

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の改良

Improvement of the Autonomous Distributed Optimization Algorithm for Intelligent Lighting System

非 池田 聡 (同志社大院) 正 三木 光範 (同志社大工)
正 廣安 知之 (同志社大工)

Satoshi IKEDA, Graduate School of Engineering, Doshisha University
Mitsunori MIKI, Doshisha University
Tomoyuki HIROYASU, Doshisha University

Key word: intelligent lighting systems, least square, autonomous distributed control, energy saving,

1 はじめに

近年、使用者や環境に合わせてシステムを自律的に制御し、人間の負荷を軽減する知的化¹⁾が行われている。そのような中において、これまで遅れていた照明システムについても知的化が進んでいる。

我々は、次世代型の照明システムである知的照明システム²⁾の研究開発を行っており、その制御として、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)³⁾をすでに提案した。ANA/CCでは、照明と照度センサの相関により概略的な位置関係の把握を行い、目標照度を満たしかつ省電力な状態への高速収束を実現する。このように知的照明システムにおいて、照明と照度センサの位置関係に基づいた探索は効果的であるが、ANA/CCでは、収束までに1分程度の時間を要している。位置関係を更に精度良く把握することで、より効率的な探索が可能であり、収束時間を短縮できると思われる。

本研究では、照明と照度センサの位置関係を光度変化量と照度変化量から成る関係式として捉え、その関係式を回帰分析することにより、正確な位置関係を把握する。そして、把握した位置関係を利用し効率的な探索を行う制御アルゴリズムを提案し、その有効性の検討を行う。

2 知的照明システムとは

2.1 知的照明システムの概要

知的照明システムとは、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る。以下に知的照明システムの特長を述べる。

2.1.1 自律分散制御

知的照明システムは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学習動作を行うことによって、各場所の照度制御を行う。集中管理機構を持たないため、システムの

耐故障性が高く大規模なビルにおいてもシステムの高い信頼性が得られる。また、照明器具および照度センサの追加が容易であり、さらにはビル照明の設計、および施工時に各照明器具や各照度センサに識別番号や配置情報などの設定が不要になるという優れた特長を有している。

2.1.2 自律的な照明コントロール

知的照明システムでは、ユーザが照度センサに目標照度を設定するだけで、照明や照度センサの位置情報を必要とすることなく、自動的に有効な照明を判断し、適切な場所に適切な照度を提供することができる。不必要な照明を点灯させることがなく、省電力を実現できる。

2.2 知的照明システムの構成

知的照明システムは、複数の知的照明器具と複数の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。知的照明器具とは学習判断ユニットと呼ばれる制御装置を備えた照明である。これにより、個々の照明が自律的に動作することが可能となる。Fig. 1に知的照明システムの構成を示す。

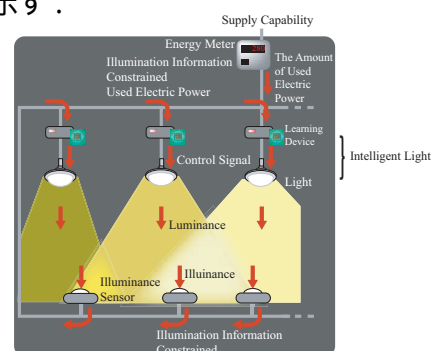


Fig. 1 Configuration of Intelligent Lighting System

3 知的照明システムのための制御アルゴリズム

3.1 従来の制御アルゴリズム

従来の知的照明制御アルゴリズムである ANA/CC は、確率的山登り法 (Stochastic Hill Climbing: SHC) をベースに照明制御用に相関係数に基づく近傍設計を組み込んだものである。

以下にこのアルゴリズムの流れを説明する．

1. 各照明を初期光度で点灯させ、各照度センサには目標照度を設定する．
2. 各照明は各照度センサの照度および使用電力量を取得し、目的関数値を計算する．
3. 各照明はセンサ情報および相関係数により3つの近傍範囲より適切な近傍を決定する
4. 設定された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．
5. 照度センサの照度を取得し、各照明において光度および照度から相関係数を計算する．
6. 次状態の目的関数値を計算し、改善している場合、その光度を確定しステップ2へ戻る．
7. ステップ6で目的関数値が悪化した場合、与えた光度変化量を計算上キャンセルし、ステップ2へ戻る．

以上の動作を繰り返すことにより、光度変化量と照度変化量を基に求めた相関係数により照明と照度センサの位置関係を動的に把握しつつ、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．なお、ステップ6,7においてステップ2に戻る理由は、外光が差込むなどの環境の変化に素早く対応させるためである．

目的関数

ANA/CCでは、各照明がEq.(1)に示す目的関数を持ち、光度を設計変数としEq.(1)の f の最小化を行う．

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

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

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

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

n, j : 照度センサの数, m, i : 照明の数, w : 重み
 P : 使用電力, Lc : 現在の照度, Lt : 目標照度
 Cd : 現在の光度, R : 相関係数, T : 閾値

なお、 R_{ij} は照明 i と照度センサ j の相関係数を表し、相関が閾値以下の場合には0を乗算する．すなわち、照度センサが目標照度を満たさない場合でも、その照度センサに対する相関が低ければ目的関数値を増加しない．これにより最適化の対象を相関の高い照度センサに絞る．また、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．この P には重み w を乗算し、これにより目標照度最適化を優先するか、電力の最小化を優先するかが決まる．

近傍範囲

ANA/CCには次光度生成に用いる近傍がFig. 2に示すように3種類ある．図中の数字は最大点灯光度を100%とした時の変化の割合を示す．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するものであり、Cは光度を上昇させることを重視したものである．この3種類の近傍を相関係数と照度センサの照度を用いて適応的に使い分ける．

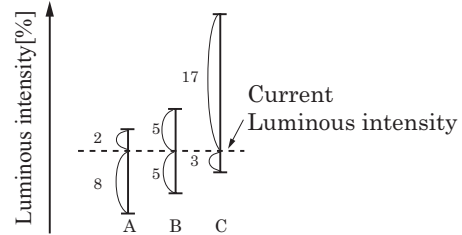


Fig. 2 Three types of the neighborhood (ANA/CC)

3.2 照明と照度センサの位置関係

3.2.1 相関係数による位置把握

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し、位置関係を考慮した次光度生成を行うことが効果的である．

ANA/CCでは、照明の光度変化量と照度センサの照度変化量との間の相互関係の強さを相関係数として求め、その相関の強さから両者が影響し合うかどうかを判断し、適応的に近傍を選択することで収束の向上を図っていた．しかし、相関による位置把握では、照明の光度変化と照度センサの照度変化の間に相互関係の有無を得ることはできるが、照明の光度変化が照度センサに与える影響度合い(因果関係)を得ることはできない．そこで、照明と照度センサの影響度合いを把握するために回帰分析を行う．

3.2.2 回帰分析による位置把握

回帰分析とは、結果となる観測値 y と要因となる説明変数 x の関係式(回帰式)を定量的に分析することである．説明変数 x が1つの単回帰式は以下の式である．ここで β_1 は直線の傾き、 β_0 は直線の y 切片、 ϵ_i は誤差である．

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon_i \quad (2)$$

本研究では、照明と照度センサの因果関係を光度変化量(説明変数 x)と照度変化量(観測値 y)の単回帰式として定式化し、その回帰式を説明する係数(傾き β_1)を求めることで両者の位置関係および影響度合いを得る．そして、得られた影響度合いを近傍選択に利用することで収束性の改善を目指す．なお、光度と照度の変化量の関係を定式化する直線近似の手法として、回帰分析の代表的な手法である最小二乗法を用いる．

最小二乗法による影響度合い(傾き)推定

最小二乗法による推定では、Eq.(2)に光度変化量 x および照度変化量 y を代入することで得られる未知係数 β に関する式をEq.(3)の観測予測誤差の式に

変換し，誤差 ϵ_i の二乗の和が最小になるよう未知係数 β を逐次に推定する．

$$\epsilon_i = y_i - (\beta_0 x + \beta_1 x_i) \quad (3)$$

最小二乗法による影響度合い β_1 の逐次推定は次の手順で行う．なお，時刻 k は現在の探索過程を示し，時刻 $k-1$ は探索の 1 ステップ前を表す．

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
 $\hat{y}(k) = x(k)\hat{\beta}(k-1)$
5. 観測予測誤差 $\epsilon(k)$ を求める
 $\epsilon(k) = y(k) - \hat{y}(k)$
6. 推定値（影響度合い $\hat{\beta}$ ）
 $\hat{\beta}(k) = \hat{\beta}(k-1) + W(k)\epsilon(k)$

以上の手順を探索ステップ毎繰り返すことにより，光度変化量を基準とした時の照度変化量の観測予測誤差を最小とし，影響度合い β_1 を推定する． β_1 は回帰式の傾きであり，光度変化量と照度変化量の因果関係を説明する係数である．すなわち， β_1 の大きさが照明の光度変化量に対する各照度センサの照度変化量の大きさを表しており，照明と照度センサの位置関係として考えることができる．

なお， $R(k)$ は観測雑音 w の共分散であり，観測値 y の重み付けに用いられる．具体的には，観測雑音 w の分散が小さい時は， $R(k)$ の重みを大きくし，観測値 y を重視するように働く．また，観測予測誤差共分散 $S(k)$ およびフィルタゲイン W も同様に重みの役割を担っており，観測予測誤差 $\epsilon(k)$ が大きくなると， $S(k)$ は大きくなり，その影響を受け W は大きくなる仕組みになっている．このように，観測予測誤差を補正することによって推定値の誤差を小さくし，推定精度を上げる．

3.3 提案アルゴリズム

本研究で提案する制御アルゴリズムは，ANA/CC をベースとしており，光度変化量と照度変化量を基に最小二乗法により両者の影響度合い（傾き）を動的に推定し，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最小二乗法を用いた適応的近傍アルゴリズム（Adaptive Neighborhood Algorithm using Least Square：ANA/LS）とする．

本アルゴリズムの制御の流れは，3.1 節で述べた ANA/CC とほぼ同様であるが，ステップ 3，およびステップ 5 が異なる．ステップ 3 では，相関係数の代わりに推定した影響度合いを利用し，適切な近傍を決定する．なお，影響度合いを得ることで相関係

数より正確な位置関係の把握が可能であるため，さらに詳細な近傍範囲が設定できると考えられる．また，ステップ 5 では，光度と照度より最小二乗法により影響度合いの推定を行う．また，ANA/LS で用いる目的関数も ANA/CC で用いた Eq.(1) とほぼ同様であるが，式 R_{ij} において相関係数を用いるのではなく，推定した影響度合いを用いる点で異なる．

近傍範囲

ANA/LS では，Fig. 3 に示すように次光度生成に用いる近傍を 7 種類持つ．A は急激に光度を下げることを重視した近傍であり，B は A よりは低速であるが減光を重視した近傍である．また，C,D,E は光度の調節を行う近傍であり，C は減光傾向，E は増光傾向を持つ調節範囲，D は非常に狭い範囲で光度の調節を行う近傍である．また，F,G は増光を重視した近傍であり，F は低速，G は急激に増光する．

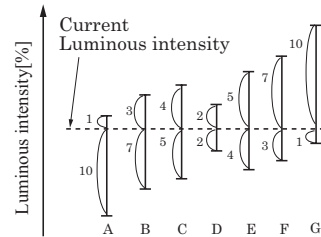


Fig. 3 Seven types of the neighborhood (ANA/LS)

近傍の決定方法

各照明は，最小二乗法による推定で得た影響度合い（傾き $\hat{\beta}$ ）を用いて，各照度センサとの近さを 4 段階でランキングを行い，ランキングに従って 7 種類の近傍を適応的に使い分ける．ランキングを行う際に用いる閾値は，3 種類であり，最も影響度の高いランクを判断する閾値 T_{high} ，次に影響度の高いランクを判断する閾値 T_{mid} ，影響があるかどうかを判断する閾値 T_{low} を用いて行う．なお，これらの閾値は実験的に求めた値である．Fig. 4 に 7 種類の近傍の決定方法を示す．各照明は，Fig. 4 の規則に従い 7 種類の近傍の中から一意に近傍を決定する．

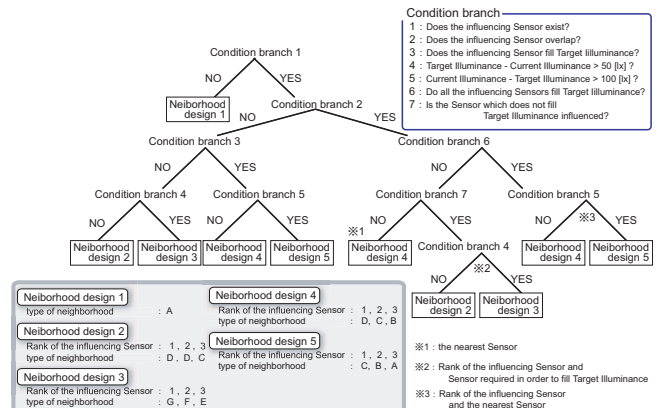


Fig. 4 Determination method of the neighborhood

4 数値実験

4.1 実験の概要

本実験では、実空間を計算機上に模倣し、以下に示す2つの実験環境において、ANA/LSを適用して数値実験を行い有効性の検証を行う。また、従来手法のANA/CCとの性能比較を行い提案アルゴリズムの有効性の検証を行う。Fig. 5に実験環境を示す。なお、実験パラメータはTable 1の通りである。

実験1：影響が推定しやすい環境

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750[lx], 700[lx], および800[lx]とする。照度センサの配置はFig. 5-aの通りである。

実験2：影響が推定しにくい環境

Fig. 5-bのように影響が推定しにくい場所に照度センサAを配置する。

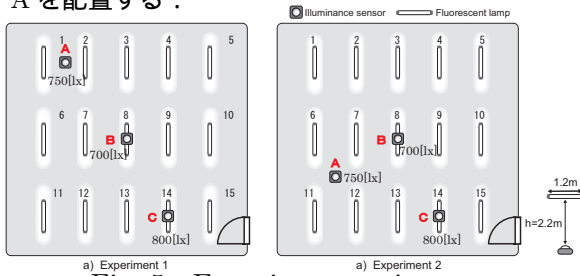


Fig. 5 Experiment environment

Table 1 Experiment parameters

	ANA/CC	ANA/LS
Number of fluorescent lamps		15
Number of illuminance sensors		3
Maximum luminous [cd(%)]		1700(100)
Minimum luminous [cd(%)]		510(30)
Initial luminance [cd(%)]		1700(100)
weight(w)		1.0
Number of data for Analysis	50	15
Threshold value	0.5 - 0.3	3.0, 2.0, 1.5

4.2 実験結果

4.2.1 実験1

Fig. 6-aに照度の履歴, Fig. 6-bに電力の履歴を示す。各図の横軸は探索回数を示す。

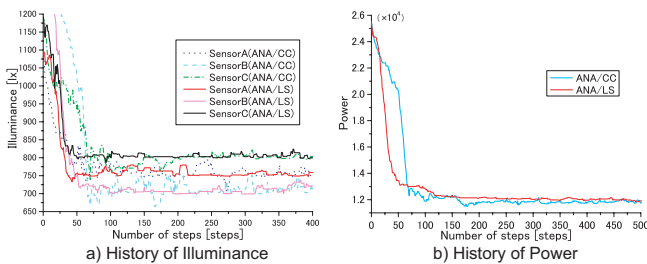


Fig. 6 Result of experiment 1

Fig. 6-aより、ANA/LSは、探索回数約50回で各照度センサA, B, およびCの照度は754, 719, 802[lx]となり、目標照度に収束していることがわかる。一方ANA/CCでは、各照度センサA, B, およびCの照度が751, 695, 829[lx]と目標照度に収束するのに約70回の探索回数を要していることが確認できる。これより、ANA/LSは、ANA/CCより高速に目標照度へと収束していることが確認でき、収束時間を短縮できていることがわかる。また、ANA/LS

はANA/CCに比べ、安定して目標照度を満たしており、詳細な近傍生成が状況に応じて上手く働いていることが伺える。Fig. 6-bより探索が進むにつれて電力の最小化が行われていることが確認でき、電力最小化においては、ANA/CCとほぼ同等の結果が得られていることがわかる。

4.2.2 実験2

Fig. 7-aに照度の履歴, Fig. 7-bに電力の履歴を示す。

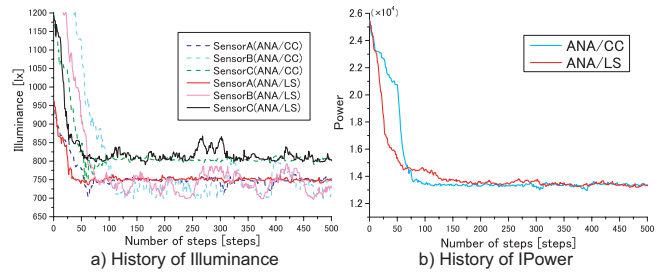


Fig. 7 Result of experiment 2

Fig. 7-aより、ANA/LSおよびANA/CC共に、探索回数約125回で各照度の目標照度に収束していることが確認でき、ANA/CCと同等の性能を示すことがわかる。また、Fig. 6-bの消費電力量に関しても、ANA/CCとほぼ同等の結果が得られていることが確認できる。

5 まとめ

本研究では、照明と照度センサの位置関係を光度変化量と照度変化量から成る関係式として捉え、その関係式を回帰分析することにより、正確な位置関係の推定を行った。そして、推定した位置関係を利用した自律分散最適化アルゴリズムとして、最小二乗法を利用した適応的近傍アルゴリズムを開発した。実環境を模倣した数値実験を行った結果、適切な解探索を行うことが確認できた。また、従来手法であるANA/CCと比較して、目標照度への収束時間短縮、および目標照度収束後の安定した解探索を確認した。以上のことより、知的照明システムにおいて、ANA/LSは有効であると考えられる。今後は様々な環境において有効性を検証していくことが必要である。

参考文献

- 1) M.Miki, T.Kawaoka. Design of intelligent artifacts: a fundamental aspects. *Proc. JSME International Symposium on Optimization and Innovative Design(OPID97)*, 1997.
- 2) K.Imazato M.Miki, T.Hiroyasu. Proposal for an intelligent lighting system and verification of control method effectiveness. *Proc IEEE CIS*, pp. 520-525, 2004.
- 3) K.Imazato M.Yonezawa M.Miki, T.Hiroyasu. Intelligent lighting control using correlation coefficient between luminance and illuminance. *Proc IASTED Intelligent Systems and Control*, Vol. 497, No. 078, pp. 31-36, 2005.