

## 数理計画法を用いて外光のない執務空間における個別照度環境を実現する照明制御システム - 消灯も考慮する照明制御システム -

### The Lighting Control System in the Office Space to Realize Individual Illuminance without Outside Light based on Mathematical Programming - Putting the Lights out for an Additional Energy Saving -

三木 光範\*  
Mitsunori Miki

善 裕樹†  
Yuki Zen

吉見 真聡\*  
Masato Yoshimi

#### 1. はじめに

著者らは、オフィス環境において執務者の好む照度が個々に異なるという研究結果 [1] から、オフィスの光環境を改善することで執務者の知的生産性の向上を目指す照明制御システム (以下、知的照明システム [2]) の研究・開発を行っている。知的照明システムは、任意の場所に執務者の要求照度を提供し、省エネルギーを実現する照明システムであり、現在、実用化に向けてオフィスビルに導入して検証実験 [3] を行っている。これらのシステムで用いる制御アルゴリズムは、外光の変化に対応した最適化を可能にするため、進化的アルゴリズムを適用しており、照度センサの照度情報をフィードバックしている。

一方、窓の無いオフィス空間では、照度シミュレーションに基づいて最適化を行うことで、目標照度を満たしつつ省エネルギーを実現することが可能であり、照度センサは不要となる。

以上のことから本稿では、外光のない執務空間において個別照度環境を実現する照明制御アルゴリズムを提案し、その有効性の検証を行う。

#### 2. 知的照明システム

知的照明システムは、任意の場所に要求照度を提供し、省エネルギーを実現するシステムである。複数の調光可能な照明、照度センサおよび電力計をネットワークに接続して構成する。

また、知的照明システムは要求照度を実現し、消費電力量を最小化することを最適化問題として定式化し、最適化アルゴリズムを用いて制御を行う。制御アルゴリズムには Simulated Annealing をもとにして照明制御用に改良を加えた、回帰係数に基づく近傍設計を組み込んだ適応的近傍アルゴリズム (ANA/RC) という進化的アルゴリズムを用いる。

大手町ビルディング等の実オフィスの実験結果 [3] から、各執務者の設定照度は 300 lx から 800 lx の間で個人によって大きく異なり、それぞれの執務に最適な光環境を実現した。また、全体の平均照度はオフィスの基準照度である 750 lx よりも減少し、約 50% の省エネルギーを実現することを確認した。

#### 3. 数理計画法を用いた照明制御アルゴリズム

##### 3.1 制御アルゴリズムの検討

オフィスビルに導入した知的照明システムは、制御アルゴリズムに進化的アルゴリズムを適用しており、外光の変化に伴っ

て各照明の光度を変化させて、目標照度を実現する。外光の変化に対応するために、照度センサの照度情報をもとに最適化を行って制御している。

一方で、オフィス空間には窓のない環境も存在する。この場合、外光の影響がないため照度センサからの照度情報を用いる進化的アルゴリズムによる制御をする必要はなく、照度シミュレーションに基づく最適化を行うことで目標照度の実現が可能である。照度情報をフィードバックする必要がなくなることで、執務者の人数分必要であった照度センサが不要となり、知的照明システムの大幅なコストダウンが見込まれると考えられる。ただし、照明器具の劣化や部屋の配置換え等には対応できないため、再度初期設定を行う必要がある。

以上のことから、外光のない執務環境において進化的アルゴリズムを用いない手法として数理計画法を用いた制御アルゴリズムを提案する。これは、要求照度を満たし、かつ消費電力量の最小化を実現する目的関数を定義し、それをもとに数理計画法を適用して最適化を行い、各照明の最適な点灯パターンを導出する制御アルゴリズムである。

進化的アルゴリズムを利用した知的照明システムでは、動作時に照度センサの照度に及ぼす照明の光度の影響度として、光度変化量および照度変化量から回帰分析を行い回帰係数を推定し、この回帰係数を制御に用いる。よって、照明を消灯するところの回帰係数を推定できないため、消灯は行わず照明は最小点灯光度で点灯する。一方で、これらの影響度を事前に測定してデータベース化することで消灯を行う方法もある。数理計画法を用いる場合は、事前に測定したこれらの影響度を用いるため、要求照度を実現する場所に影響を与えない照明は消灯を行うことができる。最適解、すなわち光度が算出された後、これを照明に送り目標照度を実現する。目標照度が変更された場合、再び最適化を行って目標照度を実現する。

##### 3.2 目的関数の定式化

式 (1) および式 (2) に知的照明システムの目的関数を示す。

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

$$g_j = \begin{cases} 0 & (I_{c_j} - I_{t_j}) \geq 0 \\ (I_{c_j} - I_{t_j})^2 & (I_{c_j} - I_{t_j}) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$P$ : 消費電力量 [W],  $w$ : 重み,  $I_c$ : 現在照度 [lx]  
 $I_t$ : 目標照度 [lx],  $i$ : 照明番号,  $n$ : 照度センサ数

\* 同志社大学理工学部

† 同志社大学大学院

この最適化問題は、設計変数を各照明の光度とし、最小化対象を消費電力量とする。目的関数は消費電力量と照度の制約を満たさないことに対するペナルティ関数（以下、照度に関するペナルティ項）との和である。しかし、この目的関数は設計変数による関数ではないため、数理計画法を用いる制御の場合には設計変数による目的関数の変換を行う必要がある。

消費電力量は、照明の調光可能範囲において照明の光度と消費電力量の間に比例関係が存在することから式 (3) のように定式化する。

$$P = \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot L_i) + \beta \quad (3)$$

$P$ : 消費電力量 [W],  $n$ : 照明数

$\alpha$ : 係数 [W/cd]  $\beta$ : 定数項 [W]  $L$ : 光度

照度に関するペナルティ項については、逐点法を用いて照明の光度と照度の関係を定式化可能である。直線光源の場合は式 (4) のように定式化可能であり、知的照明システムにおいては光度以外のパラメータは光源の特徴および位置関係による値であるため、定数と見なし、式 (5) のように表現する。式 (5) の定数は照明の光度が照度計測地点の照度に影響を与える度合いを示し、影響度係数と呼ぶ。影響度係数は影響度測定という手法により計測する。

$$I = \frac{L}{2} \left\{ \frac{l}{h^2 + d^2 + l^2} + \frac{1}{\sqrt{h^2 + d^2}} \tan^{-1} \left( \frac{l}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right) \right\} \quad (4)$$

$I$ : 照度 [lx],  $h$ : 照明から照度センサまでの高さ [m]

$l$ : 光源の長さ [m],  $L$ : 光度 [cd]

$d$ : 照明直下からの水平距離 [m]

$$I = R \cdot L \quad (5)$$

$I$ : 照度,  $R$ : 影響度係数,  $L$ : 照明の光度

以上で目的関数を設計変数で記述した。消費電力量は光度の一次式、照度に関するペナルティ項は二次式で定式化できたため、目的関数は単峰性であり、数理計画法を適用することが可能である。

### 3.3 消灯を考慮した制御アルゴリズム

制御アルゴリズムには目的関数が非線形二次関数であることから、数理計画法の中でも最も有効とされている準ニュートン法を適用し、ヘッセ近似行列の更新には BFGS 公式を用いた。また、本稿では目標照度を実現する場所に影響を与えない照明は消灯を行い、省エネルギー性を向上させた。消灯する照明は以下の方法で決定する。

1. 影響度係数をもとに実現照度が高い順番に照明を並び替える。
2. 実現照度値の和が 750 lx 以上になるまで照明を選出する。
3. 照明を選出しても実現照度値が 750 lx 以上を超えない場合は上位 4 灯の照明を選出する。

以上の操作を行うことで、消灯する照明を選出して最適化の対象から外して制御を行う。

## 4. 検証実験

図 1 に示す環境で、数理計画法を適用した制御アルゴリズムの有効性を示すための検証実験を行った。窓のない 7.2 m × 6.0 m の室内に白色蛍光灯 15 灯、照度センサ 3 台を設置した。蛍光灯は鉛直下方向に対して 352 cd から 1037 cd の範囲で調光が可能である。照度センサは制御には不要であるが、照度計測のために天井から鉛直下方向 1.9 m の位置に設置した。目標とする照度はセンサ A, B および C を 300, 700 および 500 lx として実験を行った。提案手法によって、目標照度を実現しつつ最適な点灯パターンで点灯しているか、省エネルギーを実現しているかについて検証を行う。

表 1 目標照度値と実測照度値の比較

	目標照度 [lx]	実測照度 [lx]
センサ A	300	316
センサ B	400	409
センサ C	700	723

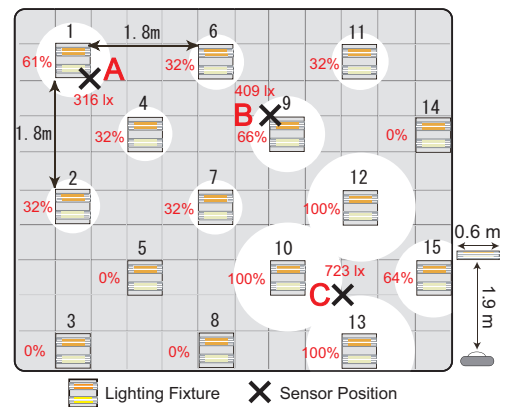


図 1 実験環境

表 1 に目標照度値と実測照度値の比較を、図 1 に探索終了時の光度の状況を示す。図 1 の照明の周辺の白円は照明の点灯割合を示す。表 1 から最大で 23 lx の誤差が発生していることが分かるが、人間は ± 50 lx 未満の明るさの変化を感じにくいという実験結果からこの誤差は目標照度の収束範囲内であると言える。図 1 からは、C 地点の目標照度が高いことから周辺の照明が最大点灯光度で点灯し、A 地点の周辺の照明光度は低いことが分かる。また、各計測地点に影響を与えないと判断された照明 3, 5, 8 および 14 番の照明が消灯している。この実験結果から照明を消灯しない場合と比較して約 12% の消費電力量を削減したことを確認した。

以上の結果から、外光のない執務空間において数理計画法を適用した照明制御アルゴリズムを提案し、その有効性を示すことができた。

## 参考文献

- [1] Peter R. Boyce, Neil H. Eklund, S. Noel Simpson, Individual Lighting Control: Task Performance, Mood, and Illuminance, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp.131-142, Winter 2000
- [2] 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, No.3, pp.399-410, 2007
- [3] 三木光範ら, 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, Vol.J94-D no.4, pp.637-645, 2011