

# 執務者の照度・色温度に対する満足度を考慮した 照明の個別分散制御手法

A Lighting Control to Optimize Satisfaction of Illuminance and Color Temperature

坂東 航<sup>\*1</sup>  
Wataru Bando

三木 光範<sup>\*2</sup>  
Mitsunori Miki

那須 大晃<sup>\*1</sup>  
Nasu Hiroaki

富岡 亮登<sup>\*1</sup>  
Ryoto Tomioka

間 博人<sup>\*2</sup>  
Hiroto Aida

<sup>\*1</sup>同志社大学大学院 理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University

<sup>\*2</sup>同志社大学 理工学部  
Department of Science and Engineering, Doshisha University

We have proposed an Intelligent Lighting System which individually provides illuminance and color temperature required by office workers. The Intelligent Lighting System has been introduced in several offices and its effectiveness is recognized. However, the Intelligent Lighting System can't realize greatly different illuminance and color temperature required by adjacent office workers because of relation between lighting position and office layout. Therefore, in this research, we propose a new lighting control method which treats illuminance and color temperature satisfactory in the area rather than the specific value by using the index of satisfaction. The verification experiment showed that the proposed method is effective for improving the total satisfaction of all officers. Also, it showed that the proposed method is effective for energy saving lighting control.

## 1. はじめに

近年、オフィスにおける執務者の知的生産性や快適性の向上への要求の高まりから、オフィス環境の改善に注目が集まっている。また、オフィス環境の中でも光環境に着目した先行研究では、執務者ごとに要求する照度および色温度は異なることが報告されている [1]。そこで、著者らはオフィスにおける執務者の快適性と省エネルギー性の向上を目的とし、各執務者が要求する照度および色温度を最小の消費電力で実現する知的照明システムの研究を行っている [2]。

知的照明システムは、最適化手法に基づいて天井照明を個別に制御することで、執務者が要求する照度および色温度を最小の消費電力で実現する。しかし、使用する天井照明の位置とオフィスレイアウトの関係によって、隣接する執務者が大きく異なる照度および色温度を要求したとき、それらを物理的に実現できない場合がある。

このとき、執務者が満足できる照度および色温度にはある程度の領域があり、また、その領域の広さには個人差があると考えられる。そのため、満足できる領域が広い執務者は要求する照度および色温度を実現せずとも十分満足できる。一方で、満足できる領域が狭い執務者は要求する照度および色温度を実現しないと全く満足できない。そこで、満足できる領域が狭い執務者の要求する照度および色温度を優先的に実現することで全執務者の満足度の合計を向上が可能である。また、満足できる照度と色温度の領域内で提供する照度を下げることで、満足度を損なうことなく省エネルギーな照明制御が可能である。

そこで本研究では、従来のように執務者が要求する照度と色温度を特定の値として捉えるのではなく、照度と色温度に対して満足度という評価指標を用いて領域として捉える。そして、執務者の照度と色温度に対する満足度を考慮した新たな照明制御手法を提案する。提案手法により全執務者の満足度の合計を最大化し、かつ省エネルギーになる最適な照度および色温度を

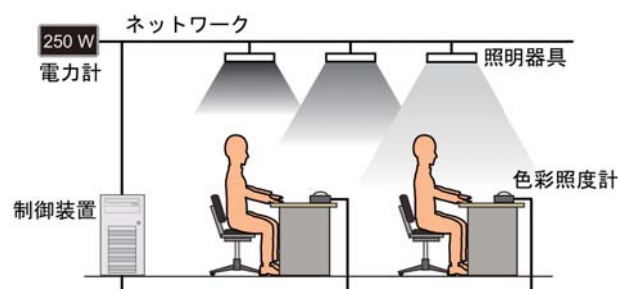


図 1: 知的照明システムの構成

実現する。これにより、知的照明システムによる執務者のさらなる快適性および省エネルギー性の向上を目指す。

## 2. 知的照明システム

### 2.1 知的照明システムの構成

知的照明システムは各執務者が要求する照度および色温度を最小の消費電力で実現するシステムである。知的照明システムの構成を図1に示す。知的照明システムは、複数の調光可能な照明器具、照明の制御装置、各執務者の机上面に設置された照度および色温度を測定するセンサ（以下、色彩照度計）、および電力計を1つのネットワークに接続することで構成する。

各執務者は要求する照度（以下、目標照度）および色温度（以下、目標色温度）を設定する。制御装置は、最適化手法に基づいて各執務者の目標照度および目標色温度を最小の消費電力で実現する点灯パターンを求め、照明器具を個別に調光することで全執務者の目標照度および目標色温度を実現する。

### 2.2 知的照明システムの制御

知的照明システムにおける制御は、各執務者の目標照度および目標色温度の実現と消費電力の最小化の2つを目的とした各照明の光度の最適化問題として捉える。制御アルゴリズムには、大域的最適化問題に対する汎用的アルゴリズムである Simulated Annealing (SA) を基礎とし、回帰係数によっ

連絡先: 坂東 航, 同志社大学大学院 理工学研究科 情報工学専攻, 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3, 0774-65-6924, wbando@mikilab.doshisha.ac.jp

て次光度生成に用いる近傍設計を選択する手法を組み込んだ適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient : ANA/RC) や、高速に目標照度および目標色温度の実現と消費電力の最小化が可能な数理計画法を用いたアルゴリズムが用いられる [3].

### 2.3 目標照度・色温度の実現における物理的制約

一般的なオフィスの天井照明は、オフィス全体が均一な照度および色温度になるように配光角の広い照明が使用され、それぞれ 1.8 m 間隔で設置されている。また、デスクは 1.2 m(W) × 0.7 m(D) のものが使用され、デスクのレイアウトは執務者間の距離が近い対向島型が採用されている。このようなオフィスでは、1 つの照明の光が複数の執務者のデスクに影響を及ぼす。そのため、隣接する執務者が大きく異なる目標照度および目標色温度を設定したとき、各照明を最適な光度で点灯した場合でも各執務者の目標照度および目標色温度を物理的に実現できない場合がある。

このとき、執務者が満足できる照度および色温度にはある程度の領域があり、また、その領域の広さには個人差があると考えられる。そのため、満足できる領域が広い執務者は要求する照度および色温度を実現せずとも十分満足できる。一方で、満足できる領域が狭い執務者は要求する照度および色温度を実現しないと全く満足できない。そこで、満足できる領域が狭い執務者の要求する照度および色温度を優先的に実現することで全執務者の満足度の合計を向上が可能である。また、満足できる照度と色温度の領域内で提供する照度を下げることで、満足度を損なうことなく省エネルギーな照明制御が可能である。

そこで本研究では、従来のように執務者が要求する照度と色温度を特定の値として捉えるのではなく、照度と色温度に対して満足度という評価指標を用いて領域として捉える。満足度は「満足」「やや満足」「普通」「やや不満」「不満」の 5 段階で評価する。被験者実験により照度と色温度に対する満足度を計測し、照度と色温度に対する満足度の特性とその個人差について検証を行う。そして、執務者の照度と色温度に対する満足度を考慮した新たな照明制御手法を提案する。提案手法により全執務者の満足度の合計を最大化し、かつ省エネルギーになる最適な照度および色温度を実現する。

## 3. 照度・色温度に対する満足度計測実験

### 3.1 満足度計測実験の概要

照度と色温度に対する満足度の特性と個人差を明らかにするため、20 代前半の被験者 10 名を対象に満足度計測実験を行った。実験環境を図 2 に示す。実験は 7.2 m(W) × 6.0 m(D) × 2.6 m(H) の実験環境を構築し、天井照明には調光・調色可能な LED 照明を 28 灯使用した。

実験中、被験者は実験室中央付近に設置した席に座り、紙面作業として読書を行う。そして、後述する実験手順に従い、机上面に提供されている照度と色温度に対して「満足」「やや満足」「普通」「やや不満」「不満」の 5 段階で満足度の評価を行う。満足度の計測対象となる環境の照度および色温度は机上面の照度が 100 lx から 1000 lx までの 50 lx ごとと、机上面の色温度が 3000 K, 3500 K, 4200 K, 5000 K, 6500 K の 5 段階である。

### 3.2 満足度計測実験の手順

満足度の計測手順について述べる。被験者はまず、計測対象となる机上面の照度と色温度の組み合わせの中から読書をする上で最も良いと感じる照度（以下、選好照度）と色温度（以下、選好色温度）の組み合わせを選択する。そして、このとき

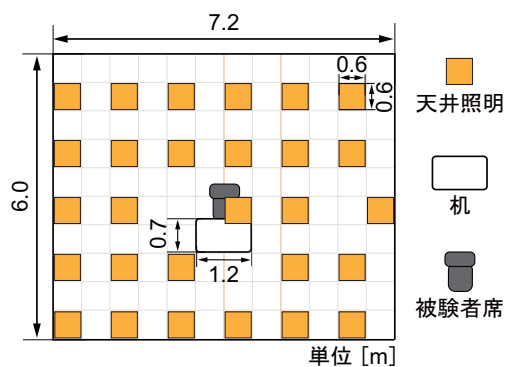


図 2: 満足度計測実験の実験環境（平面図）

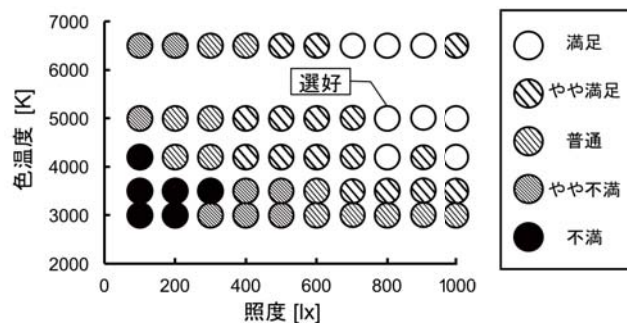


図 3: 満足度計測結果（被験者 A）

選択した選好照度と選好色温度の環境を満足度の中の「満足」に相当する環境とする。その後、実験者が天井照明を一律に調光・調色し、机上面の照度と色温度をランダムに選択した次の計測対象の環境に変更する。照度および色温度の変更後、被験者は変更された照度に対する明順応と色温度に対する色順応のため読書を行いながら 3 分間待機する [4]。そして順応後、被験者は照度と色温度に対して「満足」「やや満足」「普通」「やや不満」「不満」の 5 段階で満足度を評価する。

この実験者によるランダムな机上面の照度と色温度の変更から満足度の評価までの一連の手順を繰り返すことにより照度と色温度に対する満足度の計測を行う。

### 3.3 満足度計測実験の結果および考察

満足度計測実験の結果の一例を図 3 に示す。図 3 のグラフは被験者 A の満足度計測結果である。グラフ上のプロットはその照度と色温度に対する満足度を表す。白抜きのプロットは「満足」を表し、黒に近づくにつれて「不満」を表す。また、「選好」で示したプロットは被験者が最初に選択した選好照度と選好色温度を表す。

グラフより、被験者 A は 800 lx, 5000 K を選好照度と選好色温度に選択し、高照度の環境において高い満足度を得ていることがわかる。今回行った 10 人の被験者全てにおいて、選好照度と選好色温度の付近で高い満足度が得られる傾向が見られた。また、「満足」となる領域の広さに関しては、個人ごとに大きく異なった。

## 4. SVM による満足度の識別モデルの作成

### 4.1 満足度の識別モデル

満足度に基づいた照明の最適化制御を行うためには、提供されている照度と色温度に対する執務者の満足度を評価する必要がある。そこで本研究では、事前に計測した満足度から満足度の識別モデルを作成し、最適化途中で必要になる任意の照度

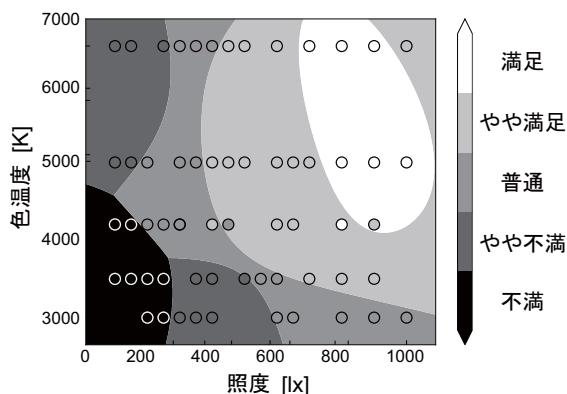


図 4: 満足度の識別モデル (被験者 A)

表 1: 各識別モデルの正解率と F 値

被験者	正解率 [%]	F 値	被験者	正解率 [%]	F 値
A	83.3	0.84	F	73.3	0.64
B	71.6	0.70	G	85.0	0.84
C	83.3	0.82	H	85.0	0.81
D	80.0	0.81	I	75.0	0.68
E	80.0	0.82	J	76.7	0.76
			平均	79.3	0.77

と色温度に対する満足度の評価を行う。満足度の識別モデルの作成には、教師あり学習によるパターン認識手法の 1 つである Support Vector Machine (以下, SVM) を用いる。

本実験では、3 章で計測した被験者ごとの 60 組の照度と色温度に対する満足度を教師データとして、SVM を用いて満足度の識別モデルを作成した。なお、特徴量に使用した照度と色温度は絶対値による差が生じるため、それぞれ 0-1 スケーリングにより標準化を行う。また、SVM のカーネルには RBF カーネルを使用し、識別モデルの性質を決定するコストパラメータ  $C$  と RBF パラメータ  $\gamma$  はグリッドサーチにより識別モデルごとに求める。

#### 4.2 識別モデルの評価実験

作成した識別モデルの評価を行うため、教師データに対する一個抜き交差検証を行う。具体的には、60 組の教師データから 1 組をテスト用として抜き取り、残りの 59 組の教師データを基に識別モデルを作成し、作成した識別モデルでテスト用の教師データを推定する。これを 60 組の全ての教師データに対して行うことで、各識別モデルの正解率と F 値を評価する。

#### 4.3 評価実験の結果および考察

作成した識別モデルの一例を図 4 に示す。図 4 は被験者 A の満足度計測実験の結果から作成した満足度の識別モデルである。グラフ上のプロットは教師データに用いた満足度を表す。また、グラフの背景の色分けは識別モデルにより識別された各満足度の領域を表す。

次に、各被験者の識別モデルの学習データに対する一個抜き交差検証による正解率と F 値を表 1 に示す。一個抜き交差検証の結果、正解率は最大で 85.0%、最小で 71.6%、平均 79.3% となった。正解率が比較的低かった被験者 B や被験者 F の識別器に関しては、学習データの中に外れ点が多かったことが原因として考えられる。また、F 値に関しては最大で 0.84、最小で 0.64、平均 0.77 となった。識別モデルによって大きく正解率や F 値が下がった結果はなく、SVM による満足度評価の有効性を示した。

## 5. 満足度を考慮した照明の個別分散制御

### 5.1 提案手法の概要

執務者の満足度を考慮した照明制御により、全執務者の満足度の合計を最大化しつつ、消費電力を最小化する新たな照明制御手法を提案する。提案手法では、4 章で述べた満足度の識別モデルを用いて、各執務者の満足度の評価を行う。そして、後述する制御アルゴリズムによって全執務者の満足度の合計を最大化しつつ、消費電力を最小化する。

### 5.2 制御アルゴリズム

提案手法の制御アルゴリズムは汎用的な最適化手法である確率的山登り法の考え方を基に作成した。以下に本アルゴリズムの制御の流れを示す。

- (1) 識別モデルにより評価した各執務者の満足度と電力計から取得した消費電力量を基に目的関数値を算出する。
- (2) ランダムに選択した執務者の目標照度および目標色温度を満足度が下がらない領域内でランダムに変化する。
- (3) 知的照明システムによる照明制御を行う。
- (4) 再び、識別モデルにより評価した各執務者の満足度と電力計から取得した消費電力量を基に目的関数値を算出する。
- (5) 目的関数値が向上している場合は目標照度および目標色温度の変更を受理し、そうでない場合は変更を棄却する。
- (6) 項目 (1) に戻る。

次に、提案手法の制御アルゴリズムの項目 (1) および (4) で使用する目的関数について述べる。提案手法の目的は全執務者の合計満足度の最大化および消費電力の最小化である。そのため、目的関数は式 (1) のように定式化する。式 (1) は各執務者の満足度  $S$  の合計と消費電力  $P$  から構成され、この目的関数を最大化することを目的とする。また、各執務者の満足度  $S$  はその執務者の識別モデル  $g$  と現在の提供されている照度  $I_c$  および色温度  $T_c$  から算出し、「満足」「やや満足」「普通」「やや不満」「不満」をそれぞれ 5~1 としてスコア化する。

$$f = w \times \sum_{i=1}^n S_i - P \quad (1)$$

$$S_i = g_i(I_{ci}, T_{ci})$$

$n$ : 執務者数,  $i$ : 執務者番号,  $w$ : 重み  
 $S$ : 満足度,  $g$ : 識別モデル,  $P$ : 消費電力 [W]  
 $I_c$ : 現在照度 [lx],  $T_c$ : 現在色温度 [K]

## 6. 提案手法の有効性検証実験

### 6.1 検証実験の概要

提案手法の有効性を示すため、シミュレーションによる検証実験を行った。実験に用いたシミュレーション環境を図 5 に示す。本実験は 3.6 m(W) × 5.4 m(D) × 2.6 m(H) の小規模の模擬オフィスを想定したシミュレーション環境を構築し行った。照明は 1.8 m 間隔で 6 灯設置し、机は一般的なオフィスで使用される対向島型レイアウトで 6 台設置した。

各机には 3 章の被験者 10 名が着席することを想定した。10 名中 6 名を重複がないように選択し、それぞれの机にランダムに着席した。全ての組み合わせ 210 通りのパターンに対して標準手法と提案手法による執務者の満足度のシミュレーションを行った。提案手法で用いる識別モデルには 4 章で作成した各被験者の識別モデルを用いた。また、各執務者の目標照度



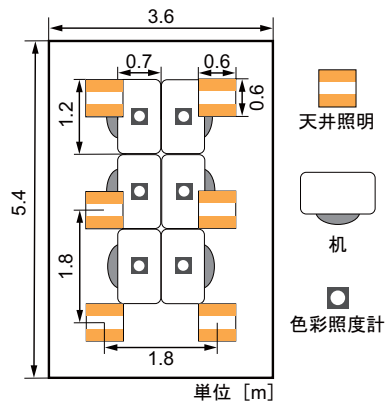


図 5: シミュレーション環境 (平面図)

表 2: 各執務者の目標照度・目標色温度

執務者	目標照度 [lx]	目標色温度 [K]
A	800	5000
B	800	3000
C	300	4200
D	700	5000
E	700	4200
F	900	5000
G	300	3500
H	500	3000
I	700	5000
J	500	4200

および目標色温度は 3 章の満足度計測実験の際に各被験者が選択した選好照度および選好色温度を設定した。各執務者の目標照度および目標色温度を表 2 に示す。シミュレーション結果から、6 名の執務者の平均満足度および各満足度の執務者が占める割合と消費電力を比較し、提案手法の有効性を検証する。

6.2 シミュレーション結果および考察

標準手法と提案手法による執務者 6 名の平均満足度の分布を図 6 に示す。図 6 より、標準手法と比較して提案手法の方が高い平均満足度を実現する頻度が増加した。また、特に平均満足度が 4 以上、つまり平均的に執務者の満足度が「やや満足」以上となる頻度が大きく増加した。

次に、標準手法と提案手法による各満足度の執務者が占める割合を図 7 に示す。図 7 の (a) より、標準手法では「やや満足」「普通」の執務者の割合がそれぞれ 35.8%、50.4%であり、2 つで全体の 8 割以上を占め、「満足」の執務者の割合は 13.3%と 1 割程度であった。一方で、図 7 の (b) より、提案手法では「やや満足」「普通」の執務者の割合はそれぞれ 33.3%、38.7%と 2 つで全体の 7 割程度であり、「満足」の執務者の割合は 27.6%と全体の 3 割程度であった。提案手法と標準手法を比較すると「満足」の執務者の割合が 2 倍近く増加した。これより、提案手法の執務者の満足度向上における有効性を示した。

次に、標準手法と提案手法による消費電力を表 3 に示す。消費電力は照明の光度が最大のときを 100%として各照明の光度の合計から算出した。標準手法の消費電力は 43.0%であるのに対して、提案手法では 40.5%となり、2.5%低下した。また、標準誤差はそれぞれ 0.3%と 0.5%となった。これより、提案手法は標準手法と比較して、平均の消費電力は低下することを示した。

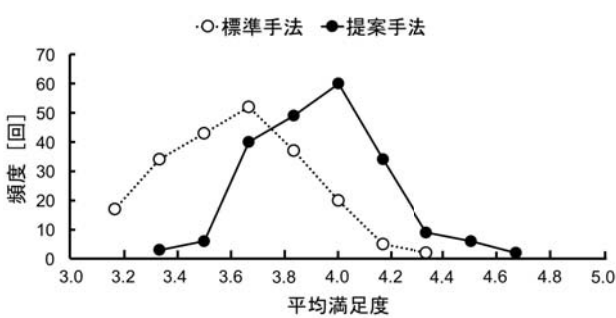


図 6: 平均満足度の分布 (210 回のシミュレーション結果)

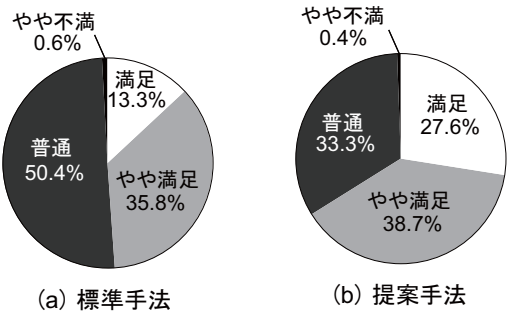


図 7: 各満足度の執務者の割合

表 3: 消費電力 [%]

	標準手法	提案手法
平均	43.0	40.5
標準誤差	0.3	0.5

7. 結論

本研究では、照度と色温度に対する執務者の満足度を考慮した新たな照明制御手法を提案した。提案手法は執務者ごとに作成した満足度の識別モデルにより満足度の評価を行い、確率的山登り法を基にした制御アルゴリズムにより、全執務者の合計満足度の最大化および消費電力の最小化を行う。シミュレーションによる検証実験により、提案手法が標準手法と比較して執務者の合計満足度および「満足」の執務者の割合が向上することを示した。また、平均の消費電力は提案手法の方が低下することを示した。

本実験はシミュレーション上での検証であったため、今後は実環境の被験者実験により実際の満足度を計測し、提案手法の有効性の確認を行う。

参考文献

[1] P.R.Boyce, N.H.Eklund, andS.N.Simpson, Individual Lighting Control: Task Performance, Mood, and Illuminance, Journal Of The Illuminating Engineering Society, Vol.29, pp.131-142 (2000).

[2] 芦辺 麻衣子, 三木 光範, 廣安 知之, 知的照明システムにおける照度と色温度の個別分散制御, 情報処理学会研究報告, パイオ情報学, Vol.2008, No.126, pp.69-72 (2008).

[3] Ryohei Jonan, Mitsunori Miki, Naoki Kawata, Daichi Terai and Hiroto Aida, Implementation to Provide Individual Illuminance and Color Temperature in an Intelligent Lighting System by Estimating the Color Temperature, The 2016 International Conference on Atifical Intelligence (ICAI2016).

[4] I. Kuriki and D.I.A MacLeod, Chromatic adaption after-effects on luminance and chromatic channels, Taylor and Francis, London (1997).