

知的照明のための適応的近傍アルゴリズム

今里 和弘[†], 三木 光範^{††}, 廣安 知之^{††}, 米澤 基[†]

[†] 同志社大学大学院 ^{††} 同志社大学工学部

我々が既に提案している知的照明システムは、移動可能な照度センサおよび電力計の情報をもとに複数の照明が、自律的に任意の場所に任意の照度を与えるものであり、高い利便性と大きな省電力を実現できる。本論文では、この知的照明システムの制御アルゴリズムとして、光度変化量と照度変化量から相関係数を算出し、それを利用した ANA/CC(相関係数を用いた適応的近傍アルゴリズム)を提案する。また、実験システムを用いた動作実験を行い有効性の検証を行う。実験の結果より ANA/CC では様々な環境において、近くにセンサのある照明が強く、センサのない照明が弱く点灯する省電力な状態への収束が高速にできることが確認できた。

Adaptive Neighborhood Algorithm for Intelligent Lighting System

Kazuhiro IMAZATO[†], Mitsunori MIKI^{††}, Tomoyuki HIROYASU^{††}, Motoi YONEZAWA[†],

[†] Graduate School of Engineering, Doshisha University

^{††} Department of Engineering, Doshisha University

An intelligent lighting system which provides required illuminance at an appropriate location is proposed. In this research, a new algorithm is proposed. For rapid converges it uses the correlation coefficient between the illuminance at a given location and the luminance of each light. We actually construct an autonomous distributed experiment system and verification tests were conducted using the proposed control method. The results showed that the various illuminance sensors converged to the preset target illuminance. We also confirmed that the algorithm can respond adaptively to environmental changes and it is effective to energy saving.

1 はじめに

近年、電子デバイス技術や情報処理技術の発展に伴い、電化製品、自動車、飛行機など様々なシステムにおいて、使用者や環境に合わせて自身のシステムの動作を自律的に制御し、人間の負荷を軽減する知的化¹⁾が行われている。

このような中、照明システムを知的化した次世代型の照明システムとして、知的照明システムが提案されている²⁾。知的照明システムは、複数の知的照明機器と複数の移動可能な照度センサおよび電力計から構成される。知的照明機器とは調光可能な照明と照明制御装置からなる。このシステムには集中制御機構は存在せず、各知的照明機器が自律的に動作することによってシステムを制御する。自律分散制御³⁾型のシステムであるため、耐故障性が高く大規模なビルにおいても高い信頼性が得られる。

このような高度な照明システムを実現するには、それらを制御するアルゴリズムが非常に重要となる。そこで本論文では、制御アルゴリズムとして、光度と照度の相関係数を用いた自律分散制御の概念に基づくアルゴリズムを提案する。また、詳細な解析を行うことで知的照明システムの制御アルゴリズムの高性能化を目指す。

2 知的照明システムとは

知的照明システムとは²⁾、複数の照明器具をネットワークに接続し、それぞれの照明器具の協

調動作によってユーザの要求を満たすシステムであり、以下の特長がある。

- 自律分散制御: システム全体を統括して制御する要素が存在せず、個々の照明が共通のデータから自律的に、各場所の照度制御を行う。
- 自律的な照度コントロール: 移動可能な照度センサに目標照度を設定するだけで、適切な場所に適切な照度を提供することができる。

3 知的照明システムの制御アルゴリズム

3.1 従来の知的照明制御アルゴリズム

従来の知的照明制御アルゴリズムは、確率的山登り法 (Stochastic Hill Climbing: SHC) をベースにした照明制御アルゴリズムを用いていた。各照明はランダムに光度の増減を繰り返し、良好な状態になった場合は受理し、状態が悪化した場合はその光度を破棄する。以上の動作を繰り返すことにより、各照度センサに設定された目標照度を満たし、かつ使用電力量の最小化を行う。各照明は Eq.1 に示す目的関数を持つ。

本アルゴリズムは、設計変数を照明の光度とし Eq.1 の f の最小化を目的とする。 f は電力 P と、現在の照度 L_c と目標照度 L_t の照度差を表す g_j からなる。電力 P には各照明の光度 Cd の和を用いる。これは光度と電力に線形関係がある蛍光灯の電源電圧特性による。 g_j は照度差が負であった場合にのみ加算される。すなわち現在の照度が目標照度を下回っていた場合、急速に増光することに

なる．この g_j には重み w を乗算する．この w の値により，目標照度を満足することを優先するか，電力の最小化を優先するかが決まる．

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

$$P = \sum_{i=1}^m Cd_i$$

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

n, j : 照度センサの数および指標 , P : 消費電力

m, i : 照明の数および指標 , Cd : 現在の光度

Lt : 目標照度 , Lc : 現在の照度 , w : 重み

従来のアルゴリズムでは目標照度を満し，かつ省電力な状態へ収束することはできるが，収束速度が遅いという問題点がある．収束が遅い原因は，従来のアルゴリズムは照明と照度センサの位置関係を学習していないためである．照明とセンサの位置関係を学習する事で，無駄のない探索により目的関数の最小化が速やかに達成できると考えられる．

3.1.1 照明と照度センサの位置関係

照明制御アルゴリズムにおいて，目標照度を満たしかつ省電力である良好な状態へと高速に収束するには，照明が各照度センサとの位置関係を把握することが効果的だと考えられる．そこで，光度および照度の変化量から相関係数を算出する．これにより，位置関係を正確に把握できることが期待される．

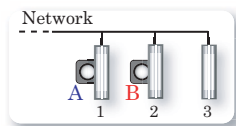


図 1: Position between lamps and sensors

図 1 に照明と照度センサの位置関係を示す．照明 1 の光度変化は，真下にあるセンサ A の照度変化との相関が高く，離れた位置にあるセンサ B の照度変化との相関は低くなる．また，照明 2 では照明 1 とは逆にセンサ B との相関が高く，センサ A との相関が低くなる．照明 3 では両センサが離れた位置にあるため，両センサとの相関は低くなる．このように，相関が低い場合は照明と照度センサが離れているため，光度を下げるよう動作し，相関が高い場合は照明と照度センサが近傍に存在し，そのセンサの目標照度を満たすよう動作すれば収束速度が向上できると思われる．

3.2 相関係数を用いた適応的近傍アルゴリズム

本論文では，照明とセンサの位置関係を光度と照度の相関関係により動的に把握しつつ最適化を行うアルゴリズムを提案する．提案するアルゴリズムは，光度変化量と照度変化量を基に相関係数を計算し，それに基づく近傍設計を組込んだものである．以後提案アルゴリズムを相関係数を用いた適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Correlation Coefficient : ANA/CC) とする．本アルゴリズムでは，各照明が Eq.2 に示す目的関数をもつ．

$$f_i = P + w \sum_{j=1}^n g_{ij} \quad (2)$$

$$P = \sum_{i=1}^m Cd_i$$

$$g_{ij} = \begin{cases} 0 & (Lc_j - Lt_j) \geq 0 \\ R_{ij}(Lc_j - Lt_j)^2 & (Lc_j - Lt_j) < 0 \end{cases}$$

$$R_{ij} = \begin{cases} r_{ij} & r_{ij} \geq Tmin_{ij} \\ 0 & r_{ij} < Tmin_{ij} \end{cases}$$

n, j : 照度センサの数および指標 , P : 消費電力

m, i : 照明の数および指標 , Cd : 現在の光度

Lt : 目標照度 , Lc : 現在の照度 , w : 重み

r : 相関係数 , $Tmin$: 閾値の最小値

本アルゴリズムは，Eq.1 と同様に，設計変数を照明の光度とし Eq.2 の f_i の最小化を目的とする．Eq.1 と異なる点は，照度の制約を表す g_{ij} に相関係数が含まれていることである． R_{ij} は照明 i の光度変化と照度センサ j の照度変化との相関係数を表す．また，相関が閾値の最小値以下の場合には 0 を乗算する．すなわち，センサが目標照度を満たさない場合でも，そのセンサに対する相関が低ければ目的関数値は増加しない．最適化の対象を相関の高いセンサに絞ることで，目標照度を満たす精度が向上すると考えられる．

3.2.1 3種類の近傍

ANA/CC では，次光度生成に用いる近傍は図 2 に示すように 3 種類ある．図中の数字は各近傍の相対的な割合を示す．A は現在の光度から光度を下げることを重視した近傍である．B は上下均等に次光度を生成し，光度の調整を行う近傍である．C は A とは逆に光度を上昇させることを重視した近傍である．従来の制御アルゴリズムには近傍 B だけを用いていた．なお，これら近傍の上下幅の割合は実験的に求めた値である．

3.2.2 近傍決定の方法

本アルゴリズムでは図 2 に示す 3 種類の近傍から，相関係数を用いて適応的に 1 つ選択し，その

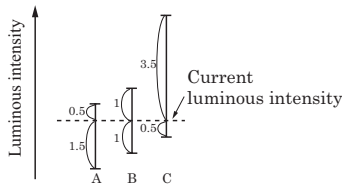


図 2: Three neighborhood ranges

範囲に乱数を用いて次光度を生成する．この近傍選択は以下の手順で行う．

1. 相関係数を用いて各照度センサに対して適切な近傍を判断する．
2. 複数の照度センサに対して影響があり，各照度センサに対して異なった近傍が設定された場合は，近傍 C, B, A の順に優先度を設定する．そして，それに基づき近傍を一意に決定する．

適切な近傍の判断には相関係数，相関係数に対する閾値，および各照度センサの照度情報を用いる．また，本アルゴリズムでは，閾値に最大値と最小値を設けてその範囲内で可変とし，照度センサ毎に調節する．これはセンサの位置によって適切な閾値が異なると推測されるためである．以下に近傍決定の判断基準を示す． i は照度センサの番号， r は相関係数， L_t は目標照度，そして L_c は現在の照度を示す．

$$\begin{cases} A & r_i < \text{threshold} \\ B & r_i \geq \text{threshold and } L_{t_i} \leq L_{c_i} \\ C & r_i \geq \text{threshold and } L_{t_i} > L_{c_i} \end{cases}$$

相関係数が閾値より低い場合は，近傍 A を設定する．相関係数が閾値より高く，現在の照度が目標照度より高い場合は，近傍 B を設定する．相関係数が閾値より高く，現在の照度が目標照度より下回っている場合は，近傍 C を設定する．

4 動作実験による ANA/CC の有効性の検証

4.1 実験の概要

以下に示す 2 つの実験環境にて ANA/CC による動作実験を行い，相関による位置関係の把握が正確に行えるか，それによって目標照度を満たしつつ省電力な状態が得られるか検証を行う．実験環境を図 3 に示す．また，環境の変化に対応可能かについても検証を行う．実験に用いた ANA/CC のパラメータは表 1 の通りである．なお，本実験には我々の研究室で構築した実験システムを用いる．

- 動作実験 1：環境に変化がない場合
設置する照度センサの目標照度はセンサ A を 750[lx]，センサ B を 800[lx]，センサ C を 600[lx] とする．照度センサの配置は図 3 の通りである．

- 動作実験 2：照度センサが移動した場合
動作実験 2 の定常状態から照度センサ B を照明 1, 2, 6, および 7 の中心へ移動させる．

表 1: Experiment parameters (ANA/CC2)

Number of fluorescent light	15
Number of illuminance sensors	3
Target illuminance [lx]	750, 800, 600
Distribution of light increase decrease (Pattern A) [%]	+2,+1,0,-1,-2,-3,-4,-5,-6,-7,-8
(Pattern B) [%]	±5,±4,±3,±2,±1,0
(Pattern C) [%]	+17,+16,+15,···+1,0,-1,-2,-3
Maximum luminous [%]	100
Minimum luminous [%]	30
Weight(w)	1.0
Maximum threshold value	0.5
Minimum threshold value	0.3
Number of data for the correlation coefficient	50

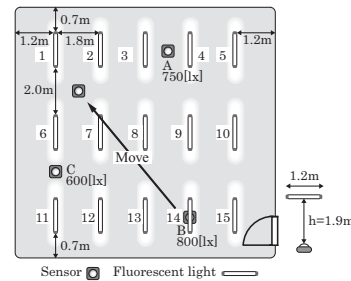


図 3: Experiment environment

4.2 ANA/CC の実験結果と考察

4.2.1 動作実験 1：環境に変化がない場合

図 4 に各照度センサの照度の履歴，図 5 に使用電力量の履歴を示す．また，図 6 に代表的な照明 4, 6, 9, 12 の光度の履歴を示す．

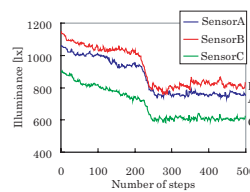


図 4: Illuminance

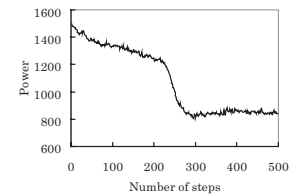


図 5: Power

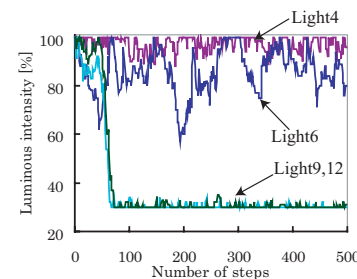


図 6: Luminous intensity history

図 4 より，実験開始後，初期の照度が減少し，照度取込み回数約 250 回 (2 分程度) で各照度セン

サ A, B, および C の照度は 776, 792, 597[lx] となり, ほぼ目標照度に収束していることがわかる. Fig5 より, 使用電力量においても, 電力計算回数約 250 回 (同じく 2 分程度) でほぼ最小値に収束し, かつその上下動の幅は小さいことがわかる. 図 6 からは, 近くにセンサが存在する照明 4, 6 は強く, センサが存在しない照明 9, 12 は最小点灯光度付近で点灯している様子が見られる.

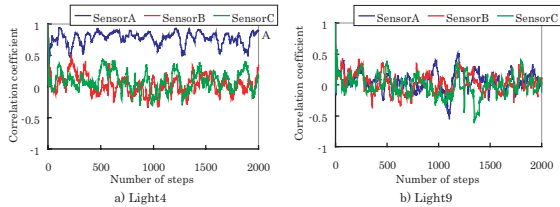


図 7: Correlation coefficient

ここで図 7-a に照明 4, 図 7-b に照明 9 の各センサに対する相関係数の履歴を示す. 照明 4 の近くにはセンサ A があり, 一方照明 9 の近くにはセンサは存在しない. 照明 4 の相関係数を示す図 7-a では, センサ A に対する相関係数のみが高い値を示している. また, 照明 9 の相関係数を示す図 7-b では, 全てのセンサに対する相関係数が低い値を示している. すなわち, 照明とセンサの相関係数の算出に, 光度変化量と照度変化量を用いることで, 照明とセンサの位置関係を正確に把握できることがわかる. このように, ANA/CC では, 照明とセンサの位置関係を正確に把握することで, 目標とする状態へ収束することができた.

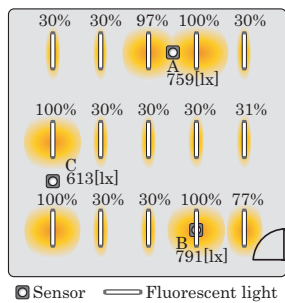


図 8: Conclusive state

図 8 に 2000 回 (約 1 時間) の探索の後に得られた最終的な状態を示す. 各照度センサの照度は, それぞれ 759, 791, および 613[lx] であり, ほぼ目標照度へ収束している. また, センサの近くの照明のみが強く点灯しており, 省電力な状態が得られている.

4.2.2 動作実験 2: センサが移動した場合

図 9 に各照度センサの照度の履歴を示す.

図 9 より, 照度センサ B を移動させた時 (照度取込み回数 4400 回の時) にセンサ B の照度が目標照度を大きく下回るが, その後徐々に上昇し, 照

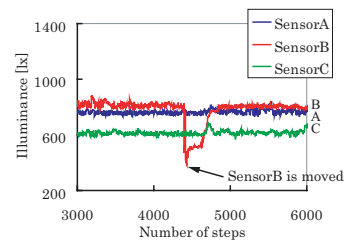


図 9: Illuminance history

度取込み回数約 400 回 (3 分程度) で目標照度に達することがわかる.

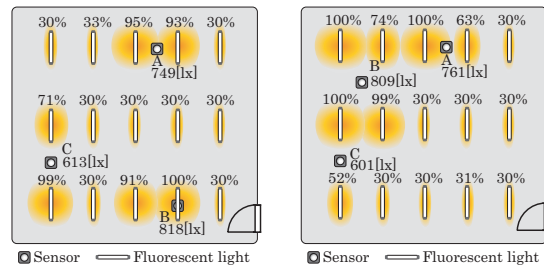


図 10: Before movement 図 11: Conclusive state

センサ B 移動直前とその後約 1000 回の探索で得られた最終的な状態を図 10 および図 11 に示す. 最終的な各センサの照度は 761, 809, および 601[lx] となり, ほぼ目標照度に収束している. 図 10 と図 11 を比べると, 照度センサ B が移動した先にある照明 1, 2, 6 および 7 が光度を上げ, 照明 13, 14 は, どの照度センサにも影響がなくなったため光度が下がる. これらの実験結果より, 照度センサの移動に対応できることがわかる.

5 まとめ

ANA/CC では様々な環境において, 近くにセンサのある照明が強く, センサのない照明が弱く点灯する省電力な状態へと, 速やかに移行することが確認できた. 本研究で開発した ANA/CC は照度および省電力の双方で非常に優れた結果を示しており, 知的照明システムの制御アルゴリズムとして非常に有効であることがわかった.

参考文献

- 1) MIKI M, KAWAOKA T *Design of Intelligent Artifacts: A Fundamental Aspects* Proc. JSME International Symposium on Optimization and Innovative Design(OPID97), 1997-9)
- 2) Miki M, Hiroyasu T, Imazato K *Proposal for an Intelligent Lighting System, and Verification of Control Method Effectiveness* Proc IEEE CIS, Page520-525, (2004)
- 3) 森欣司, 宮本捷二, 井原廣一 自律分散概念の提案, 電気学会論文誌 C, Vol.104, No.12, 1987