

WYSIWYG Light: 実画像を用いた照明の最適制御

栗山 繁^{1,a)}

概要: デジタル制御による調光が可能な LED 照明を導入すれば、屋内の特定箇所だけを照らす局所的な調光機能によって、省エネ性能の高い照明環境が構築できる。変化する部屋の状況に応じた柔軟な調光を取り入れるにはユーザによる直接的な操作手段を提供するのが望ましいが、既存のコントローラでは多数かつ多状態の光源を個別に扱う場合に、最適な状態を得るためには複雑な調整作業が必要となる。本研究では、屋内を撮影した実画像を用い最小限のユーザ操作で多数の LED 光源群を同時制御する手法を提案する。本手法では、各光源を点灯させて撮影した画像群からその光源の明るさ成分と物体表面の拡散反射率成分をベクトル分解により求め、L1 ノルム最小化条件を用いて各光源を省エネルギー性に基づく最適な状態に調光する。

キーワード: デジタル照明制御, 光源と反射率画像, 画像に基づく対話操作, 省エネ最適化

WYSIWYG-type optimal controls of lighting with real images

KURIYAMA SHIGERU^{1,a)}

Abstract: Energy-saving lighting environment can be constructed by locally illuminating a specific location using digitally controllable LED lightings. Smart user interactions should be supplied for flexible dimming depending on the various conditions of a room, but traditional controllers require complicated adjustments to obtain optimal states for many light sources of many dimming levels. This research proposes a method of simultaneously controlling many LEDs using minimal manipulations on photographed images of a real room. This method decomposes the images taken for each lights into the components of illumination and albedo, and introduces L1-norm minimization for optimizing their dimming levels so as to meet an energy-saving criterion.

Keywords: Digital Control of Lighting, Illumination and Reflectance Images, Image-based Interactions, Optimization for Energy Saving

1. はじめに

近年、照明環境の省エネルギー化の重要性の高まりに伴い LED 光源が急速に普及拡大しているが、その高速で精密な調光制御の機能を利用した、屋内での使用環境に応じた省エネ調光制御が注目されている。例えば照明設計の分野では、タスクアンドアンビエント照明と呼ばれる、照明の用途を作業用と環境用とに分けて全体としての消費電力

量を削減する制御方法が提案されている。また、人の存在を感知して必要な場所のみを明るくする調光も大規模なオフィス環境等で導入され始めており、多数個の照度センサを用いて蛍光灯を知的に制御する手法 [1], [2] も提案されている。

従来の研究やシステムでは、与えられたルールに基づく調光の自動化に焦点が当てられてきたが、時間経過に伴う屋内環境の変化や個人的な嗜好を反映するためには、対話的な制御手段を提供するのが望ましい。また、省エネ性能の高い光源として注目されている LED は、設置に必要な面積が少なく柔軟な取り付けが可能な反面、単体当たりの発光量が比較的少ないという問題もあるので、多数個の光

¹ 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan
^{a)} sk@tut.jp

源を規則的に配置した照明設備に適している。しかしながら、多段階の調光が可能な多数個の LED 光源を制御対象とした場合、その多くの自由度を活かしながら最適な調光を達成するためには、多くの煩雑な調節操作が必要となる事が予想される。したがって、一般ユーザを対象とする場合には直観的で簡略な操作のインタフェースを提供する必要がある。

コンピュータグラフィックス (CG) の分野では、生成されるシーン上での光や影の状態の変更を簡単なストローク入力により指定して、仮想的な照明の影響を逆向きに計算して最適化する手法 [3] が提案されている。しかし、リアリティーの高い生成画像を得るには、部屋全体の形状データや天井や壁等の物体の表面反射率等の精密なデータを作成するために多大な熟練作業が必要となる。一方、複数毎の撮影画像から屋内の 3 次元形状と物体の表面反射率を獲得する手法を用いて CG モデルを自動生成する手法も提案されているが、屋内の隅々におよぶ精密なモデルを得るには多くの計画的な撮影が必要とされる。さらには、物体の光学的な特性を通常のカメラで撮影した画像のみから精密に得るのは一般的に困難である。

全光源がもたらす屋内での影響を実物を撮影した画像上で直接制御できれば、個々の光源の明るさをダイヤルで調節する方法よりも簡易な操作インタフェースを提供できる。そこで本研究では、CG で生成されるシミュレーション画像を用いずに、実際の部屋を撮影した画像を用いた調光制御方法を提案する。上述した理由により、撮影画像から屋内の 3 次元モデルを再構築せずに、2 次元画像から直接的に光源の成分と各物体の拡散反射率の成分を分離する手法を導入し、各光源の画像上での明るさの影響を近似的にシミュレーションする。

輝度画像を用いた照明制御の先行研究例として、複数人物の顔の輝度の平均値が目標値となる様に複数の照明を影響度に基づいて制御する手法 [4] が提案されている。この手法は本提案手法と同様に拘束条件付き線形方程式を解いて照明の光量を決定しているが、次章で述べる輝度画像のベクトル分解モデルに基づいていないので照明や物体表面の方向情報を含んでおらず、各照明の状態を簡単なモデルでは表現できない。

2. 輝度画像の分離モデル

2.1 画像のスカラー分解

自然画像を照明光と表面反射率の分布に分解するための代表的な手法であるレティネックス法 [5] は、照明光の分布が空間的に滑らかであるという仮定に基づいてガウス関数の畳み込み演算を用いてその分布を近似する平均輝度を推定し、各画素の輝度を平均輝度で除算して反射率を算出する。また、Weiss らの手法 [6] は自然画像の輝度成分を微分した画像のヒストグラムが疎なラプラシアン分布を有

するという共通の性質を利用し、複数枚の画像から陰影の影響を含まない反射率画像を最尤推定する計算法を提案している。

これらの手法では、撮影画像 $I(p)$ を照明の影響を受けない反射率画像 $R(p)$ と照明がもたらす明るさの画像 $L(p)$ にスカラー分解する。

$$I(p) = R(p) L(p)$$

ただし、 p は各画素のインデックスを表す。一般的に画素の位置は二次元配列のインデックスで表されるが、本稿では画素の並びを一次元配列として再構成した際のインデックス p を用いる点に留意されたい。これらの手法は照明に依存しない反射率画像 $R(p)$ を抽出して画像の見やすさを向上させたり頑健な特徴分析に役立てるが、照明輝度画像 $L(p)$ は除去すべきノイズ成分の様に扱われ、照明の影響を正確に分離抽出するには適していない。また、拡散反射モデルを用いた場合には、各物体の明るさは照明から入射される光の方向と物体表面の向き（法線方向）の成す角で変化するが、画像をスカラー値で分解する手法ではこの方向に基づく輝度の変化を考慮できない。

2.2 画像のベクトル分解

一方、撮影画像を二つのベクトル成分の内積として表現する手法 [7] では、各光源に対して撮影した複数毎の画像から、各画素毎に求められるベクトル化された共通の拡散反射成分 $R(p)$ と各光源毎に求められるベクトル化された光源成分 L に分解する。

$$I(p) = R(p) \cdot L \quad (1)$$

ただし、 \cdot はベクトルの内積を表す。式 (1) において、 $R(p)$ は各画素に投影される物体の表面反射率と法線方向を乗じたベクトル値に相当し、 L は各光源から発せられる光の強度とその方向を乗じたベクトル値に相当する。本手法では、各光源の状態を単一のベクトルで近似表現する、このベクトル分解法を用いる。

N 枚の撮影画像から式 (1) を用いて反射率画像と光源画像を求めるには、まずグレースケール変換した総画素数 P 個の撮影画像から $N \times P$ の非負行列 $G(n, p)$, $n = 1, \dots, N$, $p = 1, \dots, P$ を構築する。ただし、 (n, p) の値は n 番目の画像の p 番目の画素の輝度値である。この行列は、特異値分解を用いて $G = U \Sigma V^T$ の様に表される。ただし、 T は行列の転置を表す。

ここで、行列 Σ の最初の 3×3 成分を取り出した行列を $\tilde{\Sigma}$ とし（すなわち、 G の固有値を大きいものから 3 個並べた 3×3 対角行列に相当する）、行列 \tilde{U}, \tilde{V} を $\tilde{\Sigma}$ に対応する正規直交ベクトル群で構成される $N \times 3$ と $P \times 3$ の行列とすると、 \tilde{U} は N 個の各撮影画像に対する光源ベクトル L の集合、および \tilde{V} は P 個の拡散反射率のベクトル

ル $\mathbf{R}(p)$ の集合に相当する。ただし、実際には $\tilde{\Sigma}$ の値が \tilde{U} と \tilde{V} に対して分解した値が以下の様に乗算され、

$$\tilde{L} = \tilde{U}\tilde{\Sigma}_U, \quad \tilde{R} = \tilde{\Sigma}_V\tilde{V}, \quad \text{where } \tilde{\Sigma} = \tilde{\Sigma}_U\tilde{\Sigma}_V$$

輝度画像の行列が光源成分の行列 \tilde{L} と拡散反射率成分の行列 \tilde{R} に分解される。

高解像度の画像を扱う場合には P の値は膨大になるので、特異値分解 $G = U\Sigma V^T$ を安定には計算できない。ゆえに本手法では、大規模な行列 G を二つの行列積 $G = \hat{L}\hat{R}^T$ に直接分解する Power Factorization [8] を導入する。ここで、 \hat{L}, \hat{R} は各々 $N \times 3$ と $P \times 3$ の光源ベクトルおよび拡散反射率に相当する。この行列分解法は乱数で初期値を設定し、 \hat{L} と \hat{R} の値を最小二乗解法を用いて交互に繰り返して更新計算する手法 [8] であり、各繰り返しでは $O(N \times P)$ のオーダーでの計算が可能である。この効率的な計算法を用いても、膨大な数の P に対しては多くの計算コストとなるので、画像をダウンサンプリングした $P_s (\ll P)$ 個の画素に対して構築した $N \times P_s$ の行列 G_s を分解して光源ベクトル行列 \hat{L} を算出し、得られた結果を元の画像に適用して $\hat{R} = G/\hat{L}$ により拡散反射率行列を再計算する。ただし、行列 \hat{L} と \hat{R} の分解にはスケール倍の任意性が存在するので、本手法では \hat{L} を求める際にダウンサンプリングで求めた拡散反射率ベクトル $\mathbf{R}(p)$ の平均長が一定値になるように、行列 \hat{R} をスケール変換した。

Yuille らの手法 [7] では、グレースケール画像に対するベクトル分解が紹介されているが、RGB の各成分に対しても同様の分解を適用できる。本手法では、画像の表示にはモノクロよりもカラーの方が直観性に優れるので、RGB の各成分に対してベクトル分解を適用する。ただし、光源を RGB 成分毎に扱うと色合いの誤差が目立ってしまう事が実験により判明したので、今回は白色光源のみを対象とし、光源ベクトル成分の行列 \hat{L} を計算する際にはグレースケール変換した画像を用い、その結果からカラー画像の RGB 各成分 $G_c, c \in \{r, g, b\}$ に対して拡散反射率成分の行列 \hat{R}_c を算出した。

Matlab を用いた実装で計算時間を測定した結果、MacBook Pro (Intel Core i7 2.66 GHz) の計算環境で解像度が 536×356 画素の画像 10 枚に対し、約 1 秒で上記の行列のベクトル分解が計算された。

2.3 環境光成分の推定

各光源に対して撮影された画像は Power Factorization で分解された $G = \hat{L}\hat{R}$ で近似されるが、その誤差は大きいものから 4 個目以降の固有値に対する残差成分に相当する。Yuille らの手法 [7] ではこの残差の平均値を、各画素に対する環境光の成分として取り込んでいる。したがって本手法においても、以下の式のように各画素での残差成分 $E_c = G_c - \hat{L}\hat{R}_c$ を、拡散反射率成分とは独立した環境光の

成分として以下の式で画素値 $I_c(n, p)$ の計算に取り込む。

$$I_c(n, p) = \mathbf{L}_n \cdot \mathbf{R}_c(p) + A_c(p), \quad (2)$$

$$A_c(p) = \sum_{i=1}^N E_c(i, p)/N, \quad c \in \{r, g, b\}$$

ただし、 $I_c(n, p), E_c(i, p)$ は n 番目の光源に対する p 番目の画素の色成分 c の画素値とその残差成分、 \mathbf{L}_n は行列 \hat{L} の n 行目のベクトル要素、および $\mathbf{R}_c(p)$ は色成分 c に対して計算された行列 \hat{R} の p 行目のベクトル要素を表す。また、 N は各光源に対して撮影された画像の枚数である。ただし、本稿での実験で用いた画像例では、この環境光成分 $A_c(p)$ の値は 255 階調の RGB 各成分に対して平均値が 1.0、最大値でも 7.0 以下となり、その影響が無視できる程度の小さな値であった。

3. 照明の省エネ最適制御システム

3.1 画像に基づく対話インタフェース

本手法では屋内の明るさを指定する方法として実画像を用いる。先行研究 [9] では、Weiss の方法 [6] を用いて取得した反射率画像に対して光源画像の成分をガウシアン分布関数を用いて設定する操作方法を考案した。しかし、この方法で指定される明るさの分布は物理的には実現不可能となる場合が多く発生し、所望の明るさを指定する領域も対話的に指定する必要があった。

ここではタスクアンドアンビエント照明の様に薄暗い照明環境の中で明るくしたい場所を直接指定するのが自然な操作方法であると考え、その場所を実画像上で指定した値に基づいて最適に調光制御する方法を検討する。ゆえに、指定された場所の中心付近を最も明るくするような光源を想定し、その状態を実際の光源の最適制御に用いる。

図 2 に、図 1 の様に構成された実験室で撮影された実画像上での調光操作例を示す。ただし、この実験室は遮光カーテンで外光を遮断しており、デジタル一眼レフカメラ (Nikon D90) を用いて各光源を最高輝度にした状態で撮影した 10 枚の画像を用いて、前章で述べた光源成分と拡散反射率成分の行列を計算した。また、本研究では LAN 接続された PC で 255 段階の光量調整が可能なデジタル制御型 LED 照明を自作して実験に用いた。

明るさを指定する画面には陰影成分の影響を受けない画像を用いるために Weiss の手法 [6] で抽出した反射率画像を表示し、ユーザがその画像上で最も明るくしたい箇所を指定する。そして、その箇所の画素に対する反射率ベクトル $\mathbf{R}(p)$ と同じ方向を有するベクトルの値 \mathbf{T} を目標光源として、式 (3) の光源ベクトル \mathbf{L}_n と置き換えて全画素に対する輝度を計算する。また、雑音等による反射率ベクトルの変動の影響を緩和するために、目標光源の値は明るさを指定した画素を中心とする矩形領域の範囲での平均値を用いた。

反射率ベクトルの値は RGB の各色成分で算出されているが、今回はその平均値のベクトル長が最大となる成分を選択し、指定箇所での明るさ強度に比例する目標光源のベクトル長 B の初期値は撮影画像から抽出された光源ベクトル群の平均長に設定し、目標光源の値 \mathbf{T} を以下の式で設定する。

$$\mathbf{T} = B \bar{\mathbf{R}} / |\bar{\mathbf{R}}|, \quad \bar{\mathbf{R}} = \max_{c \in \{r, g, b\}} \sum_{p \in S} \mathbf{R}_c(p) / N(S)$$

ただし、記号 S は画素位置 p を中心とする矩形領域に含まれる画素の集合であり、 $N(S)$ はその領域に含まれる画素の個数を表す。今回の実験では、集合 S の大きさは 20×20 画素の正方領域とした。また、ベクトル長 B の値は、簡易な操作によって対話的に調整できるものとした。

画像全体の計算量は画素数のみに比例するので、市販のタブレット PC やスマートフォン等を用いても実時間で対話操作が可能である。図 3 に、図 2 で指定された箇所に対する目標光源で生成された画像を示す。

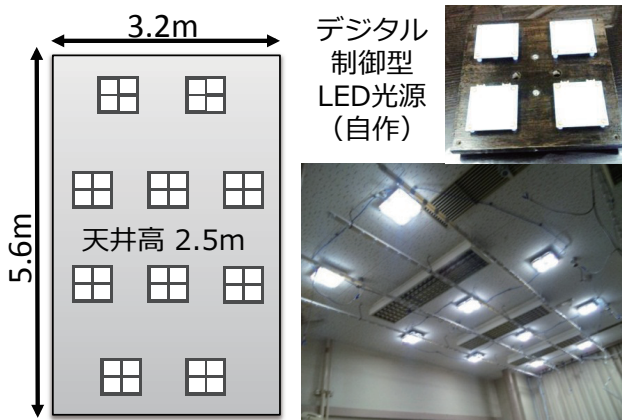


図 1 デジタル調光式 LED 照明を用いた実験部屋

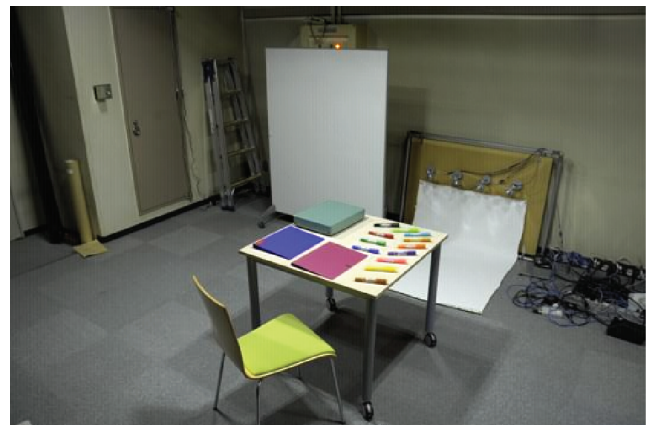
Fig. 1 Experimental room using digitally-controllable LEDs.



(a) 図 2 の指定箇所 1 に対する画像



(b) 図 2 の指定箇所 2 に対する画像



(c) 図 2 の指定箇所 3 に対する画像

図 3 目標光源ベクトルを用いて生成されたカラー画像

Fig. 3 Color images generated from target light vector.

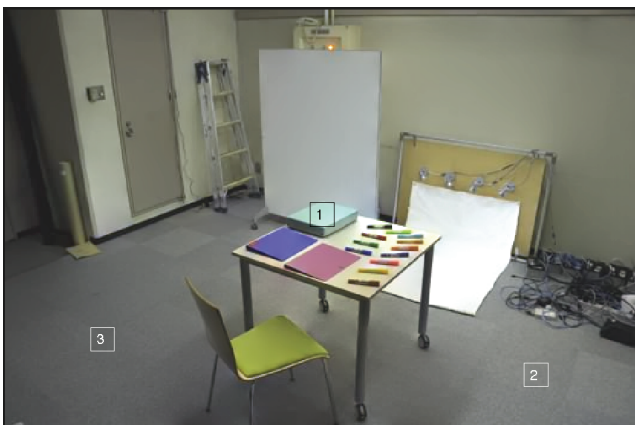


図 2 明るくする箇所の実画像上での指定例

Fig. 2 Direct manipulations of brighter region on an image.

3.2 実光源の最適化

次に、この目標光源 \mathbf{T} の値を、撮影画像から得られた各光源のベクトル値 \mathbf{L}_n の線形和で近似する。

$$\mathbf{T} \approx \sum_{n=1}^N w_n \mathbf{L}_n$$

ただし、各光源ベクトルに対する重み値 w_n は実際の光源の輝度に相当し、これらは光源を最大量に調光した際に観測された値なので、物理的な拘束条件として $0 \leq w_n \leq 1$

を設定する．各光源での消費電力はその輝度に比例する [1] と考えると，光源全体のエネルギー消費は $\sum_{n=1}^N w_n$ で与えられる．したがって，所望の光源ベクトルを最小二乗近似しながら消費電力を最小化する重みの最適値は，以下の L1- ノルム最小解 \hat{w}_n

$$\hat{w}_n = \operatorname{argmin}_{w_n} \left\| \mathbf{T} - \sum_{n=1}^N w_n \mathbf{L}_n \right\|_2 + \kappa \sum_{i=n}^N \|w_n\|_1, \quad 0 \leq w_n \leq 1 \quad (3)$$

として与えられる．ただし， $\|\cdot\|_N$ は L_N - ノルムを表す．また，定数 κ は消費電力最小化の影響度を調節する重み値である．上記の最適化は疎な解を求めることに相当し，最小個数の光源で所望の明るさが実現できる．本手法では式 (3) を変形し，2 次計画問題に置き換えて数値的に最適解を求めている．

4. 省エネ最適化の実行結果

目標光源を用いて計算した画像 $I(p)$ は

$$I_c(p) = \mathbf{T} \cdot \mathbf{R}_c(p) + A_c(p), \quad c \in \{r, g, b\}$$

で計算され，前章で述べた目標光源に対する省エネ最適化の式 (3) で計算した各光源に対する非零の重み値で計算した輝度画像 $\hat{I}(p)$ は

$$\hat{I}_c(p) = \sum_{n=1}^N w_n \mathbf{L}_n \cdot \mathbf{R}_c(p) + A_c(p), \quad c \in \{r, g, b\}$$

で計算される．

図 4 に，図 3 の各目標光源に対して算出した省エネ最適化後の画像 $\hat{I}(p)$ を，L1 ノルム制約条件に対する重みの値を $\kappa = 0.1, 1.0, 5.0$ と変化させて生成した結果を示す．

カラー画像 $I(p)$ と $\hat{I}(p)$ の間の誤差を表 1 に示す．ただし，「重み」は最適化の際に用いた L1 ノルム制約条件に対する影響の重み値 κ であり，各 255 階調の RGB 値で構成される 3 次元ベクトル長の差分値の，全画素に対する最大と平均の値で誤差を評価した．また，「電力消費」は，最適化の結果に求められた L1 ノルム値 $\sum_{i=n}^N \|w_n\|_1$ を表し，「点灯数」は非零の重み値 $w_n > 0.0$ を有する，実際に点灯される光源の個数である．ただしこれらの値は，図 2 の指定箇所 1~3 に対して計算された値を列挙した．

この結果により，L1 ノルム値の最小化の影響を強めると点灯すべき光源の個数が少なくなり，L1 ノルム値で近似される消費電力も削減できるが，そのトレードオフとしての最大誤差の増大も確認できる．

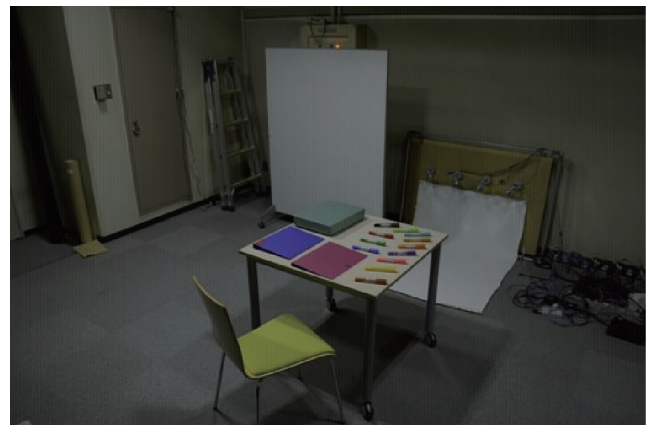
上記の実験では，目標光源の長さは光源ベクトルの平均値をデフォルト値として用いたが，この長さを増減させることによって，指定箇所での明るさを増減できる．表 2 に，L1 ノルムの影響重み値を $\kappa = 1.0$ に固定し，目標光源の長さ B を変化させて計算された，表 1 と同様の誤差評価



(a) 図 2 の指定箇所 1 に対する重み $\kappa = 0.1$ での生成画像



(b) 図 2 の指定箇所 2 に対する重み $\kappa = 1.0$ での生成画像



(c) 図 2 の指定箇所 3 に対する重み $\kappa = 5.0$ での生成画像

図 4 省エネ最適化後の生成画像

Fig. 4 Images generated after energy-saving optimization.

表 1 図 2 の指定箇所での最適化後の誤差

Table 1 Error in brightness after optimization.

重み	最大誤差	平均誤差	電力消費	点灯数
0.1	1.4, 1.7, 15.0	0.0, 0.1, 2.6	1.5, 1.5, 1.4	3, 3, 2
1.0	3.6, 10.4, 13.1	0.0, 0.4, 0.3	1.4, 1.3, 1.3	3, 2, 2
5.0	14.7, 24.3, 20.8	0.0, 0.1, 0.0	0.9, 0.8, 0.7	2, 1, 2

と消費電力性能を示す．ただし，「比率」は目標光源に設定した長さのデフォルト値に対する比率であり，誤差の値は

表 1 の結果と同様に算出した。

この結果より、明るさを増加させた方が、指定箇所によって輝度誤差の値が増大している。この原因としては、画像の輝度値が上限値をこえた「白飛び」の影響等が考えられる。また、各光源に対する重み値に物理的な限界値を考慮した上限を設けているので、同じ指定箇所においても明るさが大きくなるにつれて、光源の個数が増加している点に注意されたい。

表 2 図 2 の指定箇所での明るさの増減による最適化後誤差
 Table 2 Optimization error for various targeting brightness.

比率	最大誤差	平均誤差	電力消費	点灯数
0.5	3.6, 6.9, 6.4	0.0, 0.1, 0.0	0.6, 0.6, 0.6	3, 2, 2
1.5	3.6, 8.7, 20.2	0.0, 0.3, 0.8	2.1, 2.1, 2.0	3, 4, 2

5. まとめ

本稿では、デジタル調光が可能な多数個の LED 光源を設置した屋内環境において、特定の場所を局所的に照らす光源の輝度を省エネの観点から最適化する手法を提案した。実環境を撮影した画像上で照度を調整する場所を指定することにより、特別なデータを必要としない直観的な操作環境を実現した。また、調光の影響を同じ実画像上で確認できるので、カメラ映像を用いずに照明を遠隔制御する際にも有効な手法である。さらに、電力を最適化する調光制御は L1-ノルムの最小化によって導出されるので、粗な解が自動的に得られる。したがって、この最適化では必要とされる最小数の光源のみを点灯させることになるので、本手法は所望の明るさ分布を実現するために必要な光源の最適な配置を求める設計支援にも応用できる。

目標光源を用いて生成された画像と、省エネ最適化された光源の重み値を用いて生成された画像との誤差を比較した結果、255 階調の画素値に対して平均誤差は概ね 1 以下、最大誤差でも 1 割 (25) 以下という高い精度が得られた。しかしながら、実光源を制御して撮影した画像との誤差を評価する必要がある。光源の制御値と光度、および照度とイメージセンサの応答が理想的な線形関係となっていなければ、画像上の計算で得られた値と実環境を制御して実際に撮影した画像の間には誤差が生じてしまう。ゆえに今後は、光源やカメラの応答曲線の非線形性を考慮した最適化を導入する必要がある。

今回の実験では遮光カーテンで外光を遮断した暗室を用いたが、太陽光線が差し込む環境での光源の最適化も検討する必要がある。この場合、太陽光線も光源の一種と見なして光源ベクトルを算出して最適化の計算に組み込めるが、個々の光源と比較して光度が大きいためカメラ撮影する際に画素の輝度が上限を超過する白飛びが生じ、照明光成分の推定精度が著しく悪化する可能性がある。この対応

策として、複数の露光条件を用いて撮影した画像から生成される高ダイナミックレンジ画像を用いて、光源成分と反射率成分を計算することが考えられる。

画像上での明るさの変化によって、実環境での明るさの分布をある程度は推測できるが、画像上の輝度と人間が実際に感じる明るさの関係は撮影時のカメラのシャッタースピードや屋内環境の諸条件にも影響されるため、照度センサーで計測した値等を用いる事によって、より人間の視覚感度に近い情報を実画像上に重畳する手法の検討が必要である。また、人間が感じる明るさは照度の値だけでなく、壁や天井、および物体からの配置関係にも影響する事が示唆されている [10] ので、それらを考慮した明るさの呈示方法を検討する必要がある。

本提案手法は、色温度や RGB 3 原色を個別調光できるカラー LED を対象とすることも原理的には可能である。しかしながら、光源の成分ベクトルを得るために撮影すべき画像の枚数は単純な拡張では 3 倍に増大するので、カラーの光源成分と反射率成分の分離画像を一定の精度で効率的に獲得する手法が必要となる。また、場所毎に色を変化させたり明るさや色合いを動的に変化させたりする場合には、操作の簡略さを保持しながら調光制御の自由度を高められる対話インタフェースを考案する必要がある。

参考文献

- [1] 今里和弘, 三木光範, 廣安知之, 池田聡: 知的照明システムの提案および制御方式の有効性の検証, 日本機械学会 第 14 回設計工学・システム部門講演集, No.04-38, pp.55-58 (2004).
- [2] 朝山絵美, 三木光範, 廣安知之, 米澤基: 自律分散制御に基づく知的照明システム, 第 39 回照明学会全国大会 (2006).
- [3] Pellacini, F.: envyLight: An Interface for Editing Natural Illumination, SIGGRAPH 2010 in ACM Transactions on Graphics, Vol.29 (2010).
- [4] 新宮淳, 亀田能成, 角所考, 美濃導彦: 複数人物の撮影における照明光量の動的制御, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J87-D-II, No.3, pp.829-839 (2004).
- [5] Rahman, Z.: Properties of a Center/Surround Retinex: Part 1. Signal Processing Design, NASA Contractor Report 198194 (1995).
- [6] Weiss, Y.: Deriving intrinsic images sequences, Proc.9th IEEE International Conference on Computer Vision (2001).
- [7] Yuille, A.L., Snow, D., Epstein, R., and Belhumeur, P.N.: Determining Generative Models of Objects Under Varying Illumination: Shape and Albedo from Multiple Images Using SVD and Integrability, International Journal of Computer Vision, Vol.35, No.3, pp.203-222 (1999).
- [8] Golub G. and Van Loan C.: Matrix Computations, John Hopkins University Press (1983).
- [9] 酒井郁夫, 栗山繁: 陰影画像に基づく光源配置の最適化, 電子情報通信学会 2012 総合大会, D-12-88 (2012).
- [10] 中村 芳樹, 江川 光徳: コントラスト・プロファイルを用いた明るさ知覚の予測 - 輝度の対比を考慮した明るさ知覚に関する研究 (その 2) -, 照明学会誌, Vol. 89, No. 5, pp.230-235 (2005).