

# 輝度分布を考慮した照明制御アルゴリズム

池上 久典

Hisanori IKEGAMI

## 1 はじめに

近年、オフィスにおいて、執務者の知的生産性、創造性、および快適性の向上に注目が集まっている<sup>1)</sup>。オフィス環境が知的生産性に及ぼす影響に関する研究は既に多く行われており<sup>2, 3)</sup>、オフィス環境を改善することにより、知的生産性が向上すると報告されている<sup>4)</sup>。これからのオフィスでは、執務者の生産性向上やストレスの軽減などを目的とし、仕事内容や個人の好みなどに応じたオフィス環境の創造が必要と考えられる。オフィス環境の中でも照明環境に着目した研究では、執務者の仕事内容や好みなどによって求められる光の明るさは異なるという研究結果も報告されている<sup>5)</sup>。

近年、照明システムにおいても使用者の要求に対応する点灯パターンを実現するためのシステムが研究されている。例えばセルフコントロールシステム<sup>6)</sup>がその一つである。このシステムの特徴は、照明器具に組み込まれた照度センサが照明にあたる反射光をセンサし、それに応じて調光可能な照明器具の光放射量を制御するもので、センシングエリア内の机上面照度を一定に保つ機能を有する。しかし、このようなシステムはエリアごとの照度を制御する手法を用いており、執務者の仕事内容や好みによって異なる照度を提供することが困難である。

このような背景から、我々は個々の執務者の要求に応じた照度を提供する知的照明システムの研究を行っている<sup>7)</sup>。知的照明システムは照度センサに希望する照度を設定し、机の上に照度センサを設置するだけでその照度を最小限の消費電力で実現することができる。オフィスにおいて知的照明システムを用いた場合、各執務者がそれぞれに合わせた光環境の元で執務をすることができ、快適性向上や、ストレス軽減といった効果が期待される。また、必要な場所に必要な照度を提供するため、平均照度が下がり、大幅な省エネルギー性を実現することが可能である。これまで知的照明システムは我々の研究室にて、その有効性が検証されてきた<sup>7)</sup>。また、実オフィスに導入され、実証実験も行われている<sup>8, 9)</sup>。実証実験の結果、各執務者の目標照度を実現することで、高い省エネルギー性を実現できるという結果が得られた<sup>9)</sup>。一方で照度センサへの目標照度の入力・変更を行なっている執務者が非常に少なかった。現在の知的照明システムでは、目標照度の入力をウェブブラウザ上で行なっている。このため、パソコン作業、紙面作業など執務内容の変化に合わせて目標照度を変更することは難しく、ある程度目標照度の設定が妥協されているためだと考えられた。これを解決するために、目標照度設定のユーザビリティ向上、あるいは自動化が求められていた。また目標照度設

定の妥協と関連して、PC 作業、紙面作業などの執務内容の変化や窓面輝度の時間変化による視野内の明るさの変化によって、一度設定した目標照度では、視野内の明るさの差が気になることがあるという結果も得られた。

そこで本稿では、執務者の視野内輝度分布から知的照明システムが提供すべき照度環境を自動で決定する照明制御アルゴリズムの提案を行う。これにより、執務者の視野内光環境の細かな変化に応じて照明の光度が変更され、執務者の視野内に不快グレアが生じない輝度分布を提供する。また目標照度を手動で入力することなく照明制御が行われることで、執務者の快適性・利便性を更に向上させることを狙う。

## 2 知的照明システム

### 2.1 知的照明システムの概要

知的照明システムは必要な場所に必要な照度を最小限のエネルギーで提供するシステムである。知的照明システムは複数の照明機器と複数の移動可能な照度センサおよび電力計をネットワークに接続することで構成される。照明器具には学習判断をする制御装置を備え、これにより各照明機器が自律的に動作可能となる。知的照明システムの構成を Fig. 1 に示す。ここで、照度とは、光によって照らされている任意の場所の明るさを表し、単位はルクス [lx] を用いる。

各執務者は照度センサに「照度のある値以上にする」という照度制約条件を設定することで、各照明が自律的な光度変化を繰り返し、執務者の要求照度を実現する。また、知的照明システムでは、照明や照度センサの位置情報を必要とせず、照度センサから送られる照度データを基に照明が照度センサに及ぼす影響度を学習する。これにより、各執務者の目標照度を素早く実現することができる。

### 2.2 照度制御アルゴリズム

知的照明システムの最も有効な照明制御アルゴリズムとして、回帰係数を用いた適応的近傍アルゴリズム (ANA/RC) が提案されている。ANA/RC とは、汎用的最適化手法である確率的山登り法をベースに、照明制御用に改良したものである。ANA/RC では、回帰係数を用いて照明の照度センサに対する影響度を学習し、状況に応じて光度を変化させることで、最適な光度へと素早く変化させることができる。

#### 2.2.1 回帰分析を用いた影響度推定

知的照明システムの目的は個別照度を提供し、かつ省電力な状態を素早く実現することである。このため、照明が照度センサの照度値に与える影響度を知ることが重

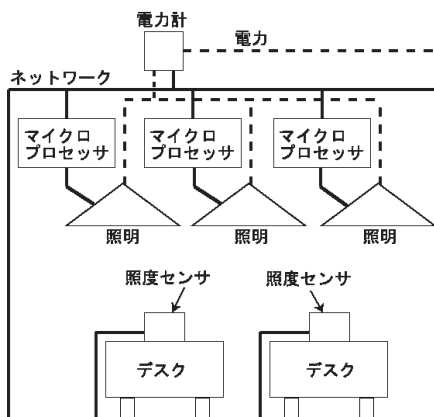


Fig.1 Configuration of the Intelligent Lighting System

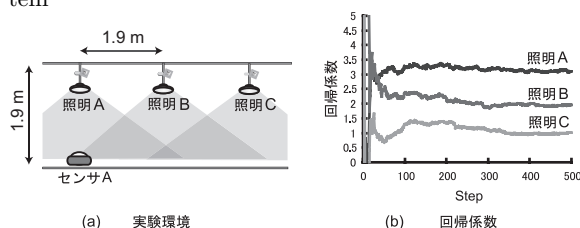


Fig.2 History of the regression coefficient

要となる．本システムでは照明が照度センサに与える影響度を推定するために，回帰分析を用いる．回帰分析とは，説明変数  $x$  を変化させたときに観測値  $y$  がどのように変化するかという 2 変数間の因果関係を分析する手法である．因果関係は説明変数  $x$  と観測値  $y$  の関係を式 1 で示す回帰式で近似することで求める．

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (1)$$

知的照明システムでは光度値の 1 回の探索における光度変化量を  $x$ ，照度変化量を  $y$  として回帰分析を行う．Fig. 2-(a) に示す環境にて，照明 A,B および C の照度センサ A に対する回帰係数の履歴を Fig. 2-(b) に示す．Fig. 2-(b) より，照度センサに近くなるほど回帰係数の値が高くなっていることがわかる．これにより，回帰係数を用いることで影響度が推定できることがわかる．

### 2.2.2 最適化問題としての定式化

知的照明システムの目的は各執務者の希望する照度を実現し，消費電力を最小にすることである．このため，各照明は自身の光度を最適化する最適化問題として捉える．そこで，各照明は自身の光度を設計変数とし，執務者の目標照度という制約条件の下，消費電力を最小化する最適化問題を解く．そのための目的関数を式 2 のように設定する．

$$f = P + w \sum_{j=1}^n g_j \quad (2)$$

$$g_j = \begin{cases} 0 & (Lc_j - Lt_j) \geq 0 \\ (Lc_j - Lt_j)^2 & (Lc_j - Lt_j) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$P$ : amount of electric power,  $w$ : weighting factor,  $Lc$ : current illuminance,  $Lt$ : target illuminance

目的関数は消費電力量  $P$  と照度制約  $g$  からなる．照度制約  $g$  は現在照度を目標照度以上にするということから，式 3 のように与える．また，重み  $w$  を変化させることで電力と照度の優先度を変化させることができる．なお，知的照明システムでは基本的に照度を優先する．

### 2.2.3 制御アルゴリズムの流れ

ANA/RC は汎用最適化手法である確率的山登り法をベースとしたアルゴリズムを用いている．さらに本アルゴリズムでは各照度センサに対する照明の影響度推定を行い，状況に応じて効率よく光度を変化させる．以下に ANA/RC の流れを示す．

1. 各照明は初期光度で点灯する．
2. 各照度センサは照度情報（現在照度，目標照度）を，電力計は消費電力量をネットワークに送信する．
3. 各照明は項目 2 の情報を取得し，現在光度における目的関数の評価を行う．
4. 影響度と照度情報を基に光度変化の範囲である近傍を決定する．
5. 近傍内に次光度をランダムに生成し，照明をその光度で点灯させる．
6. 各照度センサは照度情報を，電力計は消費電力量をネットワークに送信する．
7. 各照明は項目 6 の情報を取得し，次光度における目的関数の評価を行う．
8. 照明の光度変化量および照度センサの照度変化量の相関係数を計算する．
9. 目的関数の評価値が改良された場合は次光度を受理し，そうでない場合は元の光度に戻す．
10. 項目 2~9 を光度値の 1 回の探索とし，繰り返す．

以上の動作を繰り返すことで，各照明は各照度センサに対する影響度を学習しつつ，各執務者の目標照度を提供し，かつ省エネルギーな状態を実現する．

## 3 輝度分布最適化アルゴリズム

### 3.1 提案手法概要

従来の知的照明システムでは，目標照度に収束した執務環境を自分の目で判断した上で明るければ目標照度を下げる，暗ければ目標照度を上げる，といった操作を執務者自身の目の感覚を頼りに行っていた．そのため，Fig. 3 に示すように，自身の好みの照度値を決定するまで試行錯誤しており，ある程度満足できる照度を見つけた後はあまり変更を行っていない．また，実証実験の結果，Fig. 4 や Fig. 5 からわかるように，目標照度を変更しない執務者が非常に多い．本手法では，執務者の視野内輝度分布を評価することによって，執務者が執務環境の明るさを自身で評価することなく，知的照明システムの制御に必要な目標照度を自動決定し，最適な輝度分布状態へ徐々に推移していく．これにより，執務内容や時間の変化に対して，執務者の視野内輝度分布の細かな制御を行うことができる．従来の目標照度決定方法と自動化された目標照度決定方法の比較を Fig. 6 に示す．以下に

輝度分布最適化照明制御アルゴリズムの流れを示す．

1. 初期目標照度を設定する．
2. 照度センサに対して照度収束制御を行う．
3. 現在照度が目標照度に収束したか判定を行う．収束していなければ項目 2 に戻る．
4. 現在輝度分布を取得する．
5. 取得した輝度分布の評価を行う．
6. 最適化完了判定．完了していれば項目 2 に戻る．
7. 輝度分布が良くなる方向に目標照度変更方向決定
8. 目標照度を項目 7 で決定した方向に 50 lx 増加，あるいは減少させる．
9. 項目 2～8 を繰り返し，執務環境の変化に応じて視野内の輝度分布を最適化する．

人間の目が感じる不快グレア効果には，対比効果と飽和効果がある．対比効果は視野内の平均輝度と最大輝度の比が大きいと不快グレアを生じるもので，特に窓やディスプレイ程度にグレア源面積が大きい場合に生じる<sup>10)</sup>．飽和効果は視野内に入ってくる光量で不快グレアを生じるもので，明るすぎる照明環境や太陽などを見た時，視野内の平均輝度が上がることで生じる．これらのことから，輝度制御を不快グレアを生じる輝度比最適化問題と捉え，式 (4) のように定式化する．輝度比を最小化しかつ平均輝度が閾値を超えた場合にペナルティを与えることで，不快グレアを生じない輝度分布を実現する．視界内の輝度差がなく，輝度比による対比効果を生じないとき，輝度比の値は 1 に近くなるため，式 (4) では輝度比の値から 1 を減じ，絶対値を取った値を最小化している．視野内平均輝度が  $250 \text{ cm/m}^2$  を超えると平均輝度の上昇と共に徐々に不快感が出始め， $250 \text{ cm/m}^2$  以下で不快感の出た被験者はいなかったという先行研究があるため<sup>10, 11)</sup>，閾値  $T$  には 250 を用いた．項目 5 においては，式 (4)，式 (5) に示す最適化評価式を用いて，取得した輝度分布の評価値計算を行う．

$$f = |Lr - 1| + wg \quad (4)$$

$$g = \begin{cases} 0 & La < T \\ La & La \geq T \end{cases} \quad (5)$$

$Lr$ : luminance ratio,  $w$ : weighting factor,  $T$ : Threshold,  $La$ : average lluminance

以上の動作を繰り返すことで輝度分布の評価が良くなる方向へ自動で目標照度を変更し，視野内輝度分布を最適化する．

## 4 有効性検証実験

### 4.1 実験概要

提案手法を用いることで，知的照明システムの目標照度を自動決定し執務者の視野内輝度分布を制御できることを示す．調光可能な照明 15 灯，照度センサ 1 台，執務者に見立てた輝度計測装置を用いて Fig. 7 に示す実験環境を構築した．机の高さは JIS 標準規格によって推奨されている床面から 70 cm とした．またオフィスにおける一般的な 60 cm グリッド天井において，本実験環境の執

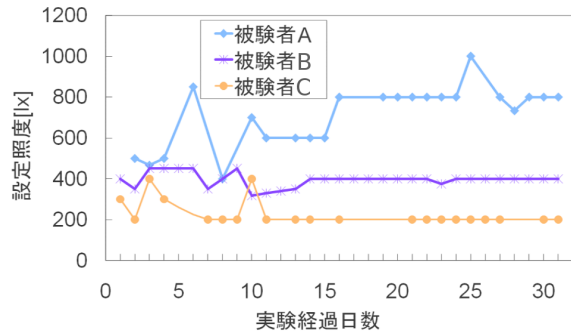


Fig.3 Convergence of Target Illuminance

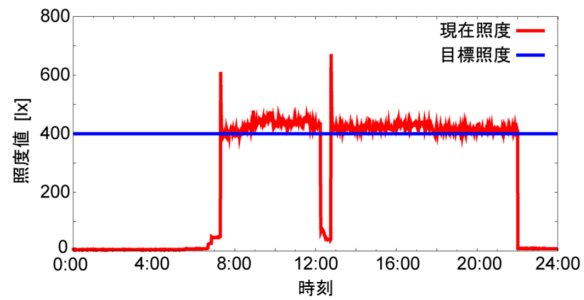


Fig.4 Not Changed Target Illuminance

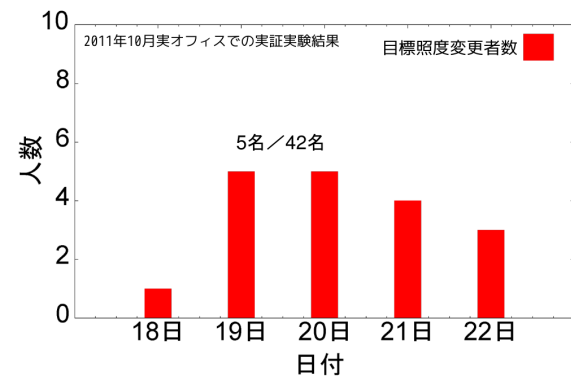


Fig.5 Number of People Trying to Change Target Illuminance

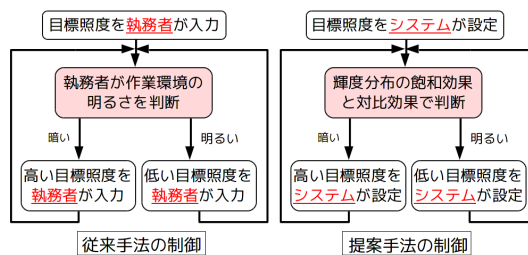


Fig.6 Automatic Determination Flowchart of Target Illuminance

務机上面に照度値 300 lx から 1000 lx まで提供できる照明数と照明配置で実験環境を構築した．ディスプレイの輝度が低い状態から PC の電源を入れディスプレイの輝度を上げる．その後，執務中にディスプレイの輝度を下げる．視野内輝度分布の変化に対応して，不快グレアを生じないような輝度比，平均輝度の輝度分布が実現することを示す．

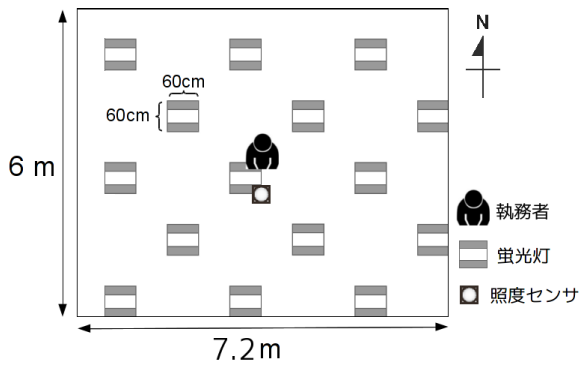


Fig.7 Experiment Environment

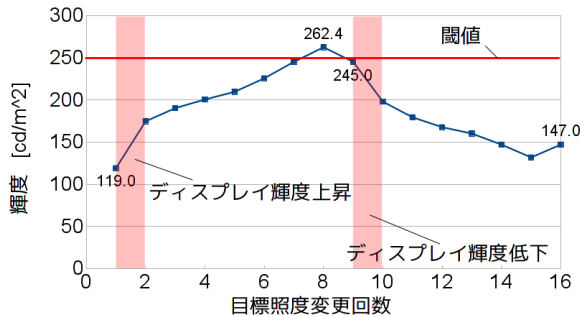


Fig.8 Luminance Average History

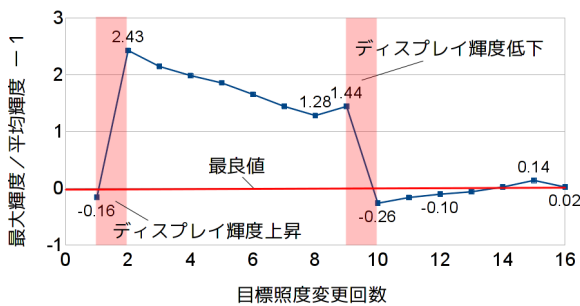


Fig.9 Luminance Ratio History

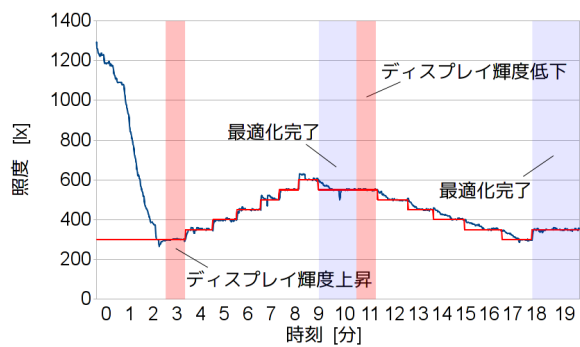


Fig.10 Illuminance History

#### 4.2 実験結果

輝度分布制御実験を行った際の視野内平均輝度の履歴を Fig. 8 に、輝度比の履歴を Fig. 9 に、目標照度と現在照度の履歴を Fig. 10 に示す。

まず、初期状態では式 (4) における第 1 項である輝度比も最良値に近く、視野内平均輝度も低くなっているこ

とがわかる。PC の電源が入り、ディスプレイの輝度が大きく上昇すると、ディスプレイが明るく、周りが暗い状況となる。周りを明るくし視野内平均輝度を  $250 \text{ cd/m}^2$  以下かつ輝度比を 1 に近づけるため、システムは目標照度を自動で上げていく。目標照度変更 8 回目で視野内平均輝度が閾値である  $250$  を超えたため、目標照度の上昇が止まり、平均輝度  $250 \text{ cd/m}^2$  以下で実現可能な最も良い輝度比となる輝度分布を提供している。その後ディスプレイの輝度を下げると平均輝度が大きく下がり、目標照度変更 9 回目以降は平均輝度  $250 \text{ cd/m}^2$  を満たしながらより良い輝度比となるように制御が推移していることがわかる。

#### 5 まとめ

PC 作業を主として、オフィスでの作業形態の変化に伴い、机上面照度だけでなく執務者の視野内輝度分布も重要となってきており、知的照明システムにおいても執務者の視野内輝度分布を最適制御することが求められていた。本稿では、執務者の視野内輝度分布を評価することで輝度分布を最適化する照明制御アルゴリズムを提案した。提案手法を用いることで、知的照明システムにおける目標照度を自動決定し、執務者の視野内輝度分布を最適制御できることを示した。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省:「クリエイティブ・オフィス推進運動実行委員会」の開催について。  
<http://www.meti.go.jp/press/20070611/5008/2007061500/8.html>.
- 2) 大林史明, 富田和宏, 服部瑤子, 河内美佐, 下田宏, 石井裕剛, 寺野真明, 吉川榮和. オフィスワークのプロダクティビティ改善のための環境制御法の研究 - 照明制御法の開発と実験の評価. ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006, 2006.
- 3) 小林弘造, 北村規明, 田辺新一, 西原直枝, 清田修, 岡卓史. コールセンターの室内環境が知的生産性に与える影響. 空気調和・衛生工学会学術講演大会論文集, pp. 2053-2056, 2005-9.
- 4) 西原直枝, 田辺新一. 中程度の高温環境下における知的生産性に関する被験者実験. 日本建築学会環境系論文集, No.568, pp. 33-39, 2003-6.
- 5) Peter R. Boyce, Neil H. Eklund, and S. Noel Simpson. Individual lighting control: Task performance, mood, illuminance. *International Journal of Emerging Sciences*, pp. 131-142, 2000.
- 6) 鶴岡伸一, 田中和徳, 川並尚, 長崎文彦. センサを応用した省エネ照明システムの開発. 電気設備学会全国大会, pp. 33-38, 1997.
- 7) 三木光範. 知的照明システムと知的オフィス環境コンソーシアム. 人工知能学会誌, Vol. Vol.22, pp. 399-410, 2007.
- 8) 真理子鈴木, 光範三木, 慎吾田中, 真聡吉見, 明彦中川, 敦子齋藤, 麻衣子福田. オフィス内フレームを用いた知的照明システムの構築 (オフィスインフォメーションシステム、e-ビジネスモデリング、特集、学生論文). 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, Vol. 95, No. 3, pp. 549-558, 2012.
- 9) 大学法人同志社大学, 株式会社三井物産戦略研究所. 平成 20 年度 ~ 平成 22 年度成果報告書エネルギー使用合理化技術戦略の開発/エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発/自律分散最適化アルゴリズムを用いた省エネ型照明システムの研究開発. Technical Report 20110000000875, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 4 月 平成 23 年.
- 10) 利枝岩田, 良和佐々木, 大輔伊藤, 悦子望月. 視野内平均輝度による総量グレア範囲の抽出: 不快グレアの対比効果と総量効果 その 2. 日本建築学会環境系論文集, Vol. 74, No. 635, pp. 25-31, 2009.
- 11) 利枝岩田, 大輔伊藤, 祐介平野. 不快グレアの対比効果と総量効果. 日本建築学会環境系論文集, No. 618, pp. 1-7, 2007.