

## 照度センサの位置推定を用いた室内照明の自動制御

荻山 将成<sup>†1</sup> 栗山 繁<sup>†1</sup>

LED 光源は高速な調光制御と指向性により、室内の照度を局所的に調整して効率的な照明環境を構築できるが、複数個の光源を簡略かつ直観的な操作で同時に調光できるシステムが必要となる。本研究では、デジタル制御が可能な LED 光源群と照度センサを用いて、任意地点での照度を直接設定できる機構を構築する。本稿では、仮想的な照明環境でのシミュレーションを用いて照度センサの観測結果のみからその位置を推定する技術を提案し、実環境における推定精度を実験的に検証する。

### Adaptive controls of room illumination by estimating the position of an illuminance sensor

MASANARI OGIYAMA<sup>†1</sup> and SHIGERU KURIYAMA<sup>†1</sup>

The fast controllability and directivity of LED lights can create efficient lighting environment, which requires local and simultaneous dimming control of light sources in a simple and intuitive way. We develop a digital control system of LED lights with an illuminance sensor for directly specifying the illuminance at arbitrary positions. This article reports the technique of estimating the position of the illuminance sensor from its observations alone by using a simulation in a virtual room, and experimentally evaluates the estimation accuracy in a real room.

#### 1. はじめに

白熱電球や蛍光灯等の従来の照明用光源は調光速度が遅く、ちらつきが人に不快感を与え<sup>1)</sup>ので、人感知センサを用いた点灯/消灯程度の簡単な制御しか考慮されてこなかった<sup>2)</sup>。

近年、LED 光源はその発光効率の向上と低価格化に伴い、室内の主照明としても用いられ始めており<sup>3)</sup>、その高速な調光制御により人に不快感を与えない高度な制御が可能となる。本研究では、この LED 光源をコンピュータで自動制御し、室内の任意地点での明るさを照度センサのみを用いて指定できる機構を開発する。具体的には、LED 照明を部分的に点灯させることで照度センサの位置を推定し、その位置を目的の照度とするように各光源の光度を調整する。この機能により、照度センサを文房具等の持ち運び可能な備品や道具に組み込むだけで、人の位置を感知するセンサを一切用いずに人に対して局所的な明るさをもたらす効率的な照明システムが構築できるものと考えられる。

本研究では、照度センサの位置推定と照明状態の最適化処理を同時に計算するモデルを構築し、照度センサの実測値からその観測位置を自動推定する。また、照明を制御する際のポリシーを設計する際に人の視界を得ながらちらつきを抑えるために、その居場所(すなわち、照度センサの位置)において以下の二つの要件、

1. 照度の値を一定以上に保つ
2. 照度を緩やかに変化させる

を考慮する。さらに、市販の照度センサを用いるために低速な応答時間でも実行可能なシステムを検討する。

提案した手法によって、仮想照明環境を用いたシミュレーションでは最短 4 回、実環境では 16 回の光源光度の更新回数で位置を推定することができた。

以下、2 章では照明を制御するモデルについて、3 章では実環境で実装するための処理について、4 章ではシミュレーションにより最適化された制御パラメータを用いた実環境での性能評価を述べる。最後に、5 章で全体のまとめを述べる。

#### 2. 照明の制御モデル

本章では、照明制御の概要を説明し、その具体的な解法と制御パラメータについて述べる。

##### 2.1 照明状態変化量の最適化モデル

照明の状態は、ベクトル量  $L=(L_1, L_2, \dots, L_n)$  で表し、その変化量を  $\delta L$  とする。ただし、 $L_n$  は  $n$  番目の光源の強さ(すなわち光度)を表し、 $0 \leq L_n \leq 255$  の範囲の整数値とする。また、ここでは変化量を負の値、すなわち全光源を最も明るい状態( $L_n = 255$ )にしてから徐々に暗くする制御に限定する。最適な照明の変化量  $\delta \tilde{L}$  は以下の式(1)で与えられる。

<sup>†1</sup> 豊橋技術科学大学  
Toyohashi University of Technology

$$\delta\tilde{L} = \operatorname{argmin}_{\delta L \in S_L} \left\{ \int_{p \in S} -\nabla I(p, L + \delta L) P_b(p|L, I) ds + w \nabla E(\delta L) \right\} \quad (1)$$

ここで、 $p$  は照度センサの推定位置であり室内の位置を離散化した有限個の地点 (以後、センサ位置標本点) から選択されるものとする。このセンサ位置標本点の集合が  $S$ 、照明の変化量  $\delta L$  の集合が  $S_L$  である。確率  $P_b$  は照明状態が  $L$ 、観測照度が  $I$  であるときにセンサ位置が  $p$  となる確率であり、この値を照明変化  $\delta L$  に対する  $p$  地点での照度変化量  $\nabla I$  の重みとして与えることにより、センサ位置らしき場所の照度の減少を抑制する。また、 $\nabla E$  は照明変化に対する電力の変化量であり、 $w$  はこの値に対する重みである。

式 (1) で求めた状態の変化量  $\delta\tilde{L}$  を用いて現状態を更新することにより、照度観測地点付近を明るく保ちつつその地点の照度に影響を与えない光源を暗くすることができる。

## 2.2 状態変化量の最適化計算の解法

式 (1) で与えられる光度の更新式はそのままの形式では多くの計算量を要するので、その積分式を離散値の和で近似計算し、最小化の問題を以下の最大化の問題に解釈を置き換える。

$$\delta\tilde{L} = \operatorname{argmax}_{\delta L \in S_L} \left\{ \sum_{p \in S} -\nabla I(p, L + \delta L) (1 - P_b(p|L, I)) \right\} \quad (2)$$

上式では、照度センサが存在する確率が低い地点に影響をおよぼす光源の光度を最大に減少させる変化量  $\delta\tilde{L}$  が選択される。ただし、1章で述べた照度の値を一定以上に保つ要件によりセンサが感知する照度が初期観測照度  $I_0$  の定数 ( $0 \leq \kappa \leq 1$ ) 倍以上となる拘束条件  $I \geq \kappa I_0$  を設ける。この条件を確かめるためには観測  $I$  が必要になるが、ここではセンサが位置する確率が最も高い地点  $\hat{p}$  を用いて

$$I(\hat{p}, L + \delta L) \geq \kappa I_0 \quad (3)$$

を満たす最適な変化量  $\delta L$  を式 (2) で計算する。照明の変化は、光度を減少させる光源の選択パターンとその減少量で定義する (詳細は次節で述べる)。

センサ位置の確率場  $P_b$  は、各標本点  $p$  においてシミュレーションで求められる照度  $I_p$  と実際に観測される照度  $I$  の誤差に基づく正規分布関数を用い、全センサ位置標本点の推定確率の和が 1 になるように正規化した以下の式で定義される。

$$P_b(p|L, I) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left( \frac{(I-I_p)^2}{\sigma^2} \right)}{\sum_{p \in S} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left( \frac{(I-I_p)^2}{\sigma^2} \right) \right\}} \quad (4)$$

ただし、分散  $\sigma$  は  $\sqrt{I}$  とした。また、さらに推定精度を高めるために、実際には現在の観測から作成された確率場と過去の確率場を以下のように掛け合わせ、過去  $T$  回更新分の履歴を参照する。

$$P_b(p|L_T, I_T) = \frac{\prod_{t=1,2,\dots,T} P_b(p|L_t, I_t)}{\sum_{p \in S} \left\{ \prod_{t=1,2,\dots,T} P_b(p|L_t, I_t) \right\}} \quad (5)$$

## 2.3 制御パラメータ

照度センサの位置を推定する際に、光度を減少させる光源の選択パターンとその減少量、およびセンサ位置標本点の数が推定精度に影響を与える。ゆえにここでは、その最適な値を検討する。

本手法では、局所的な制御として隣接する 1~4 個の光源の状態を同じ減少量に従って変化させるが、その選択パターンは図 1 に示す 4 種類を考える。

一方、減少量  $\delta L_n$  は対象となった光源の現在の光度 ( $0 \leq L_n \leq 255$ ) を用いて次のように設定する (凹減灯タイプと凸減灯タイプは図 2 で示すの光度変化を参照されたい)。

- 消灯タイプ (off) :  $\delta L_n = -L_n$
- 凹減灯タイプ (concave) :  $\delta L_n = -3(L_n + 1)/4$
- 凸減灯タイプ (convex) :  $\delta L_n = -3(256 - L_n)$
- 線形減灯タイプ (linear) :  $\delta L_n = -32$

上記の消灯タイプは選択された光源を消すのでちらつきが大きく、心理的な影響は好ましく無いと考えられるが、計算効率の点からは有利なので、センサ位置の探索回数が少なくなることが予想される。他の減灯タイプは、計算効率をある程度犠牲にしながら、心理的な悪影響を抑える方式として設定した。

## 3. 実環境への適応化処理

実際の部屋で実物の照明を観測/制御しながら前章で述べた制御モデルの最適解を得るには、仮想部屋モデルを用いたシミュレーションで、反射光の影響を考慮する必要がある。ゆ

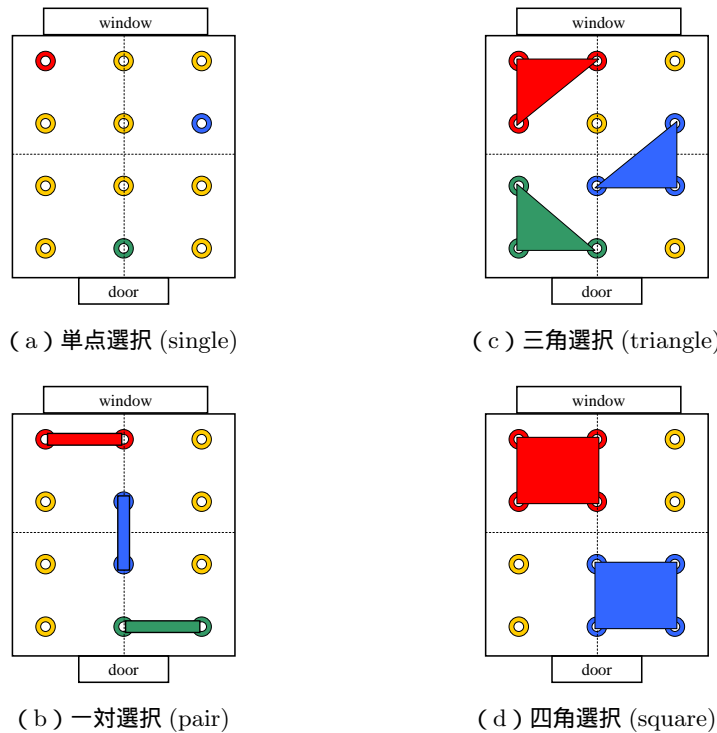


図1 更新する光源の選択パターン  
Fig. 1 Selection patterns of light sources for updates

えに、実環境で何点か照度を測定し、反射光を考慮した実環境での照度計算の補正を行う(詳細は付録を参照)。

以上の処理以外にも、最適化計算が収束した後の調整処理や探索失敗時の復帰処理などが必要となる。収束後の調整処理は、光源状態の最適化が達成されていない場合に必要の後処理である。具体的には、センサ位置の明るさにほとんど影響を与えない光源が消灯されずに残っているのを検知して消灯させる処理を追加する。これには、推定位置付近の光源を点灯させた後に光度を微小に変化させて、観測照度の値がほとんど変化しない光源を消灯させる。また、探索終了後に再観測した照度が、想定した値より暗いと判断された際には復帰処理を実行する。そのため、探索失敗1回につき1観測分の時間遅れが生じることになる。

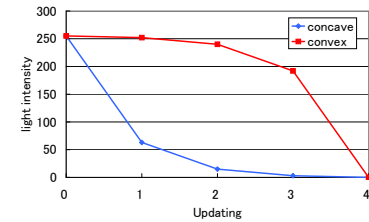


図2 凹減灯と凸減灯タイプの実際の光度変化  
Fig. 2 Light intensity reduction of concave and convex type

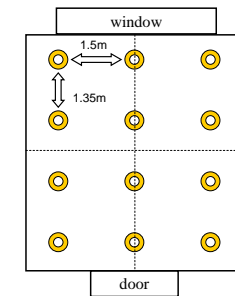


図3 実験に用いた照明環境  
Fig. 3 Experimental lighting room

#### 4. 検証実験

本章では、本システムの性能を検証する。まず、壁からの反射光や雑音成分を考慮しない状態でのシミュレーションで、センサの位置を探索する際に用いられる各種制御パラメータの最適値を調査した。そして、それらの値を用いて実環境で動作させた場合の探索回数を評価した。

##### 4.1 実験環境

環境としては図3に示す位置にLED光源を配置した。ただし、光源はColorKinetics社製LEDスポット光源iColorMRg2のビーム幅24度の機種を使用した。また、光源は天井面に直接設置し、DoctorMXをコントローラーとしてDMX信号<sup>4)</sup>により光度を制御した。照度センサはコニカミノルタ社製色彩照度計CL-200を専用ケーブルでPCに接続したものをを使用した。光度の制御に使用したPCのスペックは以下のとおりである。

- CPU: Intel Core 2 Duo T9900 3.06GHz
- メモリ: 3GB
- OS: Windows XP

##### 4.2 シミュレータ上での性能評価

図4に光度の減少量を消灯タイプとし、光源の各選択パターンに関してセンサ位置標本点の数を10, 100, 1000, 10000と変化させて性能を比較した結果を示す。ただし、制御パラメータの最適値を探索する際に、シミュレーションで最終的に推定されたセンサ位置と実際の位置との誤差が300mm以内であれば正解とした。図4(a)からもわかるように、選

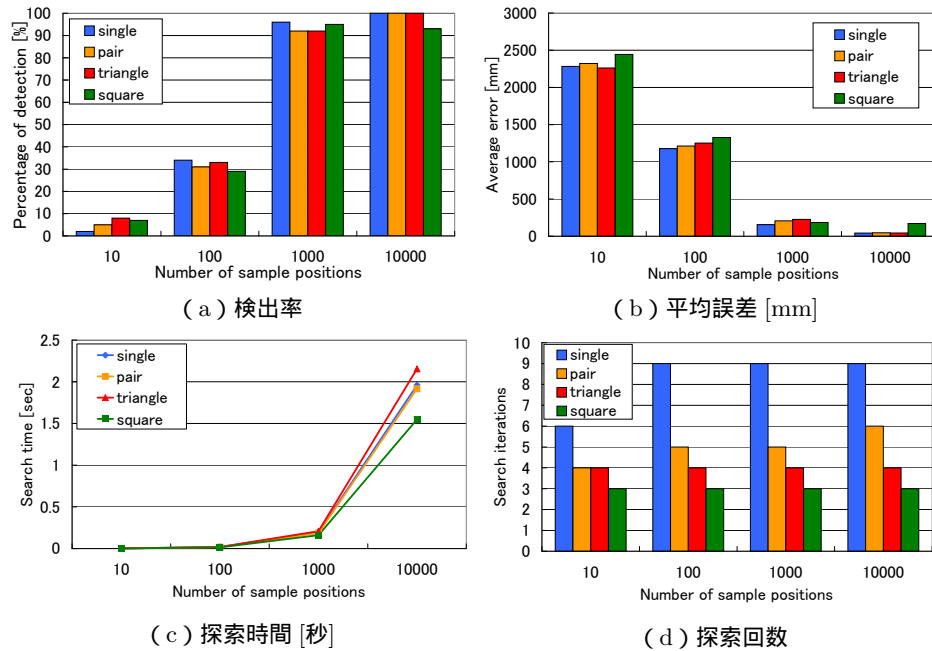


図 4 光源の選択パターンとセンサ位置標本点数の関係  
Fig. 4 Effects of light selection patterns and the number of sample positions

択パターンによる違いは顕著ではないが、10000 個のセンサ位置標本点では、四角選択のみ検出率が 100%に達していない。さらに、探索時間においてもセンサ位置標本点数に対して線形に増加しており、選択パターン間に有意差は認められない。一方、探索の回数に関しては単点選択が多くなることが確認できた。実環境ではこの探索回数の増加が観測回数となるために、実行時間の観点からは単点選択、精度の観点からは四角選択が他の選択パターンよりも劣っていることが示唆される。

次に、センサ位置標本点数を 1000 個で固定とし、各光源選択パターンと光度減少量タイプの組み合わせの性能を評価した結果を図 5 に示す。検出率や平均誤差を見る限り、減少量タイプと光源選択パターンに一定の関連性は認められない。しかし、探索時間や探索回数を見ると三角選択が概ね少ない探索回数で収束していることが確認できたので、実環境では三角選択を用いることとした。

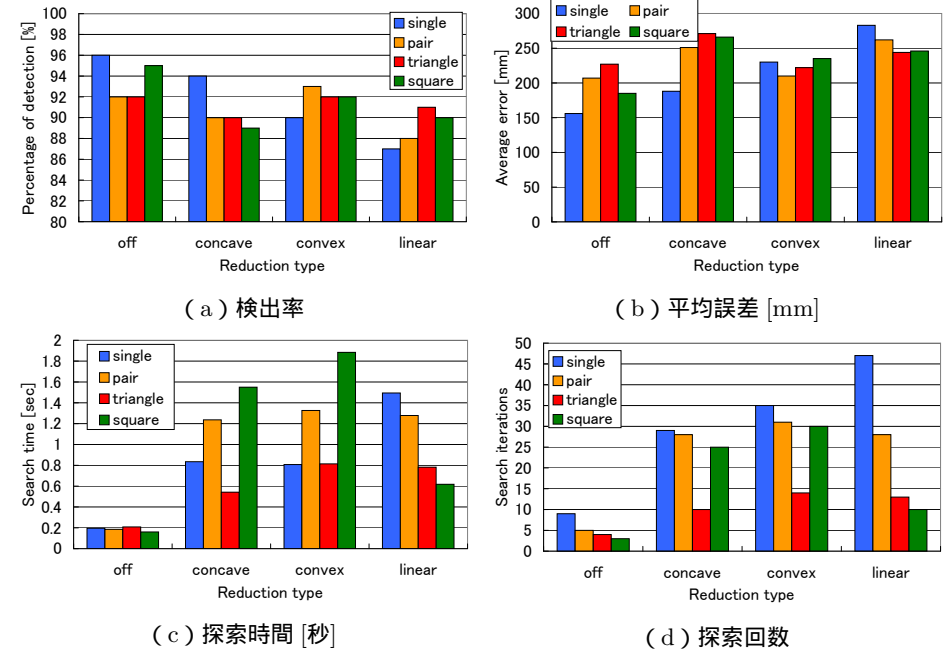


図 5 光度減少量タイプに対する光源選択パターンの精度  
Fig. 5 Effects of light selection patterns and reduction type

センサ位置標本点数の増加に伴い検出率が飽和することが前実験で示されたが、センサ位置の候補点数を変化させてその飽和点を調査した。光源選択パターンは三角選択、光度減少量タイプは消灯で評価した結果、検出率は標本点数が約 2000 で飽和することが確認された。

#### 4.3 実環境における性能評価

実環境での評価は、前節での結果より光源選択パターンを三角選択、センサ位置標本点数を 2000 に設定し、4 種類の光度減少量タイプに関してそれぞれシステムの探索回数を評価した。

図 7 から実環境において探索回数が大幅に増加していることが確認できるが、これは反射光成分の影響による照度推定の誤差に起因するものと考えられる。著者らの主観的な観測結果ではあるが、視覚的影響は凸減灯タイプが最も不快感が少なく、順に線形減灯、凹減

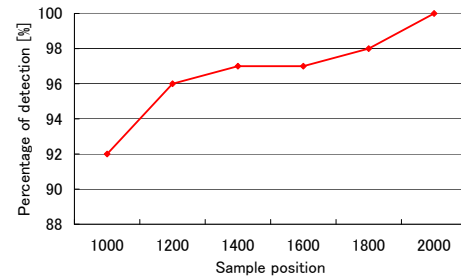


図 6 センサ位置標本点に対する検出率

Fig. 6 Detection ratio w.r.t. the number of sample positions

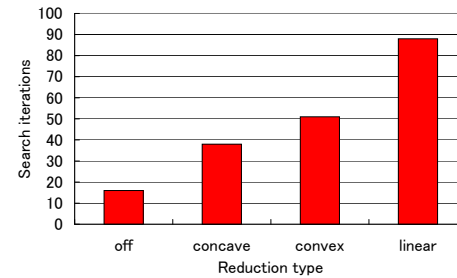


図 7 実環境実行時の探索回数

Fig. 7 The number of updates in a real lighting environment

灯、消灯と判断された。さらに図 5 の結果により、凸減灯タイプ三角選択パターンを用いれば比較的少ない探索回数で収束値を得られる事が確認できる。したがって本研究では、三角選択と凸減灯を用いた解の探索方法が最も有望であると結する。

## 5. ま と め

室内照明環境において、照度センサを用いた直接的な照明制御法を提案した。このシステムでは光源状態を最適化しながら照度センサの位置を推定し、センサ位置での照度にほとんど影響を与えない全ての光源を消灯する。光源の状態を効率良く探索するために、更新する光源を選択するパターンとその光度を減少させるタイプを数種類設けて最適な組み合わせをシミュレーションにより求めた。この組み合わせを用いて実環境においてシステムを評価した結果、最短でも 16 回の照明状態の更新が必要であった。現在は照度計の応答時間に 0.5 秒を要するので最終状態に至るまでに 8 秒以上の時間が必要とされるが、照度計の性能向上によって所要時間の問題は解決することが期待される。また、凸減灯タイプの重みを用いると最も視覚的な不快感が少ないことを実験的に確認した。

今後の課題として、現在は 1 個の照度センサを用いた制御を仮定しているが、複数の照度センサの位置を検出し、照度分布を最適化できるように機能を拡張する。また、現在では全ての光源を同じ高さに設置しているため等照度面が多く発生し位置の推定を 3 次元に拡張できないため、光源配置の高さを部分的に変更してセンサの 3 次元位置推定の頑健性を高める手法を開発する。また、デジタルカメラを照度計に代わる照度センサとして用い、応答を高速化して全体の処理時間を短縮化する実験も試みる予定である。

## 参 考 文 献

- 1) 井上容子, 久保博子, 藤本亜弓, "生理反応および印象・疲労感-有彩色光照明環境に関する研究", 日本建築学会大会学術講演梗概集, 40235, 2008
- 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) 別所誠, 清水恵一, "LED 照明の動向と展開", 東芝レビュー, Vol.65, No.7, 2010
- 4) <http://www.etconnect.com/Community/wikis/products/dmx.aspx>
- 5) E.M.Guttsait, "Analysis of the Illuminance Provided by LED Modules Placed at Large Distances from Illuminated Objects", Journal of Communications Technology and Electronics, Vol.54, No.1, pp.107-118, 2009

## 付 録

### 反射光を考慮した照度推定の補正

まず、壁面が適度に照明光を反射している状態にあると仮定する。そして、壁面を面光源と見なしてその距離に応じて、推定照度を変化させる補正式を推定する。具体的には、室内で観測した照度  $I_o$  とシミュレータ上で推定される照度  $I_s$  から変化率を求めることができ、これを目的照度として、長方形空間の長辺軸方向を  $x$ 、短辺軸方向を  $y$  として照度計算式<sup>5)</sup>で表すと次のような式になる。

$$\frac{I_o}{I_o - I_s} = ax^2 + by^2 + c \quad (6)$$

ただし、式 (6) は計算の容易さのために本来の照度計算式の分子と分母を逆にしている。また、この式のみでは寄与率があまり高くないことが確認されたため、この式の結果と、元の目的照度を用いてさらに 3 次回帰により近似した。これは照明の配置間隔に対して照明のビーム角が狭いために壁面から遠くても照度が予想される値より大きくなる地点があるためと考えられる。