

数理計画法を用いて窓のないオフィスにおける執務者の個別照度を実現する 照明制御システム - 照度センサを用いない照明制御システム -

松下 昌平

Shohei Matsushita

1 はじめに

著者らは、執務者が個別に要求する照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・開発を行っている¹⁾。知的照明システムはその有効性を検証するため、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。実証実験の結果から、知的照明システムの導入前と比較して消費電力を 50% 程度削減することを確認した。

実オフィスで実証実験を行っている知的照明システムの制御アルゴリズムには、Simulated Annealing(SA)を基にした進化的アルゴリズムを用いている。この制御アルゴリズムは、各執務者が所持する照度センサから取得した机上面の照度情報に基づいてフィードバック制御を行うことで最適な点灯パターンを探索している。

一方、オフィスには窓のないオフィスも数多く存在する。そのようなオフィスでは昼光の影響がないため、照度シミュレーションに基づいて最適化を行うことで、照度センサを用いずに最適な照明の点灯パターンを探索することが可能である。

そこで本研究では、窓のないオフィスにおいて、照度センサを用いずに個別照度を実現する新たな照明制御手法を提案し、その有効性を検証する。

2 知的照明システム

知的照明システムは制御装置、照明器具、照度センサ、および電力計を 1 つのネットワークに接続し、最適化アルゴリズムに基づいて各照明の光度を制御するシステムである。このシステムは執務者の要求する照度(目標照度)を実現し、かつ照明の消費電力が最小になるようにそれぞれの照明の光度を制御する。

知的照明システムの制御アルゴリズムには、SA を照明制御用に改良した適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient : ANA/RC) を用いる²⁾。

知的照明システムは、各執務者の目標照度の実現および消費電力の最小化を目的とする。そこで、制御に用いる目的関数を式 (1) のように定式化する。

$$f = P + w \sum_{i=1}^n g_i \quad (1)$$

$$g_i = \begin{cases} 0 & (I_{c_i} - I_{t_i}) \geq 0 \\ R_j (I_{c_i} - I_{t_i})^2 & (I_{c_i} - I_{t_i}) < 0 \end{cases}$$

n : 照度センサ数, w : 重み, P : 消費電力量
 I_c : 現在照度, I_t : 目標照度, R_j : 影響度係数

目的関数 f は消費電力 P と、現在の照度 I_c と目標照度 I_t の照度差を表す g_i からなる。 g_i 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照度ペナルティ項となっている。この定式化した式 (1) を最小化することで最適な照明の点灯パターンを探索する。

3 照度センサを用いずに執務者の個別照度を実現する照明制御システム

3.1 数理計画法を用いた照明制御アルゴリズムの提案

実オフィスに導入している知的照明システム (従来手法) は、進化的アルゴリズムである ANA/RC を用いて照明の光度変化を繰り返すことで、必要な場所に必要な照度を提供している。そのため、昼光の影響や部屋のレイアウト変更、照度センサの移動、および照明器具の劣化など、様々な照明環境の変化に対応可能である。

一方で、オフィスには窓のないオフィスも数多く存在し、そのようなオフィスでは昼光の影響を考慮する必要がない。また、実際に知的照明システムを導入した実オフィスの多くでは、執務者の席が固定席であり、照度センサの移動が発生しないオフィスが多かった。さらに、近年では LED 照明の普及に伴い、照明器具の長寿命化が進んでおり、短期的には照明器具の劣化を考慮する必要はないと考えられる。このように、窓がなく、かつ固定席のオフィスにおいて、照明環境の変化は頻繁に発生するものではないと考える。照明環境に変化がない場合、従来手法のように進化的アルゴリズムを用いる必要はなく、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。この場合、照度情報をフィードバックする必要がないため、照度センサは不要である。ただし、照明器具の長期的な使用による劣化やレイアウト変更などには対応できないため、その度に各照明が各座席の机上面に及ぼす影響度合いの計測が必要である。

以上のことから、窓がなく、かつ固定席のオフィスにおいて、進化的アルゴリズムを用いない新たな照明制御手法として、数理計画法を用いた制御アルゴリズムを提案する。提案手法では、各執務者の要求する照度を満たし、かつ消費電力の最小化を実現する目的関数を定義し、その目的関数を数理計画法を用いて最適化することで、各照明の最適な点灯パターンを算出する。

3.2 目的関数の定式化

知的照明システムの要件に数理計画法を適用する場合、式 (1) で示した知的照明システムの目的関数が設計変数(光度)で演算可能である必要がある。

照明の光度と消費電力は1次式で近似可能な関係にあるため、消費電力 P は式 (2) のように表すことができる。

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

$$P_i = f(L_i) = \alpha L_i + \beta$$

P : 消費電力 [W], i : 照明 ID, n : 照明数
 P_i : 照明 i の消費電力 [W], L_i : 照明 i の光度 [cd]
 α : 係数 [W/cd], β : 定数 [W]

式 (2) における係数 α および定数項 β は照明機種ごとに固有の値である。式 (2) を用いることで、消費電力を照明の光度で表現することが可能となった。

照度に関する制約条件は現在照度と目標照度の差により求めることができる。目標照度は各執務者が設定する定数であるため、照度に関する制約条件を定式化するためには、照明の光度から現在照度を計算する必要がある。ここで、各照明の光度と照度センサから得られる照度の関係には比例関係があり、式 (3) のように表すことができる。また、照明環境に変化がない限り式 (3) の R は定数と見なすことが可能である。以後、この R は照度/光度影響度係数と呼ぶ。

$$I_j = \sum_{i=1}^N (R_{ij} \times L_i) \quad (3)$$

i : 照明 ID, j : 照度センサ ID, N : 照明数
 I_j : 照度センサ j 地点の照度 [lx]
 L_i : 照明 i の光度 [cd]
 R_{ij} : 照度/光度影響度係数 [lx/cd]

式 (3) を用いることで、照度/光度影響度係数 R が既知ならば、各執務者の机上面の現在照度を各照明の光度から計算することができ、照度に関する制約条件を照明の光度で表現することが可能となった。

このように、消費電力および照度に関する制約条件を照明の光度で定式化したことにより、知的照明システムの要件に数理計画法を適用することが可能となった。

3.3 数理計画法を用いた制御アルゴリズム

知的照明システムの目的関数は非線形二次関数であることから、提案手法では勾配法の一つである最急降下法を用いて最適化を行う。以下に提案手法の制御の流れを示す。

1. 各照明を初期点灯光度で点灯
2. 各執務者の目標照度を設定
3. 最急降下法により各執務者の目標照度を實現する最適な点灯パターンを算出
4. 算出した点灯パターンを照明に反映
5. 執務者の目標照度に変更された場合、項目 1) へ戻る

以上の制御を行うことで、各執務者の目標照度を實現する。

4 検証実験

提案手法の有効性を示すため、検証実験を行った。白色 LED 照明 12 灯を設置した、窓のない 7.2 m × 6.0 m の室内で、執務者は 3 名を想定して実験を行った。また、制御には不要であるが、個別照度實現性の確認のため、執務者の位置に照度センサ 3 台を設置し照度計測を行った。照度センサと天井の鉛直距離は 1.9 m である。なお、各執務者の目標照度は、照度センサ A, B, および C の位置にそれぞれ 400, 500, 700 lx を設定した。実験環境および最適解探索後の照明の点灯パターンを図 1 に、各執務者の目標照度と実測照度の比較を表 1 に示す。

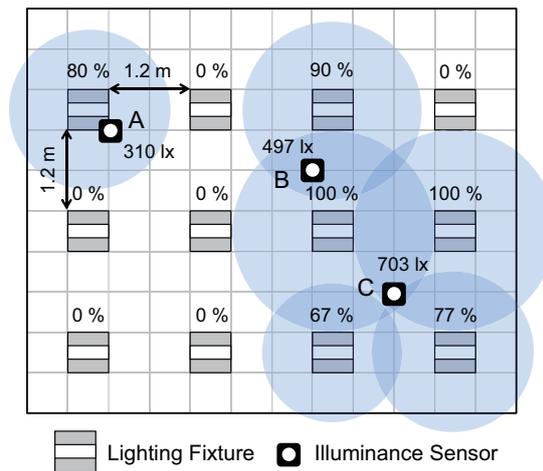


Fig.1 実験環境および結果

Table1 目標照度と実測照度の比較

	目標照度 [lx]	実測照度 [lx]
センサ A	300	310
センサ B	500	497
センサ C	700	703

表 1 から、目標照度と実測照度の差は最大で 10 lx であることがわかる。人間は、現在の照度から ± 約 7 % 以内の照度変化は知覚できないという先行研究の結果から、知的照明システムでは目標照度の ± 約 7 % 以内であれば目標照度を實現していると考える。そのため、図 1 に示した提案手法の点灯パターンは、全ての執務者の地点において目標照度を實現しているといえる。この結果から、提案手法は照度センサを用いずに、個別の目標照度を實現可能であることがわかった。また、図 1 では、必要のない照明は消灯されている。この結果から、提案手法は消費電力削減の観点からも有効であると考えられる。

以上の結果より、窓のないオフィスにおいて、照度センサを用いずに個別照度を實現する新たな照明制御手法を提案し、その有効性を示すことができた。

参考文献

- 1) 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 (2007), pp.399-410.
- 2) 後藤和宏, 三木光範, 廣安知之. 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.