

An Intelligent Lighting System Realizing Turning-Off of Lightings for Vacant Seats

Hiroyuki YONEMOTO^{*}, Mitsunori MIKI^{**}, Tomoyuki HIROYASU^{***} and Keiko ONO^{****}

(Received December 26, 2011)

We propose an Intelligent Lighting System realizing turning-off of lightings for vacant seats. In the case of no attendance, it turns off the unnecessary lights and, in the case of attendance, it turns on the necessary lights. In the past, it's necessary for the lights to keep on lighting, in order to learn the control parameter. However, in the environment of the fixed illuminance sensors, the lights get the effects on the sensors, they are turned off and on. As a result of verification, it was confirmed that this method is effective to energy saving.

Key words : energy saving , lighting system , intelligent , optimization , office environment

キーワード : 省エネルギー , 照明システム , 知的 , 最適化 , オフィス環境

離席時の消灯を実現する知的照明システム

米本洋幸, 三木光範, 廣安知之, 小野景子

1. まえがき

電子デバイスや情報処理技術の発展により, マイクロプロセッサを搭載し, 自律的に制御を機械自らが判断し操作を行うシステムの知的化が行われている. これにより, 人間の負荷は大きく減少してきた. しかし, 照明設備においては一度設置を行うと改装しにくいなどの理由から知的化が遅れている人工物であると言える.

また, 照明はオフィスビルにおいては, 電力コストがビル全体の約 20% を占めており¹⁾, 照明に対する省エネルギー対策は重要な課題である.

この課題を解決する照明システムとして, 筆者らは知的照明システムと名付けた照明システムの研究開発に取り組んでいる²⁾³⁾. 知的照明システムは, マイクロプロセッサが組み込まれた複数の調光可能な照明器具, 複数の照度センサ, および電力計を, ネットワー

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

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

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

Telephone:+81-774-65-6930,6780,Fax:+81-774-65-6716 E-mail:mmiki@mail.doshisha.ac.jp

^{***} Department of Life and Medical Sciences, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-774-65-6932,Fax:+81-774-65-6019 E-mail:tomo@is.doshisha.ac.jp

^{****} Department of Electronics and Informatics, Ryukoku University, Kyoto

Telephone:+81-775-43-7495 E-mail:kono@rins.ryukoku.ac.jp

クに接続し構成される。各照明はネットワークに流れる照度情報および電力量に関する情報を基に自律的に最適な点灯パターンを実現することで、任意の場所に任意の明るさを提供することができる。

知的照明システムでは、個人ごとに異なる照度を実現でき、結果として、実現される照度の平均値は大きく減少し、それに伴って消費電力も大きく減少する。このため、知的照明システムはオフィスビルにおける省エネルギーのためのソリューションとして重要なものとなる。

知的照明システムは、実験室での検証³⁾の後、2009年4月に東京都内の大手町ビルディング三菱地所株式会社都市計画事業室での実証実験⁴⁾を行っており、その有効性を検証してきた。

知的照明システムでは、外光や環境の動的な変化に対応するために、照明は照明自身の明るさをランダムに変化させることで、照明と照度センサとの位置関係を把握し、最適な照明制御を行う。そのため、オフィスワーカーが存在せず明るさを必要としない場所においても、照明は最小の光度で点灯し、光度の増減を繰り返す必要があるため、従来消灯するという概念はなかった。なぜなら、ある照明を消灯させるとその照明と照度センサの影響を動的に把握することができなくなるからである。

しかし、多くのオフィスワーカーが離席し、明るさが不要となった場所の照明が最小点灯といえども、点灯していることは、さらなる省エネの観点で課題である。そこで、本研究では省エネルギー性向上を目指して、これまで知的照明システムにはなかった消灯というメカニズムを実現する制御手法を提案する。ただし、この手法はセンサの位置が固定された状況でのみ用いることができる方法であり、センサの位置が変化する場合用いることが出来ない。

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、任意の場所にユーザが要求する明るさを提供する照明制御システムである。調光が

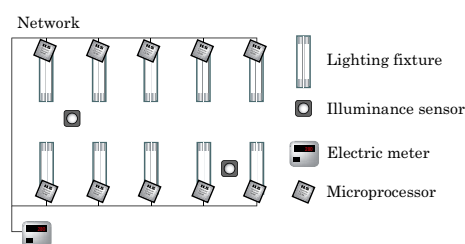


Fig. 1. The construction of a lighting fixture-driven smart lighting system.

可能な複数の照明機器と複数の照度センサ、および電力計を一つのネットワークに接続することで構成される。Fig. 1 に知的照明システムの構成を示す。

各照明機器にそれぞれ制御装置が搭載されており、制御装置が各照度センサからの照度情報、および電力計から消費電力情報を取得できる。これらの情報を基に、最適化手法を用いて制御装置が照明の明るさを制御することで、ユーザが要求する明るさを実現し、不必要な明るさを抑えることで、消費電力量の削減を図る。

2.2 目的関数

知的照明システムは、照度センサを設置した場所の照度を目標とする照度以上にし、照明が使用する電力量を最小になるように照明の光度を自律的に求める。これらを目的関数として定式化する必要がある。目的関数を式 1 に示す。

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

$$g_i = \begin{cases} 0 & (Lc_i - Lt_i) \geq 0 \\ R_i(Lc_i - Lt_i)^2 & (Lc_i - Lt_i) < 0 \end{cases}$$

$$R_i = \begin{cases} r_i & r_i \geq Threshold \\ 0 & r_i < Threshold \end{cases}$$

n:照度センサの数, w:重み, P:消費電力量

Lc:現在照度, Lt:目標照度

r:相関係数, Threshold:閾値

設計変数を照明の光度とし、式 1 の f を最小化することを目的とする。 f は消費電力量 P と、現在の照度 L_c と目標照度 L_t の照度差を表す g_i からなる。 g_i は

現在の照度が目標照度を下回った場合にのみ加算される。本目的関数では、 g_i に照度センサ i に対する相関係数を乗算する。また相関が閾値以下の場合には 0 を乗算する。つまり、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は増加しない。これにより、相関が高い照度センサ、すなわち近くに位置する照度センサに最適化の対象を絞ることができ、目標照度を満たす精度が向上する。また、 g_i には重み w を乗算し、この w の値により、目標照度の制約条件または、消費電力量の最小化のどちらを優先するを決定する。

2.3 照明制御アルゴリズム

著書らは照明制御アルゴリズムとして、確率的山登り法 (Stochastic Hill Climbing : SHC) を基に照明制御用に相関を用いた適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Correlation Coefficient : ANA/CC) ⁵⁾ を提案した。相関を用いた適応的近傍アルゴリズムのフローチャートを Fig. 2 に示し、以下に本アルゴリズムの流れを説明する。

1. 初期光度で点灯する
2. 各照度センサのセンサ情報 (センサ ID, 現在の照度, 目標照度), および電力計の消費電力量を取得し, それらの情報を用いて目的関数値を計算する
3. センサ情報, 相関係数に基づき適切な近傍を決定する (近傍とは次光度を生成する為に用いる範囲である。2.4 節にて詳しく述べる。)
4. 項目 3 で決定した近傍内に次光度をランダムに生成し, 照明はその光度で点灯する
5. 再び各照度センサのセンサ情報, および電力計の消費電力量を取得し, それらの情報を用いて次光度で点灯した状態での目的関数値を計算する
6. 照明の光度変化量と照度センサの照度変化量を用いて相関係数を計算する
7. 目的関数値が改良した場合, その光度を確定し, 項目 2 へ戻る
8. 項目 5 で目的関数値が改悪した場合, 前の光度で再度点灯し, 項目 2 へ戻る

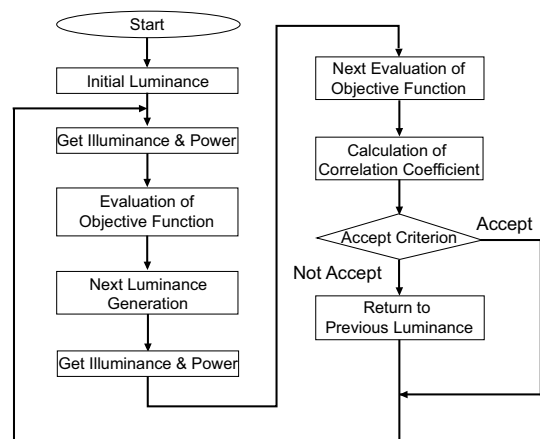


Fig. 2. Control algorithm.

以上の動作により、照明と照度センサの概略的な位置関係を把握し、目標照度を満たすとともに省電力な状態へと速やかに収束する。

また、項目 6 で計算する相関係数が照明と照度センサの概略的な位置把握を行う上で、必要である。このため、ワーカが離席し明るさが不要となった場所においても、照明は消灯することなく最小点灯光度以上で点灯を行う。

2.4 近傍設計

知的照明システムのアプローチでは、Fig. 3 に示す 3 種類の近傍を次状態の次光度生成に用いる。ある照明の光度を増加させる必要がある場合は、増光傾向の近傍を、減光させる必要がある場合には減光傾向の近傍を用いる。Fig. 3 に示すように、(A) 減光傾向、(B) 中立および (C) 増光傾向の 3 種類の近傍を用いる。Fig. 3 に示す数値は、照明の最大点灯光度を 100% とした際の光度変化量である。

この 3 種類の近傍は、相関係数と各照度センサの照度値より適応的に選択する。相関係数が閾値より低い場合、照明が影響のない照度センサと判断し、近傍 A を設定することで、減光する。相関係数が閾値より高く、目標照度より高い場合、近傍 B を設定する。照明と照度センサの位置が近いと判断するが、目標照度に比べ明るいいため、照明は現在の照度値付近で増減光を行いながら、目標照度になるよう調整を行う。相関係数が閾値より高く、目標照度より低い場合、近傍 C を

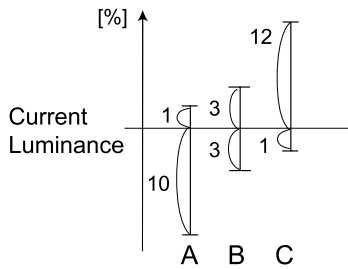


Fig. 3. Three types of the neighborhood.

設定する．照明と照度センサの位置が近いが，目標照度に比べて暗いため，照明は増光する．照度センサが複数の場合は，複数の近傍が選択される可能性がある．その場合は，近傍 C から A という優先権を持つ．これは目標照度を満たすことを最優先とし，相関の高いセンサに適した近傍を優先することを示す．

2.5 検証実験

知的照明システムの照度収束検証を行う．実験環境は大学における学生居室に仮設天井を設け構築を行った．Fig. 4(a) に実験環境の側面図，(b) に上面図を示す．Fig. 4(b) には，蛍光灯及び照度センサの位置関係を示しており，図中の蛍光灯横の番号は蛍光灯番号を，照度センサ横のアルファベットはセンサ識別名ならびに被験者名を表す．今回実験で用いた 10 灯の蛍光灯は調光範囲が 20% から 100% であり，100% 点灯で 1050 cd の光出力を行う．また，10 台の照度センサの目標照度設定は，ユーザ A，G および H は 600 lx，ユーザ B，F および I は 500 lx，ユーザ J は 400 lx，ユーザ C，D および E は離席とした．知的照明システムシステムでは，各ユーザが離席時にユーザインターフェース上の離席ボタンを押すことで，目標照度を 0 lx とする．

各照明機器にそれぞれ制御装置が搭載されており，制御装置が各照度センサからの照度情報，および電力計から消費電力情報を取得できる．これらの情報を基に，最適化手法を用いて制御装置が照明の明るさを制御することで，ユーザが要求する明るさを実現し，不必要な明るさを抑えることで，消費電力量の削減を図る．

Fig. 5 より，0 lx でない目標照度が設定されている

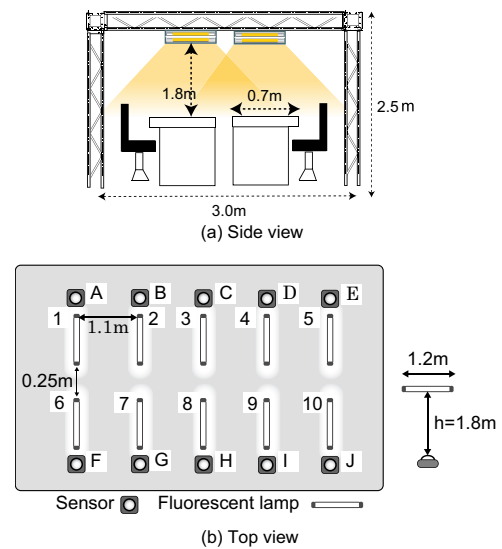


Fig. 4. Experiment Environment.

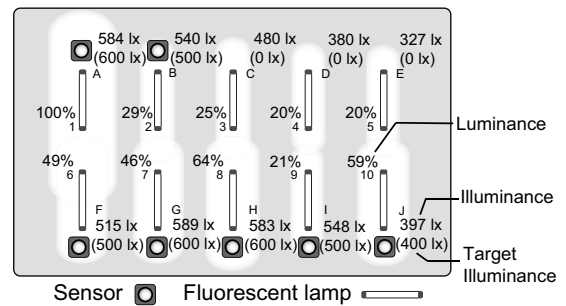


Fig. 5. Result of Convergence.

ユーザ A，B，F，G，H，I および J において，目標照度の ± 50 lx を実現しており，目標照度を満たしていることがわかる．また，離席しているユーザ C，D および E の近くの照明 3，4 および 5 は，最小点灯光度付近で点灯しており，省エネルギーな状態であると言える．

3. 離席時の消灯を実現する知的照明システム

3.1 消灯および点灯制御の必要性

知的照明システムでは，各ユーザに必要な明るさを提供するため，均一な明るさを提供する従来の照明システムと比べて省エネルギー性が高い⁶⁾．

この省エネルギー性は，照明器具の調光範囲に大きく依存している．例えば，50%の光度まで連続的に調光可能な器具よりも，25%の光度まで調光可能な器具

を用いた場合のほうが、省エネルギー効果は高くなる。これは、低い照度を好む人や執務者の離席、退社などに対応して照度を減少させることが可能であることによる。

現在の知的照明システムでは、蛍光灯照明器具を用いた場合、器具の問題から一般的な調光下限値は20%程度であり、離席者が多い場合でも、多くの照明器具が20%の点灯光度となり、省エネルギー性はこの値に規制される。これより高い省エネルギー性を得るには、不必要な照明器具を最小点灯光度である20%で点灯させるのではなく、消灯させることである。

しかし、知的照明システムでは、明るさが不要となった場所であったとしても、その位置にある照明は消灯することはなかった。各照明が人間に感知出来ない範囲で常に光度をランダムに増減させ、その光度変化量と各照度センサで計測される照度変化量の相関係数を用いて、照明と照度センサの概略的な位置関係を把握し、制御を行っているためである。照明を消灯させると、その相関係数を動的に得ることができなくなり、照明の最適制御が行えない。このため、照明は最小の明るさ以上で常に点灯する必要がある。

3.2 消灯および点灯制御を実現するメカニズム

消灯制御を行うと、照明の光度のランダムな変化と照度センサで測定された照度値のランダム変化から照明と照度センサの概略的な位置把握ができない。そのため、照度センサの位置を固定し、事前に照明と照度センサの概略的な位置関係をデータベースとして把握し、制御を行う。多くのオフィスでは、各オフィスワークの席は固定的であるために、照明と照度センサの概略的な位置関係をデータベースとして把握することは問題がない。

消灯制御は次の考え方で行う。すなわち、照明は影響があるすべての照度センサの目標照度が要求されていない場合、消灯する。

消灯ならびに、点灯制御の手順は以下の通りである。

1. 2.3 節の照明制御を行う
2. 照明が最小点灯光度であり、影響があるすべての照度センサに目標照度が要求されていない場合、

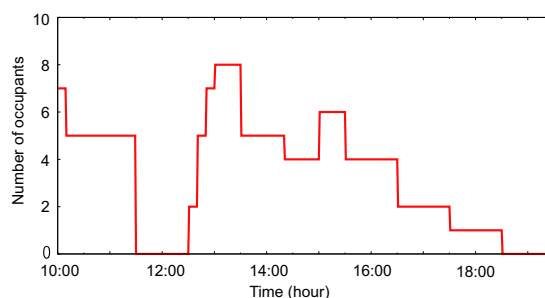


Fig. 6. Number of seat occupancy.

消灯を行う。このとき、この照明は消灯する直前の影響がある照度センサの ID を記憶する

3. 照明が消灯しており、消灯時に記憶した ID の照度センサに 0 lx でない目標照度が要求された場合、最小点灯光度で点灯を行う

このように制御を行うことで、適応的な消灯および点灯制御を実現する。

4. 離席時の消灯を実現する知的照明システムの有効性評価

4.1 実験概要

提案システムの有効性を検証するために、従来の知的照明システムとの省エネルギー性の比較を行う。知的照明システムの実験を行い、得られた目標照度ならびに、在席・離席のスケジュールをもとに提案システムの実験を行い、両システムの比較を行う。また、外光の影響を無くすために、外光のない夜間に実験を行った。目標照度の設定は、被験者 A, G, および H は 600 lx, 被験者 B, C, F, および I は 500 lx, 被験者 J は 400 lx, 被験者 D, E は終日離席とした。また、実験環境は Fig. 4 と同様である。

在席・離席のスケジュールは Fig. 6 の通りである。Fig. 6 は横軸に時間、縦軸に在席人数を示す。知的照明システムの各ユーザが離席時に個人ユーザインターフェース上の離席ボタンを押す。これにより、そのユーザの目標照度は 0 lx になる。

これらのデータから、消灯制御を組み込んだ場合と、組み込まない場合における省エネルギー性の比較を行う。

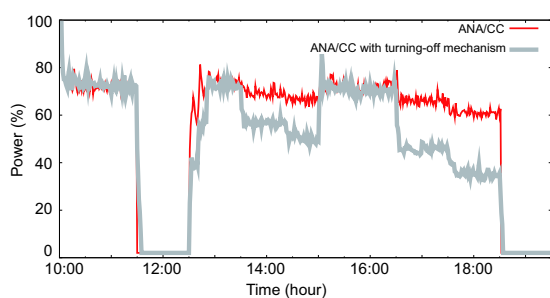


Fig. 7. History of electric power.

4.2 省エネルギー性の検証

提案システムの省エネルギー性の検証を行う。提案システムと従来システムの消費電力量の履歴を Fig. 7 に示す。Fig. 7 の横軸は時間、縦軸は消費電力量を百分率で示す。オフィスでは、机上面照度 750 lx を満たすと定められているため⁷⁾、これを実現する点灯状態での消費電力量を 100% とした。なお、机上面照度 750 lx を満たす点灯状態は、予備実験により決定した。

Fig. 7 の 13 時 30 分から 15 時 00 分ならびに、16 時 30 分から 18 時 30 分において、提案システムは従来システムと比べて、消費電力量に大きな削減が見られた。一方、15 時から 16 時では、両システムにおいて消費電力量は同一であった。これは、提案システムにおいて、離席者のパターンによって照明が消灯しなかったためである。消費電力量は従来の知的照明システムと比較して、一日の合計で約 13% の削減が可能となった。この結果から、消灯制御を知的照明システムに組み込むことで、さらなる省エネルギー性を実現でき、提案システムが有効であると言える。

5. むすび

本研究では、任意の場所に任意の明るさを、最小限の消費電力量で実現する知的照明システムの省エネルギー性をさらに高めるために、照明の調光範囲を蛍光灯照明の最小点灯光度とする従来 방식을改良し、消灯を含める新たな制御手法を提案した。知的照明システムは制御に必要なパラメータを動的に学習するために、照明を常にランダムに増減光する必要がある。そのため、照明は必ず最小点灯光度以上で点灯を行い、消灯することはなかった。しかし、知的照明システム

の省エネルギー性をさらに高めるために、照度センサが固定である環境において、各照明は影響を与える照度センサを記憶することで、消灯ならびに再点灯を実現した。消灯を含める新たな制御手法は従来と同様の照度収束を実現しつつ、さらに高い省エネルギー性を実現することを確認した。

NEDO 研究開発プロジェクト「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」研究開発フェーズ: 先導研究フェーズ研究開発課題名: 「知的照明システムの研究開発」の補助を受けて実施した。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 財団法人省エネルギーセンター. <http://www.eccj.or.jp/office.bldg/01.html>.
- 2) M.Miki, T.Hiroyasu, K.Imazato. Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness. *Proc IEEE CIS*, pp. 520–525, 2004.
- 3) 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. *人工知能誌*, Vol. 22, No. 3, pp. 399–410, May 2007.
- 4) F.Kaku, M.Miki, T.Hiroyasu, M.Yoshimi, S.Tanaka, T.Nishida, N.Kida, M.Akita, J.Tanisawa, T.Nishimoto. Construction of intelligent lighting system providing desired illuminance distributions in actual office environment. *Artificial Intelligence and Soft Computing*, Vol. 6114/2010, pp. 451–460, 2010.
- 5) 小野景子, 三木光範, 米澤基. 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. *電気学会論文誌*, Vol. 130, No. 5, pp. 750–757, 2010.
- 6) S.Tanaka, M.Miki, T.Hiroyasu, M.Yoshikata. An evolutionary optimization algorithm to provide individual illuminance in workplaces. *Proc IEEE Int Conf Syst Man Cybern*, Vol. 2009 Vol.2, pp. 941–947, 2009–10.
- 7) 照明学会. 照明ハンドブック, 第 2 版. オーム社, 2003.