

A New Control Algorithm in Intelligent Lighting System using Linear Programming

Fumiya KAKU^{*}, Mitsunori MIKI^{**}, Tomoyuki HIROYASU^{***}, Masato YOSHIMI^{**} and Takuro YOSHII^{*}

(Received December 17, 2010)

We propose a new control algorithm using Linear Programming in the Intelligent Lighting System. To apply this algorithm to the Intelligent Lighting System, we express target function and constraint condition through design variable. To express constraint condition through design variable, we estimate influence factor by Kalman Filter. It shows relation between lighting fixture and illuminance sensor. Simplex Method is derived optimized solution, and lighting fixtures are controlled. As a result of verification, it was confirmed that there is no difference in performance between this algorithm and traditional algorithm.

Key words : Light Control, Linear Programming Problem, Simplex Method, Kalman Filter

キーワード : 照明制御, 線形計画問題, 単体法, カルマンフィルタ

線形計画法を用いた制御アルゴリズムの知的照明システムへの適用

加來史也, 三木光範, 廣安知之, 吉見真聡, 吉井拓郎

1. まえがき

近年, コストの低減や環境への配慮などといった観点から消費エネルギーの削減を目指す取り組みが進んでいる. 特に, オフィスビルなど民生業務部門におけるエネルギー消費量は年々増加しており, 2008年度は 2.92×10^{18} [J] と我が国全体の約 20% を占めるまでになっている¹⁾. オフィスビルのうち, 照明および空調設備による消費エネルギーは約 7 割を占め, これらの

設備において省エネルギーを図る取り組みが求められている²⁾.

一方, オフィス環境がオフィスワーカーの生産性に及ぼす影響に関する研究が広く行われており, オフィス環境を改善することにより, ワーカーの生産性が向上すると報告されている^{3, 4)}. 特に, オフィス環境のうち, 照明環境に着目した研究では, 執務に最適な明るさ(照度)を個人ごとに提供することがオフィス環境の改善に有効であると言及されている⁵⁾. このように

^{*} Graduate School of Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6924 E-mail: fkaku, tyoshii@mikilab.doshisha.ac.jp

^{**} Department of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6930, 6780, Fax: +81-774-65-6716 E-mail: mmiki, myoshimi@mail.doshisha.ac.jp

^{***} Department of Life and Medical Sciences, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6932, Fax: +81-774-65-6019 E-mail: tomo@is.doshisha.ac.jp

執務に最適な明るさを個人ごとに提供することは、タスク照明を用いることにより容易に実現できる。しかしながら、現在のオフィスでは、フロアに均一の明るさを提供する天井照明が一般的であり、タスク照明を採用することは容易ではない。このため、既存の天井照明を用いて、個々に最適な明るさを提供する照明制御システムが必要となる。

このような背景から、著者らは知的照明システムを提案している⁹⁾。知的照明システムは、ユーザが要求する明るさをできるだけ少ない消費電力量で提供する照明制御システムである。この仕様を実現するために、システムの制御に最適化手法を用いている。すなわち、ユーザが要求する明るさを制約としながら消費電力量を最小化する最適化問題と捉え、最適化手法を用いた制御アルゴリズムにより照明の明るさを調節する。現在は、最適化手法として山登り法を用い、回帰分析による影響度推定を利用した制御アルゴリズム、Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient : ANA/RC を用いている¹²⁾。

ANA/RC が基礎とする山登り法は、ヒューリスティック手法であるため、あらかじめ設定したパラメータが探索効率に強く影響する。探索効率が悪ければ目標値への収束性が悪化してしまうため、探索効率の向上は重要な課題である。しかし、知的照明システムにおいてチューニング手法は提案されておらず、探索効率を維持するために大きな人的コストが必要となっている。今後、環境が大規模複雑化するにしたがってパラメータがさらに複雑化することが予想され、チューニングに要するコストも増大すると考えられる。そこで、ANA/RC よりもパラメータ数を減少し、かつチューニングが容易とする手法として、線形計画法を用いた制御アルゴリズムを提案する。

2. 知的照明システム

2.1 知的照明システムの概要

知的照明システムは、ユーザが要求する明るさをできるだけ少ない消費電力量で実現する照明制御システムである。Fig 1 に示すように、照明、照度センサ、お

よび電力センサをネットワークに接続することで構成する。

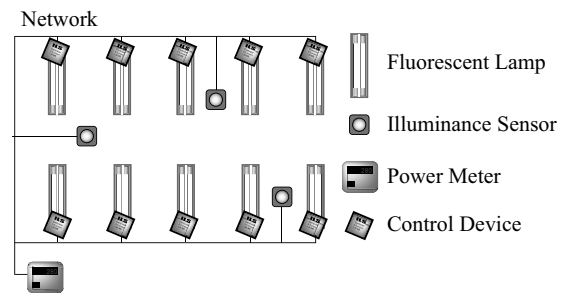


Fig. 1. 知的照明システムの構成。

知的照明システムを構成するハードウェアをネットワークに接続することにより、制御装置が照度センサからの照度情報、および電力センサからの消費電力情報を取得できる。これらの情報を用いて、制御装置が照明の明るさ（光度）を最適化手法に基づいて制御することにより、ユーザが要求する明るさを実現するとともに、消費電力量の削減を図る。

2.2 知的照明システムの制御

2.2.1 制御方法

知的照明システムは、山登り法を照明制御用に改良したアルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient : ANA/RC)¹²⁾ を用いる。

山登り法は、現在の解を基に次ステップの解を生成し、その際の目的関数値の変化に応じて、その解を受理し遷移する処理を繰り返すことで最適解を導くアルゴリズムである。そこで、設計変数を照明の明るさ（光度）、目標照度との差と消費電力量の和を目的関数とし、制御を行う。さらに、ANA/RC では、照明が照度センサに及ぼす明るさの大きさを回帰分析により学習し、その度合いに応じて光度を適切に変化させる^{10, 11, 12)}。これにより、迅速に解を導出することができる。以下、照明が照度センサに及ぼす明るさの大きさを影響度と呼称する。

2.2.2 回帰分析による影響度の把握

探索効率の向上には、照明が照度センサに及ぼす影響度の把握が重要となる。なぜなら、照度センサに及ぼす影響度を把握することで、その影響が大きい、す

なわちその付近にある照度センサに応じた光度変化を行えるためである。

そこで ANA/RC では、回帰分析を用いて照明が照度センサに及ぼす影響度を把握する。回帰分析は、説明変数を変化させた際に観測値がどのように変化するかという 2 変数間の因果関係を定式化する手法である。この因果関係は、式 (1) に示す説明変数 x_i と観測値 y_j の関係式により明示できる。

$$y_j = r_{ij} \times x_i + \beta \quad (1)$$

y :観測値, x :説明変数, r_{ij} :回帰係数 β :定数項

式 (1) に示すように、回帰係数 r_{ij} の大きさによって因果関係が数値化される。そこで、ANA/RC では探索の 1 試行における照明の光度変化量を説明変数 x_i とし、照度センサの照度変化量を観測値 y_j として回帰分析を行う。なお、回帰分析の手法として最小二乗法を用いる。これにより、照明が照度センサに及ぼす影響度を回帰係数として数値化することが可能となる。

2.2.3 制御の流れ

ANA/RC における処理の流れを以下に示す。

1. 初期化パラメータ（初期光度、目標照度、回帰係数の初期値など）を設定する
2. 照明を初期光度で点灯させる
3. 照度センサから照度情報を取得する
4. 電力センサから消費電力情報を取得する
5. 目的関数値を計算する
6. 回帰係数に基づき適切な次光度生成範囲（近傍）を決定する
7. 項目 6 の近傍内に次光度をランダムに生成する
8. 項目 7 の光度で照明を点灯させる
9. 照度センサから照度情報を取得する
10. 電力センサから消費電力情報を取得する
11. 項目 8 で点灯させた光度における目的関数値を計算する

12. 照明の光度変化量および照度センサの照度変化量を基に回帰分析を行う

13. 項目 11 の目的関数値が項目 5 の目的関数値よりも増加した場合、以前の光度に戻す

14. 項目 3 に戻る

以上の項目 3 から項目 14 を探索の 1 ステップとし、この処理を繰り返すことによってできるだけ少ない消費電力量で目標照度を実現できる。

知的照明システムの目的は、目標照度を満足させつつ、消費電力量を最小化することである。したがって、これらを目的関数として定式化する。目的関数を式 (2) に示す。なお、目的関数は照明ごとに独立して計算する。

$$f_i = P + \omega \times \sum_{j=1}^n g_{ij} \quad (2)$$

$$g_{ij} = \begin{cases} 0 & (Ic_j - It_j) \geq 0 \\ R_{ij} \times (Ic_j - It_j)^2 & (Ic_j - It_j) < 0 \end{cases}$$

$$R_{ij} = \begin{cases} r_{ij} & r_{ij} \geq T \\ 0 & r_{ij} < T \end{cases}$$

i :照明 ID, j :センサ ID, ω :重み [W/lx]

P :消費電力量 [W], Ic :現在の照度 [lx]

It :目標照度 [lx], L :光度 [cd], T :閾値

r_{ij} :照明 i に対する照度センサ j の回帰係数

式 (2) に示すように目的関数 f_i は、消費電力量 P および照度センサ j の目標照度に関する制約を表現する罰金項 g_{ij} からなる。罰金項 g_{ij} は、目標照度が満たされず、かつ回帰係数がある程度大きい（閾値 T 以上）場合にのみ正の値となる。これにより、回帰係数が低い照度センサが目標照度を満たさない場合には目的関数値は増加しない。ゆえに、回帰係数の高い、すなわちその照明器具が与える影響が強い照度センサにのみ最適化の対象を絞ることができる。また、回帰係数は前ステップにおける項目 12 で求めた値を用いる。ただし、回帰分析の精度が十分でない段階では、あらかじめ定めた初期値を用いる。また、罰金項 g_{ij} には重み ω を乗算しており、重み ω の設定によって目標照

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切り替えることができる。

2.3 制御アルゴリズムに関する課題

知的照明システムの制御アルゴリズムが基礎としている山登り法はヒューリスティック手法であるため、パラメータチューニングが探索効率に強く影響する。探索効率が悪ければ目標値への収束性が悪化してしまうため、探索効率の向上は重要な課題である。しかしながら、知的照明システムにおけるパラメータチューニングに関する効率的な手法は提案されていない。このため、経験に基づいてチューニングを行わざるをえず、人的コストが生じている。特に、今後の環境の大規模複雑化によって、さらなるパラメータの複雑化が予想される。

このため、効率的なチューニング手法などパラメータチューニングによるコストを低減する手法を提案することが重要となる。そこで本稿では、従来手法よりもパラメータ数を減少し、かつチューニングが容易とする手法として、線形計画法を用いた制御アルゴリズムを提案する。

3. 知的照明システムの対象問題

対象問題の要件は以下の3点である。

1. 消費電力量を最小化する
2. ユーザが要求する明るさ（目標照度）を実現する
3. 照明の制御範囲内である

これを定式化すると式 (3)~ 式 (5) となる。

$$\min \quad f(\bar{L}) = P \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad Ic_j \geq It_j \quad (4)$$

$$\bar{L} \in \{l|m \leq L_i \leq M\} \quad (5)$$

P :消費電力量 [W], Ic :センサの取得照度 [lx]

It :目標照度 [lx], m :照明の光度下限 [cd]

L :照明の光度 [cd], M :照明の光度上限 [cd]

式 (3) に示すように、設計変数は照明の光度である。このため、準ニュートン法などといったヒューリスティック探索ではない最適化手法を用いる場合、目

的関数および制約条件が、設計変数で演算可能である必要がある。

4. 目的関数の定式化

目的関数は、式 (3) に示す消費電力量である。これを設計変数（光度）の関数として表現する。

光源の効率を評価する指標として発光効率 [lm/W] が用いられているように、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、照明鉛直下方向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。結果を Fig 2 に示す。縦軸は消費電力量 [W]、横軸は最大点灯光度に対する光度の割合 [%] である。

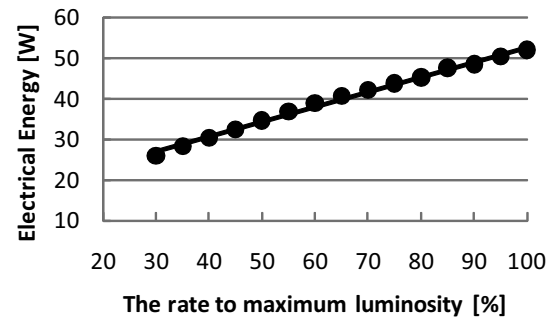


Fig. 2. 光度と電力の関係。

Fig 2 から、光度と消費電力量は 1 次式で近似できる関係にあることがわかる。すなわち、複数の照明器具から構成される知的照明システムにおける消費電力量は式 (6) のように表現できる。

$$P = f_1(\bar{L}) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i \times L_i) + \beta \quad (6)$$

P : 消費電力量 [W], α : 主係数 [W/cd]

β : 定数項 [W], L : 光度 [cd]

式 (6) における主係数 α および定数項 β は照明器具ごとに固有の値である。そのため、使用する照明器具ごとに主係数 α および定数項 β を求める予備実験が必要となる。ただし、目的関数はそれを評価できる精度で十分である。そこで、予備実験を省略するため、目的関数に式 (7) を用いる。

$$P \doteq f_2(\mathbf{L}) = \alpha \sum_{i=1}^n L_i \quad (7)$$

P : 消費電力量 [W], L : 光度 [cd], α は任意値

式 (7) を用いることで, 目的関数を設計変数の線形関数として表現することが可能となる.

5. 制約条件の定式化

5.1 光度と照度の関係

制約条件は, センサの取得照度 I_c および目標照度 I_t からなり, 照度値として表現される. これを設計変数 (光度) の関数として表現する.

照明が強く点灯するとその場が明るくなるといったように, 光度と照度には強い因果関係がある. 光度と照度の関係は, 逐点法により式 (8) で表される¹³⁾.

$$I = \frac{L}{A \times \cos \theta} \oint_{S_e} \frac{dS_e \cos \theta \cos \delta}{p^2} \quad (8)$$

I : 照度 [lx], L : 光度 [cd], S_e : 光源面

A : 光源面の面積 [m^2], p : 光源との距離 [m]

θ : 光源面と受照点との仰角 [rad]

δ : 光源と被照面との仰角 [rad]

式 (8) より, 照度および光度は線形関係にあることがわかる. また, 式 (8) の各項は, 光度を除き, 光源の形状や光源との位置関係などに応じて変化する値である. そのため, これらが変化しない環境下においてはこれらの係数は定数とみなせ, 式 (8) は式 (9) で表すことができる. 以下, この定数を影響度係数 (Influence Factor) と呼ぶ.

$$I = R \times L \quad (9)$$

I : 照度 [lx], R : 影響度係数 [lx/cd], L : 光度 [cd]

式 (9) に示すように, 影響度係数 R を算出することで, 光度および照度の関係を数値化でき, 照度制約を設計変数の関数として表現することが可能となる. 以下, 影響度係数 R の集合を照明環境のモデルと呼ぶ.

5.2 影響度係数の推定

照度制約を設計変数の関数として表現するために, 照明と照度センサの関係性を数値化する影響度係数の推定が必要となる. 光度と照度の関係は式 (9) で表すことができるため, 複数の照明および照度センサから

構成される知的照明システムにおける照明環境のモデル式は式 (10) となる.

$$I_j = \sum_{i=1}^n (R_{ij} \times L_i) + D_j \quad (10)$$

I : 照度 [lx], R : 影響度係数 [lx/cd]

L : 光度 [cd], D : 外光による照度 [lx]

式 (10) に示す影響度係数 R_{ij} および外光による照度 D_j を算出することで, 照度制約を設計変数の関数として表現することが可能となる.

第2章で述べたように, ANA/RC では影響度係数の推定を行っている. これは, 知的照明システムが人間には感知できない範囲で照明の光度をランダムに増減させることを利用している. すなわち, 最適化において様々な光度変化が行われ, それに応じて照度も様々な変化する. この変化を基に状態推定手法を用いて関係性を数値化する.

しかしながら, ANA/RC では状態推定手法として最小二乗法を用いており, 環境の変化に対応することができない. また, 照明ごとに独立して単回帰分析を行っているため, 式 (10) のように光度から照度を予測できるモデルとしては精度が低い. そこで, 本稿では状態推定手法としてカルマンフィルタを用い, またすべての照明情報を統合して状態推定を行う.

5.3 カルマンフィルタによる推定

5.3.1 カルマンフィルタ

カルマンフィルタは, 誤差のある観測値を用いて線形システムの状態変数を推定する手法である. カルマンフィルタは, 雑音が正規分布に従うならば非線形フィルタを含むあらゆるフィルタのうちで最適なフィルタである¹⁴⁾. また, 逐次推定方式であるため, すべてのデータではなく, 最新のデータのみで計算する. ゆえに, 遷移履歴データの増加に伴う計算量の増加を抑制できるため, 長期のシステム稼動に適すると考えられる.

5.3.2 外乱処理

照度センサが取得する照度情報には, 知的照明システムが光度情報を有していない光源などが及ぼす影響,

すなわち外乱が多い。外乱には、以下の4種類が考えられる。

1. センサの雑音
2. 照明のノイズ
3. 誤った照度情報の取得（人影の影響など）
4. 外光の変化

上述の項目1および項目2の外乱は正規分布に従う外乱であるため、カルマンフィルタの特性として、カルマンフィルタの更新処理が進むにつれてその影響が最小化される^{14, 15)}。

一方、項目3の外乱は正規分布に従わないため、異常な観測値として棄却し、現在のモデルに及ぼす影響を最小化する必要がある。そこで、観測値の受理判定を行う。カルマンフィルタが有効であれば、観測予測誤差 ν は正規分布に従う。したがって、観測予測誤差 ν および誤差共分散 S からなる統計量 Φ を用いてカイ2乗検定を行う。統計量 Φ を式(11)に示す。

$$\begin{aligned}\Phi &= \nu_k^T S_k^{-1} \nu_k & (11) \\ \nu_k &= Z_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}\end{aligned}$$

Φ :統計量, ν :観測予測誤差, k :ステップ数

S :誤差共分散, Z :観測値, H :観測モデル, \hat{x} :状態変数

カイ2乗検定の結果、観測予測誤差 ν が有意な確率で生じないならば、観測値を受理し、カルマンフィルタを更新する。有意な確率で生じるならば、観測値を棄却し、カルマンフィルタを更新しない。これにより、項目3の外乱がモデルに及ぼす影響を最小化する。

項目4の外乱は環境の変化としてモデルの補正が必要である。しかし、項目3の外乱との違いは、外乱の影響が短期間ではなく中長期間にわたって続くか否かだけであり、外乱発生時にそれを判断することは困難である。そのため、項目4の外乱は項目3の外乱と同様に棄却処理され、モデルに与える影響が最小化される。その結果、モデルの補正に多くのデータが必要となる。そこで、環境の変化が生じた時点から新たなカルマンフィルタを構成し、一定時間後に従来のフィルタとの比較を行う手法を提案する。

5.4 カルマンフィルタの生成と選択

前節の項目4の外乱による影響によってモデルを補正するため、環境変化に応じてカルマンフィルタを新たに構成し、より環境に適したフィルタを選択する。

まず、知的照明システム稼働時にカルマンフィルタを構成する。以下、主フィルタと呼ぶ。主フィルタを更新するとともに、式(11)に基づいて観測値の受理判定を行う。この結果、異常な観測値が検出された場合、項目4の外乱が発生したと仮定し、その時点から主フィルタとは独立した、新たなカルマンフィルタを構成し、主フィルタと同様に更新する。以下、新たに構成したフィルタを主候補フィルタと呼ぶ。一定時間後に主フィルタと主候補フィルタの比較を行い、式(12)に示す評価規範 Ψ がより小さいフィルタを新たな主フィルタとする。

$$\begin{aligned}\Psi &= \nu_k^T \nu_k & (12) \\ \nu_k &= Z_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}\end{aligned}$$

Ψ :評価規範, ν :観測予測誤差, k :ステップ数

Z :観測値, H :観測モデル, \hat{x} :状態変数

以上の処理により、一定時間後に再び元の環境に戻るような短期間の影響（項目3の外乱）に対してはもともとの主フィルタがそのまま更新され、一定時間後にも環境が変化したままとなる中長期間の影響（項目4の外乱）に対しては外乱の影響を大きく考慮した主候補フィルタが新たな主フィルタとなる。すなわち、比較評価までの時間の大小によって、棄却される外乱と反映される外乱が決定する。

式(10)を用いることで照度制約を設計変数の線形関数として表現することが可能となった。

6. 線形計画法を用いた制御アルゴリズム

6.1 線形計画問題

第4章および第5章で述べた手法によって、対象問題における目的関数および制約条件を設計変数の関数として表現することが可能となった。特に、両者ともに設計変数の線形関数として表現できたため、対象問題を線形計画問題として捉えることが可能となった。

線形計画問題は、制約条件が矛盾しているなどの例外を除き、大域的最適解を導出することが可能である¹⁶⁾。そのため、チューニングの簡略化の観点からだけでなく、解の精度が必ずしも保証されない従来アルゴリズムよりも解精度の観点において利点がある。そこで、線形計画法を用いて解を導出する。

代表的な線形計画法として単体法と内点法の2つがあるが、本稿では単体法を用いる。

6.2 単体法

単体法は、より小さい目的関数値をもつ実行可能基底解を次々と生成していく反復法である。

単体法は、Blandの最小添字規則に従うことで有限収束性をもつことが保証される¹⁶⁾。すなわち、有限回の反復によって最適解を導出する、ないしは解が存在しないことを識別できる。このため、第5章で述べたモデルの精度が高いことが前提であるが、ハードウェアとの同期を必要とせず、コンピュータの内部処理のみで最適解を導出する事が可能である。

ただし、単体法は指数時間アルゴリズムであり、多項式時間アルゴリズムである内点法に比べ、探索効率の点で劣る。しかしながら、一般的には制約条件の数 n に対して $1.5n$ から $3n$ の反復回数で最適解を導出できることが知られており¹⁶⁾、実用上は十分に高速であると考えられる。このため、実装が容易な単体法を用いる。

6.3 単体法を用いた制御アルゴリズム

提案手法における処理は、第5章で述べた照明環境のモデル化を行うモデル化フェーズ、および単体法による求解を行う最適化フェーズからなる。

モデル化フェーズでは、照明の光度を人の目には感知できない範囲で微小に変化させ、その際に生じる照度変化を用いて、カルマンフィルタによる状態推定を行い、式(10)を導出する。この処理は永続的に行ない、カルマンフィルタの精度を向上させ、式(10)を正確に導出する。

モデル化フェーズによって式(10)が更新されるたびに、最適化フェーズを行う。最適化フェーズでは、式(7)および式(10)を用いて、対象問題を式(13)~

式(15)として定式化し、単体法により最適解を導出する。

$$\min \quad f(\bar{L}) = P = \alpha \sum_{i=1}^n L_i \quad (13)$$

$$s.t. \quad Ic_j \geq It_j = \sum_{i=1}^n (R_{ij}L_i) + D_j \quad (14)$$

$$\bar{L} \in \{l|m \leq L_i \leq M\} \quad (15)$$

L : 照明の光度 [cd], P : 消費電力量 [W]

Ic : センサの取得照度 [lx], It : 目標照度 [lx]

R : 影響度係数 [lx/cd], D : 外光による照度 [lx]

m : 照明の光度下限 [cd], M : 照明の光度上限 [cd]

なお、モデル化フェーズにおいてモデルの精度が保証されない、すなわちカルマンフィルタの推定誤差共分散が閾値より高い場合には、モデル化フェーズは行わない。

以上の処理により、ユーザが要求する明るさをできるだけ少ない消費電力量で実現する光度を導くことが可能となる。

7. 提案手法の検証

7.1 実験環境

シミュレーションのモデルは、知的照明システムを導入したオフィスの1つである三菱地所株式会社エコツェリア(東京都千代田区新丸ビル)とした。これをモデルとした理由は、照明器具および照度センサの配置情報が既に得られていたためである。エコツェリアでは、10.1[m] × 7.2[m] のフロアに13名のオフィスワーカーが執務を行っている。オフィスワーカーにはそれぞれ固定の座席が与えられており、それぞれの机上面における照度を計測するための照度センサを1台ずつ設置する。また光源として照明器具が24台設置されている。照明器具および照度センサの配置をFig 3に示す。なお、Fig 3内の数字はそれぞれ、照明識別用のIDナンバーおよび照度センサ識別用のIDナンバーである。

シミュレーションにおける照度計算は、照明の光度から、逐点法¹³⁾を基に算出する。なお、照度センサの観測雑音を模擬するために、平均値0 [lx], 分散5

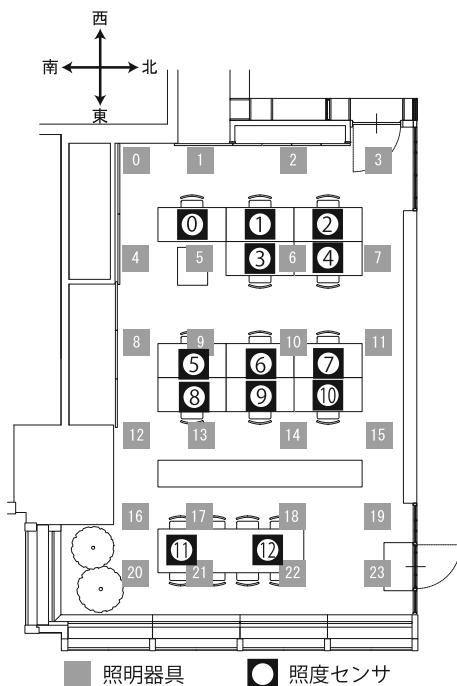


Fig. 3. シミュレーション環境 (平面図).

[lx²]の正規分布の乱数を、観測雑音として照度情報に加算する。なお、これらの値は実際のセンサ情報から経験的に得た値である。

さらに、主フィルタと主候補フィルタの比較までの時間は300秒とした。すなわち、300秒未満の外乱による影響は障害として(項目3の外乱)棄却され、300秒以上の外乱による影響は環境の変化(項目4の外乱)としてモデルに反映される。

7.2 推定した影響度係数の検証

カルマンフィルタにより推定した影響度係数が適切であるかを検証する。検証にあたり、3000秒の間、人の目には感知できない範囲で光度変化を行なう。その際に得られる光度情報および照度情報を基にカルマンフィルタにより推定した推定外光値および影響度係数の遷移状況を検証する。なお、環境が変化した場合を想定し、照度センサ7において1000秒までは外光による影響は0 [lx]、1000秒以降を500 [lx]とした。

照度センサ7における推定外光値および想定外光値をFig 4に示す。縦軸は照度値 [lx]、横軸は時間 [秒]を表す。Fig 4に示すように、推定外光値は60秒程度でほぼ安定しており、1000~1300秒の間を除き、推

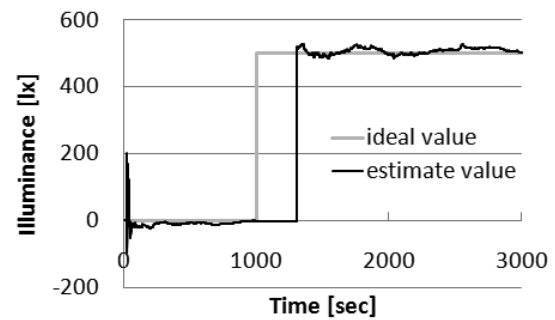


Fig. 4. 照度センサ7の推定外光値履歴.

定外光値と想定外光値がほぼ一致している。第4章で述べたように、環境変化を検知した場合、新たなカルマンフィルタを生成し、一定時間後により環境に適したフィルタを選択する処理を行なっている。このため、一定時間が経過するまでは環境の変化は反映されない。検証実験においては、この時間を300秒としているため、環境を変化させた1000秒から300秒の間は想定外光値との間に誤差が生じると考えられる。これはFig 4で示した結果と一致するため、上述の処理が正しく行えていることが確認できる。

また、推定値が安定する60秒から環境変化が生じる1000秒までの間において、推定外光値と想定外光値との平均誤差は9 [lx]、最大誤差は23 [lx]であった。一方、環境適応後の1300秒以降の平均誤差は10 [lx]、最大誤差は30 [lx]であった。50 [lx]程度の照度差は人の目では感知できない¹⁷⁾ため、推定外光値の誤差は十分に小さいと考えられる。

照度センサ7と、照明0、照明10、および照明14との影響度係数をFig 5に示す。縦軸は影響度係数 [lx/cd]、横軸は時間 [秒]を表す。なお、Fig 3に示すように、照度センサ7と照明10は近く、照明14はやや近く、照明0は遠い位置関係にある。Fig 5に示すように、100秒程度で影響度係数が安定していることがわかる。また、照明10の影響度係数は高く、照明14の影響度係数はそれに次ぎ、照明0は低くなっている。このことから、照明との位置関係に応じて、影響度係数の値が変化していることがわかる。

また、照度センサ7と最も近く、与える影響が大きい3つの照明(ID:10,11,14)の影響度係数について検

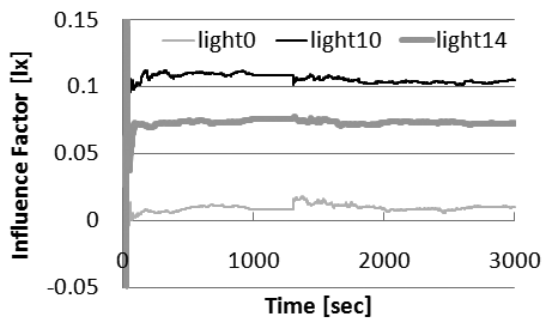


Fig. 5. 照度センサ7の影響度係数履歴.

討する. Table 1 にそれぞれの平均誤差および最大誤差を示す. Table 1 に示すように, 平均誤差も最大誤差

Table 1. 影響度係数の誤差.

| 照明 ID | 平均誤差 [lx/cd] | 最大誤差 [lx/cd] |
|-------|----------------------|----------------------|
| 10 | 3.4×10^{-3} | 8.2×10^{-3} |
| 11 | 2.4×10^{-3} | 6.6×10^{-3} |
| 14 | 2.0×10^{-3} | 6.1×10^{-3} |

も非常に小さい値となっている. すべての照明において最大の誤差が生じたと仮定し, すべての照明が 2000 [cd] で点灯した場合, 40 [lx] 程度の誤差が生じる. 前述のように, 50 [lx] 程度の照度差は人の目では感知できない¹⁷⁾ ため, 影響度係数の誤差は十分に小さいと考えられる.

7.3 単体法による制御の検証

7.3.1 環境が一律な場合

外光が変化しない環境において, 従来手法 (ANA/RC) と提案手法の比較を行った. 照度センサに Table 2 に示す目標照度を設定した際の, 目標照度の収束状況および消費電力量の削減効果を検証する.

Table 2. 目標設定.

| 照度センサ ID | 目標照度 [lx] |
|-------------------|-----------|
| 0, 1, 2, 3, 4 | 400 |
| 5, 6, 7, 8, 9, 10 | 600 |
| 11, 12 | 800 |

従来手法および提案手法のそれぞれについて, 3000 秒 (約 50 分) の間, 設定した目標値に対して処理を行った.

目標照度との平均誤差及び最大誤差を, 従来手法と提案手法のそれぞれについて Table 3 に示す. なお, 少ない反復回数ではモデルの精度が十分ではないため, 本来最適化フェーズを行わない. しかし, 本章では従来手法との比較を行うため, 少ない試行回数でも最適化フェーズを行う. Table 3 に示すように, 提案手法

Table 3. 目標照度との誤差比較.

| 時間 [秒] | 平均誤差 [lx] | | 最大誤差 [lx] | |
|--------|-----------|------|-----------|------|
| | 従来手法 | 提案手法 | 従来手法 | 提案手法 |
| 1000 | 76 | 39 | 199 | 108 |
| 2000 | 76 | 44 | 201 | 112 |
| 3000 | 81 | 42 | 220 | 113 |

のほうが従来手法よりも平均誤差および最大誤差がやや小さくなっている. ゆえに, 目標照度への収束という観点から, 提案手法が従来手法と比べ同等以上の性能を有していることがわかる.

次に, 消費電力量の最小化状況を検証する. 従来手法と提案手法のそれぞれにおける消費電力量を Table 4 に示す. なお, Table 4 の値は, すべての照明を最大光度で点灯させた際の消費電力量を 100 とした場合の比率である. Table 4 に示すように, 従来手法と提案

Table 4. 消費電力量の比較.

| 時間 [秒] | 従来手法 [%] | 提案手法 [%] |
|--------|----------|----------|
| 1000 | 39 | 39 |
| 2000 | 40 | 39 |
| 3000 | 39 | 39 |

手法がほぼ同等の消費電力量となっている. ゆえに, 消費電力量の削減効果という観点から, 提案手法が従来手法と比べ同等の性能を有していることがわかる.

7.3.2 環境変化の対応

外光が変化する環境において、従来手法と提案手法の比較を行った。目標設定は前節と同じであるが、照度センサ7における外光による影響は、0~1500秒が0 [lx]、1500~3000秒が200 [lx]と変化させた。

外光変化後における目標照度との平均誤差および最大誤差を、従来手法と提案手法のそれぞれについてTable 5に示す。Table 5に示すように、提案手法より

Table 5. 目標照度との誤差比較.

| 時間 [秒] | 従来手法 [lx] | 提案手法 [lx] |
|--------|-----------|-----------|
| 1400 | 76 | 3 |
| 1500 | 227 | 201 |
| 1600 | 31 | 200 |
| 1700 | 6 | 202 |
| 1800 | 11 | 68 |
| 1900 | 7 | 7 |

も従来手法の方がより迅速に目標照度に収束している。これは、提案手法が環境の変化によるモデル式の補正に一定時間（検証実験では300秒と設定）必要とするため、環境変化への対応に遅れが生じるためである。

従来手法と提案手法のそれぞれにおける消費電力量をTable 6に示す。なお、Table 6の値は、すべての照明を最大光度で点灯させた際の消費電力量を100とした場合の比率である。Table 6に示すように、提案

Table 6. 消費電力量の比較.

| 時間 [秒] | 従来手法 [%] | 提案手法 [%] |
|--------|----------|----------|
| 1400 | 51 | 46 |
| 1500 | 44 | 45 |
| 1600 | 34 | 45 |
| 1700 | 31 | 45 |
| 1800 | 30 | 26 |
| 1900 | 31 | 31 |

手法よりも従来手法の方がより迅速に消費電力量が安

定している。理由は前述のとおりである。

以上の結果から、環境変化への即応性においては、従来手法が優れているといえる。

7.3.3 目標変化の対応

目標が変化する環境において、従来手法と提案手法の比較を行った。目標設定は前節と同じであるが、1500秒において照度センサ8の目標値を800 [lx]に再設定した。

目標設定後における目標照度との誤差を、従来手法と提案手法のそれぞれについてTable 7に示す。Table 7

Table 7. 目標照度との誤差比較.

| 時間 [秒] | 従来手法 [lx] | 提案手法 [lx] |
|--------|-----------|-----------|
| 1400 | 62 | 8 |
| 1500 | 134 | 6 |
| 2000 | 90 | 9 |
| 2500 | 58 | 1 |
| 3000 | 50 | 6 |

に示すように、従来手法よりも提案手法の方がより迅速に目標照度に収束している。

従来手法と提案手法のそれぞれにおける消費電力量をTable 8に示す。なお、Table 8の値は、すべての照明を最大光度で点灯させた際の消費電力量を100とした場合の比率である。Table 8に示すように、従来

Table 8. 消費電力量の比較.

| 時間 [秒] | 従来手法 [%] | 提案手法 [%] |
|--------|----------|----------|
| 1400 | 50 | 47 |
| 1500 | 51 | 55 |
| 2000 | 62 | 55 |
| 2500 | 64 | 55 |
| 3000 | 63 | 54 |

手法よりも提案手法の方がより迅速に消費電力量が安定しており、かつ安定時における消費電力量がより小さい。

以上の結果から、目標変化への即応性においては、提案手法の方が優れているといえる。

8. まとめ

本稿では、知的照明システムの新たな制御アルゴリズムを提案した。提案手法は、カルマンフィルタによる照明環境のモデル化を行うフェーズと、単体法による求解を行うフェーズからなる。そして検証実験により、提案手法が環境変化への即応性は劣るが、目標変化への即応性は優れていることがわかった。

この手法を用いることにより、従来手法のような複雑なパラメータチューニングを必要とせず、目標照度に応じた照明制御が可能となった。また、本稿で述べたモデル化フェーズにより、単体法以外の最適化手法を知的照明システムの制御アルゴリズムとして用いることが可能となる。

参 考 文 献

- 1) 資源エネルギー庁総合政策課：平成 20 年度（2008 年度）におけるエネルギー需給実績（確報），<http://www.enecho.meti.go.jp/>，pp.19-25（2007）.
- 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) 大林史明，富田和宏，服部瑤子，河内美佐，下田宏，石井裕剛，寺野真明，吉川榮和，オフィスワークの生産性向上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，ヒューマンインターフェースシンポジウム 2006，Vol.1，No.1322，pp.151-156（2006）.
- 4) 西原直枝，田辺新一，中程度の高湿環境下における知的生産性に関する被験者実験，日本建築学会環境系論文集 No.568，pp.33-39（2003）.
- 5) R.Boyce，H.Eklund，S.Noel，Individual Lighting Control: Task Performance，Mood and Illuminance JOURNAL of the Illuminating Engineering Society，pp.131-142（2000）.
- 6) 三木光範，進化する人工物，オーム社（1999）.
- 7) 鶴岡伸一，田中和穂，川並尚，長崎文彦，センサを応用した省エネ照明システムの開発，電気設備学会全国大会講演論文集 Vol.15th pp.37-38（1997）.
- 8) 太田正明，森本康司，オフィスにおける照明設備の省エネ制御，東芝レビュー，Vol.59，No.10，pp.22-26（2004）.
- 9) 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）.
- 10) M.Miki，T.Hiroyasu，K.Imazato，Proposal for an intelligent lighting system，and verification of control method effectiveness，Proc IEEE CIS，pp.520-525（2004）.
- 11) 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，Vol.2，pp.941-947（2009）.
- 12) 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 Vol.130 No.5，pp.750-757（2010）.
- 13) 社団法人照明学会，照明ハンドブック，オーム社（2003）.
- 14) 谷萩隆嗣，カルマンフィルタと適応信号処理，コロナ社（2005）.
- 15) 有本卓，カルマン・フィルター，産業図書（1996）.
- 16) 茨木俊秀，福島雅夫，最適化の手法，共立出版（1993）.
- 17) 鹿倉智明，森川宏之，中村芳樹，オフィス照明環境における明るさの変動知覚に関する研究，照明学会誌，Vol.85 No.5，pp.346-351（2001）.