

養殖魚モニタリングのための可視光通信モジュールの開発と評価

Design and evaluation of a visible light communication module for fish farm monitoring

笥 浩平[†] 水島 弘樹[†] 今中 聖尋[†] 谷口 義明^{†,‡}
Kohei Kakehi Hiroki Mizushima Kiyohiro Imanaka Yoshiaki Taniguchi

1. はじめに

さまざまなものにセンサ、通信機能を組み込み、情報を収集、利活用する IoT (Internet of Things) システムが注目を集めている。農業、畜産、養殖業などの第一次産業においても IoT システムに関する多くの研究開発がある。しかしながら、養殖業においては生産物が水面下にあることから、IoT システムの利活用が他の分野と比べて進んでいない。

我々の研究グループは、養殖マグロのような商品価値の高い魚にセンサ端末を装着し、情報を収集する養殖魚モニタリングシステムを検討している [1-3]。このようなシステムにおいて端末は、魚体に装着できるサイズであること、出荷までの数年間使用できるよう低消費電力であること、といった条件を満たす必要がある。そこで我々は、図 1 に示すような可視光通信を用いた養殖魚モニタリングシステムを検討してきた [3]。このシステムでは、魚に装着された端末は、データをフルカラー LED の色情報に変換して送信する。その光を生簀底面中央付近に設置した半球カメラ (カメラ部) で撮影し、撮影動画像中の色情報からデータを受信する。LED の消費電力が小さいことに加え、カメラは同時に複数の LED を撮影でき端末側の多元接続処理が不要となることから、本システムでの端末の消費電力は低く抑えられると考えられる。

本報告では、我々の提案している可視光通信を用いた養殖魚モニタリングシステムの一部を実機材を用いて実装し、その基本的特性を評価する。実装システムでは、端末としてフルカラー LED の装着されたマイコンを、カメラ部として市販の半球カメラの接続されたノート PC を用いる。マイコンは所定のデータをフルカラー LED の発行色として送信する。カメラ

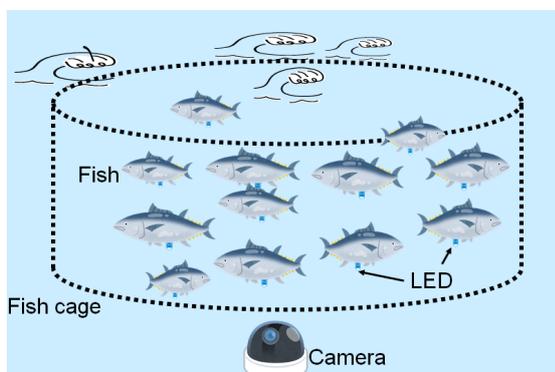


図 1 可視光通信を用いた養殖魚モニタリングシステム [3]

部では、その様子を半球カメラで撮影した動画をノート PC で処理することにより、データを受信を行う。実装システムでは、ノート PC 上で画像処理を行うために OpenCV [4] を利用した。また、変調方式としては IEEE 802.15.7 で規定されている CSK (Color Shift Keying) [5] を実装し、同じく IEEE 802.15.7 で規定されているキャリブレーション処理を導入した。本稿では、研究室内実験により実装したシステムの基本的特性を評価する。

本報告の以降の構成は以下のとおりである。まず、2. 章で、我々の提案する可視光通信を利用した養殖魚モニタリングシステムを紹介する。次に、3. 章で、本研究で利用する IEEE 802.15.7 の CSK およびキャリブレーション処理の説明を行う。続いて、4. 章で実装システムの説明を行い、5. 章で作成したシステムの実験評価結果について述べる。最後に 6. 章でまとめと今後の課題を述べる。

2. 可視光通信による養殖魚モニタリングシステム

本章では、これまで我々が検討してきた可視光通信を利用した養殖魚モニタリングシステム [3] を説明する。可視光通信については様々な検討があるが [6-10]、我々の知る限り、海中における養殖魚のモニタリングのために可視光通信を用いることを想定しているものはない。我々の提案する可視光通信を用いた養殖魚モニタリングシステムを図 1 に示す。このシステムでは、魚に装着された端末は、データをフルカラー LED の色情報に変換して送信する。その光を生簀底面中央付近に設置した半球カメラ (カメラ部) で撮影し、撮影動画像中の色情報からデータを受信する。LED は安価で消費電力が小さいことに加え、カメラは同時に複数の LED を撮影でき端末側の多元接続処理が不要となることから、本システムでの端末の消費電力は低く抑えられると考えられる。一方で、LED とカメラの間に他の魚がいる場合には、その魚が障害物となりデータ通信を行えないため、カメラに近づいた時にデータを送信する、カメラの数を増やす、などの対策も必要となると考えられる。

なお、我々は電波や超音波を利用した養殖魚モニタリングシステムについても検討している [1, 2]。水中での電波の利用については近年着目されつつあるが、海中では電波減衰が大きいことや、法令上の制限もあり、発展途上である。一方、海中データ通信においては超音波がよく使われる。しかしながら我々の想定する養殖魚モニタリング環境では、比較的浅瀬の狭い領域を想定しており、波の音などの影響、波や養殖魚自体の動きの影響を考慮しなければならないと考えられる。我々の検討している LED を用いた可視光通信では、端末側でデータを受信することは想定していないが、その分、上述のように消費電力が抑えられると考えられる。また、消費電力が抑えられることにより、端末に装着するバッテリーのサイズや重さを減らすことができ、その分、魚体に負荷の少ない端末を実現できると

[†] 近畿大学理工学部情報学科, Faculty of Science and Engineering, Kindai University

[‡] 近畿大学情報学研究所, Cyber Informatics Research Institute, Kindai University

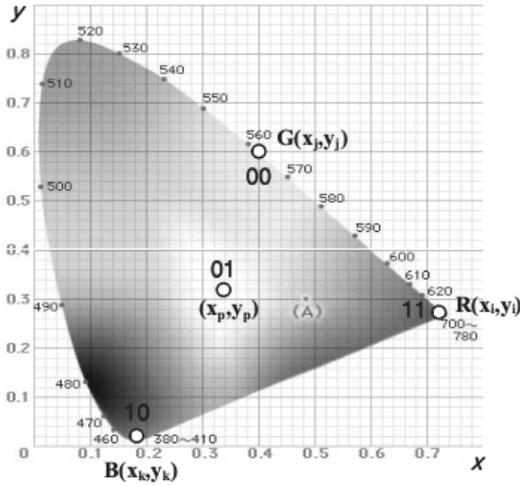


図2 CSK 色度座標 [5]

考えられる。

可視光通信を行うためには、データと色を相互に変換する必要がある。本研究では、以降で述べるような IEEE 802.15.4 で規定されている CSK を利用して変復調を行う。

3. IEEE 802.15.7

IEEE 802.15 は無線 PAN (Personal Area Network) の規格であり、IEEE 802.15.1 (Bluetooth)、IEEE 802.15.4 (ZigBee) が有名である。IEEE 802.15.7 は短距離光無線通信に関する規格である。本章では、IEEE 802.15.7 [5] のうち、本研究で用いる CSK とキャリブレーション処理について説明する。

3.1 CSK (Color Shift Keying)

CSK は色によって変調する方式 (色変調方式) のことである。IEEE 802.15.7 では 4CSK、8CSK、16CSK が規定されている。それぞれ、4 種類の色、8 種類の色、16 種類の色を使ってデータの変調を行う方式であり、一度のシンボルで 2 ビット、3 ビット、4 ビットの情報を伝送できる。本研究では 4CSK のみを実装しており、本章では 4CSK の説明を行う。

CSK では図 2 のような CIE 1931 色空間上の x, y 座標 (色度座標) で色を扱う。また、フルカラー LED 内にある赤色、緑色、青色の LED の送信強度を P_i, P_j, P_k と表記する。それぞれ単色で光らせた場合の色度座標は IEEE の仕様中 [5] で定義されている。本研究で用いているフルカラー LED WS2812 [11] の赤色、緑色、青色 LED のそれぞれの波長は 620–630 nm、515–530 nm、465–475 nm であり、これらそれぞれの LED を単体で用いた場合の色座標は (0.669, 0.331)、(0.011, 0.733)、(0.169, 0.007) となる。4CSK を利用する場合、これらの 3 つの座標と、3 つの座標からなる三角形の重心の座標で表される色を用いる。なお、重心の座標は (0.283, 0.357) である。それぞれの色をどのデータに割り当てるかも規定で決まっている。

ここで、CSK で用いる任意の色度座標 (x_p, y_p) と、その座標を用いた色を送信する際の LED の送信強度 P_i, P_j, P_k は

表 1 本実験環境で使用する 4CSK

データ	xy 色度座標	LED 送信強度 (P_i, P_j, P_k)
00	(0.011, 0.733)	(0.000, 1.000, 0.000)
01	(0.283, 0.357)	(0.333, 0.333, 0.333)
11	(0.669, 0.331)	(1.000, 0.000, 0.000)
10	(0.169, 0.007)	(0.000, 0.000, 1.000)

以下のような関係がある。

$$\begin{aligned} x_p &= P_i x_i + P_j x_j + P_k x_k \\ y_p &= P_i y_i + P_j y_j + P_k y_k \\ P_i + P_j + P_k &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

この関係より、重心座標に対応する LED の送信強度は $(P_i, P_j, P_k) = (0.333, 0.333, 0.333)$ となる。したがって、本研究で用いるフルカラー LED の場合、表 1 で示される色を使用することになる。

3.2 キャリブレーション

一般的に、LED から送信された光と同じ色をカメラで受信するわけではない。LED から光を送る際、3 色間の干渉や周囲の環境、光源の特性によって、LED 側から送られた色とカメラ側で受け取った色に誤差が生じる。そこで、IEEE 802.15.7 では、誤差の補正を行うためのキャリブレーション処理の手順が決められている。

キャリブレーション処理を導入した CSK システムの概要を図 3 に示す。可視光通信システムではデータ通信を行う前にキャリブレーション処理を実施し、下記で表される 3×3 のチャンネル伝搬行列を推定する。

$$\begin{bmatrix} h_{ii} & h_{ij} & h_{ik} \\ h_{ji} & h_{jj} & h_{jk} \\ h_{ki} & h_{kj} & h_{kk} \end{bmatrix} \quad (2)$$

可視光通信において、LED からの光を受信した際、受信時の赤色、緑色、青色の受信強度を P'_i, P'_j, P'_k とすると、下記式により補正を行う。

$$\begin{bmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{ii} & h_{ij} & h_{ik} \\ h_{ji} & h_{jj} & h_{jk} \\ h_{ki} & h_{kj} & h_{kk} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P'_i \\ P'_j \\ P'_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

4. 開発システム

本研究では、我々が提案する可視光通信を利用した養殖魚モニタリングシステムの一部を市販の機材を用いて実装、開発する。開発システムは送信部と受信部からなる。送信部、受信部はそれぞれ提案システムにおいて養殖魚に装着する端末、生簀下部に設置する半球カメラに相当する。本章では開発したシステムについて説明する。

4.1 送信部の構成と動作

本研究では、送信部をマイコン ATOM Matrix [12] およびフルカラー LED WS2812 [11] を用いて実装した。送信部の外観を図 4 に、ATOM Matrix の諸元を表 2 に示す。ATOM Matrix 自体にフルカラー LED があらかじめ装着されているが、黒いパネルで覆われている。本研究では、黒パネルの影響を回避するため、ATOM Matrix の GPIO ピンに外付けのフ

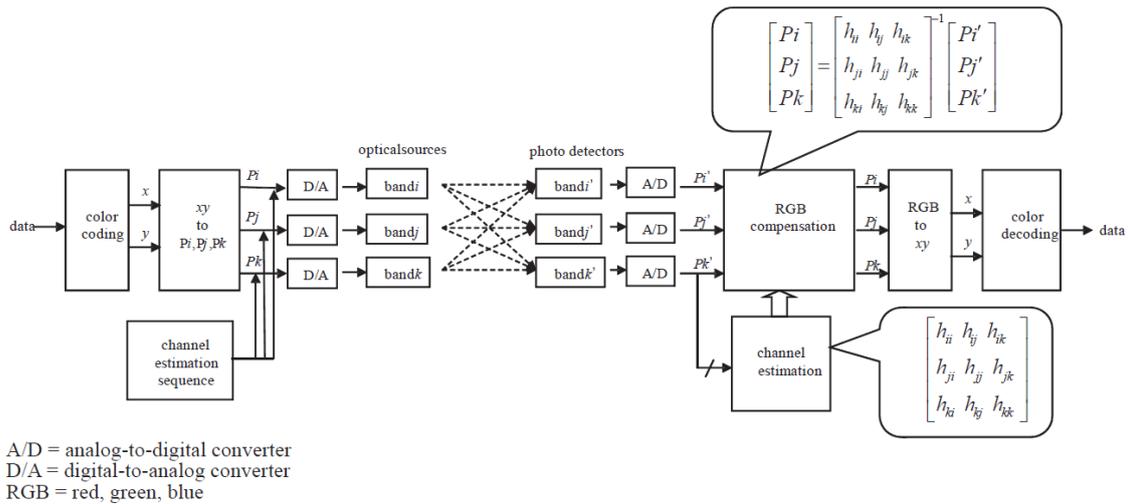


図3 キャリブレーション処理を導入したCSKシステム [5]

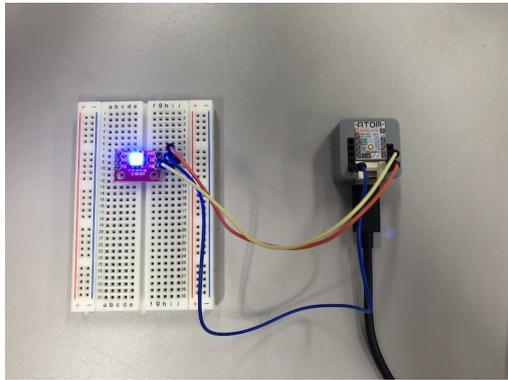


図4 送信部



図5 受信部

表2 ATOM Matrix 諸元

大きさ、重さ	24 × 24 × 14 mm、14 g
MPU、メモリ	ESP32 PICO、4 MB
センサ	MPU6886 6 軸センサ
出力	フルカラー LED (WS2812C) 25 個、赤外線 LED1 個
インタフェース	リセットボタン 1 個、GPIO ピン 6 個
無線通信機能	IEEE 802.11 b/g/n、Bluetooth (Classic、BLE 両対応)

ルカラー LED を装着し、外付けのフルカラー LED を可視光通信に用いた。ここで、ATOM Matrix 自体にはバッテリーが内蔵されていないため、評価実験においては、ATOM Matrix を外部電源に接続して動作させた。

また、送信部を制御するためのプログラムを C を用いて記述した。現状のシステムでは、送信部はあらかじめ設定されたパターンで LED の色が切り替わる。また、無線 LAN 経由で他の PC から LED の発行色を変えることも可能である。

表3 SP360 4K 諸元

大きさ、重さ	48 × 50 × 52.5 mm、102 g
有効画素数	1240 万画素
動画解像度	15 種類 (～2880 × 2880、～240 fps)
画角	3 種類

4.2 受信部の構成と動作

受信部は、半球カメラ Kodak PIXPO SP360 4K [13] およびノートパソコン Macbook Air を用いて実装した。受信部の外観を図5に、SP360 4K の諸元を表3に示す。現時点での実装システムでは、基本評価を行うため、SP360 4K で撮影、保存した動画ファイルファイルを PC にコピーした後、処理を実施している。SP360 4K はパソコンを USB ケーブルで接続することにより、ウェブカメラとして使うこともできるため、今後、SP360 4K で撮影した映像からリアルタイムにデータを復調できるように受信部を拡張する予定である。

受信部のノートパソコンはカメラで撮影された動画画像を処理してデータの受信を行う。本研究では、受信処理を Java と Python および OpenCV ライブラリ [4] を用いて実装した。受信部は 1 フレームごとに動画画像を処理し、画像中の LED 領域

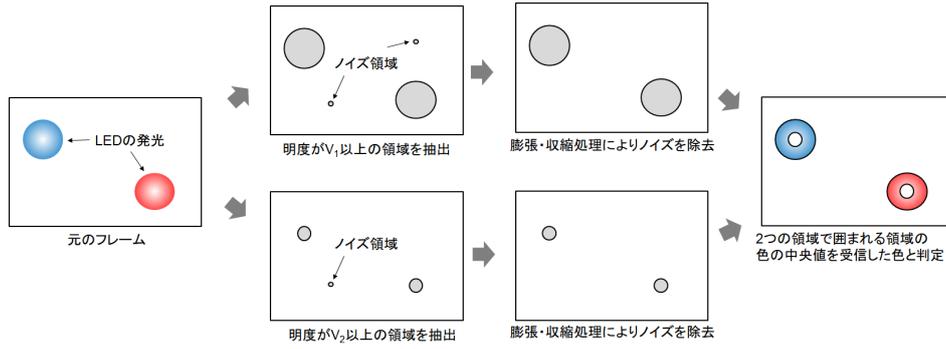


図6 受信部における画像処理



(a) 原画像 (b) LED 領域抽出後の画像

図7 青色LEDを撮影、処理した画像例

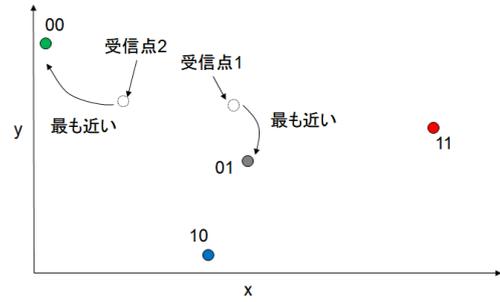


図8 復調処理の例

の検出およびLEDの色の抽出、およびデータの復調を行う。以下、受信部における復調処理の手順を説明する。

受信部は、まず、フレームに対して画像処理を行い、画像中のLED領域の検出およびLEDの色の抽出を行う。この処理の概要を図6に、処理画像の例を図7に示す。図7(a)のように撮影されたLED領域の中心領域は明るく白として検出されるため、本研究では、LEDの発光領域と中心領域を分けて抜き出す。具体的には、受信部はフレーム画像のうち、HSV空間上で明度が V_1 以上の領域をLEDの発光領域、明度が V_2 ($V_1 < V_2$)以上の領域をLEDの中心領域として抜き出す。その後、ノイズとして抜き出された領域の影響を減らすために、得られたそれぞれの領域に対して膨張・収縮処理を実施する。さらに、2つの領域で囲まれた領域をLED領域として抽出し、LED領域中に含まれる画素の画素値の中央値をLEDの色とする。LED領域の例を図7(b)に示す。

このようにして取得したLEDのRGB(R'_r, G'_r, B'_r)を255で割ることで受信強度(P'_i, P'_j, P'_k)に変換する。その後、式(2)に示されるキャリブレーション処理により、LEDの推定送信強度(P_i, P_j, P_k)を求める。さらに、得られた(P_i, P_j, P_k)をRGB(R_r, G_r, B_r)に変換し、CIE 1931色空間上の xy 座標系に変換、座標(x_r, y_r)を得る。RGB座標系から xy 座標系に変換するには以下の数式を用いる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_r \\ G_r \\ B_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$x_r = X/(X+Y+Z) \quad (5)$$

$$y_r = Y/(X+Y+Z) \quad (6)$$

なお(4)の各係数の値は利用するLEDに対応する波長の xy 色



図9 実験環境

度座標によって変化するので別途計算する必要がある[14, 15]。その後、表1に示される4つの信号点のうち、座標(x_r, y_r)と最も近い信号点のデータとして復調する。

復調の例を図8に示す。例えば、上記の処理の結果、受信点1で示される色が受信された場合、受信点1に最も近い位置にある信号点のデータ01として復調する。一方、受信点2で示される色が受信された場合、データ00として復調する。

5. 実験評価

5.1 実験環境

研究室内で、送信部のフルカラーLEDと受信部のカメラを用いて送信した色情報をカメラで正しく認識できるか実験を行った。実験の様子を図9に示す。実験では送信部のフルカラーLEDと半球カメラを約30cm離し、フルカラーLEDがちょうど中央に写るように半球カメラを配置した。また、研究室内の電灯を消し、自然光のみのやや薄暗い状態とした。

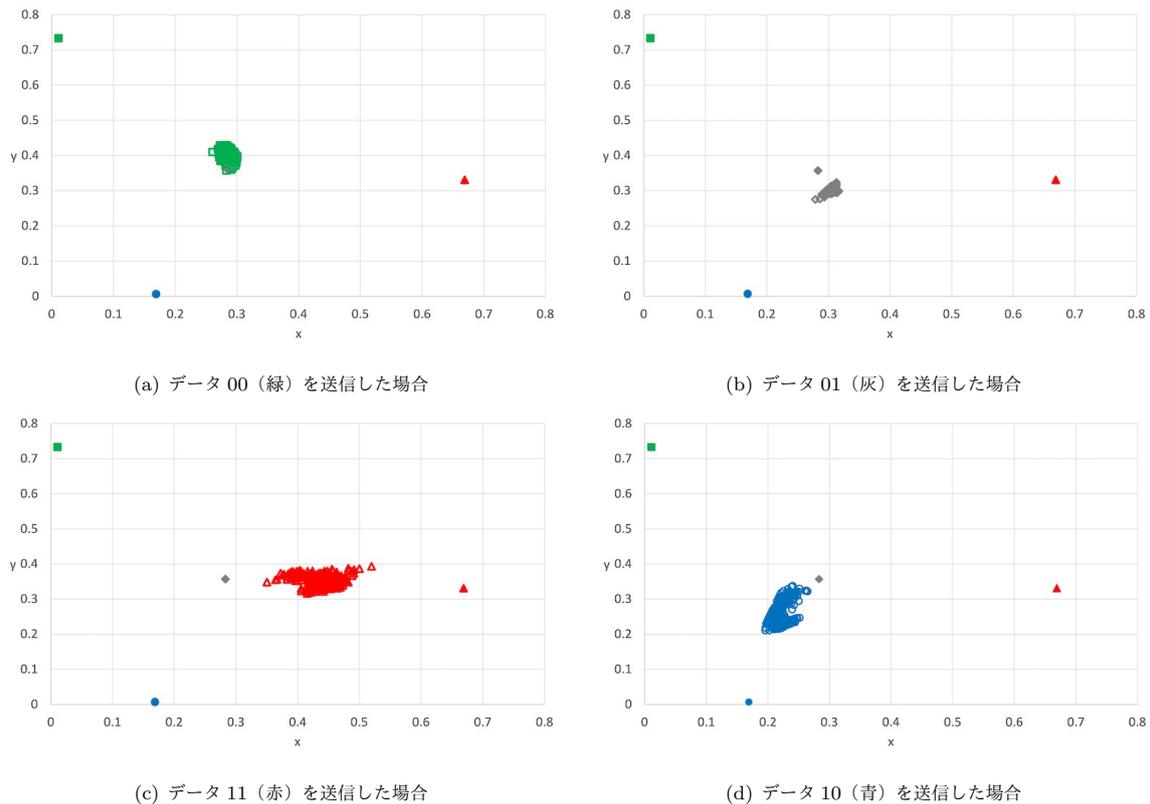


図 10 LED 領域に含まれる画素の色の分布

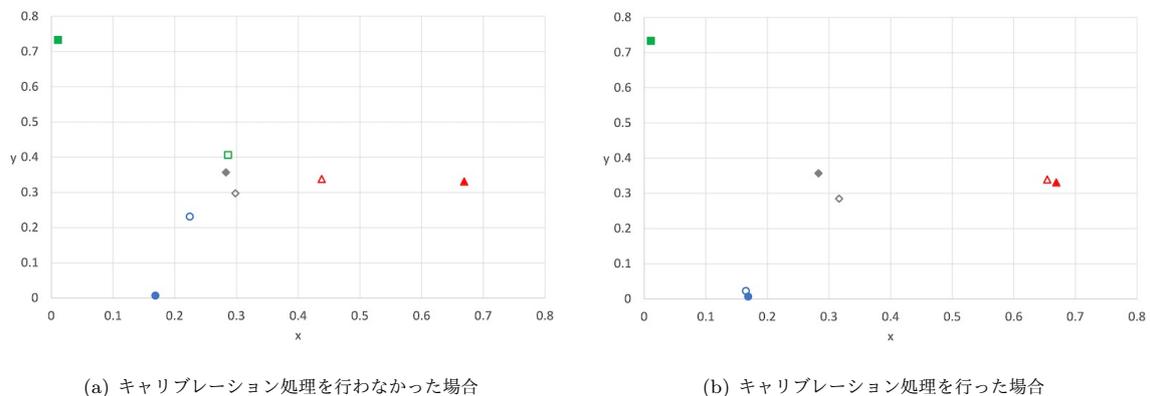


図 11 受信した色の色座標

この状態で、フルカラー LED が表 1 で示される 4CSK で使用する 4 種類の色を各 3 回ずつ発光するようにした。その様子を半球カメラで撮影し、動画中の LED の発光部分周辺の画像を合計 12 枚抜き出して評価に用いた。各色 3 枚の画像のうち 2 枚がキャリブレーション用、残り 1 枚がデータ受信用の画像である。図 7(a) は評価に用いた画像の一つである。

5.2 評価結果

まず、各 4 種類の色それぞれを送信した場合の受信画像中の LED 領域に含まれる画素の色の分布を図 10 に示す。また、キャリブレーション処理を行わなかった場合の受信色の座標を図 11(a) に、キャリブレーション処理を行った場合の受信色の座標を図 11(b) に示す。各色で塗りつぶされたのが送信した色の色度座標、塗りつぶされていないものが実際に受信した色の色度座標を示している。また、表 4 にデータ送信用として送

受信した色および復号されたデータを、表 5 にキャリブレーション用として送受信した色を示す。

図 11(a)、表 4 からわかるようにキャリブレーションをしなかった場合、どの色を送信した場合でも受信時の色は三角形の重心（データ 01 に相当する信号点）に寄ってしまい、データ 01 として復号されてしまうことから、正しく復号できないことがわかる。これは表 4、表 5 に示されるように、周囲の環境光等の影響により、送信色と受信色に大きな違いがあるためである。一方、図 11(b)、表 4 に示されるように、キャリブレーションを導入することにより、送信色に近い座標で受信され、データが正しく復号されることがわかる。

6. まとめと今後の課題

本研究では我々がこれまでに提案してきた可視光通信を用いた養殖魚モニタリングシステムのための可視光通信モジュール

表4 実験で得られた送受信色 (データ受信用画像)

送信色			受信色			受信色 (キャリブレーション処理後)		
データ	xy 色度座標	RGB	xy 色度座標	RGB	データ	xy 色度座標	RGB	データ
00	(0.169, 0.007)	(0, 0, 255)	(0.183, 0.240)	(38, 90, 204)	01	(0.165, 0.02)	(0, 5, 233)	00
01	(0.011, 0.733)	(0, 255, 0)	(0.164, 0.459)	(58, 193, 100)	01	(0.011, 0.733)	(0, 255, 0)	01
11	(0.669, 0.331)	(255, 0, 0)	(0.468, 0.352)	(201, 56, 49)	01	(0.654, 0.339)	(241, 5, 0)	11
10	(0.283, 0.357)	(85, 85, 85)	(0.280, 0.321)	(152, 141, 189)	01	(0.316, 0.285)	(122, 72, 140)	10

表5 実験で得られた送受信色 (キャリブレーション用画像)

送信色		受信色	
xy 色度座標	RGB	xy 色度座標	RGB
(0.169, 0.007)	(0, 0, 255)	(0.182, 0.238)	(37, 89, 205)
(0.169, 0.007)	(0, 0, 255)	(0.181, 0.239)	(37, 90, 205)
(0.011, 0.733)	(0, 255, 0)	(0.164, 0.460)	(57, 190, 97)
(0.011, 0.733)	(0, 255, 0)	(0.165, 0.459)	(58, 191, 99)
(0.669, 0.331)	(255, 0, 0)	(0.470, 0.352)	(200, 55, 48)
(0.669, 0.331)	(255, 0, 0)	(0.470, 0.351)	(202, 55, 49)
(0.283, 0.357)	(85, 85, 85)	(0.280, 0.320)	(152, 141, 190)
(0.283, 0.357)	(85, 85, 85)	(0.280, 0.320)	(153, 141, 191)

の開発と評価を行った。実装システムでは、送信側端末としてフルカラー LED の装着されたマイコンを、受信側カメラ部として市販の半球カメラの接続されたノート PC を用いた。実装システムでは、変調方式として IEEE 802.15.7 で規定されている CSK を実装し、同じく IEEE 802.15.7 で規定されているキャリブレーション処理を導入した。さらに研究室実験により実装システムの基本的特性を評価した。その結果、キャリブレーション処理を導入することにより可視光通信が実現できることを確認した。

今後、角度や距離を変えた場合、複数のフルカラー LED を用いた場合のデータ受信実験、水中下での実験、それらの実験結果に基づくさらなる手法の改良を行う必要がある。

謝辞

本研究の一部は科学研究費 (課題番号 19K11934) の補助を受けている。本研究を実施するにあたり貴重なご意見を頂いた近畿大学 波部齊准教授に感謝する。また、本研究の初期段階において協力いただいた近畿大学の富田祥生氏、小原直己氏に感謝する。

参考文献

- [1] Y. Taniguchi, "A desynchronization-based data gathering mechanism for a fish farm monitoring environment," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E100-A, no. 11, pp. 2547–2550, Nov. 2017.
- [2] K. Ishida, Y. Taniguchi, and N. Iguchi, "A routing method for fish farm monitoring under short transmission range condition," *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E101-D, no. 8, pp. 2145–2149, Aug. 2018.
- [3] Y. Taniguchi, "A system for monitoring farmed fish via LED-based visible light communication," *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, no. 11, pp. 1725–1726, Nov. 2019.
- [4] OpenCV Team, "OpenCV," <https://opencv.org/>.
- [5] IEEE Standard, "IEEE 802.15.7-2018 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications," 2019, <https://standards.ieee.org/standard/802-15-7-2018.html>.
- [6] A. Yokoi and H. Mizuno, "CSK を応用したディスプレイ-カメラ間通信," 2016, https://www.ieice.org/~wbs/pdf/taikai_yokoi.pdf.
- [7] 古川治樹, 和田忠浩, 椋本介士, "色偏移変調を用いた並列伝送型無線可視光通信システムに関する一検討," *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 113, no. 390, pp. 17–22, Jan. 2014.
- [8] 松田祐希, 宮城桂, 山田親稔, 谷藤正一, 市川周一, "可視光 LED による水中通信システムの FPGA 実装," *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 118, no. 282, pp. 43–46, Nov. 2018.
- [9] 高山佳久, "適用領域が広がる空間光通信の研究動向," *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 119, no. 30, pp. 23–28, May 2019.
- [10] 小野寺幸仁, 高野宏紀, 久野大介, 中山悠, "ドローン搭載 LED とカメラを用いた可視光通信におけるドローン検知精度の評価," *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 120, no. 261, pp. 61–66, Nov. 2020.
- [11] Worldsemi, "WS2812 - Intelligent control LED integrated light source," <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812.pdf>.
- [12] M5Stack, "ATOM Matrix ESP32 Development Kit," <https://shop.m5stack.com/collections/m5-atom/products/atom-matrix-esp32-development-kit>.
- [13] Kodak, "SP360 4K Action Camera," <https://kodakpixpro.com/AsiaOceania/jp/cameras/vrcamera/sp3604k/>.
- [14] K. Ichikawa, "CIE XYZ 表色系 (10) : XYZ / RGB 変換マトリックスの計算" iCIE XYZ/RGB," <http://www.enjoy.ne.jp/~k-ichikawa/CIEXYZ.RGBmat.html>.
- [15] Agenasu, "RGB/XYZ 変換行列," <http://technorgb.blogspot.com/2015/08/rgb-xyz.html>.