

調光演出が可能なカラーLEDサインボードを用いた 情報配信

清水 誠^{1,a)} 栗山 繁^{1,b)} 神納 貴生^{1,c)}

概要：近年、LED 照明の普及により可視光に基づく通信技術が注目され、スマートフォン等に搭載されたデジタルカメラでのデータ受信が可能な方式も提案されている。既存の手法は、一般的な屋内用照明に近い用途を想定して照明の色をできる限り一定に保つ方式と、情報の検出精度を重視した用途を想定して照明の色を大きく変化させる方式がある。しかしながら、これらの手法は関連するコンテンツ情報のある一定の調光パターンに置き換えているため、イルミネーションとしての演出効果を考慮した照明の色の制御は困難である。本研究では、デジタル調光可能なカラー LED を装着したサインボードを用い、ユーザが自由に演出効果を付与した調光制御に連動させながら情報配信する機構を提案する。本稿では、試作したサインボードを送信器、市販タブレット端末を受信器とし、様々な条件下での伝送情報の読み取り精度を実験的に検証した結果を報告し、他用途への応用と課題について考察する。

キーワード：可視光通信、イメージセンサ通信、サインボード、LED、調光演出

Information service by effectively dimming color-LED signboard

MAKOTO SHIMIZU^{1,a)} KURIYAMA SHIGERU^{1,b)} TAKAO JINNO^{1,c)}

Abstract: Communication technology with visible light becomes more important owing to the diffusion of LED lighting, and a new type of visible lighting communication (VLC) system has been proposed by utilizing ordinary mobile cameras as receivers. Accurately transmitting the data requires significant modulations of light color for robustly decoding the signals received on an image sensor. Such mechanism, however, are unsuitable for the entertainment lighting which allows users to effectively modulate the light colors. We therefore propose the robust VLC system with the user-directable lighting system, where a signboard with color LEDs is utilized as a transmitter, and receives information signals using a commercial tablet. This paper demonstrates the capability of our system by experimentally evaluating decoding accuracy under various environments.

Keywords: Visible light communication, Image sensor communication, Signboard, LED, Production dimming

1. 序論

1.1 背景と目的

可視光通信分野の中で、受信機としてイメージセンサを用いるイメージセンサ通信の研究が注目されている [1][2][3].

LED の照明や光源を送信機とし、スマートフォン等のモバイル端末に搭載されているデジタルカメラを受信機とした一方向の通信方式 [4][5][6][7][8] は、高感度な受光素子を使用する方式と比べて通信速度は劣るものの、安価かつ同時に多数の信号を受け取れる。また、カメラ付きのスマートフォンの普及により、通信に必要な環境が既に整っているため、導入のコストが抑えられるといった利点がある。

既存の研究には、主に 2 種類の調光方法が提案されてい

¹ 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology
^{a)} shimizu@val.cs.tut.ac.jp
^{b)} sk@tut.jp
^{c)} jinno@val.cs.tut.ac.jp

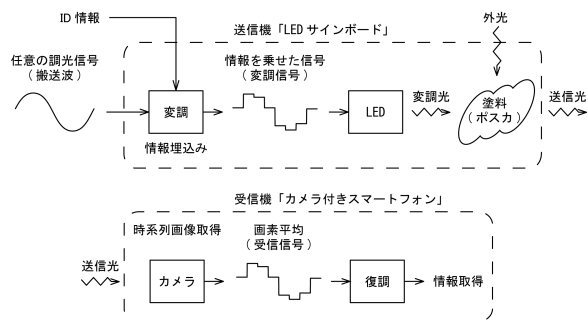


図 1 提案システムの概要

Fig. 1 Overview of our proposed system

る。1つ目は、人間が知覚できない程度に変調量を抑えることで、既存の照明のように一定の明るさと色で照明を制御する方法 [6][7][8] である。美術館や博物館などの展示物に対して情報を付与する場合に利用できるが、変調量によっては演色性に悪影響を与える可能性がある。

2つ目は、最大限に変調量を振ることで、通信の頑健性を高める方法 [5] である。照明の輝度や色合いの変化が大きいため、光源のサイズが小さい場合でも、画像内からの光源位置推定が比較的容易であり、複数の光源からも情報を受信できる。しかしこの手法では、埋め込むデータによって調光のパターンが限定されるので、照明として用いた場合は低速で変調するとフリッカと呼ばれるちらつきを生じてしまう。

これらの手法は演色性と頑健性のトレードオフを考慮する必要があるが、いずれの手法もユーザが任意に調光した照明パターンを用いる状況は考慮されていない。そこで本研究では、ユーザが任意に設定した調光制御に対して情報を埋め込めるイメージセンサ通信方式を提案する。これにより、時間的に明るさや色合いに変化があるイルミネーションやプロジェクタの光にも情報を埋め込めるので、デジタルサイネージとして利用範囲の拡大が期待できる。

提案するシステムは、図 1 に示す概略図の通り、送信機としては広告看板である LED サインボードを、受信機としてはスマートフォンのデジタルカメラを利用する。まず送信側では、サインボードに任意の色のマーカを使って宣伝用の広告を描き、調光信号 (搬送波) となるサインボードの調光パターンを選択する。次に、提案する変調方法を用いて調光信号に情報を埋め込んだ変調信号を生成し、サインボードに搭載されている RGB3 色の LED を調光する。マーカは、この変調光を反射および透過する媒体となり、周辺環境の外光も加わることで発せられる色や明るさが決まる。次に受信側では、マーカ領域を含むサインボードの全体もしくはその一部の領域を受信機のカメラで撮影して時系列画像を取得し、各時間での画素平均を画像全域から計算して受信信号を得る。この受信信号を復調することで埋め込んだ情報を復元し、利用者に呈示する。



図 2 LED サインボードの外観と機構図

Fig. 2 Structural chart and appearance of LED signboard

2. 変調信号の構成と情報埋め込み手法

2.1 LED サインボードの製作

図 2 に示すような LED サインボードは様々なタイプの製品が既に市販されている。しかし、自身で自由に調光できる製品は普及していないので、独自に開発した。このサインボードは、A2 サイズのアクリルボードの 4 辺にカラー調光可能なリボンタイプの LED を配置している。アクリルボードの背面には黒色の色紙を貼り付け、背景が透けない様になっている。LED は PIC マイコンでデューティ比を変えることによって制御するが、PIC の動作電圧が 3V なのに対して、LED の動作電圧が 12V であったため、FET とトランジスタを組み合わせでドライブ回路を作成した。LED は RGB の各チャンネルを独立に制御でき、それぞれの明るさは 256 段階で調整できる。ただし、消灯状態は 0、最大輝度は 255 である。また、マーカの描画にはブラックボード用の 8 色のポスカ利用した。

2.2 提案する変調方式

本研究では、マンチェスター符号を利用した変調方式を用いる。マンチェスター符号とは図 3 に示すように、信号の Low レベルから Hi レベルへの立上り変化を '1'、Hi レベルから Low レベルへの立下り変化を '0' のように定義し、信号の状態変化を 1 つのシンボルとしてデータを割り当てる符号化手法である。図 5 の様に各シンボルの間に出現するエッジを「補償エッジ」と呼び、各シンボルの状態変化のエッジを「データエッジ」と呼称する。

補償エッジは、その増減量を任意に変えたとしても符号化されたデータに影響がなく、マンチェスター符号としての整合性は保たれる。この特徴を利用し、図 4 のように補償エッジの高さや向きを変え、データエッジの midpoint が搬送波と一致する様にシンボルを配置することで信号波を重畳する。

データエッジは、変調量が小さくなるほどノイズとの判

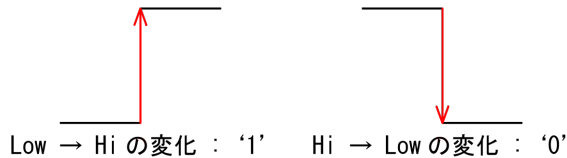


図 3 マンチェスター符号のシンボル

Fig. 3 Symbols of Manchester code

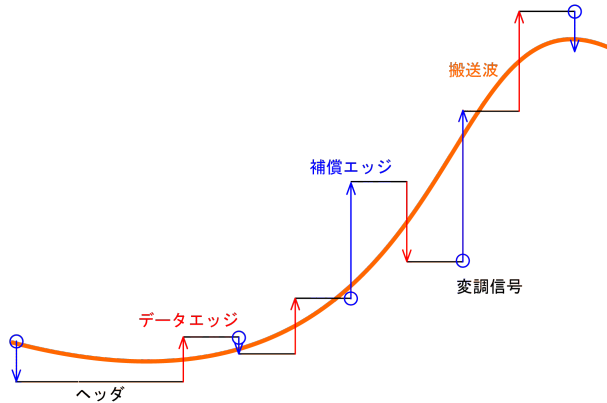


図 4 搬送波と変調信号

Fig. 4 Carrier wave and modulated signal

別が難しくなり、情報を誤って復号する可能性が高まる。また、変調量が大きすぎると照明のちらつきが顕著になってしまう。そのため、人の視覚は人工照明において 7% 程度の照度変化であればその認識が困難になるという実験結果 [9] に基づいて、変調量を信号レベルに応じて変化させる。本来であれば、照度に対して変調量を変化させるべきであるが、使用する LED の種類やドライバ回路によって調光信号に対する照度の応答が非線形に変わってしまう。従って、調光信号に対して線形に照度が変化すると仮定し、式 (1) で経験的に変調量を決定するという簡略な方式を用いた。変調量は 255 段階中最大で 20、最小で 5 とし、搬送波に変調量を足し合わせた際に、信号の定義域を超えることを防ぐために、搬送波は 10 から 245 の範囲の値とした。

$$m = \frac{1}{235}(15x + 1025) \quad (1)$$

$$10 \leq x \leq 245$$

m : 変調量, x : 搬送波のレベル

2.3 信号の構成

送信する信号は図 5 に示す様に、1.5 シンボル長のヘッダ部と、 N シンボル長のデータ部によって 1 つのパケットを構成している。データ部は、前述した変調方法で変調したデータが格納されており、その長さは送信するデータ量によって変化し、 N ビットのデータを送信する場合は N シンボル分の長さとなる。一方、ヘッダ部はデータの始まり

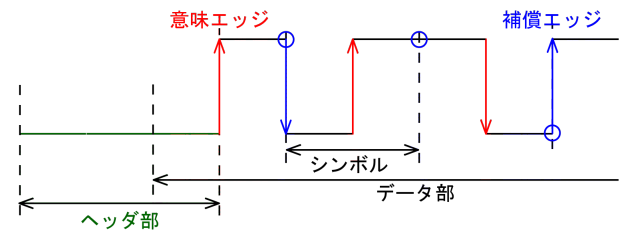


図 5 信号波形の例

Fig. 5 Example of signal wave

を意味し、データ部の一番先頭と同じ信号レベルに設定する。マンチェスター符号では、1 シンボル以内に必ず信号レベルが変化する特徴があるため、ヘッダ部だけが変調信号内で 1.5 シンボル分不変となる区間を占有する。そのため、信号レベルが不変な区間を探索し、1 シンボル分の長さを超える区間を検出すればヘッダ部となるためデータの先頭を推定できる。

また、通信速度は 1 シンボルの長さを $S \text{ sec}$ とし、送信データを $N \text{ bit}$ とすると、1 パケットの長さは $S + NS \text{ sec}$ となり、通信速度 $V \text{ bit/sec}$ は次式で表される。

$$V = \frac{N}{(1 + N)S} \quad (2)$$

この式で表されるように、 N を限りなく大きくしていくと $V = 1/S$ となる。よって、通信速度の限界は、1 シンボル分の長さ S に依存することが分かる。仮に、 $S = 0.2 \text{ sec}$ とすると、通信速度の限界は 5 bit/sec となる。ただし、一度に送るデータ量を増やすと、1 パケットが長くなる。本手法では情報を受け取る際に、手でスマートフォンを持ち最低でも 1 パケット分の長さ以上の動画を撮影することで信号を取得するため、撮影時間が長いと撮影者の負担が大きくなる。よって、1 パケットで送信するデータ量は撮影者の負担を考慮しながら決定する必要がある。

3. 観測した信号からの埋め込み情報検出

データの受信には市販のスマートフォンを利用し、カメラのプレビュー画像を更新するタイミングですべて保存して時系列画像を得る。この章では、取得した時系列画像から埋め込まれた情報を復元する方法を述べる。

3.1 前処理

スマートフォンで撮影した時系列画像は、YUV 形式であるため、jpeg 形式に変換する。画像サイズは、 320×240 ピクセルとした。次に、各画像の全域から RGB それぞれの平均値を求め受信信号とし、その差分 (傾き) を計算して式 (3) の様に差分信号を得る。

$$G(t) = R(t + 1) - R(t) \quad (3)$$

$R(t)$: 受信信号, $G(t)$: 差分信号

理想的な差分信号では、データエッジと補償エッジ以外で信号が変化するタイミングがないため、これらのエッジ

以外の値は0となる。しかし、手振れや環境雑音、および撮像素子の遅延等の影響により受信信号の波形が鈍り、差分信号で現れるエッジが幅を持つことで、次節で述べる境界検出処理で境界を誤検出する可能性がある。従って、差分信号で幅を持ったエッジを先鋭化するために、差分信号に対して連続する三点 $G(t-1), G(t), G(t+1)$ に着目し、この3点が単調増加あるいは単調減少であれば中央の点 $G(t)$ の値を0にする。この処理を、差分信号全体に施すことで先鋭化した差分信号 $G'(t)$ を求め、以降の処理で差分信号として利用する。

3.2 境界検出

境界検出は、変調信号の中でヘッダの位置を検出し、データエッジの出現タイミングを推定する処理である。データ部の先頭シンボルのデータエッジの出現タイミングは、式(4)によって求められる。まず図6のような先鋭化された差分信号の絶対値に対して、式(5)より、ヘッダ部の長さである1.5シンボル区間の総和を求めることで、コスト関数を求める。総和の区間内にエッジが含まれている場合、コストは増大し、エッジが含まれない区間でコストが減少する。そのため式(4)によって、このコストの最小点を求めることで、データ部の先頭にあるデータエッジの出現タイミング K が推定できる。ただし、送信データの最後尾ビットが‘1’、先頭ビットが‘0’で、信号レベルが一定の搬送波となる場合に、ヘッダ部を含む信号レベルが不変な区間が2シンボル分の長さ出現する。このような場合には、コストが最小となる複数の候補点が発生して K の値が一意に定まらないという問題が生じる。理想的な差分信号であれば、候補点のコストの値はすべて0であるため、今回の実験では時間方向で一番最後に出現したコスト最小点を K の値とした。しかしながら、実際の差分信号では候補点のコストの値はすべて0ではなくノイズによって変動するため、最小となる点が存在する可能性がある。従って、雑音等に起因する成分を適切な閾値を設けて除去する方法を導入し、このような状況でも安定して境界を検出することが今後の課題である。

$$K = \underset{t}{\operatorname{argmin}} \operatorname{Cost}(t) \quad (4)$$

$$\operatorname{Cost}(t) = \sum_{i=t-1.5S}^t |G'(i)| \quad (5)$$

$G'(t)$: 先鋭化された差分信号, S : 1シンボルの長さ

K : データ部先頭のデータエッジ出現タイミング

3.3 信号の復号

境界検出によりパケット内のデータエッジのタイミングが推定されているため、このタイミングでのデータエッジの正負の符号を調べることで、埋め込まれたデータを復元

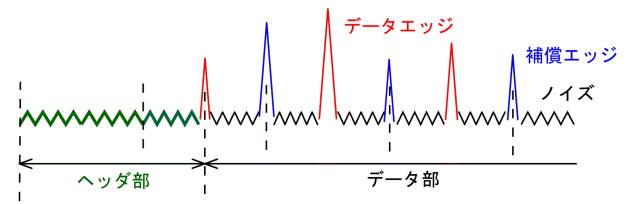


図6 理想的な差分信号波形の例

Fig. 6 Example of ideal form of differential signal

する。まず受信信号に対して、式(6)により、データエッジ出現タイミングから前後に a だけ離れた点の差を求める。この $D(n)$ の値が正ならば、受信信号が Low から Hi への状態変化が観測されたので、 n bit 目は‘1’となる。同様の理由で、 $D(n)$ の値が負ならば n bit 目のデータは‘0’となる。また、 $D(n)$ の値が0の場合、区間内にエッジを含まないことになり、境界検出が失敗している可能性が高いので受信は失敗とする。ここで、 a の値はデータエッジと補償エッジの中間点に設定する。1シンボルの長さを 0.2 sec とすると1シンボル中のサンプリング点は6点現れ、データエッジと補償エッジの間には2点のサンプリング点が存在するので、 a の値は1となる。

$$D(n) = R(N + a + 1) - R(N - a) \quad (6)$$

$$N = K + (n - 1)S$$

$D(n)$: n bit 目のデータ判定変数

N : n bit 目のデータエッジ出現タイミング

4. 検証実験

4.1 実験環境

実験に際して、表1のように設定した諸元を標準状態とした。この状態から1つのパラメータを変化させることにより、検出精度にどのような影響があるのかを考察した。ただし、検出精度を表す指標には、10回データを受信した時に何回正しくデータを受け取れたかを比率で表した値を検出率とする。実験では、RGBの3チャンネルに対して同じデータを送信し、それぞれのチャンネルで埋め込み情報を独立に復号した。受信機のスペックは次の通りである。

名称: Nexus 7, OS: Android 4.3, RAM: 2GB

CPU: Qualcomm Snapdragon S4 Pro 1.5GHz

4.2 マーカ色と調光色の違いによる検出精度への影響

標準状態において、図7に示す様なデザインでマーカの色のみを変えた際の、各受信チャンネルの検出率を図8に示す。標準状態である白色マーカの検出率は、すべて100%となった。また、マーカの種類が変わっても、全ての受信チャンネルで検出率が80%以上となった。

次に、照明の色を変えたときの各マーカ色に対する検出率を図9-11示す。図9は、赤のLEDを正弦波、青と緑のLEDを低輝度で調光した搬送波を用いた際の、受信チャ

表 1 標準状態における各種パラメータ

Table 1 Default parameters

1 シンボルの長さ	: 200msec
埋め込むデータ量	: 5bit
埋め込みデータ	: 11111
マーカ色	: 白
撮影距離	: 近距離 (100~200mm)
調光波形	: 白色一定
周辺の外光環境	: 蛍光灯下 (室内)
手振れ	: なし

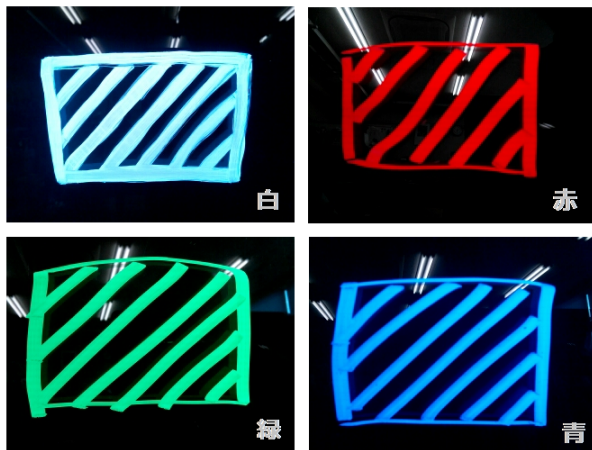


図 7 4.2 節~4.4 節のマーカデザイン

Fig. 7 Marker design

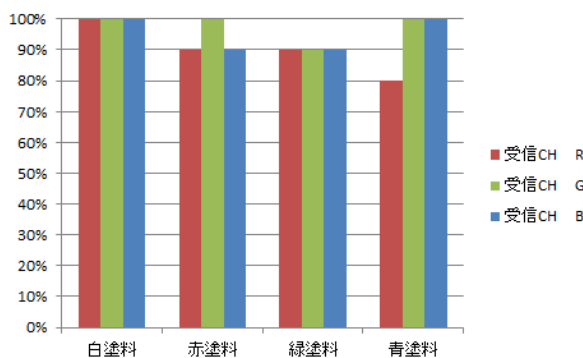


図 8 マーカ色の違いによる検出率

Fig. 8 Detection rates for various colors of markers

ンネル毎の各マーカ色に対する検出率である。この結果では、R チャンネルでは赤色のマーカ、G チャンネルでは緑色のマーカ、および B チャンネルでは全色でのマーカが各々 80%以上の検出率となった。

図 10 は、緑の LED を正弦波、赤と青の LED を低輝度で調光した搬送波を用いた際の、受信チャンネル毎の各マーカ色に対する検出率である。この結果では、R チャンネルでは赤と青色のマーカ、G チャンネルでは緑と青色のマーカ、および B チャンネルでは全色でのマーカが各々 80%以上の検出率となった。

図 11 は、青の LED を正弦波、赤と緑の LED を低輝度で

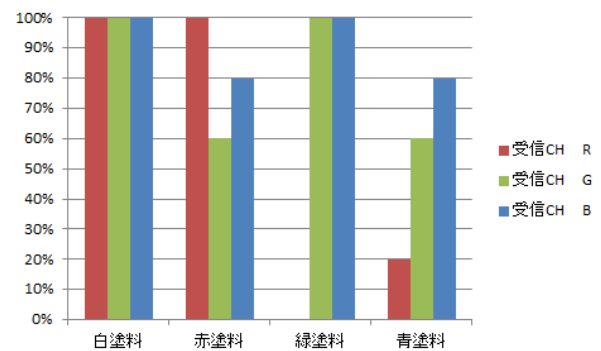


図 9 赤色調光に対する各マーカの検出率

Fig. 9 Detection rates for red-dominated dimming

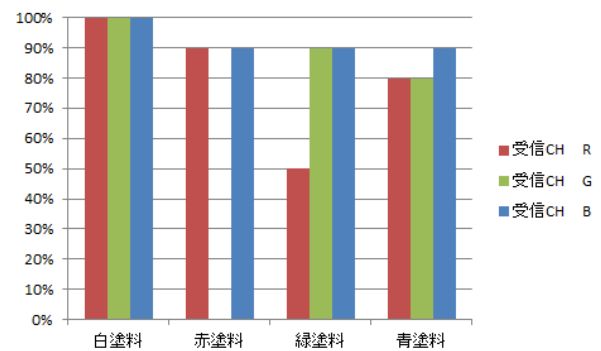


図 10 緑色調光に対する各マーカの検出率

Fig. 10 Detection rates for green-dominated dimming

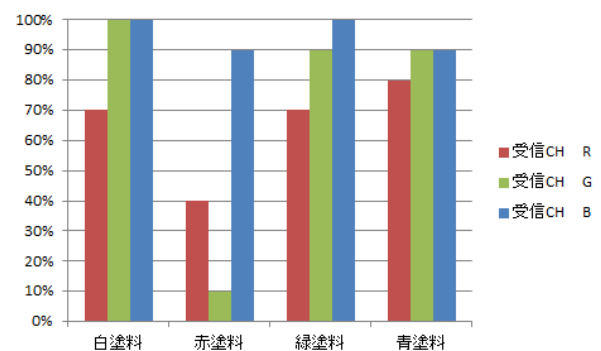


図 11 青色調光に対する各マーカの検出率

Fig. 11 Detection rates for blue-dominated dimming

調光した搬送波を用いた際の、受信チャンネル毎の各マーカ色に対する検出率である。この結果では、R チャンネルでは青色のマーカ、G チャンネルでは緑と青色のマーカ、および B チャンネルでは全色でのマーカが各々 80%以上の検出率となった。

これらの結果より、B チャンネルはどの照明の色でどのマーカを使っても検出精度が高く、照明の色と同じ色のマーカを使っている条件では、同系色のチャンネルで検出率が高いことが分かる。ただ、照明の色とマーカ色の組み合わせによっては、情報をほとんど復号できない条件が存在した。これはマーカ自身の光に対する反射・吸収・透過

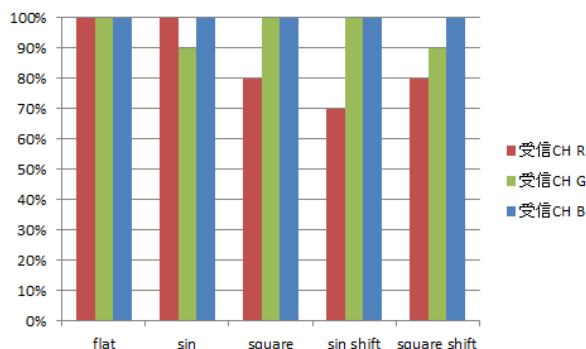


図 12 調光波形の違いによる検出率

Fig. 12 Detection rates for various forms of carrier wave

などの特性とカメラの分光感度特性により、受信チャンネル間で信号が干渉するクロストーク [10] が発生し検出率が低下したと考えられる。照明の色が一定の場合、RGB の各波長のスペクトル強度の比率はほぼ一定であるため、画素値の変化はスケールが変化する程度である。しかし、照明の色が変化すると RGB の各波長のスペクトル強度の比率が変化し、画素値の変化は RGB の比率が変化するため、チャンネル間の干渉が発生しクロストークの影響が大きくなる。さらにクロストークの影響はマーカの色によって違うため、照明の色とマーカ色の組み合わせによって検出率が変動すると考えられる。

4.3 調光制御波形の違いによる検出精度への影響

マーカの色を白色に固定し、調光波形の違いの検出精度への影響を調べた。調光波形は、白色一定 (flat)、正弦波 (sin)、矩形波 (square)、各チャンネルで位相を 1/3 ずらした正弦波 (sin-shift)、各チャンネルで位相を 1/3 ずらした矩形波 (square-shift) の 5 種類について実験した。

図 12 の結果を見ると、R チャンネルで受信した信号について、square・sin-shift・square-shift の 3 条件で検出精度が 80%以下となった。前述した実験で、白色塗料は青色調光において R チャンネルでの検出率が低いことが分かっている。そのため位相をずらした条件では、周期的に青色が強い調光が現れ、そのタイミングでエッジの変化が減衰してしまい誤検出に繋がったと考えられる。

4.4 調光信号の周期の違いによる検出精度への影響

マーカの色を白色に固定し、搬送波を白色の正弦波とした場合、その周期の違いの検出精度への影響を調べた。図 13 の結果より、どの周期においても 80%以上の検出率が得られるので、周期の検出精度への影響はほとんどないと考えられる。ただし、変調の際に 0.2 sec 間隔で搬送波をサンプリングしているため、サンプリング定理により、サンプリング周期の 2 倍の 0.4 sec を下回る信号は復元できない。

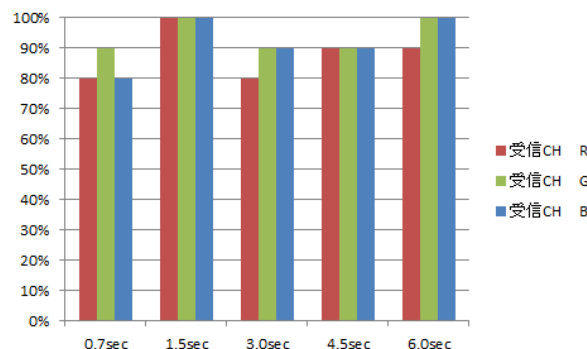


図 13 調光周期の違いによる検出率

Fig. 13 Detection rates for various dimming periods

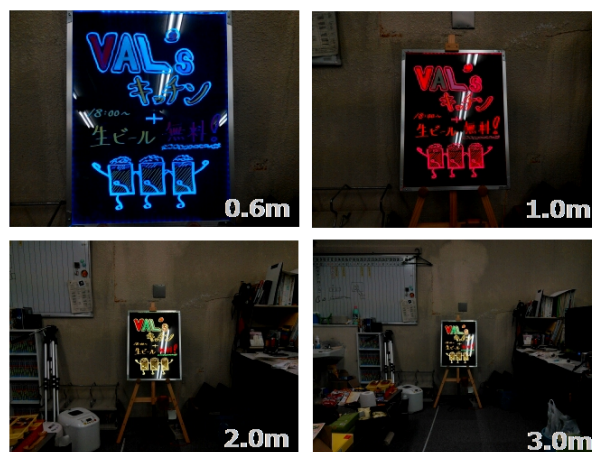


図 14 撮影距離の違いによるサインボード領域の変化

Fig. 14 Change of signboard area captured from different view-points

4.5 撮影距離の違いによる検出精度への影響

各チャンネルで位相を 1/3 ずらした矩形波で LED を調光し、図 14 に示す様にサインボード全体が写る距離の 0.6 m から、徐々に撮影距離を増加させた場合での検出率は、図 15 に示す様にサインボードからの距離が離れるほど検出率が低下した。撮影距離が離れると、画像内に含まれるサインボード上のマーカ領域が減少したため、受信信号の強度が減少し信号の S/N 比が小さくなり、復号に失敗し検出精度が低下したと考えられる。また、R チャンネルの検出率が著しく低下した要因の詳細は未だ調査できていないが、クロストークの影響を調査した際に、白色のマーカに対して R チャンネルと BG チャンネルの間には負の相関があり、G チャンネルと B チャンネルの間には正の相関がある傾向が確認された。従って、G と B のチャンネルは信号を互いに強め合い、検出率の低下が抑えられた可能性が示唆された。

5. 結論

5.1 まとめ

本論文では、自由に調光演出可能な LED サインボード

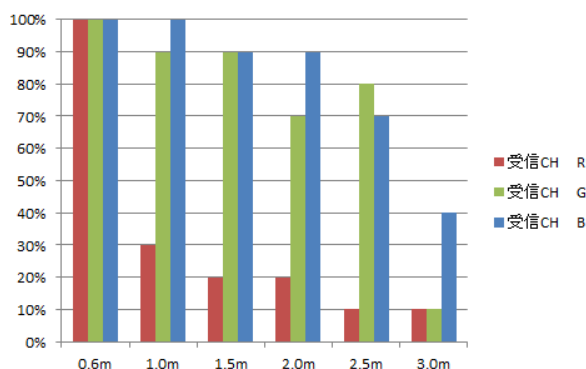


図 15 撮影距離の違いによる検出率

Fig. 15 Detection rates for various view-distances

の光に対して情報を埋め込み、スマートフォンに搭載されている通常のデジタルカメラでサインボードを撮影することで情報を復元するシステムを提案した。

提案手法では、マンチェスター符号のシンボル間に出現するエッジの高さと向きを変えて信号波を生成し、ユーザが指定した搬送波に加算することで、任意の調光制御に対する情報の埋め込みが可能となった。現実装では1シンボル分の時間間隔を0.2secに設定しているので、サンプリング定理よりこの周期の2倍の0.4sec以下の周期の搬送波は復元できない。また、1シンボルが0.2secの場合に提案した変調方式の1チャンネルで送信できるデータの転送速度限界は、5 bit/secとなり、既存の手法と比べると、一度に送れる情報量は少ないと考えられる。しかし、サインボードに書かれている内容の情報と併せて情報をコード化することにより、実質的な情報量を増加させることは可能である。

検出精度は、搬送波の波形と使用するマーカの色によって変動するが、受信信号のBチャンネルは、搬送波とマーカの色とは無関係に、常に80%以上の検出精度が得られた。

5.2 課題と展望

今後の課題として、サインボードの領域を判定する処理が必要である。現在はカメラで撮影した画像内のすべての画素を使用して、受信信号を求めているので、サインボードを遠くから撮影した場合には、情報が埋め込まれた領域の画素数が少なくなり、検出精度が低下している。また、画像内に写り込んでいる周辺の景色が大きく変化した場合は、ノイズが受信信号に乗ることになる。そのため、マーカの領域だけを選択的に選んで、受信信号を抜き出すなどの工夫が必要である。

その他にも、RGBの各チャンネルに異なるデータを用いて変調信号を生成してデータを送信した場合に、検出率に現れる影響を調査する必要がある。この方法で安定してデータを検出できれば、転送速度が3倍である15 bit/secまで増やせる。また、撮像素子のローリングシャッターの

特性を利用して画素領域ごとに色変化を検出すれば、データ転送量を飛躍的に増大させることが可能になると予想される。その場合、カメラ撮影時のシャッタータイミングの安定化が必須となるが、今後はその様な高速化も検討する予定である。

本手法は、任意の搬送波に対して情報を埋め込むことができるので、イルミネーション等に応用できる。例えば、撮影距離の問題もあるが、イベントなどで用いられるライトアップの制御信号に情報を埋め込むことで、情報を配信できる。LEDサインボード以外に、本手法が適用できる事例の発掘も今後の検討課題である。

参考文献

- [1] T. Komine, M. Nakagawa : Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights, Consumer Electronics, IEEE Transactions on, Vol.50, No.1, pp.100-107(2004)
- [2] 飯塚宣男. "可視光イメージセンサ通信技術の動向と展望 (研究会報告)." マイクロメカトロニクス 54.202 (2010): 26-37.
- [3] 海道保志, 柴田啓司, 堀田裕弘, 南雲弘 : LED アレイを用いた並列可視光通信におけるフリッカ知覚の検討, 信学技報, ITS2009?34, pp. 97・100, 2009.
- [4] 赤熊高行, 衣川彰, 松田一朗, 青森久, 伊藤晋 : 夜景への情報冗長を目的とした可視光通信による LED 電飾の識別, 電子情報通信学会総合大会講演論文集情報・システム (2), pp.30(2012)
- [5] ビカピカメラ, <http://www.casio-isc.com/ja/>
- [6] モノに情報を付与できる LED 照明技術, <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2014/11/17.html>
- [7] 荻野 雅泰, 栗山 繁 : 色調整可能な照明と物体反射光の動画撮影によるデータ送受信, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J97-A No.2 pp.96-103(2014)
- [8] スマートフォンで利用可能な「光 ID」技術, <http://news.panasonic.com/press/news/data/2014/12/jn141211-2/jn141211-2.html>
- [9] 鹿倉智明, 森川宏之, 中村芳樹 : オフィス照明環境における明るさ変動知覚に関する研究, J.Illum.Engng.Inst.Jpn, Vol.85, No.5, pp.346-351(2001)
- [10] 北川克一: "3 波長干渉計測のためのクロストーク補正", 計測自動制御学会産業論文集 Vol.8, No.14 pp.113-116, 2009.