

色彩計測器を用いずに各執務者の要求した照度および色温度を実現する知的照明システム

正会員 三木 光範 (同志社大学) 非会員 川島 梨沙 (同志社大学大学院)
非会員 中林 弘光 (同志社大学大学院) 正会員 間 博人 (同志社大学)

Providing Individual Illuminance and Color Temperature in an Intelligent Lighting System Without Using a Chroma Meter

Member Mitsunori Miki (Doshisha University), Non-Member Risa Kawashima (Doshisha University),
Non-Member Hiromitsu Nakabayashi (Doshisha University) and Member Hiroto Aida (Doshisha University)

ABSTRACT

The authors have conducted a research on an Intelligent Lighting System with low power consumption, that achieves an appropriate illuminance and color temperature for individual office workers by using a chroma meter as a sensor. However, as these chroma meters are expensive, it is not easy to introduce them into offices. For this reason, we have proposed a new method for an Intelligent Lighting System that achieves individual illuminance and color temperature without using a chroma meter. To verify the effectiveness of the proposed method, we have performed a comparative experiment between the method using a chroma meter and the proposed method. From the experiment, it was possible to achieve an appropriate illuminance and color temperature for individual office worker, when the sensors were separated.

KEYWORDS : office lighting, lighting control, lighting system, color temperature, chroma meter

1. まえがき

近年、オフィスにおける快適性の向上を求める声が高まっており、オフィス環境を改善することによって、知的生産性が向上すると報告されている¹⁾。中でも、オフィスの光環境に着目した研究では、執務者の仕事内容によって求められる照度および相關色温度（以下、色温度）は個人によって異なるという研究結果が報告されている²⁾³⁾。ゆえに、オフィスにおいて執務者の快適性を向上するためには、適切な照度および色温度を適切な場所に提供することが必要である。

このような背景から、著者らはオフィスの光環境に着目し、各執務者が要求した照度および色温度を指定した場所に提供する知的照明システムの研究を行っている⁴⁾⁵⁾。知的照明システムでは、色彩計および照度計を兼ね備えたコニカミノルタ社製の色彩照度計測器 CL200-A（以下、色彩照度計）を机上面に設置し、それに各執務者が要求する照度および色温度を設定することで、個々の照明器具が光度を変化させ、電力の最小となるような点灯パターンを実現する。

知的照明システムは既にその有効性が認められ、東京都内複数のオフィスにおいて実証実験を行っている^{6)~8)}。知的照明システムでは、執務者一人一人が色彩照度計を保持することで、各執務者に個別の光環境を提供する。しかし、色彩照度計は高価であることから、執務者ごとに色彩照度計を設置することは容易ではない。そのため、実オフィスに導入した知的照明システムでは、色彩照度計に比べ安価である簡易照度計（以下、照度センサ）を用いて制御を行っている⁷⁾⁸⁾。実オフィスに導入した色彩照度計を用いない知的照明システムでは、各執務者が照度センサに設定した照度を満たし、かつ電力が最小となるよう照度制御のみを行っている。一方、色温度においては、各照明器具の色温度を執務者がユーザーインターフェース上で手動設定することで制御を行っており、これは執務者の負担となっている。

そこで本研究では、色彩照度計および Web ユーザーインターフェースを用いず、指定した場所に各執務者が要求する照度および色温度を提供する照明制御手法を提案する。色彩照度計を不要とし、かつ各照明器具の色温度を Web ユーザーインターフェース上で設定する操作も不要とすることで、執務者の負担低減を狙う。提案手法を組み込んだ知的照明システムを構築し、実オフィスで模擬した環境下で検証実験を行うことでその有効性を示す。

2. 知的照明システム

2.1 知的照明システムの概要

知的照明システムとは、任意の場所に要求した照度および色温度を省電力で提供する照明システムである⁵⁾。複数の調光可能な照明器具、複数の色彩照度計、制御装置および電力計を 1 つのネットワークに接続することで構成される。各執務者は色彩照度計を 1 つずつ所持し、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）を各色彩照度計に設定する。そして、全執務者の目標照度および目標色温度を満たすよう、各照明器具の光源ユニットが動作することで、執務者の要求する光環境を個別に実現する。図 1 に知的照明システムの構成を示す。

また、知的照明システムでは、色彩照度計の物理的な位置情報を必要としない。これは、色彩照度計から得られる照度と照明器具の光度から、照明器具が色彩照度計に及ぼす明るさの影響度合い（照度／光度影響度係数）を学習し、センサ位置を推定しているためである。これにより、各執務者の目標照度および目標色温度を素早く実現することができる。

2.2 知的照明システムの制御

知的照明システムでは、Simulated Annealing (SA) を基盤とした制御アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient : ANA/RC) を用いている⁹⁾。ANA/RC では、設計変数を各照明器具の光度とし、探索ごと各照明器具の光度を執務者に

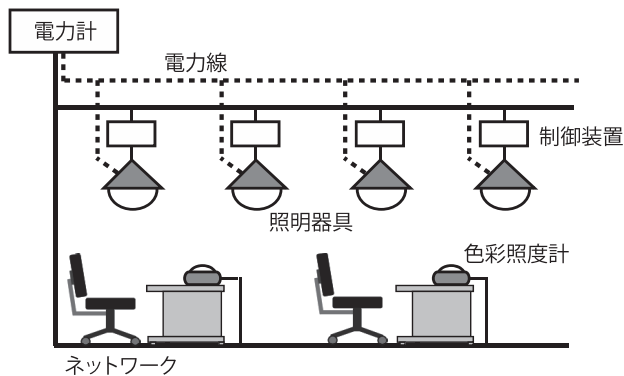


図1 知的照明システムの構成
Fig.1 Configuration of Intelligent Lighting System.

感知されない範囲¹⁰⁾で変化させ、最適な点灯パターンの探索を行う。以下に本アルゴリズムの制御の流れを示す。

- (1) 各色彩照度計に目標照度および目標色温度を設定
- (2) 全照明器具を初期光度および初期色温度で点灯
- (3) 色彩照度計および電力計から計測値（照度，色温度，電力）を取得
- (4) 照明器具の点灯パターンを目的関数に基づき評価
- (5) 次光度をランダムに生成し，照明器具を次光度で点灯
- (6) 色彩照度計および電力計から計測値を取得
- (7) 照明器具の点灯パターンを評価
- (8) 項目(4)および(7)の評価値を比較し，点灯パターンが改良された場合は項目(5)で生成した次光度を受理
- (9) 項目(3)に戻る

以上の項目(3)～(9)までを1ステップ（約2秒）とする。これらの処理を繰り返し行うことで，目標照度および目標色温度を実現し，消費電力を最小化する。

知的照明システムでは，項目(4)および(7)のように評価値を探索する過程において，各照明器具の光度を変化させている。このとき，各照明器具の光度変化量と色彩照度計の照度変化量を基に回帰分析を行うことで，各照明器具における各色彩照度計の照度／光度影響度係数を推定する。色彩照度計の設置位置に近い照明器具は，色彩照度計に与える影響が大きいため照度／光度影響度係数は大きくなる。一方，色彩照度計の設置位置から離れている照明器具は，照度／光度影響度係数が小さくなる。

次に，項目(4)および(7)で用いる目的関数について述べる。知的照明システムの目的は，各執務者の要求する照度・色温度の実現および消費電力の最小化である。そこで，式(1)のように目的関数を定式化する。

$$f_i = P + \omega_E \times \sum_{j=1}^n g_{ij} + \omega_{T_{cp}} \times \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$g_{ij} = \begin{cases} 0 & (E_{cj} - E_{tj}) \geq 0 \\ R_{ij} \times (E_{cj} - E_{tj})^2 & (E_{cj} - E_{tj}) < 0 \end{cases}$$

$$t_{ij} = \begin{cases} 0 & (T_{cpj} - T_{tj}) \geq 0 \\ R_{ij} \times (T_{cpj} - T_{tj})^2 & (T_{cpj} - T_{tj}) < 0 \end{cases}$$

$$R_{ij} = \begin{cases} r_{ij} & r_{ij} \geq \text{Threshold} \\ 0 & r_{ij} < \text{Threshold} \end{cases}$$

i ：照明器具番号， j ：色彩照度計番号， P ：消費電力 [W]

ω_E ：重み（照度）[W/lx]， $\omega_{T_{cp}}$ ：重み（色温度）[W/K]

E_c ：現在の照度 [lx]， E_t ：目標照度 [lx]

T_{cp} ：現在の色温度 [K]， T_t ：目標色温度 [K]

Threshold：回帰係数 r_{ij} の閾値

r_{ij} ：照明器具 i に対する色彩照度計 j の回帰係数

式(1)が示す目的関数は，消費電力 P と照度制約 g_{ij} および色温度制約 t_{ij} から構成され，各照明器具ごとに計算する。なお，照度／光度影響度係数は回帰係数 r_{ij} を基に推定し，この値が大き

いほど色彩照度計 j の設置位置は照明器具 i に近いと言える。各色彩照度計の目標照度および目標色温度を制約条件としたペナルティ関数 g_{ij} および t_{ij} は，回帰係数 r_{ij} により大きく変動するため，回帰係数が大きい照明器具ほどペナルティ関数を最小化するように動作する。また，回帰係数 r_{ij} に閾値 Threshold を設けることで，最適化の対象を色彩照度計に強い影響を及ぼす照明器具に絞ることができる。これにより，色彩照度計の設置位置から離れている照明器具は消費電力の最小化のみを目的として動作する。

2.3 各照明器具の色温度を個別で指定する照明制御手法

知的照明システムを実オフィスへ導入する際，色彩照度計は高価であることから導入が容易ではない。そこで，色彩照度計に比べ安価である照度センサのみを用いた知的照明システムを提案し，実オフィスに導入した⁷⁾⁸⁾。現在，実オフィスで用いている照度センサを図2に示す。

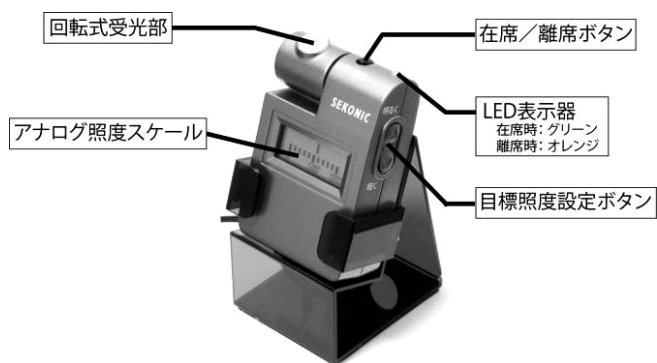


図2 実オフィスに導入したデジタル照度センサ
Fig.2 Digital illuminance sensor introduced in the actual office.

実オフィスに導入した照度センサはイーサネット給電タイプであり，図2に示す受光部から取得した照度値をデジタル信号で制御コンピュータへ送信する。なお，この受光部は回転式となっており，デジタル照度センサの様々な取り付け角度に対応できる。また，目標照度設定ボタンにより目標照度を，在席／離席ボタンにより執務者の在席／離席状態をコンピュータに送信する。この在席／離席状態は，図2に示すLED表示器で確認することができ，目標照度および現在照度はアナログ照度スケールから確認できる。なお，このデジタル照度センサは知的照明システムのために開発したものである。

この照度制御には，照度センサから得られる照度を基に2.2節で述べた照明制御アルゴリズムを用いる。一方，色温度制御においては照明制御アルゴリズムには組み込まず，各照明器具の色温度をユーザインターフェース上で手動指定する方法を用いた。実オフィスに導入した照明器具の色温度制御 Web ユーザインターフェースの一例を図3に示す。

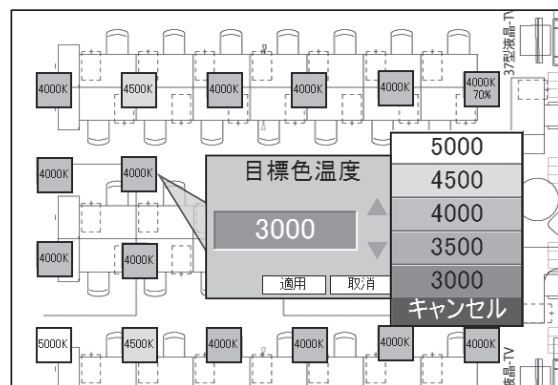


図3 各照明器具の色温度を指定する Web ユーザインターフェースの一例
Fig.3 The example of web user interface changing each lighting's color temperature.

図3で示す Web ユーザインターフェースでは、色温度を変更したい照明器具を1灯または複数灯、執務者が選択する。そして、その照明器具の色温度を執務者が指定することで、照明器具の色温度を制御する。

しかし、照明器具の色温度を手動指定する方法は、執務者が Web ユーザインターフェース上で各照明器具の色温度を設定する必要がある、この操作は執務者の負担といえる。よって、要求する照度および色温度を各照度センサに与えることで、執務者が好む光環境を個別に提供する知的照明システムの新たな照明制御手法を提案する。

3. 色彩照度計を用いず各執務者に個別の照度・色温度を実現する照明制御手法

3.1 照明制御手法の概要

色彩照度計を用いずに、各執務者が要求した照度および色温度を個別に提供する手法を提案する。本提案手法では、照度センサから得られる照度を基に、2.2節で述べた照明制御アルゴリズムを利用して照明制御を行い、各執務者が要求する照度を個別に提供する⁴⁾。一方、各執務者が要求する色温度を個別に提供するためには、照度センサの設置位置に近い照明器具を複数灯抽出し、それらを照度センサに設定した目標色温度で点灯する。また、複数の照度センサに設置位置に近い照明器具が存在する場合、複数の照度センサの平均した目標色温度で点灯する。

なお、提案手法では各照度センサに目標色温度を設定する必要がある。これは、図2のデジタル照度センサに色温度変更ボタンを追加し、設定した色温度をアナログ照度スケールにアナログ色温度スケールとして切り替えて表示することで、設定した目標色温度が知的照明システムの制御コンピュータに送信されるよう、簡単な変更を行うことで可能である。

3.2 照度/光度影響度係数を用いた近傍照明の抽出手法

照度センサの設置位置に近い照明器具の抽出手法について述べる。知的照明システムでは、各照明器具の光度変化量と各照度センサの照度変化量を基に回帰分析を行うことで、照度/光度影響度係数を推定する。この照度/光度影響度係数を基に照度センサに設置位置に近い照明器具を抽出することで、目標照度実現までの時間を短縮し、影響のない照明器具を低光度で点灯する⁹⁾。

知的照明システムにおける照度センサに設置位置に近い照明器具の抽出方法において、著者らは照度センサ直近の2灯と照明配置図を用いて照度センサに設置位置に近い照明群を抽出する手法を提案した¹¹⁾¹²⁾。図4にこの手法の概念を示す。また、各照明器具の左上に照明番号を示す。

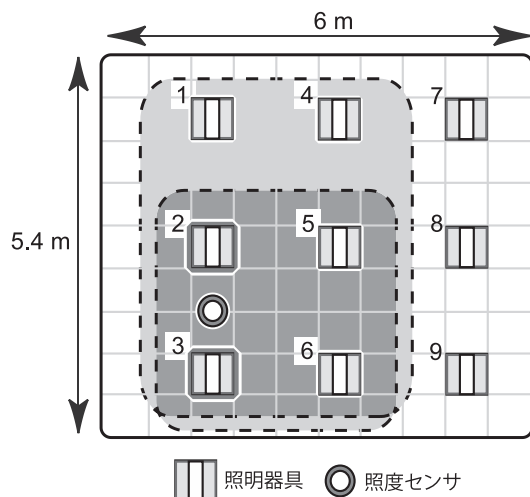


図4 回帰係数と照明配置図を用いた照度/光度影響度係数の再推定
Fig.4 Re-estimation of influence in luminance and illuminance using regression coefficient and lightings placement map.

図4のように1台の照度センサを配置した場合、照度センサ直近の2灯の照明器具（照明2および3）は照度/光度影響度係数から正確に抽出できる。これらを照度センサの近傍照明とする。照度センサに対して影響のある照明器具は、一般的なオフィスにおいて4〜6灯程度である¹¹⁾¹²⁾。しかし、近傍照明以外の照度センサに設置位置に近い照明器具は、照度/光度影響度係数が正しく推定できないことがある¹¹⁾¹²⁾。よってこれらの照明器具は、照明2および3に隣接する照明器具から照明配置図を基に正しく抽出する。この場合、隣接とは縦、横、斜め方向に隣り合う照明器具である。図4より、照明2に近い照明群は照明1, 3, 4, 5, 6であり、照明3に近い照明群は照明2, 5, 6である。これらの照明群の積集合を取ることで、照明2および3いずれに対しても隣接する照明器具、照明5および6が抽出できる。これを照度センサの隣接照明とする。

照度/光度影響度係数によって抽出した近傍照明2および3と、照明配置図を基に抽出した隣接照明5および6を、照度センサの近傍・隣接照明とする。提案手法は、近傍・隣接照明を照度センサの目標色温度で点灯することで、個別の色温度環境を実現する。

3.3 複数の照度センサが存在する環境での色温度制御

複数の照度センサが同じ環境下に存在する場合、各照度センサの近傍・隣接照明が互いに重複する可能性がある。そこで提案手法は、この照明器具を各照度センサの目標色温度を平均した色温度で点灯する。なお、ここでの平均は逆色温度を用いて算出する。図5にこの色温度制御手法の概念を示す。

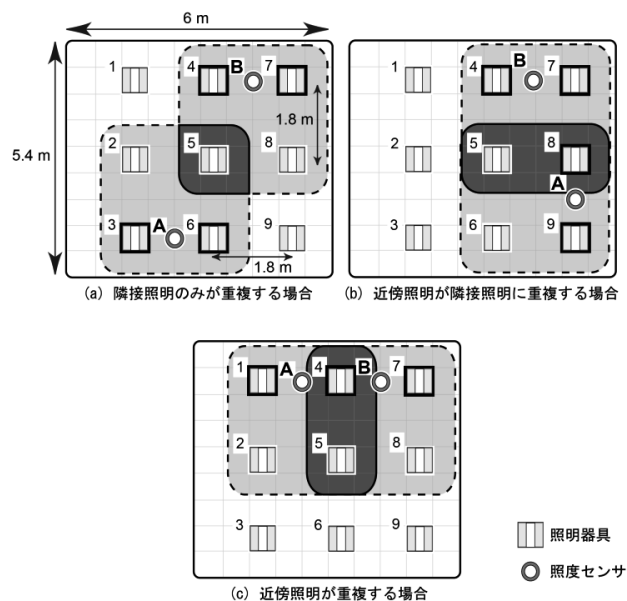


図5 複数の照度センサが存在する環境下での色温度制御手法
Fig.5 Color temperature control method in the environment with multiple illuminance sensors.

図5のように2台の照度センサAおよびBを配置した場合について考える。提案手法において複数の照度センサを配置した場合、各照度センサの近傍・隣接照明が重複するパターンは下記の3通りである。

- ・隣接照明のみが重複する場合：図5-(a)
- ・近傍照明が隣接照明に重複する場合：図5-(b)
- ・近傍照明が重複する場合：図5-(c)

図5-(a)のように照度センサAおよびBの隣接照明（照明5）が重複する場合、その照明器具は両照度センサの平均色温度で点灯する。また、図5-(b)のように照度センサAの近傍照明（照明8）がセンサBの隣接照明（照明5）に重複する場合、照明8は照度センサAの目標色温度で点灯し、照明5は両照度センサの平均色温度で点灯する。そして、図5-(c)のように照度セ

センサ A および B の近傍照明（照明 4），照度センサ A および B の隣接照明（照明 5）が互いに重複する場合，照明 4 および 5 は両照度センサの平均色温度で点灯する。

3.4 照明器具を指定した色温度で点灯する手法

照度センサに設置位置に近い照明器具をそれらの目標色温度で点灯させる方法として，異なる色温度を持つ照明器具の照度比率を制御する手法を用いる。知的照明システムにおける各照明器具は，色温度の異なる 2 色の LED 光源で構成され，異なる色温度の光源の照度比率を変化させることで色温度を変更することが可能である⁷⁾⁸⁾。表 1 に，昼白色および電球色光源の照度比率と色温度の関係性の一例を示す。本提案手法では，照度センサに設置位置に近い複数灯の照明器具を目標色温度で点灯するよう，この照度比率を基に色温度制御を行う。たとえば，照度センサに目標色温度 3900 K が設定された場合，照度センサに設置位置に近い照明器具複数灯を昼白色光源 57%，電球色光源 43% で点灯する。

表 1 色温度と昼白色・電球色光源の照度比率の関係
Table 1 The relationship of color temperature and neural and incandescent lighting's illuminance ratio.

色温度 [K]	昼白色光源 [%]	電球色光源 [%]
5400	100	0
5100	91	9
4800	84	16
4500	76	24
4200	67	33
3900	57	43
3600	47	53
3300	35	65
3000	21	79
2700	0	100

4. 検証実験

4.1 実験概要

提案手法の有効性を示すため，検証実験を行った。実験環境は縦 5.4 m，横 6.0 m の空間であり，照明器具と照度センサ間の鉛直距離は 1.8 m である。実験の際には壁面からの反射光による外乱を避けるため，壁面側に暗幕を設けた。また照明器具には，2700 K ～ 5400 K まで調光可能な SHARP 社製 LED 照明器具を 9 灯，センサにはコニカミノルタ社製色彩照度計 CL-200A を 2 台，図 5 のように設置した。なお，色彩照度計から得られる色温度情報は，提案手法における色温度の実現性を確認するためのみに用い，本検証では色彩照度計を照度センサと仮定して設置し実験を行う。

提案手法は照度センサに設置位置に近い照明器具を目標色温度で点灯し，執務者の要求する色温度環境に近づける簡易的な手法である。よって，検証実験では図 5 で示した，3 通りの照度センサ 2 台の近傍・隣接照明が重複する環境下で実験を行い，照度センサ間の距離と色温度の実現性を明らかにする。

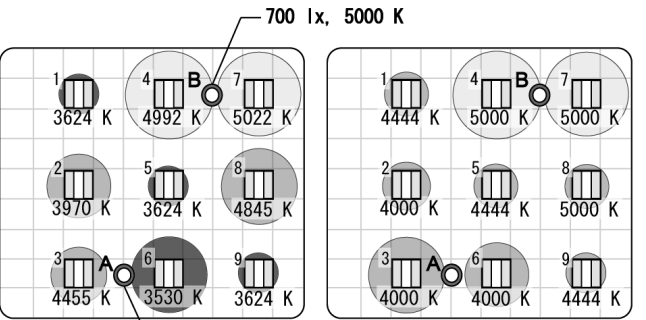
提案手法における近傍・隣接照明の抽出には，60 ステップ分（約 120 秒）のデータから算出された回帰係数を用いる。これは実際のオフィスに導入した知的照明システムで採用している学習時間である。提案手法では，照明器具の色温度を変化させずに照明器具の光度をランダムに変化させ，回帰係数が算出された直後に色温度制御を行う。

また，本検証では 2.1 節および 2.2 節で述べた色彩照度計を用いる従来の知的照明システム⁵⁾と色彩照度計を用いない提案手法との比較実験を行い，提案手法における色温度の実現性を明らかにする。

各照明器具の初期状態を最大点灯光度とし，検証を行う。なお，照明器具の昼白色光源と電球色光源を最大光度で点灯したときの照度および色温度は，約 1600 lx および約 3800 K となる。また，センサ A および B の目標照度・目標色温度はそれぞれ，500 lx および 4000 K，700 lx および 5000 K とした。

4.2 隣接照明のみが重複する場合での検証

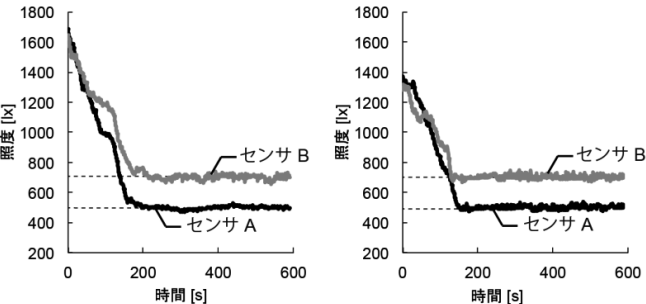
図 5-(a) のように，センサ 2 台の隣接照明のみが重複するようセンサを配置した場合での，各照明器具の点灯状況を検証する。色彩照度計を用いる従来の知的照明システムと色彩照度計を用いない提案手法を共に 300 ステップ（約 600 秒）試行した後の各照明器具の点灯光度および色温度を図 6 に示す。なお，各照明器具を中心とした円の大きさが照明器具の鉛直下方向の光度を示し，照明器具下に示す数値はその照明器具の色温度である。



(a) 色彩照度計を用いる従来手法 (b) 色彩照度計を用いない提案手法
図 6 隣接照明のみが重複する場合での照明点灯パターン
Fig.6 Lighting distribution only when adjacent lighting interferes.

色彩照度計を用いる従来手法の点灯パターンを示す図 6-(a) より，従来手法では各照明器具の色温度が一灯一灯ごとに異なるのが分かる。これは，各センサの目標色温度を満たすよう，色彩照度計から得た色温度情報を基に照明器具の色温度を一灯一灯変化させ，最適な点灯パターンを探索しているためである。図 6-(a) では，センサ A の目標色温度を満たすよう照明 3 が目標色温度よりも高色温度，照明 6 が目標色温度よりも低色温度で点灯している。また照明 4 および 7 は，センサ B の目標色温度を満たすよう 5000 K 程度で点灯した。一方，色彩照度計を用いない提案手法の点灯パターンを示す図 6-(b) では，各センサの近傍および隣接照明がそれぞれの目標色温度で点灯し，互いに重複する照明 5 はセンサ A および B の平均色温度で点灯する。

図 5-(a) における，目標照度の実現性について検証する。各手法の照度履歴を図 7 に示す。なお，図中の波線はセンサ A および B の目標照度を示す。図 7-(a) において，照明制御が安定する 400 秒～600 秒までの間，目標照度と実測照度の平均誤差は 8 lx であった。また，図 6-(b) において，目標照度と実測照度の平均誤差は 9 lx であった。おおよそ 7% 程度の照度差は人の目



(a) 色彩照度計を用いる従来手法 (b) 色彩照度計を用いない提案手法
図 7 隣接照明のみが重複する場合での照度履歴
Fig.7 History of illuminance only when adjacent lighting interferes.

では感知できないため¹⁰⁾、照度誤差がセンサ A は35 lx、センサ B は49 lx 以内であれば、その誤差は十分に小さいと考える。両センサの実測照度は、この条件をどちらも満たす結果となった。

また、図5-(a)における、目標色温度の実現性について検証する。各手法の色温度履歴を図8に示す。なお、図中の波線はセンサ A および B の目標色温度を示す。図8-(a)において、照明制御が安定する400秒～600秒までの間、目標色温度と実測色温度の平均誤差は25 Kであった。また、図8-(b)において、目標色温度と実測色温度の平均誤差は35 Kであった。5.5ミレッド程度の色温度差は人の目では感知できないため¹³⁾、色温度誤差がセンサ A は70 K、センサ B は110 K 以内であれば、その誤差は十分に小さいと考える。両センサの実測色温度は、この条件をどちらも満たす結果となった。

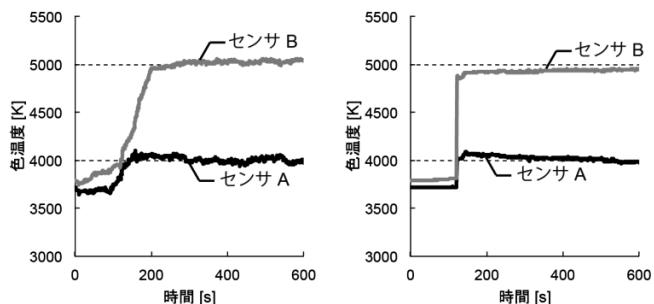


図8 隣接照明のみが重複する場合での色温度履歴
Fig.8 History of color temperature only when adjacent lighting interferes.

4.3 近接照明が隣接照明に重複する場合での検証

図5-(b)のように、センサ A の近傍照明がセンサ B の隣接照明に重複するようセンサを配置した場合での、各照明器具の点灯パターンを検証する。色彩照度計を用いる従来の知的照明システムと色彩照度計を用いない提案手法を共に300ステップ(約600秒)試行した後の各照明器具の点灯光度および色温度を図9に示す。

色彩照度計を用いる従来手法の点灯パターンを示す図9-(a)では、センサ A の目標色温度を満たすよう照明5および6が目標色温度よりも高色温度で、照明8および9が低色温度で点灯した。また、照明4および5は、センサ B の目標色温度を満たすよう5000 K 程度で点灯した。一方、色彩照度計を用いない提案手法の点灯パターンを示す図9-(b)では、各センサの近傍および隣接照明がそれぞれの目標色温度で点灯し、互いに重複する照明8はセンサ A の目標色温度で、照明5は両センサの平均色温度で点灯する。

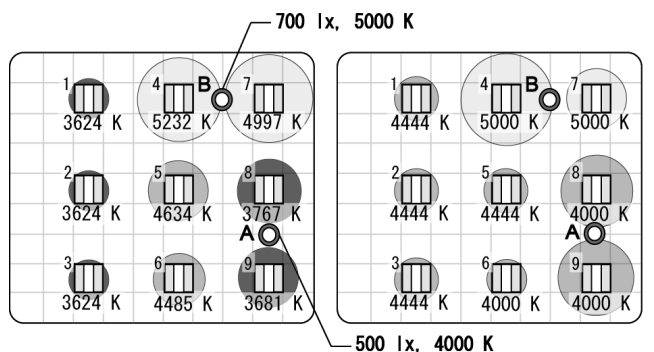


図9 近傍照明が隣接照明に重複する場合での照明点灯パターン
Fig.9 Lighting distribution when neighbored lighting interferes adjacent lighting.

図5-(b)における、目標照度の実現性について検証する。各手法の照度履歴を図10に示す。図10-(a)において、照明制御が

安定する400秒～600秒までの間、目標照度と実測照度の平均誤差は11 lxであった。また、図10-(b)において、目標照度と実測照度の平均誤差は10 lxであった。先程と同様、この照度誤差は十分に小さいと考える¹⁰⁾。

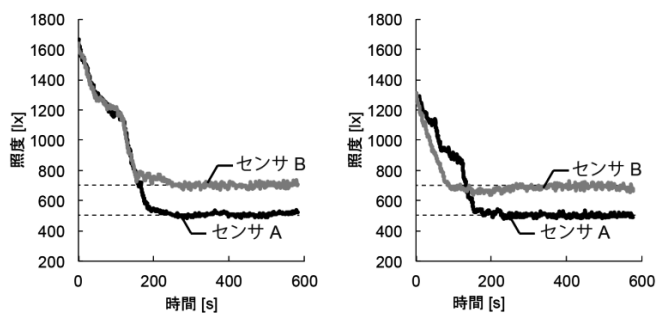


図10 近傍照明が隣接照明に重複する場合での照度履歴
Fig.10 History of illuminance when neighbored lighting interferes adjacent lighting.

図5-(b)における、目標色温度の実現性について検証する。各手法の色温度履歴を図11に示す。図11-(a)において、照明制御が安定する400秒～600秒までの間、目標色温度と実測色温度の平均誤差は18 Kであった。また、図11-(b)において、目標色温度と実測色温度の平均誤差は64 Kであった。先程と同様、この程度の色温度誤差は十分に小さいと考える¹³⁾。

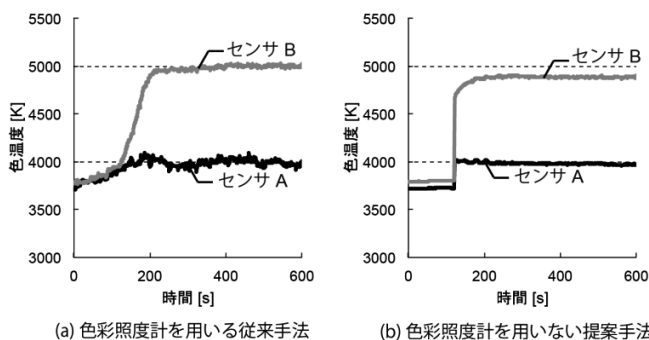


図11 近傍照明が隣接照明に重複場合での色温度履歴
Fig.11 History of color temperature when neighbored lighting interferes adjacent lighting.

4.4 近接照明が重複する場合での検証

図5-(c)のように、センサ2台の近傍照明が互いに重複するようセンサを配置した場合での、各照明器具の点灯状況を検証する。色彩照度計を用いる従来の知的照明システムと色彩照度計を用いない提案手法を共に300ステップ(約600秒)試行した後の各照明の点灯光度および色温度を図12に示す。

色彩照度計を用いる従来手法の点灯パターンを示す図12-(a)

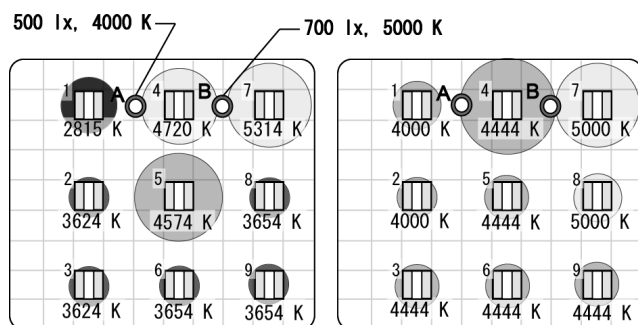


図12 近傍照明が重複する場合での照明点灯パターン
Fig.12 Lighting distribution when neighbored lighting interferes.

では、センサ A および B の目標色温度を満たすよう、中間に位置する照明 4 が両センサの目標色温度の平均程度で点灯した。また、センサ A の目標色温度を満たすよう照明 1 がより低色温度で、センサ B の目標色温度を満たすよう照明 7 がより高色温度で点灯した。一方、色彩照度計を用いない提案手法の点灯パターンを示す図 12-(b) では、両センサが重複する近傍照明（照明 4）および隣接照明（照明 5）が各センサの目標色温度から平均を取った色温度で点灯し、重複してない両センサの近傍照明（照明 1 および 7）はそれぞれの目標色温度で点灯する。

図 5-(c) における、目標照度の実現性について検証する。各手法の照度履歴を図 13 に示す。図 13-(a) において、照明制御が安定する 400 秒～600 秒までの間、目標照度と実測照度の平均誤差は 32 lx であった。また、図 13-(b) において、目標照度と実測照度の平均誤差は 17 lx であった。先程と同様、この照度誤差は十分に小さいと考える¹⁰⁾。

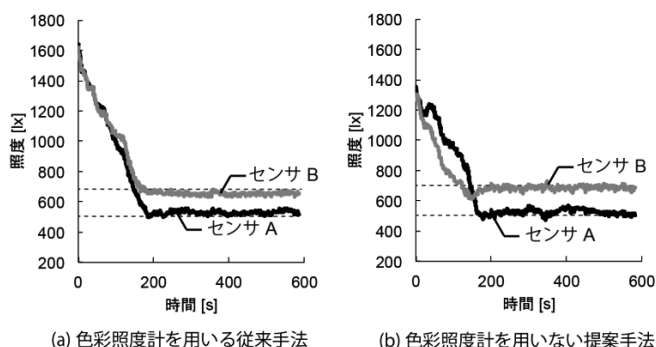


図 13 近傍照明が重複する場合での照度履歴
Fig.13 History of illuminance when neighbored lighting interferes.

また、図 5-(c) における、目標色温度の実現性について検証する。各手法の色温度履歴を図 14 に示す。図 14-(a) において、照明制御が安定する 400 秒～600 秒までの間、目標色温度と実測色温度の平均誤差は 24 K であった。先程と同様、この程度の色温度誤差は十分に小さいと考える¹³⁾。一方、図 14-(b) において、目標色温度と実測色温度の平均誤差は 280 K であった。人の目では感知できない色温度差 5.5 ミレッド程度であり¹³⁾、センサ B は 110 K 以内であれば、その誤差は十分に小さいと考えるため、この誤差はそれを上回る結果となった。

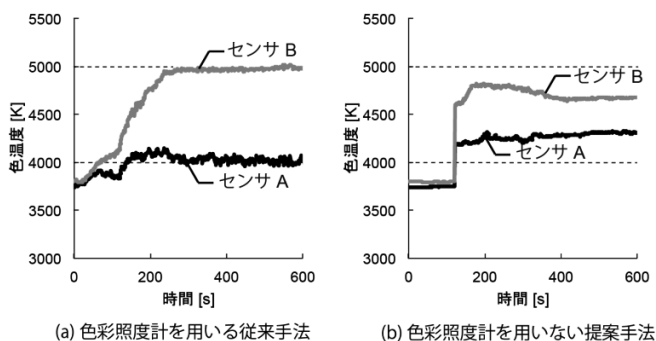


図 14 近傍照明が重複する場合での色温度履歴
Fig.14 History of color temperature when neighbored lighting interferes.

この色温度誤差について考察する。図 12-(b) において、センサ A および B の中間に位置する照明 4 はセンサ A および B の目標色温度の平均値で点灯した。一方、提案手法は照度センサを用いているため、従来手法のように各センサから色温度を取得できない。よって、照明 1 および 7 は、図 12-(a) のように各センサの目標色温度を満たすよう照明器具の色温度補正を行うことができない。また、両センサの目標照度を満たすよう、照明 4 は照明

1 および 7 に比べ高光度で点灯している。よって、照明 7 はセンサ A および B への影響が強いため、両センサの実測色温度が照明 4 の色温度に干渉したことを図 14-(b) から確認した。

以上の結果から、提案手法は執務者の要求する色温度環境を簡易的に実現する手法であるため、近傍照明が重複するようなセンサ間の設置位置に近い環境では、各センサの目標色温度の実現が難しいと考える。そこで実オフィスに本提案手法を導入する場合、執務者は目標色温度を数値的に設定するのではなく、現在の色温度から高くするか、あるいは低くするかのどちらかを選択するよう、相対的に目標色温度を設定する方式を用いる。相対的な増減のみで目標色温度を設定することで、センサの設置位置に近い場合でも執務者の選好色温度を実現できると考える。

5. むすび

本研究では、知的照明システムにおいて色彩照度計を用いず、照度センサのみを用いて各執務者が要求する照度および色温度を実現する照明制御手法を提案した。提案手法では、照度センサに設置位置に近い照明器具を複数灯抽出し、それらを各照度センサに設定した色温度で点灯することで、各執務者に個別の色温度環境を簡易的に提供する。また、複数の照度センサに設置位置に近い照明器具が重複した場合、それらの照明器具は照度センサの平均色温度で点灯する。

検証実験により、各照度センサの近傍照明が重複しないよう照度センサを設置することで、個々の執務者が求める照度および色温度を実現することを示した。色彩照度計を用いず、照度センサのみで各執務者に個別の照度および色温度を提供する照明制御が可能となったことで、知的照明システムの実オフィスへの導入がより容易となる。またシステムの操作を簡略化したことで、執務者の負担低減が期待できる。

参考文献

- (1) 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, No.1322, pp.151-156 (2006).
- (2) Peter R.Boyce, Neil H.Eklund and S.Noel Simpson : Individual Lighting Control : Task Performance, Mood, and Illuminance, JOURNAL of the Illuminating Engineering Society, pp.131-142 (2000).
- (3) 三木光範, 谷口由佳, 吉見真聡: 創造的業務における最適な照度および色温度, 照学誌, 96-8, pp.437-441 (2012).
- (4) 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, 22-3, pp.399-410 (2007).
- (5) 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, BIO, バイオ情報学, 2008-126, pp.69-72 (2008).
- (6) 三木光範, 加来史也, 廣安知之, 吉見真聡, 田中慎吾, 一谷澤淳, 西本龍生: 実オフィス環境における任意の場所にユーザが要求する照度を提供する知的照明システムの構築, 電子情報通信学会論文誌, D, 情報・システム, 94-4, pp.637-645 (2011).
- (7) 小野景子, 三木光範, 吉見真聡, 西本龍生, 近江徹夜, 足立宏, 秋田雅俊, 笠原佳浩: LED 照明を用いた知的照明システムの実オフィスへの導入, 電気学会論文誌, A, 基礎・材料・共通部門誌, 131-5, pp.321-327 (2011).
- (8) 鈴木真理子, 三木光範, 田中慎吾, 吉見真聡, 中川明彦, 齋藤敦子, 福田麻衣子: オフィス内フレームを用いた知的照明システムの構築, 電子情報通信学会論文誌, D, 情報・システム J95-D, pp.549-558 (2012).

- (9) 小野景子, 三木光範, 米澤基: 知的照明システムのための自律分散最適化アルゴリズム, 電気学会論文誌, C, 電子・情報・システム部門誌, 130-5, pp.750-757 (2010).
- (10) 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変動知覚に関する研究, 照学誌, 85-5, pp.346-351 (2001).
- (11) 三木光範, 吉井拓郎, 小野景子, 東陽平: 知的照明システムにおける照度センサの位置推定を用いた消費電力の削減, 電子情報通信学会論文誌, D, 情報・システム J96-D, No.10, pp.1839-1847 (2012).
- (12) 三木光範, 吉井拓郎, 東陽平, 小野恵子: 知的照明システムにおける照度センサに影響のある照明の抽出手法およびそれに伴う消灯制御, 電子情報通信学会論文誌, D, 情報・システム J96-D, No.11, pp.1839-1847 (2013).
- (13) 大田登: 色彩工学, 東京電機大学出版局, 第2版 (2001).
(受付日2014年12月12日/採録日2015年8月25日)



三木 光範 (正会員)

同志社大学理工学部
〒610-0394 京都府京田辺市多々羅都谷1-3
1950年2月16日生まれ。1950年大阪市立大学大学院工学研究科博士課程終了。工学博士。大阪
市立工業研究所研究員, 金沢工業大学助教授を
経て1987年大阪府立大学工学部航空宇宙工学科助教授, 1994年同
志社大学工学部教授。IEEE, 情報処理学会, 人工知能学会, シ
ステム制御情報学会, 日本機械学会, 計算工学会, 日本航空宇宙
学会等各会員。超並列計算研究会代表。文部科学省学術フロンティ
ア研究プロジェクトリーダー。知的オフィス環境コンソーシアム
会長。



川島 梨沙 (非会員)

同志社大学大学院理工学研究科
〒610-0394 京都府京田辺市多々羅都谷1-3
1991年9月20日生まれ。2014年同志社大学理工
学部インテリジェント情報工学科卒。同年, 同
志社大学大学院理工学研究科修士課程入学。知
的照明システムにおける新たな制御アルゴリズムの研究に従事。



中林 弘光 (非会員)

同志社大学大学院理工学研究科
〒610-0394 京都府京田辺市多々羅都谷1-3
1991年5月24日生まれ。2014年同志社大学理工
学部インテリジェント情報工学科卒。同年, 同
志社大学大学院理工学研究科修士課程入学。知
的照明システムにおけるアルゴリズムの改良等の研究に従事。情
報処理学会会員。



間 博人 (正会員)

同志社大学理工学部
〒610-0394 京都府京田辺市多々羅都谷1-3
1978年9月19日生まれ。2010年慶応義塾大学博
士(政策・メディア)取得。同志社大学理工学
部インテリジェント情報工学科助教。センサ
ネットワーク, ユビキタスコンピューティング, インタラクショ
ンなどの研究に従事。情報処理学会, 電子情報通信学会, IEEE,
ACM 各会員。