

オフィス空間に個別照度を実現する進化的最適化アルゴリズム

三木 光範¹ 田中 慎吾¹ 廣安 知之¹ 池田 聡²

¹同志社大学 ²現日立製作所

An evolutional optimization algorithm to provide individual illuminance in workplaces

Mitsunori MIKI¹ Shingo TANAKA¹ Tomoyuki HIROYASU¹ Satoshi IKEDA²

¹Doshisha University, ²Hitachi, Ltd

Abstract: We develop a new lighting system called the intelligent lighting system. This system can provide necessary illuminances to desired locations and save energy. In this research, we propose Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient (ANA/RC) for a control method of the intelligent lighting system. This algorithm can grasp the position relation between the lighting and the illuminance sensors using regression analysis. We confirmed the validity of the algorithm in an experiment.

1. はじめに

近年、オフィス空間での知的生産性の向上を目的とし、環境改善のための様々な研究が行われている。その中でも我々は光環境に着目している。これまでの先行研究により、個別照度環境を提供することで知的生産性が向上することが報告されている [1][2]。これらの研究ではタスクライトを用いて個別照度環境を実現しているが、実際のオフィスではタスクライトが好まれない環境も存在する。そのため、天井照明のみで個別照度を実現することが望まれる。

そこで、我々は各ユーザの希望する照度を自動で提供するための照明制御システムとして知的照明システムの開発を行う。本研究では、照明制御用に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 : ANA/RC) を提案する。本アルゴリズムは確率的山登り法 (Stochastic Hill Climbing : SHC) をベースとしており、各照明が光度をランダムに変化させることで、個別照度に関する制約条件を満足し、消費電力を最小化する。さらに本アルゴリズムでは、光度変化量と照度変化量を基に回帰分析を用いて照度センサに及ぼす照明の影響度を推定することで効率的な探索を行う。本稿では、提案アルゴリズムの詳細について述べ、その有効性および実業務空間に導入した結果を示す。

2. 知的照明システムの概要

知的照明システムは、Fig.1 に示すようにコンピュータを搭載した照明、移動可能な照度センサ、および電力計をネットワークに接続することで構成される。知的照明システムでは、各ユーザは照度センサに「照度をある値以上にする」という照度制約条件を設定するだけで、各照明が自律的な光度変化を繰り返し、最適な光度に変化していく。さらに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することなく、他の機器から送られるデータを基に照明が照度センサに及ぼす影響度を学習し、最適な光度を効率よく探索することで、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最大の特徴は、全体を統括して制御する要素は存在せず、各照明が共通のデータから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。

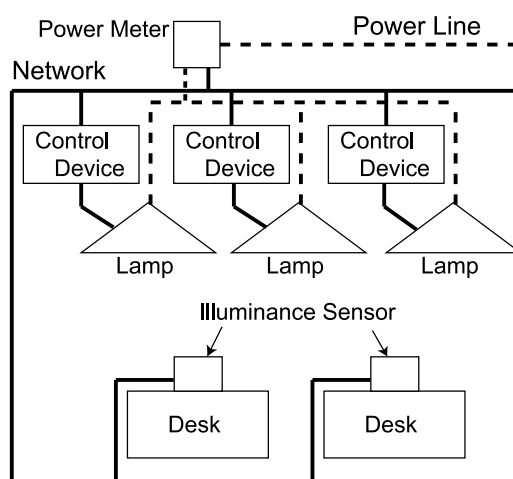


Fig. 1 Configuration of Intelligent Lighting System

3. 回帰係数を用いた適応的近傍アルゴリズム (ANA/RC)

3.1 制御アルゴリズム

ANA/RC は確率的山登り法をベースとし、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光度を変化させるアルゴリズムである。以下に ANA/RC の手順を示す。

1. 照度情報、消費電力をネットワークを介して取得し、現在光度における評価を行う。
2. 回帰係数と照度情報を基に近傍を決定する。

3. 近傍内に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。
4. 照度情報、消費電力をネットワークを介して取得し、次光度における評価を行う。
5. 照明の光度変化量および照度センサの照度変化量を用いて回帰係数を計算する。
6. 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。
7. 1~6 を探索の 1step とし、探索を繰り返す。

上記の繰り返しの際にステップ 1 に戻って再度評価を行うのは、環境の変化に対応するためである。

3.2 目的関数

ANA/RC ではユーザの目標照度という制約条件を満たし、消費電力を最小化するために目的関数を (1) のように設定する。

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

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

P :消費電力量, w :重み, Lc :現在照度, Lt :目標照度, R :影響度

目的関数は消費電力量 P と照度制約 g_j からなり、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。 g_j は目標照度を満たせなかった際に加算される値であり、目標照度と現在照度の差の 2 乗を用いる。さらに影響度を乗算することで、各照明において照度センサとの影響度に応じた照度制約を付加することができる。影響度の詳しい内容については後述する。

3.3 回帰係数による影響度推定

知的照明システムでは個別照度を満たし、かつ省電力な状態を素早く実現するために照明が照度センサの照度値に与える影響度（因果関係）を知ることが重要となる。そこで、ANA/RC では照明と照度センサの因果関係を推定するために、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定式化し、分析する手法である。因果関係は説明変数 x と観測値 y の関係を (2) で示す回帰式で近似することで求める。

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (2)$$

ANA/RC では回帰分析に逐次型最小二乗法を用いる。この手法は探索過程において再起的に回帰係数を推定する。逐次型最小二乗法による回帰係数 β の推定は以下の手順で行う。なお、 k は現在の探索ステップを示す。

1. 観測予測誤差共分散 $S(k)$ を求める
 $S(k)=x(k)P(k-1)x(k) + R(k)$
2. フィルタゲイン $W(k)$ を求める
 $W(k)=P(k-1)x(k)S^{-1}(k)$

3. 推定値 (回帰係数 β) の誤差共分散 $P(k)$ を求める
 $P(k)=P(k-1)-W(k)S(k)W(k)$
4. 観測予測値 $\hat{y}(k)$ を求める
 $\hat{y}(k)=x(k)\beta(k-1)$
5. 観測予測誤差 $\epsilon(k)$ を求める
 $\epsilon(k)=y(k)-\hat{y}(k)$
6. 推定値 (回帰係数 β) を求める
 $\beta(k)=\beta(k-1)+W(k)\epsilon(k)$

ANA/RC では、1 回の探索における光度変化量 x 、照度変化量 y として回帰分析を行うことで、Fig.2 に示すような分布と回帰直線が得られる。なお、Fig.2 は LampA に対する SensorA および SensorB の回帰分析結果である。Fig.2 より、他のランプの光度変化の影響も入っているため、分布にばらつきが見られるが、回帰直線をひくことで照明と照度センサとの影響度（距離）に応じた回帰係数 β (傾き) を得ることができる。

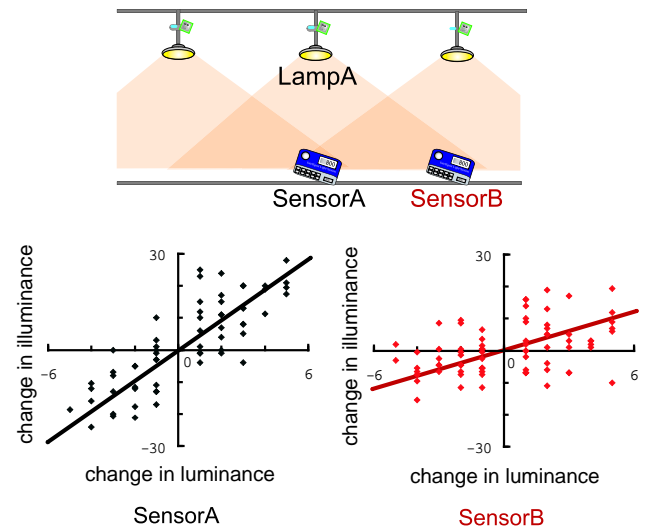


Fig. 2 The regression line according to the distance

3.4 近傍の種類と決定手法

3.4.1 近傍の種類

ANA/RC では、次光度生成に用いる近傍を増光傾向、減光傾向および調節近傍をベースとし、実験により Fig.3 に示す 7 種類の近傍を作成し、使用した。近傍は A から順に G に近づくほど増光傾向の近傍となっている。なお、Fig.3 の中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。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状況に基づき近傍を一意に決定する。

3.4.2 近傍決定手法

ANA/RC では、まず影響度に基づいたランキングを行い、照度状況に応じて近傍決定を行う。ランキングには 3 種類の閾値を用い、最も影響度の高いランク 1 を判断する閾値 T_{high} 、次に影響度の高いランク 2 を判断する閾

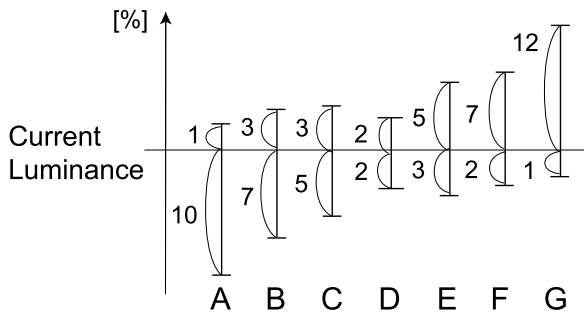


Fig. 3 Seven types of the neighborhood

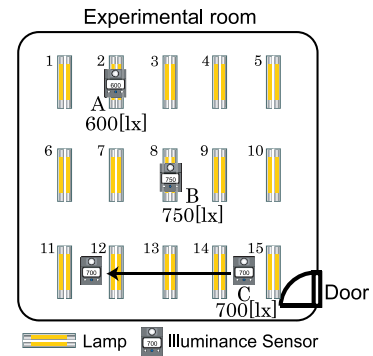


Fig. 4 Experiment environment (Plan)

値 T_{mid} , 次に影響度の高いランク 3 を判断する閾値 T_{low} を用い, それ以下は影響がないと見なす. ランキングによってランク付けを行った後, 以下のように照度状況によって近傍を決定する. なお, 影響度が低く, ランクがない場合は近傍 A を選択する.

- 現在照度 \geq (目標照度 + 50)
 - ランク 1: 近傍 C
 - ランク 2: 近傍 B
 - ランク 3: 近傍 A
- 目標照度 $<$ 現在照度 \leq (目標照度 + 50)
 - ランク 1: 近傍 D
 - ランク 2: 近傍 C
 - ランク 3: 近傍 B
- (目標照度 - 30) $<$ 現在照度 \leq 目標照度
 - ランク 1: 近傍 E
 - ランク 2: 近傍 D
 - ランク 3: 近傍 C
- (目標照度 - 60) $<$ 現在照度 \leq (目標照度 - 30)
 - ランク 1: 近傍 F
 - ランク 2: 近傍 E
 - ランク 3: 近傍 D
- 現在照度 \leq (目標照度 - 60)
 - ランク 1: 近傍 G
 - ランク 2: 近傍 F
 - ランク 3: 近傍 E

以上のように近傍割り当てを行うことで, 目標照度を満たせていない照度センサに影響度の高い照明ほど増光傾向の近傍を選択する.

4. ANA/RC の性能評価

4.1 動作実験

ANA/RC の動作実験を行う. 構築した実験環境を Fig.4 に示す. 設置する照度センサ A, B および C の目標照度はそれぞれ 600, 750 および 700 lx に設定する. また, 実験開始から 300step 後に照度センサ C を照明 11 と 12 の間に移動させる. 得られた照度履歴を Fig.5 に, 電力履歴を Fig.6 に, 移動前後における定常状態の光度分布を Fig.7

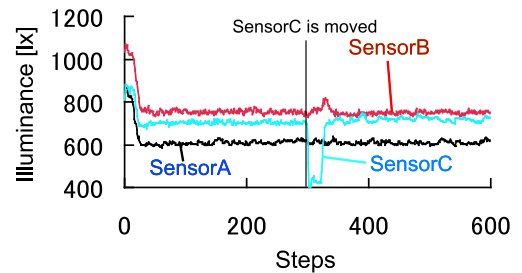


Fig. 5 History of illuminance

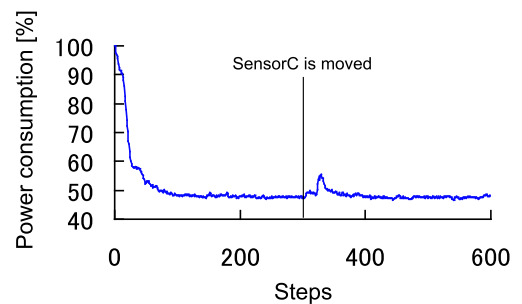


Fig. 6 History of power

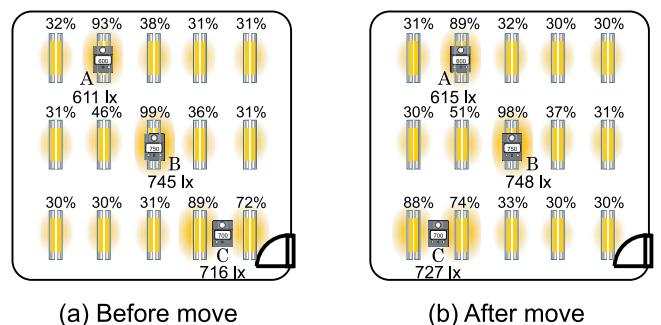


Fig. 7 Steady state

にそれぞれ示す. なお, 照明は光度を 30% から 100% の間で調光可能なものを用いる.

Fig.5 より, 実験開始後 50step ですべての照度センサが

目標照度に収束していることがわかる。また、照度センサ C が移動することで、照度センサ C の照度値が低くなるが、50step 後には影響度を学習することで目標照度に収束していることがわかる。Fig.6 および Fig.7 より、照度センサに近い照明が高い光度で点灯し、遠くの照明は最小点灯光度である 30% で点灯することで消費電力が最小化され、50% の電力削減ができていくことがわかる。以上のことから ANA/RC を用いることで、個別照度環境を実現し、かつ省電力な状態を実現できることがわかる。

4.2 執務空間に置ける省エネルギー性の評価

上記の動作実験は実験室環境で行ったが、実際の執務空間での検証も行う必要がある。そこで実執務空間に ANA/RC を用いた知的照明システムを構築し、その有効性の検証を行う。研究室の一面にトラス構造を設け、そこに Fig.8 のように 17% から 100% で調光可能な照明 10 灯を用いて知的照明システムを構築する。実験には 20 代の学生 10 名が参加し、施設内にて普段通りの執務を行う。実験は月曜日から次の週の土曜日までの 13 日間行う。

得られた各被験者の目標照度を実現した際の光度、照度分布を Fig.9 に示す。なお、括弧内の数字は各照度センサの目標照度を示している。また、日別の平均消費電力を Fig.10 に示す。1 日の消費電力は 10 時から 22 時の 12 時間の消費電力の平均値を用い、消費電力には全体を 800 lx に設定した際の消費電力を基準としたときの消費電力の割合を用いた。現在オフィスでの机上面照度は 750 lx 以上と定められているが、照明の劣化を考慮して初期は 1000 lx になっているオフィスが多い。そこで今回は劣化が進んだ状態である 800 lx を基準として考えた。

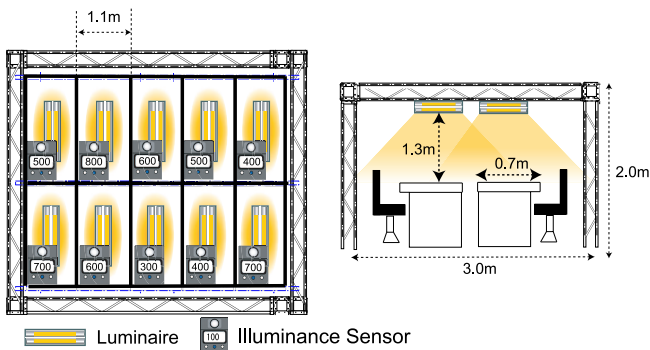


Fig. 8 Experiment environment at actual workspace

Fig.9 より、各ユーザの目標照度が実現できていることがわかる。また、目標照度が低い照度センサにおいては照度値が目標照度より最大 230 lx 程度高い値となっているが、真上の照明が最小点灯光度である 17% となっていることから、周囲の照度を実現した際にはこれ以上照度が下がらない。Fig.10 より、実執務空間において ANA/RC を用いた知的照明システムは従来の照明環境に比べて約 3 割の消費電力の削減が可能であった。また、土曜日においても数人の学生が登校していたが、最小限の照明のみで照度を提供することができるため、消費電力は約 4 割

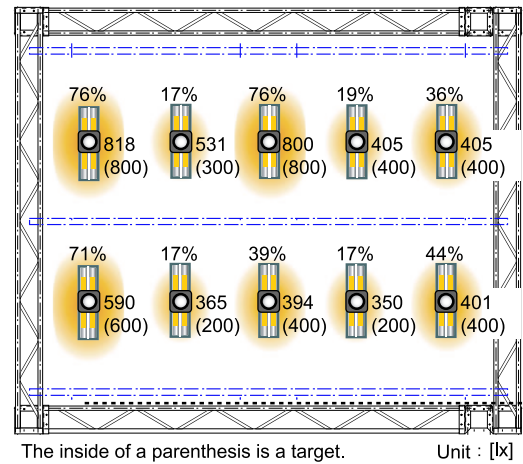


Fig. 9 Distribution of the luminance and illuminance

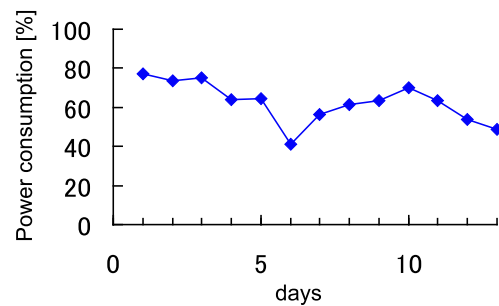


Fig. 10 Daily power consumption

に抑えることができた。以上のことから、ANA/RC を用いた知的照明システムは実執務空間においても有効であることがわかる。

5. まとめ

本研究では、最適化手法を照明制御に応用することで、オフィス空間に個別照度環境を実現するためのアルゴリズムである ANA/RC を提案した。ANA/RC では回帰分析を用いて照明が照度センサに及ぼす影響度を学習することができる。動作実験の結果より、ANA/RC を用いた知的照明システムは素早く個別照度環境を実現し、かつ省電力な状態を実現することを確認できた。また、実執務空間に導入することによって、従来の照明環境と比較し 3 割の電力削減が可能であった。

参考文献

[1] 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

[2] 西川 雅弥, 西原 直枝, 田辺 新一: タスク照明の個人制御が知的生産性に与える影響に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol.603, pp.101-109, 2006