
LED の形状	砲丸型, 直径 5 mm
半値角	30°
光度	3,000 mcd
LED の配置	正方行列
LED の個数	9
LED 点滅制御デバイス	Arduino Mega 2560 R3

表 2 高速カメラの仕様
Table 2 High-speed camera specifications.

カメラ型名	Photoron IDP-Express R2000
撮像素子	CMOS イメージセンサ
レンズ型名	NIKKOR 35 mm f/1.4
焦点距離	35 mm f/1.4
画像解像度	512×512 pixels
センササイズ (λ)	$10 \mu\text{m}$
出力画像	8 bit グレイスケール

表 3 実験諸元
Table 3 Experimental parameters.

符号化方式	On-Off-Keying (OOK)
LED 点滅周波数	250 Hz
撮影速度	2,000 fps
レンズの絞り (F 値)	16
通信距離	30 m
撮影環境	(太陽光が影響しない) 屋外, 静止環境

と LED 点滅制御デバイスで構成されており、本実験ではその制御デバイスに Arduino Mega R3 を用いた。各 LED の素子間隔は 20 mm としており、これは日本で一般的に使用されている LED 信号機を参考に決定した値である。送信データはヘッダ部とデータ部からなるパケットで送信される。ヘッダ部は送信データの開始を識別するための既知のパターン、及び、各 LED が単独で順番に点灯する「単独点灯パターン」で構成されている。この単独点灯パターンは、実験で各 LED の $G(p, q)$ を取得するために挿入している。3. で述べたとおり、提案手法を実現するためには、画像の劣化によって受信画像内の任意の画素が受ける各 LED からの影響 $G(p, q)$ を知る必要がある。本実験では、単独点灯パターンを点灯させることで、受信機側では各 LED のみが点灯している「単独点灯画像」を撮影でき、その画像から各 LED が画素にもたらす影響 $G(p, q)$ を取得する。また、各 LED を単独に点灯させる事で、各 LED の中心座標も取得できる。データ部は OOK されたランダムデータに従って各 LED が個々に点滅するように設計されている。

実験環境は、太陽光が直接当たらない (影響しない) 屋外で、なおかつ、静止環境で実施した。送信機の LED 以外の光である背景光の影響を少なくするため、カメラのレンズの絞り (F 値) を 16 とした。送信機と受信機の高さを同じとし、LED アレーとカメラのレンズが互いに向かい合うように設置した。送受信機間の通信距離は 30 m 一定とした。これは、各 LED 画素群と周辺の LED 画素群の画像上での距離を小さくするためである。

実験は、まず、OOK から従って個々に点滅する LED を高速カメラで撮影する。次に、撮影された複数の画像の中からパケットの先頭を見つけ、ヘッダ部の単独点灯画像から各 LED の $G(p, q)$ を取得する。そして、取得された $G(p, q)$ を用いて、データ部の各点灯パターンから、データの復調を行う。本実験では画像内の個々の LED の位置は既知であるとして、手で LED 画素を抽出する。更に、画像を劣化させるために、カメラのピントをずらし、各 LED 光の画素が周辺の LED 光の画素に影響を与えるように調整した。図 11 (a) と (b) に、ピントずれのない (劣化のない) 単独点灯画像とピントずれによって劣化した画像をそれぞれ示す。更に、図 11 (a) と (b) から抽出された画素値を図 12 (a) と (b) にそれぞれ示す。図 12 (a) から分かるように、ピントずれのない場合、LED の画素値

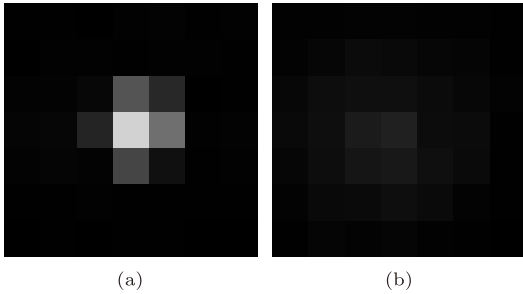


図 11 単独点灯画像例：(a) 劣化前の画像, (b) 劣化画像
 Fig. 11 Example of Independently LED light: (a) Non-blurred image, (b) Blurred image.

1	1	0	2	1	1	2
0	2	2	1	2	2	1
3	3	7	84	40	0	1
5	6	36	210	111	2	3
3	5	3	69	16	1	2
1	1	2	1	1	1	1
0	1	0	1	1	0	0

2	2	3	3	2	2	1
3	6	11	9	6	5	1
7	13	15	15	11	7	3
9	14	27	32	12	11	1
6	13	21	24	15	10	1
3	9	10	14	10	3	1
1	5	3	5	2	1	0

図 12 図 11 の画素値：(a) 劣化前の画像の画素値, (b) 劣化画像の画素値
 Fig. 12 Pixel values of Fig. 11: (a) Pixel values of non-blurred image, (b) Pixel values of blurred image.

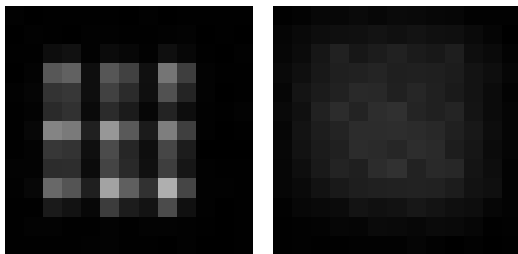


図 13 全 LED 点灯の例：(a) 劣化前の画像, (b) 劣化画像
 Fig. 13 Example of lighting pattern of all-on LEDs: (a) Non-blurred image, (b) Blurred image.

群は輝度の高い画素を中心に、周辺の 8 画素の範囲に留まっている。それに対し、図 12 (b) のピントずれした画像では、LED 画素値群の中心輝度値は図 12 (a) よりも減少し、画素値群の範囲も拡大している。本実験では、図 12 (b) で示すような劣化画像を用いて、提案手法の性能を評価する。図 13 (a) と (b) に、送信機の全ての LED が点灯した際の劣化前と後の撮影画像をそれぞれ示す。図 13 (a) から分かるように、劣化

表 4 実験結果 (BER 特性)
 Table 4 Experimental result (BER performance).

Conventional method	Proposed method
1.1×10^{-1}	0.0

前の各 LED 画素群の中心と隣接する LED 画素群のそれとの間はわずか 2 画素である。ゆえに、図 13 (b) のような画像劣化によって、複数の LED が受信画像内の各画素に影響を及ぼし合う状況になっていると言える。

表 4 に、実験から求めた BER 特性を示す。4. でシミュレーションと同様、比較のため、従来の OOK 復号方法でデータ復調を行った結果も従来手法として同表に示す。表から分かるとおり、従来手法では BER が 1×10^{-1} を超え、頻繁に誤りが起こるのに対し、提案手法ではエラーフリーを達成している。これは、シミュレーション時と同様、画像の劣化により、複数の LED が受信画像の各画素に互いに影響を及ぼし合う劣悪な環境下でも、提案手法によって各 LED の状態を判別可能である事を意味する。つまり、本実験のように各 LED が画素にもたらす影響 $G(p, q)$ を取得できれば、画像の劣化が引き起こされたとしても、提案手法を用いる事でデータ復調の正確性を高められると考える。以上から、実験の面からも提案手法の有効性を確認できたと言える。

上述したとおり、本実験は送信機受信機共に静止した環境で行った。ここで、送受信機間が車の移動により変化する路車間可視光通信での画像劣化度合いとそれに対する提案手法の有効性について述べる。移動環境の場合、撮影画像上の LED は送受信機間の距離等の要素により拡がり (劣化) が生じる。それら画像に写る LED の拡がり、3. で述べたように、撮像面上での LED 像と当該ピクセルとの距離をパラメータとした二次元ガウス関数で近似される。このとき、式 (4) で定義されたカーネル関数の分散 σ_g^2 は、送受信機間の距離により変化し、その変化は以下の式で表すことができる [11]。

$$\sigma_g^2 = \rho\gamma\nu\left(\frac{1}{f_l} - \frac{1}{\nu} - \frac{1}{l}\right) \quad (12)$$

ここで、 f_l は焦点距離、 l はレンズ主点から物体までの距離、 ν はレンズ主点から撮像面までの距離、 γ はレンズの開口径、 ρ はレンズに依存する定数である。送受信機間の距離が変化することで、 σ_g^2 の値が変化し、フィルタの係数の値も変化する。そのため、送受

信機間の距離の変化に伴い、撮影画像上での LED 光の拡がりが増えることとなる。静止環境では、ある一定の距離のみを考えるだけでよいが、 $G(p, q)$ が変化することを考慮していないが、動作環境においては移動によって変化する $G(p, q)$ を考慮する必要がある。 $G(p, q)$ は、上述したように LED の単独点灯画像から取得することができる。そのため、移動によって変化する LED 送信機の位置を常に認識してさえいれば $G(p, q)$ は取得することが可能といえる。また、事前に LED 送信機の形状を知っておくことで、受信機側での LED 送信機の認識及び各 LED の位置 (座標) 情報の取得を容易にする。ゆえに、送信機の点滅パターンとして各 LED が単独に点灯する単独点灯パターンを組み込むことにより、移動環境でも容易に $G(p, q)$ を取得できると考える。

6. む す び

本論文では、高速度カメラを用いた LED 可視光通信において、送受信機間の距離の変化により撮影画像が劣化、特に画像がボケる状況において、そのボケの影響を考慮した新たな信号復号手法を提案した。シミュレーション結果及び実験結果から提案手法は従来の復号方式に比べ、画像劣化に対する耐性に強く、優れた BER 特性をもつことが確認できた。今後の課題として、実機を用いた移動環境での実験による提案手法の性能を評価する。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 24760307、平成 26 年度高専—長岡技科大共同研究助成、平成 26 年度高専連携教育研究プロジェクト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] 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.
- [2] 中川正雄, "ユビキタス可視光通信," 信学論 (B), vol.J88-B, no.2, pp.351–359, Feb. 2005.
- [3] H. Okada, K. Masuda, T. Yamazato, and M. Katayama, "Successive interference cancellation for hierarchical parallel optical wireless communication systems," 11th Asia-Pacific Conference on Communications, pp.788–792, Oct. 2005.
- [4] T. Yamazato and S. Haruyama, "Image sensor based visible light communication and its application to pose, position, and range estimations," IEICE Trans. Commun., vol.E97-B, no.9, pp.1759–1765, Sept. 2014.
- [5] 山里敬也, "LED アレイ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.

- [6] T. Yamazato, I. Takai, H. Okada, T. Fujii, T. Yendo, S. Arai, M. Andoh, T. Harada, K. Yasutomi, K. Kagawa, and S. Kawahito, "Image Sensor based Visible Light Communication for Automotive Applications," IEEE Communication Mag., pp.88–97, July 2014.
- [7] 高井 勇, 原田知育, 安藤道則, 川人祥二, "空間光通信イメージセンサによる車車間通信システムの開発," 信学技報, ITS2011-39, Feb. 2012.
- [8] 須川成利, "CMOS イメージセンサにおける高速化技術の動向," 映像学誌, vol.66, no.3, pp.174–177, March 2012.
- [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] 西本早耶香, 山里敬也, 岡田 啓, 藤井俊彰, 圓道知博, 荒井伸太郎, "LED アレイ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," 信学論 (B), vol.J96-B, no.2, pp.191–201, Feb. 2013.
- [11] 増田幸仁, 圓道知博, 山里敬也, 岡田 啓, メヒルダドバナヒブルテヘラニ, 藤井俊彰, 谷本正幸, "路車間並列光通信の通信路特性と受信システム," 情報科学技術フォーラム講演論文集, vol.9, no.4, pp.51–55, Aug. 2010.
(平成 26 年 10 月 28 日受付, 27 年 2 月 25 日再受付)



大平 祐生 (学生員)

平 26 香川高専・工・情報通信工学卒。現在、同高専・専攻科在学中。ITS 無線技術、可視光空間通信の研究に従事。IEEE 学生員。



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、確率共鳴に関する研究に従事。平 20 本会学術奨励賞受賞。IEEE 会員。



圓道 知博 (正員)

平 8 東工大・工・制御工卒。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 10TAO・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。3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。



鎌倉 浩嗣 (正員)

平 9 慶大・理工・電気卒。平 11 同大学院修士課程了。平 14 同大学院博士課程了。博士(工学)。平 11~14 日本学術振興会特別研究員。平 14~18 千葉大・電子機械・助手。平 18 千葉工業大学・情報・講師。平 21 同准教授。平 14・15 (各 3ヶ月) オタワ大訪問研究員。平 14 エリクソンヤングサイエンティストアワード 2002 受賞。主として通信ネットワークに関する研究に従事。IEEE 会員。



山里 敬也 (正員:フェロー)

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・エトピア科学研究機構, 平 19 同大・エトピア科学研究所・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。平 25 本会フェロー称号受賞。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。



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修了。平成 11 同大学院博士課程後期課程修了。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 名大・エトピア科学研究所・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 25 本会・通信ソサイエティ ComEx Best Letter Award。



藤井 俊彰 (正員)

平成 2 東大・工・電子卒。平成 7 同大学院博士課程修了。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。平成 23 名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻准教授。平成 24 名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻教授。3次元映像通信, 3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。