

数理計画法を用いた照明の照度センサに及ぼす影響度の推定手法

宮崎 昇幸

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、我々は知的照明システムを提案している。知的照明システムでは、各ワークが設定した目標照度を満たし、かつ消費電力が最小となる点灯パターンを最適化手法を用いて実現することが可能である²⁾。

知的照明システムは、照明の制御に、回帰係数を用いた適応的近傍アルゴリズム (ANA/RC) というアルゴリズムを用いている²⁾。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である影響度係数を推定し、照明制御に用いる。現在、知的照明システムは実オフィスにプロトタイプシステムを導入して実証実験が行われているが、システムの大規模化に伴い単回帰分析による影響度の推定が困難になる。そのため、実際には、影響度調査という方法により影響度係数を実測しデータベース化して利用する手法が用いられている³⁾。

しかし、この方法では照明の劣化や環境の変化に対応するためデータベースを更新する際に毎回影響度調査を行わなければならない、非効率的である。そこで、システムの大規模化に対応可能で、かつ影響度調査を用いない影響度係数の推定手法を提案し、実験を通してその有効性を検証する。

2 現在の知的照明システムにおける影響度測定手法

2.1 知的照明システム

知的照明システムは、照度センサからの照度情報および電力センサからの電力情報に基づき最適化アルゴリズムを用いて各照明器具を制御することで、任意の場所にワークが要求する照度を提供する。最適化アルゴリズムには、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) という進化的アルゴリズムを用いている。ANA/RC では、物理的な位置情報を一切用いず、照明の光度変化量と照度センサの照度変化量の回帰係数を単回帰分析により求めることで、動的にセンサと照明の位置関係を推定している。

2.2 照度、光度の関係と影響度係数

照明の点灯光度と照度の間には線形関係が存在する。直線光源の場合では、照度と光度の関係は逐点法⁴⁾によ

り式 (1) のように表される。

$$I_i = \sum_{j=1}^m \frac{\cos^3 \theta_j}{h_j^2} L_j \quad (1)$$

I_x : センサ x の照度 [lx], L_y : 照明 y の光度 [cd],
 m : 照明台数, θ_y : 照明 y とセンサのなす鉛直角,
 h_y : 照明 y とセンサの鉛直距離 [m]

式 (1) において、光度以外は光源とセンサの位置関係に依る値であるため定数と見なすことが可能である。この定数を影響度係数と呼び、これを用いて照度と光度の関係を表式 (2) のように表現できる。

$$I_i = \sum_{j=1}^m R_{i,j} L_j \quad (2)$$

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

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り、照明台数とセンサ数の積と同数存在する。この影響度係数を用いることで、照明やセンサの物理的な位置情報を一切用いること無く両者の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。

2.3 現行の手法の課題

2.1 節で述べたように、知的照明システムでは単回帰分析により照明と照度センサの影響度を推定している。しかし、単回帰分析による影響度係数の推定ではセンサと照明の 1 対 1 の影響度を求めることになり、他の照明がセンサに与える影響を考慮しないため、センサや照明の数が多く大規模なシステムになると、正確に影響度係数が推定できない。そこで、大規模なシステムでは事前に影響度調査という方法により影響度係数を実測してデータベース化して利用する手法が提案されている。

しかし、この手法では、照明の劣化や環境の変化により影響度係数が変化する度に影響度調査を行ってデータベースを更新しなければならない。影響度調査は、部屋全体の照明の点灯と消灯を繰り返すことにより影響度係数を測定する方法であり、外光の影響が無く、部屋に人の居ない環境で行う必要があるが、実オフィスで照明の点灯や消灯を繰り返すことは現実的でなく、かつ非効率的である。

以上のことから、最適化手法を用いて点灯のログデータから影響度係数を推定することで、外光の影響のない環境において知的照明システムを稼働させた状態で影響度係数を得る手法を提案する。

3 数理計画法を用いた影響度係数の推定

3.1 概要

照明の点灯光度、および照度センサの照度出力の実測データから影響度係数を推定する問題を以下では影響度係数推定問題と呼ぶ。新しい影響度係数測定手法として、この問題を影響度係数を変数とする最適化問題として捉え、最適化手法により最適解を求めることで影響度係数を推定する方法を提案する。具体的には、外光の影響のない環境で ANA/RC による照明制御を行い、そのなかで照明の点灯光度、および照度センサの照度出力の実測データを取得する。その実測データを用いて影響度係数を変数とする式 (2) のような方程式を複数立式し、数理計画法により連立方程式の解となる影響度係数を計算する。

3.2 最適化問題としての定式化

影響度係数推定問題を最適化問題として捉え、定式化すると式 (3) のようになる。ここでは、照明台数分の点灯光度値とセンサ台数分の実測照度値からなるひとつの実測データ系列を式 (4) のように表現するものとする。

$$\min_{R \in \mathbb{R}} f_i = \min_{R \in \mathbb{R}} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^m R_{j,k} L_{i,k} - I_{i,j} \right)^2 \quad (3)$$

$$D_i = \{L_{i,1}, L_{i,2}, \dots, L_{i,m}, I_{i,1}, I_{i,2}, \dots, I_{i,n}\} \quad (4)$$

($i = 1, 2, 3, \dots$)

i : データ番号, m : 照明台数, n : センサ数,

L : 光度 [cd], I : 実測照度 [lx],

$R_{x,y}$: センサ x に対する照明 y の影響度係数

3.3 最適勾配法による影響度係数推定の流れ

3.2 節にて定式化した影響度係数推定問題は、非線形である。そこで、ここでは数理計画法の手法として非線形計画法である最適勾配法を用いる。最適勾配法とは、勾配方向に直線探索を行い最適なステップ幅を計算（一次元最適化）しながら解探索を行う手法である。

3.2 節にて示した最適化問題を解くことは、以下の式 (5) に示すような各センサに対する m 元 1 次方程式の解を求めることに等しい。

$$R_{j,1}L_{i,1} + R_{j,2}L_{i,2} + \dots + R_{j,m}L_{i,m} = I_{i,j} \quad (5)$$

i : データ番号, j : センサ番号, m : 照明台数,

L : 光度 [cd], I : 実測照度 [lx],

$R_{x,y}$: センサ x に対する照明 y の影響度係数

したがって、影響度係数推定問題の解を一意に求めるには、互いに異なる実測データ系列を用いて少なくとも m 個 (= 照明台数) の目的関数を立式し、その全てを同時に最小化するような影響度係数を探索しなければならない。そこで、立式した複数の目的関数に対して、各目的関数を最小化する影響度係数を算出・伝播しながら連続的に最適勾配法を適用することにより最適化を行う。以下にその流れを示す。

1. 影響度係数の初期値を設定。 $k = 1$ とする。
2. データ系列 D_k の目的関数に最適勾配法を適用。
3. 終了条件を満たしていれば探索を終了、そうでなければ 4 へ。
4. D_k が末尾のデータ系列であれば $k = 1$ 、そうでなければ $k = k + 1$ とし、2 で得られた影響度係数をデータ系列 D_k の目的関数に初期値として伝播して 2 へ戻る。

また、最適勾配法の計算の流れを以下に示す。

1. 勾配ベクトル $\nabla f(x)$ を算出。
2. 降下方向 $s = -\nabla f(x)$ の決定。
3. 直線探索問題 $f(x + \alpha s) = \min \{f(x + \alpha s)\}$ を解き、ステップ幅 α を決定。
4. $x = x + \alpha s$ として探索点を更新。
5. 終了条件を満たしていれば探索を終了、そうでなければ 1 へ戻る。

以上の動作により、影響度係数を全ての目的関数を最小化するような値に収束させることが可能である。

4 検証実験

4.1 実験概要

光度・照度の実測データを用いて最適勾配法による影響度係数の推定のシミュレーションを行い、影響度調査により測定した実測影響度係数との比較により提案手法の評価および使用データに関する検討を行う。実測データの取得および影響度調査は香川県 KC111 実験室で行った。実験環境を Fig.1 に示す。実験室は、7.2[m] × 6.0[m] の空間に照明（白色蛍光灯）15 台、照度センサ 3 台が Fig.1 のように設置されている。

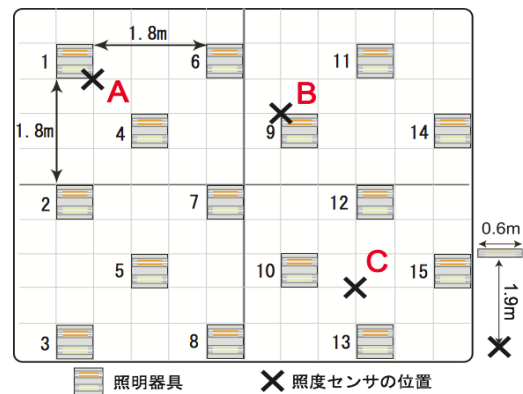


Fig.1 実験環境

4.2 使用データ

今回は照明 15 台、照度センサ 3 台を用いるため、使用するデータは式 (4) において $m = 15, n = 3$ としたデータ系列となる。データは以下の 4 種類を用いる。

1. 影響度調査によって取得した 16 系列。15 台の照明全てを 900[cd] で点灯させて 1 系列を取得。その後、各照明を 1 灯ずつ消灯して 15 系列を取得。

2. 等間隔に光度を変化させ取得した 150 系列. 15 台の照明全てを 900[cd] で点灯させたのち, 各照明の光度を 1 灯ずつ下げて 15 系列を取得. 下げる光度は 400[cd],450[cd],500[cd],...,850[cd] の 50[cd] 刻みの 10 種類で, 計 $15 \times 10 = 150$ 系列を取得.
3. ランダムに光度を変化させ取得した 150 系列. 生成する光度 L_i [cd] は $400 \leq L_i \leq 1000$ を満たす整数値.
4. ランダムに光度を変化させ取得した 1000 系列. 取得方法は 3 と同様.

4.3 評価と考察

影響度調査で取得したセンサ A に対する実測影響度係数(実測値)と, 最適勾配法で推定したセンサ A に対する影響度係数(推定値)とを, 差の絶対値和の大小および収束に要した探索回数において比較し, 本手法の評価を行う. 以下, Table1 に使用データ別の実測値およびその推定値を, Table2 に使用データ別の実測値と推定値の差の絶対値和, および収束までに要した探索回数を示す.

Table1 より, 影響度調査で取得したデータ(データ 1)を用いて推定を行った場合では高々 10^{-3} 程度の誤差で実測値に近い推定値を算出できているのに対して, データ 2~データ 4 では最大 10^{-2} 程度の誤差が出ている. 香知館 KC111 実験室の照明の最大点灯光度においては影響度係数の 10^{-2} の誤差に対して照度で 10[lx] 程度の誤

Table1 実測値と推定値の比較(センサ A)

照明番号	使用データ				実測値
	1	2	3	4	
1	0.2998	0.2895	0.2900	0.2906	0.300
2	0.0597	0.0585	0.0568	0.0573	0.060
3	0.0140	0.0137	0.0134	0.0127	0.014
4	0.1538	0.1517	0.1508	0.1516	0.154
5	0.0193	0.0185	0.0198	0.0190	0.020
6	0.0636	0.0640	0.0652	0.0650	0.064
7	0.0267	0.0265	0.0279	0.0272	0.028
8	0.0110	0.0117	0.0116	0.0121	0.012
9	0.0187	0.0185	0.0193	0.0193	0.020
10	0.0107	0.0119	0.0104	0.0122	0.012
11	0.0094	0.0104	0.0112	0.0104	0.011
12	0.0082	0.0089	0.0080	0.0095	0.010
13	0.0070	0.0079	0.0069	0.0076	0.009
14	0.0057	0.0065	0.0086	0.0090	0.008
15	0.0078	0.0089	0.0078	0.0085	0.010

Table2 使用データ系列別の精度及び効率の比較

	使用データ			
	1	2	3	4
差の絶対値和	0.0500	0.075	0.0962	0.0850
探索回数	10673	200251	7629	7653

差が生まれるが, 人間は ± 50 [lx] 以内の照度変化は感じにくいことから, 許容誤差であると言える. すなわち, 今回使用したどのデータにおいても, 提案手法により影響度係数が推定できていると言える.

データ 1 とデータ 2 を比較すると, 照明番号 1 や 4 のようにセンサ A に対して強い影響を与えている照明の影響度がデータ 2 では減少し, 同時に, 影響の弱い照明の影響度が増加している. このことから, それぞれの取得方法の差異を考慮すると, 消灯している照明の無い状況では, 消灯している照明が存在する場合よりも多くの照明に影響度が分散され特定の照明が突出して高い影響度を持ちにくいと考えられる. 消灯している照明の存在しない状況で取得したデータ 2 およびデータ 3 の推定値に関してもこの傾向は見られ, 消灯している照明の存在・不在により影響度係数を使い分ける必要がある可能性がある.

次に, Table2 より, 等間隔に光度を変化させたデータであるデータ 1 およびデータ 2 では使用データ系列数が増えると探索回数が大きく増加しているのに対し, ランダムに光度を変化させたデータ 3 およびデータ 4 ではデータ数が増えても探索回数はそれほど増加せず, かつ精度が向上していることがわかる. したがって, 知的照明システムの稼働により取得したログデータのように光度変化が一様でないデータを用いた場合には, 使用するログデータの量を増やすことにより, 更に高速かつ正確な影響度係数の推定を行うことが期待できる.

5 まとめと今後の展望

本研究では, 外光の影響の無い環境で知的照明システムを稼働させたログデータから影響度係数を推定することを目的として, 最適勾配法による影響度係数推定手法を提案した. また, 数種類の実測データを用いた検証を行い, 最適勾配法により影響度係数が推定可能であることを確認し, 実際のログデータの使用に向けた検討を行った. 今後は, オフィスビルでの実証実験から得られた知的照明システムの実際のログデータを用いた検証, センサ数や照明台数を増やし大規模なシステムを想定した検証, およびアルゴリズムの改善やログデータの選別など推定値の精度向上に関する検討が必要であると考えている.

参考文献

- 1) 大林文明ら. オフィスワークの生産性向上のための環境制御の研究 - 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.
- 2) 池田聡, 三木光範, 廣安知之. 知的照明システムを用いた実務環境における最適な照度. 日本機械学会第 16 回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集, pp. 121-124, 2006.
- 3) 三木光範, 米本洋幸, 廣安知之, 吉見真聡. 照明と照度センサ間の影響度をデータベース化する個別分散最適制御照明システム. 情報処理学会第 73 回全国大会講演論文集, pp. 395-396, 2011.
- 4) 照明学会. 照明ハンドブック. オーム社, 2003.