

実執務空間における個別照度制御アルゴリズムの提案

三木 光範*₁ 〇吉形 允晴*₂
廣安 知之*₃ 田中 慎吾*₂

キーワード：照明制御 最適化 個別照度 省エネルギー

1. はじめに

近年、オフィス環境についての研究がなされており、オフィス環境がワーカーに大きな影響を与えていることが知られている[1][2]。照明環境については、各ワーカーの希望に応じた明るさを提供することによって知的生産性が向上することが報告されている。[3]

しかし、現在、日本のオフィスでは机上面照度 750 lx 以上という均一な照度を基準とする照明設計がなされている。そのため、各ワーカーに適した光環境ではないと考えられる。また、人種や文化によっても適正な照度は異なると考えられる。これらのことから、我々の研究室では個別照度環境を実現するために知的照明システムについて研究を行っている。知的照明システムは各ユーザが希望する照度を提供し、かつ必要最小限の電力でその照度を実現する。

本報告では、知的照明システムによる個別照度制御アルゴリズム (ANA/RC : Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient) を提案する。また、実執務空間にて知的照明システムの評価実験を行い、その有効性を検証する。

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、図 1 に示すように、マイクロプロセッサを搭載した照明、移動可能な照度センサ、および電力計から構成され、各要素はネットワークで接続される。各ユーザは照度センサに照度制約条件 (ユーザが要求する照度) を設定する。このとき、各照明は自律的な光度変化を繰り返し、最適な光度に収束する。また、知的照明システムでは、照明や照度センサの位置情報を必要としない。これは、照度センサから送られる照度データを基に、照明が照度センサに及ぼす影響度を学習するためである。これより、各ユーザ

の目標照度を素早く実現することができる。

知的照明システムの特徴は、全体を統括して制御する要素は存在せず、各照明が自律的に制御を行っていることである。そのため、システムの耐故障性が高く大規模なオフィスにおいてもシステムの高い信頼性が得られる。

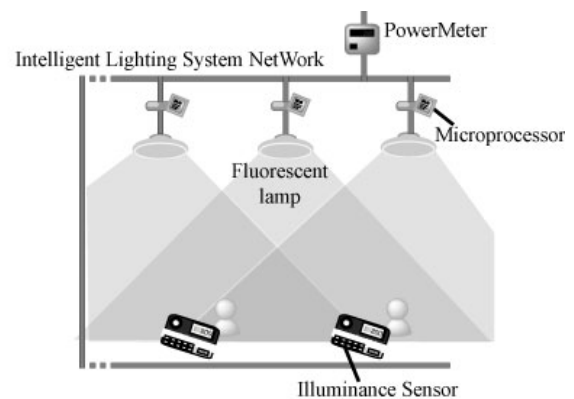


図 1 知的照明システムの構成

2.2. 最適化問題としての定式化

知的照明システムの目的は各ユーザの希望する照度を実現し、消費電力を最小にすることである。このため、各照明は自身の光度を最適化する最適化問題として捉える。そこで、各照明は自身の光度を設計変数とし、ユーザの目標照度という制約条件の下、消費電力を最小化する最適化問題を解く。そのための目的関数を式(1)のように設定する。

$$f = P + w \sum_{j=1}^n g_j \quad (1)$$

目的関数は消費電力量 P と照度制約 g からなる。また、重み w を変化させることで電力と照度の優先度を変化させることができる。照度制約は、ユーザの作業に最適な照度であることを考慮する。なお、本報告における照度制約条件は、一般的に明るい場所よりも暗

い場所における作業に不満が多いことから、ユーザが必要とする照度以下にならないようにする。すなわち、現在照度を目標照度以上にするという条件式(2)を照度制約に加える。

$$g_j = \begin{cases} 0 & 0 \leq (Lc_j - Lt_j) \\ (Lc_j - Lt_j)^2 & (Lc_j - Lt_j) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

P: 消費電力量, w: 重み, j: 照度センサの数,
Lt: 目標照度, Lc: 現在照度

2.3. 知的照明システムの制御アルゴリズム

知的照明システムでは汎用最適化手法である HC (Hill Climbing) 法をベースとしたアルゴリズムを用いる。さらに提案するアルゴリズム ANA/RC では、各照度センサに対する照明の影響度推定を行い、状況に応じて効率よく照度収束を行うための機構を組込む。以下に ANA/RC の制御の流れを示す。

- ①各照明は初期光度で点灯する。
- ②各照度センサは照度情報(現在照度, 目標照度)を、電力計は消費電力量をネットワークに送信する。
- ③各照明は②の情報を取得し、現在光度における目的関数の評価を行う。
- ④影響度と照度情報を基に光度変化の範囲を決定する。
- ⑤光度変化範囲内において次光度をランダムに生成し、照明をその光度で点灯させる。
- ⑥各照度センサは照度情報を、電力計は消費電力量をネットワークに送信する。
- ⑦各照明は⑥の情報を取得し、次光度における目的関数の評価を行う。
- ⑧照明の光度変化量および照度センサの照度変化量による回帰係数を計算する。
- ⑨目的関数の評価値が改良された場合は次光度を受理し、そうでない場合は元の光度に戻す。
- ⑩②～⑨を光度値の1回の探索とし、繰り返す。

以上の動作を繰り返すことで、各照明は各照度センサに対する影響度を学習しつつ、各ユーザの目標照度

を提供し、かつ省エネルギーな状態を実現する。なお、1回の探索に必要な時間は約1秒である。上記の繰り返しの際に⑤ではなく②に戻って再度目的関数の評価を行う理由は、環境の変化に対応するためである。

2.4. 次光度生成の方法

一般的な HC のアルゴリズムではランダムに光度を変化させながら目的関数を最小化する。そして、そのとき用いる次光度生成の範囲は、一定である。しかしながら、このような一定の次光度生成範囲を用いると探索の繰り返し数が多くなり照度の収束が遅くなる。このため、ANA/RC では次光度生成の範囲を適応的に決定する。すなわち、ある照明の光度を増加させる必要があるときには増光傾向の次光度生成範囲を用いる。一方ある照明の光度を減光させる必要があるときには減光傾向の次光度生成範囲を用いる。図2には、(A)減光傾向、(B)中立および(C)増光傾向の3種類の一例である。なお、図2で示した数値は照明の最大点灯光度を100%とした際の光度変化量である。

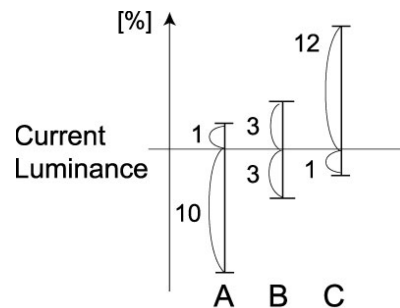


図2：次光度生成範囲の種類

各照明は各照度センサに対する影響度や照度センサの照度値に基づき、照度センサjに対する次光度生成範囲Nを、以下のルールを用いて決定する。

$$N_i = \begin{cases} r_j < threshold & \dots A \\ r_j \geq threshold \text{ and } Lc \geq Lt & \dots B \\ r_j \geq threshold \text{ and } Lc < Lt & \dots C \end{cases}$$

ここで、rは照度センサiに対する回帰係数、thresholdは影響の有無を判定するための回帰係数の閾値を示す。

各照度センサに対して次光度生成範囲Nを決定した

後、次光度生成範囲 N の中でより増光傾向の高いものをその照明の近傍とする。上記のルールを用いることで、照度センサに対して影響度の少ない照明は減光する。一方、影響度の高い照明は影響する照度センサの目標照度を実現するように光度変化を行う。

2.5. 回帰係数を用いた影響度の推定

照明が照度センサに与える影響度を推定するために、回帰分析を用いる。回帰分析とは、説明変数 x を変化させたときに観測値 y がどのように変化するかという 2 変数間の因果関係を分析する一般的な手法である。知的照明システムでは、照明の光度変化量を x を説明変数とした際に、その光度変化に対する各照度センサの照度変化量 y を観測値と捉え分析を行う。図 3 では、照明 A と照度センサ 3 台の物理的な位置関係を示した概念図である。照明 A に対して照度センサ A、B、C が一定間隔で並んでおり、照度センサ A は、照明 A の真下に設置している。このとき照明 A の光度変化量に対して、照度センサ A、B、C の回帰係数を取得すると、図 4 のような関係が得られる。図 4 のグラフは縦軸が回帰係数、横軸が探索回数を示す。

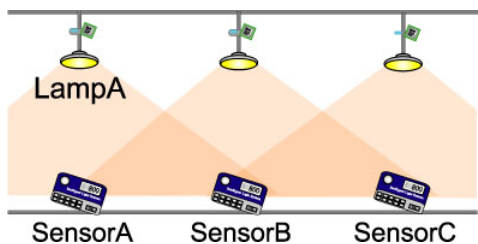


図 3：照明と照度センサの物理的位置関係

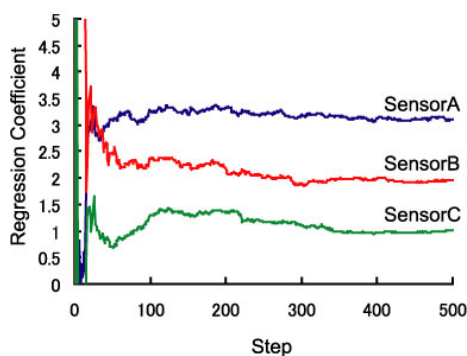


図 4：距離による回帰係数の違い

光度と照度の関係は、距離の 2 乗に比例することから、最も距離の近い照度センサ A から順に高い回帰係数が得られることがわかる。この結果を用いて、AN/RC では回帰係数の大小に伴い適応的に次光度生成範囲を割当て、照度収束を行う。

3. 実環境における知的照明システム有効性の検証

3.1 実験概要

本システムは、これまで特別な実験室環境で種々の実験を行ってきた。しかしながら、知的照明システムの実用化に向け、オフィスワーカーが業務を行う実環境における検証は行われていない。そのため、実際の執務環境において知的照明システムを利用した際の問題抽出が課題である。そこで、学生を対象とした実執務空間に知的照明システムの導入を行った。

図 5 に示すように、研究室における学生居室において仮設天井を設けた。そこに 17% から 100% まで調光可能な照明 10 灯を設置し、知的照明システムを構築する。被験者は 21~25 歳の学生 10 名であり、普段通りの執務を行う。実験は 2 ヶ月間行う。なお、各被験者は最適と感じる照度を実験期間中の初期に試行錯誤して決定するものとした。

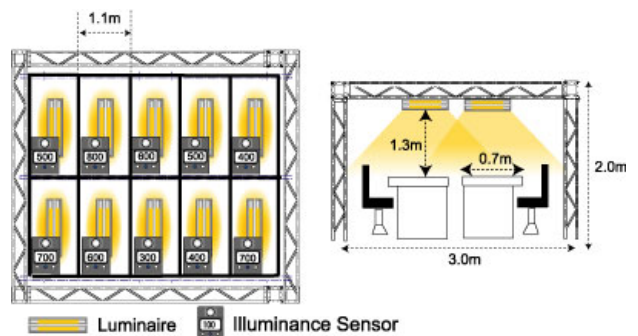


図 5：実験環境

3.2 実験結果と考察

図 6 は各被験者の目標照度、光度、および照度の分布を示したものである。括弧内の数字は各照度センサの目標照度を示している。

図 6 より、各被験者の目標照度は最大 800 lx、最小 200 lx であった。この結果から、10 人の被験者が執務

に最適と感じる照度は大きく異なっていることがわかる。そして、知的照明システムが提供している照度は 300 lx 以下の低照度に目標を設定している被験者を除いて、各被験者の実現照度と目標照度との誤差は 18 lx 以下であった。このことからわかるように、ほぼ被験者が要求する目標の値を実現できたといえる。また、実現できない低照度を目標照度にした被験者に対しては一番近隣の照明の光度が最小の 17 % で点灯していた。このことから、システム上実現可能な目標照度をほぼ満たされることから、省エネルギーを考慮した適切な照明点灯パターンを実現できることが確認できる。なお、隣接する目標照度の差においては、周囲が 800 lx と高照度の場所においては、約 200 lx 程度の差を実現できた。しかし、周囲が低照度の場所においては、照明器具の下限光度値のため、照度は 100 lx 程度であった。調光範囲がより広い照明器具を用いることでこの問題を解消できる。

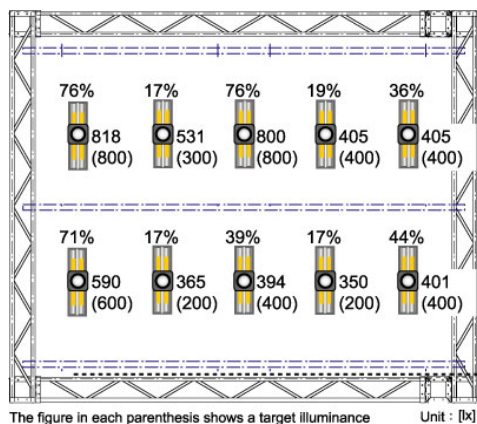


図 6：光度および照度の分布

一方、実験期間中の平均消費電力を図 7 に示す。1 日の消費電力は 10 時から 22 時までの 12 時間の消費電力の平均値を用いた。現在、日本の一般的なオフィスでは机上面照度として 750 lx が推奨されている。実際のオフィスでは蛍光管の劣化を考え、初期に実現される照度が 1000 lx 程度であるオフィスが多い。本研究では蛍光管の劣化がある程度進行している状態を基準として、照度 800 lx を電力の基準とした。図 7 より、知的照明システムを長期的に利用した場合、従来の照明環境に比べて約 4~5 割の電力削減が可能であること

受付番号：H17

がわかる。

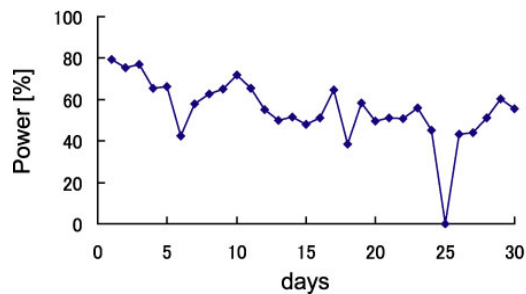


図 7：1 ヶ月間の使用電力量

4. まとめ

本報告では、オフィス環境の光環境改善方法として、個別照度環境を提供する知的照明システムを提案した。知的照明システムでは制御アルゴリズムとして、照明の光度変化と照度センサの照度変化の相関係数を用いた最適化アルゴリズムを用いている。これによってユーザーに要求された照度を基に各照明が最適な光度を探索することができる。また、本システムを実務空間に導入した。その結果、各被験者が最適と感じる照度は最大 800 lx、最小 200 lx と被験者が執務に最適と感じる照度は大きく異なっていることがわかった。また、従来の照度を一定とする照明環境に比べて約 4~5 割の電力削減が可能であることを示した。

[参考文献]

- [1] Olli Seppanen, William J. Fisk: A Model to Estimate the Cost-Effectiveness of Improving Office Work through Indoor Environmental Control, Proceedings of ASHRAE, 2005
- [2] M. J. Mendell, and G. A. Heath: Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature, Indoor Air, Vol.15, No.1, pp.27-52, 2005
- [3] Peter R. Boyce Neil H. Eklund S. Noel Simpson: Individual Lighting Control: Task Performance, Mood, and Illuminance, JOURNAL of the Illuminating Engineering Society, pp.131-142, Winter 2000

- *1 同志社大学理工学部 教授 工博
- *2 同志社大学 大学院生
- *3 同志社大学生命医科学部 教授 工博