

# Optical Camera Communicationにおける環境適応型 CSK

Adaptive CSK for Optical Camera Communication

小野寺 幸仁<sup>1</sup>  
Yukito Onodera

久野 大介<sup>2</sup>  
Daisuke Hisano

中山 悠<sup>1</sup>  
Yu Nakayama

東京農工大学 大学院 工学府 情報工学専攻<sup>1</sup>  
Department of Computer and Information Sciences,  
Tokyo University of Agriculture and Technology

大阪大学 大学院 工学研究科<sup>2</sup>  
Graduate School of Engineering,  
Osaka University

## 1 はじめに

Optical Camera Communication(OCC)とは、送信機にLEDやディスプレイなどの光源、受信機にはカメラに搭載されているCMOSセンサーを用いた可視光通信である。近年、多くのデバイスに光源やカメラが搭載されているため、OCCは安価でセキュアな通信チャネルとして期待される[1]。一般的なOCCでは、3色LEDの点滅により光信号を送信し、カメラで撮影した画像を解析することで信号を受信する。OCCの変調方式の中でも、3色LEDの特徴を生かしたColor Shift Keying(CSK)は、スループット向上の観点から注目されている。しかし従来のCSKでは、外部環境によっては特定の色の読み取り精度が低下する課題があった。そこで本稿では、環境に応じてシンボルすなわち色の使い方を変える環境適応型CSKとして、(N+1)-CSKを提案する。複数環境における測定結果から、提案手法はシンボル誤り率(SER; Symbol Error Rate)を低下させ、従来のN-CSKと比べBit Error Rate(BER)を大幅に低減可能なことを確認した。

## 2 Color Shift Keying

CSKとは、可視光通信の変調方式の1つとしてIEEE802.15.7で規定され、光の色により情報を伝送する。CSKでは一般的に、CIE1931[2]色空間(図1)の色度座標を用いて色情報を表す。CIE1931とは、複数の波長から構成される物理的な色と人間の知覚色との関係を定量的に表すために定義された色空間であり、一般によく用いられる。従来のN-CSKでは、色空間内にN個の色シンボルを定義することで、 $\log_2 N$  bit/symbolの情報を伝送する。OCCでは、これらの色シンボルを三色LEDの発光強度の調節により表現するが、一般にカメラの機種によって色の認識範囲が異なる(図1)。よって認識範囲内でシンボル間距離を最大化するようシンボルを配置することで、SERを抑制する手法が知られている。しかしながら、カメラによる色補正のほか、周囲の環境などの外部要因、送信する光源の種類などによっては、特定の色の認識率が低下する場合がある。

## 3 提案手法

### 3.1 概要

上記課題を解決するため、本稿では環境適応型CSKである(N+1)-CSKを提案する。提案手法の目的は、外部環境の変化などに起因する特定シンボルの認識率低下に動的に対処し、低SERを達成することである。提案

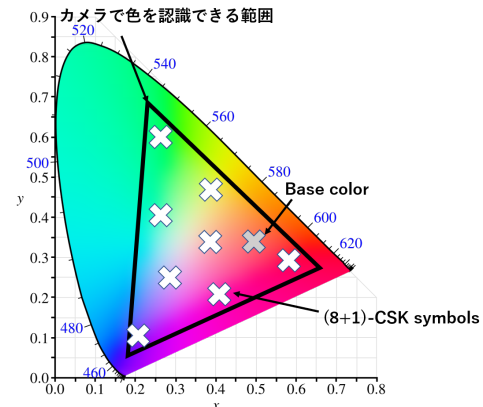


図 1: CIE 1931 色空間における (8+1)-CSK.

手法のコンセプトを図1に示す。具体的な手法としては、通常のN-CSKより1つ多くのシンボルを用意しておき、SERが最大となるシンボルをベースカラーと定義する。信号の伝送にはベースカラーを使用せず、他のNシンボルを用いる。本手法により、状況に適応して利用シンボルを変化させ、信号伝送時のSERを抑制することが可能である。なおベースカラーはNULLを表す色として美観向上にも利用可能である。

### 3.2 色空間上の座標とLEDの発光強度

ここでは、色空間上の色度座標とLEDの発光強度の関係について記述する。はじめにN+1個のシンボル $s_i$  ( $1 \leq i \leq N+1$ )を格納したシンボルセット $\mathcal{A}$ を定義する。

$$\mathcal{A} = \{s_1, s_2, \dots, s_{N+1}\}.$$

シンボル $s_i$ を表すRGB三色LEDの発光強度をそれぞれ $p_r, p_g, p_b$ と定義する。また、図1中の三角形の頂点座標を $(x_r, y_r), (x_g, y_g), (x_b, y_b)$ とおく。このとき、シンボル $s_i$ の色度座標 $(x_i, y_i)$ とLED発光強度との関係は、次式により表される。

$$p_{i,r}x_r + p_{i,g}x_g + p_{i,b}x_b = x_i,$$

$$p_{i,r}y_r + p_{i,g}y_g + p_{i,b}y_b = y_i,$$

$$p_{i,r} + p_{i,g} + p_{i,b} = 1,$$

以上の関係式を解くことで、任意のシンボル座標とLEDの発光強度とを相互に変換可能である。



(a) 環境1 (Tree) (b) 環境2 (Cloud)  
図2: 実験環境.

### 3.3 ベースカラー選択

ベースカラーの選択方法について述べる. ここでは, 送受信機の仕様やチャンネル環境は固定されていると仮定する. まずパイロット信号として各シンボルを送信し, SER を測定する. 各受信シンボルについて, 色空間でユークリッド距離が最も近いシンボルとして推定し, その誤り率を SER とする. 次, 以下の式を用いて, SER が最も高いシンボルをベースカラーとして選択する.

$$s_b = \arg \max e_i$$

ここで  $e_i$  は  $i$  番目のシンボルの SER を表している. 本手法により, 所与の環境のもとで認識精度が最も低い色を除外して信号伝送を行い, 信頼性の高い通信が可能となる.

## 4 実験

### 4.1 実験環境

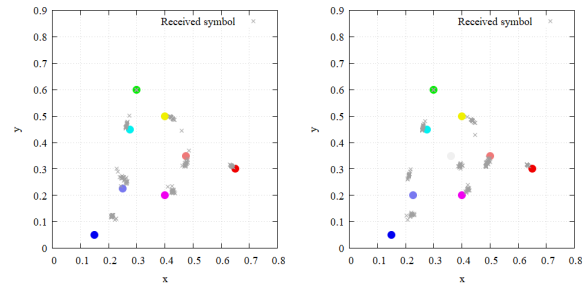
提案手法の有効性について実験により確認した. 送信機である光源には一辺 6cm の 3 色 LED パネルを用い, 20Hz の送信間隔でデータを伝送した. 提案手法の優位性を確認するため, LED パネルを異なる 2 つの環境に設置して信号伝送を行った. 各実験環境を図 2 に示す. LED パネルの背景が, 環境 1 は樹木であるのに対し, 環境 2 は曇である. シンボルの数について  $N=8$  と設定し, N-CSK と比較した.

受信機には 60fps のビデオカメラを用いた. 撮影画像から送信 LED の占める領域を切り抜き, 当該領域の RGB の明度を取得した. RGB 値を色空間にマッピングし, 最近隣シンボルと推定して復調を行った.

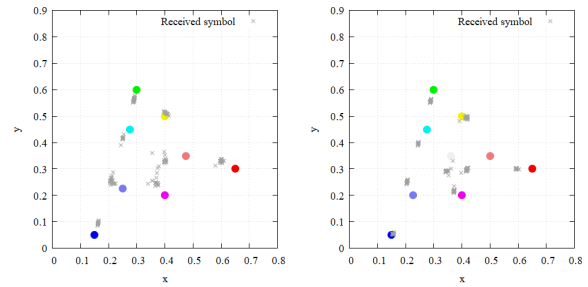
### 4.2 実験結果

LED で送信したシンボルと, 各環境下で受信したシンボルを色空間にマッピングした結果を図 3, 4 に示す. 環境 1, 2 において, それぞれ青色, オレンジ色のシンボルが送信シンボルから遠くに位置しており, SER は 0.8 を上回った. この結果から, 実際に環境によって認識精度が低下する色が異なることがわかる. 測定した SER に基づきベースカラー選択を行い, 環境 1 では青色, 環境 2 ではオレンジ色をベースカラーに設定した.

さらに, 提案手法である (N+1)-CSK および N-CSK を用いて, 各環境でデータ伝送を行い, BER を測定した. 測定結果を図 5 に示す. いずれの環境においても, 提案方式は従来手法に比べて, BER の大幅な低減に成功している. この結果から, 提案する環境適応型 CSK により, 外部環境によらず高精度な通信を実現できることを確認した.



(a) 従来手法 (b) 提案手法  
図3: 環境1のシンボルマッピング.



(a) 従来手法 (b) 提案手法

図4: 環境2のシンボルマッピング.

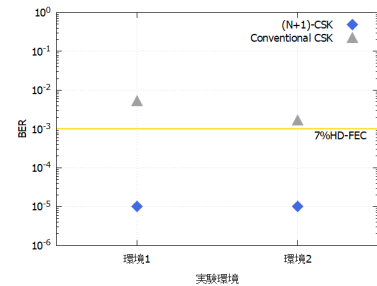


図5: 各環境における BER.

## 5 結論

本稿では, 外部環境に応じてシンボルの使い方を変える環境適応型 CSK として, (N+1)-CSK を提案した. 提案手法により, 外部環境の変化などに起因する特定シンボルの認識率低下に応じてベースカラーを選択し, SER を低減する. 複数環境における測定結果から, 提案手法により従来の N-CSK と比べ BER を大幅に低減可能なことを確認した. 今後はより包括的な評価と, 理論的な解析を行う.

### 謝辞

本研究の一部は, JST ACT-I(JPMJPR18UL), および GMO 財団の支援を受けて行われた.

### 参考文献

- [1] N. T. Le, M. A. Hossain, and Y. M. Jang, "A survey of design and implementation for optical camera communication," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 53, pp. 95–109, 2017.
- [2] CIE, *Commission Internationale de l'Éclairage Proc.* Cambridge University Press, 1931.