

単一光源を用いた複数動画カメラへの 選択的可視光通信

平野 新^{1,a)} 嶋田 祥太¹ 橋爪 宏達² 杉本 雅則¹

概要: 本稿では、OFDM 変調信号における各キャリア波の受信感度の相違を利用することにより、単一光源と複数動画カメラを用いた選択的可視光通信手法を提案する。評価実験では、基本周波数に対する 50 次、75 次、78 次、80 次の搬送波を用い、各搬送波の受信が互いに排他的なるよう、カメラのシャッター開度を設定した。16psk で変調された各搬送波のシンボル誤り率を求め、実験結果により、各キャリア波の通信選択性を確認できた。

キーワード: 可視光通信, OFDM, 選択的通信, 多対一通信, LED, 汎用動画カメラ

Selective visible light communication for multiple video cameras using a single light source

ARATA HIRANO^{1,a)} SHOTA SHIMADA¹ HIROMICHI HASHIZUME² MASANORI SUGIMOTO¹

Abstract: In this paper, we propose a selective visible light communication method using a single light source and multiple video cameras by utilizing their reception sensitivity differences between carrier waves composing of OFDM modulated signals. In evaluation experiments, transmitted signals are composed of 50th, 75th, 78th and 80th order carrier waves and symbols are modulated by 16-psk. Shutter speeds of a camera are set to different values so that it can successfully decode symbols encoded in one of the carrier waves and erroneously in the others. Though experimental results, degree of selectivity of individual carrier waves are confirmed.

Keywords: VLC, OFDM, Selective communication, Many to one credit, LED, Movie cameras

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末などの普及や近年の IoT 技術の発達にしたがい、無線通信の需要はますます高まってきている。現在スマートフォンやタブレット端末などで広く用いられている無線通信方式は、Wi-Fi や Bluetooth 等の電波を用いたものが挙げられる。これらは特定の周波数帯域の電波を複数のチャンネルに分割して送受信する。しかし、異なる送信デバイスが互いに近い位置

にあると干渉が起きたり、あるいは電波の使用が制限されている場所では使用できない等の問題がある。一方、可視光通信には 3 つの大きなメリットが存在する [2]。一つは電波通信の代替もしくは補完が可能な点である。二つ目は既存の LED を可視光通信に利用可能な点である。現在 LED は照明、ディスプレイ、信号機等多様な機器で利用されている。そのためこれらの機器を可視光通信に転用する事は容易であり、導入のハードルは低いと言える。三つ目はその通信範囲の設定が容易である点である。光は電波と異なり物体を透過しにくい性質を持つ。一般的にこれは通信範囲の減少というデメリットになり得る。しかし、逆手に取れば光を遮る事で任意の通信範囲を設定可能であり、通信の保護に繋がる。また、本論文の提案手法と組み合わせる

¹ 北海道大学
Hokkaido University

² 国立情報学研究所
National Institute of Informatics

a) hirano@ist.hokudai.ac.jp

ことで秘話通信の可能性が広がることも考えられる。

可視光通信は、発光ダイオードの普及、低価格化に伴い、実用化を目的とした研究開発が進められている。可視光通信の応用例として信号機を用いた Intelligent Transport System (ITS)[10] や、LED 照明による通信 [1]、将来的な自動運転を見据えた自動車間の通信 [3] などが挙げられる。

しかし、従来の手法では複数の光源から任意の情報源を特定する手法 [6] はあっても単一光源から複数の受信機に情報を選択的に送信する手法は、筆者らの知る限り存在しない。提案手法は、特定のユーザーへの秘匿性の高い情報配信や、テレビ・ラジオのような複数チャンネルによる情報配信等への展開が期待される。本稿では、動画カメラのシャッター開度と呼ばれるパラメータを変更することで任意の情報が受信可能となり、かつ一部の情報が受信困難となる選択的可視光通信手法を提案する。本論文では、関連研究について言及した後、その概要及び数学的根拠を述べる。評価実験では、基本周波数に対する 50 次、75 次、80 次の搬送波を用い、各搬送波の受信が互いに排他的になるよう、カメラのシャッター開度を設定する。16psk で変調された各搬送波のシンボル誤り率の結果により、各キャリア波の通信選択制について議論する。最後に、本稿の結論と課題について述べる。

2. 関連研究

単一光源を用いた可視光通信はパナソニック光 ID 技術 [7] に代表されるように多対一のブロードキャスト通信や複数光源から複数受信機への可視光通信 [9][6] などが一般的である。これらの手法では、公共の場での情報伝達など、多くの人々への多量な情報の伝達に適している。しかし一方で、これらの方式では通信相手を選択することや、秘話通信は難しい。よって、現在の可視光通信は、完全な電波の代替手段となるには難しい部分がある。

可視光通信の暗号化手法としては、一度スマートフォンを媒介として用いる例もある [4]。しかし、このような手法では専用のデバイスが必要となったり、導入へのコスト、ハードルが高くなることが多い。一方、提案手法ではソフトウェア制御のカメラのシャッター開度を変更することで、選択的に通信を行う。また、その性質から一部の情報が復号しづらくなる事で、通信の秘匿性が上がる可能性を示唆する。

3. 提案手法

3.1 手法の概要

提案手法の概要を図 1 に示す。送信機に LED 面光源、受信機にローリングシャッター方式の汎用動画カメラを用いる。LED は、異なる周波数を持つ正弦波の合成波 (図 2) を、次節で示す [5][8] の手法を用いて発光させる。

信号を受信する汎用動画カメラは、一定のシャッター

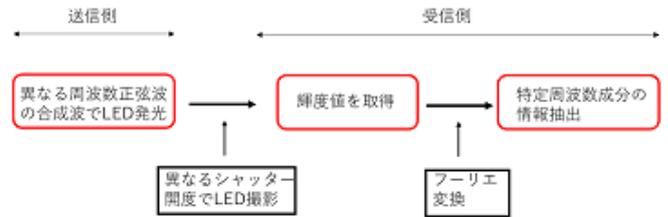


図 1 選択的可視光通信の概要

Fig. 1 An overview of selective visible light communication

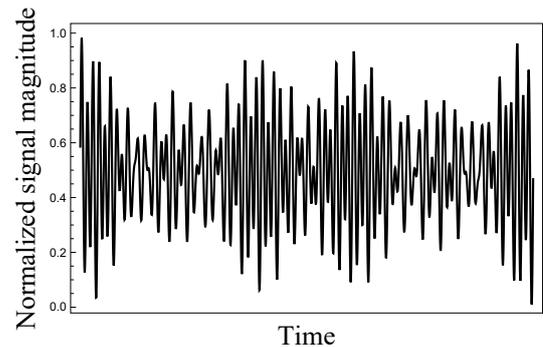


図 2 合成波の一例

Fig. 2 An example of synthetic wave

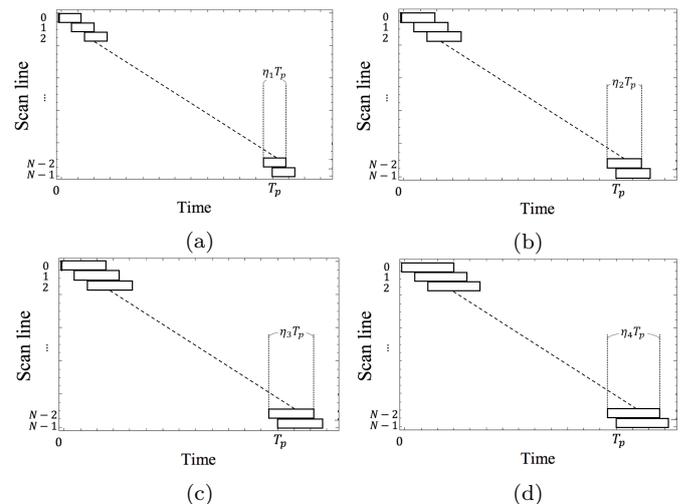


図 3 異なるシャッター開度における、ローリングシャッター方式カメラでの走査線動作

Fig. 3 Line scan sampling of rolling shutter cameras

開度で LED を撮影する (図 3)。この時、撮影時に用いたシャッター開度によって得られる輝度値の波形が異なる (図 4)。この得られた波形にフーリエ変換を行うと、特定周波数成分のみが復調され、他の周波数成分は検出されない (図 5)。本研究ではこの性質を用いて情報の選択性を実現している。

3.2 選択的可視光通信

周波数軸上に等間隔に並べた搬送波 $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots, K\omega$ を用意し、各搬送波でシンボル列 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_K$ を変調する。

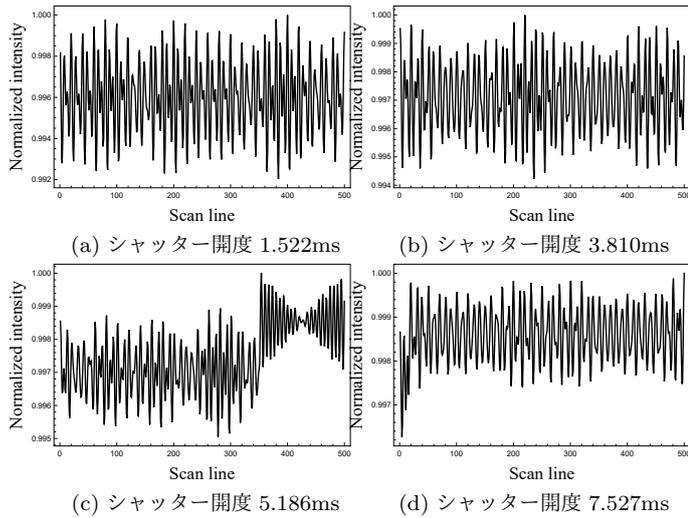


図 4 異なるシャッター開度で合成波を撮影した時に得られる輝度値
Fig. 4 Brightness each scan line block by shooting a synthetic wave

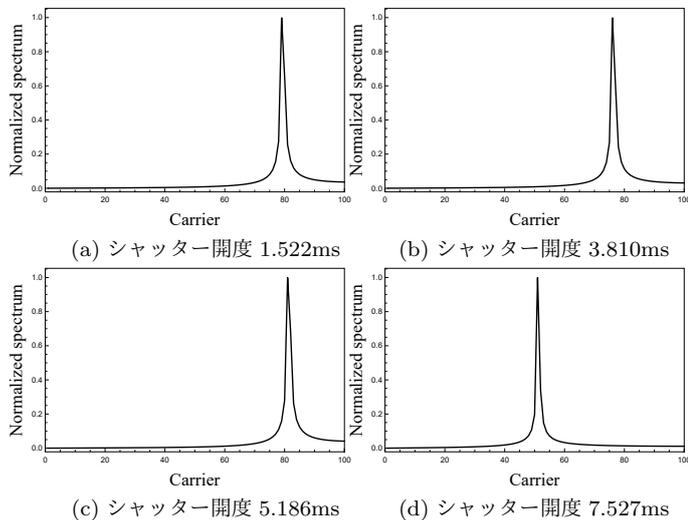


図 5 図 4 をフーリエ変換する事で得られるスペクトル分布の例
Fig. 5 Examples of spectral distribution obtained by fourier transform Fig. 4

これは、

$$\beta_k = \begin{cases} \sigma_k & (k > 0) \\ \overline{\sigma_k} & (k < 0) \end{cases} \quad (1)$$

として ($\overline{\sigma_k}$ は σ_k の複素共役), カメラ周期を T_p (フレームレートの逆数) とする. 搬送波の基本周波数を $\omega = 2\pi/T_p$ とすると送信信号 $b(t)$ は, β_k をフーリエ係数と見立てて逆フーリエ変換を行うことで,

$$b(t) = \sum_{k=-K}^K \beta_k e^{jkt/T_p} \quad (2)$$

と表せる. この信号を今回用いたローリングシャッタ方式カメラで画面全体に受光する. ただし各走査線の感度は等しいものとし, 走査線の全ライン数を N とする. また, 現在注目しているラインを第 n ラインとする ($n = 0, 1, 2, \dots, N-1$).

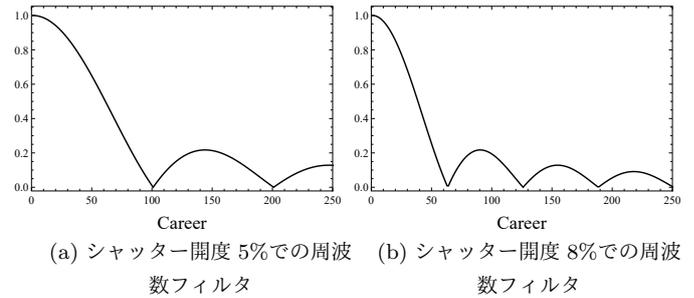


図 6 各シャッター開度に対応する周波数フィルタの例
Fig. 6 Examples of frequency filter with each shutter opening

また, η はシャッター開度である. カメラ撮像素子の動作は積分的であることから, この撮影ラインで得られる信号は, $b(t)$ に対し輝度値は

$$I_n = \frac{A}{T_p} \int_{nT_p}^{nT_p + \eta T_p} b(t) dt \quad (3)$$

と表せる. A は送受信器間の伝達効率により決まる係数であるが, 便宜的に $A = 1$ としてこれを無視する. 撮影して得た 1 フレーム $\mathbf{I} = (I_0, I_1, I_2, \dots, I_{N-1})^T$ を空間フーリエ級数に変換すれば, その k 次の係数 B_k は,

$$B_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{-j2\pi kn} \quad (-N/2 \leq k \leq N/2 - 1). \quad (4)$$

この I_n に式 (3) を代入, さらに発光信号は変調シンボルの逆フーリエ変換であったことを利用すると,

$$B_k = \eta e^{j\pi k \eta} \text{sinc}(\pi k \eta) \beta_k. \quad (5)$$

フレーム \mathbf{I} を空間フーリエ変換して $\mathbf{B} = \text{FFT}[\mathbf{I}]$ とすると, フーリエ係数 B_k は送信シンボル β_k に対応することがわかった. しかしカメラの積分的動作により

$$\eta e^{j\pi k \eta} \text{sinc}(\pi k \eta) \quad (6)$$

という係数がかかり, 一種の周波数フィルタになっている (図 9). ここで η はシャッター開度であるため 0 とはならず, $e^{j\pi k \eta}$ も 0 とはならない, したがって $\text{sinc}(\pi k \eta)$ の値が 0 となるような k と η の組み合わせの場合, 信号の伝搬強度は限りなく小さくなり, 信号は復調されない. 異なるシャッター開度での sinc 関数のグラフを見ると, シャッター開度の変更により, その読み取り可能な搬送波が変化することがわかる. 例としてシャッター開度 5% と 8% のグラフを図 6 に示す.

よって本論文では, このシャッター開度に対応した sinc 関数の値が 0 となる位置が互い違いになるようなシャッター開度 (周波数フィルタ) を用い, 複数台で単一光源を撮影したときに異なる情報のみを復号可能であることを示した.

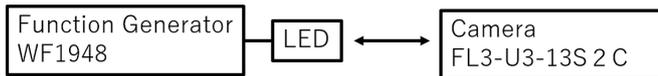


図 7 実験機材の構成

Fig. 7 Configuration of experimental apparatus

4. 評価実験

4.1 実験環境

計測実験のために準備した環境を以下に示す. 受信側は Point Gray 社の FL3-U3-13S2C を使用し, 60fps でシャッター開度を 1.68ms(1.0%) と 0.99ms(0.6%) として撮影した. 送信側は OptoSupply Limited 社の青色 LED OSB56A5111A(以下 LED) を面光源として用い, NF 回路設計ブロック社の WF1948 により送信信号を生成した.

また, 撮影は動画カメラと LED を距離 0.015m に近接させ, 暗室下で行った. これらの構成は図 7 の通りである.

4.2 送信波形

実験では全部で 32 フレーム分の信号を 25 回分, 計 800 フレームの信号を受信した. このデータを基に 25 個の同一信号の平均輝度値を計算することにより, 雑音の低減を図った.

送受信した 32 フレームの内訳は,

- 1~4 フレーム目: 周辺減光補正用信号
- 5~8 フレーム目: 同期用信号
- 9~12 フレーム目: 通信路推定用信号
- 13~32 フレーム目: 16-PSK 変調信号 (20 パターン)

とした.

LED の発光特性は中心が明るく, また, 周辺減光と呼ばれるカメラレンズの特性により, 中心の方が感度が高く, 画像端は暗くなる (図 8). そのため直流電圧で印加した LED の輝度値を最初に測ることで, そのデータを基に補正を行った. 次に, 周辺減光補正用信号より高電圧の直流電圧で LED を光らせ, 周辺減光補正用信号と同期用信号との輝度差を見ることで信号開始点の推定を行った. さらに, 通信に用いる各周波数正弦波の無変調信号の合成波を発生し, 各正弦波の位相・振幅変化を計測することで通信路推定を行った. 最後に, 搬送波を位相変調し情報を送信, これを用いて通信性能の評価を行った. 受信機カメラは, 汎用動画カメラで一般的な 60fps で動作させた. この場合, 撮像素子が反応しないデッドタイムは 1/120 秒となるため, 光源側は基本周波数を 120Hz として発光させた. 本実験では, 4 つの異なる搬送波として, 基本周波数 120Hz の 78 次 (9360Hz), 75 次 (9000Hz), 80 次 (9600Hz), 50 次 (6000Hz) の高調波を選んだ. また, 各搬送波に対する受信ができるだけ排他的になるよう, カメラのシャッター

表 1 理論的信号強度

Table 1 Theoretical signal strength

シャッター開度	搬送波次数			
	78 次	75 次	80 次	50 次
1.522ms	1	0.0078	0.0078	0.0078
3.810ms	0.0030	1	0.0030	0.0030
5.186ms	0.11	0.020	1	0.020
7.527ms	0.0057	0.093	0.050	1

開度をそれぞれ 1.522ms (20.00%), 3.810ms (50.00%), 5.186ms (67.99%), 7.527ms (98.72%) に設定した. これらの値は, $\text{sinc}(\pi k\eta)$ が 0 となる k と η の組み合わせを基に, 各搬送波の排他性をできる限り満足するよう, 最適化計算により求めた. この周波数フィルタを基に, 理論的な信号強度を推定した. シャッター開度 1.522ms では 78 次搬送波, シャッター開度 3.810ms では 75 次搬送波, シャッター開度 5.186ms では 80 次搬送波, シャッター開度 7.527ms では 50 次搬送波を基準に正規化した信号強度を表 1 に示す.

4.3 実験結果

16-psk を用いて搬送波に位相変調を施し, 実験結果から通信選択性が示された.

各シャッター開度から得られる周波数フィルタの概形はそれぞれ図 9 で表される. また, 各シャッター開度で撮影して得られたコンスタレーションを示す (図 10, 図 11, 図 12, 図 13).

これらの図から, シャッター開度 1.522ms の場合は 78 次の搬送波, 3.810ms の場合は 75 次の搬送波, 5.186ms の場合は 80 次の搬送波, 7.527ms の場合は 50 次の搬送波, においてコンスタレーションが単位円周上に復調された. また, それ以外のシャッター開度と搬送波次数との組み合わせに関して, 各シンボルは単位円周上に復調されず, 不規則に復調された.

これらのシンボル誤り率は表 2 の通りである. どのシャッター開度で撮影しても, 同じ情報源を撮影しているため, 全ての搬送波情報が伝達できていると仮定すると, 今回用いた全てのシャッター開度において各搬送波情報は同一となるが, 提案手法で示した通り, 特定の組み合わせ以外では復調されない. これから特定のシャッター開度と搬送波の組同士の排他的な関係がわかる. よって通信の選択性が示されていると言える. また, 表 1, 表 2 より各シャッター開度において理論的信号強度とシンボル誤り率の値は反比例しており, 実験結果が理論と一致することが確認できた.

5. 結論と今後の課題

本論文では, 16-psk で位相変調された OFDM 信号を用いて, 任意の搬送波情報を伝達し, 他の搬送波情報は復号困難となる選択的可視光通信手法を提案した. これによ

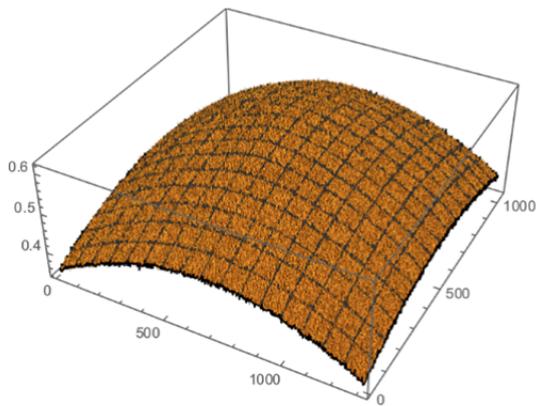


図 8 周辺減光の様子
Fig. 8 Peripheral dimming

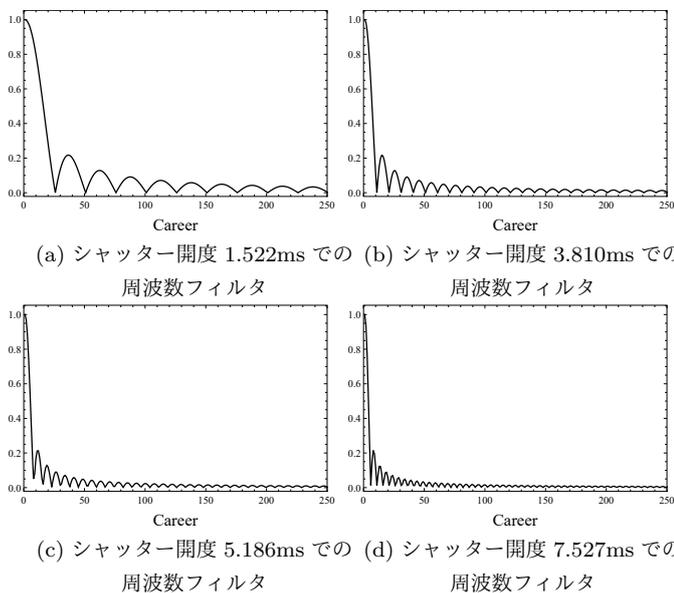


図 9 各シャッター開度に対応する周波数フィルタの概形
Fig. 9 Frequency filter with each shutter opening

表 2 シンボル誤り率
Table 2 Symbol error rate

シャッター開度	搬送波次数			
	78 次	75 次	80 次	50 次
1.522ms	0	0.8	0.85	0.9
3.810ms	0.85	0	1	0.9
5.186ms	0.65	0.7	0	0.9
7.527ms	0.85	0.65	1	0

り、動画カメラのシャッター開度と呼ばれるパラメータを変更することで、あたかもテレビ・ラジオのチャンネルを変更するように情報を選択できることを確認した。また、シャッター開度に対応しない搬送波情報が復号困難となることは通信の保護への発展可能性を持つと言える。

今後の課題としては大きく分けて二つ挙げられる。

- より多くの搬送波を用い、また変調方法を改善しシンボル数を増やすことでシンボル当たりの情報量を増やし、より多くの情報量を伝達可能にすることでシステ

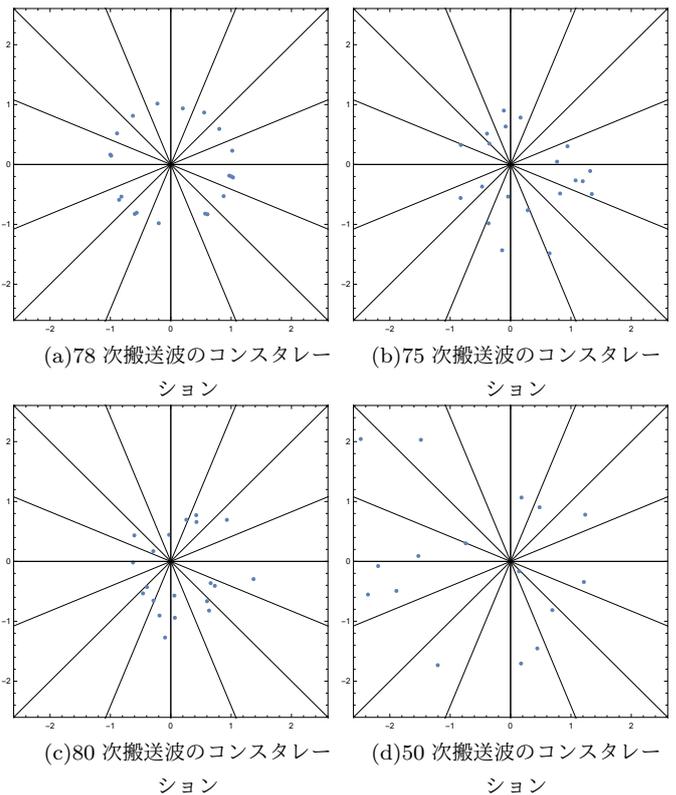


図 10 シャッター開度 1.522ms における各搬送波のコンスタレーション
Fig. 10 Constellation of each carrier wave in shutter opening 1.522 ms

ム全体での通信速度の向上を図る。

- 提案手法をスマートフォンに実装することによって、実用的なアプリケーションを開発する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 16H03070 および 17K19952 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Komine, T. and Nakagawa, M.: Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights, *IEEE transactions on Consumer Electronics*, Vol. 50, No. 1, pp. 100-107 (2004).
- [2] Pathak, P. H., Feng, X., Hu, P. and Mohapatra, P.: Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges, *IEEE communications surveys & tutorials*, Vol. 17, No. 4, pp. 2047-2077 (2015).
- [3] Yamazato, T., Takai, I., Okada, H., Fujii, T., Yendo, T., Arai, S., Andoh, M., Harada, T., Yasutomi, K., Kagawa, K. et al.: Image-sensor-based visible light communication for automotive applications, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, No. 7, pp. 88-97 (2014).
- [4] Yang, L., Kevin, L., Hung-Yu, C., Liang-Yu, W., Chin-Wei, H., Chi-Wai, C. and Chien-Hung, Y.: Light encryption scheme using light-emitting diode and camera image sensor, *IEEE Photonics Journal*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-7 (2016).
- [5] 橋爪宏達, 杉本雅則: 汎用動画カメラを用いた OFDM 可視光通信, *電子情報通信学会誌*, Vol. 101, No. 1, pp. 44-51 (2018).
- [6] 白木康建, 山里敬也, 岡田 啓, 藤井俊彰, 圓道知博, 荒

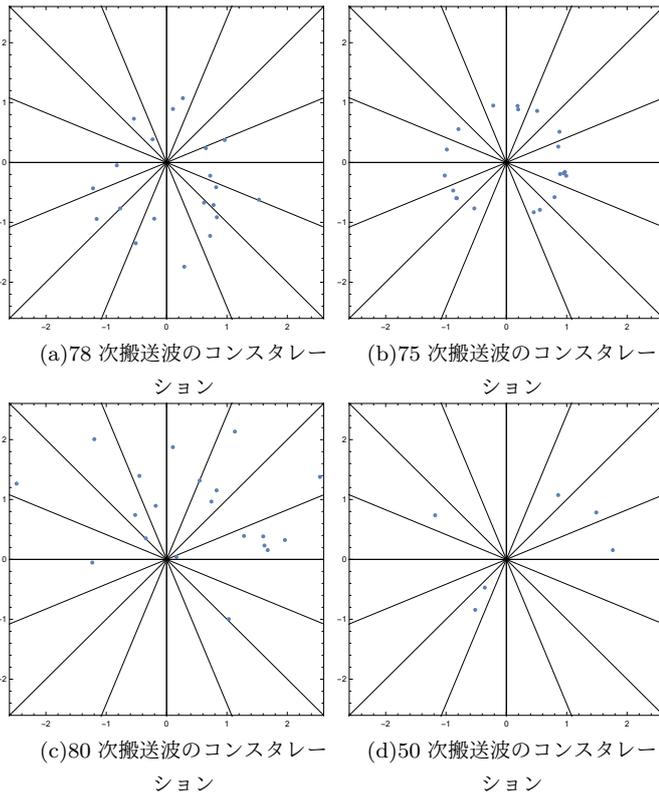


図 11 シャッター開度 3.810ms における各搬送波のコンスタレーション

Fig. 11 Constellation of each carrier wave in shutter opening 3.810 ms

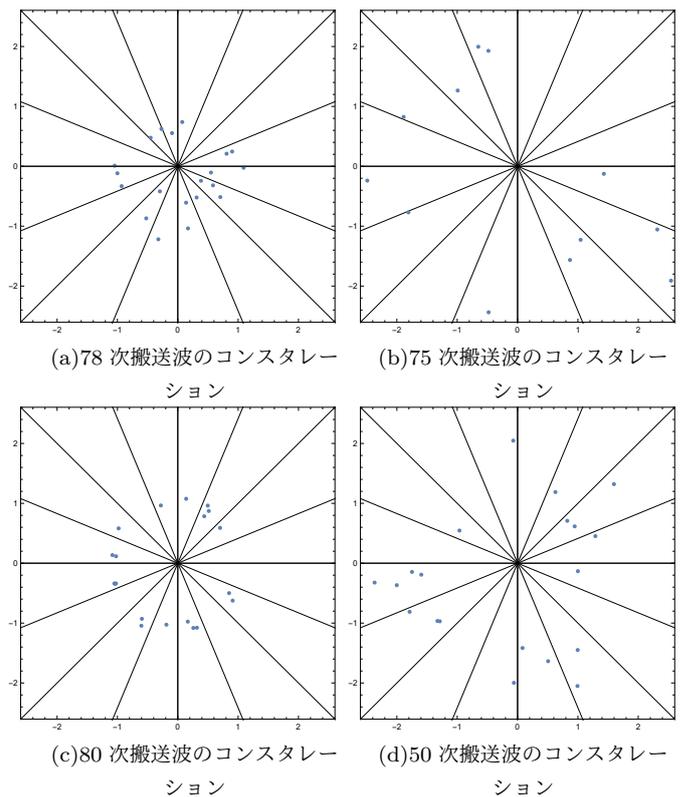


図 12 シャッター開度 5.186ms における各搬送波のコンスタレーション

Fig. 12 Constellation of each carrier wave in shutter opening 5.186 ms

井伸太郎：走行車両が高速カメラを用いて情報を受信するユビキタス可視光通信のための複数情報源認識手法，電子情報通信学会論文誌. B, 通信, Vol. J95-B, No. 11, pp. 1517-1528 (2012).

- [7] 大嶋光昭, 青山秀紀, 中西幸司：イメージセンサ受信型可視光通信技術の開発，パナソニック技報= Panasonic technical journal, Vol. 61, No. 2, pp. 118-123 (2015).
- [8] 嶋田祥太, 秋山尚之, 橋爪宏達, 杉本雅則：汎用動画カメラを用いた OFDM 可視光通信 (無線通信システム), 電子情報通信学会技術研究報告= IEICE technical report: 信学技報, Vol. 117, No. 132, pp. 175-180 (2017).
- [9] 飯塚宣男, 菊地正哲：ピカピカカメラ：カメラを用いた可視光通信スマホアプリ, 照明学会誌, Vol. 98, No. 10, pp. 546-549 (2014).
- [10] 大平祐生, 荒井伸太郎, 圓道知博, 山里敬也, 岡田 啓, 藤井俊彰, 鎌倉 浩：LED と高速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合手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J98-B, No. 7, pp. 696-706 (2015).

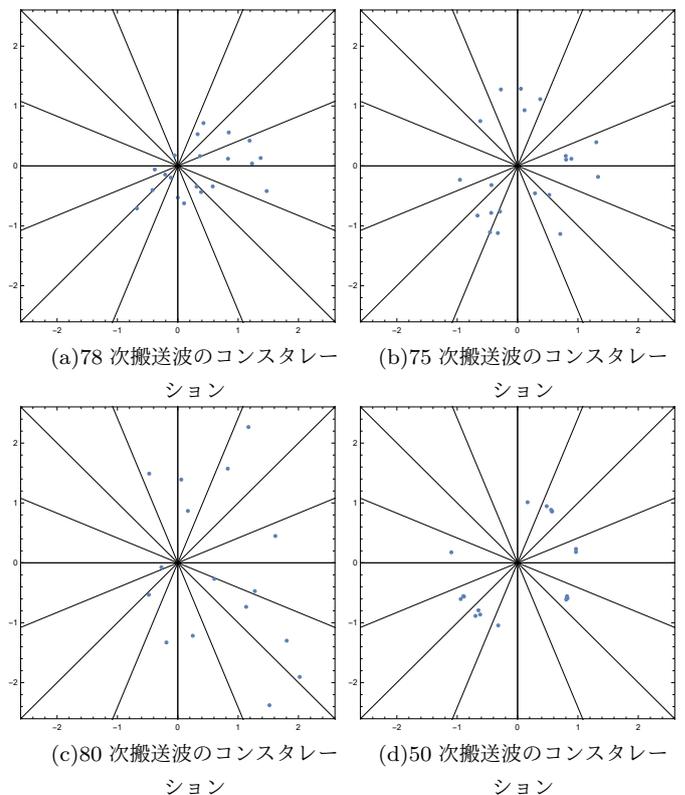


図 13 シャッター開度 7.527ms における各搬送波のコンスタレーション

Fig. 13 Constellation of each carrier wave in shutter opening 7.527 ms