

発光色の推定に K-means++法を適用した 災害時可視光通信手法の提案

岡崎匡紀^{†1} 塚田晃司^{†2}

災害が発生すると、携帯電話などの既存の情報伝達インフラが機能しなくなることがある。さらに日没後は被災地域の探索や被災者の安否確認が著しく困難になってしまう。そのような状況において、被災地から外部へ情報を送る手段が必要となる。このような状況に対処する通信方法として、風景に溶け込み難く、夜間でも発見が容易に行える可視光の色変化が考えられる。色の推定には、観測した色と各色の基準ベクトルとの類似度から推定する。基準ベクトルは周囲の環境やカメラの性能に影響されるため、K-means++法を用いて動的に推定する。これにより、周囲の環境やカメラの性能に左右されずに認識率を向上できるシステムを提案する。

Disaster Communication System using Visible Light Communication Applied the K-means++ Clustering to estimate Color of Visible Light

MASAKI OKAZAKI^{†1} KOJI TSUKADA^{†2}

If a disaster occurs, existing communication infrastructures such as cell-phone don't function. In addition, it becomes so difficult to search disaster areas and to confirm safety of victims in disaster areas after sunset. In that situation, we need a method to send information from disaster area to outside. To cope with that situation, we propose a communication system using change of colors of visible light which is hard to melt into scenery and easy to find at night. We estimate the color from resemblance degree of observed color and standard vectors of each color. Standard vectors are influenced by neighboring environment and performance of the camera, so we estimate dynamically using the K-means++ method. Therefore, we suggest the system which can improve recognition rate without being influenced by neighboring environment and performance of the camera.

1. はじめに

災害が発生すると、建物の倒壊や火災により基地局のアンテナが倒壊し、携帯電話などの既存の情報伝達インフラが機能しなくなることがある。物理的障害が発生しなかった場合においても、安否確認などを行うことにより通信量が増大し、輻輳が発生することにより情報伝達を行うことが困難になってしまう。

以上のような状況において、外部に情報を送る方法として、はじめに声や音を出すことが考えられる。しかし、体力的に限界があり、音の届く範囲は非常に限られてしまう。また、複数箇所の音源から情報が送られてきた場合、情報源の判別が非常に困難となり、感覚に頼らざるを得ない。

他の方法として無線を利用して通信を行うことも考えられる。しかし、無線通信を行うには免許が必要であり、さらに電波は目に見えないため、通信状況の確認を機器無しには行えないといった問題点がある。加えて、いつ情報が発信されるかは不定であるため、常に機器を待機状態にしておく必要があり、無駄が多くなる。

視覚に訴える情報伝達手法として、狼煙や救難サインを利用したものがある。しかし、狼煙は誰でも実行可能というわけではなく、また危険であり、救難サインは情報量の

増加とともに設置面積も増加してしまうといった問題点があげられる。さらに、どちらも夜間には見えなくなってしまう。

そこで、本研究では視覚に訴える情報伝達手法として、可視光の低速な色変化に着目する。可視光の色変化は自然界に存在しないため気づきやすく、色が変化することにより情報の伝達が行われているということが視覚的にわかる。さらに、光を使用しているため、直進性が非常に高く、夜間においても使用することができる。このため、地上から上空を飛ぶヘリコプターに情報を送り通信を行う状況を想定している。被災地が送信側となり地上から上空へ向けて光を送る。ヘリコプターは光を受信し、それを文字情報に復号することにより情報伝達を行う。通信のイメージを図1に示す。提案手法により、専用装置を用いることでより詳細な情報を得ることができ、装置が無くても情報発信源の特定や通信が行われているかどうかの確認ができる。受信側は目視で発信源を見つけ、その方向にカメラを向けることによって光の変化に重畳されている情報を取り出す。

2. 関連研究

イメージセンサ通信における研究で、連続的な色変化と

^{†1} 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University.

^{†2} 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University.

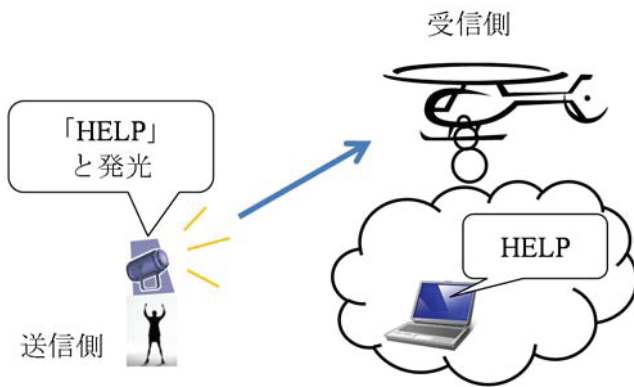


図 1 被災地域における可視光通信の利用イメージ
Figure 1 Image of visible light communication at disaster areas

色相差により信号の位置とデータを検出する C-Blink がある[1]. 点滅周波数が同じ場合、単色光の点滅に比べ 1 光源あたりのデータ通信速度を高くできるが、送信するデータは ID などの決められた情報しか送ることができず、動的なメッセージを扱うことには向いていない。

また、色変化を用いた通信技術として光クロノコードがある[2]. 光クロノコードは、点灯する光の色の変化パターンからデータを取得する技術である. 市販の USB カメラを利用でき、1 画素でも画面に映れば復号可能であり、システム導入の敷居は低い. しかし、こちらも C-Blink と同様、ID などの決められた情報しか送ることができない。

可視光通信技術を利用した写真共有アプリ「ピカピカカメラ」がある[3]. 送信側は赤緑青の光を順番に点滅させ、受信側がカメラをかざすことにより、データを送ることができる. 受信側は受け取ったデータをもとに、クラウドサーバ上からコンテンツを取得する。

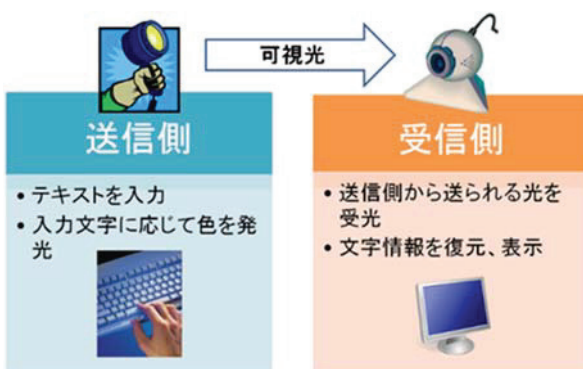


図 2 システムモデル
Figure 2 System image

3. 先行研究

イメージセンサ通信は災害時非常時通信に応用されている[4][5]. 送信側は文字情報を色情報に置き換え LED ラ

イトで送信する. 受信側は Web カメラで光の色を xy 色度図に基づいて認識し文字情報に復元する. システムのモデルを図 2 に示す.

先行研究[6]では、受信側において色の識別に RGB とその混成色の基準ベクトルとの類似度を用いる. 基準ベクトルとは、観測値との比較のための基準となる値である.

3.1 送信側

送信側は送りたいメッセージを入力し、入力した情報に対応する色を発光させることにより情報の送信を行う. 送信時は、入力された文字列を一字ずつ 2 進数のビット列に変調する. 使用する色は赤・緑・青・シアン・マゼンタ・イエロー・白の 7 色であり、白以外の 6 色に 2 進数を割り当て、白を文字と文字の間隔のために使用する.

文字列をビット列に変換した後、2 ビットごとに切り分け、色を発光していく. 図 3 のように RGBCMY の 6 色を並べ、現在光っている色からいくつ隣の色に変化したかにより情報を識別する. 1 つ隣の色に変化した場合は 00, 2 つ隣の場合は 01, 3 つ隣の場合は 11, 4 つ隣の場合は 10 の情報を送ったことになる. 遷移数と送信されるビット列の関係を表 1 に示す. 文字を送る際に白を最初に発光することによって、受信側と送信側の同期を図る. 白から他の色に変化することによって情報の送信を開始する. 図 3 における R の位置を最初の W の位置とし、何色に変化したかによって送られた 2 進数 2 桁の情報を識別し、一文字分の情報が送られるたびに再び白を発光することによって一文字分の区切りを示す. 値の割り当ては、隣接ビットに変換する際に 1 ビットで済むグレイコードを用いる. 図 3 のように 2 ビットの 4 値を決定しているため、01010101 のように同じ 2 進数 2 桁の情報を繰り返し送っても、送信側の色変化は WGBRG となり、同じ色が連続しないようになっている. そのため、受信側と送信側でタイミングの同期をせずに通信を開始することができる.

表 1 遷移数と送信ビット列の関係

Table 1 The relation between the number of transition and transmission bits

遷移数	ビット列
1	00
2	01
3	10
4	11

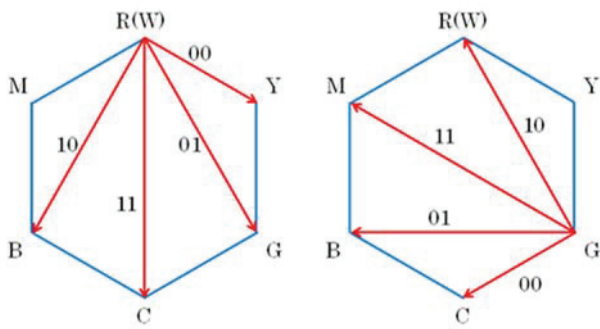


図 3 色の遷移と送信ビット列

Figure 3 The relation changing color and transmission bits

3.2 受信側

基準ベクトルを求めるには、事前に RGB と自然光の三次元ベクトルを用意しておく。しかし、この RGB はカメラや光源の特性により互いに直交していないため、アフィン変換による回転で軸を揃え、斜交座標を直交座標に座標系変換を行うことにより正規直交化を図る。この正規直交化を行う行列を変換行列と呼び、変換行列は事前に求めた RGB の値から求められる。基準ベクトルのイメージ図を図 4 に示す。

最初に Y 軸回転を行う。図における R の基準ベクトルの座標を $(R_x \ R_y \ R_z)$ とすると、Y 軸回転の角度は $\tan^{-1}(R_z/R_x)$ で求められる。この角度を利用して、RGB 基準ベクトルそれぞれに Y 軸回転を行う。これにより、R の基準ベクトルが XY 平面と平行になる。Y 軸回転を表す行列を式(1)に示す。

$$Y = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdots (1)$$

$$Z = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdots (2)$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \cdots (3)$$

次に Z 軸回転を行う。Y 軸回転を行った後の R の基準ベクトルを $(R'_x \ R'_y \ R'_z)$ とすると、Z 軸回転の角度は $-\tan^{-1}(R'_y/R'_x)$ で求められる。この角度を利用して、RGB 基準ベクトルそれぞれに Z 軸回転を行う。一連の手順により、R の基準ベクトルを X 軸に合わせる。Z 軸回転を表す行列を式(2)に示す。

最後に X 軸回転を行う。YZ 回転を行った後の G の基準ベクトルを $(G''_x \ G''_y \ G''_z)$ とすると、X 軸回転の角度は $-\tan^{-1}(G''_z/G''_y)$ で求められる。この角度を利用して、RGB 基準ベクトルそれぞれに X 軸回転を行う。一連の手順により、R の基準ベクトルが X 軸に揃い、G の基準ベクトルが XY 平面と平行になる(図 4)。X 軸回転を行う行列を式(3)に示す。

ただし、

$$\alpha = \tan^{-1}(R_z/R_x) \cdots (4)$$

$$\beta = -\tan^{-1}(R'_y/R'_x) \cdots (5)$$

$$\gamma = -\tan^{-1}(G''_z/G''_y) \cdots (6)$$

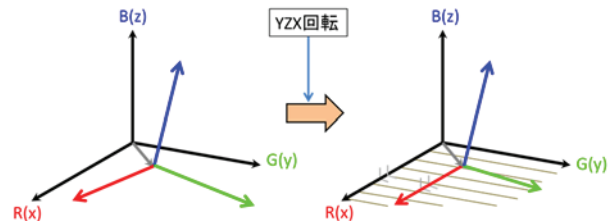


図 4 YZX 変換

Figure 4 YZX transformation

これによりアフィン変換による回転を終了する。ここから直交座標系に変換する処理を行う。斜交座標系の x 軸と直交座標系の X 軸が平行であり、斜交座標系の xy 平面と直交座標系の XY 平面が平行である場合、斜交座標系における単位ベクトルを $(s_1 \ s_2 \ s_3)$ とすると、直交座標系の単位ベクトル $(i_1 \ i_2 \ i_3)$ は以下の式(7)で表すことができる。ただし、斜交座標系における x 軸と y 軸、y 軸と z 軸、z 軸と x 軸の成す角をそれぞれ ϕ 、 η 、 ψ とする(図 5)。

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \cos \phi & \cos \psi \\ 0 & \sin \phi & \frac{\cos \eta - \cos \psi \cos \phi}{\sin \phi} \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{g}}{\sin \phi} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} \cdots (7)$$

ただし、

$$g = 1 - \cos^2 \phi - \cos^2 \psi - \cos^2 \eta + 2 \cos \phi \cos \psi \cos \eta \cdots (8)$$

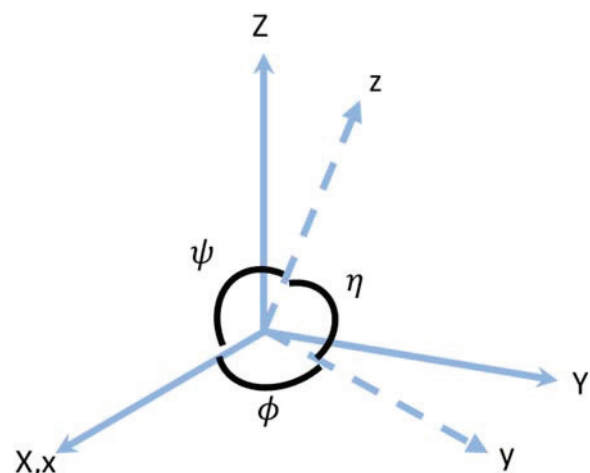


図 5 斜交座標系(x y z)と直交座標系(X Y Z)

Figure 5 Oblique coordinates system (x y z) and Orthogonality coordinate system (X Y Z)

先程のアフィン変換は、直交座標系に変換するにあたり、

以上のような行列を使用できるようにするための演算である。原点移動を行った後、基準ベクトルを直交座標系に変換するには、以上にあげた4つの行列を順に掛けることにより図6のように変換できる。この一連の流れは4つの行列を1つの行列にまとめた変換行列によって表すことができる。すなわち、原点移動した後の値を(a b c)とすると、正規直交化後の観測値(x y z)は以下の式(8)で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = AXZY \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \cdot \cdot \cdot (8)$$

ただし、

$$Y = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

$$Z = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \cos \phi & \frac{\cos \psi}{\sin \phi} \\ 0 & \sin \phi & \frac{\cos \eta - \cos \psi \cos \phi}{\sin \phi} \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{g}}{\sin \phi} \end{pmatrix}^{-1}$$

$$g = 1 - \cos^2 \phi - \cos^2 \psi - \cos^2 \eta + 2 \cos \phi \cos \psi \cos \eta$$

Aは正規直交化を行う行列、X、Z、YはそれぞれX軸回転、Z軸回転、Y軸回転を行う行列である。このことから、斜交座標系から直交座標系への座標変換を行う行列を求めるためには、自然光のベクトルと、RGBの基準ベクトルの計4つのベクトルが必要であることがわかる。

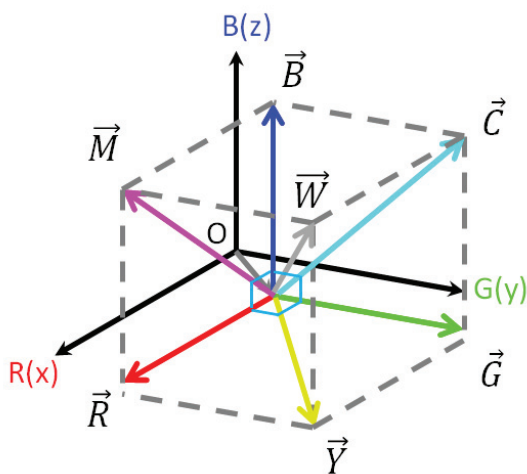


図6 正規直交化された基準ベクトル

Figure 6 Standard vectors that was made regular orthogonality

基準ベクトルを求めた後、観測した色のベクトルと各基準ベクトルとのcos類似度を計算し、色の推定を行う。求めた7色の基準ベクトルの成分を(a b c)、座標変換を行った観測値のベクトルの成分を(x y z)で表すと、cos類似度は式(9)により求められる。値が1に近いほど2つのベクトルの成す角が小さい、つまり同じ色を示していることを表す。

$$\cos \theta = \frac{ax+by+cz}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \cdot \cdot \cdot (9)$$

この研究により、高速かつ高認識の通信手法を確立したが、この時用いた変換行列はあらかじめ求めていたものである。実際の場合においては、各場面においてRGBを求め、最も適した変換行列を求められるようにする必要がある。

4. 提案手法

先行研究においては、基準ベクトルを求めるのに必要なRGBベクトルを事前に用意していた。しかし、実際には最適な基準ベクトルは環境によって変化していくため、事前に求めていたものとずれが生じてしまう。そこで本研究では、常に変化する最適な基準ベクトルを動的に取得するアルゴリズムを提案する。

はじめに何も光らせていない状態（自然光）とRGBCMYWの光のRGB値のサンプルを取得する。そして取得したサンプルを8つのグループにクラスタリングする。結果を図7に示す。

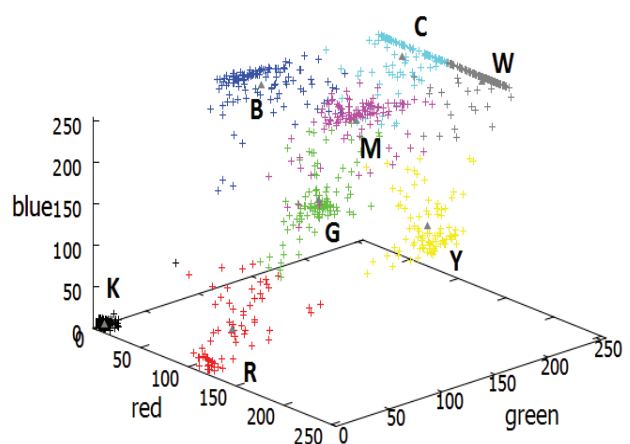


図7 8色のクラスタリングの結果

Figure 7 The result of eight colors of clustering

クラスタリングの手法にはK-means法を用いる。K-means法は、非階層型クラスタリング手法の一つであり、クラスタの平均値から、与えられたn個のデータをK個のクラスタに分類する。K-means法のアルゴリズムを以下に示す。

1. 各データ $x_i (i = 1 \dots n)$ それぞれにランダムにクラスタ

を割り当てる。

2. 割り当てられたデータから各クラスタの中心 $c_j(j = 1 \dots K)$ を計算する。具体的には、割り当てられたデータの各要素の算術平均

$$c_j = \frac{1}{|c_j|} \sum_{x_i \in c_j} x_i \dots (10)$$

を用いる。ここで、式(10)における $|c_j|$ はクラスタ j に所属するデータの数、 c_j はクラスタ j に含まれる要素の集合を現す。

3. 各 x_i と各 V_j との距離を計算し、 x_i を最も近い中心のクラスタに割り当て直す。
4. 全ての x_i について、クラスタの割り当てが変化しなかった場合、収束したと判断し処理を終了する。一つでも所属クラスタの変化があった場合、2に戻り V_j の再計算を行う。

ただし、K-means法は結果が初期クラスタのランダムな割り当てに大きく依存するため、最適な解が得られるとは限らない。その初期値の選択手法を改良したものとして、K-means++法がある。K-means++法は、初期のクラスタ中心はなるべく離れていたほうが良いという考え方に基づいている。K-means++法のアルゴリズムを以下に示す。

1. 一つ目のクラスタ中心 c_1 を全データ $x_i(i = 1 \dots n)$ からランダムに選択する。
2. 全データに対して、 $D(x_i)(i \in (1 \dots n))$ を求める。 $D(x_i)$ は、データ x_i と既に決定されたクラスタ中心 c_1 との距離を表す。
3. 次式(11)を満たす実数値 L をランダムに求める。

$$0 \geq L \geq \sum_{i=1}^n D(x_i)^2 \dots (11)$$

4. 次式(12)を満たす x_i を次のクラスタ中心 c_j に選択する。

$$\sum_{i=1}^{j-1} D(x_i)^2 \geq L \geq \sum_{i=1}^j D(x_i)^2 \dots (12)$$

5. 初期クラスタ中心を K 個選択するまで手順2から4を繰り返す。 K 個選択後、K-means法の手順2から4を行う。

8つのクラスタ中心を求めた後に、それぞれがどの色の基準ベクトルであるかを識別する必要がある。8つの色はそれぞれRGBの各成分を含む(1)か含まない(0)かによって判別することができる。基準ベクトルのそれぞれのRGB値の平均を計算し、平均より高い場合を1、低い場合を0とし、01の並びで各色を識別する。それぞれの色とRGB成分の組み合わせの関係を表2に示す。

クラスタリングの結果によっては、2つ以上のクラスタ中心に同じ色が割り当てられてしまい、色の判別ができなくなってしまう場合がある。そのような場合は、再びK-means++法を実行し、再度クラスタ中心を求めて8色に分

けられるまで判別を行う。

以上のような流れを繰り返す、変換行列を常に最新の状態に更新することにより、常に現在の環境における最適な基準ベクトルを求めることができる。

表2 各色とRGB成分の組み合わせ

Table 2 Combination of color and RGB elements

色	(R,G,B)	色	(R,G,B)
黒(自然光)	(0,0,0)	シアン	(0,1,1)
赤	(1,0,0)	マゼンタ	(1,0,1)
緑	(0,1,0)	イエロー	(1,1,0)
青	(0,0,1)	白	(1,1,1)

5. 実装

本研究はWindows 7 OS上でMicrosoft Visual Studio 2010において実装した。OpenCV2.4.5をインストールし、プログラムを作成した。受信機側で用いるUSBカメラにはセンサーテクノロジー社のSTC-TC33を使用した。

5.1 送信側

送信機には、Alkalite社のOctopod 75を使用する。送信機の仕様を表3に示す。

送信側は3色あるRGBの光を点滅させることにより色彩を再現する。任意の発光パターンを送るには、USB接続したWindowsコンピュータによって行う。今回の実験では、Windows Vista SP2がインストールされているVostro 1000を送信PCとして用いた。送信用PCの仕様を表4に示す。

表3 LEDの仕様

Table 3 Specification of LED

電源	AC100V50/60Hz
消費電力	10W
外形寸法	171×155×137mm
重さ	0.52kg
LED数	76個(赤32個, 緑25個, 青19個)

表4 送信側PCの仕様

Table 4 Specification of sender PC

CPU	AMD Athlon64 X2 TK-57
動作周波数	1.9GHz
メモリ	1GB
GPU	ATI RADEON Xpress 1150 内蔵 (RADEON X300 相当)
重量	約2.88kg

5.2 受信側

受信機には、センサーテクノロジー社の STC-TC33 を使用する。受信機の仕様は表 5 のとおりである。受信処理を行う PC には Windows 7 がインストールされているタブブック CF-31 を用い、カメラと PC を USB 接続する。USB カメラにより取得した画像から RGB 成分を取得し、OpenCV を用いて画像処理を行う。バージョンは 2.4.5 を用いる。プログラミング開発環境には Microsoft 社の Visual C++ 2010 を用いる。受信用 PC の仕様を表 6 に示す。

表 5 カメラの仕様

撮像素子	CCD
フレームレート	29.97fps
解像度	640×480pixel
画素数	33 万画素
外形寸法	51×51×44.3mm
重さ	145g

表 6 受信側 PC の仕様

CPU	Intel Core i5 M520
動作周波数	2.4GHz
メモリ	2GB
GPU	モバイルインテル QM57 Express チップセット
重量	約 3.72kg

6. 実験・考察

提案手法を実装し、いくつかの場面において通信実験を行った。具体的には、暗室、屋内、屋外において通信実験を行い、先行研究との比較を行い、提案手法の有用性を検討した。

暗室とは、通信用の LED ライト以外の光源がまったく存在しない理想的な環境である。屋内とは、通信用の LED ライト以外に照明光などのほかの光が存在している環境である。

それぞれの環境において、はじめに LED を白色に光らせ、RGB の各色が飽和しないようにカメラの絞りなどの調節を行う。LED の発光間隔を先行研究と同じく 200ms・175ms・150ms・125ms・100ms・75ms・50ms としてそれぞれについて実験を行った。発光間隔と通信速度の関係を表 7 に示す。発光間隔 xms における通信速度を ybps とすると、x と y の間には $y = 1600/x$ の関係が成り立つ。

表 7：発光間隔別における通信速度

Table 7 Transmission rate of each light interval

発光間隔[ms]	通信速度[bps]
200ms	8.000
175ms	9.143
150ms	10.667
125ms	12.800
100ms	16.000
75ms	21.333
50ms	32.000

今回、実験に使用した CCD カメラのフレームレートは 29.97fps であるが、実際には PC の性能や周囲の環境により 18~26fps の範囲の異なった値となる。これは処理速度の問題や LED の高速な点滅が人体に悪影響を及ぼすことを考えると、想定範囲内であると言える。

送信データについて、こちらも先行研究と同じく、ASCII コードで 16 進数の (20)16~(7E)16 までの計 95 個のデータを送った。実験データをこのような数字にしている理由は、(00)16~(1F)16 まだが制御文字であり、(20)16 が空白で、(21)16~(7E)16 まだが図形文字、そして (7F)16 が制御文字 (DEL) になっているからである。

各発光間隔において受信、復号を行う前に自然光と 7 色の色のサンプルを 1000 個取得する。その後 K-means++ 法によりクラスタリングを行い、自然光と 7 色の基準ベクトルを求めた後、変換行列を求める。そのあと受信、復号処理を行うが、色を 100 回観測するたびに最新 1000 個のデータを用いてクラスタリングを行い、変換行列と基準ベクトルを更新する。

誤りがどのくらい発生しているかについては、任意の文字列に対して、受信した文字と比較することにより、誤り率の測定を行った。本論文における誤り率とは、シンボルエラーレートのことであり、ビットエラーレートのことではない。例えば、緑→シアン:00 を、緑→青:01 と誤認識した場合、1 ビット間違っているとするものではなく、シアンを青と間違えることにより復元される文字列に誤りが生じるため、1 文字の間違いとする。

6.1 実験結果（暗室）

暗室実験の様子を図 8 に示す。この状態において暗幕を下ろすことにより暗闇の空間内で実験を行った。結果を図 9 に示す。それぞれの発光間隔において 1 回ずつ計測しているので、送信データの個数は全部で 95 個となる。

図 9 において、75ms までの発光間隔において、非常に高い認識率を示している。しかし、50ms の発光間隔では認識率が著しく低下している。先行研究ではカメラのフレームレートが 18~21fps であったのに対し、今回の実験では約

26fps のフレームレートを確認できたため、75ms においても高い認識率が得られたものだと考えられる。

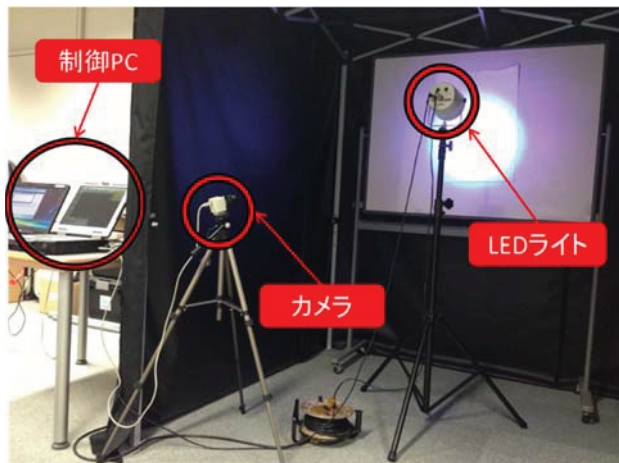


図 8 暗室実験の様子
Figure 8 Experimentation in the dark room

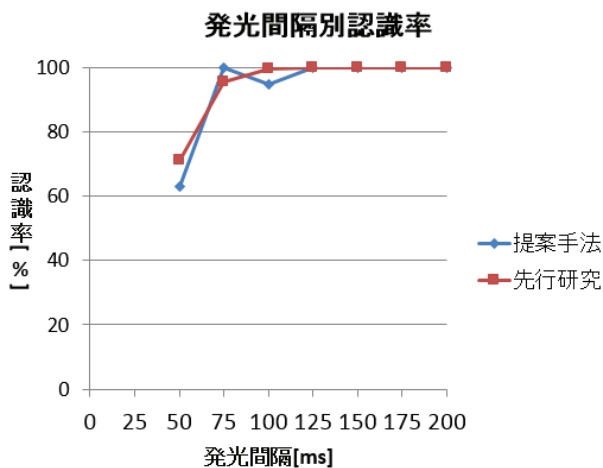


図 9 暗室実験における発光間隔別認識率
Figure 9 Recognition rate in the dark room

先行研究において、頻繁な変換行列の更新量により計算量が增大し、処理速度の低下が懸念されていた。しかし、今回の実験結果により、通信速度はそのままに、常に最適な変換行列を求め、通信を行うことができることを確認した。

6.2 実験結果（屋内）

屋内実験の様子を図 10 に示す。蛍光灯等、LED ライト以外の光源が存在する環境において実験を行った。結果を図 11 に示す。暗室実験と同様、それぞれの発光間隔において 1 回ずつ計測しているのので、送信データの個数は全部で 95 個となる。

図 11 において、暗室における実験と同様、75ms までの発光間隔において非常に高い認識率を示していることがわかる。175ms~125ms において 100% の認識率を確認できた

一方、最も発光間隔の長い 200ms において 2 つの誤りが見られた。これは、基準ベクトルと変換行列の更新の際に一度クラスタリングに失敗し、本来ならシアンと認識されるはずの色がシアンと認識されなかったことにより、送信データに影響が出たと考えられる。

先行研究において、変換行列を暗室実験の値から変更せずに同様の実験を行うと、全ての発光間隔において全く認識を行うことができなかった。変換行列を今回の外乱を含む環境に適した値に設定し直し実験することにより、暗室実験より精度は下がったがある程度の認識率を得ることができた。これに対し、提案手法においては暗室による実験とほぼ同等の認識率を得ることができている。今回の実験から、提案手法が照明光などの外乱を含む環境においても先行研究より高い認識率を得られることが示された。

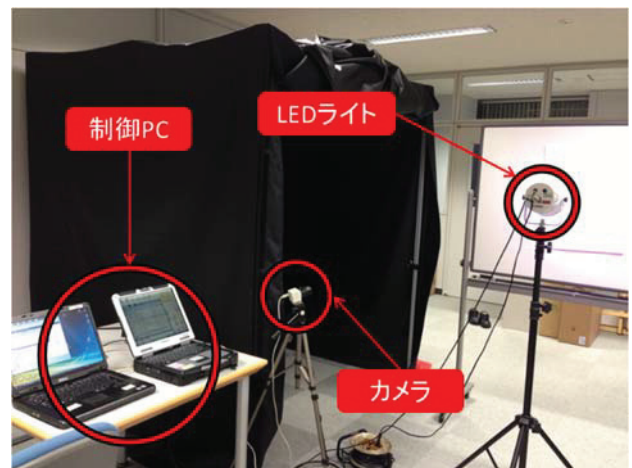


図 10 屋内実験の様子
Figure 10 Experimentation in the indoor

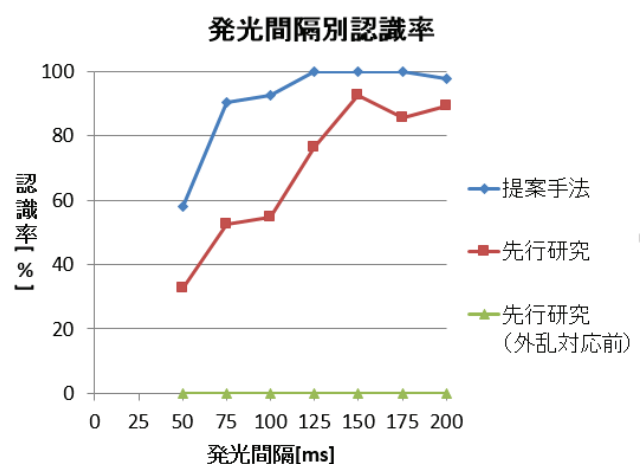


図 11 屋内実験における発光間隔別認識率
Figure 11 Recognition rate in the indoor

6.3 実験結果（屋外）

和歌山県和歌山市和歌山大学にて、建物の 6F に設置した送信機と、約 350m 離れた地面に置いた受信機との間で

通信実験を行った。これは先行研究と全く同じ環境である。送信機と受信機の距離を 350m 強放離しているのは、航空機の最低安全高度が家屋の密集している地域ならば 300m 以上、開けた場所であれば 150m 以上と定められているからである。暗室実験、屋外実験と同様に、任意の文字列を送信し、受信した文字列と比較することにより誤り率の計測を行った。実験の結果を図 12 に示す。

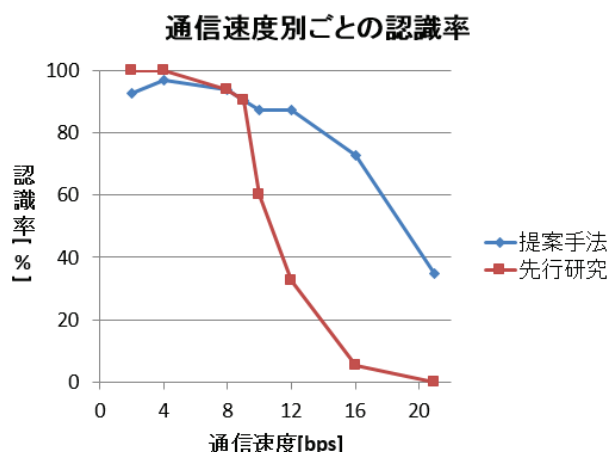


図 12 屋外実験における発光間隔ごとの認識率
Figure 12 Recognition rate of outdoor experimentation

図 12 より、発光間隔が短くなっていく（通信速度が速くなっていく）につれて認識率が低下しているが、先行研究と比較して認識率の低下は抑えられている。今回の実験結果から、およそ 100ms までの発光間隔が実用に耐えられる許容限界範囲だと考えられる。

先行研究では、事前に変換行列を用意した後、現場においてピントや絞りなどを調節していたため、そこから最適な変換行列とのずれが生じ、認識率の低下の原因であると考えていた。今回の実験では、先にピントや絞りなどを調節し、通信を行う前に 7 色の基準ベクトルと変換行列をその場で求めて実験を行った。さらに通信の途中でも適宜 7 色の基準ベクトルと変換行列を常に最適な状態に更新した。今回の実験により、変換行列を動的に求めることにより認識率の向上を確認することができた。

高速な光の点滅に対する認識率が向上した一方、比較的低速な発光間隔における認識率は 100% にならなかった。考えられる原因として、変化途中の色を認識してしまい復号結果に影響を及ぼしてしまったことが考えられる。今回の実験において、シアンから赤に変化する際に一度だけマゼンタが認識された瞬間があり、本来ならシアン→赤：11 が送信されるはずがシアン→マゼンタ：01 が送信され、誤った文字が復号される場合が存在した。

また、クラスタリングに失敗し、ある色の基準ベクトルが誤って設定された可能性が考えられる。一度クラスタリングが誤って設定されると、次の更新までその誤った基準

ベクトルで色の判別が行われる為、その間は正しく文字の復号が行えなくなってしまう。

7. おわりに

本研究では、発光色の推定に k-means++法を用いることにより、各場面において最適な基準ベクトルと変換行列を求め通信を行うことのできる災害時可視光通信システムを提案、実装した。提案手法を実装し通信実験を行い、環境の変化に対応できることを確認することができた。一方で、復号に失敗し、誤った文字列を受信してしまう事例も存在した。誤認識を減らすために、誤り検出・訂正を行う必要性が考えられる。また、今回の研究では、受信機と送信機を固定し、カメラの取得画像から光源を手動で選択して実験を行った。実際の想定環境では送信側が揺れや移動等の影響により光源がずれてしまう。そのため、光源を自動で認識・追跡していく必要がある。これらの課題を解決し、実際の場面において実験を行い、本研究の有効性を確認する必要がある。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金 23650029 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 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-1, No. 10, pp.1584-1594, 2005.
- 2) B.CORE Inc. CB クロノ(光クロノコード): <http://www.colorbit.jp/chrono/chrono_feature>
- 3) カシオ計算機株式会社: ピカピカカメラ, 入手先 <<http://www.casio-isc.com/ja/>>
- 4) 原山 拓士, 村吉 翔大, 塚田 晃司: 高輝度フルカラーLEDを用いた非常時通信システムの提案, 日本災害情報学会第 12 回研究発表大会予稿集, pp.363-368, 2010 年 10 月
- 5) 原山 拓士, 高田 政裕, 塚田 晃司: 揺れ、移動を考慮した非常時可視光通信システムの改良と実装, 情報処理学会第 74 回全国大会, 2012 年 3 月
- 6) 岡 裕大, 塚田 晃司: RGB 色ベクトルの推定を用いた災害時可視光通信システムの提案と実装, 情報処理学会第 75 回全国大会, 2013 年 3 月