

知的照明システムにおける線形計画法を用いた 照明制御アルゴリズム

池上 久典^{1,a)} 桑島 奨¹ 三木 光範² 間 博人²

受付日 2014年6月12日, 採録日 2014年12月3日

概要: 著者らはオフィスにおける執務者の快適性向上と照明における消費電力の削減を両立させる知的照明システムの研究・開発を行っている。実際のオフィスに導入した結果、各執務者に個別照度環境を提供することによって、執務快適性の向上と大幅な消費電力の削減を実現した。省電力な点灯パターンの探索に採用している照明制御手法“ANA/RC”は、照明が照度センサに及ぼす明るさの大小（影響度）を回帰分析により学習し、明るさの影響度合いに応じて、各照明の光度を適切に変化させる手法である。ANA/RCの基礎となる山登り法は、ヒューリスティック手法であり、あらかじめ設定したパラメータが最適解の探索効率に影響する。また、最小二乗法による単回帰分析を行っており、照明光度から照度を推定するモデルとしては精度が低い。本研究では、最適解探索効率と影響度推定精度を向上させるため、線形計画法を用いた照明制御手法とカルマンフィルタを用いた影響度の推定手法を提案する。検証実験を行い、ANA/RCよりも目標照度実現性と消費電力削減効果が優れていることを示した。

キーワード: オフィス, 知的照明システム, 線形計画問題, カルマンフィルタ

Lighting Control Algorithm Using Linear Programming for an Intelligent Lighting System

HISANORI IKEGAMI^{1,a)} SHO KUWAJIMA¹ MITSUNORI MIKI² HIROTO AIDA²

Received: June 12, 2014, Accepted: December 3, 2014

Abstract: We research and develop an intelligent lighting system to improve office workers comfort and to reduce the power consumption. We have introduced the intelligent lighting system to realize individual lighting environments into real office environments. According to target illuminance values, we reduce the power consumption drastically. We have adopted ANA/RC (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient) to search efficiency lighting pattern. ANA/RC based on Hill-Climbing method is Heuristic method and parameters set in advance affect search efficiency. And Least-square method is adopted in regression analysis, so the model accuracy to estimate illuminance by luminous intensity is not good. The study proposes a new control algorithm using linear programming to improve search efficiency and influence factor. We show that the proposed method is superior to previous method ‘ANA/RC’ to provide the target illuminance and to reduce the power consumption.

Keywords: office, intelligent lighting system, linear programming, kalman filter

1. まえがき

近年、オフィスにおいて、執務者の知的生産性、創造性、および快適性の向上に注目が集まっている [1]。オフィス環境が知的生産性に及ぼす影響に関する研究はすでに多く行われており [2], [3], オフィス環境を改善することにより、知的生産性が向上する [4]。特に執務者の仕事内容や好みな

¹ 同志社大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto 610-0394, Japan

² 同志社大学理工学部
Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto 610-0394, Japan

^{a)} hikegami@mikilab.doshisha.ac.jp

によって求められる光の明るさ（照度）は様々である [5].
 このような背景から、著者らは個々の執務者の要求に応じた照度を提供できる知的照明システムを提案した [6]. オフィスにおいて知的照明システムを用いた場合、執務者がそれぞれに合った光環境のもとで執務をすることができ、快適性向上や、ストレス軽減といった効果が期待される。また、必要な場所に必要の照度を提供するため、部屋全体としての平均照度が下がり、高い省電力性を実現することが可能である。

知的照明システムはすでにその有効性が認められ、東京都内の複数の実オフィスで実証実験が行われている [7], [8], [9], [10]. 実オフィスにおいて必要な場所に必要の照度を提供することに成功し、高い省電力性を実現した [10]. 現在実オフィスに導入されている知的照明システムでは、点灯パターンの最適化に山登り法を基礎とした制御アルゴリズム、Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient: ANA/RC を用いている [11]. ANA/RC は照明が照度センサに及ぼす明るさの大小（影響度）を回帰分析により学習し、明るさの影響度合いに応じて、各照明の光度を適切に変化させる手法である。ANA/RC の基礎となる山登り法は、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最適解の探索効率に影響する。制御に必要なパラメータの決定には、オフィスの照明環境に合わせた実験が必要である。また、影響度の推定手法として、照明ごとに最小二乗法を用いた単回帰分析を行っており、照明光度から照度を推定するモデルとしては精度が低い。

そこで本研究では、線形計画法を用いた照明制御手法とカルマンフィルタを用いた影響度の推定手法を提案する。複数の制約条件が矛盾するような例外を除き、大域的最適解の導出が保証されている線形計画法を知的照明システムの制御に適用する。また、カルマンフィルタを用い、すべての照明情報を統合して、照明の光度が照度センサの照度に及ぼす明るさの大小（影響度）を推定する。提案手法により、目標照度実現性と消費電力削減効果の向上を狙う。

2. 知的照明システム

2.1 知的照明システムの構成

知的照明システムの構成を図 1 に示す。知的照明システムは、照明器具、制御装置、移動可能な照度センサ、および電力計を 1 つのネットワークに接続することで実現する。各照明の明るさ（光度）を変化させることによって執務者の要求する照度を提供し、かつ省電力な点灯パターンを実現するシステムである。制御装置は、照度センサから得られる照度情報と電力計から得られる電力情報に基づき、現在の点灯パターンの有効性を評価する。照明全体で目標照度を満たしつつ、消費電力の最小化を行う。

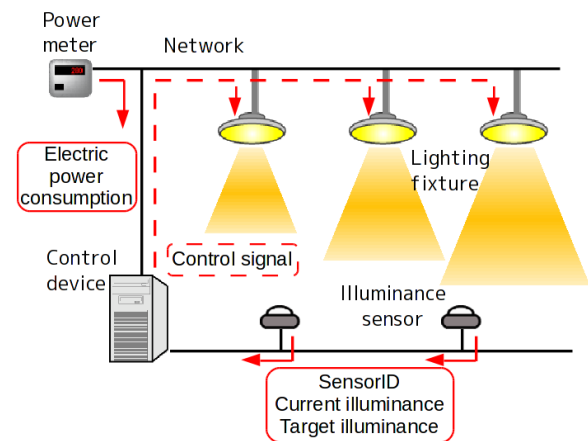


図 1 知的照明システムの構成
 Fig. 1 Configuration of the intelligent lighting system.

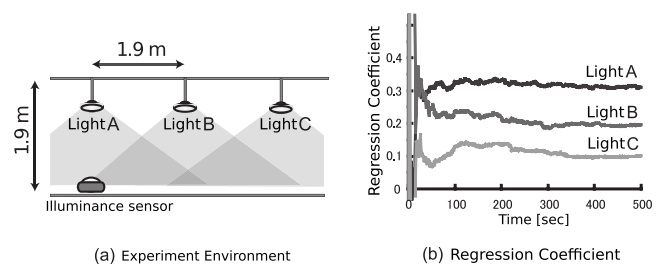


図 2 回帰係数の履歴
 Fig. 2 History of the regression coefficient.

2.2 照明制御アルゴリズム

知的照明システムの有効な照明制御アルゴリズムとして、回帰係数を用いた適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient, 以下 ANA/RC) を提案している [11], [12], [13]. ANA/RC とは、汎用的最適化手法である確率的山登り法をベースに、Simulated Annealing (SA) を照明制御用に改良したものである。各照明が照度センサに及ぼす明るさの大小（影響度）を回帰分析で学習し、明るさの影響度合いに応じて各照明の光度を適切に変化させることで、最適点灯パターンに推移する。

2.3 回帰分析による影響度の把握

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。ANA/RC では最小二乗法による回帰分析を行い、照明が照度センサの明るさに及ぼす影響度合いを把握する。照明の光度変化量を説明変数、照度センサの照度変化量を目的変数として回帰分析を行う。図 2(a) に示す環境において、各照明光度を乱数変化させ計測した回帰係数の履歴を図 2(b) に示す。図 2(b) より、照度センサに近くなるほど回帰係数の値が高くなっていることが分かる。回帰係数を用いることで照度センサに近い照明を抽出できることが確認できる。

ANA/RC では、照明の光度を変化させる際に、照明と照度センサの距離に応じて、数種類の光度変化幅を使い分けることで、最適な点灯パターンの探索効率を向上させている [11]。現在の照明光度に対する光度変化の割合を近傍と呼称している。回帰係数の値に応じて、適応的に数種類の近傍を使い分けることで、最適な点灯パターンを探索する。

2.4 制御アルゴリズムに対する課題

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最適解の探索効率に影響する。ANA/RC におけるパラメータとは、前述した数種類の近傍を使い分けるために、回帰係数の値に設定する閾値のことである。すでに提案している 3 種類の近傍設計 [11] を用いる場合、回帰係数に 2 つの閾値を設定し、照度センサに近い照明、中間の照明、遠い照明を抽出する必要がある。この閾値は、天井の高さや照明の配置間隔など、オフィスの照明環境によって異なる。

実オフィスに導入した知的照明システムでは、目標照度収束速度を向上させるため、最大で 7 種類の近傍を採用している。近傍決定のための閾値も、回帰係数に対してだけでなく、現在照度と目標照度の差や照明に近い照度センサの個数など様々であり、知的照明システムの導入時には、実験を繰り返して収束性能の良い閾値を採用している。また、ANA/RC では照明の光度が照度センサの照度に及ぼす影響度を推定する手法として、照明ごとに最小二乗法を用いた単回帰分析を行っており、照明光度から照度を推定するモデルとしては精度が低い。

これまで、知的照明システムは照明 1 灯 1 灯にマイクロプロセッサを搭載し、自律分散的に制御することを前提としており [11]、照明ごとに独立して最適化を行っていた。オフィスの照明設備として運用するため、高い耐故障性が求められたことから、各照明が独立して最適化問題を解くモデルを想定し、一部の照明が故障しても他の照明が補うように動作することを狙っていた。しかしながら、LED 照明の普及にともなって照明器具の長寿命化が進み、オフィスビルの基幹ネットワーク規格として BACnet が採用され、集中制御方式であっても、照明の故障検知が容易になったことから、現在の知的照明システムは、図 1 のような集中制御方式の構成を採用している。集中制御方式のシステム構成となったことで、目標照度実現性と消費電力削減効果を高めるため、ヒューリスティック手法である ANA/RC や単回帰分析のように照明ごとに独立した制御手法ではなく、照明の光度情報を総合的に考慮した制御モデルを検討可能となった。

そこで本研究では、線形計画法を用いた照明制御手法とカルマンフィルタによる影響度推定手法を提案する。知的照明システムの制御に対して、複数の制約条件が矛盾するような例外を除き、大域的最適解の導出が保証されている

線形計画法を適用する。また、状態推定手法としてカルマンフィルタを用いて、すべての照明情報を統合して影響度推定を行う。提案手法を用いることで、近傍設計の煩雑さをなくし、かつ最適な点灯パターンの探索精度向上を狙う。

3. 知的照明システムに対する線形計画法の適用

3.1 知的照明システムの要件

知的照明システムの要件は以下の 3 点である。

- (1) 消費電力を最小化する。
- (2) 執務者が要求する照度を実現する。
- (3) 照明光度が器具の実現可能範囲である。

これを定式化すると式 (1)～式 (3) となる。

$$\min P = \sum_{i=1}^n P_i \tag{1}$$

$$\text{subject to } I_c \geq I_t \tag{2}$$

$$L_{min} \leq L_i \leq L_{max} \tag{3}$$

P : 消費電力 [W], L : 照明の光度 [cd]

I_c : センサの取得照度 [lx], I_t : 目標照度 [lx]

L_{max} : 照明の光度上限 [cd], n : 照明台数

L_{min} : 照明の光度下限 [cd], i : 照明番号

設計変数は照明の光度である。準ニュートン法のような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。目的関数は、式 (1) に示す消費電力である。これを設計変数 (光度) の関数として表現することを考える。

3.2 目的関数の定式化

消費電力を光度の関数として定式化するために、照明鉛直下方向の光度と消費電力の関係を検証する予備実験を行った。結果を図 3 に示す。縦軸は消費電力 [W]、横軸は最大点灯光度に対する光度の割合 [%] である。なお、測定は 5% 刻みで行った。最大点灯時の鉛直下方向の光度は 1,200 cd である。また、図 3 中の直線は回帰直線である。

図 3 から、光度と消費電力は 1 次式で近似できる関係にあることが分かる。すなわち、複数の照明器具から構成さ

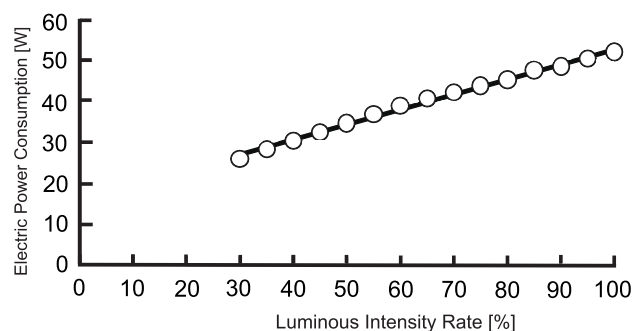


図 3 点灯光度の割合と消費電力の関係

Fig. 3 Relation of luminosity and electric-power consumption.

れる知的照明システムにおける消費電力は式 (4) のように表現できる.

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

$$P_i = f(L_i) = \alpha L_i + \beta \quad (5)$$

P : 消費電力 [W], α : 係数 [W/cd]

β : 定数 [W], L : 照明の光度 [cd], n : 照明台数

i : 照明番号

式 (4) 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. そのため, 使用する照明機種ごとに係数 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, 目的関数は大小の評価が可能な精度であればよい. そこで, 定数 β は実験省略のため, 定数 β を省略した式 (6) を用いる. 定数 β は, 設計変数である照明光度の値と無関係に, 目的関数の値に加算される定数項であり, 省略した場合でも, 省略後の目的関数の大小比較に問題は生じない. 照明の点灯光度が増加するにつれて消費電力が増加する関係を定式化した式 (6) を用いることで, 消費電力 P を最小化するには十分である.

$$P_i = f(L_i) \doteq \alpha L_i \quad (6)$$

P : 消費電力 [W], L : 照明の光度 [cd]

i : 照明番号, α : 定数

式 (6) 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った.

従来, 知的照明システムを導入する際には, 導入先の環境で照明 1 灯 1 灯の点灯消灯を繰り返し, 回帰係数の値に設ける閾値を決定していた. 特に, 壁の反射率やテナントの設置したパーティションの影響はオフィスの設計図から読み取ることができず, 照度センサを設置する位置によって, その影響も様々である. ANA/RC が探索効率向上のために採用している近傍設計 [11] は, 回帰係数に設ける閾値や回帰係数によって算出された影響度の精度によって, 探索効率が変化するため, 実オフィスでの閾値決定の動作実験が必須であった.

提案手法を用いることで, 導入後に実環境で閾値決定のために照明の点灯消灯を繰り返す必要はなくなり, 知的照明システムに用いる照明に対してのみ事前実験を行うだけで導入が可能となる. 事前実験は導入する照明 1 灯の明るさを徐々に変化させ, その照明機種の消費電力量を計測するのみである. 実オフィスに立ち入る必要がなくなることで, オフィス内に立ち入ることを好まないテナントに対しても知的照明システムの導入が容易となる. また, 非線形な特性を持つ照明に対しては非線形計画法を適用することを考えている. 本論文では線形な特性を持つ照明を扱う. 本実験で用いたのは NEDO 共同研究プロジェクトの一貫としてシャープ株式会社が試作した LED 照明であり, 既

成品ではない. 前述のとおり, 照明の特性は機種ごとに変わると予想されるが, 本研究の手法は図 3 のように線形近似可能な特性を持つ照明全般に対して適用可能であると考えている.

3.3 制約条件の定式化

式 (2) の制約条件は, 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. 照明が強くと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 (7) で表される.

$$I = \frac{L}{A \times \cos \theta} \oint_{S_e} \frac{dS_e \cos \theta \cos \delta}{p^2} \quad (7)$$

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 (7) より, 照度および光度は線形関係にあることが分かる. また, 式 (7) の各項は, 光度を除き, 光源の形状や光源との距離など, 照明環境に依存する定数 (影響度) である. そのため, 式 (7) は式 (8) で表すことができる.

$$I = R \times L \quad (8)$$

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

壁面反射を考慮した場合でも, 壁面反射率はオフィスの環境に依存する定数であり, 式 (8) の R に含まれる. 各照度センサに対する照明の影響度 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 R の集合を照明環境のモデルと呼ぶ. 複数の照明から構成される照明環境のモデル式は式 (9) となる.

$$I_j = \sum_{i=1}^n (R_{ij} \times L_i) + D_j \quad (9)$$

I : 照度 [lx], R : 影響度 [lx/cd]

L : 光度 [cd], D : 外光による照度 [lx], n : 照明台数

i : 照明番号, j : センサ番号

式 (9) に示す影響度 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.

ANA/RC では回帰分析を用いて影響度の推定を行っている. 最適化段階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に変化する. この変化を基に状態推定手法を用いて影響度を数値化する. 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, 照明ごとに独立して単回帰分析を行っているため, 式 (9) のように光度から照度を予測するモデルとしては精度が低い. そこで, 本研究では状態推定手法としてカルマンフィルタを用い, すべての照明情報を統合して状態推定を行う.

3.4 カルマンフィルタによる推定

3.4.1 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。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ともなう計算量の増加を抑制できるため、長期のシステム稼働に適すると考える。

3.4.2 外乱処理

実オフィスにおいて、照度センサが取得する照度情報には外乱が多い。外乱は以下の4種類があげられる。これらは実オフィスに導入した知的照明システムの運用中に見られた外乱要因である。

- (1) センサの雑音
- (2) 照明の光度のゆらぎ
- (3) 誤った照度情報の取得（人影や書類の影など）
- (4) 外光の変化

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。したがって、カルマンフィルタの特性により、カルマンフィルタの更新処理が進むにつれてその影響は最小化される。

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(10)に示す。

$$\Phi = \nu_k^T S_k^{-1} \nu_k \quad (10)$$

$$\nu_k = Z_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}$$

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容易でない。カイ2乗検定による観測値の棄却処理を行うと、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てしまう。そこで、項目(3)と項

目(4)の外乱を区別するため、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。

3.5 カルマンフィルタの生成と選択

前節の項目(4)の外乱発生時にはモデルを補正する必要がある。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(10)に基づいて観測値の受理判定を行う。異常な観測値が検出された場合には、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（以下、主候補フィルタ）を構成する。主候補フィルタも主フィルタと同様に更新処理を行う。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(11)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。

$$\Psi = \nu_k^T \nu_k \quad (11)$$

$$\nu_k = Z_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}$$

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

以上の手順で、項目(3)の外乱の影響は最小化し、項目(4)の外乱に対応してフィルタを取捨選択する。これにより、現在の環境に最も適したカルマンフィルタを状態推定に用いることができる。

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考慮した主候補フィルタが新たな主フィルタとなる。式(9)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。

4. 線形計画法を用いた制御アルゴリズム

4.1 線形計画問題

3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とらえることが可能となった。

線形計画問題は、複数の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。そのため、パラメータ決定の簡略化の観点からだけではなく、短時間での最適解の導出が必ずしも保証されない従来の制御アルゴリズムよりも素早く最適な点灯パターンを実現するという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、本研究では単体法を用いる。

4.2 単体法

単体法は、より小さい目的関数値を持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持つことが保証される。すなわち、有限回の反復によって、最適解を導出あるいは解が存在しないことを識別できる。このため、3章で述べた照明環境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ことが可能である。

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 $1.5n \sim 3n$ の反復回数で最適解を導出可能であり、知的照明システムの最適解探索に用いる場合において、十分に高速である。このため、実装が容易な単体法を用いる。

4.3 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、3章で述べた、影響度を求めることで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、人の目には感知できない範囲で照明光度を変化させ、その際に生じる照度変化を基に、カルマンフィルタによる状態推定を行い、式(9)を導出する。モデル化フェーズによって式(9)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(6)および式(9)を用いて、対象問題を式(12)~式(14)として定式化し、単体法により最適解を導出する。

$$\min f(\bar{L}) = P = \alpha \sum_{i=1}^n L_i \quad (12)$$

$$\text{subject to } It \leq Ic = \sum_{i=1}^n (R_i L_i) + D \quad (13)$$

$$\bar{L} \in \{l | m \leq L \leq M\} \quad (14)$$

L : 照明の光度 [cd], P : 消費電力 [W], n : 照明台数
 Ic : センサの取得照度 [lx], It : 目標照度 [lx]
 R : 影響度 [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]

以上の処理により、執務者が要求する明るさをできるだけ少ない消費電力で実現する点灯パターンを導くことが可能となる。

5. 提案手法の検証

5.1 実験環境

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

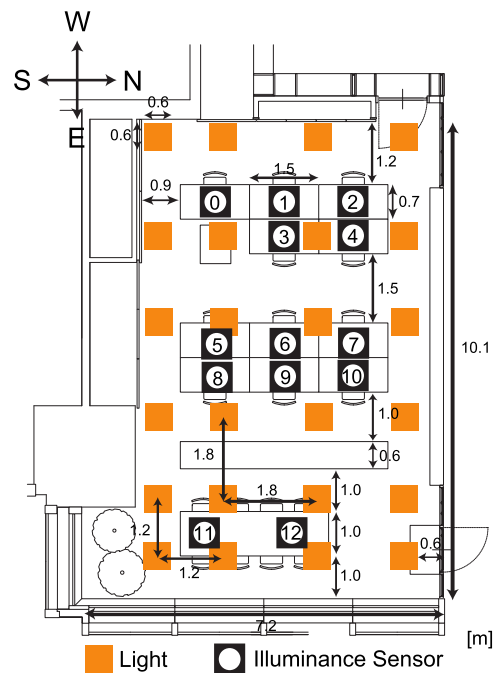


図4 シミュレーション環境 (平面図)
 Fig. 4 Simulation environment.

ル) [14] を対象としてシミュレーションを行う。エコツェリアは $10.1 \text{ [m]} \times 7.2 \text{ [m]}$ のフロアに照明 24 台、照度センサ 13 台が設置されている。シミュレーション環境を図4に示す。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を基に算出し、壁やパーティションの反射は考慮しない。また、天井と照度センサの垂直距離は 1.9 m である。照明の最小光度は 360 cd 、最大光度は $1,200 \text{ cd}$ とした。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 lx^2 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。これは、NEDO 共同研究プロジェクトのため、株式会社セコニックが試作した知的照明システム用照度センサの性能検証を行った結果に基づいている。外光のない部屋で照明 1 灯を点灯し、照度値 100 lx 、 200 lx 、 \dots 、 $1,000 \text{ lx}$ を計測する距離に照度センサを配置する。照明の調光信号値を変化させない状態で照度センサの照度変化量を測定したところ、観測雑音は上述の結果となった。この予備実験は一定の調光信号値にもかかわらず照明の光度がゆらいでしまう項目(2)の外乱を含んでいる。上述の観測雑音を照度値に加算することで、項目(1)、項目(2)の外乱を模擬する。

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(項目(3)の外乱)として棄却され、 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。これは、三菱地所株式会社エコツェリアの利用者との対話による実運用上の判断に基づいたものである。カルマンフィルタへの環境変化反映待ち時間の設定は、一時的な環境変化として棄却すべき外乱の続く時

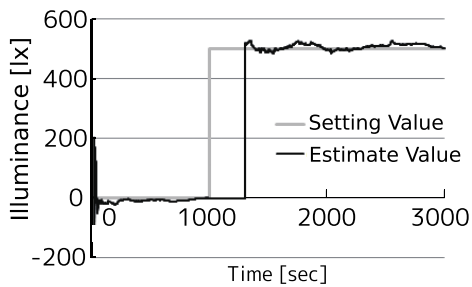


図 5 外光照度の履歴

Fig. 5 History of the daylight illuminance.

間よりも長い時間であることが求められる。また一方で執務者が許容できる時間内であることも求められる。導入先のオフィス環境によって外乱の時間長と利用者の許容時間を検証する必要があるが、本研究ではエコツェリア利用者の許容例である 300 秒を用いる。

5.2 カルマンフィルタの検証

カルマンフィルタにより推定した影響度が適切であるかを検証する。影響度を正しく求めることができれば、実測照度と照明光による照度から外光照度を算出することができる。3,000 秒の間、動作実験を行い、カルマンフィルタにより推定した影響度を基に照度を計算し、実測照度との差から外光照度を計算する。環境が変化した場合を想定し、照度センサ 7 において 1,000 秒までは外光による影響は 0 lx, 1,000 秒以降を 500 lx とした。照度センサ 7 における推定外光照度値および実外光照度値を図 5 に示す。図 5 に示すように、推定外光照度値は 60 秒程度でほぼ安定しており、1,000~1,300 秒の間を除き、推定外光照度値と想定外光照度値がほぼ一致している。3.5 節で述べたように、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 1,000 秒から 300 秒の間は想定外光照度値との間に誤差が生じる。これは図 5 で示した結果と一致するため、上述の処理が正しいことが確認できる。

また、推定値が安定する 60 秒から環境変化が生じる 1,000 秒までの間、推定外光照度値と想定外光照度値との平均誤差は 9 lx, 最大誤差は 23 lx であった。一方、環境適応後の 1,300 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ため [15], 推定外光照度値の誤差は十分に小さいと考えられる。

以上より、カルマンフィルタによって求めた影響度は適切であり、影響度の推定と外光照度の推定が可能であることを示した。

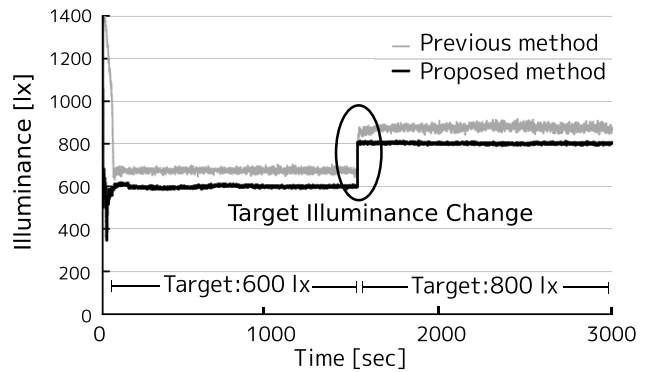


図 6 目標照度実現性の比較

Fig. 6 Possibility of the target illuminance.

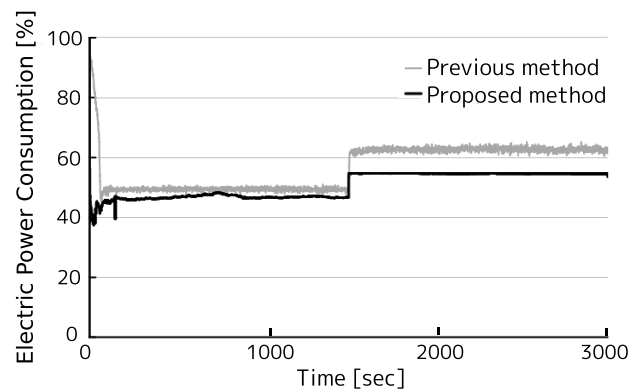


図 7 消費電力の比較

Fig. 7 Comparison of electric power consumption.

5.3 目標照度実現性と消費電力削減効果

目標照度が変化する場合を想定し、従来手法と提案手法の比較を行った。1,500 秒において照度センサ 8 の目標照度値を 600 lx から 800 lx に変化させる。全照明を最大点灯した状態から従来手法を用いた制御と提案手法を用いた制御の動作検証を行った。目標照度の履歴を図 6 に、消費電力の比較を図 7 に示す。

従来手法は照明の光度変化が安定し、照度変化が人間に知覚できない範囲内 [15] に収束するまで 60 秒かかる一方で、提案手法は 25 秒で実現すべき目標照度に収束した。提案手法は 1 回の最適制御で目標照度付近まで急速に照度収束可能であり、図 6 から目標照度実現速度の向上が確認できる。同様に、図 6 より、収束時の目標照度との差も提案手法のほうが小さいことが分かる。さらに、図 7 より、従来手法よりも提案手法のほうが消費電力削減効果が高いことが分かる。従来手法は回帰分析を用いて照度センサへの影響度を算出していたが、照度センサから遠い照明の回帰係数が高く評価される場合があった [16]。ANA/RC は回帰係数の値に応じて光度変化に方向性を持たせるため、回帰係数の学習精度によって、目標照度の実現が容易でない場合があり、省電力な点灯パターンが実現できないことがある [16]。提案手法はすべての照明情報を統合して影響度

表 1 目標照度との平均誤差比較

Table 1 Comparison of the difference with the target illuminance.

Time (sec)	Previous (lx)	Proposed (lx)
60~1,500	72	8
1,500~3,000	47	6

表 2 平均消費電力の比較

Table 2 Comparison of the average electric-power consumption.

Time (sec)	Previous (%)	Proposed (%)
60~1,500	51	46
1,500~3,000	63	56

推定を行ったことで、回帰分析を用いる従来手法よりも目標照度実現性が向上したと考えられる。

また、照明の光度変化が安定する 60 秒から目標照度変更の 1,500 秒までの間と、目標照度を変更した 1,500 秒から実験終了の 3,000 秒までの間について、目標照度実現性の比較を表 1 に、消費電力削減効果の比較を表 2 に示す。表 1 について、提案手法の平均誤差は 50lx 以下であり、従来手法に比べて目標照度実現性を大きく向上している。表 2 について、提案手法によって各照度センサの目標照度実現性が向上したことで、照明全体の消費電力削減効果が向上したと考えられる。消費電力削減率について、60~1,500 秒で 5%、1,500~3,000 秒で 7%の改善が見られた。シミュレーション対象とした三菱地所株式会社エコツヴェリアでは補助灯やタスクライトは使用されていない。従来一律で最大点灯していた天井照明に、知的照明システムを導入することで、照明設備の消費電力を年間 60%削減することに成功した [10], [14]。本手法を用いることで、目標照度実現性を向上させながら、さらに約 5%の消費電力削減効果を見込んでいる。また、実オフィスにおいては、執務者の在席・離席行為が存在するが、これは執務者の照度センサに目標照度を設定する行為である。目標照度変更時においても、提案手法は素早く目標照度を実現し、消費電力削減効果も向上しており、執務者の在席・離席時の目標照度設定に対しても提案手法が優れていると考えられる。

以上の結果より、提案手法は従来手法よりも素早く目標照度を実現し、安定時の目標照度実現性と消費電力削減においても優れていることを示した。一方、人の移動や天候の変化による影響のように偶発性の高い外乱事象の振舞いをシミュレーション上で再現し、評価しきことは容易でない。本研究では特に、線形計画法とカルマンフィルタの適用による目標照度実現速度、目標照度実現性、および消費電力削減効果の向上を扱った。今後は、提案手法を実オフィスで運用中の知的照明システムに適用し、長時間の検証実験を行う。様々な外乱事象に対する可用性の高さを示すことで、NEDO 共同研究プロジェクトにおける知的照明

システム実用化の最終段階「長期間の実運用に耐える知的な照明制御システム」の確立を目指す。

6. むすび

本研究では、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って影響度を推定するモデル化フェーズと、単体法による求解を行う最適化フェーズからなる。検証実験により、目標照度実現性と消費電力削減効果が優れていることを示した。また、提案手法を用いることで ANA/RC におけるパラメータチューニング（近傍設計）を必要とせずに照明制御することが可能となった。さらに、知的照明システムの制御を線形計画問題ととらえることが可能となったことで、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。導入先環境での実験を繰り返す必要がなくなり、知的照明システムの導入容易性を高めることができた。

今後は、検証実験を重ねた後、すでに知的照明システムが導入されている実オフィスに対して導入し、照明の消費電力削減効果を向上させることを考えている。

謝辞 この研究は NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）研究開発プロジェクト名「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」研究開発フェーズ：先導研究フェーズ研究開発課題名：「知的照明システムの研究開発」の補助を受けて実施した。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] 経済産業省：「クリエイティブ・オフィス推進運動実行委員会」の開催について、入手先 (<http://www.meti.go.jp/press/20070615008/20070615008.html>)。)
- [2] 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, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006, pp.151–156 (2006)。
- [3] 小林弘造, 北村規明, 田辺新一, 西原直枝, 清田 修, 岡 卓史：コールセンターの室内環境が知的生産性に与える影響, 空気調和・衛生工学会学術講演大会論文集, pp.2053–2056 (2005-9)。
- [4] 西原直枝, 田辺新一：中程度の高温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 (2003-6)。
- [5] Boyce, P.R., Eklund, N.H. and Simpson, S.N.: Individual Lighting Control: Task Performance, Mood, Illuminance, *International Journal of Emerging Sciences*, pp.131–142 (2000)。
- [6] 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, pp.399–410 (2007)。
- [7] 鈴木真理子, 三木光範, 田中慎吾, 吉見真聡, 中川明彦, 齋藤敦子, 福田麻衣子：オフィス内フレームを用いた知的照明システムの構築 (オフィスインフォメーションシステム, e-ビジネスモデリング, 特集学生論文), 電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム, Vol.95, No.3, pp.549–558 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009418763/>) (2012)。

- [8] 小野景子, 三木光範, 吉見真聡, 西本龍生, 近江哲也, 足立 宏, 秋田雅俊, 笠原佳浩: 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, 基礎・材料・共通部門誌 = The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. A, A publication of Fundamentals and Materials Society, Vol.131, No.5, pp.321-327 (オンライン), DOI: 10.1541/ieejfms.131.321 (2011).
- [9] 三木光範, 加來史也, 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 (情報・システム基礎), 電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム, Vol.94, No.4, pp.637-645 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008593471/>) (2011).
- [10] 大学法人同志社大学, 株式会社三井物産戦略研究所: 平成 20 年度~平成 22 年度成果報告書エネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発/自律分散最適化アルゴリズムを用いた省エネ型照明システムの研究開発, 技術報告 20110000000875, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2011).
- [11] 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・システム部門誌 = The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. C, A publication of Electronics, Information and System Society, Vol.130, No.5, pp.750-757 (オンライン), DOI: 10.1541/ieejjeiss.130.750 (2010).
- [12] Miki, M., Hiroyasu, T. and Imazato, K.: Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness, *Proc. IEEE CIS*, Vol.1, pp.520-525 (2004).
- [13] Tanaka, S., Miki, M., Hiroyasu, T. and Yoshikata, M.: An Evolutional Optimization Algorithm to Provide Individual Illuminance in Workplaces, *Proc. IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, Vol.2, pp.941-947 (2009).
- [14] 三菱地所株式会社エコツヴェリア プレスリリース: 世界初「LED 知的照明システム」「輻射空調システム」複合導入 1 年間の実験結果, 約 30% の節電効果を実証, 入手先 (http://www.ecozzeria.jp/archive/news/2011/07/22/jisedaioffice_ecozzeria.html).
- [15] 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変動知覚に関する研究, 照明学会誌, Vol.85, No.5, pp.346-351 (2001).
- [16] 三木光範, 吉井拓郎, 小野景子, 東 陽平: 知的照明システムにおける照度センサの位置推定を用いた消費電力の削減 (オフィスインフォメーションシステム, e-ビジネスモデリング), 電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム, Vol.95, No.10, pp.1839-1847 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009517643/>) (2012).



池上 久典 (学生会員)

1989 年生. 2013 年同志社大学工学部インテリジェント情報工学科卒業. 同年同志社大学大学院理工学研究科修士課程入学. 知的照明システムにおける新たな制御アルゴリズムの研究に従事. 人工知能学会, 照明学会各会員.



桑島 奨 (学生会員)

1990 年生. 2014 年同志社大学工学部インテリジェント情報工学科卒業. 同年同志社大学大学院理工学研究科修士課程入学. 知的照明システムにおけるアルゴリズムの改良等の研究に従事.



三木 光範

1950 年大阪市立大学大学院工学研究科博士課程修了, 工学博士. 大阪市立工業研究所研究員, 金沢工業大学助教授を経て, 1987 年大阪府立大学工学部航空宇宙工学科助教授, 1994 年同志社大学工学部教授. 進化的計算手法

とその並列化, および知的なシステム的设计に関する研究に従事. 著書は『工学問題を解決する適応化・知能化・最適化法』(技法堂出版)等多数. IEEE, 米国航空宇宙学会, 人工知能学会, システム制御情報学会, 日本機械学会, 計算工学会, 日本航空宇宙学会等各会員. 超並列計算研究会代表. 文部科学省学術フロンティア研究プロジェクトリーダー. 知的オフィス環境コンソーシアム会長.



間 博人

1978 年生. 2010 年慶應義塾大学博士 (政策・メディア) 取得. 同志社大学理工学部インテリジェント情報工学科助教. センサネットワーク, ユビキタスコンピューティング, 通信プロトコル等の研究に従事. 計測自動制御学会,

IEEE 各会員.