

知的照明システムの数理計画法を用いた 影響度係数推定における有効ログデータの抽出

岡安 淳平

Jumpei OKAYASU

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¹⁾、コスト削減や環境問題への配慮等の観点から省エネルギーに向けた取り組みが盛んに行われている。このような背景から、我々はオフィス環境において執務者の知的生産性と省エネルギーを目的とした知的照明システムの研究を行っており、複数のオフィスビルに導入して実証実験を行っている^{2) 3)}。

知的照明システムは回帰係数を用いた適応的近傍アルゴリズム (以下, ANA/RC) を用いて制御を行っている。ANA/RC では、単回帰分析を行うことによって照明がセンサに影響を及ぼす度合い (影響度係数) を推定し、照明制御に用いる。しかし、ANA/RC では照明台数の増加に伴って影響度係数の誤差が増大することがある。よって、照明と照度センサの 1 対 1 の影響度合いを計測する手法 (影響度調査) が考案されているが、照明の劣化や環境の変化に対応する為に、環境が変化する度に影響度調査を行わなければならない、実オフィスにおいてこのような調査の実施は現実的でない。

そこでオフィスにおけるシステムのログデータを用いて影響度合いを推定する手法が提案されている。本稿では、この手法において推定精度向上を目的とした有効ログデータの抽出手法を提案する。

2 知的照明システム

2.1 概要

現在、知的照明システムでは現行手法として最適化アルゴリズムに、Simulated Annealing (SA) をベースとして照明制御用に回帰係数に基づく近傍設計を組み込んだ Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient (ANA/RC) を用いている。ここで回帰係数は照明器具と照度センサの因果関係を表しており、照度収束と省エネルギーの実現の両面から重要なパラメータである。また、ANA/RC において回帰係数は照明器具と照度センサとの影響の大きさを表す指標であり、この指標を影響度係数という。

2.2 位置関係の指標

影響度係数を用いることで、光度と照度の関係を定式化することができ、逐点法⁴⁾を用いて式 (1) のように表せる。影響度係数は各照明が各照度センサに影響を与える度合いである。これによりセンサの物理的な位置情報を一切用いること無く照明との光学的な位置関係を推定でき、かつ照明の点灯光度に対する照度センサの推定出

力照度を求めることが可能となる。

$$I_i = \sum_{j=1}^m R_{i,j} L_j \quad (1)$$

I_x : センサ x の照度 [lx], L_y : 照明 y の光度 [cd],

m : 照明台数,

$R_{x,y}$: センサ x に対する照明 y の影響度係数

2.3 現行手法の課題

ANA/RC では照明台数の増加に伴い、各照明のランダムな変化に相関関係が見られるようになると、影響度係数を正しく推定できなくなる場合がある。そこで、導入時に影響度調査を行い精度の高い影響度係数をデータベース化した、ANA/DB という手法がある。

ANA/DB は、照明器具の劣化や部屋の配置換えに伴う照度センサ位置の変更がある場合に、再度影響度係数の測定が必要となり、実オフィスにおいて測定実験を行うことは現実的ではない。そこで、影響度係数の再調査を行わず、知的照明システムのログデータに含まれる照明の点灯光度、および照度センサの計測照度から数理計画法を用いて影響度係数を推定する手法が提案されている。

この手法では推定に用いるログデータで影響度の精度が左右される。知的照明システムが目標照度を実現している場合、大幅な光度変化は発生せず、稼働ログデータ中には光度および照度ともに類似したログデータが多数含まれる。すると、特定の点灯パターンに大きく重み付けされた目的関数を最小化するように影響度係数が推定され、結果として真値とは大きく異なる値に収束する可能性がある。そこで、本稿ではあらかじめログデータの中で光度値が大きく変化しているデータ (以下、有効データ) を抽出して推定を行う方法を提案する。

3 数理計画法を用いた影響度推定手法

この手法における対象問題は、影響度係数と光度データの積によって算出される推定照度とログデータ中の実測照度の誤差の最小化を目的とするものである。この最適化問題を式 (2) のように定式化する。この問題は、同時刻の各照明の点灯光度と各照度センサの計測照度を 1 系列のデータとし、各データ系列 i に対して立式した式 (2) に示す目的関数の重み付き総和を目的関数とし、これを最小化する影響度係数を算出する問題である。

設計変数 $\mathbf{R} = \{R_{1,1}, \dots, R_{1,n}, \dots, R_{m,n}\}^T$ (m : 照度センサ数, n : 照明数) は $m \times n$ 次元ベクトル, $\mathbf{f}(\mathbf{R}) = \{f_1(\mathbf{R}), \dots, f_d(\mathbf{R})\}^T$ (d : データ系列数) は d 次元ベクトル

ルである。この目的関数に対して数理計画法を適用することで影響度係数を推定することが可能である。本稿では数理計画法の最急降下法を用いる。

$$\min \sum_{i=1}^d u_i f_i(\mathbf{R}) \quad (2)$$

$$f_i(\mathbf{R}) = \sum_{j=1}^m (E_{i,j} - I_{i,j})^2$$

$$E_{i,j} = \sum_{k=1}^n (R_{j,k} L_{i,k})$$

R : 影響度係数 [lx/cd], d : データ系列, u : 重み
 m : 照度センサ数, n : 照明数, I : 計測照度 [lx], L : 光度 [cd]

4 推定に有効なログデータの抽出

4.1 概要

実証実験における知的照明システムのログデータは、日時や光度、照度などの多数のデータが存在するが、本稿では点灯光度 [cd] × 照明数、計測照度 [lx] × 照度センサ数を 1 系列のデータとする。また、ログデータには太陽光等の時間的に変化する外乱の影響を受けたデータも存在するが、これらの計測照度から影響度係数の推定は困難であるため、前提として外光のない環境におけるログデータを用いる。

そこで、データ間の類似度に基づいて類似データを単一化し、影響度係数推定に有効データのみを抽出して用いることで、提案手法の精度の向上、および計算速度の向上が期待できると考えられる。この処理を以下では有効データ抽出と表現する。本稿ではコサイン類似度とユークリッド距離を用いた有効データの抽出を行い比較をする。

4.2 コサイン類似度を用いた有効データ抽出方法

コサイン類似度とは 2 つのデータ系列 D_i, D_j の類似度を、各照明の光度値に関する両系列の m 次元ベクトル d_i, d_j (m : 照明台数) が成す角の大小で表現したものである。本研究では両系列間の類似度が閾値以上となる場合に一方を排除することで有効データ抽出を行う。

なおコサイン類似度ではベクトルの大きさを考慮できないため、基準光度を設定し光度値が基準光度以上ならば 1 に、基準光度以下であれば 0 にする特徴ベクトルを生成し、コサイン類似度の算出を行う。特徴ベクトルの例を式 (3) に、コサイン類似度の計算式を式 (4) に示す。

$$d_i = \{0, 1, 1, \dots, 0\} \quad (3)$$

$$\text{sim}(d_i, d_j) = \frac{d_i \cdot d_j}{|d_i| |d_j|} = \frac{d_{i1} d_{j1} + \dots + d_{im} d_{jm}}{\sqrt{d_{i1}^2 + \dots + d_{im}^2} \sqrt{d_{j1}^2 + \dots + d_{jm}^2}} \quad (4)$$

i, j : データ系列番号

コサイン類似度計算の流れを以下に示す。

1. 全データ系列を読み込み、基準光度 [cd] を最大点灯光度に設定する

2. 照明 k の光度が基準光度を超えていれば $d_k = 1$, 下回っていれば $d_k = 0$ として、各系列 D_i を光度値に関する特徴ベクトル d_i に変換する
3. 全データ系列の基準光度に関する特徴ベクトルの相互の類似度を計算する
4. 基準光度が照明の最小点灯光度に等しいならば (5) に、そうでなければ基準光度から 10 lx を減算し、(2) に戻る
5. 各 2 系列の全基準光度に関する類似度を総合し、それが閾値を超えていれば一方を排除する

なお、閾値は予備実験により 0.96 とする。

4.3 ユークリッド距離を用いた有効データ抽出方法

ユークリッド距離とは 2 つのデータ系列、各照明の光度値に関する両系列の m 次元ベクトル d_i, d_j (m : 照明台数) で表される 2 点の幾何学的な直線距離である。本研究では両系列間の類似度が閾値未満となる場合に一方を排除することで有効データ抽出を行う。ユークリッド距離の計算式を式 (5) に示す。

$$D(d_i, d_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^m (d_{i,k} - d_{j,k})^2} \quad (5)$$

k : 照明番号, i, j : データ系列番号

ユークリッド距離を用いた抽出方法の流れを以下に示す。

1. 全 n データ系列を読み込む
2. データ系列 d_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) に対して、 d_j ($j = i, i+1, \dots, n$) に関するユークリッド距離を算出する。
3. (2) で算出したユークリッド距離が、閾値を下回ってれば片方のログデータ d_j を排除する。

なお、閾値は予備実験より 38 とする。

5 検証実験

5.1 実験概要

コサイン類似度とユークリッド距離を用いた有効データ抽出の有効性の検証を行う。推定の対象環境は同志社大学香知間 KC111 実験室で、白色蛍光灯 15 灯、照度センサ 3 台を設置し、推定手法で用いる目的関数は 45 変数となる。対象環境を Fig. 1 に示す。本実験では知的照明の稼働シミュレーションを行い、ログデータを取得する。ANA/RC を動作させた場合の 5000 系列データ (目標照度 1 パターン) を用いて影響度係数推定手法の有効性の検証を行う。

上記の環境を想定して、有効データ抽出を行わなかった場合と、有効データ抽出を行った場合で検証する。

5.2 実験結果

1 のログデータを用いて推定した影響度係数と実測の影響度係数を比較した。有効データ抽出を行っていないときの照度センサ C に対する照明 10, 12, 13, 15 の影響度係数を Table.1 に示す。同様にコサイン類似度を抽

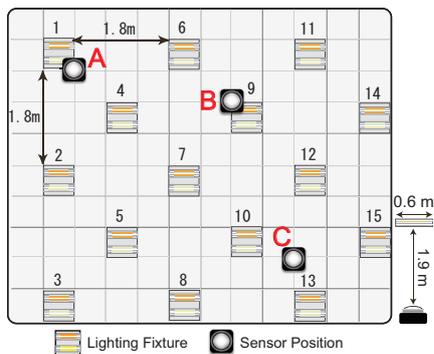


Fig.1 対象環境

出方法の影響係数を Table.2, ユークリッド距離を抽出方法に用いたとき影響係数を Table.3 に示す。

影響度推定において、コサイン類似度を用いた抽出を行うと推定値と実測値の誤差が最大 $1.04 \times 10^{-3} \text{lx/cd}$ であるのに対し、ユークリッド距離を用いた抽出を行うと、 $2.63 \times 10^{-3} \text{lx/cd}$ の誤差が生じた。なお、センサ A でも同様の比較を行ったが、両手法の誤差にそれほど差は見られなかった。これは、ユークリッド距離が各照明における光度値の相関を考慮しない為だと考えられる。センサ C で誤差が大きかったのは、センサ C に対して周辺の各照明に同程度の影響度があった為と考えられる。

次に 1000STEP のランダムに生成した光度値を用いて、実測照度と目標照度の照度誤差の比較を行った。セ

Table1 センサ C に対する実測影響度と推定影響度の比較 (有効データ抽出なし)

照明番号	推定影響度	実測影響度
10	0.1281	0.2073
12	0.08	0.1576
13	0.1543	0.2442
15	0.0859	0.1447

Table2 センサ C に対する実測影響度と推定影響度の比較 (コサイン類似度)

照明番号	推定影響度	実測影響度
10	0.206	0.2073
12	0.1668	0.1576
13	0.2422	0.2442
15	0.1343	0.1447

Table3 センサ C に対する実測影響度と推定影響度の比較 (ユークリッド距離)

照明番号	推定影響度	実測影響度
10	0.181	0.2073
12	0.1688	0.1576
13	0.245	0.2442
15	0.1243	0.1447

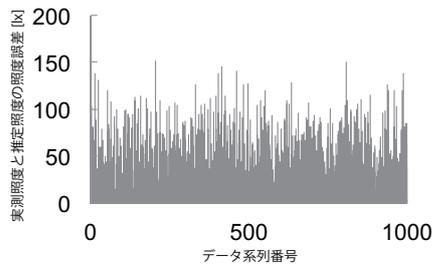


Fig.2 推定照度と実測照度の誤差 (有効データ抽出なし)

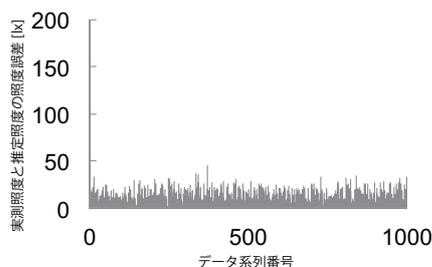


Fig.3 推定照度と実測照度の誤差 (コサイン類似度によるデータ抽出)

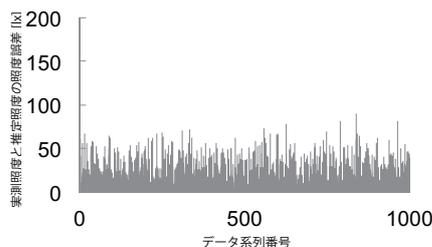


Fig.4 推定照度と実測照度の誤差 (ユークリッド距離によるデータ抽出)

ンサ C の照度誤差を有効データ抽出を行わなかった場合、コサイン類似度で排除した場合、そしてユークリッド距離で排除した場合でそれぞれ Fig.2, Fig.3, Fig.4, に示す。

この結果と影響係数の誤差より有効データ抽出の有効性は十分にあると考えられる。また、コサイン類似度とユークリッド距離の照度誤差がそれぞれ 8.649lx と 10.456lx となり、コサイン類似度でデータ抽出した場合が数理計画法における影響係数の推定において精度が良いといえる。

参考文献

- 大林文明ら, オフィスワークのプロ抱く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, 2006
- 小野景子ら, 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
- 三木光範ら, 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
- 照明学会, 照明ハンドブック, オーム社, 2003