

LED 照明の色変調を用いた間接光型空間タグ

荻野雅泰^{†1} 栗山繁^{†1}

本報告では、カラーLED 照明により照らされる環境に埋め込まれた情報が、スマートフォン等の携帯端末に搭載されているデジタルカメラで検出可能な空間タグシステムを提案する。既存の可視光通信で用いられるコーディング手法を RGB 変調が可能な LED 光源色の微小変化に拡張し、シーン内に置かれた物体の表面特性の影響を受けない、間接光を介したデータ伝送を実現する。可視光にタグ情報を埋め込む事により、画像特徴の検出や識別が困難な平坦な壁や類似物体からでも短縮 URL 等の情報を手軽に取得できるシステムが構築できる。

Spatial Tag using Color Modulation of LED Lighting

MASAYASU OGINO[†] SHIGERU KURIYAMA[†]

This report introduces a new type of spatial tag system that is detectable with a digital camera equipped in smart-phones, where the information is embedded on the environment lit by the color LED lighting. This method enables data transmission through indirect light, independently with the features of objects' surface materials on the scene. This method extends existing coding technique of visible light communication into those based on the small color modulations with RGB-controllable LED lights. With this tags embedded via visible lights, a handy mechanism for obtaining index data such as shortened URL can be constructed, even for the plain walls and similar objects whose image features are hard to be detected.

1. はじめに

近年、QRコード等の技術を利用することで、紙媒体やデジタルサイネージへURL情報を埋め込む技術が提案されている。しかし、QRコードなどは広告媒体の美観を損ない、コードを埋め込む領域の確保も必要になるので、その美観や目立ちにくさを考慮したビジュアルコードがいくつか提案されている [1][2][3]。これらの手法は広告物等の美観の改善には役立つが、2次元バーコードと同様にマーカにカメラを近づける必要があり、今後はNFC(Near Field Communication)を用いた空間タグシステムに置き換えられる可能性がある。

シーン内の物体をタグ情報の埋込に用いるために、物体の画像特徴量を利用するシステムが開発されている[4]。この手法は物体を撮影するだけで関連情報を引き出す事が可能であるが、外観が類似した複数の物体に異なる情報を埋め込むには、位置情報等を併用する必要がある。また、画像特徴量の検出が困難な平坦な壁等には、情報を埋め込む事ができない。

本研究では以上の点を考慮し、情報を埋め込む対象として物体表面の画像特徴量は用いずに、LED 照明による照明光を利用する。

LED 照明は低消費電力や調光が容易であるという特徴から、可視光通信の研究分野において幅広く利用されている[5]。しかし、LED 照明を可視光通信に利用している研究の多くは、フォトダイオードやハイスピードカメラといったデバイスを利用していることが多い。これらのデバイス

は研究では広く使われているものの、一般的に利用されている汎用的なデバイスであるとは言えない。そこで本研究では、照明光に埋め込まれた情報を読み取るデバイスとしてスマートフォンやタブレットといった携帯端末に搭載されているデジタルカメラを利用する。また、照明光からの埋め込み情報についても携帯端末上での計算で検出することで、図 1 に示す様な手軽なタグシステムを構築する。

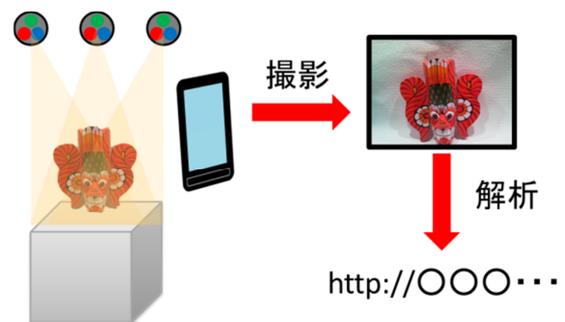


図 1 提案システムの概要

Figure 1 System overview

本提案手法と同様のシステムとして CASIO のピカピカカメラが挙げられる[6]。このシステムは、光源やディスプレイを点滅させることでカメラによる可視光通信を行なうが、見た目への影響が考慮されておらず、例えば、光源色が赤から青のように極端に変化するので、通常の照明として用いるには適していない。また、伝送可能な情報量も 1 秒あたり 5 ビットと非常に低速である。

本研究では、見た目への影響を考慮して色変化が少なく、照明本来の機能としての使用にも耐え得るシステムを提案

^{†1} 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology

する。照明により照らされた物体とその周囲を動画撮影することで、間接光から短縮 URL 程度の数バイトの情報を検出することを目標とする。

2. 照明光の変調方式と埋め込み信号の構成

本章では情報を埋め込む照明光の変調方式と、埋め込み信号の構成について述べる。

2.1 照明光の変調方式

可視光を信号として利用する場合の一般的な変調方式としてはオンオフ変調が知られている。光源の1変化あたりの状態数は2状態であるものの、1変化に要する時間を短くすることで、単位時間あたりに表現可能な情報量を増加させている。オンオフ変調では光源を高速に変化させることで人間の目には光源変化は視認されない。しかし、高速な光源変化を観測するためには高フレームレートな受光用デバイスが必要となる。本研究で用いる汎用カメラのフレームレートは高々数十フレーム/秒程度であるため、高速な光源変化の観測は困難である。また、汎用カメラのフレームレートに合わせた速度で光源を変化させる場合、光源1変化に要する時間が長くなってしまふ。そこで、1変化あたりの状態数を増加させることで、単位時間あたりに表現可能な情報量を増加させるために、光源としてフルカラーLED照明を用いて、多段階に変調する。

フルカラーLED照明はR、G、Bの3素子により構成される。RGB各素子を独立に制御させることで、単一素子の場合に比べて、1変化あたりの状態数が増える。また、オンオフの2状態のみでなく、その間の光量を1つの状態とみなし、光源を多段階に変調させることで1変化あたりに表現可能な状態数を増加させることが可能となる。

フルカラーLED照明を用いる場合、各素子の変化量が大きいと色合いの変化も大きくなり、照明としての品質に悪影響をもたらす。さらに、カメラのフレームレートに合わせ照明を低速に変化させた場合、照明の変化毎に細かいちらつきが発生し、その点滅がフリッカーとして認識されてしまう。そのため、色合いの大きな変化やちらつきは極力抑える必要があり、ちらつきの防止も研究されている[8]。

本研究では、光源にあらかじめ基準となる光量をオフセットとして設定し、基準の光量から多段階に変調する。変調する際の変調量もカメラで観測可能な範囲で小さくすることにより、ユーザが感じる不快感を軽減する。RGB各チャンネルを $c = \{R, G, B\}$ とした場合、光源に設定する基準の光量 $L(c)$ を以下のように設定した。

$$L(c) = L_{offset}(c) + n * \delta L(c) \quad (1)$$

$L_{offset}(c)$ はチャンネル c における光量のオフセットを示し、 $n(=0, 1, \dots, N-1)$ は N 段階の多段階変調を行った際の数値、 $\delta L(c)$ はチャンネル c における変調量を示す。

2.2 埋め込み信号の構成

本研究で扱う情報量の目標として、短縮 URL を挙げる。

利用するサービスにもよるが、短縮 URL は概ね6バイト程度の情報で表現可能である。

RGB各チャンネルをそれぞれR=5段階、G=6段階、B=5段階で多段階に変調し、光源の1変化あたり150の状態数を作り出すことで約7ビットの情報を表現する(以降、便宜上1変化を1セグメントとする)。各チャンネルの段階数は白色から色合いの変化が過大にならず、カメラで観測可能なパターンを事前実験により求めた。10セグメントからなる周期信号を構成することで、短縮 URL 程度の情報を扱える埋め込み信号を実現する。埋め込み信号は図2に示す構成となる。

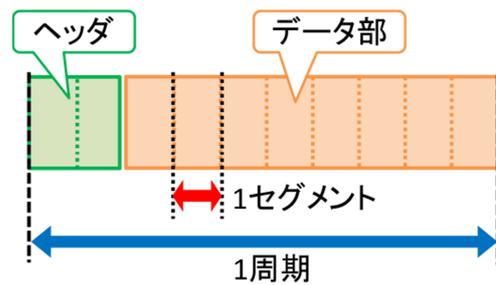


図2 埋め込み信号の構成

Figure 2 Configuration of embedded signal

データ部は8つのセグメントから構成され、各セグメントで伝送情報を信号値に変換する。データ部には伝送する短縮 URL の情報を埋め込む。ヘッダはデータ部の前に2セグメント分付与し、ヘッダの第1セグメントにはRGB各チャンネルが取りうる最小の信号値($R=0, G=0, B=0$)、第2セグメントには最大の信号値($R=4, G=5, B=4$)を設定する。光源が第1セグメントから第2セグメントへ変化する時、理想的にはRGB全チャンネルにおいて光量の変化が最大となる。この変化を利用し周期信号の境界を検出するとともに、最大値と最小値を検出することで信号が取りうる値域を検出し、情報検出の際の前処理である信号振幅の正規化に利用する。

3. 埋め込み信号からの情報検出

本章ではカメラで撮影した動画を用い、照明光に埋め込まれた情報を検出する手法について述べる。情報検出は得られた動画の各フレームを複数領域に分割後にノイズを除去し、クロストークの補正を行うことで素子間の反応感度を補正する。続いて、得られた信号から過渡状態を検出および除去することにより情報を検出する。

3.1 領域分割

動画の各フレームを一定のサイズを持つ小領域に分割し、この小領域毎に処理し得られた復号結果を多数決することで最終的にひとつの時系列信号値を推定する。小領域に分割することで検出精度の向上を図るとともに、処理に用い

るデータ量を削減し携帯端末上での実時間処理を実現する。

分割された各小領域に対し、検出の事前処理としてフレーム毎に R,G,B 各チャンネルの全ピクセルの画素平均を求める。これにより小領域内のノイズ成分を取り除き、時系列データ群を生成する。求めた画素平均は撮影時に小領域に入った撮影対象によって明るさが異なるオフセットを持つため、各小領域の時系列データ内の最大値および最小値を元に正規化する。撮影の段階で得る動画のサイズは 320×240 ピクセルとし、小領域への分割は経験的に 80×80 ピクセルの 12 個とした。

3.2 クロストークの補正

太陽光が広い波長帯を持つ光を発するのに対し、LED 照明は特定の波長帯において強い光を発するスペクトルを有し、フルカラーLED 照明では、R, G, B のそれぞれの波長帯において強いスペクトルを有する。一方で、カメラ内のイメージセンサも光に対する感度特性を有しており、特定の波長帯の光に対して強く反応するものの、他の波長帯の光に対しても反応してしまう。このため、異なる感度特性を持つイメージセンサであっても特定の波長帯の光に対してどちらのイメージセンサも反応してしまうクロストーク [7] という現象が発生してしまう。この場合、例えば、G チャンネルの光源変化に対し、R や B などのイメージセンサが微量に反応する可能性がある。

本研究では LED 照明の RGB 各チャンネルを独立に制御し、イメージセンサ側でその変化を独立に観測する必要がある。ゆえに、事前実験によりイメージセンサの感度特性を調査したところ、クロストーク現象が発生していること確認できた。そこで、クロストークの影響を抑えるため、観測値を補正 [9] した。光源の各チャンネル $c = \{R, G, B\}$ の光量を $L(c)$ とした時、イメージセンサ c の観測値 $I(c)$ は一次式の関係で補正できる。本実験で用いた光源とカメラに対して、観測値を元に最小二乗法により一次式の各係数の値を求めた結果、以下のような補正式が得られた。

$$I(R) = 1.15L(R) + 0.155L(G) - 0.175 \quad (2)$$

$$I(G) = 0.2L(R) + 1.0L(G) - 0.2L(B) \quad (3)$$

$$I(B) = 1.0L(B) \quad (4)$$

3.3 過渡状態の検出

あるフレーム t における観測画素値は、前フレーム $t-1$ から現フレーム t までにイメージセンサが受光した光量によって決定される。この間、光源の光量に変化しなければフレーム $t-1$ およびフレーム t の観測値は等しく、定常状態を観測できる。一方で、光源の光量に変化した場合、フレーム $t-1$ とフレーム t の観測値は異なり、フレーム t は光源変化の前後の光量の過渡的な状態が観測される。

信号値を検出する際、単一フレームでなく複数フレーム分のデータを検出に利用したとする。この時、利用するフレーム群が全て定常状態を観測したものであれば観測値の信頼性は高く、精度向上が見込まれる。一方で、フレーム

群に過渡状態が含まれる場合、観測値の信頼性は低くなり、精度の低下につながる。高フレームレートなイメージセンサならば過渡状態の数に対して十分に多い定常状態のフレームを取得できるため、検出精度に過渡状態の影響はほとんど現れない。しかし、汎用カメラで定常状態の数を十分に取得するためには、1 セグメントの時間を長くする必要があり、単位時間あたりの情報量の低下をまねく。そのため、検出精度と情報量の低下を抑制するために、過渡状態の検出および除去が必要となる。

あるフレームにおけるイメージセンサの観測値を $I(t)$ とした時、前 2 フレームの観測値の平均および、後 2 フレームの観測値の平均との比較することで過渡状態を検出する。

$$\left| \frac{I(t-2) + I(t-1)}{2} - I(t) \right| > threshold \quad (5)$$

$$\left| \frac{I(t+1) + I(t+2)}{2} - I(t) \right| > threshold \quad (6)$$

前 2 フレームと比較することで、注目するフレームにおいて光量変化が発生しているか判断する。同時に、後 2 フレームとも比較する。現在の値が前 2 フレーム、後 2 フレーム両方から一定値以上離れている場合、そのフレームの観測値は過渡状態を観測したものと判断し、時系列データから除去する。この時用いる閾値は経験的に $threshold=0.1$ とした。

3.4 情報の復元

情報を復元するため、過渡状態を除去した時系列データ群から周期信号の境界およびセグメント毎の境界を検出する。境界の検出にはヘッダの第 1 セグメントと第 2 セグメントを利用する。境界となる前後のフレームの観測値 $I(t-1)$ および $I(t)$ については、 $I(t-1) < 0.2$ および $I(t) > 0.8$ という条件を設け境界を検出した。セグメント毎の境界検出については、1 周期の計測時間 T をもとに、 $T/10$ だけ経過する毎にセグメント境界として切り分ける。

各セグメントは複数フレームからなるため、これらのフレームの平均を取り、信号値の境界位置と比較する。比較結果を元に、そのセグメントにおける信号値を決定する。この時の各信号値 $c = \{R, G, B\}$ の境界位置 $P(c)$ は、以下のように与えられる。

$$P(c) = \alpha_c(2m-1) \quad (7)$$

なお、R および B チャンネルについては $\alpha_c = 0.125$ 、 $m = 1, \dots, 4$ となり、G チャンネルについては $\alpha_c = 0.1$ 、 $m = 1, \dots, 5$ となる。

各領域で時系列信号値を取得後、最終的には復元した情報として時系列信号値を 1 つに決定するために条件付きの多数決を用いる。信号値を決定する際に、チャンネル毎に境界位置を設定したが、この境界位置に近い値をとるフレームを低信頼値のフレームとし、その数を小領域毎にカウントする。各小領域でカウントした低信頼値のフレーム数を平均し、平均値以上のフレーム数を有する小領域につい

では、信頼性の低い領域と判断し、多数決の段階では利用しない。低信頼値の範囲については、2つの境界位置の距離の20%とした。以下の図3に各チャンネルの境界位置と低信頼値の範囲について示す。

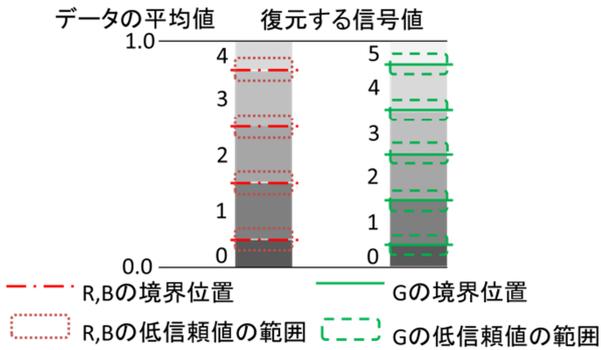


図3 各チャンネルの区間と低信頼値の範囲
 Figure 3 Regions of each level and low confidence

4. 検出精度実験

4.1 実験環境

図4に示すような実験用の環境を構築し、検出精度を実験的に検証した。

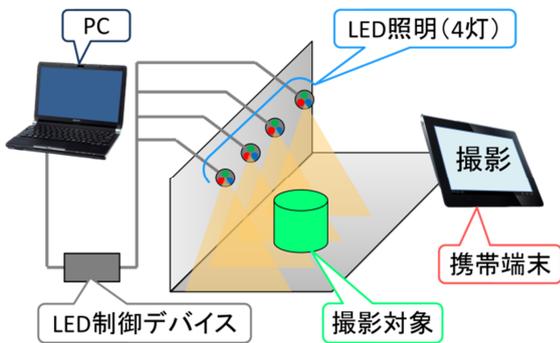


図4 実験環境概要
 Figure 4 Experimental environment overview

埋め込み信号を周期的に繰り返すプログラムを作成し、PCにより4灯のLED照明を制御した。照明により照らされる背景と床面には白い壁紙を使用し、暗室で実験した。実験に使用したLED照明と埋め込み信号の設定を表1に、撮影に使用した携帯端末の仕様を表2に示す。

表1 埋め込み信号の環境設定
 Table 1 Setting of signal environment

照明 (4灯)	PHILIPS iColor MR g2
LED 制御デバイス	Kuwatec Doctor MX
1セグメントの長さ	0.2秒
信号1周期の長さ	2.0秒

表2 携帯端末の仕様

Table 2 Specification of the mobile device

モデル	Sony Tablet S
OS	Android 4.0.3 (API15)
CPU	1.0GHz
メモリ	1.0GB

表2に示した携帯端末内で動画撮影および情報を検出するため、Androidアプリを作成した。カメラのホワイトバランスおよび露光は固定で動画を撮影した。撮影は撮影対象が画面内に収まる程度の距離に携帯端末を固定し、最低でもヘッダから1周期分の信号が取得できるように5秒程度の撮影時間とした。

撮影対象としては図5に示すように材質や色に特徴のある4種類の物体を用意した。これらの撮影対象を、ランダムに生成した10パターンの信号を埋め込んだ照明光により照らし、動画を撮影した際の埋め込み信号の検出率を求めた。



(a) 背景のみ (b) 鮮やかな工芸品
 (c) 反射の強い金属 (d) 反射の弱い壺

図5 撮影対象物体

Figure 5 Target objects

4.2 実験結果

10パターンの埋め込み信号に対して求めた検出率を図6に示す。ここでの検出率は、各セグメントにおいて得られた信号値の正答率である。

図6より、撮影対象を配置しない場合、100%という高い検出率を得られていることが分かる。また、撮影対象を配置した場合にも、平均で98%を超える高い検出率が得られている。

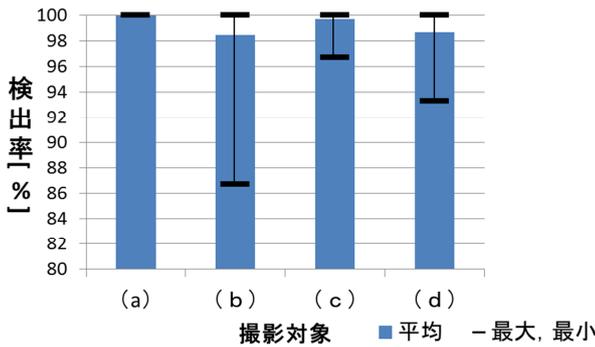


図 6 埋め込み信号の検出率

Figure 6 Detection rate of embedded signals

4.3 手法の検討

提案手法として挙げた、クロストークの補正、信号の過渡状態の除去、情報復元時の信頼性による条件付き多数決の3つの処理について、各処理を用いた場合とそうでない場合に、検出結果にどのように影響が出るか検討する。

クロストーク補正、過渡状態の除去、条件付き多数決のうち、どれか1つの処理を適用した場合と全てを適用しなかった場合において、10パターンの埋め込み信号から情報を検出した際の平均検出率を以下の図7に示す。

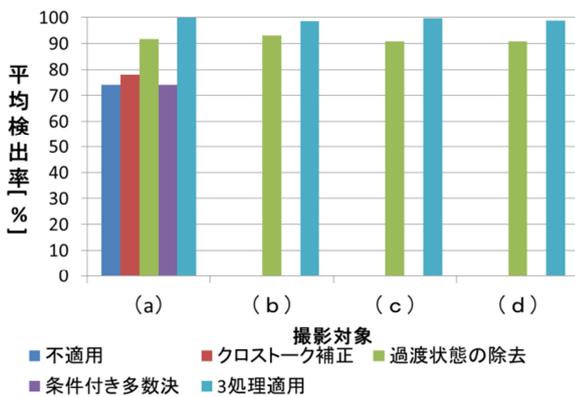


図 7 各処理を適用した場合の検出率

Figure 7 Detection rate for adopting each process

図7より、撮影対象が(a)背景のみの場合には各処理を適用しない場合にも70%程度の検出率を得られていることがわかる。しかし、撮影対象が背景のみでない場合には情報の検出に失敗していることが確認できる。これは、撮影対象の物体の色や材質の影響により、撮影動画からの周期信号の境界検出に失敗していることが原因である。過渡状態の除去を行った場合には、周期信号の境界検出に成功し、90%程度の検出率を得られている。周期信号の境界検出に用いた閾値の条件を変更し他手法を適用した場合には、境界の検出自体は可能なものの、正しい境界を検出することが出来なかった。したがって境界を精度良く検出するため

には過渡状態の除去が有効であることが確認できた。

次に、2種類の処理を適用した場合に10パターンの埋め込み信号から情報を検出した際の平均検出率を以下の図8に示す。

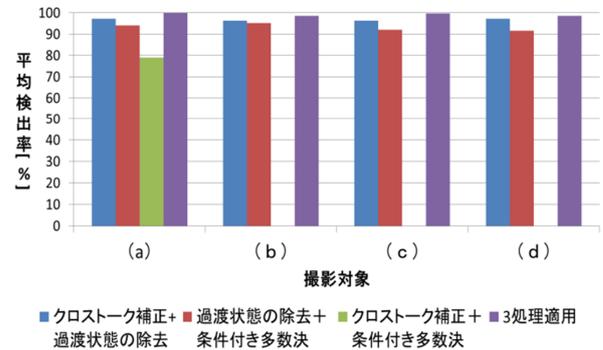


図 8 2つの処理を適用した場合の検出率

Figure 8 Detection rate for adopting two processes

2つの処理を適用した場合、過渡状態の除去のみに比べて検出率が向上していることが確認できる。特にクロストーク補正については、過渡状態の除去のみの場合に比べ平均で3~6%の検出率の向上が見られた。クロストーク補正は特にGのイメージセンサの信号値の検出率への影響が大きく、平均80%程度であった検出率が96%に向上する結果となった。これは、GのイメージセンサがRおよびBの中間の波長帯に位置するためGチャンネルの照明以外が変化した場合にもその影響を受けやすかったものが、クロストーク補正によりその影響を受けにくくなったことが要因である。

また、光源変化の定量的な評価として、照度計により照明の直下の照度および色度を測定したところ、照度変化は基準として設定した光量から10%以内の変化量であり、色度変化は色度管理の基準となるマクアダム楕円[10]と同等の変化に収まっていることが確認できた。

5. おわりに

LED照明と携帯端末に搭載されているデジタルカメラを用いた空間タグシステムを提案した。

このシステムでは、RGB各チャンネルを独立に制御し、微小量ずつ多段階に変調することで1セグメントあたりに表現可能な状態数を増加させ、見た目には分かりづらい変調を実現した。また、間接光からの信号検出の手法を述べ、検証実験により映り込む物体によらない高い検出率が得られることを確認した。

今後の課題として、手ブレ対策を施すことによる信号検出の頑健性向上が挙げられる。この問題に対しては解析の際に取得する領域について、画素値の変化が少ない背景領域を利用することで解決できると考えている。具体的には、

クラスタ分析の技術を用いることで、背景領域のみを採用する方法等が考えられる。

また、現在は信号 1 周期あたりに 2 秒を要しているが、この時間をいかに短縮し、応答を速めるかも重要な課題である。そのために、1 回の信号変化あたりに取得するフレーム数を減らし、より少ないフレーム数によって情報を解析する必要がある。現在は動画撮影および解析するアプリケーションを Android 端末上で開発しており、計算性能の不足から十分に満足な応答性能が得られていないと考えられるが、スマートフォンやタブレット等の携帯端末の演算性能は今後も向上していくと考えられるため、処理速度の問題は解決されると考えられる。

参考文献

- 1) H.Otori, S.Kuriyama: Texture Synthesis for Mobile Communications, IEEE Computer Graphics and Application, Vol 29 Issue 6(2009).
- 2) 三宅哲平, 栗山繁: 明度変化を用いた形状輪郭への情報埋め込み, 電子情報通信学会総合大会論文集 情報・システム(2), S-27,S-28(2009).
- 3) 能田雄規, 河野恭之: 不可視マーカを用いた実世界物体の認識, 情報処理学会論文誌 Vol.50,No.12, pp.2889-2893(2009).
- 4) Google Goggles <http://www.google.com/mobile/goggles/>
- 5) 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).
- 6) Picapicamera <http://www.casio-isc.com/ja/>
- 7) 葉山大輔, 松本大助, 李英載, 林新, 春山真一郎, 松本充司: 可視光通信におけるちらつき防止の一検討, 電子情報通信学会総合大会講演論文集 通信(2),pp.423(2012).
- 8) 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).
- 9) 北川克一:3 波長ワンショット干渉計測におけるクロストーク係数推定, 計測自動制御学会産業論文集 Vol.10, No.25 pp.209-212(2011).
- 10) David L Macadam: Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight, JOSA 32 (5), pp.247-274(1942).