

# 知的照明システムにおける照度/光度影響度係数を用いない 照明制御回数の削減

The reduction of the lighting control number in the Intelligent Lighting System  
Without Using an Influence factor

上南 遼平\*1    三木 光範\*2    松下 昌平\*1    山口 浩平\*1    間 博人\*2  
Ryohei Jonan    Mitsunori Miki    Shohei Matsushita    Kohei Yamaguchi    Hiroto Aida

\*1同志社大学大学院 理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University

\*2同志社大学 理工学部

Department of Science and Engineering, Doshisha University

We propose a method to reduce a number of lighting convergence control in an Intelligent Lighting System, which is providing required light to an office worker individually. In the conventional method, the advance measurement experiment was needed to reduce the number of lighting convergence control. In the proposal method, the system reduce the number of lighting convergence control by simulating illuminance in the introduced environment by using arrangement layout of the lightings and the illuminance sensors. By using proposal method, we eliminate the need of measurement experiment and aim to improve the easiness of the system's introduction.

## 1. はじめに

我々は、オフィスにおいて各執務者が要求する明るさ（目標照度）を最小の消費電力で提供する知的照明システムの研究を行っている [1],[2]。実オフィスに導入した結果、各執務者に目標照度を提供することに成功し、高いエネルギー性を実現した [4]。知的照明システムは照明が照度センサの照度に与える明るさの大小（照度/光度影響度係数）に応じて適切に照明を制御することで、約 1 分ほどで各執務者の目標照度を実現する。しかし、導入環境の拡大に伴い照明や照度センサの数が増大し、1 回の照明制御にかかる時間が増大することが懸念される。照度/光度影響度係数を用いることで、照明光の壁の反射やパーティションの影響などの導入環境特有の影響を考慮した導入環境の正確なシミュレーション環境を構築できる。これにより、大規模な環境に知的照明システムを導入した場合でも、シミュレーション環境で、各執務者の目標照度を実現する点灯パターンを高速に導出し、照明に反映されることで各執務者の目標照度を従来と同等以上の速度で実現することができた。

これまで、知的照明システムを導入した実オフィスでは、事前に照度/光度影響度係数を計測した。しかし、導入においてオフィスに立ち入り、事前に照度/光度影響度係数を計測することはオフィスにおいては容易ではなく、知的照明システムの普及に対する 1 つの課題である。本研究では、計測が必要な照度/光度影響度係数を用いずに、目標照度への収束制御回数を削減する手法を提案する。検証実験を行い、照度/光度影響度係数を用いることなく、収束制御回数を削減できることを示す。導入環境において照度/光度影響度係数を計測する必要がなくなり、知的照明システムの導入容易性の向上を目指す。

## 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、照明、照明制御装置、照度センサ、および電力計を一つのネットワークに接続することで構成され

連絡先: 上南 遼平, 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, rjonan@mikilab.doshisha.ac.jp

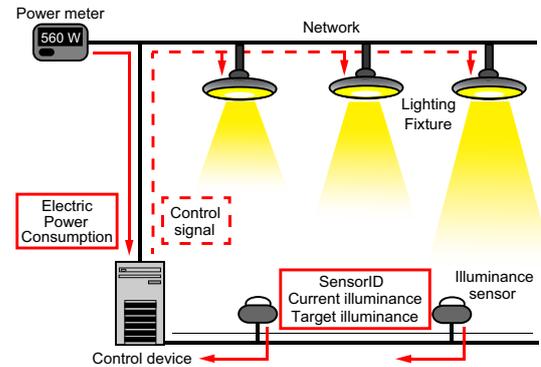


図 1: 知的照明システムの構成

る。各照明の明るさ（光度）を変化させることによって執務者の目標照度を実現し、かつ大幅な省エネルギー性を実現する。知的照明システムの構成を図 1 に示す。

照明制御装置は、照度センサから得られた照度情報、および電力計から得られる電力情報に基づき、現在の照明の点灯パターンに対する有効性を評価する。照明の点灯パターンの微小変化と有効性の評価を繰り返すことで、各執務者が要求する照度の制約条件を満たしつつ、消費電力の最小化を行う。

### 2.2 知的照明システムの制御アルゴリズム

知的照明システムでは、Simulated Annealing (SA) を基礎とした照明制御アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient: ANA/RC) を用いている [1],[3]。SA は、現在の解から近傍の範囲内で近傍解を生成し、目的関数が改善した場合は近傍解を受理する汎用的な局所探索法である。設計変数を照明光度とし、探索毎に各照明光度を人の目に感知されない変化幅の範囲内でランダムに微小変化させ、最適な点灯パターンの探索を行う。知的照明システムでは 1 回あたり約 1 秒の照明制御を 30 回から 100 回行うことで、各執務者の目標照度を実現する。

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。この問題を各照明光度を設計変数とし、執務者の目標照度を満たすという制約条件の

下, 消費電力を最小化する最適化として捉える. そのため目的関数を式 (1) のように定式化し, 目的関数が最小となる最適な点灯パターンを実現する.

$$f_i = P + w \times \sum_{j=1}^n R_{ij}(I_j - I_j^*)^2 \quad (1)$$

$P$ : 消費電力 [W],  $w$ : 重み

$R$ : 照度/光度影響度係数 [lx/cd]

$I$ : 現在照度 [lx],  $I^*$ : 目標照度 [lx]

式 (1) に示す目的関数は消費電力と照度に関する照度制約で構成される. 照度に関する制約条件は現在照度が目標照度を下回った際に加算される値である. 重み  $w$  を変化させることで目標照度の実現と消費電力削減の実現のどちらを優先するかが決まる.

### 2.3 照度/光度影響度係数

照明光度と照度センサの照度には比例関係があることがわかっており, 式 (2) で表すことができる.

$$I = RL \quad (2)$$

$I$ : 照度 [lx],  $L$ : 光度 [cd]

$R$ : 照度/光度影響度係数 [lx/cd]

照度/光度影響度係数  $R$  は照明環境に依存する値であり, 照明環境に変化がない限り定数と見なすことができる. 一般的なオフィスは固定席であることが多く, 照度センサの位置もあらかじめ決まっている. よって, 知的照明システムの導入環境において照明を 1 灯ずつ点灯・消灯させることで, 事前に照度/光度影響度係数を計測することができる. これまで知的照明システムを導入した実オフィスでは, 導入前にオフィスに立ち入り, 照度/光度影響度係数を計測することができた.

### 2.4 照度収束までの照明制御回数の削減

知的照明システムの導入環境の拡大に伴い, 照明器具や照度センサの数は増加する. そのため, 照明の調光信号の伝搬遅延や照度センサからの照度取得の遅延によって, 1 回の照明制御にかかる時間が増加し, 各執務者の目標照度の実現に従来より多くの時間がかかることが懸念される.

各照明から各照度センサに対する正確な照度/光度影響度係数がわかっている場合, 式 (2) より, 任意の点灯パターンにおける各照度センサの照度を算出できる. そのため, 照明光の壁の反射やパーティションの影響など, 照明配置図からは読み取れない導入環境特有の影響を考慮した導入環境の正確なシミュレーション環境を構築できる. シミュレーション環境において, 各執務者の目標照度を実現する点灯パターンを高速に導出し, 照明に反映させることで 1 回の照明制御で各執務者の目標照度を実現することができた. また, 外光のある環境においても, 1 回目の照明制御時の照度センサの取得照度から外光照度を推定し, 外光照度を考慮することで 2 回の照明制御で各執務者の目標照度を実現することができた (以下, シミュレーション手法). これにより, 大規模な環境に知的照明システムを導入した場合でも, 従来よりも高速に各執務者の目標照度を実現可能である.

しかし, 導入時にオフィスに立ち入り, 事前に照度/光度影響度係数を計測することは, オフィスによっては容易ではなく, このことが知的照明システムの普及に対する 1 つの課題である. 導入先のテナントが部外者の立ち入りを好まないため,

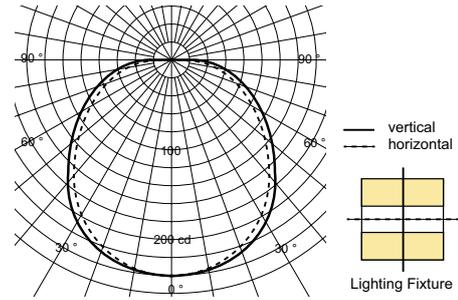


図 2: 配光曲線 (検証実験で用いた SHARP 製 LED 照明)

照度/光度影響度係数の計測ができない事例も存在する. 知的照明システムの導入容易性を向上させ, 普及させていくためには, 推定または計測が必要な照度/光度影響度係数を用いずに照度収束までの照明制御回数を削減する手法が必要である.

## 3. 照度/光度影響度係数を用いない照明制御回数の削減

### 3.1 提案手法の基本原則

計測が必要な照度/光度影響度係数を用いずに照明制御回数を削減する手法を提案する. 提案手法では, 照明と照度センサの配置図から読み取った照明に対する照度センサの位置を基に, 各照明光度から照度センサの照度を算出する. それにより, 照度/光度影響度係数を用いる場合に比べて簡便に導入環境のシミュレーション環境を構築する. シミュレーション環境において, 各執務者の目標照度を実現する点灯パターンを高速に導出し, 照明に反映させることで, 各執務者の目標照度を素早く実現しつつ, 照明制御回数の削減を行う.

### 3.2 照度センサの位置に基づく照度の定式化

照明光度と照度センサの照度の関係は, 式 (3) で表すことができる.

$$I = \frac{L}{d^2} \cos \theta \quad (3)$$

$I$ : 照度 [lx],  $L$ : 光度 [cd]

$d$ : 光源からの直線距離 [m],  $\theta$ : 鉛直角度 [°]

式 (3) から, 照明から照度センサに対する直線距離と鉛直角度を基に, 照度センサの照度を算出する. しかし, 式 (3) は照明の放射特性が考慮されていないため, 照明と照度センサとの直線距離に応じて, 算出される照度に誤差が生じる. そのため, 照明の放射特性を考慮する必要がある. 一般的な照明は設計資料として配光曲線が公開されており, そこから照明の放射特性を考慮する. 後述する検証実験で用いる SHARP 社製 LED 照明の配光曲線を図 2 に示す.

図 2 より, 照明から照度センサに対する鉛直角度が大きいくほど, その方向に対する光度は減衰する. 鉛直角度に応じた光度の減衰を配光曲線から考慮することで, 照度算出時の誤差を小さくすることができる.

### 3.3 制御アルゴリズム

シミュレーションを行い算出した点灯パターンを照明に反映させることで, 照度収束までの照明制御回数の削減を行う. 照度センサの照度を算出するには, 外光照度を考慮する必要がある. 照度センサ設置地点における外光照度は式 (4) で表すことができる.

$$D = I_j - I_L \quad (4)$$

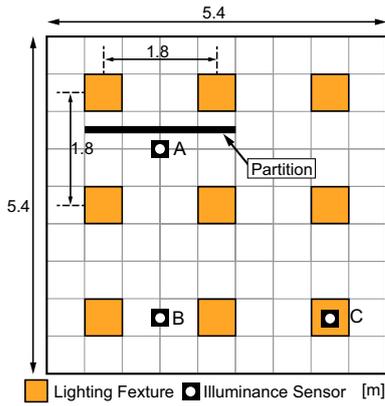


図 3: 実験環境 (平面図)

$D$ :外光照度 [lx],  $I_j$ :照度センサの取得照度 [lx]  
 $I_L$ :照明による照度 [lx]

照明による照度をシミュレーション環境で算出し、式 (4) から外光照度を推定する。提案手法の制御方法を以下に示す。

1. 各執務者は目標照度を設定する。
2. 照度センサから照度情報を取得する。
3. 式 (4) から、外光照度を推定する。
4. シミュレーション環境で、外光を考慮した点灯パターンを算出する。
5. 算出した点灯パターンを照明に反映する。
6. 執務者の目標照度に変更された場合、項目 (1) に戻る。

常に変化する外光に対応するため、項目 (2) から (6) を繰り返す。

本提案手法では、導入環境特有の影響を考慮することはできないため、シミュレーションで算出した照度と照度センサの取得照度に誤差が生じる。これにより、外光照度の推定精度は低下するが、照度センサの取得照度とシミュレーションによる算出照度の照度差を外光照度として考慮することで、実環境において各執務者の目標照度を実現する。

## 4. 検証実験

### 4.1 検証実験の概要

提案手法を組み込んだ知的照明システムの有効性を示すため、検証実験を行う。照明 9 灯と照度センサ A, B および C の 3 台を用いて図 3 に示す実験環境を構築した。実験室は 5.4 m × 5.4 m × 2.45 m の空間で、JIS が推奨するオフィス机の高さである床面から 0.7m の地点に照度センサを設置した。照明には、調光可能な SHARP 社製 LED 照明を用いた。

提案手法では、照明光の壁の反射やパーティションによる遮光などの影響をあらかじめ考慮することはできない。中でもパーティションによる遮光は照度センサの照度に与える影響が大きい。そこで、図 3 に示すように、照度センサ A の上方にパーティションを設置した場合と、設置しない場合において検証実験を行い、提案手法の各環境における有効性を示す。

### 4.2 パーティションの設置されていない環境における検証実験

図 3 に示すパーティションが設置されていない実験環境において、照度収束実験を行う。照度センサ A, B および C の目標照度をそれぞれ 300, 500 および 700 lx に設定した。また、外光を考慮する提案手法の有効性を検証するため、実験開

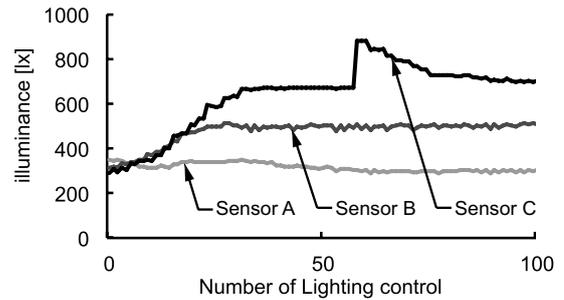


図 4: ANA/RC を用いた場合の照度履歴

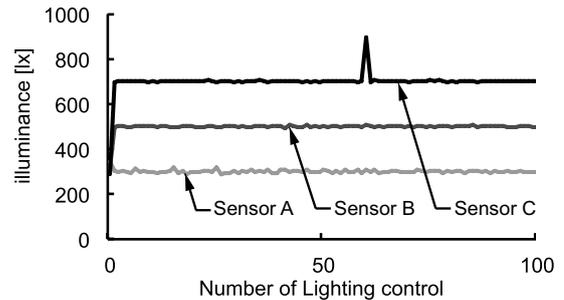


図 5: シミュレーション手法を用いた場合の照度履歴

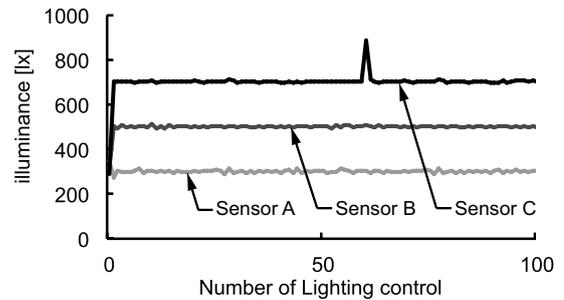


図 6: 提案手法を用いた場合の照度履歴

始から 60 回の照明制御を行った時点で、外光照度として照度センサ C に蛍光灯の明かりを入射させた。ANA/RC を用いた手法、シミュレーション手法および提案手法を用いて照度収束実験を行った。各手法の照度履歴および照明の点灯状況を比較することで、提案手法の有効性を検証する。

ANA/RC を用いた場合の各照度センサの照度履歴を図 4 に、シミュレーション手法を用いた場合の各照度センサの照度履歴を図 5 に、提案手法を用いた場合の各照度センサの照度履歴を図 6 に示す。また、実験開始から 200 回の照明制御を行った時点での各手法における照明の点灯状況を図 7 に示す。図 4 および図 6 より、ANA/RC を用いた場合は約 30 回の照明制御で目標照度を実現しているのに対し、提案手法は 1 回の照明制御で目標照度を実現している。図 5 および図 6 より、シミュレーション手法を用いた場合と提案手法を用いた場合では、照度履歴に大きな差は見られない。また、各手法の照度履歴より照明制御回数が 60 回の時点において、外光照度の入射によって一時的に照度センサ C の取得照度が大きくなっている。図 6 より、提案手法を用いることで外光照度を照度センサが取得してから 1 回の照明制御で再び目標照度を実現している。次に、図 7 より、各手法の点灯状況を比較すると、各手法は同等の点灯パターンを実現している。これらの結果から、提案手法を用いることで、素早く各執務者の目標照度を実現しつつ、照明制御回数を削減できることを示した。

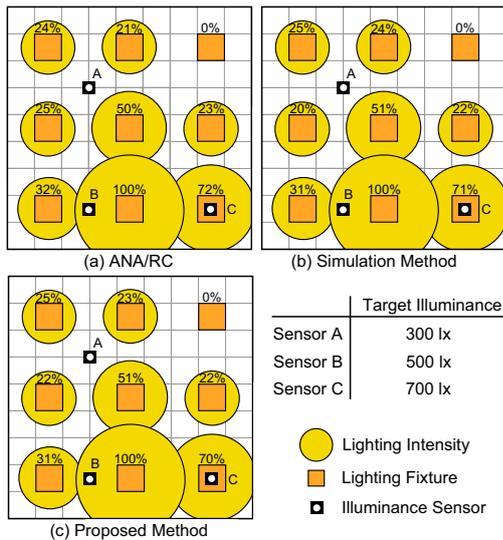


図 7: 各手法の点灯パターン (照明制御回数: 200 回)

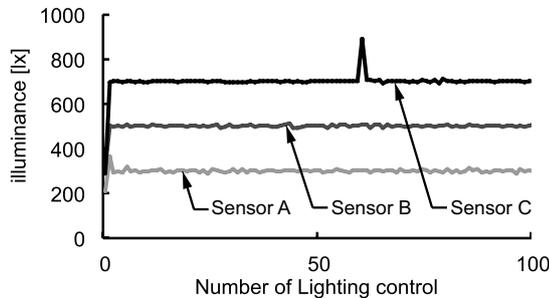


図 8: 提案手法を用いた場合の照度履歴

### 4.3 パーティションが設置された環境における検証実験

図 3 に示すパーティションが設置された実験環境において、照度収束実験を行う。パーティションが設置されていない環境での検証実験と同様の条件において、ANA/RC を用いた手法、シミュレーション手法および提案手法を用いて照度収束実験を行った。各手法の照度履歴および照明の点灯状況を比較し、提案手法の有効性を検証する。

ANA/RC を用いた場合とシミュレーション手法を用いた場合の照度履歴は、パーティションが設置されていない環境における検証実験の結果と大きな差がなかったため、本稿では枚数の都合上省略する。提案手法を用いた場合の各照度センサの照度履歴を図 8 に示す。また、実験開始から 200 回の照明制御を行った時点での各手法における照明の点灯状況を図 9 に示す。

図 8 より、提案手法は照度センサ B および照度センサ C は 1 回、パーティションによる遮光の影響の大きい照度センサ A は 2 回の照明制御で目標照度を実現している。次に、図 9 より、ANA/RC を用いた場合とシミュレーション手法を用いた場合ではパーティション上方の照度センサに影響のない照明が消灯し、省電力な点灯パターンを実現できている。それに対し、提案手法を用いた場合ではパーティション上方の照明が点灯し、最適な点灯パターンを実現できていない。

これらの結果から、提案手法を用いることで、パーティションが設置された環境においても、素早く各執務者の目標照度を実現しつつ、照明制御回数を削減できることを示した。しかしながら、提案手法ではパーティションの設置の有無を判断できないため、パーティションが設置されているために照度センサに影響のない照明も点灯する。そのため、提案手法を用いた場

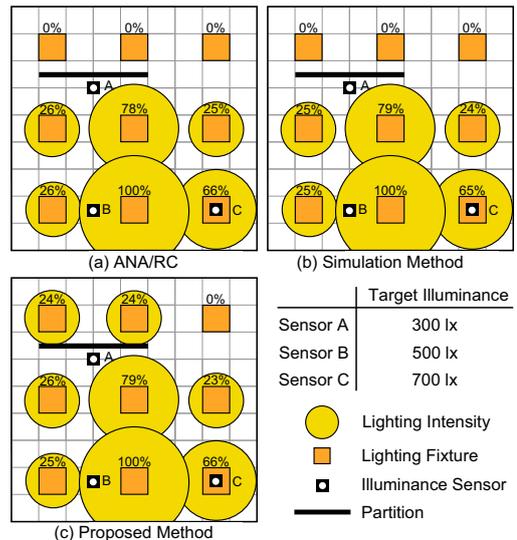


図 9: 各手法の点灯パターン (照明制御回数: 200 回)

合、ANA/RC と従来手法を用いた場合に比べて点灯パターンが悪化することを示した。

日本のオフィスで設置されるパーティションは背の低いものが多く、照度センサに影響のある照明がパーティションの設置によって影響がなくなる場合は少ない。そのため、提案手法の点灯パターンが従来手法に比べて悪化することは少ないと考えている。また、背の高いパーティションが設置された場合は、パーティション等が記載された配置図を用いることで、遮光物の設置をあらかじめ考慮したシミュレーション環境を構築することを検討している。

## 5. 結論

本研究では、照度/光度影響度係数を用いることなく、照度収束までの照明制御回数を削減する手法の提案を行った。提案手法では、照明と照度センサの配置図から照明に対する照度センサの位置を読み取り、照度センサの位置を基に照度算出を行った。シミュレーション環境で各執務者の目標照度を実現する点灯パターンを算出し、照明に反映することで照度収束までの照明制御回数を大幅に削減する。検証実験を行い、提案手法を用いることで、素早く各執務者の目標照度を実現しつつ、照明制御回数の削減が可能であることを示した。導入ごとにオフィスに立ち入り、照度/光度影響度係数を計測する必要はなくなり、導入容易性向上の可能性を示した。

## 参考文献

- [1] M.Miki, T.Hiroyasu and K.Imazato, Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness, Proc. IEEE CIS, **1**, 520-525 (2004).
- [2] M.Miki, K.Imazato and M.Yonezawa, Intelligent lighting control using correlation coefficient between luminance and illuminance, Proc.IASTED Intelligent Systems and Control, **497**[078], 31-36 (2005).
- [3] S.Tanaka, M.Miki, T.Hiroyasu, M.Yoshikata, An Evolutional Optimization Algorithm to Provide Individual Illuminance in Workplaces, Proc IEEE Int Conf Syst Man Cybern, **2**, 941-947 (2009).
- [4] 三木 光範, 加来 史也, 廣安知之, 吉見 真聡, 田中 慎吾, 谷澤 淳一, 西本 龍生, 実オフィス環境における任意の場所にて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 (情報・システム基礎), 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, **94**[4], 637-645 (2011).