

〈特別研究課題〉 情報を埋め込んだ壁紙を用いた  
室内照明の制御システム

助成研究者 豊橋技術科学大学 栗山 繁



## 情報を埋め込んだ壁紙を用いた 室内照明の制御システム

栗山 繁  
(豊橋技術科学大学)

### Control system of interior lighting using data-embedded wallpaper

Shigeru Kuriyama  
(Toyohashi University of Technology)

#### Abstract:

We report the feasibility study of the system that digitally controls indirect illumination of LED lights with a handy digital camera. The correlation between the features of photographed images and the illuminance reflected by a wall is computed using a multiple regression model for various materials of wallpaper. We have experimentally found that the illuminance at the floor is predictable from the pixel values of digital images in sufficient accuracy, except for the wallpapers whose reflection coefficient is very small. We also extended our visual coding technique based on example-based texture synthesis for inconspicuously embedding the values of regression coefficients on the patterns of wallpaper, and have experimentally confirmed its feasibility.

#### 1. はじめに

近年、発光ダイオード(Light Emitting Diode、以後LED)は、その発光効率の向上と低価格化により省電力化に適した次世代の照明として急速に需要が高まりつつある(1)。LED光源は高速で精密な調光が可能なので、コンピュータを用いたデジタル制御により高度な調光機能が実現できる。筆者の研究室ではLED照明の制御に先進的IT技術を導入するプロジェクトを実施しており、本研究課題ではLED光源を間接照明として使用する場面を想定し壁紙の材質を考慮した調光機能の構築に取り組んだ。さらには、考案したシステムを低コストで普及させるために、ネットワーク通信

に基づくデジタル制御に適したLED光源ユニットを、安価なICを組み合わせて設計し、将来の高機能なLED照明の基盤となるシステムの構築に取り組んだ。

本報告書では、壁のへ反射で生じる間接光による床面照度を撮影画像のみから精度良く推定する技術の検証結果を述べる。撮影画像から照明の色温度を推定する手法(2)は既に提案されているが、本研究では間接光によって生じる床面照度を対象とする点で異なる。具体的には、照明光を投影する壁紙をデジタルカメラで撮影し、その画像の特徴量と壁付近の床面照度との相関を計算により求めて反射特性としてモデル化する。そして、種々の材質の壁紙に対して求めた反射特性から計算した照度の推定精度を、実環境での実験により検証する。

光の反射特性は壁紙の材質によって異なるので、壁紙の模様が目立たないように埋め込んだその値を同じ撮影画像から読み出して参照する機構を開発する。ただし、壁紙の模様情報に埋め込むには、筆者の研究室において開発されたテクスチャ画像に情報コードを埋め込む手法(3)を、壁紙として多用される高い明度かつ低いコントラストの模様に応用するために拡張し、その読み取り精度を実験的に検証する。これらの機構が実現すれば、照度センサ等の計測器を必要とせず、市販のデジタルカメラを介して床面照度を所望の値に調整できる。

本研究課題が目的とするシステムの全体の流れを図1に示す。

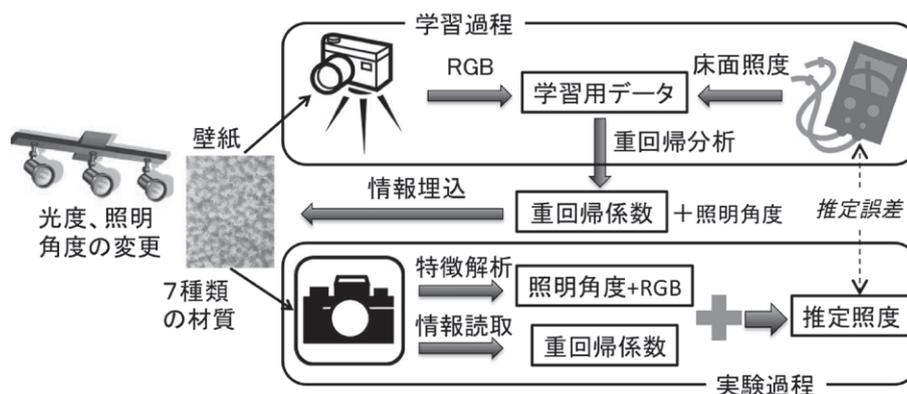


図1. システム全体の流れ

## 2. 間接光の影響による床面照度の撮影画像を用いた推定

本手法では、光源の色・明るさと照射方向を様々に変化させながら壁面をデジタルカメラで撮影し、壁面と光源の照射方向がなす照明角度と床面照度、および画像特徴量をデータ化して壁紙の反射特性を学習させる。そして、任意の光源状態で壁面を撮影した画像と学習した反射特性から床面照度を推定する。

照明光は色温度を用いた調光方式が主流であるが、今回の実験ではLED光源の光度を赤・緑・青色の各256段階でデジタル制御できるLED照明システムを使用した。光源はフルカラーLED (Color Kinetics社製iColorMRg2ワイド型)を用い、そのデジタル制御にはDMX512と呼ばれるプロトコルを用いた。間接光を得るには、図2のように縦1.6m×横1.2mの大きさの仕切り板に色、材質、および柄の異なる7種類の壁紙(表1参照)を貼付け、その上部に取り付けた4個のLED光源からの光を反射させた。

照明角度 $\theta$ は30, 45, 60, および75度の4段階で変化させ、全ての光源に対して同じ点灯色と照明角度を設定した。また、学習のための壁面撮影時には、画像のずれやぼけを抑えるためにデジ

タルカメラ(ニコン社製D3000)を壁面全体が写り込む位置に三脚で固定し、床面照度は壁面の中央部からの距離が0.2m離れた位置を色彩照度計(コニカミノルタ製CL-200)により測定した。次に、赤、緑、青、シアン、マゼンタ、イエロー、および白の7種類の色相で明度を各々5段階に変化させた計35種類の色にLED光源を調光し、壁紙と照明角度の各条件に対して壁面画像と床面照度から反射特性を求めた。これを7種類の壁紙と4段階の照明角度を組み合わせさせた計28通りの条件に対して個別に学習させ、任意の光度に対する床面照度を推定した。

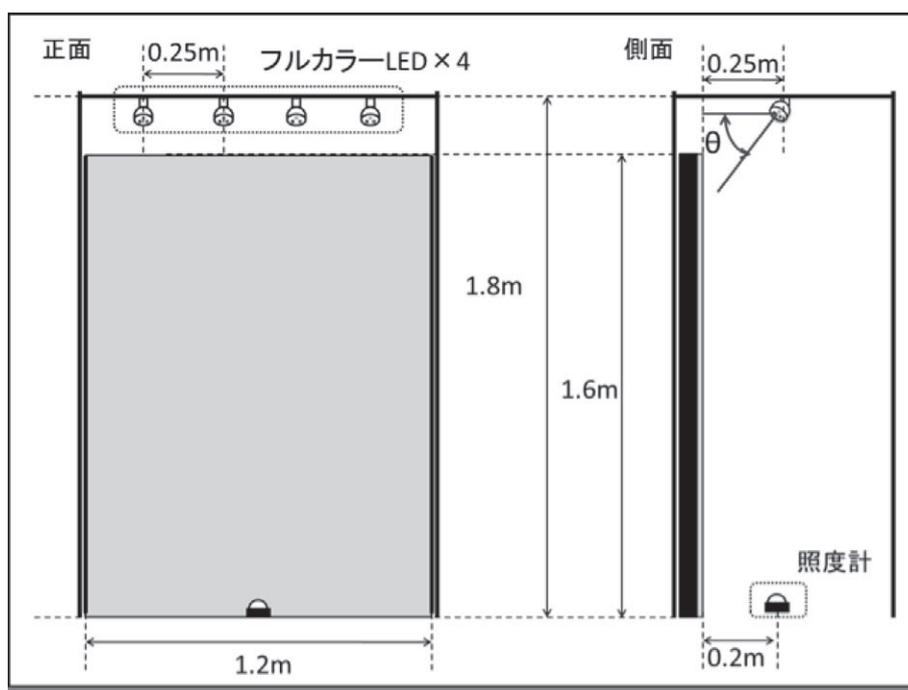


図2. 間接光の照度推定実験環境

## 2.1 重回帰モデルを用いた反射特性の学習と床面照度の推定

学習データを作成する際に、壁面撮影画像から壁面以外の箇所を検出して除去し、壁紙の矩形領域を特定して射影変換を施すことにより、カメラ撮影時に生じる画像の歪みを補正する。この前処理を受けた画像の全画素に対して、赤(R)、緑(G)、青(B)の各色成分の平均値 $\bar{R}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\bar{B}$ を求めて説明変数とし、同時に観測した床面照度の値  $I$  を従属変数として以下の重回帰式を満足する重回帰分析を計算する。

$$I = \alpha \bar{R} + \beta \bar{G} + \gamma \bar{B} \quad (1)$$

この学習により、壁紙と照明角度の各組み合わせ条件に対して照度を推定する重回帰係数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  の値が反射特性として得られる。各壁紙に対して学習されたこの係数の値は壁紙模様埋め込み、撮影画像からその値を読み出すものとする。

照明角度  $\theta$  は撮影した壁面画像から推定する必要があるため、ここでは壁面画像を縦方向に  $K$  個に分割した各ブロック画像に対して R、G、B 値の平均値を求め、NTSC係数を用いて平均輝度  $Y_k = 0.299R_k + 0.587G_k + 0.114B_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$  を得る。次に、各照明角度に対して

得られたこの平均輝度の値を全ブロックでの最大値で除して正規化し、光源の明るさや輝度に依存しない $K$ 次元ベクトル値に変換しておく。計測時の照明角度の推定には、撮影した壁面画像に対して同様に求めた値と各照明角度で事前に学習した値との $K$ 次元ユークリッド距離が最小となる値を求める。

上記の推定により得られた照明角度に対する重回帰係数 $\alpha, \beta, \gamma$ の値を壁紙模様の画像から読み取り、壁面画像の $R, G, B$ 成分の平均値 $R, G, B$ を用いて式(1)で床面照度を推定する(図1参照)。

## 2.2 照度推定の検証実験

今回は、撮影した壁面画像を $550 \times 368$ の約20万画素の解像度にダウンサンプリングした画像データを用いて照度推定の精度を検証した。ただし、学習時にはデジタルカメラを三脚で固定したが、検証実験では実際の使用環境と同等な条件としてデジタルカメラを手を持った状態で撮影した。また、照明角度の推定には、壁面画像の縦方向への分割数を $K=40$ に設定した。

表1に、35種類の点灯色と4種類の照明角度の中から無作為に選択した10通りの組み合わせに対して、各壁紙で得られた床面照度の実測値に対する推定誤差を示す。ただし、照度が高くなるに伴い推定誤差も増大する傾向があるので、誤差の絶対値の実測値に対する割合の平均値を精度の評価指標として用いている。

表1. 各材質の壁紙に対する照度推定の誤差の実測値に対する割合

壁紙							
材質	塩化ビニル織物調	織物刺繍有	和紙麻の漉き込み	珪藻土粒子状	無地	塩化ビニル和調	フロッキー植毛
平均誤差割合 [%]	12.6	5.9	16.3	10.0	8.5	12.3	45.5

オフィスの照明環境における明るさの変動知覚に関する研究(4)では、作業時における最小知覚変動比(明るさの変動を知覚できる照度変動比の閾値)は $0.88 \sim 1.13$ の範囲であり、光度を連続的に変化させた場合は $0.8 \sim 1.3$ の範囲となる事が報告されている。今回の結果では、照度を連続的に変化させる環境では実用的な推定精度が得られていると考えられるが、照度を瞬時に変化させる条件では、壁紙の材質によってはさらに高い精度が要求される。

フロッキー植毛の壁紙は45%以上の誤差となり実用的な推定精度が得られなかった。この壁紙に対する大きな誤差は、壁面画像が全体的に暗すぎるので輝度の区別が困難であり正しい照明角度が得られなかったため、誤対応の反射特性を参照した事が原因と考えられる。しかしながら、光をほとんど反射しない材質の壁紙を間接照明の反射板に用いる事は稀なので、この壁紙に対する問題は無視できるものと考えられる。

### 2.3 未学習の照明条件に対する推定精度の検証

未学習の照明条件において床面照度の推定が可能であるかを検証するために、一部の光源のみを点灯させて学習したデータが全光源を点灯させた際の照度推定に有効であるかを調査した。すなわちこの実験により、光源の配置間隔の変更に対しても頑健に照度を推定する汎化性能が検証できる。

ここでは図3に示すように、配置した4個の光源に対して真ん中の2個のみを点灯させた場合、1個飛ばしの2個を点灯させた場合、および両端の2個のみを点灯させた場合の計3パターンについて、各壁紙に対して無作為に選択した点灯色と照明角度の10通りの組み合わせの学習データを用いて重回帰係数を算出した。表2に、上記の学習結果を用いて全光源を点灯させた状態で照度を推定した結果を示す。

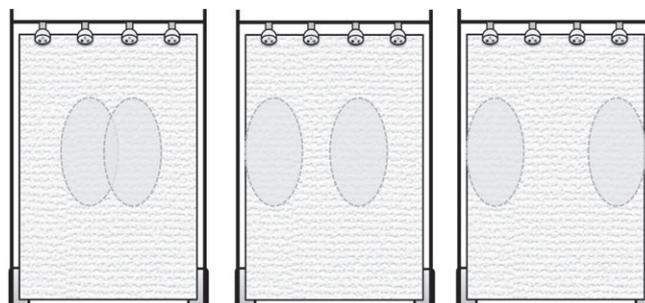


図3. 光源2個のみの点灯実験

表2. 未学習データに対する絶対誤差の割合

点灯させる光源	全光源	真中2個	1個飛ばし	両端
絶対誤差割合[%]	12.6	13.0	18.3	15.7

表2で示される結果より、4個の全光源で推定した結果と2個の光源で推定した結果の誤差割合には大きな差異は認められないので、未学習な照明条件に対しても実用的な精度で床面照度が推定されたと判断される。したがって、本手法の照度推定方法は光源の配置間隔の変更に対しても汎用的に適用できる可能性が示された。

### 3. 反射特性の壁紙模様への埋め込み

照度を推定するための反射特性(重回帰係数)の値は壁紙の材質によって異なるので、壁紙毎にその値を参照する仕組みが必要となる。壁紙を購入する際のマニュアル等から情報を取得する事も考えられるが、本研究では壁紙の模様そのものに情報を埋め込み、撮影した画像から自動的に値を取得する機構の実現性に関して調査した。

#### 3.1 テクスチャ画像への情報埋め込み

情報の埋め込みには、筆者の研究室で開発したテクスチャ画像にコードを埋め込む技術(3)を導入する。ゆえにここでは、テクスチャ模様のように一定のパターンの繰り返して表現される壁紙模様のみを対象とする。

情報を埋め込む手順は図4に示すように、二値化した埋め込み情報にしたがって Local Binary Pattern(5)(以後、LBPと呼ぶ)のドットパターンを描画する。まず、画像を5×5のブロックに

等分割し、各ブロック内で中心に1個と周回に8個のドットを描画する。周回の各ドットは1ビットの情報に対応し、0の情報を示すドットは中央に配置されるドットの色よりも低い輝度の色で塗られ、1の情報を示すドットはその逆関係の色で塗られる。ただし、実際に使用される色は、テクスチャを生成する素材となる見本画像中で出現頻度の高い色が選択される。情報の読み取り時には、カメラ撮影した画像からこの中央と周囲のドット上の色を検出し輝度の大小関係で情報をデコードする。このLBPコードだけではQRコードのように規則的な模様になってしまうが、本手法では見本画像からテクスチャ特徴の類似した画素ブロックを探索し、コード化されたドット画像以外の画素領域をドット模様が目立たなくなるように自動的に塗りつぶす。この結果、学習時に参照する見本画像と類似のテクスチャ模様がLBPコードを内包しながら生成される。

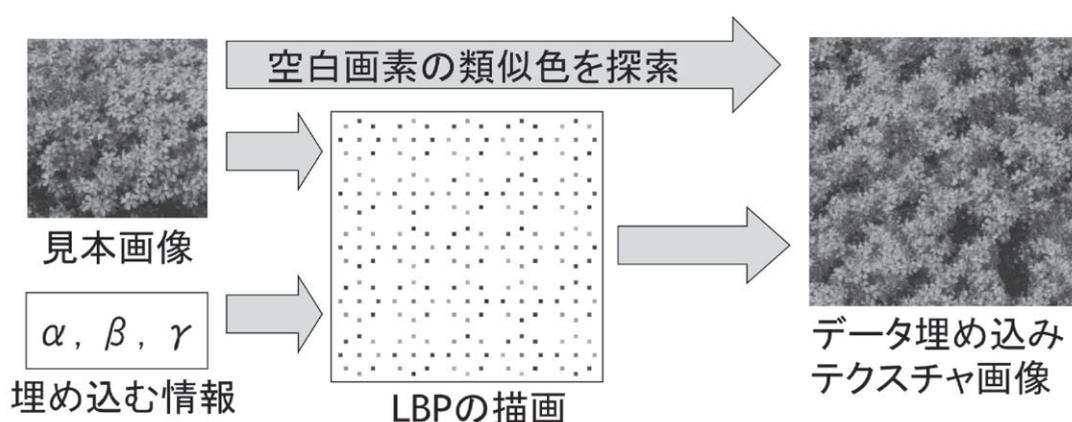


図4. テクスチャ画像を用いた情報埋め込みの概要図

しかしながら、この手法を壁紙の模様に応用する際には、以下の2点を考慮する必要がある。

- 壁紙の模様は、白色に近く明るい色が多用される
- 壁紙の模様は、色のコントラストの低いものが多用される

既存技術では画像に使用される色が薄かったりコントラストが低かったりすると情報の読み取り精度が低下する傾向がある。したがって、上記の性質を有するテクスチャ模様に対しても、情報を頑健に検出できる機構が必要とされる。

### 3.2 生成テクスチャの明度変換

本手法においては、人間の視覚特性を考慮して比較的明るく薄い色のテクスチャ模様に対しても、埋め込んだコードが目立たずにかつ安定に情報を検出できる機構を構築する。

最初に、情報を埋め込むLBPのパターン画像を描画する方法を修正する。図5に示すように、見本画像の画素値のヒストグラムを作成して、この中心値を基準にヒストグラムの幅を圧縮して全体のコントラストを下げる。次に、青色成分に対するヒストグラムを3層へ分離し、上層と下

層の色を各々埋め込む二値情報に割り当てる。ここで、中層の幅を大きく設定すると画像から情報を検出する際の頑健性が增大するが、パターン描画に使用する色の選択肢が減少するので画質が劣化するというトレードオフの関係がある。しかしながら、従来手法で用いた輝度ではなく青色成分の比較によってLBPのパターン画像をデコードする事により、明るく薄い画像に対してもパターン画像を目立たなくする事ができた。

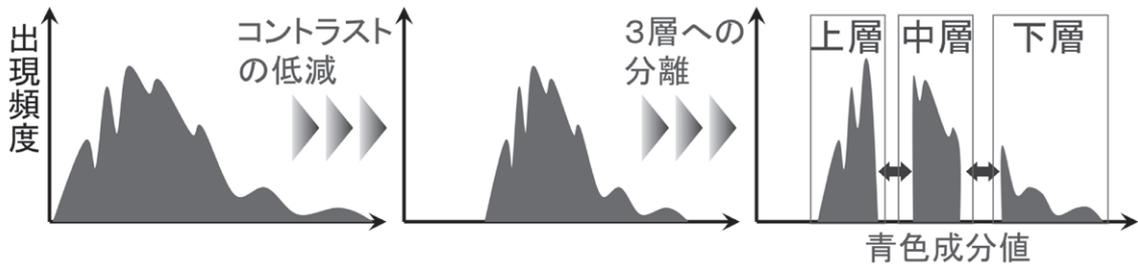


図5. 青色成分の補正とグループ化

このパターン画像に対して既存の手法と同様にテクスチャ画像を生成するが、さらに画像の明度を上げる処理を加える。具体的には、パターン画像の描画時に圧縮した青色成分のヒストグラムが上限値(255)を超えない範囲で明るい方に移動するように、全画素に対してRGBの各成分値を一定の値だけ増加させる。ただし、赤色と緑色の成分は情報の埋め込みには関与していないので、その上限値を超えても良いものとする。図6に、上述した壁紙に対するテクスチャ画像の生成手順を示す。

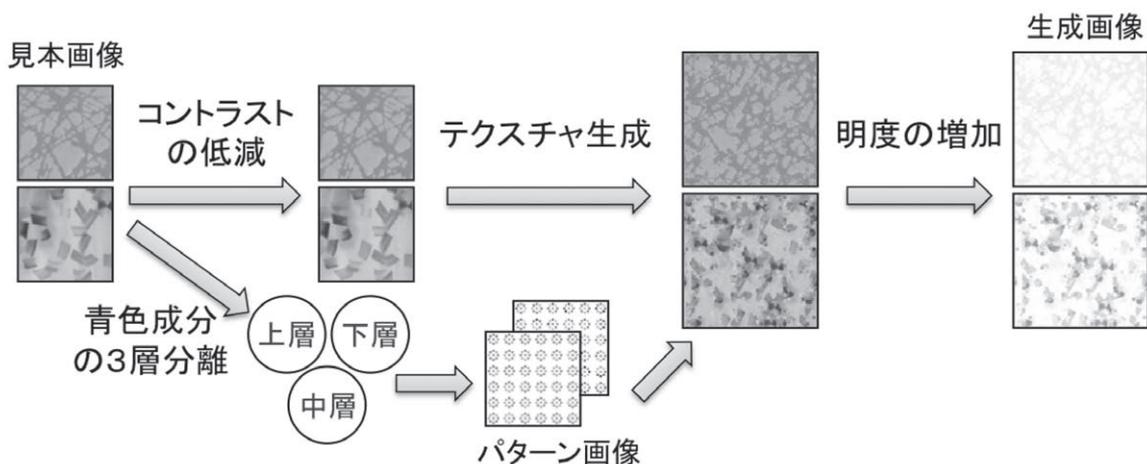


図6. 壁紙のテクスチャ模様の生成手順

### 3.3 読み取り精度の検証実験

図6の上側に示したテクスチャの見本画像に対し、3層に分離された青色成分の中層の幅(以後、青色分別間隔)を4段階で変化させて画像生成した。その結果を印刷出力した紙を撮影して、埋め込んだ情報の読み取り精度を調査した。表3に、テクスチャを生成した画像の明度を全体的に明るく変換させる前後の画像に対する読み取り精度の比較結果を示す。

表3の結果より、青色分別間隔の増大に伴い情報の読み取り精度の向上が確認でき、安定な検出にはこの値を32以上確保する必要があると判断できる。また、生成したテクスチャ画像に対して明度を高める後処理の影響に関しては、青色分別間隔を0に設定した場合を除き明度の増加前後で誤り率に大きな差異は認められなかった。したがって、青色成分のみを情報の検出に用いる本手法では、明度そのものは読み取り精度に大きな影響を与えないと考えられるので、壁紙のような明るい模様にも十分に適用可能である。さらに、テクスチャ画像には25バイトの情報を埋め込めるので、重回帰係数 $\alpha, \beta, \gamma$ の各値を8バイトの倍精度浮動小数点として格納し、さらに照明角度を1バイトの255段階で指定できるので、照度の推定に十分な精度の情報が得られる事になる。ただし、学習した照明角度の数だけテクスチャ画像を複数箇所に埋め込む必要がある。

現実装では、情報を埋め込んだ画像領域の境界を線分として描く必要があるが、領域の四隅となる点を目立たないマークで描き、読み出す機構を開発中である。

表3. 読み取り精度

青色分別間隔	誤りbit率[%]	
	明度補正前	明度補正後
0	11.3	11.1
16	4.55	5.09
32	2.57	2.88
48	0.28	0.34

#### 4. ネットワーク制御型LED照明システムの開発

本研究における間接光制御の実環境での実験は、市販のフルカラーLEDとデジタル制御システムを用いて実施した。しかしながら、このシステムはイルミネーションや舞台照明等の特殊な用途に開発されたものであり、コンピュータ制御や電源供給のためには高価で大掛かりな機材が必要であった。したがって、一般家庭や小規模店舗等での普及も視野に入れ、インターネット向けの通信プロトコルを用いたデジタル制御が可能な、低コストかつコンパクトなLED照明ユニットを図7のように試作した。



図7. 試作したLED照明ユニット

照明システムの全体は、図8に示すように制御用コンピュータとLANで接続された複数の照明モジュールから構成される。各照明モジュールはLANコントローラと複数のLEDユニットにより構成され、UDP通信で受け取るJSON (JavaScript Object Notation) 形式のデータの記述内容に基づいて調光される。

LANコントローラではUDP通信制御、JSON形式データの構文解析、およびその解析結果に基づくLEDユニットへの命令送出手当し、各LEDユニットでは受信した命令に基づいて各光源の光度を調整する。

図9に示すLANコントローラは、LAN通信を実行するEthernetコントローラとMicrochip社のPICマイクロコントローラ、およびその周辺回路により構成される。制御機構の開発には、PICマイコン用のライブラリとTCP/IPスタック等を使用した。

図10に示すLEDユニットは、I2Cバスを利用した通信によって各LANコントローラに対して複数個接続され、受信命令によりLED光源の光度を制御する。LANコントローラからの命令は、アドレス、色、光度、変化時間、変化波形、および待ち時間等の内容を含んでおり、これらを基にLED光源の光量を現状態から次状態へと変化させる。また、各ユニットはLED光源、LEDドライバ、およびPICマイコンにより構成される。

LED光源は電流の大きさにより色合いが変化するという特性があるため、光度の制御には定電流制御が不可欠である。ゆえに、定電流制御が可能で同時に3種類のLED光源を接続できるMAXIM社のICをLEDドライバとして採用した。LED光源には、異なる色の製品が数多く存在し回路基板の変更なしでカスタマイズに対応できるパッケージタイプの市販品を採用した。

本研究では、各LED光源が外部情報を基に自律的に変化するシステムを構築するために、デジタル制御機器内蔵型のLEDユニットを試作した。これには、光源の制御にDMX512のような単なる数値命令の系列ではなくJSONと呼ばれる標準的で高位的な記述形式を導入し、柔軟な調光に特化したコンパクトな操作命令と変数の体系を構築した。さらに、複雑な照明制御を簡易に実装するために、光度の補間は各ユニットが自律分散的に制御するように設計した。

今回は、一般用途の照明を対象として色温度で光度を制御する照明ユニットを試作したが、今後はイルミネーションや農業等の、広汎な分野での利用も考慮したフルカラー照明の実装を予定している。人の視覚感度を考慮した照明の認知的な制御機構の開発も今後の課題である。

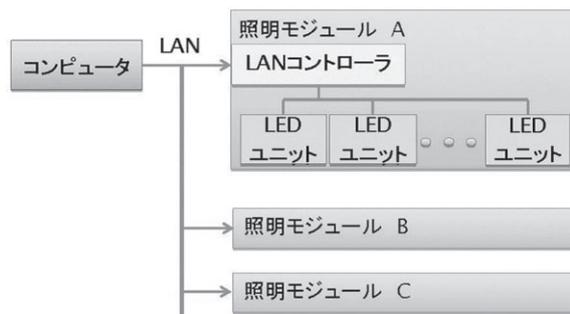


図8. LED照明のシステム構成

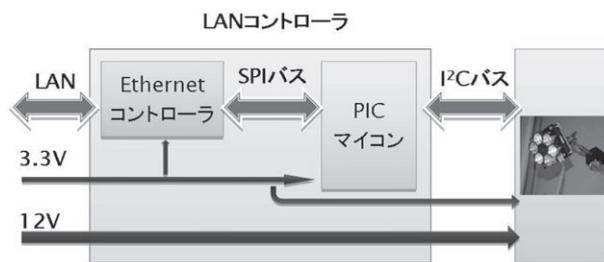


図9. LANコントローラ回路構成

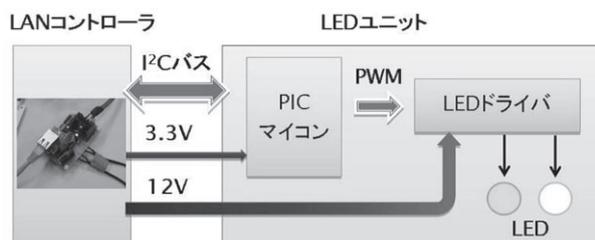


図10. LEDユニット回路構成

## 5. まとめ

本報告では、デジタルカメラで壁面を撮影した画像から床面の照度を推定する手法を提案し、その精度を実環境で調査した結果を述べた。また、デジタル制御が可能なLED照明のユニットやそれらをネットワーク化したシステムの構成等を紹介した。この照明システムを実際に試作し、コンピュータから送信される独自の制御命令に基づく調光機能を実装した。

壁面撮影画像から推定された照明角度と画素値の色成分毎の平均値、および学習で得られた反射特性(重回帰係数)の値を用いて床面照度を推定した結果、間接照明に有効な反射率を有する壁紙に対しては実用上十分な精度が得られた。さらに、一部の光源を消灯させて学習した反射特性のみを用いて照度推定した場合にでも、同程度の精度が得られた。また、テクスチャ画像に情報を埋め込む手法を壁紙のように明るくてコントラストの低い模様に適用的なための拡張方法を考案し、反射特性の値を格納するのに十分な埋め込み容量を確保しながら実用的に十分な読み取り精度を得た。

今後の課題としては、各光源の点灯色や照明角度を個別に調整した場合等の複雑な条件設定に対して広範囲で床面照度を推定できるような手法の拡張が挙げられる。さらに、携帯電話やスマートフォンを照度計の代用とし、通信ネットワークを介してLEDユニットを制御する機構を実装中である。

筆者の研究室では、照度の実測値と光源の制御情報から照度計の位置を推定する技術(6)も既に開発しており、これとカメラ画像からの照度推定技術を統合して、LED照明のより高度な制御技術を開拓していく予定である。

## 参考文献

- (1) 別所誠, 清水恵一, LED照明の動向と展開, 東芝レビュー, 65 (7) (2010)
- (2) 富永昌治, 田中法博, 酒井英昭, 画像からシーン照明の色温度を推定する方法, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU: パターン認識・メディア理解, 100(566), 135-142 (2001)
- (3) Hirofumi Otori and Shigeru Kuriyama, Texture Synthesis for Mobile Data Communications, IEEE Computer Graphics and Applications, 29 (6), 64-71 (2009)
- (4) 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の変動知覚に関する研究, 照明学会誌, 85(5), 346-351 (2001)
- (5) T. Mäenpää and M. Pietikäinen, Texture Analysis with Local Binary Patterns, Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision, 3rd ed., World Scientific, 197-216 (2005)
- (6) 萩山将成, 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, 情報処理学会ユビキタスコンピューティングシステム研究発表会(研究報告 2011-UBI-29) (2011)