

知的照明システムにおける照度/光度影響度係数の稼働ログデータによる推定

上南 遼平

Ryohei JONAN

1 はじめに

我々はオフィスにおける執務者の快適性向上と消費電力の削減を両立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度センサがある場所に、執務者が個別に要求する目標照度を最小の消費電力で提供する。

知的照明システムは実験室での検証実験の後、実用化に向けて複数のオフィスに導入し実証実験を行い、その有用性を検証してきた¹⁾。実証実験では、JIS 基準照度である 750 lx 以下の照度を要求する執務者が多く、全体で消費電力を 50 % 程度削減することが可能となった。

知的照明システムでは、各照度センサに対する各照明の照度/光度影響度係数を用いて、照明制御を行う。実オフィスに導入した知的照明システムは、システム導入時にオフィスに立ち入り照度/光度影響度係数を計測し、その値を用いて適切に照明を制御する。この手法は対象環境において照明を全て消灯し、1 灯ずつ照明を点灯させ各照明が各照度センサに及ぼす照度/光度影響度係数を計測する。この手法を照度/光度影響度係数計測法と呼ぶ。

しかし、導入時に計測する照度/光度影響度係数は照明の劣化やパーティションの設置/撤去、レイアウトの変更などにより変化するため、値を更新する必要がある。そのため、照明環境の変化に応じて照度/光度影響度係数を再計測することが望ましいが、照度/光度影響度係数計測法を用いて計測を行うことは照明の点滅を繰り返すため執務者の業務に支障を来すことから一般的に許可されないことが多い。また、この手法は照明の点滅を繰り返すため夜間に照度/光度影響度係数を計測することは防犯上問題となることが考えられる。

そこで本研究では、新たに知的照明システムの稼働ログデータを基にして照度/光度影響度係数を推定する手法を提案する。稼働ログデータを用いることで、照度/光度影響度係数計測法を行うことなく、照明環境の変化に応じて照度/光度影響度係数の更新が可能となる。

2 知的照明システム

2.1 知的照明システムの構成と制御

知的照明システムは、照明光度を個別に変化させることによって、任意の場所に執務者が要求する明るさを提供し、かつ省電力な状況を実現するシステムである。複数の調光可能な照明器具、照明制御装置、複数の照度センサ、および電力計を一つのネットワークに接続することで構成する。知的照明システムの構成を 1 に示す。

知的照明システムの制御アルゴリズムとして、Simulated Annealing (SA) を基礎とした回帰係数に基づく近

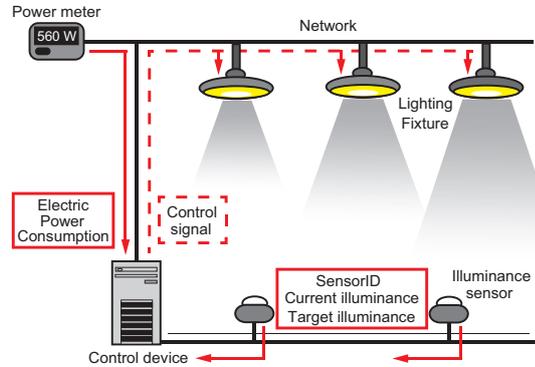


Fig.1 知的照明システムの構成

傍設計を組み込んだ適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient : ANA/RC) を提案した²⁾。照明制御装置は、各照明光度を人の目に感知されない変化幅内でランダムに微小変化させる。そして、照度センサから得られる照度情報、および電力計から得られる電力情報を基に、現在の照明の点灯パターンの有効性を評価する。照明の点灯パターンの微小な変更と、有効性の評価を繰り返すことで、執務者が要求する目標照度を低消費電力で実現する。

2.2 照度/光度影響度係数

ANA/RC は、照度/光度影響度係数に基づいて照明を制御する。照明の光度変化量と照度センサの照度変化量を基に回帰分析を行い、照度/光度影響度係数を動的に推定し、その値を基に適切な次光度を決定し、収束速度の向上を図る²⁾。このため、正確な照度/光度影響度係数を把握することは、知的照明システムにおいて各照明を制御する上で重要である。しかしながら、各照明の光度を同時にランダムに変化させるため、ある照明の光度変化において他の照明の光度変化が回帰分析における外乱となる。そのため、照度センサから遠い照明の回帰係数が正しく算出できず、省電力な点灯パターンが実現できないことがあった。実オフィスに導入した知的照明システムにおいてもこの現象が観測されており、この時、不必要な照明が一時的に増光するなどの現象が生じる。この現象は一時的なものであり、各執務者が要求する照度や全体の消費電力にはほとんど影響はないが、知的照明システムを導入した実オフィスの執務者から少し気になるとのアンケート結果が得られた。

我々は、この課題を改善するため、新たな照度/光度影響度係数を算出する手法を考えた。知的照明システムを導入した実オフィスでは、固定席での執務が多いことから、それらのオフィスに対して動的に照度/光度影響度係

数を推定するのではなく、知的照明システム導入時に照度/光度影響度係数を計測する。対象環境において照明を全て消灯し、1灯ずつ照明を点灯させることで、式(1)に示す関係式に基づき、各照明から各照度センサに及ぼす照度/光度影響度係数を算出する。この手法を本研究では、照度/光度影響度係数計測法と呼ぶ。計測した照度/光度影響度係数をデータベースに格納し、その値を用いることで回帰分析を行う場合に比べて安定した照明制御を行うことができる。

$$R_{ij} = I_i/L_j \quad (1)$$

I_i : 照度センサ i の照度 [lx], L_j : 照明 j の光度 [cd],
 R_{ij} : センサ i に対する照明 j の照度/光度影響度係数 [lx/cd]

実オフィスは、窓から外光が入る環境が一般的であり、このような環境では照度/光度影響度係数の計測値に外光による誤差が生じることが考えられる。そのため、実オフィスに導入した知的照明システムでは、システム導入時に管理者から特別に許可を得ることで、日の入り後に計測実験を行う。

2.3 実環境における課題

照度/光度影響度係数は次のような照明環境の変更に応じて変化する。

- パーティションやロッカーなどの設置/撤去
- 机等のレイアウトの変更
- 照明器具の経年劣化

実オフィスで上記の照明環境の変化が生じた場合、照度/光度影響度係数計測法により照度/光度影響度係数を再計測し、値を更新する必要がある。しかし、システム導入後に実オフィスにおいて照度/光度影響度係数計測法を行うことは、照明の点滅を繰り返すため執務者の業務に支障を来す。そのため、こうした計測実験を行うことは一般的に許可されないことが多い。また、夜間の執務者不在時にこのような計測実験を行うことは警備の観点から許可されない。

そこで、本研究では知的照明システムの稼働ログデータを基に、数理計画法を用いて照度/光度影響度係数を推定する手法を提案する。

3 稼働ログデータを用いた照度/光度影響度係数の推定

知的照明システムの稼働ログデータを用いて照度/光度影響度係数を推定する手法を提案する。提案手法に用いるログデータの一例は、図2に示す通りであり、その中の照明台数分の光度値と照度センサ台数分の照度値を用いて照度/光度影響度係数を推定する。

稼働ログデータ中の同時刻における各照明光度と各センサ照度を1系列のデータとし、データ系列毎に推定照度と実測照度の差の二乗で表される目的関数を求める。その目的関数のデータ系列分の総和を単一の目的関数と

Time	luminance (light 1)	luminance (light 2)	measured_illuminance (sensor A)	target_illuminance (sensor A)
9:00	900	900	618	300
9:01	927	918	614	300
9:02	927	918	610	300
9:03	917	899	598	300
9:04	917	899	595	300
9:05	880	854	576	300
9:06	906	802	573	300
9:07	906	802	573	300
9:08	951	761	573	300
9:09	912	715	557	300
9:10	912	715	553	300
9:11	912	715	551	300
9:12	912	715	550	300
9:13	875	700	532	300
9:14	866	672	521	300
9:15	857	644	510	300

Fig.2 知的照明システムの稼働ログデータ

して最小化することで、照度/光度影響度係数の推定を行う。複数の照明の光度値と照度センサの照度の関係に基づき、目的関数を式(2)のように立式する。

$$F = \sum_{i=1}^d \left(\sum_{j=1}^n (E_{ij} - I_{ij})^2 \right) \quad (2)$$

$$E_{ij} = \sum_{k=1}^m R_{jk} L_{ik}$$

d : データ系列, m : 照明台数, n : 照度センサ台数,
 E_{ij} : データ系列 i における照度センサ j の推定照度 [lx],
 I_{ij} : データ系列 i における照度センサ j の実測照度 [lx],
 L_{ik} : データ系列 i における照明 k の点灯光度 [cd],
 R_{jk} : 照度センサ j に対する照明 k の照度/光度影響度係数 [lx/cd]

式(2)に示した照度/光度影響度係数推定の最適化問題は非線形であるため、数理計画法の手法としてここでは、最急降下法を用いる。

4 稼働ログデータを用いた照度/光度影響度係数推定手法における有用性の検証

次に示す2つの実験を行うことで、提案手法の有用性について検証する。

- 提案手法により照度/光度影響度係数の推定が可能か (精度検証実験)
- 照明環境の変化に応じて照度/光度影響度係数の更新が可能か (照明環境変化実験)

検証実験を行うため、照明12灯および照度センサ3台を用いて図3に示す実験環境を構築した。実験環境は、7.2 m × 6.0 m × 2.6 mの空間であり、JISが推奨するオフィス机の高さである床上0.7 mの位置に照度センサを設置した。照明は最大1150 cdまで調光可能なMitsubishi社製LED照明を、照度センサには一般型A級デジタル照度計であるANA-F11を用いた。また、照明の最小点灯光度は最大点灯光度の20%とした。

精度検証実験では、図3に示すパーティションは設置しない。照度/光度影響度係数計測法により計測した照度/光度影響度係数から算出した照度(真値)と提案手法

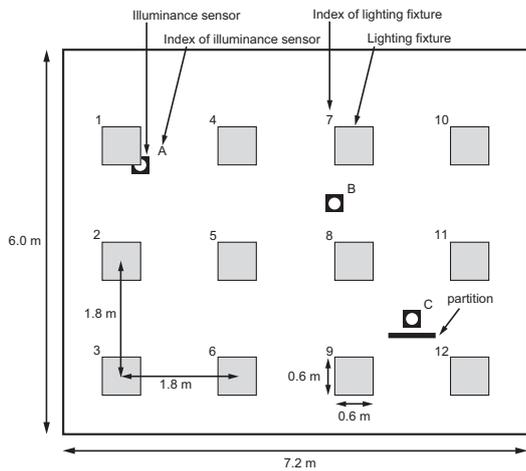


Fig.3 実験環境（平面図）

により推定した照度/光度影響度係数を用い算出した照度（推定値）を評価対象とし提案手法の有用性を検証する。

照明環境変化実験では、知的照明システム稼働中に照明環境の変化を模擬するため、パーティションを設置する。パーティションの設置により、照明光度がセンサ照度に及ぼす照度/光度影響度係数は変化するため、照明の点灯パターンが悪化する。そこで、パーティション設置後のログデータを用いて照度/光度影響度係数を更新することにより、最適な点灯パターンを実現することが可能であるか検証する。

4.1 実験結果と考察（精度検証実験）

実環境で照度/光度影響度係数の推定を行うことを模擬し、執務者が目標照度を表 1 に示すように変更した 60 分間のログデータ、すなわち 1 ステップ 2 秒のため 1800 ステップの稼働ログデータを用いて、提案手法により照度/光度影響度係数の推定を行った。また、推定に用いた各照度センサの 60 分間の照度履歴を図 4 に示す。

実験結果を明確にするため各照度センサに対し照度/光度影響度係数の計測値が 0.05 lx/cd 以上であるものを図 5 に示す。ここでは枚数の都合上照度センサ A の結果のみを示す。また、計測した照度/光度影響度係数が 0.05 lx/cd 未満のものに対しても同等の精度で推定できた。

図 5 に示す実験結果により、計測値と推定値にほとんど誤差なく、照度/光度影響度係数の推定ができていたことがわかる。

提案手法により推定した照度/光度影響度係数を用い

Table1 目標照度変更履歴

time [min]	sensor A	sensor B	sensor C	[lx]
0-10	300	500	700	
10-20	500	500	700	
20-30	300	400	400	
30-40	600	500	700	
40-50	300	500	700	
50-60	300	300	700	

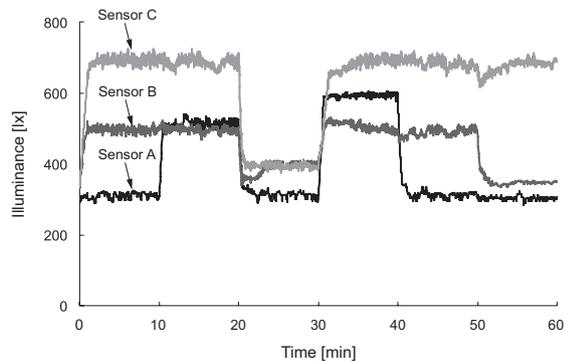


Fig.4 各照度センサの照度履歴

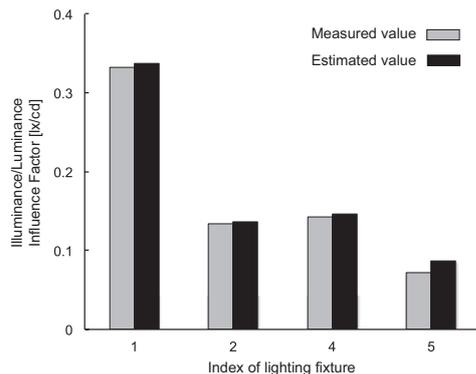


Fig.5 照度/光度影響度係数の推定値と計測値（照度センサ A）

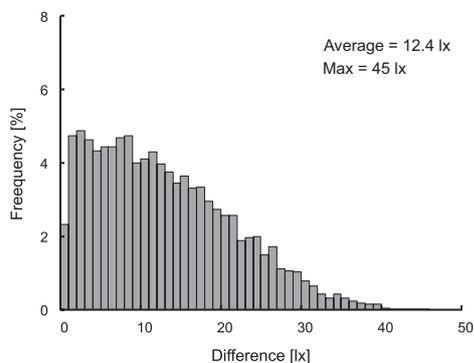


Fig.6 照度誤差のヒストグラム（照度センサ A）

て、照度誤差を算出することにより提案手法の評価を行う。照度誤差とは、実際に計測した照度/光度影響度係数と光度を用いて算出した照度（真値）と提案手法により推定した照度/光度影響度係数を用いて算出した照度（推定値）の誤差である。各照度センサにおける照度誤差のヒストグラムを作成することで提案手法の検証を行った。ヒストグラムの算出に用いた光度は、様々な点灯パターンにより照度誤差の検証を行うため実験環境における照明の点灯光度をランダムに作成したデータ (1×10^4 通り)を用いた。図 6 に照度センサ A における照度誤差のヒストグラムを示す。

図 6 に示す通り照度センサ A では、平均照度誤差が 12.4 lx、最大照度誤差が 45 lx でありこれは各センサの

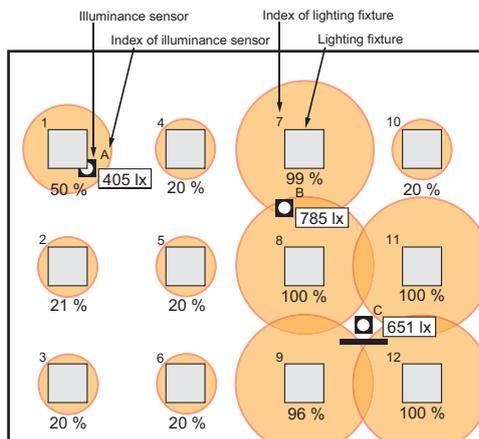


Fig.7 点灯光度分布 (影響度係数更新前)

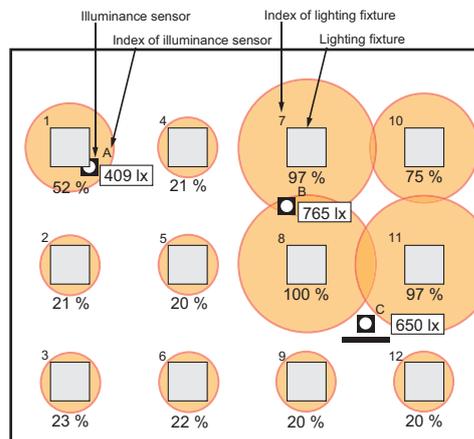


Fig.8 点灯光度分布 (影響度係数更新後)

中で照度誤差が最も大きかった。JIS では執務者の作業面照度として 750 lx を推奨している。また、オフィスの一般的な業務である VDT 作業の執務者は、基準照度に対して 12% 程度の照度誤差は認知しないことがわかっている³⁾。よって、JIS の規定照度に対し執務者は 60 lx 程度の照度誤差を許容できると考えており、提案手法は実環境において有用であると言える。

本稿では、窓のないオフィスを模擬した実験環境において提案手法の精度検証を行った。実オフィス等の窓から外光が存在するオフィス環境では、日の入り後の外光の影響が少ない時間帯のログデータを用いて提案手法により照度/光度影響度係数を推定することで、同等の推定精度を保持すると考えている。

4.2 実験結果と考察 (照明環境変化実験)

照明環境変化実験では、図 3 に示すように実験環境において、照明環境の変化を模擬するため照度センサ C の下方にパーティションを設置した。

パーティション設置後の目標照度を実現する照明の点灯パターンを図 7 に示す。照度センサ A, B, C の目標照度は 400 lx, 750 lx, 650 lx である。

パーティションを設置することにより、照度/光度影響度係数が変化する。そのため、照度センサ C に対する照明 9 と照明 12 の照度/光度影響度係数が低下するにも関わらず照度/光度影響度係数の更新が行なわれていないため、強く点灯していることがわかる。これは、省エネルギー性の悪化を招く要因となるため知的照明システムにおいて最適な点灯パターンであるとは言えない。

次に、パーティションが設置された状態で精度検証実験と同じように照度収束実験を行う。そして、得られた稼働ログデータを基に提案手法により照度/光度影響度係数を推定し、データベースの値の更新を行う。更新した照度/光度影響度係数を用いて目標照度を実現する点灯パターンを図 8 に示す。

図 8 における照明 9 と照明 12 が照度/光度影響度係数の更新前と比較し減光していることがわかる。照度/光度影響度係数の更新後の照明の点灯パターンは、更新前と同等の目標照度の実現精度があり、かつ消費電力を削減

をしている。これらの実験結果により、本提案手法を用いることで執務者の目標照度を実現し、かつ消費電力を削減する点灯パターンを実現できることを示した。

これら 2 つの検証実験の結果より知的照明システムにおいて提案手法は有用であると言える。

5 結論と今後の展望

本研究は、実オフィスにおいて照度/光度影響度係数の計測ができないという課題に対し、知的照明システムの稼働ログデータを用いて照度/光度影響度係数を推定する手法を提案した。この手法を用いることにより、オフィスでの業務を中断せず、かつ照度/光度影響度の計測に伴う労力やコストをかけずに、照明環境の変化に応じて照度/光度影響度係数の更新が可能である。

提案手法において最大 45 lx の誤差が発生した要因として、稼働ログデータのデータセットの偏りが考えられる。知的照明システムでは照度収束時に類似したログデータを出力し続ける。よって、提案手法によって照度/光度影響度係数の推定を行う場合、類似したデータセットに目的関数が大きく重み付けされる。

この課題を解決するため、稼働ログデータから提案手法において有効なログデータを抽出する必要がある。照度収束時に人の目に感知されない変化幅内で光度を変化させることで、有効なログデータを出力する手法も考えられる。また、実オフィスに導入した知的照明システムを評価対象とし実験を進めていくことを検討している。

参考文献

- 1) 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. 電気学会誌, C, 電子・情報・システム部門誌, pp. 750-757, 2010.
- 2) Tomoyuki Hiroyasu Mitsuharu Yoshikata Shingo Tanaka, Mitsunori Miki. An evolutionary optimization algorithm to provide individual illuminance in workplaces. *Proc IEEE Int Conf Syst Man Cybern*, pp. 941-947, 2009.
- 3) 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, pp. 346-351, 2001.