

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04378

研究課題名(和文) イメージセンサ型可視光通信のための通信範囲拡大技術

研究課題名(英文) Coverage extension technology for image sensor type visible light communication

研究代表者

鎌倉 浩嗣 (Kamakura, Koji)

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：60344967

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、複数の発光ダイオードが二次元的に配置される点に注目し、カメラのイメージセンサで受信する可視光通信(VLC)を高度道路交通システムへ応用するものであった。LEDから送出するデータをISで受信するVLCでは、その通信範囲を拡大するための符号化技術と、異なるフレームレートで動作するカメラ受信機が混在する環境において、データレートの異なる複数のデータを単一の送信機から送信する重畳伝送技術の確立が必要であった。ISを用いたVLCは、離散的に配置されたピクセル分解能のために通信可能な距離に限界があったが、その限界を超えて通信を可能にする本研究の符号化方式によって、通信速度を高速化が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の学術的意義は、これまでの単一フォトダイオードを受信機とする可視光通信(VLC)が一次元通信路でしかなかったのに対して、申請者が対象とするVLCは、二次元的に配置されたLEDからの送信光を、その二次元構造を保ったままIS上の各ピクセルにおける輝度値として記録される点にある。このような二次元通信路を研究対象とし、その二次元通信路の面の大きさが、距離に応じて縮退する場合にも通信を続けさせるという学術的「問い」に、符号化という点で解決手段を提示する点は革新的である。

研究成果の概要(英文)：This research focused on two-dimensional arrangement of multiple light-emitting diodes and applied visible light communication (VLC) received by an image sensor installed in a camera to an intelligent transportation system. In VLC, which receives data sent from multiple LEDs with IS, multiple data with different data rates can be processed in an environment where encoding technology to expand the communication range and camera receivers operating at different frame rates coexist. This was the establishment of superimposition transmission technology that transmits from a single transmitter. VLC using IS had a limited communication distance due to the resolution of discretely arranged pixels. Higher speed is now possible.

研究分野：通信工学

キーワード：可視光通信 時空間符号化 イメージセンサ LED 階層的符号化 二次元通信路 光直交周波数分割多重

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、複数の発光ダイオード (Light Emitting Diode: LED) が二次元的に配置される点に注目し、カメラに備えられたイメージセンサ (Image Sensor: IS) で受信する可視光通信 (Visible Light Communication: VLC) を高度道路交通システム (Intelligent Transport Systems: ITS) へ応用するものである。具体的な研究課題は、複数の LED から送出するデータを IS で受信する VLC において、その通信範囲を拡大するための符号化技術と、異なるフレームレートで動作するカメラ受信機が混在する VLC 環境において、データレートの異なる複数のデータ系列を単一の送信機から送信する重畳伝送技術の確立である。

## 2. 研究の目的

本研究の主たる目的は、IS を用いた VLC は、離散的に配置されたピクセルの分解能のために通信可能な距離に限界があるが、その限界を超えて通信を可能にする符号化方式の通信速度を高速化する符号化方式を検討し、実証実験によって、ビット誤りなしで可能な通信距離を明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

イメージセンサ (IS: Image Sensor) カメラを搭載する携帯端末の普及により、可視光通信 (VLC: Visible Light Communication) が注目されている。IS 型 VLC は、既存の携帯端末を受信機に利用できるため、追加費用なく電波の使用が制限される場所での通信が行える魅力がある。例えば、デジタルサイネージを送信機に用いて、スマートフォン (カメラ) を受信機に用いる通信は電波を必要としない無線通信の一種である。IS 型 VLC の通信速度はカメラのフレームレートに依存するため、低フレームレートのカメラでも通信速度を上げるために、1 フレームあたりのビット数を増加させる研究が盛んに行われている。そのような研究の一つに空間並列伝送 (PT: Parallel Transmission) がある。PT 方式では、P 値位相シフトキーイング (P-PSK: P-ary Phase Shift Keying) で変調された  $N=(M_0-1)/2$  個の空間周波数を含む  $M_0$  個の離散信号を、液晶ディスプレイ (LCD: Liquid Crystal Display) 上の  $M_0$  個の送信領域を用いて並列に伝送する。受信機のカメラは LCD の  $M_0$  個の送信領域を撮影し、 $M_0$  個の輝度値を得る。 $M_0$  個の輝度値は、 $N$  個の空間周波数を取り出すために離散フーリエ変換 (DFT: Discrete Fourier Transform) に入力され、各空間周波数の PSK シンボルが復調される。したがって、1 フレームあたりのビット数は  $N \times \log P$  ビットとなり、空間周波数の数  $N$  が増えるとともに増加する。

しかし、PT 方式の信号は本質的に直交周波数変調 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 信号であるため、復調誤りなしの  $N$  の数を増加させようとすると高ピーク対平均電力比 (PAPR: Peak-to-Average Power Ratio) の問題に直面する。OFDM を用いた方式において、少ないキャリア数で通信速度を上げる方法に並列コンビネータ (PC: Parallel Combinatory) OFDM がある。PC-OFDM では、信号が振幅ゼロのキャリアと非ゼロのキャリアから構成される。このとき、ゼロと非ゼロのキャリアの組合せを考えると、それぞれの組合せに追加ビットを割り当てることが可能である。PC 変調は時

間領域の OFDM には適用されるものの、空間領域の OFDM、つまり PT 方式には適用されていない。

そこで、M 点コンビネータ (MC: M-point Combinatory) 変調を用いた PT 方式を提案した。提案する MC 変調では、フレーム毎に  $M_0$  個の送信領域の中から  $M$  ( $M < M_0$ ) 個の送信領域を選択し、それらを  $M$  個の離散信号の伝送に使用する。  $M_0$  個の中から  $M$  個を選ぶとき、 ( $M_0 M$  通りの組合せがあるため、LCD 上に配置される  $M_0$  個の送信領域の中から  $M$  個を選ぶ組合せに  $L$  ビット割り当てられる。選ばれた  $M$  個の送信領域は、  $N=(M-1)/2$  個の空間周波数を入力とした  $M$  点 IDFT から生成される  $M$  個の離散信号の伝送に使用される。受信機側は、LCD 上の  $M_0$  個の送信領域を撮影した画像から  $M_0$  個の受信輝度値を得る。MC 復調では、  $M_0$  個の受信輝度値が降順に並び替えられ、上位  $M$  個の輝度値をもつ領域を送信側が使用した送信領域であると決定する。MC 復調の後、PSK シンボルは MC 復調で決定された  $M$  個の輝度値より復調される。実験結果より、8-PSK で変調した場合、従来の PT 方式では 180 bits/frame まで誤りなし伝送を達成したのに対し、提案する MCPT 方式では 697 bits/frame まで達成したことを示す。

#### 4. 研究成果

右図に、MC を用いる場合と用いない場合の PT における、誤りなし伝送を達成した一フレームあたりのビット数を示

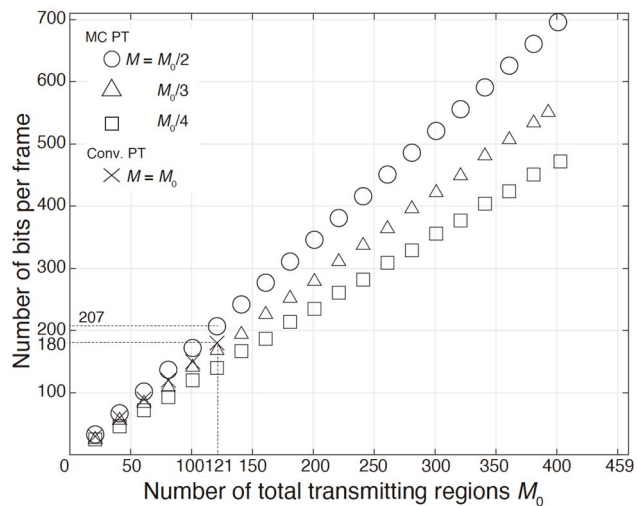
す。図のマークは、すべての送信領域の数が  $M_0$  のときに観測された誤りがないことを示す。例えば、従来の PT 方式 (×印) では、  $M_0=M=121$  まで誤りなくビットの伝送ができ、1 フレームあたりのビット数は

180 ,bits/frame であった。また、  $M=M_0/2, M_0/3, M_0/4$  の MCPT 方式では、それぞれ

$M_0=402, 393, 404$  まで誤りがなく、一フレームあたりのビット数は 697 bits/frame , 551 bits/frame , 472 bits/frame であった。

図より、  $M_0=121$  の場合、  $M=M_0/2$  の MCPT 方式は 207 ,bits/frame であり、従来の PT 方式の 180 ,bits/frame よりも高いデータレートで誤りなし伝送を達成した。

一方、  $M=M_0/3, M_0/4$  の MCPT 方式も誤りなし伝送を達成したが、1 フレームあたりのビット数はそれぞれ 168 ,bits/frame , 140 ,bits/frame と、従来の PT 方式よりも低くなった。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takumi Sato, Koji Kamakura, Masayuki Kinoshita, Takaya Yamazato	4. 巻 41
2. 論文標題 M-Point Combinatory for Parallel Transmission Image Sensor-Based Visible Light Communications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 515, 523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2022.3218071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Yamamoto, T. Yamazato, H. Okada, M. Kinoshita, K. Kamakura, S. Arai, T. Yendo, T. Fujii	4. 巻 10
2. 論文標題 Vehicle Distance Measurement based on Visible Light Communication Using Stereo Cameras	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 498, 504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山本拓也, 山里敬也, 岡田啓, 木下雅之, 鎌倉浩嗣, 荒井伸太郎, 園道知博, 藤井俊彰	4. 巻 J104-B
2. 論文標題 LED信号機対高速イメージセンサ間可視光通信における逆曇み込みを用いたLED間干渉除去手法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 938, 948
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kotomi Takahashi, Koji Kamakura, Masayuki Kinoshita, Takaya Yamazato	4. 巻 39
2. 論文標題 Luminance Inversion for Parallel Transmission Visible Light Communication Between LCD and Image Sensor Camera	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 6759, 6767
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 YAMAMOTO Takuya, YAMAZATO Takaya, OKADA Hiraku, KINOSHITA Masayuki, KAMAKURA Koji, ARAI Shintaro, YENDO Tomohiro, FUJII Toshiaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Comparison of Distance Performances of Modulation Schemes in Intelligent Transport System Image Sensor Communication	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 1,6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2021ETL0032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 有末 知矢, 木下 雅之, 山里 敬也, 岡田 啓, 鎌倉 浩嗣, 荒井 伸太郎, 圓道 知博, 藤井 俊彰	4. 巻 J103-A
2. 論文標題 移動環境におけるDMDプロジェクタを用いたイメージセンサ可視光通信の性能評価実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子電子情報通信学会論文誌A 基礎・境界	6. 最初と最後の頁 283 ~ 286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transfunj.2020JAL2005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 亀川智史, 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣	4. 巻 J102-B
2. 論文標題 イメージセンサ可視光通信におけるプリコードPWMの性能評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 962-965
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2019JBL4002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣	4. 巻 J102-B
2. 論文標題 高速二眼カメラによる画素選択/最大比合成受信を適用した可視光通信性能の評価実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 90-97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2018GTP0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣	4. 巻 J102-B
2. 論文標題 高速二眼カメラによる画素選択/最大比合成受信を適用した可視光通信性能の評価実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 90,97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 亀川智史, 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣	4. 巻 J102-B
2. 論文標題 イメージセンサ可視光通信におけるプリコードPWMの性能評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 962,965
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 R. Huang, T. Yamazato, M. Kinoshita, H. Okada, K. Kamakura, S. Arai, T. Yendo, T. Fujii
2. 発表標題 Vehicle Distance Measurement based on Visible Light Communication Using Stereo Cameras
3. 学会等名 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayuki Kinoshita, Takumi Toguma, Shun Yamaguchi, Sora Ibaraki, Koji Kamakura, Takaya Yamazato
2. 発表標題 Performance Enhancement of Rolling Shutter Based Visible Light Communication via Selective Reception Using Dual Cameras
3. 学会等名 2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kotomi Takahashi;Koji Kamakura;Masayuki Kinoshita;Takaya Yamazato
2. 発表標題 Luminance Inversion for Parallel Transmission VLC between LCD and Image Sensor Camera
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Communications (ICC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ruiyi Huang;Masayuki Kinoshita;Takaya Yamazato;Hiraku Okada;Koji Kamakura;Shintaro Arai;Tomohiro Yendo;Toshiaki Fujii
2. 発表標題 Performance Evaluation of Range Estimation for Image Sensor Communication Using Phase-only Correlation
3. 学会等名 2020 IEEE Globecom Workshop
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kotomi Takahashi;Koji Kamakura;Masayuki Kinoshita;Takaya Yamazato
2. 発表標題 Nonlinear Transform for Parallel Transmission for Image-Sensor-based Visible Light Communication
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋琴美・鎌倉浩嗣・木下雅之・山里敬也
2. 発表標題 空間並列伝送イメージセンサ型可視光通信における非線形コンパニング
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションシステム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koki Yamamur, Koji Kamakura, Masayuki Kinoshita, Takaya Yamazato
2. 発表標題 Three-Frame Demodulation for Non-Synchronous Square Wave Quadrature Amplitude Modulation
3. 学会等名 1st Workshop on Optical Wireless Communication for Smart City (1st OWC2) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kotomi Takahashi, Koji Kamakura, Masayuki Kinoshita, Takaya Yamazato
2. 発表標題 Nonlinear Companding scheme for Parallel Transmission for Image-Sensor-based Visible Light Communication
3. 学会等名 1st Workshop on Optical Wireless Communication for Smart City (1st OWC2) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ruiyi Huang, Takaya Yamazato, Hiraku Okada, Masayuki Kinoshita, Toshiaki Fujii, Shintaro Arai, Tomohiro Yendo, Koji Kamakura
2. 発表標題 Range estimation for traffic light based on visible light communication using stereo cameras
3. 学会等名 1st Workshop on Optical Wireless Communication for Smart City (1st OWC2) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Yamamoto, Takaya Yamazato, Hiraku Okada, Masayuki Kinoshita, Koji Kamakura, Shintaro Arai, Tomohiro Yendo, Toshiaki Fujii
2. 発表標題 Nonlinearity Mitigation of Received Luminance Using Inverse Pattern of the LED array in Image Sensor Communication
3. 学会等名 1st Workshop on Optical Wireless Communication for Smart City (1st OWC2) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Tomoya Arisue, Takaya Yamazato, Hiraku Okada, Masayuki Kinoshita, Shintaro Arai, Tomohiro Yendo, Koji Kamakura, Toshiaki Fujii
2. 発表標題 An Experiment of Image Sensor Communication Using Digital Micromirror Device Projector as a Vehicle Headlight
3. 学会等名 1st Workshop on Optical Wireless Communication for Smart City (1st OWC2) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Hori, M. Kinoshita, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, K. Kamakura, T. Yendo, S. Arai
2. 発表標題 An LED Transmitter Detection using Linear SVM and CNN for ITS Image Sensor Communication
3. 学会等名 3rd International Conference and Exhibition on Visible Light Communications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayuki Kinoshita, Koji Kamakura, Takaya Yamazato, Hiraku Okada, Toshiaki Fujii, Shintaro Arai, Tomohiro Yendo
2. 発表標題 Stereo Ranging Method Using LED Transmitter for Visible Light Communication
3. 学会等名 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayuki Kinoshita, Koji Kamakura, Takaya Yamazato
2. 発表標題 Visible Light Communication and Ranging System Using High-speed Stereo Cameras
3. 学会等名 2019 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------