

# 数理計画法を用いて個別照度を実現する 照明制御システム

三木 光範, 善 裕樹\*, 吉見 真聡 (同志社大学)

Lighting Control System to provide the Individual Illuminance using the Mathematical Programming  
Mitunori Miki, Yuki Zen\*, Masato Yoshimi (Doshisha University)

## 1. はじめに

近年, オフィス環境改善による執務者の知的生産性の向上が期待されており, 光環境に着目した研究では, 執務者の好む明るさは個々に異なるという研究結果<sup>(1)</sup>が報告されている。

このような背景から我々は, 任意の場所に要求する明るさ(照度)を提供する分散制御照明システム(以下, 知的照明システム<sup>(2)</sup>)の研究・開発を行っている。知的照明システムは, 実用化に向けて新丸の内ビルディングおよび大手町ビルディング等にシステムを導入して実証実験を行っている<sup>(3)(4)</sup>。その結果, 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, これによりそれぞれの執務に最適な光環境を実現することができた。また, 全体として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%の省エネルギー性を実現した。

システムにおける照明制御アルゴリズムには, 外光の変化に対応した最適化を可能にするため, Simulated Annealing を基にした進化的アルゴリズムを用いている。この制御手法では照度センサの照度情報をフィードバックしている。

しかし, オフィスには窓のない空間も多く存在し, そのような場所では外光の変化は発生せず, 照度シミュレーションに基づいて最適化を行い, 目標照度を実現することが可能である。この場合, 照度センサは不要となる。

以上のことから, 本稿では, 外光のない状況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<sup>(2)</sup>は任意の場所に要求照度を提供し, 省エネルギー性を実現するシステムである。複数の調光可能な照明器具, 照度センサおよび電力センサ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消費電力量を最小化し, 要求照度を実現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により照明制御を行う。アルゴリズムには Simulated Annealing を基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。

## 3. 数理計画法を用いた照明制御アルゴリズム

〈3・1〉新たな制御アルゴリズムの検討 知的照明システムは, 実オフィスにおける検証実験の結果から, 執務者の要求照度を満たし, 調光機能のない照明と比較して約 50%の消費電力量を削減している<sup>(3)(4)</sup>。

知的照明システムは, 照明制御アルゴリズムに進化的アルゴリズムを用いており, 外光の変化に伴って照明の光度を制御し, 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用いて制御している。

一方でオフィスには窓のない空間も多く存在する。窓のない空間では外光の変化は発生せず, 進化的アルゴリズムを用いて制御を行う必要はない。この場合, 照度シミュレーションによる最適化を行うことで目標照度を満たすことができる。また, 照度情報をフィードバックする必要がないため, 照度センサが不要となり, 知的照明システムの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, 部屋の配置換えなどには対応できない。

以上のことから外光のない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。制御に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用いて, 数理計画法を用いた最適化を行う。最適解を導出した後, その結果を照明に反映させて目標照度を実現する。目標照度の変更された場合, 再び最適化を行って目標照度を実現する。

### 〈3・2〉目的関数の定式化と目的関数の単峰性 (式1)

および(式2)に本システムで用いる従来の目的関数を示す。

$$f = P + \omega \sum_{j=1}^n g_j \dots\dots\dots(1)$$

$$g_j = \begin{cases} 0 & I_{C_j} - I_{T_j} \geq 0 \\ (I_{C_j} - I_{T_j})^2 & I_{C_j} - I_{T_j} < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

$P$  : 消費電力量[W],  $\omega$  : 重み,  $I_C$  : 実現照度[lx]

$I_T$  : 目標照度[lx],  $n$  : 照度センサ数

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。

消費電力量に関しては、照明が調光可能な範囲では照明の光度と消費電力量に比例関係が存在するため、(式3)のように定式化する。

$$P = \sum_{i=1}^m (\alpha L_i + \beta) \dots\dots\dots(3)$$

$m$  : 照明数,  $\alpha$  : 係数[W/cd],  $\beta$  : 定数項[W]

一方、照度に関するペナルティ項については、逐点法によって照明の光度と照度の関係を表現可能である。直線光源の場合は(式4)のように定式化が可能であり、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(以下、影響係数)とみなすことができ、(式5)のように表現できる。

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

$I$  : 照度[lx],  $L$  : 光度[cd],  $h$  : 照明とセンサとの距離[m]  
 $d$  : 照明直下からの距離[m],  $l$  : 光源の長さ[m]

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

$I$  : 照度[lx],  $R$  : 影響係数[lx/cd],  $L$  : 光度[cd]

以上で目的関数を設計変数により記述した。消費電力量は光度に関して一次式、照度に関するペナルティ項は二次式で表されるため、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> 準ニュートン法を用いた制御アルゴリズム** 制御アルゴリズム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用いる。ヘッセ近似行列の更新にはBFGS公式を用いる。以下に制御アルゴリズムの流れを示す。

1. 目標照度に変更されている場合は2へ
2. 初期点灯光度を設定
3. 終了条件を満たせば探索終了
4. 降下方向  $\mathbf{S}^k = -\mathbf{H}^k \nabla f(\mathbf{L}^k)^T$  を決定
5. 直線探索問題を解き、ステップ幅を決定
6. BFGS公式によりヘッセ近似行列を更新
7.  $\mathbf{L}^{k+1} = \mathbf{L}^k + \alpha \mathbf{S}^k$  として3へ

#### 4. 検証実験

図1に示す環境の下、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。7.2 m×6.0 mの窓のない空間に白色蛍光灯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1320 cdの範囲で調光することが可能である。照度センサは制御には不要であるが、照度確認のために使用し、天井から鉛直下方向1.9 mの位置に設置した。実現する照度センサの目標照度は、センサA、BおよびCをそれぞれ300, 500および700 lxとした。外光の

ない状況において数理計画法を用いた制御アルゴリズムにより、目標照度を実現可能か、照明が最適な点灯パターンで点灯しているかについて検証を行う。

表1 実現照度と目標照度との比較

Table 1. Comparison with measurement illuminance and target illuminance

	目標照度 [lx]	実測照度 [lx]
センサ A	300	302
センサ B	500	495
センサ C	700	691

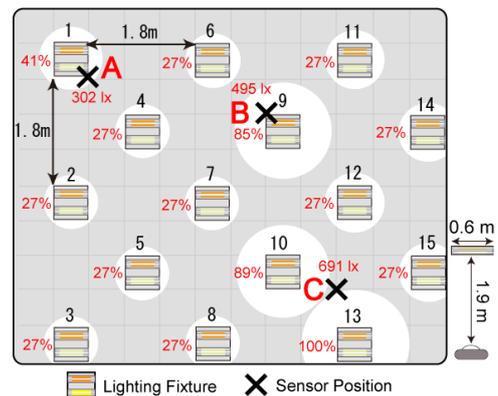


図1 実験環境および光度状況(平面図)

Fig.1. Experiment environment and luminance situation

図1に探索終了時の光度の状況を、表1に目標照度値と実測照度値の比較を示す。表1から最大で9 lxの誤差が見られるが、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れらの誤差は無視できると考えられ、目標照度を満たしていると言える。図1からは、センサCは目標照度が高いことから周辺の10, 13番の照明の光度は高く、目標照度が低いセンサAの周辺の照明は光度が低いことが確認できる。また、照度センサから遠い位置にある2, 3, 5, 8番等の照明は影響を及ぼさないため、最小点灯光度で点灯していることから、各照明は最適な点灯パターンで点灯していると考えられる。

以上の結果から、外光のない状況において進化的アルゴリズムではなく、数理計画法を用い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。

#### 文献

(1) Peter R.Boyce,Neil H.Eklund,S.Noel Simpson,Individual Lighting control:Task performance,mood,illuminance.IJES, pp.131-142, 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,Vol.22,No3,pp.399-410, 2007  
(3)三木光範,加来史也,他: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  
(4)小野景子,三木光範,他: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, Vol.131 No.5 pp.321-327,2011