

災害時における非常時通信のための 偽色発生を抑制する非同期CSK方式の提案

塚田 晃司^{1,a)} 岡崎 匡紀^{2,†1}

受付日 2017年4月14日, 採録日 2017年10月3日

概要: 既存通信インフラが使用できない場合の代替通信手段の1つとして, 免許不要で手軽に利用でき, 長距離を空間伝播する可視光通信に着目した. 災害時の利用を想定した場合, 救援を求めていることに気付いてもらうことが重要である. そこで, 以前, RGB 3色LEDにより生成される7色を用いたCSK方式を提案した. しかし, この従来方式では偽色が発生し, 受信誤り率を高めていた. そこで, 従来方式を改良し, 偽色が発生しにくいCSK方式と, 偽色を受信しても正しい発光色を推定する手法を提案する. そして, 提案方式の有用性を確認するため, 提案方式を採用したプロトタイプシステムの実装とその実証評価を実施した.

キーワード: 可視光通信, 非常時通信, イメージセンサ通信, 偽色

Asynchronous Color Shift Keying with False Color Avoidance for Emergency Communication

KOJI TSUKADA^{1,a)} MASAKI OKAZAKI^{2,†1}

Received: April 14, 2017, Accepted: October 3, 2017

Abstract: We paid attention to Visible Light Communication (VLC) as an alternative communication tool in case that the existing communications network cannot be used. Since visible light is used, we can find out the source of a message signal, without using any devices. Moreover, we can receive detailed message by using dedicated devices. It is important at the time of a disaster to tell that we are asking for help, so characteristics of VLC are effective. Previously we proposed the new color-shift keying using 7-colors formed by additive color mixing of RGB 3-color LEDs. The CSK, however, has an issue that some false colors occur when using low frame rate camera in dark environment, and it brings to increasing failure ratio at receiver side. In this paper, we proposed the revised color-shift keying with false color avoidance and a new method which estimates a correct color from a false color. We implemented the prototype system and evaluated it.

Keywords: visible light communication, emergency communication, optical camera communication, false color

1. はじめに

日本は国土の7割近くを中山間地域が占め, 災害時孤立

¹ 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University,
Wakayama 640-8510, Japan

² 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama Uni-
versity, Wakayama 640-8510, Japan

^{†1} 現在, 中央コンピューター株式会社
Presently with CHUO COMPUTER Co., Inc.

^{a)} ktsukada@sys.wakayama-u.ac.jp

可能性集落が全国約2万カ所存在する [1]. 孤立集落で重要なことは, 被害報告や救援要請を迅速に外部に伝えることである. 多くの自治体では防災行政無線, 衛星電話の導入を進めているが, 住民がふだんから手軽に利用できる手段ではない. また, 広く普及している携帯電話網は, 東海・東南海・南海地震の広域連動災害では, 輻輳やケーブル切断だけでなく, 長期停電にともなう通信設備の機能停止により利用不能になることが予想される. 無線LANによるアドホックネットワークを用いた非常時通信 [2], [3], [4] も

注目されているが、アンライセンスバンドであるため手軽に利用できる反面、広く普及してしまったため、混信・干渉の問題は避けられない。

そこで、代替通信手段の1つとして、免許不要で手軽に利用できる可視光通信に着目した。可視光を搬送波として用いるので、目視によっても信号の発信源を視認することが可能である。さらに、専用の受信装置を用いることで、重畳されている情報を取得することが可能となる。災害時の利用を想定した場合、被災地上空を飛行するヘリコプタに対して、視野内の広範囲な地上から救援を求めていることに気付いてもらうことが重要である。我々は、可視光の特性を活かして、夜間における可視光通信の非常時通信への適用に取り組んでいる。そして、RGBの3色のLED光源の加法混色により生成される7色で色変調を行う非同期CSK (Color-Shift Keying) 方式を提案した [5]。

多くの可視光通信システムでは、高速なフレームレートでの撮影が可能な特殊なビデオカメラを前提としているものが多い。この提案方式は、一般に広く使用され、入手が容易なフレームレートが30fpsのビデオカメラ（以降、低フレームレートカメラと呼ぶ）を使用することを特徴としている。しかし、フレーム周期と発光色変化周期がずれること、また、夜間、暗い被写体を撮影した場合、露光時間が延びることにより、実際の発光色とは異なる色として受信してしまう現象（偽色）が発生し、受信誤り率が大きくなる要因となっている [5]。そこで、本論文では、この偽色発生の仕組みをモデル化し、低フレームレートカメラにおいても受信誤り率を抑えることができる非同期CSK方式の改良を提案する。

2. 関連研究

非常時通信には、従来から長距離通信が可能で、物理的なケーブルを敷設する必要のない無線通信が広く使われている。多くの自治体では、孤立集落対策として防災行政無線、衛星電話を整備している。しかし、これらは、免許や認可が必要であること、また、導入コスト、運用コストが高額であることから、非常時に備えてふだんから使い慣れておくことが困難である。

免許が不要なアンライセンスバンドの無線LANを基盤とし、アドホックネットワーク技術を応用した手法が注目されている [2], [3], [4]。しかし、これらは自由に利用可能な無線LANを使用しているため、使用周波数帯が他の目的で使用されている通信と混信・干渉の可能性がある。

可視光を搬送波に用いた光無線通信方式の研究開発が進んでいる。たとえば、文献 [6], [7], [8], [9], [10] では、無線LANのような高速な無線通信としての位置付けであり、室内照明、交通信号機、航路標識、デジタルサイネージなどの光に情報を重畳させている。これらの方式は、単色光源の点滅を人間に意識させないような変調方式（たとえば文

献 [11]) が使用されている。

単色ではなく複数色の発光色の時間的変化を用いるCSKの技術がいくつか提案されている。IEEE 802.15.7 [12] は、XYZ表色系における二次元の図として表されるxy色度図の座標値を用いて情報を伝達する手法である。C-Blink [13] は携帯電話のディスプレイを用いて色点滅で送信機能を実現している。それをUSBカメラで認識し、HSV表色系における色相差からデータ信号を受信する。picalico [14], [15] はスマートフォンの動画撮影機能を用いて可視光通信の受信機能を実現している。輝度の変化とRGBの色変化を併用した色変調方式を採用している。

可視光通信の中でも、ビデオカメラなどの二次元撮像素子を用いたOCC (Optical Camera Communication) においては、送信側の発光タイミングと受信側のビデオカメラのフレーム周期とのずれが課題となっている。単色光LEDのON (点灯) とOFF (消灯) とで変調を行うOOK (On-Off Keying) では、本来二値であるべき明度が、上記のずれにより中間的な明度として撮像されてしまう。この課題解決のためにいくつかの手法が研究されている [16], [17], [18], [19], [20]。

しかし、CSKを適用したOCCにおける発光色変化タイミングとフレーム周期とのずれの問題に関する議論は進んでいない。そこで、本論文では、CSKにおける発光色変化周期とフレーム周期との同期ずれにより生じる偽色発生の仕組みをモデル化し、低フレームレートカメラでも利用可能な偽色発生を抑えた非同期CSK方式を提案する。

3. 提案

3.1 提案システムのコンセプト

図1に我々が提案しているシステムのコンセプトを示す。本研究の最終目標は、夜間、地上に照明がなく目視による被災地の状況把握が困難な状況において、被災地の孤立集落の住民が地上から上空の消防・警察・自衛隊などのヘリコプタに救援要請のメッセージを伝えられるようにすることである。

図2にシステム構成図を示す。地上に多色LEDを使用した送信機を設置し、ヘリコプタにカメラを備えた受信機を搭載する。そして、カメラで撮影した画像に映る多色LEDの光色から、救援要請のメッセージを読み取る。

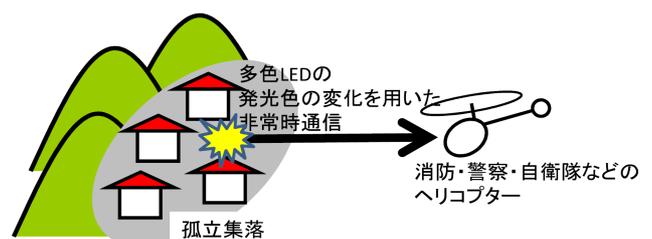


図1 提案システムのコンセプト

Fig. 1 Basic concept of proposed system.

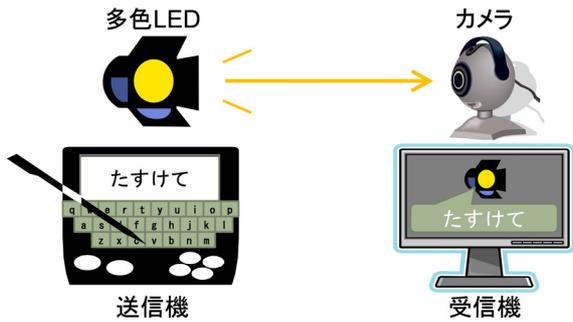


図 2 システム構成図
Fig. 2 System architecture.

本提案では、単一の受光素子を用いた可視光通信ではなく、カメラのような二次元撮像素子を用いた OCC であるので、画像中に複数の発光源があったとしても、並行して情報を受信できる。また、受信側のカメラには、一般に入手しやすい低フレームレートカメラを使用する。

3.2 時間的要因による偽色発生モデル化

二次元平面上に RGB の 3 原色の撮像素子を配列させたビデオカメラにおいては、被写体の空間周波数と撮像素子の空間周波数のずれにより偽色が発生することが知られている。一方、本節でモデル化を行うのは、発光色変化周期とフレーム周期とのずれにより偽色が発生する仕組みである。これらを区別するために、前者を空間的要因による偽色、後者を時間的要因による偽色とする。

ビデオカメラでは、露光時間内に受光素子に当たった光の積分量に応じて発生する電荷を読み取ることで撮像している。ここで、発光色変化周期の時間を T_i 、ビデオカメラのフレーム取得間隔の時間を T_f 、露光時間を T_e とする。ある発光色 C_1 から C_2 に変化する瞬間を含むフレーム周期に注目する。そのフレーム周期の中で、露光時間の間だけ受光素子に電荷をためる。ここでは、フレーム周期の後半に露光時間があるものと仮定する。このとき、フレーム周期の開始時点から発光色が変わるまでの時間を t_{offset} とする (図 3 参照)。

ここで、RGB 空間上において、発光色 C_1, C_2 を

$$\begin{aligned} C_1 &= [C_{1b} \ C_{1g} \ C_{1r}]^T \\ C_2 &= [C_{2b} \ C_{2g} \ C_{2r}]^T \end{aligned} \quad (1)$$

撮像素子の出力 V を

$$V = [V_b \ V_g \ V_r]^T \quad (2)$$

とすると、 V は次のように表現できる。発光色変化の瞬間が露光時間外 ($0 \leq t_{\text{offset}} < T_f - T_e$) の場合は、

$$V = K \int_0^{T_e} C_2 dt = K T_e C_2 \quad (3)$$

となり、発光色変化の瞬間が露光時間内 ($T_f - T_e \leq t_{\text{offset}} <$

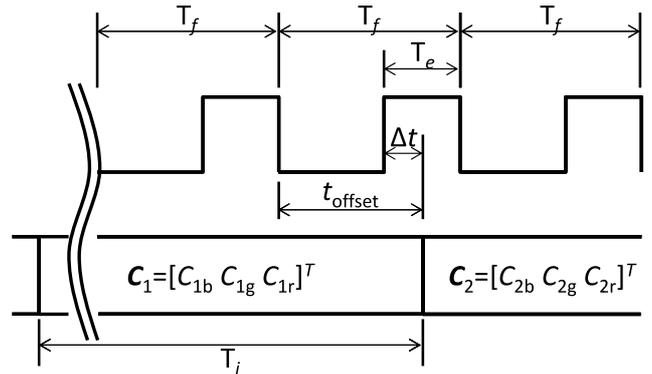


図 3 フレーム周期 T_f と露光時間 T_e

Fig. 3 Frame period time T_f and exposure time T_e .

T_f) の場合は、

$$V = K \int_0^{\Delta t} C_1 dt + K \int_{\Delta t}^{T_e} C_2 dt = K \Delta t C_1 + K (T_e - \Delta t) C_2 \quad (4)$$

となる。ただし、 K は電荷と出力値との関係を調整する係数、 $\Delta t = t_{\text{offset}} - (T_f - T_e)$ 、 $T_i > T_f$ とする。

ここで、OOK の場合を想定すると、 C_1 を白色光の ON、 C_2 を OFF とすれば、

$$\begin{aligned} C_1 &= [1 \ 1 \ 1]^T = \mathbf{1} \\ C_2 &= [0 \ 0 \ 0]^T = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (5)$$

とおくことができる。簡単のため $K = 1$ とすれば、式 (3)、式 (4) より

$$V = \begin{cases} T_e \mathbf{0} = \mathbf{0} & \text{if } 0 \leq t_{\text{offset}} < T_f - T_e, \\ \Delta t \mathbf{1} + (T_e - \Delta t) \mathbf{0} = \Delta t \mathbf{1} & \text{if } T_f - T_e \leq t_{\text{offset}} < T_f. \end{cases} \quad (6)$$

となる。したがって、OOK の場合には露光時間 T_e の中で ON の時間 Δt に応じて明るさが変化するだけである。

一方、CSK の場合、仮に発光色 C_1 を Red、 C_2 を Blue とすると、

$$\begin{aligned} C_1 &= [C_{1b} \ C_{1g} \ C_{1r}]^T = [0 \ 0 \ 1]^T \\ C_2 &= [C_{2b} \ C_{2g} \ C_{2r}]^T = [1 \ 0 \ 0]^T \end{aligned} \quad (7)$$

となるので、同様に $K = 1$ とすれば、

$$V = \begin{cases} [0 \ 0 \ T_e]^T & \text{if } 0 \leq t_{\text{offset}} < T_f - T_e, \\ [\Delta t \ 0 \ T_e - \Delta t]^T & \text{if } T_f - T_e \leq t_{\text{offset}} < T_f. \end{cases} \quad (8)$$

となる。すると、露光時間 T_e の中で比率 $\Delta t : (T_e - \Delta t)$ によって、Red から Blue へと連続的に色が変化し、比率が等しいと Red と Blue の加法混色である Magenta となる。実際には、Red の LED を点灯した場合であっても、Blue、Green の色成分も含まれているので、比率 $\Delta t : (T_e - \Delta t)$

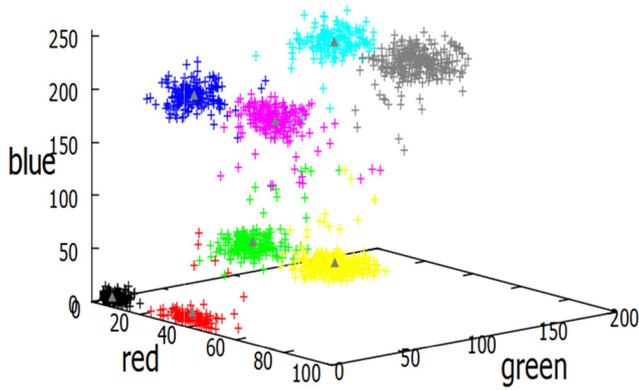


図 4 観測値の RGB 空間でのプロット結果

Fig. 4 The 3D graph of observation value in the RGB color space.

表 1 2色の組合せにおける色変化

Table 1 Transition between two color combinations.

		C_2				
		R	Y	G	C	B
C_1	M	MR	MY	M(W)G	MC	MB
	B	B(M)R	B(W)Y	B(C)G	BC	—
	C	C(W)R	CY	CG	—	—
	G	G(Y)R	GY	—	—	—
	Y	YR	—	—	—	—

による加法混色となり、これが偽色として出力 V に現れる。

この現象は、先行研究 [5] における測定結果でも判明しており、低フレームレートカメラで撮像した RGB 値をプロットすると図 4 に示すように加法混色で得られる 7 色に相当する頂点以外にも偽色に該当する測定値が分布している。我々の先行研究では、CSK に使用する 7 色と区別できない偽色が発生していたため、偽色もシンボルとして解釈してしまい、受信誤り率を低くすることを阻害していた。

ここで、先行研究において使用する 7 色の中の異なる 2 色 C_1 , C_2 のすべての組合せにおいて、偽色の発生の可能性をまとめた結果を表 1 に示す。ただし、 $R = [0 \ 0 \ 1]^T$, $G = [0 \ 1 \ 0]^T$, $B = [1 \ 0 \ 0]^T$ とし、 $Y = R + G$ (R と G の加法混色 Yellow), $C = G + B$ (G と B の加法混色 Cyan), $M = R + B$ (R と B の加法混色 Magenta), $W = R + G + B$ (R , G , B の加法混色 White) とする。また、表中、MR とは Magenta と Red の中間色となること、B(M)R とは Blue と Red の中間色となり途中で Magenta になることを表現している。

表 1 から $R(W)C$, $G(W)M$, $B(W)Y$, $R(Y)G$, $R(M)B$, $G(C)B$ の 6 種類の色変化がほかで使用している色と混同する可能性がある。ただし、前 3 種類で偽色となる W は先行研究では区切りとして使用しているので、出現条件をあらかじめ想定でき、偽色が発生しても対処が可能である。一方、後 3 種類は、通常使用する色と区別す

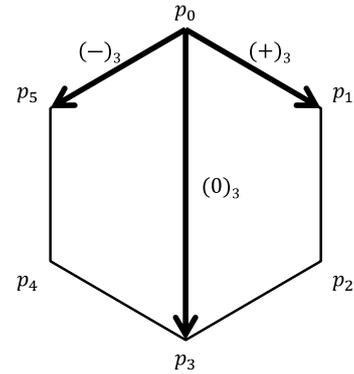


図 5 ternary 値による状態遷移
Fig. 5 State transition model.

ることができない。

そこで後 3 種類の組合せを使用しない変調方式を 3.3 節で提案する。また、送信側の変調方式で対処しても、受信側において発光色変化周期とフレーム間隔のずれによる偽色発生は防げないので、偽色から正しい色を推定する方式を 3.4 節で提案する。

3.3 変調方式

3.2 節で述べた受信誤り率を増加させる偽色の発生を抑えるために、先行研究 [5] で提案した CSK 方式をベースとして、 $R(Y)G$, $R(M)B$, $G(C)B$ の色変化の組合せが出現しない変調方式を提案する。

送信データは bit 列で表現されているものとし、長さ $4n$ の bit 列データ $b_1b_2 \dots b_{4n-1}b_{4n}$ ($1 \leq n$) があるとする。先頭から順番に 4 bit ごとに区切っていくと、 i 番目の 4 bit のかたまりの並びは $(b_{4i-3}b_{4i-2}b_{4i-1}b_{4i})_2$ ($1 \leq i \leq n$) となる。

ここで 4B3T (4 Binary 3 Ternary) 符号化方式により、この 4 桁の binary 値のかたまりを、3 桁の ternary 値のかたまりに対応付ける。すなわち、 i 番目の ternary 値のかたまりは $(t_{3i-2}t_{3i-1}t_{3i})_3$ ($1 \leq i \leq n$) となる。ただし、ternary 値は $t_i \in \{-, 0, +\}$ とする。

次に、右回りに頂点 p_0, p_1, \dots, p_5 からなる 6 角形を考える。そして、 p_0 を初期位置として、送信データの ternary 列の 1 番目の値が $(+)3$ ならば右回りに 1 つ隣の頂点 p_1 へ、同様に $(0)3$ ならば 3 つ隣の頂点 p_3 , $(-)3$ ならば 5 つ隣の頂点 p_5 に移動する (図 5 参照)。次に、その移動した頂点位置を基準に、ternary 列の 2 番目の値に応じて同様に頂点を移動する。これを送信データの ternary 列に対して順次頂点を遷移させていく。このとき、 i 番目の ternary 値に対して処理したときの頂点の位置 $P(i)$ は、

$$P(0) = p_0 \tag{9}$$

$$P(i-1) = p_j \tag{10}$$

$$P(i) = \begin{cases} p_{(j+1) \bmod 6} & \text{if } t_i = (+)_3, \\ p_{(j+3) \bmod 6} & \text{if } t_i = (0)_3, \\ p_{(j+5) \bmod 6} & \text{if } t_i = (-)_3. \end{cases} \quad (11)$$

で表される。

得られる頂点遷移列 $P(1), P(2), \dots, P(n)$ に対して、頂点 p_0 を Red, 頂点 p_1 を Yellow, 頂点 p_2 を Green, 頂点 p_3 を Cyan, 頂点 p_4 を Blue, 頂点 p_5 を Magenta と順番に割り当て、対応する R, G, B の3色のLEDを点灯させることで、発光色を用いたCSK変調を行う。この方式を用いると、3.2節で述べた $\mathbf{R}(\mathbf{Y})\mathbf{G}$, $\mathbf{R}(\mathbf{M})\mathbf{B}$, $\mathbf{G}(\mathbf{C})\mathbf{B}$ の組合せが出現しない。また、Whiteは、送信データのbit列の送信開始と送信終了を示すために使用する。4B3Tのbinaryとternaryの対応付けには、各ternary値の出現頻度が等しくなるように設計されているMMS43-Code[21]を採用する。

3.4 発光色判定方式と復調方式

3.3節の変調方式において、R, G, BのLEDのON-OFF状態を表現するベクトル $\mathbf{S} = [S_b \ S_g \ S_r]^T$ を考える。各要素はLEDのON-OFF状態を1, 0で表現する。たとえば、MagentaはRedとBlueの加法混色であるので $\mathbf{S}_{magenta} = [1 \ 0 \ 1]^T$ となる。このON-OFF状態に基づいて制御されたLEDをカメラで撮影すると、加法混色された色がカメラから出力される。ここでカメラが出力する色ベクトルを観測値 $\mathbf{V} = [V_b \ V_g \ V_r]^T$ とする。そこで、 \mathbf{V} からON-OFF状態の推定値 $\hat{\mathbf{S}}$ を求める手続き \mathcal{F} を考える。

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathcal{F}(\mathbf{V}) \quad (12)$$

実際に通信を行う環境において、あらかじめR, G, Bの基準となる色ベクトルをサンプリング[22]し、 \mathbf{V} との比較により $\hat{\mathbf{S}}$ を推定する。

カメラで撮像した \mathbf{V} を、RGB空間上にプロットすると、LEDの色特性、カメラの色特性により斜交した平行6面体の頂点位置にサンプルが集まった形状となる。提案手法では、CSKで使用する7色の基準ベクトルとの類似度で推定するため、複数のベクトルが斜交して近接していると推定が困難となる。そこで、先行研究[5]で提案した座標変換手法により基準ベクトルが構成する平行6面体を、各基準ベクトルどうしがなす角度がお互いに直角になるように立方体に座標変換した $\hat{\mathbf{V}}$ を用いて類似度による推定を行う(図6参照)。 $\hat{\mathbf{V}}$ と上記の7色の基準ベクトルとの差の絶対値を類似度と定義し、その値が最小となる基準ベクトルを $\hat{\mathbf{S}}$ とする。

以上をまとめると、手続き \mathcal{F} は

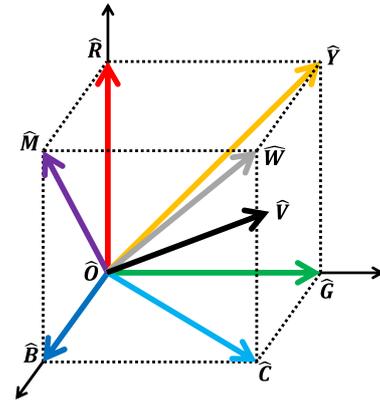


図6 7色の基準ベクトルと観測値 $\hat{\mathbf{V}}$
Fig. 6 Reference vectors of 7-colors and $\hat{\mathbf{V}}$.

$$\hat{\mathbf{S}} = F(\mathbf{V}) = \begin{cases} \hat{\mathbf{O}} & \text{if } |\hat{\mathbf{V}}| \leq \varepsilon, \\ \arg \min_{\mathbf{Z} \in \{\hat{\mathbf{B}}, \hat{\mathbf{G}}, \hat{\mathbf{R}}, \hat{\mathbf{C}}, \hat{\mathbf{M}}, \hat{\mathbf{Y}}, \hat{\mathbf{W}}\}} |\hat{\mathbf{V}} - \mathbf{Z}| & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

となる。ただし、 ε は消灯 $\hat{\mathbf{O}}$ と判断するための閾値とする。

3.3節で $\mathbf{R}(\mathbf{Y})\mathbf{G}$, $\mathbf{R}(\mathbf{M})\mathbf{B}$, $\mathbf{G}(\mathbf{C})\mathbf{B}$ の組合せを使用しない変調方式を提案したが、発光色変化周期とフレーム周期のずれによる偽色の影響を完全に排除することはできない。そこで、偽色が発生した場合に変化前と変化後の色を推定する処理を追加する。

まず、偽色の発生は、式(13)において $|\hat{\mathbf{V}} - \mathbf{Z}|$ が閾値より大きくなった場合、すなわち、すべての基準ベクトルからの距離が大きいことで判断する。

式(4)において、比率 $\Delta t : (T_e - \Delta t)$ を連続的に変化させたときの \mathbf{V} , すなわち偽色のベクトル軌跡は、RGB空間上でプロットすると変化前 \mathbf{C}_1 と変化後 \mathbf{C}_2 の座標を結ぶ線分、すなわち、図6における立方体の辺と対角線とに一致する。そこで、この特性を用いて、 $\hat{\mathbf{V}}$ の座標値が、どの2色間の座標を結ぶ線分に近いかで変化前と変化後の色を推定する。

図6の立方体において、2色間を結ぶ線分は辺12本と対角線16本の計28本あるが、提案方式の場合に考慮すべき線分は、 $\overline{\mathbf{RY}}, \overline{\mathbf{YG}}, \overline{\mathbf{GC}}, \overline{\mathbf{CB}}, \overline{\mathbf{BM}}, \overline{\mathbf{MR}}, \overline{\mathbf{RC}}, \overline{\mathbf{GM}}, \overline{\mathbf{BY}}, \overline{\mathbf{RW}}, \overline{\mathbf{YW}}, \overline{\mathbf{GW}}, \overline{\mathbf{CW}}, \overline{\mathbf{BW}}, \overline{\mathbf{MW}}$ の15本である。そこで、観測値を座標変換した $\hat{\mathbf{V}} = (\hat{V}_b, \hat{V}_g, \hat{V}_r)$ との距離 $d(l, \hat{\mathbf{V}})$ が最小となる線分 l を選択する。線分 l が決定できれば、その線分 l の両端点に相当する基準ベクトル $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2$ が決定できるので、 $|\hat{\mathbf{V}} - \mathbf{Z}_i|$ が最小となる \mathbf{Z}_i を選んで $\hat{\mathbf{S}}$ とする。

提案方式は非同期の変調方式であるため、発光色が変わったことをトリガとして $\hat{\mathbf{S}}$ を時系列順に記録する。その記録列 $\hat{\mathbf{S}}_t, \hat{\mathbf{S}}_{t+1}, \hat{\mathbf{S}}_{t+2}, \dots$ を図5に示した6角形の頂点に対応させて、変調方式の逆の手順でternary値に逆変換し、MMS43-codeでbinary値に復元する。また、Whiteを受

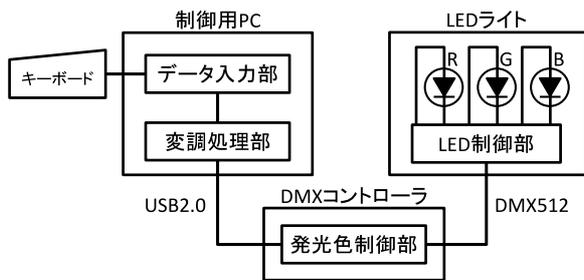


図 7 送信側装置の構成

Fig. 7 Configuration of the transmitter.

表 2 LED ライトの仕様

Table 2 Specifications of the LED light.

電源	AC100 V~240 V
消費電力	10 W
LED 数	76 個 (R 32 個, G 25 個, B 19 個)
照射出力	185 lux (1m 時)
入出力 IF	DMX512

信データの開始, 終了の区切りとして処理する.

4. 実装

提案方式のプロトタイプシステムでは, キーボードなどの文字を入力することが可能な装置と発光する装置を装備した送信側装置, そして送信側装置の光を撮像できるカメラを備え, 受信した信号を復調する受信側装置の組から構成される.

4.1 送信側装置

送信側装置の構成概要を図 7 に示す. R, G, B の 3 色 LED を搭載した舞台照明用 LED ライト (Alkalite LED Technology Octopod75) を使用し, 舞台照明制御用の通信規格である DMX512 [23] を用いて各色 LED の ON-OFF 制御を行うことで, 3.3 節で述べた変調方式に従って送信する (表 2 参照). 使用した LED ライトは, 搭載されている R, G, B の LED の個数が異なっているため, 各色の輝度が異なることが想定される. しかし, 先行研究 [5] で提案した座標変換手法により基準ベクトルの長さを等しく揃えているため, 変復調に及ぼす影響はない.

4.2 受信側装置

受信側装置の構成概要を図 8 に示す. 工業用 CCD カメラ (センテック STC-TC33USB) と工業用 CS マウントレンズ (タムロン M13VM308) を使用し, 外部インタフェースとして USB2.0 を用いて, カメラ制御, および, 撮像データの読み出しを行うことで, 3.4 節で述べた発光色の判定, 復調の処理をする (表 3 参照).

上記カメラを使用するにあたって, カメラで撮像された 2 次元画像データの中で, あらかじめ指定した座標のピク

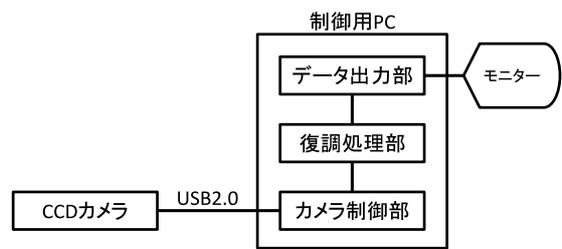


図 8 受信側装置の構成

Fig. 8 Configuration of the receiver.

表 3 カメラ, レンズの仕様

Table 3 Specifications of the camera and the lens.

撮像素子	1/3"正画面素型 VGA プログレッシブカラー CCD
解像度	640×480 pixel
フレームレート	29.97 fps
入出力 IF	USB2.0 High speed
焦点距離	3.0-8 mm (バリフォーカル)
開放絞り	F/1.0

セルの RGB 成分を V として処理をしている. ただし, 指定した当該 1 ピクセルのみではカメラや LED ライトのわずかな揺れによりずれてしまうため, その周囲 8 ピクセルを含めた 9 ピクセルの平均値を V として採用している.

5. 評価

提案手法の有効性を検証するために, 外乱などのない理想的条件としての暗室内, および, 実際に利用環境を想定した屋外夜間の 2 つの条件において受信誤り率の測定を行った.

5.1 暗室内における測定

カメラで撮影する範囲内に外乱となる照明光がない暗室内における通信性能を測定した. 暗室内では送信機と受信機との距離が短くなり, 送信機からの直接光を受光すると明るすぎて白色になってしまう現象 (白飛び) が発生するため, 送信機から約 1m の距離の垂直な壁面に白色の模造紙を貼りつけてそこに照射し, その間接光を壁面から約 1.2m の距離に設置した受信機で受光した. 各色の発光色変化周期 T_i を 40 ms~200 ms の範囲で変化させて, 受信誤り率を測定した. T_i を短くすれば, 通信速度の高速化につながる. 送信データは ASCII コードにおける図形文字 95 文字 (0x20~0x7E) とする. これらは先行研究 [5] と同一条件にしている. 結果を表 4 に示す.

5.2 屋外夜間における測定

本研究の想定は, 災害時に上空を飛行するヘリコプタに対して地上から情報を発信することである. そこで, 屋外

表 4 発光色変化周期と受信誤り率 (暗室内)

Table 4 Relationship between time interval of LED light emitting and receive failure rate (in darkroom).

発光色 変化周期 ms	受信誤り率 (N=950)
200	0%
180	0%
150	0%
130	0%
100	0%
90	0.5%
80	0%
70	0%
60	1.8%
50	2.1%
40	45.0%

表 5 発光色変化周期と受信誤り率 (屋外夜間)

Table 5 Relationship between time interval of LED light emitting and receive failure rate (outdoors at night).

発光色 変化周期 ms	受信誤り率	
	1 回目 (N=95)	2 回目 (N=285)
200	2.1%	—
150	0%	—
100	0%	3.2%
90	—	0.4%
80	0%	1.8%
70	—	3.5%
60	—	10.2%
50	12.6%	8.8%
40	82.1%	58.2%

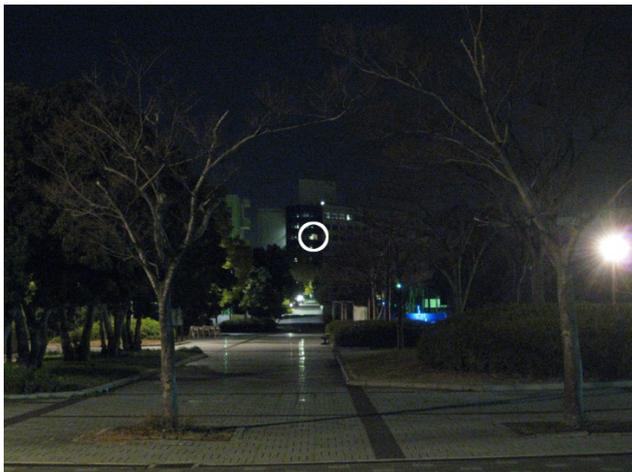


図 9 屋外夜間の実験環境

Fig. 9 Experimental circumstances (outdoors at night).

夜間において通信性能を測定した。送信機設置地点と受信機設置地点との間に水平方向に約 350m の距離を確保し、送信機からの直接光を受信機で受光して実験した。この距離は、法令により航空機の最低安全高度が家屋密集地域ならば地上 300m 以上、開けた場所ならば地上 150m 以上と定められていることから、ヘリコプタの飛行高度を約 350m と想定して決定した。これは先行研究 [5] と同一条件にしている。実験は夜間に 2 回実施している。各回の気象条件は、

1 回目：気温 14.2°C, 湿度 49.4%

2 回目：気温 8.0°C, 湿度 43.0%

であり、いずれも日没後の冬季の乾燥した条件下である。受信機設置地点から送信機設置地点を撮影した写真を図 9 に示す。送信機設置地点は写真中央の円で囲んだ部分であ

る。災害時においては、避難所周辺の照明や火災の炎などの光源が周囲に存在することが想定される。実験環境においても、隣接する部屋の照明、街路灯などが周囲に光源として存在する条件としている。

このような屋外夜間の環境下で、撮影画像内での光源位置の座標を手動で指定し、受信誤り率を測定した結果を表 5 に示す。

6. 考察

6.1 通信性能

先行研究の実験結果 [5] とあわせて、表 4, 表 5 をグラフにプロットしたものを図 10, 図 11 に示す。

先行研究では、暗室内では発光色変化周期 T_i が最短で 125 ms まで、屋外夜間では 400 ms まで受信誤りなしであったのに対して、提案手法では、暗室内では 70 ms まで、屋外夜間では 80 ms まで受信誤りなしで通信できており、大幅に通信性能が改善されている。また、提案手法では、暗室内、夜間屋外ともに T_i が 40 ms で急激に悪化しているが、これは低フレームレートカメラを用いていることが原因である。実験機材の CCD カメラは 29.97 fps なので $T_f = 33.4$ ms となる。 $T_i \approx T_f$ にまで短くなると、ほぼすべてのフレームの出力 \hat{V} が時間的要因による偽色となってしまうためと考えられる。

T_i が短くなると通信速度が速くなる。提案手法では、暗室内では 16 bps, 屋外夜間では 14 bps になる。無線 LAN などと比較すると非常に低速ではあるが、1 文字 8 bit とすると 1 分間に 100~120 文字を送信可能な速度である。簡単なメッセージ程度であれば実用可能な速度である。

単純な文字伝達の符号としては、モールス符号がある。モールス符号は可変長であるため単純比較できないが、第 1 級総合無線通信士に要求される電気通信術のモールス電

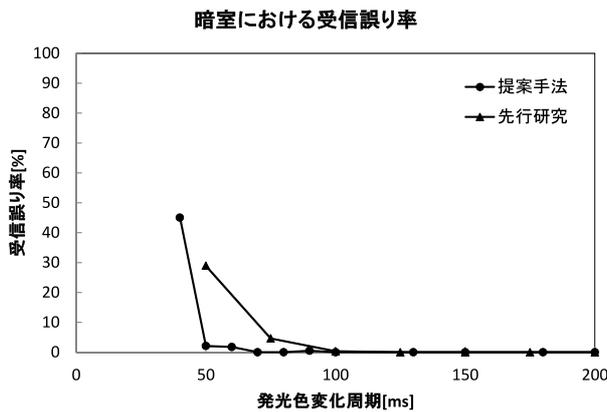


図 10 発光色変化周期と受信誤り率 (暗室内)

Fig. 10 Relationship between time interval of LED light emitting and receive failure rate (in darkroom).

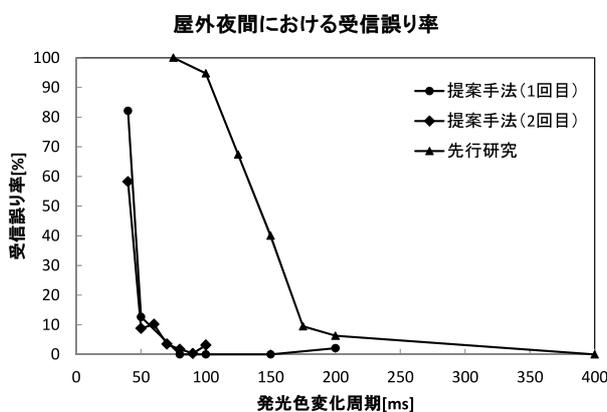


図 11 発光色変化周期と受信誤り率 (屋外夜間)

Fig. 11 Relationship between time interval of LED light emitting and receive failure rate (outdoors at night).

信のレベルが「1 分間 75 字の速度の和文, 1 分間 80 字の速度の欧文暗語及び 1 分間 100 字の速度の欧文普通語によるそれぞれ約 5 分間の手送り送信及び音響受信」(無線従事者規則第五条の一)であり, 非常時通信の一手段として十分実用になる。

前述のように T_i が 50 ms 付近まで受信誤り率 10% を維持し, 40 ms 付近で悪化しているが, 30 fps の一般のビデオカメラを使用することを想定した場合, 非同期通信ではサンプリング定理により限界に達しているといえる。本研究の前提は, 受信機側で一般に入手可能な低フレームレートカメラを使用することである。これ以上の高速化を目指すには, 高価な高フレームレートカメラが必要となってしまふ。

また一方で, 高速な光の点滅, 色の変化などは人体に与える影響も考慮しなければならない。高速な点滅, 輝度変化は光感受性発作を誘発することが知られている。文献 [24], [25], [26] の知見を参考にしながら, 慎重に T_i の値を決定する必要がある。

表 6 発光色変化周期と偽色発生率

Table 6 Relationship between time interval of LED light emitting and false color occurrence rate.

発光色 変化周期 ms	偽色 取得回数 (N=6,650)	偽色 発生率
200	1,540	23.2%
180	1,557	23.4%
150	1,595	24.0%
130	1,575	23.7%
100	1,584	23.8%
90	1,661	25.0%
80	1,630	24.5%
70	1,488	22.4%
60	1,439	21.6%
50	1,530	23.0%
40	1,533	23.1%

6.2 時間的要因による偽色の影響

暗室内での実験結果をもとに, 時間的要因による偽色の発生について考察する。暗室内での実験では, ASCII コードの図形文字 95 文字 (1 文字 8 bit) 分の送信を 10 回反復している。提案手法は 4B3T を用いているので, 8 bit は 6 桁の ternary になる。1 桁の ternary を送信するごとに 1 回色変化し, 区切りとして White を発光する。したがって, 1 文字送信するのに計 7 回の色変化があるので, 総計 $N = 6,650$ の発光色変化が含まれている。図形文字の送信順序はあらかじめ決めているので, 正解の発光色変化の順序と比較して偽色か否かをカウントした結果を表 6 に示す。

T_i にかかわらずに一定の比率で偽色が発生している。これは, フレーム間隔 T_f と露光時間 T_e の比率によると考えられる。フレーム周期と発光色変化周期は正確に同期をしていない。発光色に変化するフレームに注目すると, 発光色に変化するタイミングはフレーム周期内でランダムな位置, すなわち, 図 3 における t_{offset} の値が $0 \leq t_{\text{offset}} < T_f$ の範囲でランダムな値をとると考えられる。すると, 式 (3), 式 (4) に示したように $0 \leq t_{\text{offset}} < T_f - T_e$ の範囲では変化後の発光色を正しく取得するが, $T_f - T_e \leq t_{\text{offset}} < T_f$ では偽色を取得することになる。以上のことから, 確率 $P_{fc} = T_e/T_f$ で偽色を取得すると考えられる。

暗室内の明るさはほぼ一定であり, 使用した機材は自動露出機能を備えているため T_e の値はほぼ一定である。また, $T_f = 33.4$ ms も一定である。したがって, T_i の値に依存せずに一定確率 P_{fc} で偽色を取得したと考えられる。

T_e を長くすれば輝度の低い光源からの情報も取得することができる。一方で, 偽色取得の確率 P_{fc} が高まる。提案

手法によってどこまでの偽色発生に対処できるかを明らかにすることによって、送信側の輝度を低くすることができれば省電力化も可能となる。今後、露光時間 T_e をマニュアル設定できる機材を用いて、偽色発生率に対する耐性について検証していく必要がある。

6.3 関連技術との比較

CSK を採用したシステムとして 2 章であげた C-Blink [13] がある。これは発光色を制御可能な光源として、身近なデバイスである携帯電話機のディスプレイ画面を用いている。しかし、ディスプレイ画面の光量が小さいため、至近距離での利用を想定している。そのため、本研究で想定しているような上空を飛行するヘリコプタとの距離では、地上のディスプレイ画面の光源を目視で確認することは困難であり、また、一般に入手可能な撮影感度のカメラでも受信することが困難である。

本プロトタイプシステムにおいては、光源として高輝度の舞台照明用 LED ライトを利用することで長距離での通信が可能となっている。しかし、専用機材を利用せざるをえないため、個人で所有する形態ではなく、発電機や衛星電話のように避難所に備蓄する資機材 [27] と同様の位置づけを考えている。

一方で、発光色を制御可能な高輝度の光源が利用可能であれば利用可能である。たとえば、最近では、高輝度 W (白色) LED を用いた懐中電灯が普及してきている。また、1 素子で R, G, B の 3 色と W とが発光可能な高輝度 LED も登場している。送信メッセージを固定メッセージのみに限定した簡易な送信機機能と多色発光可能な高輝度 LED を懐中電灯に組み込むことができれば、身近な光源としての利用が期待でき、個人での所有も可能となる。

7. おわりに

可視光通信の非常時通信への適用をめざし、夜間における被災地上空からの視認性を重視した可視光非常時通信方式の開発に取り組み、先行研究では、RGB の 3 色 LED の加法混色により生成される 7 色を用いて CSK 方式を提案した。しかし、発光色変化周期とフレーム周期のずれにより発生する時間的要因による偽色が課題であった。そこで、時間的要因による偽色が発生しにくい CSK 方式の提案と、偽色が発生した場合に正しい発光色を推定する方式を提案した。そしてプロトタイプシステムによる評価実験を実施し、通信性能の改善を確認した。これにより、災害時においての実用可能性が見込めると考えられる。

また、評価実験の結果より、偽色発生率は発光色変化周期やフレーム間隔ではなく露光時間に依存している可能性がある。偽色への耐性向上ができれば、送信側の輝度が低くても受信できることになり、より簡便で低消費電力の装置で送信できる道につながる。今後は、以上の検証に取り

組むとともに、各種気象条件下 (たとえば、夏季の多湿時) での性能評価、ドローンなどを用いて鉛直方向での性能評価を実施し、実用性の向上をはかっていく。

謝辞 本研究は、JST A-STEP 課題番号 AS221Z02488A、および、JSPS 科研費 23650029、25242037 の助成を受けたものです。本研究の一部は、(公財)高橋産業経済研究財団より助成金の援助を受けたものです。また、本研究の実証評価に協力してくれた岡本典樹君に感謝いたします。

参考文献

- [1] 内閣府政策統括官 (防災担当): 中山間地等の集落散在地域における孤立集落発生の可能性に関する状況調査 (都道府県アンケート調査) 調査結果, 内閣府 (2005).
- [2] 間瀬憲一, 岡田 啓, 大和田泰伯: 中山間被災地復興へ向けた無線ブロードバンド提供の実践的取り組み, 電子情報通信学会誌, Vol.91, No.10, pp.857-861 (2008).
- [3] Urakami, M., Innami, S., Kamegawa, M., Shigeyasu, T. and Matsuno, H.: Wireless Distributed Network System for Relief Activities after Disasters, *Proc. 2010 Int'l Conf. Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications*, pp.260-267 (2010).
- [4] 大瀧 龍, 重安哲也, 浦上美佐子, 松野浩嗣: 自律的無線ネットワークを用いた被災情報提供システム, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.1, pp.308-318 (2011).
- [5] 塚田晃司, 岡 裕大: RGB 3 色 LED の加法混色を用いた色変調可視光通信の提案と非常時通信への適用, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.1, pp.134-144 (2016).
- [6] 中川正雄: 可視光通信の世界, 工業調査会 (2006).
- [7] 飯塚宣男: 可視光イメージセンサ通信技術の動向と展望, マイクロメカトロニクス, Vol.54, No.202, pp.26-37 (2010).
- [8] 春山真一郎: 可視光通信の現状, 照明学会誌, Vol.98, No.10, pp.538-541 (2014).
- [9] pureLiFi Ltd.: pureLiFi, available from (<http://purelifi.com/>) (accessed 2017-04-13).
- [10] パナソニック (株): LinkRay, 入手先 (<https://panasonic.biz/cns/LinkRay/>) (参照 2017-04-13).
- [11] 杉山英充, 春山真一郎, 中川正雄: 可視光通信に適した変調方式の実験的検討, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE2005-7, pp.35-38 (2005).
- [12] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, IEEE Std 802.15.7 (2011).
- [13] 宮奥健人, 吉田悠一, 東野 豪, 外村佳伸: C-Blink: 携帯端末カラーディスプレイによる色相差光信号マーカ, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J88-D-I, No.10, pp.1584-1594 (2005).
- [14] 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).
- [15] カシオ計算機 (株): Picalico, 入手先 (<http://picalico.casio.com/ja/>) (参照 2017-04-13).
- [16] Nguyen, T., Le, N.T. and Jang, Y.M.: Asynchronous Scheme for Unidirectional Optical Camera Communications (OCC), *Proc. ICUFN 2014*, pp.48-51 (2014).
- [17] Le, N.-T., Le, T., Nguyen, T. and Jang, Y.M.: Synchronization Issue for Optical Camera Communications, *Proc. ICUFN 2015*, pp.220-224 (2015).
- [18] Luo, P., Zhang, M., Ghassemlooy, Z., Minh, H.L., Tsai, H.-M., Tang, X., Png, L.C. and Han, D.: Experimental Demonstration of RGB LED-Based Optical Cam-

- era Communications, *IEEE Photonics J.*, Vol.7, No.5 (2015).
- [19] 嶋田祥太, 秋山尚之, 橋爪宏達, 杉本雅則: 汎用動画カメラによる高速可視光通信とその応用, 情報処理学会研究報告, Vol.2016-UBI-50, No.17, pp.1-6 (2016).
- [20] 近藤那樹, 北岡涼太郎, 水野翔太, 中條 渉: 逐次推定法を用いたイメージセンサ可視光通信の同期方式, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J100-B, No.2, pp.77-89 (2017).
- [21] Infineon Technologies AG: T-SMINTO 4B3T Second Gen. Modular ISDN NT (Ordinary) PEF 80902 Version 1.1, pp.19-21 (2001).
- [22] 岡崎匡紀, 塚田晃司: 発光色の色変化を利用した災害時可視光通信手法の提案, 情報処理学会研究報告, Vol.2015-GN-93, No.36, pp.1-8 (2015).
- [23] United States Institute for Theatre Technology Inc.: DMX512, available from (<http://old.usitt.org/DMX512.aspx>) (accessed 2017-07-13).
- [24] 日本放送協会, (社)日本民間放送連盟: アニメーション等の映像手法について (2006).
- [25] ITU-R: Guidance for the reduction of photosensitive epileptic seizures caused by television, ITU-R BT.1702 (2005).
- [26] Wilkins, A., Veitch, J. and Lehman, B.: LED Lighting Flicker and Potential Health Concerns: IEEE Standard PAR1789 Update, *Proc. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp.171-178 (2010).
- [27] 内閣府 (防災担当): 避難所における良好な生活環境の確保に向けた取組指針, 内閣府 (2016).



塚田 晃司 (正会員)

1996年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程所定単位取得退学。同年(株)日立製作所システム開発研究所。2003年より和歌山大学システム工学部助教授。現在, 准教授。博士(工学)。ネットワークサービス, 減災情報システム等の研究に従事。電子情報通信学会, 日本災害情報学会, システム制御情報学会, IEEE, ACM 各会員。



岡崎 匡紀

2014年和歌山大学システム工学部情報通信システム学科卒業。2016年同大学大学院システム工学研究科博士前期課程修了。同年中央コンピューター(株)入社, システム部に配属。同年7月より高松事業本部に配属, 電力系のシステム開発業務に従事。