

# 知的照明システムにおける光度・色温度連動型照明の効果

Effect of the control of color temperature linked with luminance on Intelligent Lighting System

三木 光範\*1    本谷 陽\*2    長野 正嗣\*3  
Mitsunori Miki    Yo Motoya    Masashi Nagano

\*1同志社大学 理工学部

Department of Science and Engineering, Doshisha University

\*2同志社大学 大学院 理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University

\*3同志社大学 大学院 工学研究科

Graduate School of Engineering, Doshisha University

We have been conducting research on Intelligent Lighting System which provides illuminance appropriate for office worker's needs. Currently, the verification experiments of this system is conducted in actual offices.

Although this system is able to provide an appropriate illuminance and color temperature by incorporating chroma sensor, this system is controlled without chroma sensor at the verification experiments because chroma sensor is expensive. Moreover, when setting illuminance and color temperature, selecting the illuminance as well as a color temperature suitable for that illuminance may be difficult for users.

Thus, we propose Intelligent Lighting System which be able to achieve individual illuminance and color temperature averagely preferred by users for that illuminance without chroma sensor. we aim to introduce Intelligent Lighting System at low cost, and improve the level of comfort for workers in an office by simplifying the operations of setting target illuminance and target color temperature.

## 1. はじめに

近年、オフィスにおける執務者の知的生産性および快適性の向上に関する研究が行われるようになり、注目されてきている。その中でも、オフィス環境を改善することで執務者の知的生産性の向上、作業効率の向上、およびストレスの低減が期待できると報告されている [1]。特に、適切な照度を提供することによるオフィスの光環境の改善が知的生産性および作業効率を向上させるために有効であると報告されている [2]。

このような背景から、我々は、オフィスの光環境に着目し、任意の場所にユーザが要求する明るさを提供する知的照明システムを提案している [3]。この知的照明システムは、既に実オフィスに導入され、実証実験が行われている。

光環境に用いる指標には、照度以外にも光度、輝度、および色温度等が存在し、色温度に着目した研究では、照度同様、色温度を改善することで知的生産性が向上すると報告されている [2]。また、知的照明システムにおいては、システムに色彩照度センサを組み込むことで、ユーザに個別の照度および色温度を提供することができる [4]。

しかし、色彩照度センサは高価であり、現在実オフィスに導入されている知的照明システムは、照度センサのみを用いて制御を行い、照度は最適化手法を用いて制御しているのに対して、色温度の制御は、各ユーザが照明ごとに手動で行なっている。また、目標照度および目標色温度を設定する際、照度に対してどのような色温度を設定すべきかわからず、照度だけでなくその照度に適した色温度を選択することは、ユーザにとって難しい場合がある。

そこで、本研究では、色彩照度センサを用いずに、ユーザが目標照度を設定すると、照度およびその照度に対して平均的に選好される色温度を提供する照明制御システムを提案する。

色温度制御可能な知的照明システムをより低コストで実オフィスに導入可能とし、また、目標照度および目標色温度を設定する操作をより単純化することで、オフィスにおける執務者の快適性の向上を目指す。

## 2. 知的照明システム

### 2.1 知的照明システムの概要

知的照明システムとは、任意の場所にユーザが要求する明るさを提供する照明システムである。知的照明システムは、調光が可能な複数の照明機器、複数の照度センサ、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。ユーザごとに照度センサを所持し、ユーザの手元の明るさを計測する。また、ユーザは知的照明システムのユーザインタフェースを通して目標照度を入力する。各照明機器に搭載された制御装置が各照度センサからの照度情報、および電力計から消費電力情報を取得することで、これらの情報を基に、最適化手法を用いて制御装置が照明の明るさを制御し、ユーザが要求する明るさを実現し、かつ消費電力量の削減を図る。

### 2.2 知的照明システムにおける色温度制御

知的照明システムは、色彩照度センサを組み込むことで、ユーザに個別の照度および色温度を提供することが可能である [4]。ユーザは目標照度および目標色温度を設定するだけで、執務に最適な照度および色温度環境が個別に実現できる。

しかし、色彩照度センサは高価であり、現在オフィスに導入した知的照明システムでは、照度センサのみを用いて、照度のみを最適化手法を用いて制御している。色温度の制御に関しては、ユーザがユーザインタフェースを用いて照明を選択し、その照明の色温度を手動で設定することで任意の色温度環境を実現している。また、目標照度および目標色温度を設定する際、照度に対してどのような色温度を設定すべきかわからず、照度だけでなくその照度に適した色温度を選択することは、ユーザにとって難しい場合がある。

連絡先: 本谷 陽, 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, ymotoya@mikilab.doshisha.ac.jp

そこで、本研究では、色彩照度センサを用いず、ユーザが目標照度を設定すると、照度およびその照度に対して平均的に選好される色温度を提供する照明制御システムを提案する。

### 3. 照度と色温度の関係

照度および色温度の関係についての研究は既に行われており、色温度の低い室内では落ち着いた温かい雰囲気となり低照度が適しているのに対して、色温度が高い室内では照度が低いと陰気な雰囲気となるため高照度が適切であると報告されている[5]。図. 1 は、横軸が色温度、縦軸が照度を示し、2本の実線で囲まれた領域が快適であり、それ以外の領域は、不快であるということを示している。

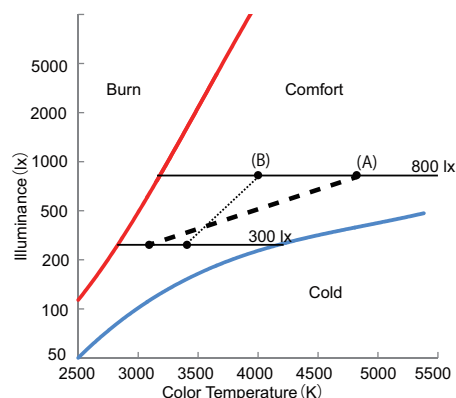


図 1: 照度および色温度の快適領域

## 4. 光度と色温度を連動した照明制御システム

### 4.1 システム概要

本システムは、任意の場所にユーザが要求した照度を提供し、その照度に対して平均的に選好される色温度を提供するシステムである。照明器具には、色温度可変型 LED 照明を用いる。色温度に関しては、前節で説明した、照度と色温度の関係を制御に用いる。本システムは、個々のユーザが目標色温度を入力するのではなく、低照度を要求するユーザには、低色温度、高照度を要求するユーザには高色温度を提供することで執務者が平均的に好む光環境を実現する。執務エリアの管理者が、図. 1 に示す快適領域の範囲において、照度と色温度の関係を入力することで、執務エリア全ての照明がその関係を実現するよう制御を行う。また、執務内容や時刻に応じてこの関係を変更することで、より快適と感じる空間を提供することが可能となる。照度の制御には、ANA/RC を用い、照度制御で実現された光度値に応じて色温度の制御を行う。4.2 節で照度の制御手法、4.4 節で色温度の制御手法について述べる。

### 4.2 照度の制御

照度の制御には山登り法を照明制御に適応したアルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient: ANA/RC)[6] を用いる。山登り法は、現在の解を基に次ステップの解を生成し、解が良好な方向へ向かえば解を受理するという遷移を繰り返していくことで最適解を導くアルゴリズムである。

ANA/RC では、設計変数を照明器具の光度とし、照度をある値以上にするという照度制約の下、消費電力を最小にすることで、最小の消費電力で目標照度を提供することができる。このアルゴリズムでは、次ステップへの各照明の光度変化幅

を決定するための範囲を定める。この範囲を近傍と呼び、この近傍からランダムに次ステップの光度を選択する。この近傍を決定するために、各照明の光度変化量と各センサの照度変化量の関係を最小二乗法によって回帰係数を動的に推定し、照明が照度センサに及ぼす影響度を推定する。ここで得られた影響度を用いて、各照明に同一の近傍を適応するのではなく、影響度に応じて、複数の近傍を使い分ける。状況に応じて適切な近傍を設定することにより、局所最適解に陥りにくくするだけでなく、急速に目標の明るさを満たすことができる。

次に、知的照明システムにおける目的関数について述べる。知的照明システムは、照度センサを設置した場所の照度を目標とする照度以上にし、照明が使用する電力量を最小になるように照明の光度を自律的に求める。これらを目的関数として定式化する必要がある。各照明の目的関数を式 1 に示す。

$$f_i = P + w \sum_{j=1}^n g_{ij} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (1)$$

$$g_{ij} = \begin{cases} 0 & (Lc_j - Lt_j) \geq 0 \\ R_{ij}(Lc_j - Lt_j)^2 & (Lc_j - Lt_j) < 0 \end{cases}$$

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

$f$ : 目的関数  $m$ : 照明の数

$n$ : 照度センサの数  $w$ : 重み

$P$ : 消費電力量  $Lc$ : 現在照度  $Lt$ : 目標照度

$r$ : 回帰係数  $\text{Threshold}$ : 閾値

設計変数を各照明の光度とし、式 1 の  $f_i$  を各照明ごとに最小化することを目的とする。 $f_i$  は消費電力量  $P$  と、現在の照度  $Lc$  とユーザが入力した目標照度  $Lt$  の照度差に照明  $i$  の光度変化量と照度センサ  $j$  の照度変化量から成る回帰係数  $r_{ij}$  を乗算した  $g_{ij}$  (回帰係数が閾値以下の場合には 0 を乗算したもの) からなる。 $g_{ij}$  は現在の照度が目標照度を下回った場合にのみ加算する。これにより、回帰係数が高い照度センサ、すなわち近くに位置する照度センサに最適化の対象を絞ることで目標照度を満たす精度の向上を実現する。また、 $g_{ij}$  には重み  $w$  を乗算し、この  $w$  の値により、目標照度の制約条件または、消費電力量の最小化のどちらかを優先するかを決定する。

最後に ANA/RC の制御の流れについて述べる。以下にこのアルゴリズムの流れを説明する。

- (1) 全ての照明を初期光度で点灯させる
- (2) 各照度センサのセンサ情報 (センサ ID, 現在照度, 目標照度), および電力計の使用電力量を取得し、それらから目的関数値を計算する
- (3) 各照明が回帰係数を用いて設定された近傍から 1 つを選択する
- (4) (3) で決定した近傍内に次光度をランダムに生成し、照明を次光度で点灯させる
- (5) 再び各照度センサのセンサ情報, および電力計の使用電力量を取得する
- (6) センサ情報と使用電力量から次光度で点灯した状態での目的関数値を計算する
- (7) 取得した照度センサの照度変化量と照明の光度変化量から回帰係数を計算する
- (8) 目的関数値が良好になっている場合, その光度を確定し (2) へ戻る  
目的関数値が改悪した場合, 変化させた光度を計算上キャンセルし, (2) へ戻る

以上の動作を2秒間隔で繰り返し行い、目的関数を最小化する。影響度を学習し、照明と照度センサの影響度を動的に把握することで、素早く目標照度を満たすとともに照明の消費電力の削減を可能にする。

### 4.3 照度に対する色温度の決定

本手法では、照度および色温度の関係を執務エリアの管理者が入力し、その関係を満たす照度および色温度を提供することで、執務者が要求する光環境を実現する。前提条件として、オフィスにおいて求められる照度は、300 lx～800 lx程度であるため [7], 300 lx～800 lx を実現可能な照度とする。管理者は、目標照度 300 lx にした場合に求める色温度と、目標照度 800 lx にした場合に求める色温度をシステムに入力する。システムは、管理者が入力したその2点を図. 1 上で線形に結ぶことで、照度と色温度の関係を決定する。例えば、照度 300 lx の場合に色温度 3100 K、照度 800 lx の場合に色温度 4700 K で点灯するようにユーザーがシステムに入力した場合、破線 (A) のような線上の照度と色温度の関係を実現するよう制御を行う。

### 4.4 光度と色温度の対応付け

光度と色温度の対応付けは、4.3 節で管理者が入力した、照度と色温度の関係をを用いる。手元の色温度に関して、複数の照明が異なる色温度で点灯している環境において、点灯光度と点灯色温度から、手元の色温度を求めることは出来ない。そこで、提案手法では、4.2 節で述べた ANA/RC によって目標照度を満たす際の、点灯光度のパターンに対して、適切な色温度で点灯することで、目標の色温度を実現する。ANA/RC の点灯光度のパターンは、ユーザーと照明の位置関係によって大きく次の3つのパターンに分けられる。

- パターン 1: 照明 4 灯の真中にユーザーがいる場合
- パターン 2: 照明 2 灯の真中にユーザーがいる場合
- パターン 3: 照明 1 灯の真下にユーザーがいる場合

パターン 1 の配置の場合、4 灯の照明は低く均等に点灯する。対してパターン 2 では、付近 2 灯が強く点灯し、パターン 3 の場合、真上の照明 1 灯が強く点灯する。本稿では、この中の2つのパターンにおいて、次の2つの光度と色温度の対応付けの手法を用いることで、どちらの手法がより有効であるかを検証する。

- 手法 1: 照明 4 灯の真中の地点において、300 lx および 800 lx を満たすために必要な 1 灯の光度とそれぞれの照度での目標色温度を対応付ける
- 手法 2: 照明 1 灯の真下の地点において、300 lx および 800 lx を満たす際に真上の照明 1 灯が点灯する光度とそれぞれの照度での目標色温度を対応付ける

手法 1 では、照明 4 灯の真中の地点で、300 lx および 800 lx を満たすために必要な光度を 300 lx および 800 lx の目標色温度を対応付ける。予備実験により、照明 4 灯の真中にあるセンサの目標照度を満たすために照明が必要な光度を求めた結果、300 lx を実現するためには、4 灯それぞれ 540 cd、800 lx を実現するためには、それぞれ 1500 cd が必要であることがわかった。そこで、800 cd をユーザーが選択した 300 lx の目標色温度、1500 cd をユーザーが選択した 800 lx の目標色温度と対応付けを行った。例えば、図. 1 の破線 (A) の関係を満たす光度と色温度の対応付けを行う場合、目標照度が 300 lx の場合、目標の色温度は、約 3100 K、800 lx では、約 4700 K であるため、540 cd を 3100 K、1500 cd を 4700 K で対応付け、その間の光度と色温度の関係を線形に結び、点灯光度に依

じて点灯色温度の対応付けを行った。手法 2 も同様に、予備実験を行ったところ、300 lx を実現するためには、真上の照明は、800 cd、800 lx を実現するためには、1500 cd が必要であった。そのため、800 cd をユーザーが選択した 300 lx の目標色温度、1500 cd をユーザーが選択した 800 lx の目標色温度と対応付けを行った。

## 5. 提案システムの有効性の検証

### 5.1 システムの構築

前章で述べた光度と色温度を連動した照明制御システムを同志社大学内の実験スペースに構築した。本システムの領域は、5.4 m × 6.0 m を占め、壁面には暗幕を設けた。また、3100 K～4700 K、56 cd～1530 cd まで調光可能な LED 照明を 9 灯、色彩照度センサ 3 台を設置した。構築した環境の平面図を図. 2 に示す。

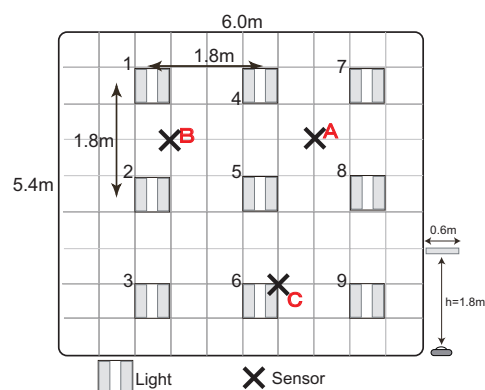


図 2: 実験環境

### 5.2 実験 1: 手法 1 の検証

構築したシステムの動作実験を行う。異なる領域に異なる目標照度を設定した際の、照度の収束状況、および色温度の収束状況を検証する。光度と色温度の連動手法は、4.4 節の手法 1 を用いる。今回、目標とする照度と色温度の関係は図. 1 の破線 (A) とする。それぞれの照度センサの目標照度を、センサ A を 650 lx、センサ B を 500 lx および、センサ C を 350 lx に設定した。この環境で、初期点灯光度を、最大点灯光度の 90% とし実験を行った。

照明制御システムを 150 ステップ試行した後の、目標照度と実測値の照度差、および目標色温度と実測値のミレッド差を図 3 に示す。

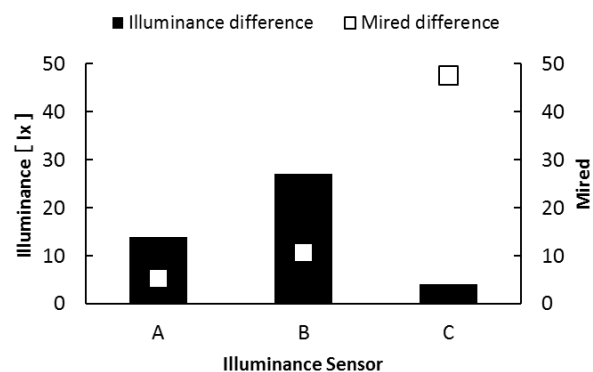


図 3: 実験 1 の実験結果

検証実験の結果、照度に関しては、人の認識できる照度の変化は± 50 lx であるため [8], 全ての照度を満たしていること

がわかる。色温度に関しては、人の目によって色温度の変化を感じるのは5.5 ミレッドとされている [9]。ミレッドとは、色温度の逆数を表した値で、色の違いを求めるために使われる尺度である。実験の結果、高照度、高色温度は満たすことができたが、低照度のセンサには、低色温度は満たすことができなかった。知的照明システムは、照明による消費電力を最小値にするよう制御を行うため、2 センサの距離が近い場合、2 センサの間の照明の点灯光度が高くなり、低照度のセンサ付近の色温度環境に影響を与えることがあるとわかった。また、センサが照明一灯の真下にある場合、真上の照明の光度が大幅に上昇するため、低照度を選択した場合でも、真上の照明は高色温度で点灯してしまうことが原因であると言える。

### 5.3 実験 2：手法 2 の検証（照度と色温度の関係を破線 (A) にした場合）

目標とする照度および色温度の関係を図. 1 の破線 (A) とし、4.4 節の手法 2 を用いて、目標照度および目標色温度を満たせるか検証実験を行う。実験 1 と同様に、それぞれの照度センサの目標照度を、センサ A を 650 lx、センサ B を 500 lx および、センサ C を 350 lx に設定した。実験結果を図 4 に示す。

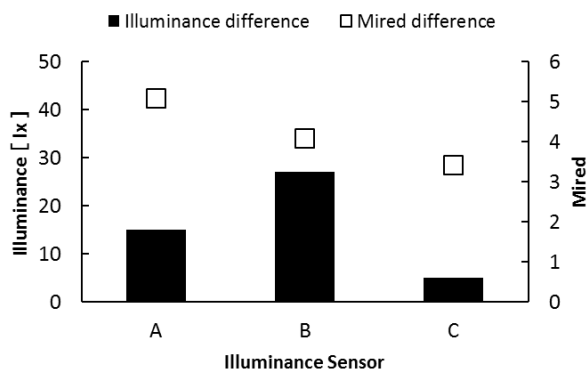


図 4: 実験 2 の実験結果

検証実験の結果、照度に関しては、すべての照度が目標照度との差が  $\pm 50$  lx 以内であるため、全ての照度を満たせていることがわかる。また、色温度に関しては、全てのセンサの色温度が、目標色温度と 5.5 ミレッド以内の差に収まり、色温度を実現できていることがわかった。

### 5.4 実験 3：手法 2 の検証（照度と色温度の関係を破線 (B) にした場合）

実験 1、実験 2 より、手法 2 が高い精度で色温度を満たせることがわかった。そこで、手法 2 を用いて、目標とする照度と色温度の関係を図. 1 の破線 (B) とした場合に、同様に目標照度および目標色温度を満たせるか検証実験を行った。また、これまでの実験と同様に、それぞれの照度センサの目標照度を、センサ A を 650 lx、センサ B を 500 lx および、センサ C を 350 lx に設定した。実験結果を図 5 に示す。

検証実験の結果、照度に関して、全ての照度が目標照度との差が  $\pm 50$  lx 以内であるため、全ての照度を満たせていることがわかる。色温度に関して、すべてのセンサの色温度が目標色温度と 5.5 ミレッド以内の差に収まり、実験 2 と同様に、手法 1 より優位であることが確認された。実験結果より、4.4 節の手法 2 が、光度、色温度連動手法に適していることがわかった。

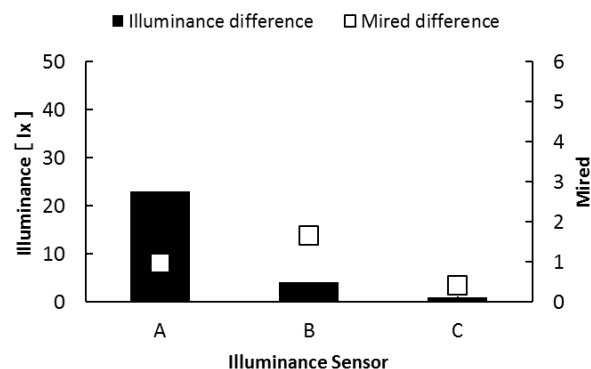


図 5: 実験 3 の実験結果

## 6. まとめ

実オフィスに導入した知的照明システムにおいて、各ユーザに色彩照度センサを用意することはコストが高くなるため、照度センサのみを用いて制御し、ユーザが手動で照明の色温度を変更することで、色温度環境を実現していた。また知的照明システムにおいて、目標照度および目標色温度を設定する際、照度だけでなくその照度に適した色温度を選択することは、ユーザにとって難しい場合がある。

そこで本稿では、色彩照度センサを用いず、色温度を制御可能なシステムを提案した。提案システムは、低照度には低色温度、高照度には高色温度という、人が選好する照度および色温度の関係をを用いるため、低光度で点灯する照明は低色温度、高光度で転倒する照明は高色温度で転倒するシステムを構築した。

検証実験の結果、高照度を求めるユーザには高色温度、低照度を求めるユーザには低色温度を実現することができた。これにより、実オフィスに低コストで色温度制御可能な知的照明システムを導入することが可能となり、また、ユーザが照度を選択すると、その照度に対して平均的に選好される色温度が実現可能となり、目標照度および目標色温度を設定する操作がより単純化することで、執務者の快適性が向上すると考えられる。

## 参考文献

- [1] M. J. Mendell, G. A. Heath, Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature, *Indoor Air, Proc IEEE Int Conf Syst Man Cybern*, Vol.15, pp27-52, 2005
- [2] 大林史明ら, オフィスワークの生産性向上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, *ヒューマンインターフェースシンポジウム 2006*, Vol.1, No.1322, pp.151-156, 2006
- [3] 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.22, No3, pp399-410, 2007
- [4] 三木 光範, 谷口 由佳ら, 照度・色温度可変型照明システムの構築と執務における最適な照度および色温度, *情報科学技術フォーラム講演論文集 9(3)*, 523-524, 2010-08-20
- [5] A.A.Kruithof, Tubular Luminescence Lamps for General Illumination, *Philips Technical Review* 6, pp.65-96, 1941
- [6] 後藤和宏, 知的照明システムのための回帰係数を用いた自律分散最適化アルゴリズム, *照明学会全国大会講演論文集*, Vol.40, pp.123-124, 2007
- [7] JIS. JISZZ9110:照明基準総則, 2011.
- [8] 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の変動知覚に関する研究, *照明学会誌*, Vol.85 No.5, pp.346-351, 2001
- [9] 太田登, 色彩工学, 東京電機大学出版局, 第 2 版, 2001