

# 汎用動画カメラによる高速可視光通信とその応用

嶋田 祥太<sup>1,a)</sup> 秋山 尚之<sup>2</sup> 橋爪 宏達<sup>3</sup> 杉本 雅則<sup>1</sup>

**概要:** 汎用動画カメラを用いた可視光通信では、スマートフォン等の端末を用いた応用が期待できる。しかし、汎用動画カメラはフレームレートが 30fps や 60fps であるため、従来の On-Off-Keying に基づいた手法では通信速度が低速になってしまう。そこで本稿では、汎用動画カメラでも適用可能な、単色単光源からより多くの情報量を受信できる手法を提案する。評価実験により伝送速度をそれぞれ 120bps, 150bps, 180bps に設定したとき、シンボル誤り率はそれぞれ 0.0, 0.0148889, 0.733778 であった。誤りの原因についても考察し、さらに提案手法の応用についても議論する。

## 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により、高速な無線通信の需要はますます高まってきている。現在広く用いられている無線通信方式に Wi-Fi や Bluetooth 等の電波を用いたものが挙げられる。しかし、これらの通信方式は、電波の使用が制限されている場所では使用できない。そのため、電波を用いない無線通信方式の研究が行われている。なかでも、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。

可視光通信のメリットは、光を特定の位置だけに当てることで情報の送信に指向性を持たせることが可能、既存の照明を利用可能、などである。応用例としては、信号機を用いた Intelligent Transport System (ITS)[1] などが挙げられる。

しかし、従来の On-Off-Keying に基づいた手法では単色単光源から得られる情報量は動画カメラのフレームレートを超えることができない。そのため 30fps や 60fps で動作する汎用動画カメラでは通信が低速になってしまう。そこで本論文では、汎用動画カメラでも適用可能で、単色単光源から動画カメラのフレームレートを超える情報量を受信できる可視光通信手法を提案する。提案手法では、LED に周期的な変調をさせ、位相と振幅の情報を受け取る。この手法を評価するために、直交振幅変調 (Quadrature

Amplitude Modulation: QAM) を表現したシンボルを用い、情報を高速で受信できることを、室内の理想的な環境における計測実験により確認した。256-QAM, 1024-QAM, 4096-QAM で表現した変調方式での情報伝達速度はそれぞれ 120bps, 150bps, 180bps に対し、シンボル誤り率はそれぞれ 0, 0.0148889, 0.733778 であった。また受信した信号誤りの原因について考察し、撮影した輝度値の非線形性による系統誤差について述べる。

## 2. 関連研究

可視光通信には主に、光センサや高フレームレートで動作する撮像素子により構成される高速受信機を用いる手法と、30fps から 60fps 程度の低速で動作する汎用動画カメラを用いる手法とに大別される。

高速受信機を用いた手法は、専用のデバイスを必要とするが、高速な通信が可能であるというメリットがある。Grobe ら [3] は、LED に 180MHz の高速変調したものを光検出器で受信することで 1Gbps での通信を可能にした。望月ら [4] は、応答速度を向上させた簡素な回路を用いた受信機と送信機を使うことで LED の単純点滅にて 600Mbps を超える通信を実現した。横井らの無線照明 LAN[5] は、天井の照明を利用している。PC 等に接続した受光器は 4m 程の通信距離を持ち、数 10Mbps でデータの伝送ができる。

汎用動画カメラを用いた手法は、カメラのフレームレートが高くないために受信できる情報の量が少ないという欠点がある。そこで、情報量を増やすために空間分割や色偏移変調 (Color Shift Keying: CSK) などの手法が提案されている。CSK の例として、飯塚らの開発した Picalico[6] は、赤、緑、青の 3 色と消灯の 4 パターンの色マーカーを情報として送信し、スマートフォン等の端末でアプリケーション

<sup>1</sup> 北海道大学  
Hokkaido University

<sup>2</sup> 総合研究大学院大学  
The Graduate University for Advanced Studies

<sup>3</sup> 国立情報学研究所  
National Institute of Informatics

a) shimada@main.ist.hokudai.ac.jp

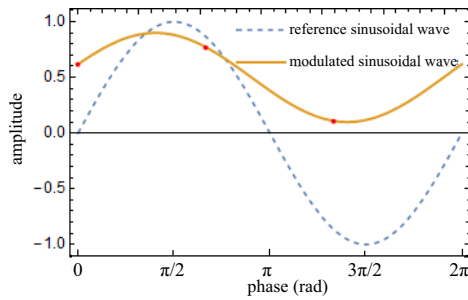


図 1 正弦波による変調

Fig. 1 Sinusoidal wave for modulation

ンを用いて受信する．この手法ではカメラのフレームレートの約半分のビットレートで受信可能である．空間分割の例として，天野ら [7] は液晶表示装置を用いて何種類かに色分けした情報を並列伝送することで数 kbps での受信を可能とした．

以上のような手法で，汎用動画カメラでも受信できる情報量を増やすことができる．しかし，いずれの手法も一つの光源に対するオンオフ変調によって情報を受信するため，単色単光源から得られる情報量は 1 フレームにつき 1bit が限界である．これに対し，大嶋らの光 ID[8] は CMOS 型イメージセンサのラインスキャン特性を利用して受信を行うことで数 kbps の受信速度を記録した．しかし，この手法が適用できるのはローリングシャッターのカメラに限られる．

そこで本稿では，グローバルシャッターの動画カメラにも適用可能で，単色単光源から受信できる情報量が 1bit を超える手法を提案する．

### 3. 提案手法

提案手法では，単光源 LED をビデオ撮像素子の 3 フレーム分となる周期で変調して，これを 3 フレーム間撮影する．そして，得られた連続する 3 フレームの輝度から LED 変調光の位相と振幅を情報として受け取る．以下では LED の変調に正弦波を用いた場合と正弦波でない任意波形を用いた場合に分けて説明し，受信した位相と振幅から復号可能な変調および復号手法を提案する．

#### 3.1 正弦波を用いた通信

まず，正弦波状の変調により明滅させた LED の位相と振幅を抽出することを考える．図 1 の破線で示す正弦波を基準とし，図 1 の実線のように，直流のオフセットをかけ，任意に振幅と位相の遅れを変化させる．このとき，変調光の輝度の変化  $f(\theta)$  は次の通りに表せる．

$$f(\theta) = Ae^{j\theta} + Be^{-j\theta} + C \quad (1)$$

ここで  $A$ ,  $B$  は

$$a \cos(b) = \frac{A+B}{2}, \quad a \sin(b) = \frac{A-B}{2j} \quad (2)$$

を満たす数で，互いに複素共役である．また，振幅を  $a$ ，位相の遅れを  $b$  としている． $C$  はバックグラウンドの明るさを含む変調光の直流分である．これを撮影すると，連続する 3 フレームの撮像素子は  $\theta \in \{0, \frac{2}{3}\pi, \frac{4}{3}\pi\}$  のタイミングでシャッターが開くので，それぞれ最初のスキャンラインで記録する発光スペクトルは図 1 の 3 点で示される．この 3 点は式 (1) に  $\theta \in \{0, \frac{2}{3}\pi, \frac{4}{3}\pi\}$  を代入したもので，これをそれぞれ  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  とすると，

$$\begin{cases} S_0 = f(0) & = A + B + C \\ S_1 = f(\frac{2}{3}\pi) & = Ae^{\frac{2\pi j}{3}} + Be^{-\frac{2\pi j}{3}} + C \\ S_2 = f(\frac{4}{3}\pi) & = Ae^{\frac{4\pi j}{3}} + Be^{-\frac{4\pi j}{3}} + C \end{cases} \quad (3)$$

となり，これは撮影した撮像素子の連続する 3 フレームから得られる輝度である．

$$\omega = \frac{(1 + j\sqrt{3})}{2}$$

を用いてこれを行列式で表すと

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \omega & \omega^2 & 1 \\ \omega^2 & \omega & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \omega^2 & \omega \\ 1 & \omega & \omega^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

となり，撮影して得た輝度を式 (3) にそれぞれ代入すれば  $A$  が求まる．この  $A$  を用いて  $a, b$  を求めるために式 (2) を変形すると，

$$a = |A| \quad (6)$$

$$b = \arg A \quad (7)$$

となり，振幅  $a$ ，位相  $b$  を抽出することができる．

#### 3.2 任意波形を用いた通信

前節では，周期的に明滅する正弦波変調光を撮像素子により撮影することで，その振幅と位相を情報として受信できることを示した．しかし，LED への正確な正弦波状の変調は実際には容易ではない．そこで矩形波や三角波といった，周期的な波形による変調光の振幅と位相を抽出する方法を提案する．以下では 2 種類の通信手法を提案する．

##### 3.2.1 仮想正弦波導出手法

1 つ目の手法では，任意波形による変調光を前項での正弦波抽出手法同様，式 (3) に連続する 3 フレームから得られた輝度をそれぞれ代入して振幅と位相を抽出する．撮像

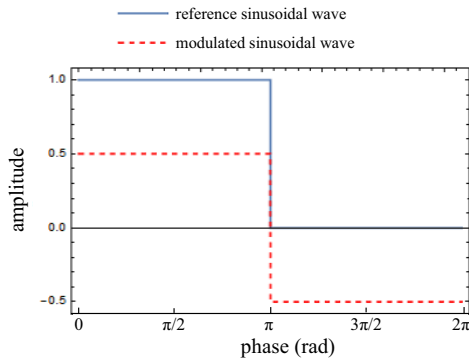


図 2 矩形波変調光

Fig. 2 Rectangular wave for modulation

素子の 3 フレーム分を周期として明滅する任意波形は、連続する 3 フレームの各フレームでシャッターを開いた時点で同じ明るさをとる正弦波に一意に変換することができるので、抽出される振幅と位相も変換された正弦波に対応付けされる。その正弦波を変換するアルゴリズムを以下に示す。

- (1) 任意波形による発光スペクトルを  $y_k$  とする
- (2)  $y_k$  の指標  $k \in (-\infty, \infty)$  を、3 の余剰により  $3n+0$ ,  $3n+1$ ,  $3n+2$  のグループ  $k_0$ ,  $k_+$ ,  $k_-$  に分割する
- (3)  $P_0 = \sum_{k \in k_0} y_k$ ,  $P_1 = \sum_{k \in k_+} y_k$ ,  $P_2 = \sum_{k \in k_-} y_k$  とする
- (4) 3 フレーム長の逆数を基本周波数  $f$  として、 $-f$  に  $P_0$ ,  $0$  に  $P_1$ ,  $+f$  に  $P_2$  をもつ複素スペクトルを逆フーリエ変換する。

上記のアルゴリズムを矩形波に対して適用する。図 2 破線で示される矩形波に直流分を付加すると、図 2 実線で示される矩形波となる。これをローリングシャッターで 3 フレームにわたって撮影すると、図 3 の実線のような明暗が記録される。グリッドラインで区切られた 3 つの区間がそれぞれ 3 つのフレームである。すると、 $P_0, P_1, P_2$  はそれぞれ

$$P_0 = 256 \quad (8)$$

$$P_1 \approx 128.03 - 73.6297i \quad (9)$$

$$P_2 \approx 128.03 + 73.6297i \quad (10)$$

となる。これを逆フーリエ変換すると図 3 の破線で示される正弦波が得られ、各フレームの最初のスキャンラインと同じ値をとっていることがわかる。このように周期的な任意波形は仮想的な正弦波に一意に変換できるため、前項での正弦波導出手法を任意波形に適用することで、同様に解析できる。

### 3.2.2 直接導出手法

2 つ目の手法では、周期的な任意波形に対して逆関数を導出し、その逆関数より振幅と位相を抽出する。ただし任

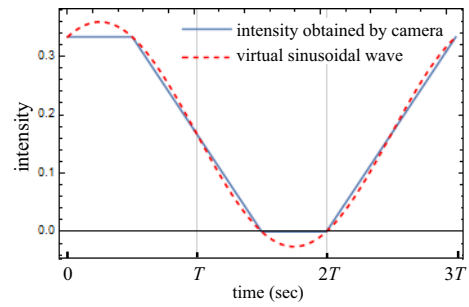


図 3 仮想正弦波とカメラで取得される輝度値

Fig. 3 Virtual sinusoidal wave and intensity obtained by camera

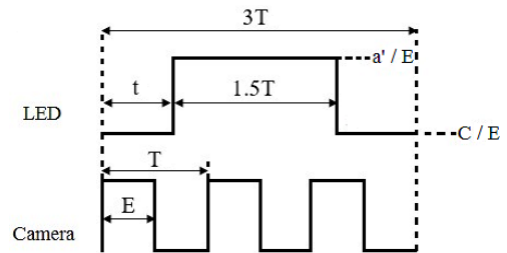


図 4 LED 変調光とカメラの動作

Fig. 4 Modulated LED light and camera exposure time

意波形は線形な関数とは限らないので注意が必要である。実際の LED 制御を考慮した場合、矩形波状の変調が最もシンプルであるので、ここでは矩形波の逆関数を提示する。

まず、3 フレーム時間を周期とする基本矩形波は、図 2 の破線である。直流分を付加し、位相  $\theta$  と振幅  $a$  を任意に変化させる。露光時間を  $E$  とし、露光時間比  $E/T$  のシャッターで 3 フレーム間撮影した時、それぞれのフレームと矩形波は図 4 のようになる。ここでカメラの矩形波は凸の区間でシャッターが開き、凹の区間でシャッターが閉じていることを示している。LED の矩形波は輝度を示している。カメラの露光時間を  $E$ 、フレーム周波数を  $T = \frac{2}{3}\pi$  とし、図 4 の LED の矩形波は、時間  $x$  を用いた関数 (11) で、振幅  $a$  は式 (12) で定義する。 $C$  はバックグラウンドの明るさを含む直流分である。このときカメラの各フレームが記録する輝度をそれぞれ  $S_0, S_1, S_2$  とすると、それぞれ式 (13), (14), (15) で与えられる。

$$r(x) = \begin{cases} a'E^{-1}(-3T \leq x < -1.5T) \\ CE^{-1}(-1.5T \leq x < 0) \\ a'E^{-1}(0 \leq x < 1.5T) \\ CE^{-1}(1.5T \leq x < 3T) \end{cases} \quad (11)$$

$$a = \frac{a'}{E} - \frac{C}{E} \quad (12)$$

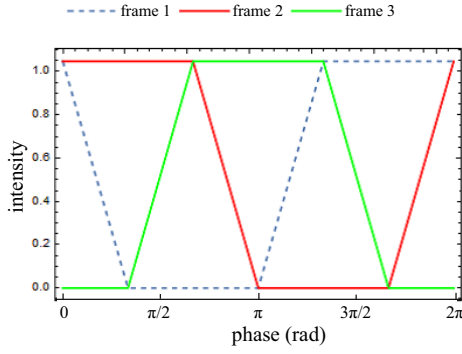


図 5 3 フレームの輝度値の変化  
Fig. 5 Intensities of three frames

$$S_0 = \begin{cases} B & (0 \leq \theta < \frac{E}{T}) \\ C & (\frac{E}{T} \leq \theta < \pi) \\ A & (\pi \leq \theta < \pi + \frac{E}{T}) \\ a + C & (\pi + \frac{E}{T} \leq \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (13)$$

$$S_1 = \begin{cases} A & (0 \leq \theta < \frac{E}{T} - \frac{\pi}{3}) \\ a + C & (\frac{E}{T} - \frac{\pi}{3} \leq \theta < \frac{2\pi}{3}) \\ B & (\frac{2\pi}{3} \leq \theta < \frac{2\pi}{3} + \frac{E}{T}) \\ c & (\frac{2\pi}{3} + \frac{E}{T} \leq \theta < \frac{5\pi}{3}) \\ A & (\frac{5\pi}{3} \leq \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (14)$$

$$S_2 = \begin{cases} C & (0 \leq \theta < \frac{\pi}{3}) \\ A & (\frac{\pi}{3} \leq \theta < \frac{\pi}{3} + \frac{E}{T}) \\ a + C & (\frac{\pi}{3} + \frac{E}{T} \leq \theta < \frac{4\pi}{3}) \\ B & (\frac{4\pi}{3} \leq \theta < \frac{4\pi}{3} + \frac{E}{T}) \\ C & (\frac{4\pi}{3} + \frac{E}{T} \leq \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (15)$$

例えばカメラの露光時間比を 50% に設定すると、 $E = \frac{T}{2}$  より、位相  $\theta$  を 0 から  $2\pi$  まで変化させたときの輝度の変化は図 5 のようになる。

ここでの  $A$ ,  $B$  はそれぞれ

$$A = \frac{aT}{E}(\theta - \theta_{min}) + C \quad (16)$$

$$B = -\frac{aT}{E}(\theta - \theta_{min}) + a + C \quad (17)$$

$\theta_{min}$  は  $\theta$  の各定義域における最小をとる。ここで  $\frac{E}{T} = E'$  とおき式 (13), (14), (15) を変形すると

$$\theta = \begin{cases} \frac{3E'S_1 - 3E'S_2 - \pi S_0 + \pi S_2}{3(S_0 + S_1 - 2S_2)} & (0 \leq \theta < E' - \frac{\pi}{3}) \\ \frac{E'S_1 - E'S_0}{S_1 - S_2} & (E' - \frac{\pi}{3} \leq \theta < \frac{\pi}{3}) \\ \frac{(3E' + \pi)(S_0 - S_1)}{3(S_0 - 2S_1 + S_2)} & (\frac{\pi}{3} \leq \theta < E') \\ \frac{3E'S_0 - 3E'S_2 + \pi S_0 - \pi S_1}{3(S_0 - S_1)} & (E' \leq \theta < \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{-3E'S_0 + 3E'S_2 - 3\pi S_0 + \pi S_1 + 2\pi S_2}{-3(2S_0 + S_1 + S_2)} & (\frac{2\pi}{3} \leq \theta < E' + \frac{\pi}{3}) \\ \frac{3E'S_1 - 3E'S_2 + 2\pi S_0 - 2\pi S_2}{3(S_0 - S_2)} & (E' + \frac{\pi}{3} \leq \theta < \pi) \\ \frac{3E'S_1 - 3E'S_2 + 2\pi S_0 + 3\pi S_1 - 5\pi S_2}{3(S_0 + S_1 - 2S_2)} & (\pi \leq \theta < E' + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{-E'S_0 + E'S_1 + \pi S_1 - \pi S_2}{S_1 - S_2} & (E' + \frac{2\pi}{3} \leq \theta < \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{3E'S_0 - 3E'S_2 + 4\pi S_0 - 7\pi S_1 + 3\pi S_2}{3(S_0 - 2S_1 + S_2)} & (\frac{4\pi}{3} \leq \theta < E' + \pi) \\ \frac{3E'S_0 - 3E'S_2 + 4\pi S_0 - 4\pi S_1}{3(S_0 - S_1)} & (E' + \pi \leq \theta < \frac{5\pi}{3}) \\ \frac{-3E'S_0 + 3E'S_2 - 9\pi S_0 + 4\pi S_1 + 5\pi S_2}{-6S_0 + 3S_1 + 3S_2} & (\frac{5\pi}{3} \leq \theta < E' + \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{3E'S_1 - 3E'S_2 + 5\pi S_0 - 5\pi S_2}{3(S_0 - S_2)} & (E' + \frac{4\pi}{3} \leq \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (18)$$

となるので撮像素子 3 フレームから得られた輝度を式 (13), (14), (15) にそれぞれ代入すると、変調をした LED の振幅  $a$  と位相  $\theta$  が一意に求まることがわかる。

### 3.3 位相振幅コーデック手法

前節では 3 フレームで変調光から位相と振幅を抽出する方法を提案した。ここでは、抽出した位相と振幅を複号でできるような変調および複号手法を提案し、さらに直流分を情報点として利用する方法も示す。提案手法では QAM を模した変調方式により符号点を格子状に並べ、受信側は受け取った位相と振幅、そして直流分から、送信された符号点を復号する。

まず、情報点の総数を  $S$  とおく。  $S$  は 2 のべき数をとる。そして基準となる変調光に対する任意の変調光の振幅比を  $a' (\leq 1)$ 、位相の遅れを  $\theta'$  とし、極座標上へプロットする。例えば、 $S = 256$  の場合、256 個のシンボルが、図 6 のように配置される。このとき、 $y$  行  $x$  列のシンボルの座標を  $(X, Y)$  とすると、これは

$$(X, Y) = (a' \cos \theta', a' \sin \theta') \\ = \left( -\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{S}-1}x, \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{S}-1}y \right) \quad (19)$$

となる。これより、 $y$  行  $x$  列のシンボルを示す振幅比  $a'$ 、位相の遅れ  $\theta'$  は

$$\theta' = g(X, Y) = \arg X + jY \quad (20)$$

$$a' = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (21)$$

となる。これにより、LED 変調光の位相と振幅を利用して、平面上で符号点を扱う方法を示せた。

次に、直流分を利用し、さらにシンボル数を増やす方法を述べる。バックグラウンドの明るさが一定であるとき、

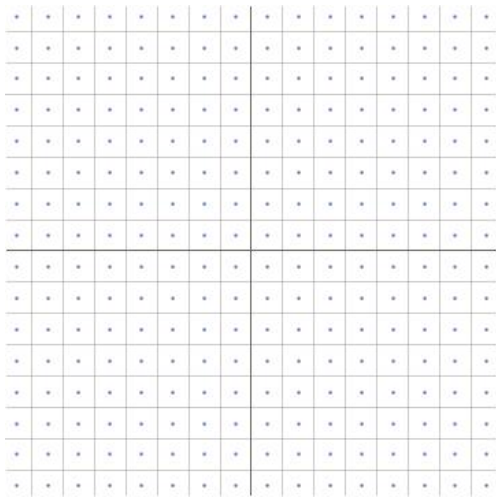


図 6 256-QAM のシンボル配置  
 Fig. 6 Symbol arrangement of 256-QAM

あらかじめ基準となる直流分とバックグラウンドの明るさを計測しておけば、式 (13), (14), (15) より、 $C$  の値から直流分を求めることができ、基準との比によってこれも情報として受け取ることができる。例えば、直流分を 4 段階に分けて付加させながら 256-QAM 変調をする。受信側では、位相、振幅に加え、直流分から  $z$  軸の情報を得ることができ、情報点が 4 倍に増える。ただし、LED に印加できる電圧には限度があるため、直流分を任意に変化させたい場合、式 (12) より、任意に変更できる振幅は小さくなり、直流分の大きさと振幅の大きさにはトレードオフが生じる。これをどのように設定するのが適切であるのかは、今後の実験にて調査する予定である。

## 4. 評価実験

### 4.1 実験機器構成

計測のための実験機器構成を図 7 に示す。受信側は、受信カメラ (Point Gray 社製 FL3-U3-13Y3M) に対しフレームレートを任意に定めるために信号発生装置 (NF 回路設計ブロック社製 WF1948) により外部トリガーを与えた。発信側は、紙媒体で覆った青色 LED (OptoSupply Limited 社製 OSB56A5111AD) を自作の V-I コンバータに接続し、同信号発生装置による変調信号を与えた。LED とカメラの距離を約 1.5m に設定し、実験は暗室環境で行われた。

### 4.2 計測実験

ランダムに設定されたシンボル値を 256-QAM, 1024-QAM, 4096-QAM で変調した。動画カメラを 60fps で動作させ、変調光の周期をカメラ周期の 3 フレーム分となる 20Hz とした。LED 変調光の直流分は 0.5V で、基準の振幅は 2.5V<sub>p-p</sub> に設定した。LED 変調光はそれぞれ 18,000 フレーム撮影された。

復号したシンボルと誤り率は、図 8, 9, 10, 表 1 の通りで

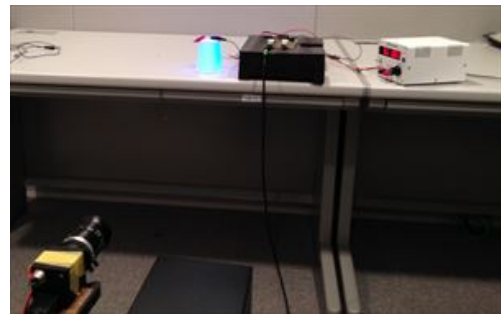


図 7 実験機器構成  
 Fig. 7 Configuration of experimental equipment

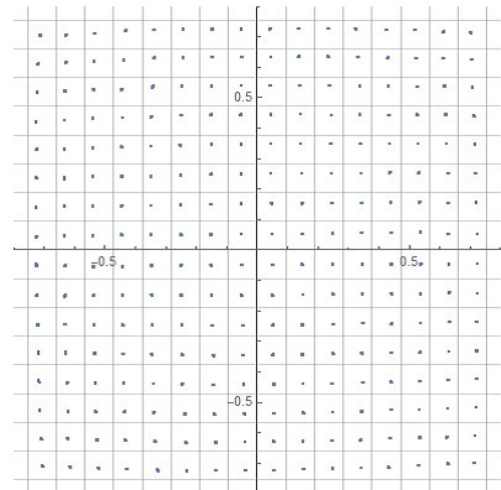


図 8 256-QAM  
 Fig. 8 256-QAM

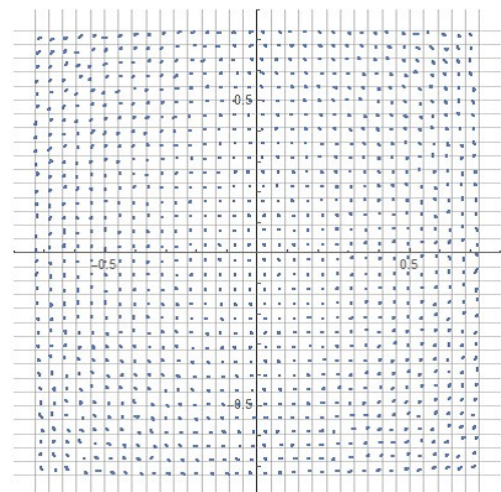


図 9 1024-QAM  
 Fig. 9 1024-QAM

ある。

次に、256-QAM 変調に直流分を 4 段階に分割した場合の実験も行った。直流分は 0.4V, 0.8V, 1.2V, 1.6V の 4 段階で、基準の振幅は 1.4V<sub>p-p</sub> に設定した。ほかの計測条件は同様である。結果は図 11 の通りである。誤り率は 0.0 であった。

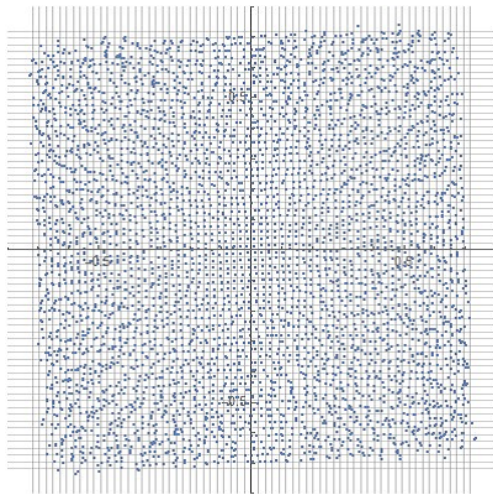


図 10 4096-QAM  
Fig. 10 4096-QAM

表 1 シンボルの誤り率  
Table 1 Symbol error rate

シンボル数	誤り率
256	0.0
1024	0.014889
4096	0.733778

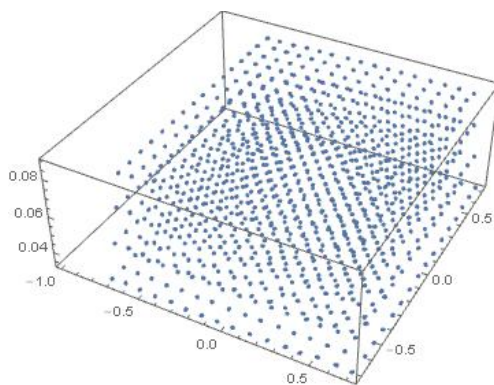


図 11 3D256-QAM  
Fig. 11 3D256-QAM

## 5. 考察

計測実験により、従来手法よりも高い通信速度が実現できることが確認できた。256QAM, 1024QAM でのシンボル誤り率はそれぞれ 0.0, 0.015 であり、直流成分の利用によりさらに通信速度の増大が可能であることが示された。誤り率低減には誤り訂正符号の利用が考えられるが、通信速度のトレードオフについて検討する必要がある。

1024-QAM, 4096-QAM ではシンボル誤りが検出された。誤りの一因として、以下が考えられる。

- 撮影した輝度の非線形性
- 動画カメラの量子化誤差

LED への印加電圧を直線的に変化させて計測したとき、動

画カメラで撮影して得る輝度も正確に直線的に変化するわけではないということが予備実験により確認された。この非線形性の要因は検討が必要である。次に、動画カメラから得られる輝度値は 256 段階で量子化されているため、変調光の正確な値を受信することができない。これによる量子化誤差の影響についても調査を要する。

提案手法はスマートフォン等に搭載のカメラを用いて実装可能である。よって、LED 光を光 ID とする位置認識システムや、物理世界の対象物の AR 手法による情報提示等への展開も期待できる。

## 6. 結論と今後の展開

本論文にて、汎用動画カメラでも使用可能な高速可視光通信手法を提案した。提案手法では受信できる情報量が、動画カメラの 1 フレームあたり 1bit を超えることを室内暗室環境における計測実験にて示した。実験では、256-QAM, 1024-QAM, 4096-QAM でそれぞれ 1 フレームあたり 2bit, 2.5bit, 3bit 受信できるが、1024, 4096-QAM はシンボル誤りが発生する。考察により、誤りの一因が輝度値の非線形性による系統誤差であると推測される。さらに、直流分を利用し、256-QAM の符号点を 4 倍に増やすことが可能であることを実験にて確かめた。

今後は、空間分割多重化や CSK 等の利用による通信速度増大を目指すとともに、誤差の低減方法について検討する。

## 参考文献

- [1] 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 浩嗣, "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複合手法", 電子情報通信学会論文誌, J98-B(7), pp.696-706, 2015.
- [2] Komine, T., Nakagawa, M., "Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lights", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 50(1), pp.100-107, 2004.
- [3] Grobe, L., Paraskevopoulos, A., Hilt, J., Schulz, D., Lassak, F., Hartlieb, F., Kottke, C., Jungnickel, V. and Langer, K.-D.: "High-speed visible light communication systems", *IEEE Communications Magazine*, vol.51(12), pp. 60-66, Dec 2013
- [4] 望月 輝, 藤本 暢宏, "三原色型白色 LED による高速照明光通信の一検討" 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2012(2), p. 425, Mar 2012
- [5] 横井 敦也, 志村 達久, 山田 祥代, 青柳 陽介, 黒川 裕之, 後藤 雅夫, 村山 文孝, 成澤 博樹, "LCD バックライトを利用した可視光通信システム", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2012(2), p. 424, Mar 2012
- [6] 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, Vol98(10), pp. 546-549, Oct 2014
- [7] 天野 準也, 和田 忠浩, 椋本 介士, "並列伝送型イメージセンサ可視光通信システムの構築と検証", 電子情報通信学会論文誌. VolJ96-B(7), pp. 742-752, Jul 2013
- [8] 大嶋 光昭, 青山 秀紀, 中西 幸司, 前田 敏行, "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, Vol61(2), pp. 118-123 Nov 2015