

Proposal for Neighborhood Design to Make Reduction of Illuminance Convergence Time in an Intelligent Lighting System

Mitsunori MIKI^{*}, Keigo MACHIDA^{**}, Hisanori IKEGAMI^{**}, Shohei MATSUSHITA^{**},
Takeshi TANIGUCHI^{**}, Sho KUWAJIMA^{**}, Hiroto AIDA^{*}

(Received January 20, 2014)

Intelligent Lighting System implements the individual requested illuminance for each office workers in the lowest power consumption by changing light's luminance continuously. Also, the luminance changes in the relative amount of the current brightness to reduce flicker of the brightness. In the conventional approach, the luminosity changes, the value of it's change range was selected in a uniform probability. However, since the changes in brightness is a relative value, it takes a lot of time to satisfy the target illuminance when the office worker has moved to the environment in low brightness. Therefore, we propose a new neighborhood design that makes the larger change in weighted probability. By evaluating this method by simulation, we confirmed that the time to satisfy the target illuminance is reduced, compared to the conventional method.

Key words : intelligent lighting system, lighting control, illuminance

キーワード : 知的照明システム, 照明制御, 照度

知的照明システムにおける照度収束時間削減のための 近傍設計の提案

三木光範, 町田啓悟, 池上久典, 松下昌平, 谷口武, 桑島奨, 間博人

1. まえがき

近年, 電力コストの低減や環境への配慮といった観点から消費エネルギーを削減する取り組みが行われており, オフィスにおいても省エネルギー性の向上が広く検討されている. オフィスにおける照明の消費電力は全体のおよそ 40 %を占めており¹⁾, 照明環境を改善

することで, 消費電力を大きく削減し省エネルギーに貢献することができる²⁾. また, オフィス環境が執務者に及ぼす影響に関する研究が広く行われており, オフィス環境を改善することにより, 知的生産性が向上することが報告されている²⁾. 中でも, オフィスの照明環境に注目した研究では, 執務に最適な明るさ(照

^{*} Department of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6930, Fax: +81-774-65-6716, E-mail: mmiki@mail.doshisha.ac.jp

^{**} Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6924, E-mail: kmachida@mikilab.doshisha.ac.jp

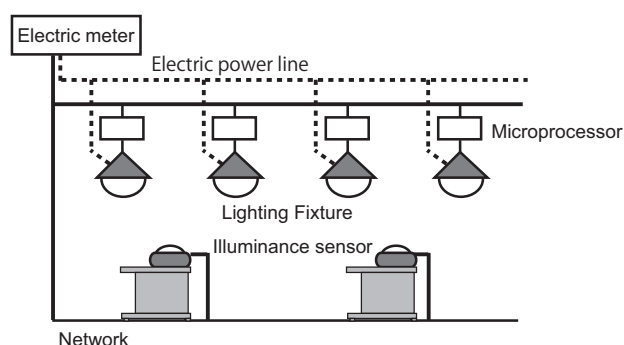


Fig. 1. Configuration of intelligent lighting system.

度)を提供することが執務者の知的生産性の向上につながる事が報告されている³⁾。

このような背景より、我々は、執務に最適な照度を個別に提供することが可能な知的照明システムを提案している⁴⁾。既にその有効性が認められ東京都内および福岡の複数の実オフィスにおいて検証実験が行われている⁵⁻⁸⁾。実オフィスにおいて必要な場所に必要なる照度を提供することに成功し、かつ高い省エネルギー性を実現した⁸⁾。

知的照明システムでは、ユーザの要求する明るさを制約条件とし、照明の消費する消費電力を最小化する最適化問題として捉え、最適化手法を用いたアルゴリズムにより照明の制御を行う。現在の知的照明システムでは、回帰分析を用いて、照明と照度センサの関係を推定している。これにより、照度センサに近い照明は明るく、遠い照明を暗くしていくことにより、効率的な照明制御が可能となる。

しかし、現在のアルゴリズムを用いた場合、ユーザの要求する照度を実現するまでに100~200秒⁹⁾の時間が必要であり、頻繁に移動するユーザにとって、目標の照度を實現するまでの待ち時間がストレスになることがある。このため本研究では、照度収束に必要な時間を削減する手法を提案する。

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照度センサが設置された場所に、要求された照度を最小限の消費電力で実現するシステムである。Fig. 1に示すように、照明器具、照度センサ、電力センサおよびそれらをつなぐネットワークから構成されている。

各照明は照度センサおよび電力センサから取得できる情報から、最適化手法を用いて執務者に感知されない範囲¹⁰⁾で光度を変化させる。これを繰り返すことで、執務者の要求する照度を省電力で実現する。

2.2 光度と照度の関係

照度センサから得られる照度値と照明の光度の関係は式(1)で表すことができる。式(1)におけるRは、照度センサに及ぼす各照明の影響度合いを説明する指標である。照明環境およびオフィス内のレイアウトが変化しない限り、Rは定数とみなすことができる。知的照明システムでは、照度センサと照明の因果関係を示した定数Rを照度/光度影響度係数と呼んでいる。また、知的照明システムでは照度/光度影響度係数を、照明の光度とそれにより得られる照度の関係から回帰分析により動的に推定している。

$$E = RI \quad (1)$$

E :照度 [lx] , I :光度 [cd] ,

R :照度/光度影響度係数 [lx/cd]

2.3 照度制御アルゴリズム

知的照明システムの制御には、Simulated Annealing (SA) を基盤とした適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient: ANA/RC⁹⁾) を用いている。適応的近傍アルゴリズム (ANA/RC) では、設計変数を各照明の光度、制約条件を各照度センサの目標照度とし、目的関数を照明全体の消費電力とする最適化問題を各照明ごとに自律分散的に解いている。

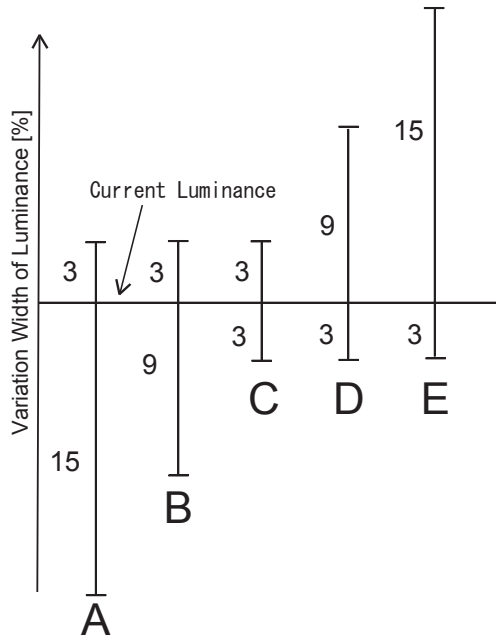


Fig. 2. Neighborhood in normal time.

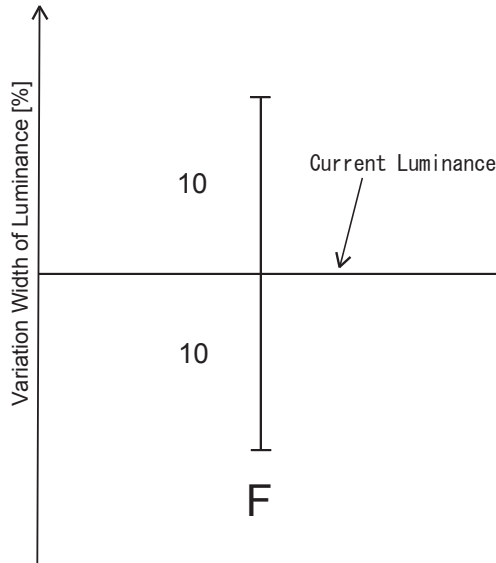


Fig. 3. Neighborhood in the time of learning influence.

ANA/RC は照度/光度影響度を解探索中の照度変化と光度変化に関する回帰分析より推定し、その照度/光度影響度に応じて、光度変化に Fig. 2 に示すような方向性を持たせる。Fig. 2 のような光度の変化幅のことを近傍と呼び、近傍は人の目に感知されない範囲に設計される。各照明の光度は、選択された近傍の範囲内でランダムに変化させていくことで、最適な点灯パ

ターンの探索を行う。

また、ANA/RC では、ある程度精度の高い照度/光度影響度を推定するまでに数十ステップを要する。この間は、光度の変化に方向性をもたせることができないため、Fig. 3 における近傍 F のような中立的な近傍を選択する。

以下に、知的照明システムにおける制御アルゴリズムの流れを示す。

1. 照明の初期光度および照度センサの目標照度を設定する
2. 照明を初期光度で点灯させる
3. 照度センサおよび電力センサから計測値を取得する
4. 後述する目的関数に基づき、評価値を計算する
5. 次光度を生成し、次光度で点灯させる
6. 次光度における評価値を計算する
7. 各照明の光度変化量、および各照度センサの照度変化量を基に回帰分析を行い影響度（回帰係数）を推定する
8. 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る
9. 項目（3）に戻る

各照明の目的関数は式（2）で表される。

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

$$g_{ij} = \begin{cases} 0 & (Ic_j - It_j) \geq 0 \\ R_{ij} \times (Ic_j - It_j)^2 & (Ic_j - It_j) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

i :照明数, j :センサ数, ω :重み [W/lx²]

P :消費電力 [W], Ic :現在の照度 [lx]

It :目標照度 [lx], L :光度 [cd],

r_{ij} :照明 i に対する照度センサ j の回帰係数

式 (2) に示す目的関数は、消費電力 P と照度制約 g_{ij} から構成され、各照明毎に計算する。各照度センサの目標照度を制約条件としたペナルティ g_{ij} は影響度係数 r_{ij} により大きく変動するため、影響度係数が大きい照明ほどペナルティを最小化するよう動作する。

知的照明システムは各々の照明が、人に感知できない範囲で自律的に光度を変化させ続ける。なお、低光度の場合の大きな変化はちらつきの原因になるため、光度は絶対量ではなく相対量で変化させる。このため、点灯光度が低い照明は変化量が少なくなり、高い目標照度を要求された場合など、目標照度への収束に時間がかかることがある。

そこで、上記の課題を改善するための手法として、光度変化が大きくなるよう確率に重み付けを行う近傍設計を提案する。

3. 確率に重み付けを行う近傍設計

知的照明システムは Fig. 4 に示すような一様な確率密度分布により光度の変化幅を決定し、次光度を生成している。このため、光度の変化は Fig. 5 に示すように、小さい光度変化と大きい光度変化が同様の確率で選ばれる。しかし、光度の変化幅は現在の光度からの相対的な変化となるため、点灯光度が低い照明は変化量が少なくなり、高い目標照度を要求された場合など、照度収束までに時間がかかることがある。この問題を解決するため本手法では各照明の光度の変化が大きくなるよう確率に重み付けを行う。重み付けを行った確率密度関数の形状を Fig. 6, Fig. 7 に示す。以後、光度変化の確率に Fig. 6 の重み付けを行った近傍を中抜き近傍, Fig. 7 の重み付けを行った近傍を三角近傍と称する。また、中抜き近傍において光度変化が C_{upp} または C_{low} の 2 値しか持たない近傍を 2 値近傍と称する。

4. 検証実験および結果

4.1 実験環境

提案する近傍設計が目標照度までの収束速度の向上に有効であるかを検証するため、Fig. 8 に示す環境を



Fig. 4. Uniform neighborhood.

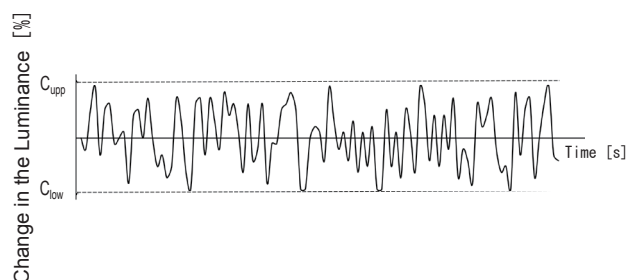


Fig. 5. History of change in the luminance.

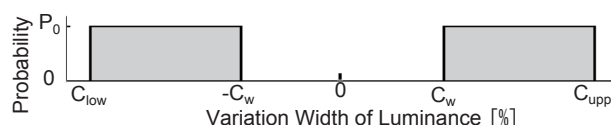


Fig. 6. Eliminate center of neighborhood.

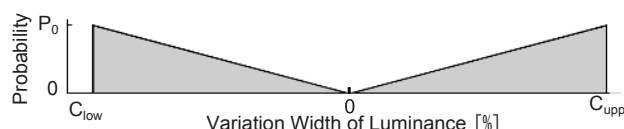


Fig. 7. Trigona neighborhood.

想定し、シミュレーションによる評価実験を行った。実験には照明を 15 台、照度センサを 3 台配置し、それぞれの照度センサの目標照度を Table 1 に示す。また、照明光度の初期値は最小点灯光度（最大点灯光度の 30%）から開始し、照度/光度影響度の推定期間は 50 ステップ（1 ステップ）としている。

4.2 提案近傍の評価実験

提案する近傍設計と従来用いられている一様な近傍設計の比較実験を行った。中抜き近傍は C_w に C_{low} または C_{upp} の 40 %, 60 %, 80 % の値を用いたときの

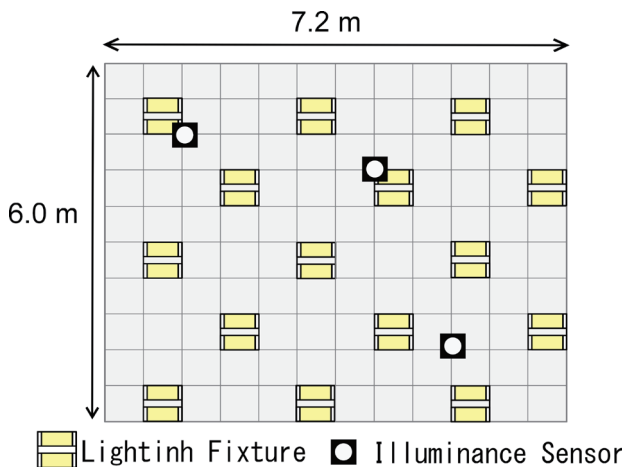


Fig. 8. Experiment environment.

形状を用いる．よって従来の一様近傍，中抜き近傍の $C_w=40\%$ ， 60% ， 80% ，2 値近傍ならびに三角近傍の 6 種類の確率密度関数を使った近傍によって，各近傍ごとに 100 回の施行をおこなったときの収束時間の平均を比較する．なお，照度が目標照度の ± 50 lx 以内にはいったとき，目標照度に収束したと判定する．

各目標照度までの平均収束時間を Fig. 9 に示す．この結果より中抜き近傍において C_w を C_{low} ならびに C_{upp} の 40% ， 60% ， 80% と中を抜く幅を大きくしていくほど，照度センサの目標照度までの収束時間が早くなっていき，完全に中を抜いた 2 値近傍が最も収束時間が早くなっている．この結果より，本手法を用いることで，従来近傍よりも $10\sim 40\%$ の照度収束時間の削減が確認できた．

また，従来の一様近傍と最も収束速度の早かった 2 値近傍を使ったときの，照度センサ A と照度センサ C の照度履歴を Fig. 10，Fig. 11 に示す．Fig. 10，Fig. 11 より，2 値近傍は従来の一様近傍よりも，照度/光度影響度の推定期間における目標照度までの推移が早い

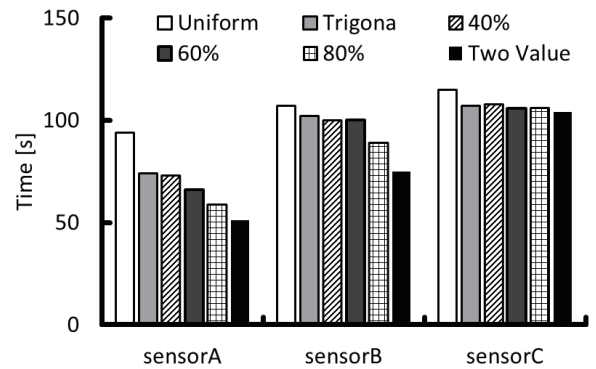


Fig. 9. Average time taken to fill target illuminance.

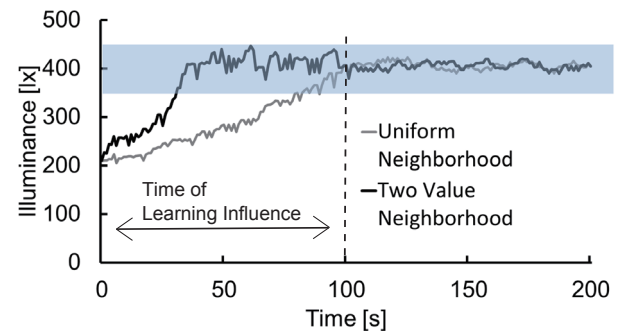


Fig. 10. Illumination history of sensorA.

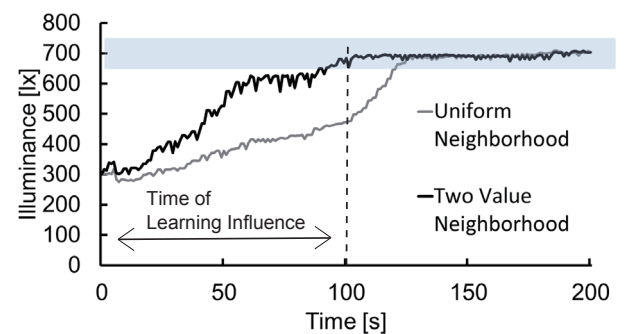


Fig. 11. Illumination history of sensorC.

ことがわかる．また，Fig. 11 の照度履歴から，目標照度が高く照度収束に時間がかかったとき，照度/光度影響度の推定が完了するため，従来の一様近傍であってもそこからの照度収束が早くなっていることが確認できる．このことから，照度センサごとの平均収束時間に関し，低い目標照度を持った照度センサほど提案近傍による収束時間の削減ができていると考えられる．

Table 1. Target illuminance.

Illuminance Sensor	Target Illuminance [lx]
A	400
B	500
C	700

5. まとめ

本研究では、知的照明システムにおける照度収束速度の向上のため、次光度生成に使用する新たな近傍設計を提案した。従来の一様な確率密度関数を持った近傍では、現在光度が低い照明の近くで高い目標照度を要求されたとき、目標照度への収束に時間がかかることがあった。そこで本研究では、光度変化の起こる確率に重み付けを行い、大きい光度変化の起こる確率が高い近傍を複数提案した。提案した重み付けをおこなった近傍により、照度/光度影響度係数の推定期間であっても、目標照度への収束性が向上した。最も収束速度の良かった、光度変化に最大値と最小値の2値のみを使用する近傍は、従来近傍と比較し、10～40%の収束速度の向上を確認することができた。

以上の結果より、提案した近傍設計は知的照明システムにおける照度収束性速度の向上に有効であると考ええる。

本研究の一部は、同志社大学理工学研究所研究助成金の助成を受けて行われた。

参 考 文 献

- 1) 財団法人省エネルギーセンター, “オフィスビルにおける照明の消費エネルギー比率”, http://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html
- 2) 大林 史明, 富田 和宏, 服部 瑤子, 河内 美佐, 下田 宏, 石井 裕剛, 寺野 真明, 吉川 榮和, “オフィスワークのプロダクティビティ改善のための環境制御法の研究 - 照明制御法の開発と実験的評価”, ヒューマンインターフェースシンポジウム, **1**(1322), pp.151-156(2006).
- 3) P. Boyce, N. Eklund, N. Simpson, “Individual Lighting Control Task Performance, Mood, and Illuminance”, J. of the Illuminating Engineering Society, pp.131-142(2000).
- 4) 三木 光範, “知的照明システムと知的オフィス環境コンソーシアム”, 人工知能学会誌, **22**(3), pp.399-410(2007).
- 5) 鈴木真理子, 三木光範, 田中慎吾, 吉見真聡, 中川明彦, 齋藤敦子, 福田麻衣子, “オフィス内フレームを用いた知的照明システムの構築 (オフィスインフォメーションシステム, e-ビジネスモデリング, 特集学生論文)”, 電子情報通信学会論文誌. D 情報・システム, **95**(3), pp. 549-558(2012).
- 6) 小野景子, 三木光範, 吉見真聡, 西本龍生, 近江哲也, 足立宏, 秋田雅俊, 笠原佳浩, “Led 照明を用いた知的照明システムの実オフィスへの導入”, 電気学会論文誌. A, 基礎・材料・共通部門誌= The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. A, A publication of Fundamentals and Materials Society, **131**(5), pp.321-327(2011).
- 7) 三木光範, 加來史也, 廣安知之, 吉見真聡, 田中慎吾, 谷澤淳一, 西本龍生, “実オフィス環境における任意の場所にユーザが要求する照度を提供する知的照明システムの構築 (情報・システム基礎)”, 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, **94**(4), pp. 637-645(2011).
- 8) 大学法人同志社大学, 株式会社三井物産戦略研究所, “平成 20 年度～平成 22 年度成果報告書エネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発/自律分散最適化アルゴリズムを用いた省エネ型照明システムの研究開発”, Technical Report 20110000000875, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, (2011).
- 9) 後藤和宏, “知的照明システムのための回帰係数を用いた自立分散最適化アルゴリズム”, 照明学会 全国大会講演論文集, **40**, pp.123-124(2007).
- 10) 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変動知覚に関する研究”, J.Illum.Engng.Inst.Jpn, **85**(5), pp.346-351(2001).