

# 数理計画法を用いた知的照明システムの最適制御

善 裕樹

## 1 はじめに

近年、オフィスにおいて知的生産性の向上が期待されており<sup>1)</sup>、オフィスの光環境に着目した研究では、オフィスワークの好む明るさが異なるという研究結果も報告されている。また、オフィスビルにおけるエネルギー消費量は年々増加傾向にあり、照明による消費エネルギーは全体の 20% を占めている<sup>2)</sup> ことから、照明を制御することにより消費電力削減の可能性も考えられる。

このような背景から、我々は任意の場所に任意の明るさ(照度)を提供し、省エネルギーを実現する知的照明システムの研究を行っている。知的照明システムは、照明器具、照度センサおよび電力センサから構成されており、照度センサおよび電力センサから得られる情報をもとに最適化手法を用いることで、各ユーザが設定した照度を満たし、かつ電力が最小となる照明の点灯パターンを実現している<sup>3)</sup>。

現在、知的照明システムは、システムの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プロトタイプシステムを導入し、実証実験を行っており、良好な結果を得ている。照明の制御アルゴリズムには Simulated Annealing(SA) をベースとして改良を加えた進化的アルゴリズムを用いている。これは、知的照明システムにおける最適化問題が太陽光などの動的な外乱を受ける問題であり、進化的アルゴリズムを用いることで外光の変化にも柔軟に対応できるようにするためである。現状として、目標照度への収束には数分間を要しており、制御のために電力情報や照度情報等のセンサからの情報を必要とする。

しかし、オフィス空間には太陽光などの影響を受けない窓のない空間も存在しており、そのような状況下では制御に進化的アルゴリズムを用いる必要はない。この場合、照度シミュレーションに基づく最適化を行い、その結果を反映させることで、目標照度を瞬時に満たすことが可能である。また、外光による影響もないため、照度センサは不要になる。

以上のことから、外光の影響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制御アルゴリズムを提案し、その有効性の検証を行う。

## 2 数理計画法を用いた制御アルゴリズム

### 2.1 新たな制御アルゴリズムの検討

現在、知的照明システムはシステムの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のオフィスビルにシステムを導入し、実証実験を行っている。実験からは、各オフィスワークの要求する目標照度に応じてシステムの制御が行われていることが確認されてい

る。また、消費電力量も調光機能のない照明を用いた場合と比較して 50% 程度の削減が可能なることも確認できており、非常に良好な結果を得ている<sup>4)</sup>。

進化的アルゴリズムによる制御では、電力センサおよび照度センサからの情報をもとに常に最適化を行っており、目標照度への収束には数分の時間を要する。これは、知的照明システムが太陽光やタスクライト等の外的影響に常に対応できるようにするためである。

しかし、オフィスビルには窓のない空間のように太陽光の影響を受けないオフィス環境も存在する。外光の影響のない状況下では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い、その結果を反映させることにより目標照度を実現することが可能となる。この場合、瞬時に目標照度を満たすことが可能であり、進化的アルゴリズムを用いた場合に生じていた収束時間の問題を解消することが可能となる。また、システム稼働中は従来のように照度センサからの情報を用いる必要がないため、照度センサは不要となる。ただし、照度シミュレーションを作成する場合のみ必要である。

以上のことから、外光の影響のない環境において進化的アルゴリズムを用いない知的照明システムの新たな制御アルゴリズムを提案する。

### 2.2 新たな制御アルゴリズムの概要

進化的アルゴリズムを用いない最適化手法としてここでは数理計画法を用いる。知的照明システムの制御アルゴリズムとして数理計画法を用いるためには、外光のない状況であること、目的関数を設計変数で表現すること、および目的関数が単峰性であることが前提条件である。これらについては次節にて述べる。

数理計画法を用いたアルゴリズムで制御を行う場合にはまず、コンピュータで照度シミュレーションを行う。シミュレーションにより最適解を算出した後、光度信号値を送信して制御を行うことで目標照度を満たすことが可能となる。目標照度に変更された場合は再びシミュレーションを行う。よって、光度信号値が送信された後は、目標照度に変更されない限り光度の変化は発生しない。

### 2.3 設計変数による目的関数の記述と目的関数の単峰性

知的照明システムの問題を最適化問題として捉え、定式化すると式 (1) および (2) となる。

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

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

$P$  : 消費電力量 [W],  $\omega$  : 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

設計変数を照明鉛直下方の光度  $L$ , 最小化対象を消費電力量  $P$  とする. 目的関数  $f_i$  は消費電力量  $P$  と照度センサ  $j$  の目標照度に関する制約を表現するペナルティ項から  $g_j$  からなる. ペナルティ項  $g_j$  は, 目標照度が満たされない場合に目標照度と照度との照度差の 2 乗を加算する. また, ペナルティ項  $g_j$  には重み  $\omega$  を乗算しており, 重み  $\omega$  によって目標照度への収束を優先するか, 消費電力量の最小化を優先するかを決定することが可能となる.

この目的関数は消費電力量と照度に関するペナルティ項により表現されており, 設計変数で表現されていない. 数理計画法による制御アルゴリズムを用いるためには, 目的関数を設計変数である光度の関数で表現する必要がある.

まず, 消費電力量の設計変数による表現である. 光源の効率を表す指標として発光効率 [lm/W] が用いられているように, 照明の光度と消費電力量は比例関係にある. これを定式化するために, 照明鉛直下方の光度と消費電力量の関係を検証する予備実験を行った. その結果を図 1 に示す.

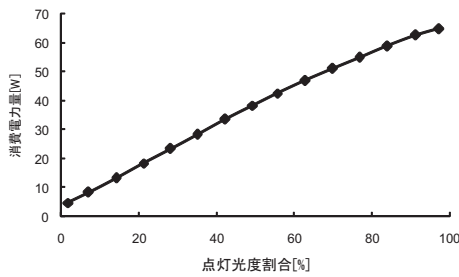


Fig.1 光度と消費電力量の関係

図 1 から光度と照明の消費電力量は 1 次式により近似可能であることが分かる. よって, 複数の照明機器によって構成される場合の知的照明システムの消費電力量は式 (3) で表し, 設計変数による表現が可能となる. 式 (3) の係数  $\alpha$  および定数項  $\beta$  は照明ごとに固有の値である.

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

$P$  : 消費電力量 [W],  $n$  : 照明数

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

一方, 照度に関するペナルティ項も設計変数によって表す必要がある. 直線光源の場合, 照度と光度の関係は逐点法<sup>5)</sup>を用いて式 (4) のように表されるが, 光度以外には光源の特長および照度の計測位置との位置関係による値であるため, 定数と見なすことが可能であり, 照度は式 (5) で表される. よって, 照度に関するペナルティ項も光度の関数で表現可能となる.

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

$I$  : 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

式 (5) に示される影響度係数は, 各照明が各々の照度センサに対して照度を与える度合いを示すものであり, 影響度係数が大きいほど照明が各照度センサに及ぼす影響が大きいことになる. 影響度係数は以下の方法により決定することが可能である.

1. 照度センサを指定の位置に設置する.
2. 全ての照明を点灯させ, 全点灯時の照度を取得する.
3. 照明 1 灯を消灯させ, 消灯させた場合の照度を取得する.
4. 全点灯時の照度と 1 灯のみ消灯させた場合の照度差を計算する.
5. 消灯させた照明を点灯させる.
6. 3~5 を照明台数分だけ繰り返す.

4 で算出された照度差を 2 で取得した照度で除算して, 影響度係数を算出する.

以上で, 目的関数を設計変数についての関数で表現することが可能となった. 続いて, 目的関数の単峰性について検証する. 消費電力量は光度に関する 1 次式, 照度に関するペナルティ項は光度に関する 2 次式で表されており, 目的関数は設計変数に関して 2 次関数である. よって, 照明台数分の多変数 2 次関数となる目的関数は単峰性である.

以上のことから, 制御アルゴリズムとして数理計画法を用いるための条件を満たし, 実装することが可能となった.

## 2.4 最急降下法を用いた制御アルゴリズム

数理計画法には様々な手法が存在するが, 目的関数は 2 次関数であるため, 非線形計画法を用いる. ここでは 1 階微分を用いる簡便な手法であり, 目的関数の勾配が最も大きい方向に探索を進める最急降下法を用いる. 以下に最急降下法を用いた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する.
3. 勾配ベクトル  $\nabla f(L)$  を算出し, 終了条件を満たせば探索を終了する.
4. 降下方向  $s = -\nabla f(x)$  を決定する.
5. 直線探索問題  $f(x + \alpha s) = \min\{f(x + \alpha s) \mid \alpha > 0\}$  を解き, 次光度のステップ幅  $\alpha$  を決定する.
6.  $x = x + \alpha s$  として次光度を決定し, 3 へ戻る.

4の直線探索問題には、黄金分割法を用いた、以上の動作を繰り返すことで目標照度に収束し、かつ、消費電力量を最小に近づけることが可能である。

### 3 検証実験

#### 3.1 実験環境

数理計画法を用いた制御アルゴリズムの検証を行う。実験環境を図2に示す。実験室には7.2[m] × 6.0[m]の空間に調光可能な白色蛍光灯が15台、照度センサが3台設置されている。白色蛍光灯の最小点灯光度は352[cd]、最大点灯光度は1320[cd]である。照度センサは制御には不要であるが、照度確認のため図2のA、BおよびCの位置に設置しており、白色蛍光灯と照度センサの距離は1.9[m]である。なお、外光の影響を受けないようにするために、窓のない空間で実験を行った。

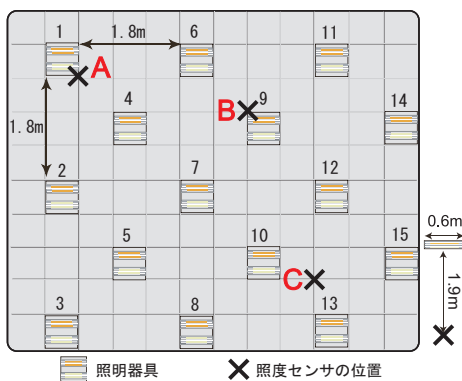


Fig.2 実験環境

#### 3.2 提案した制御アルゴリズムの検証

設定する照度センサの目標照度はセンサ A、センサ B およびセンサ C をそれぞれ、300[lx]、700[lx]、500[lx]とする。ここでは、要求照度を提供可能であるか、不必要な明るさを抑えて最適な点灯パターンで照明が点灯しているかについて検証を行う。

シミュレーション照度値と実測照度値の比較を表1に、結果の光度状況を図3に示す。人間は±50[lx]以内の範囲であれば明るさの変化を感じにくいことから、知的照明システムでは照度と目標照度の差が±50[lx]以内であれば目標照度を満たすと定義している。よって、表1の目標照度と実測照度との照度差は最大で40[lx]であるが、全ての照度センサに対して目標照度を満たしていると言える。

一方、図3から目標照度が高いセンサ B 周辺の6,9および12番の照明光度は高いことが分かる。センサ A およびセンサ C 周辺の照明の光度は、目標照度が低いためセンサ B と比べて低い光度となっている。また、センサから遠い3,5,8 および14番等の照明は照度センサにあまり影響を与えないので点灯していない。以上の結果から、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。

Table1 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	298
センサ B	700	660
センサ C	500	498

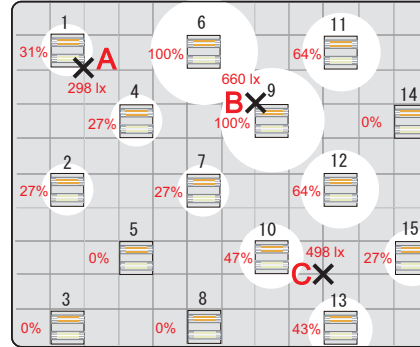


Fig.3 光度状況

### 4 まとめ

我々は、任意の場所に任意の照度を提供し、省エネルギーを実現するシステムとして知的照明システムを提案しているが、その制御アルゴリズムには進化的アルゴリズムを用いており、目標照度への収束には数分間を要していた。しかし、外光のない状況においては、数理計画法を用いて最適解を導出し、その結果を反映させることで目標照度を瞬時に満たすことが可能となる。また、外光の影響がないため、照度センサも不要である。

提案手法では、目標照度に変更された場合にのみシミュレーションを行い、最適解を導出し、光度を変化させて目標照度を満たす。検証実験の結果から、照明を最適な点灯パターンで点灯させつつ、要求された照度を実現することが可能となった。今後は、最急降下法よりも最適解への収束ステップ数が少ない準ニュートン法を用いたアルゴリズムを実装して検証を行う。

### 参考文献

- 1) 大林文明, 富田和宏, 服部瑠子, 河内美佐, 下田宏, 石井裕剛, 寺野真明, 吉川榮和, オフィスワークのプロダクティビティ改善のための環境制御法の研究 - 照明制御法の開発と実験的評価, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006, pp.118-141, 2006
- 2) 財団法人 省エネルギーセンター, <http://www.eccj.or.jp/office.bldg/01.html>
- 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. No.3. pp.399-410. 2007
- 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 小野景子, 三木光範, 米澤基, 知的照明システムのための自律分散最適化アルゴリズム, 電気学会論文誌.C, 電子・情報・システム論文誌, pp.750-757, 2010
- 5) 照明学会, 照明ハンドブック, 2003