

光源色の時間変調検出に基づいた照明の影響度推定

高井 大輔¹ 栗山 繁¹

概要：本研究では，環境に合わせて自動的に調光する照明システム等に利用できるカラー LED 光源の，任意地点における影響度を推定する手法を提案する．本報告では，Walsh 符号に基づいてデコードされたパターンをデジタル制御方式の LED 光源の色変調パターンに変換し，その光源で照らされた床面や机上面をスマートフォンのカメラで撮影した動画像から，撮影点における各光源の影響度を推定する手法を提案する．さらに，市販のカラー LED 照明を複数台用いた実環境での推定性能の検証実験の結果について報告する．

Influence estimation of lights by detecting time-modulations of their colors

DAISUKE TAKAI¹ SHIGERU KURIYAMA¹

1. はじめに

近年，省エネルギーや長寿命などの理由から，室内照明は蛍光灯や白熱灯に替わり LED 照明が用いられるようになった．LED 照明は PWM(Pulse Width Modulation) 調光方式などによりデジタル制御が容易であるため，環境に合わせた照明の動的な自動調光システムが発展していくと予想される．また，現在では主に演出の用途に限られているカラー LED 照明も一般消費者向けの電球型の製品*¹が登場する等，身近なインテリアとして認識され始めている．

本研究ではカラー LED 照明と市販のカメラ付きスマートフォンを用いた照明光の影響を推定する手法 [1] を検討する．照明からの影響を測定することができれば，各照明の位置が既知の場合には，撮影場所の位置が推定できるので，多様なシステムへの応用が期待できる．

照度による人や物体の位置推定 [2] や照明と照度センサの出力値の相関から位置関係を取得する手法 [3] などは照度を計測するデバイスが必要となり，既存の可視光通信を利用した位置推定方法においても通信用フォトダイオードが必要となる．

スマートフォン等のモバイルインターネットデバイスを

用いることによって，このような特殊なデバイスを利用せずに影響度を手軽に推定できるようになる．スマートフォン等のカメラを用いれば，特殊なセンサを置く場所が確保できないような作業環境でも，その場所を撮影するだけで位置を推定することが可能となり，スマートフォンのディスプレイに照明環境の状況などを重畳表示することもできる．本研究では，カメラで撮影した画像から影響度を推定する手法を確立することで，インターネットを介したデジタル制御を利用して，インタラクティブに照明を調光制御するための基盤技術を開発する．本稿では，動画像から付近の照明の影響度を推定する方法とその検証実験について述べる．

2. カメラを用いた各照明の影響度の取得

本手法では，照明光を特定のパターンで変化させることにより，複数の照明光が合成された間接光から撮影位置におけるそれぞれの照明光の影響度を取得する．照明を変化させるパターンは Walsh 符号 [4] と呼ばれる携帯電話の CDMA(Code Division Multiple Access) などの多次元接続方式のチャンネル分割に使われる拡散系列を利用する．本研究で用いた符号の長さは 8bit であり，これから 8 パターンの符号を生成することができる．また，本研究では間接光を扱うが，その理由として撮影画像の白とびを防ぐことや机の上などの撮りやすい位置での撮影を考慮していること

¹ 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

が挙げられる．

2.1 自然な照明光の変化の利用

スマートフォン等のカメラでは可視光通信のように照明光の高速な点滅を撮影できないため，低フレームレートでも撮影で変化を捉えられる様に，低速度で照明の色合いを変化させる必要がある．しかしながら，カメラの動画撮影速度と同程度の緩やかな光源輝度の変化は人間の視覚にフリッカとして知覚される．したがって，輝度の変化に敏感で色合いの変化には鈍感という人の視覚特性を利用して照明変化の不自然さを軽減する．輝度は照明色における赤色，緑色，および青色で算出されるが，本手法では最も輝度変化に影響の少ない青色成分のみを用いて照明光の変化パターンを設定する．青色成分を増減させることで白色からオレンジ色の変化となり，色温度を変化させた時のような自然な光となり，不自然さを軽減することができる．

変調量を過大に設定すれば照明光の色自体が不自然に見えてしまう状態を生じるため，本研究では青色成分の変調量は 255 階調での ± 8 階調分としている．図 1 に 8bit の変化パターンの一例を示す．

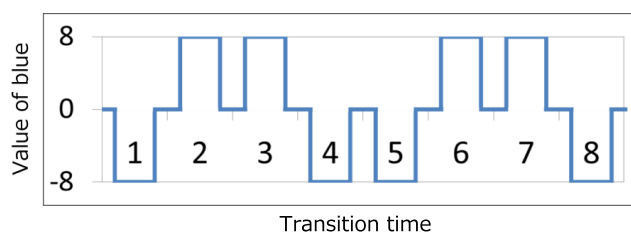


図 1 照明光の変化パターン例

2.2 撮影画像からの波形取得

撮影した動画画像から，影響度を求めるためにフレームごとの青色成分の画素平均の時間変化を波形として得る．ただし，ホワイトバランスや自動露出などの補正がかかると，画像全体の色が変化する場合があるので事前に無効状態に設定しておく．また，照明光は明るい白色に近い状態で変化させるため，得られた波形は青色の階調上限の 255 付近での遷移となる．ゆえに，波形には大きなオフセットがかかった状態になるので，これを除去するためにハイパスフィルタを用いる．

2.3 Walsh 符号を用いた照明光の分離

撮影シーンを照らしている間接光から合成された照明光を符号により分離し，動画画像の撮影位置における各照明の影響度を推定する．本手法では照明光を分離するために符号同士が直交し，互いの内積が 0 となる Walsh 符号を用いている．

ここで，“1”と“-1”を要素とし，各行ベクトルが互いに

直交しているような 2^n 行 $\times$ 2^n 列の正方行列 (アダマール行列) の行ベクトルを関数とすれば，互いに直交した直交関数が得られる．この関数により得られる符号を Walsh 符号という．Walsh 符号の生成に用いられるアダマール行列を式 (1) に示す．

$$H_n = \begin{bmatrix} H_{n-1} & H_{n-1} \\ H_{n-1} & -H_{n-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

符号間に位相差がない場合には符号間の相関値が小さくなり，内積が 0 に近くなる．照明の変化は順次更新されるようになっており，完全な同期ではないが，撮影時間に比べて十分に更新時間が短いため，符号間の位相差はないものと考えられる．Walsh 符号は符号間の相関値が小さく，干渉が少ないため，多重化した照明光を正確に取り出すことができる．

前述の通り Walsh 符号は“1”と“-1”で構成されており，照明光の青色成分の増減を“1”と“-1”に対応付けることによって照明光の変化パターンを構成する．間接光はこの Walsh 符号の合成であり，各符号との内積を計算すると同一符号以外は相互相関値が小さいため，同一符号のみの値が残る．これにより間接光から照明光の影響度を推定することができる．表 1 に Walsh 符号のパターンを示す．後述する実験で用いるため，便宜的に各符号に A ~ H の名称をつけている．

表 1 8bit の Walsh 符号

Code ID	Code
A	[-1, 1,-1, 1,-1, 1,-1, 1]
B	[-1,-1, 1, 1,-1,-1, 1, 1]
C	[-1,-1, 1, 1, 1, 1,-1,-1]
D	[-1, 1, 1,-1,-1, 1, 1,-1]
E	[-1, 1,-1, 1, 1,-1, 1,-1]
F	[-1,-1,-1,-1, 1, 1, 1, 1]
G	[-1, 1, 1,-1, 1,-1,-1, 1]
H	[-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1]

2.4 Walsh 符号を用いた情報の取得

通常 Walsh 符号は通信手法の一つである CDMA などに利用される符号であり，Walsh 符号を反転することによって 0 と 1 を表し，連続して符号を送ることによって通信を行なっている．本手法で情報量を得るために約 3 秒の撮影時間が必要となるが，影響度取得の際に反転，非反転の 2 通りの情報を得ることができる．また，検出できない Walsh 符号の影響度は 0 付近となるため，対象とする符号を反転することによる他の符号との混信は避けられる．

3. 影響度推定性能の検証

実際にカラー LED 照明を使用し，各照明の影響度推定を実験により推定した．今回の実験では，カラー LED 照

明を3台用意し、8パターンのWalsh符号のうちの符号B、符号D、および符号Fの3つを割り当て図2のように配置した。照明直下の床面をスマートフォンのカメラで撮影し、各照明を単体で点灯した時のそれぞれの影響度と全照明を点灯した時の各点における影響度を測定した。

使用したスマートフォンはLG 電子のOptimus G L-01Eであり、カラーLED照明はPHILIPS iColorMRg2である。また、照明を制御するための通信プロトコルとしてDMX512を使用している。

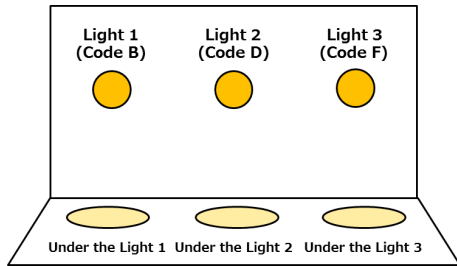


図2 照明の配置

3.1 単一照明の点灯時における影響度の測定

動画撮影により得られた実際の青色成分の波形を図3に示す。また、3つの照明をそれぞれ単体で点灯した時の影響度を5回測定し、平均を求めた結果を図4に示す。この実験における照明直下の照度は110[lx]程度である。

図3から単一照明点灯時には、ノイズの少ない波形が得られていることが確認できるが、波形の中心が上方へずれていることがわかる。図4では、それぞれ点灯した照明の符号と同じ符号で影響度が大きく表れていることが確認できる。しかし、符号Hにおいても負の方向に大きく影響が表れている。これは符号Hはすべて“-1”で構成されているため、波形の中心が上方へずれたことによるオフセットの影響を大きく受けていると考えられる。8bitのWalsh符号のパターンは限られているため、扱える符号は減ってしまうが、符号Hを使用しないことでオフセットの影響を少なくすることができる。

また、照度を80[lx]ほどまで下げた場合についても実験を行った。これも同様に3つの照明をそれぞれ単体で点灯した時の影響度を5回測定し、平均を求めた。結果を図5に示す。図4と図5の結果はほとんど影響度に違いはないことが確認できた。オフセットは除去されるため、照度が変わったとしても変調量を変えなければ、常に同じ影響度を得ることができる。

3.2 複数照明の点灯時における影響度の測定

複数の照明がある場合、互いのWalsh符号がどのように影響するかを確認する実験を行った。動画撮影により得られた実際の青色成分の波形を図6に示す。図2の照明下の

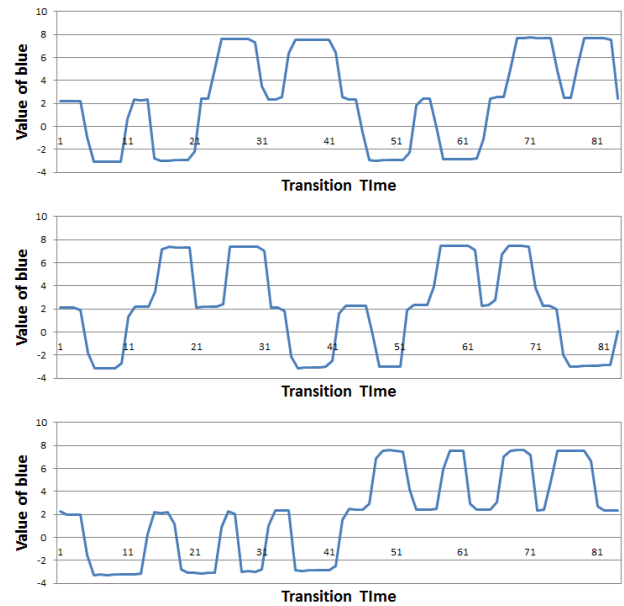


図3 符号B,D,F点灯時の取得波形



図4 単一照明の点灯時における影響度

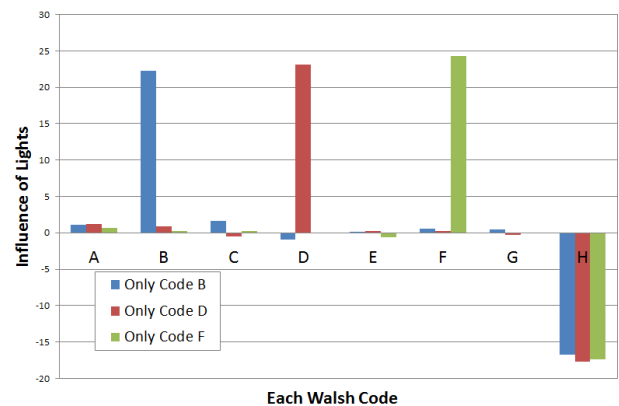


図5 単一照明の点灯時における影響度 (照度 50lx)

床面からの間接光の影響度を測定した。10回測定し、平均を求めた結果を図7に示す。

図6は単一照明点灯時に比べて、ノイズが多いことがわかる。図7では同一のWalsh符号で発光する照明との距離が近いほど影響度が強く表れ、離れるほど影響度が弱く

なっていることが確認できる．このことから影響度の大きさから照明直下の位置だけではなく，照明からの距離を推定することができると考えられる．また，照度は光源の明るさや距離によって変化するが，影響度は距離が遠くなれば全体的に小さくなり，光源の明るさを変えても影響度に違いがないという性質がある．単一照明の点灯と同じく符号 H は影響度が大きく表れており，前述した通りオフセットの影響を受けているためと考えられる．

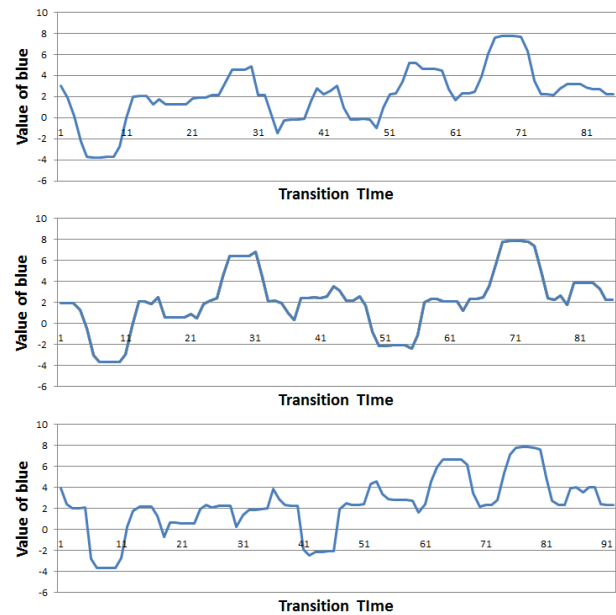


図 6 符号 B,D,F 下の撮影点における取得波形

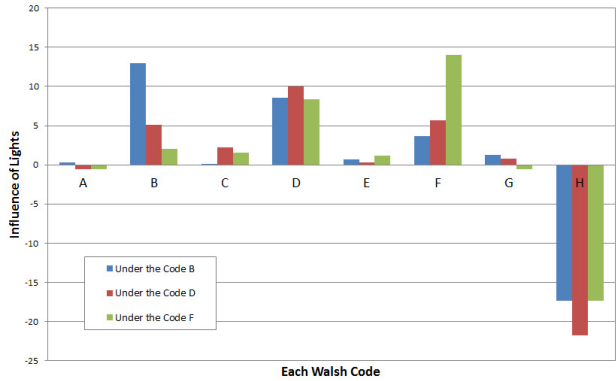


図 7 複数照明の点灯時における影響度

また，各撮影点における照度を測定した．その結果と図 7 を比較できるように並べ直したものをそれぞれ図 8 と図 9 に示す．照度は光源からの距離の 2 乗に反比例するため，距離が遠くなるほど減衰する．同様に影響度も距離が遠くなるほど減衰していることがわかる．

各測定地点における影響度と照度の比率が等しければ，照度を照明からの影響として影響度が正しく反映していると考えられる．測定地点における測定照度と影響度の比率，およびその誤差を表 2 に示す．ほとんどの場所と符号で誤差は 10[%] 以内に収まっており，影響度が照度を反映して

いることを確認した．また，符号 D は比較的大きな誤差が表れており，これは符号 B と符号 F の間に位置しているために他の測定地点に比べて他符号による干渉が大きいと考えられる．今後、照度と影響度の関係性を調べることによって，影響度から照度を推定することが可能である．

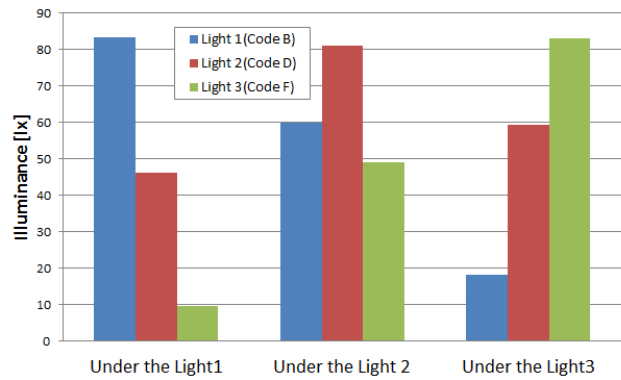


図 8 照度比較

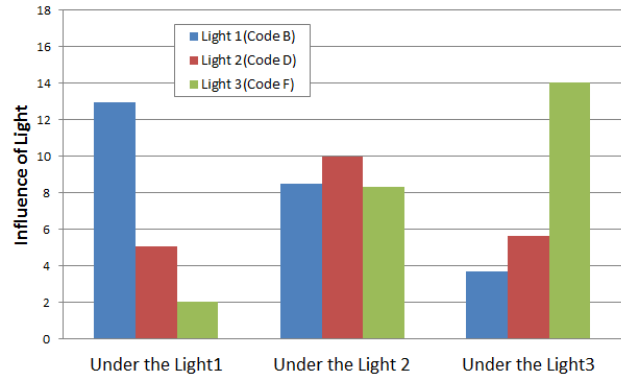


図 9 影響度比較

表 2 場所ごとにおける比率とその誤差			
Code ID	Under the Light 1		
	Illuminance[%]	Influence[%]	Error[%]
B(Light 1)	60	65	5
D(Light 2)	33	25	8
F(Light 3)	7	10	3

Code ID	Under the Light 2		
	Illuminance[%]	Influence[%]	Error[%]
B(Light 1)	31	32	1
D(Light 2)	43	37	6
F(Light 3)	26	31	5

Code ID	Under the Light 3		
	Illuminance[%]	Influence[%]	Error[%]
B(Light 1)	11	16	5
D(Light 2)	37	24	13
F(Light 3)	52	60	8

4. おわりに

本稿では、カラー LED 照明とスマートフォンによる Walsh 符号を用いた影響度推定の手法を検討した。単一照明の検証実験において、Walsh 符号を用いた影響度の取得が可能であることを確認した。また、複数照明の実験からは影響度と距離には相関が認められ、照明直下の影響度だけではなく、距離に応じた影響度の取得が可能であることを確認した。2つの実験結果から、影響度の推定精度は照明自体の明るさには影響を受けず、照明との距離には影響を受けることを確認した。

これにより、各光源の位置の値が既知であれば、撮影した地点の相対的な位置を推定することが可能である。照明の明るさを暗くした場合にも、本手法は利用することが可能であり、照明との距離による明るさと照明自体の明るさを判別することが可能である。

今後は照明との距離を影響度の関係から精度よく算出する方法や本手法を用いた応用方法について検討し、照明のインタラクティブな操作を実現する。

参考文献

- [1] 高井大輔, 栗山繁: “スマートフォンカメラを用いたカラー LED 光源の影響度推定” 電子情報通信学会, 2013.
- [2] 荻山将成, 栗山繁: “照度センサの位置推定を用いた室内照明の自動制御” 研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL), no.1, pp.1-5, 2011.
- [3] 朝山絵美, 三木光範, 廣安知之: “自動分散制御に基づく知的照明システム” 照明学会, 2006.
- [4] 松尾憲一: “スペクトラム拡散技術のすべて” 東京電機大学出版局 (2002).

*1 Philips hue <http://www.meethue.com/>, 2013/01/18