

知的照明システムにおける省エネルギー性向上を実現する消灯制御

三木 光範[†] 米本 洋幸^{††,†††} 小野 景子^{†††} 長野 正嗣^{††}

An Intelligent Lighting System with an Additional Energy-Saving Mechanism

Mitsunori MIKI[†], Hiroyuki YONEMOTO^{††,†††}, Keiko ONO^{†††}, and Masashi NAGANO^{††}

あらまし 知的照明システムは、任意の場所に任意の明るさを最小の消費電力量で実現する。各照明は明るさをランダムに増減させることで、照明の光度の制御を行い、制御に必要なパラメータを学習する。このため、照明は一定以上の明るさで点灯する必要があり、ユーザが離席し、明るさが不要な場所においても、照明は消灯を行うことはなかった。個別照度を実現することで高い省エネルギー性を実現してきた知的照明システムであるが、さらなる省エネルギー性の観点から消灯を実現するメカニズムが必要であると言える。そこで本研究では、ユーザの離席に応じて不必要な照明を消灯させるメカニズムの提案を行う。動作実験として、調光可能な蛍光灯 10 灯と照度センサ 10 台を用いた実験システムを構築し、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ことで提案システムの有効性を検証する。提案システムを用いた場合でも、従来システムと同様の照度収束能力を実現しつつ、さらに高い省エネルギー性を実現できることを確認した。

キーワード 省エネルギー、オフィス環境、照明制御、知的、最適化

1. まえがき

我が国のエネルギー使用量を大幅に削減することは、緊急の課題である。特に、業務用ビルの消費エネルギーは年々増加しており、この部門における省エネルギーは、国全体にとってエネルギーの大きな削減につながる。オフィスビルにおいては、照明に用いる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し、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、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、逐次、照明と照度センサの位置関係を照明の明るさを人が知覚することができない範囲 [5] でランダムに変化させ、照明と照度センサとの位置関係、および外光や環境の動的な変化を把握することで、最適な照明制御を行う。

このことから、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ため、知的照明システムでは、オフィスワークが存在せず明るさを必要としない場所においても、最小点灯する必要があり、従来消灯するという概念はなかった。

[†] 同志社大学工学部
Department of Science and Engineering, Doshisha Univ.

^{††} 同志社大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Doshisha Univ.

^{†††} 現在、株式会社 NTT データ

^{††††} 龍谷大学 理工学部
Department of Electronics and Informatics, Ryukoku Univ.

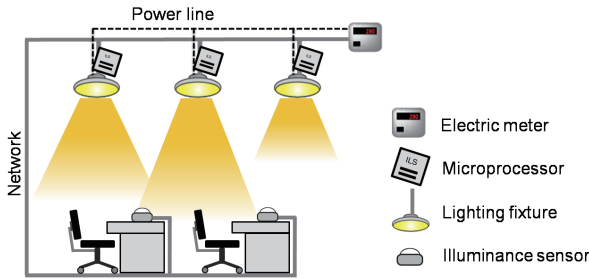


図1 知的照明システムのシステム構成

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

このことは、2011年3月に生じた東日本大震災以前には、オフィスの安全性の観点から、正しいものとして認識されてきた。

しかし、大震災以降、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、省エネルギー性を高める上で課題であると考えられるようになってきた。

現在多くのオフィスで用いられている離席センサを用いた照明の消灯制御では、あるエリア（例えば20人程度の執務スペース）における在席者が0人になったときはじめてそのエリアすべての照明が消灯するといった制御が行われている。

一方で、照明と照度センサの位置関係を把握し、最適な照明制御を行う知的照明システムにおいて、消灯制御を実現すること出来れば、一灯ごとのより細かな消灯制御を実現することが可能となる。

そこで、本研究ではさらなる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。調光が可能で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。図1に知的照明システムの構成を示す。ユーザごとに照度センサを所持し、ユーザの手元の明るさを計測する。また、ユーザは知的照明システムのユーザイ

ンタフェースを通して目標照度を入力する。各照明機器に搭載された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することで、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し、ユーザが要求する明るさを実現しかつ、消費電力量の削減を図る。なお知的照明システムは、照明の数も照度センサの数にも制限はないが、例えば、近接する照度センサの目標照度の差が大きい場合など、目標照度を物理的に実現出来ない場合は、もちろん目標照度を十分に満たすことは出来ない。一般的なオフィスの照明器具間隔（1800mmピッチ）、および一般的な執務機の間隔（1200mmピッチ）において、近接する執務機の机上面に置かれた照度センサの最大実現照度差は200 lx程度である。

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。各照明の目的関数を式1に示す。

$$f_i = P + w \sum_{j=1}^n g_{ij} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (1)$$

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

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

f : 目的関数 i : 照明の指標 n : 照度センサの指標

m : 照明の数 n : 照度センサの数 w : 重み

P : 消費電力量 L_c : 現在照度 L_t : 目標照度

r : 相関係数 Threshold : 閾値

設計変数を各照明の光度とし、式1の f_i を各照明ごとに最小化することを目的とする。 f_i は消費電力量 P と、現在の照度 L_c とユーザが入力した目標照度 L_t の照度差に照明 i の光度変化量と照度センサ j の照度変化量から成る相関係数 r_{ij} を乗算した g_{ij} （相関が閾値以下の場合には0を乗算したもの）からなる。 g_{ij} は現在の照度が目標照度を下回った場合にのみ加算する。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で目標照度を満たす精度の向上を実現する。また、 g_{ij} 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かを決定する。

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) [6] を提案した。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

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制御を行う上で, 必要であるため, ワーカーが離席し明るさが不要となった場所においても, 照明は消灯せずに最小点灯光度以上で点灯する。

2.4 近傍設計

知的照明システムのアルゴリズムでは, 図 2 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, 増光傾向の近傍を用い, 減光させる必要があるときには減光傾向の近傍を用いる。図 2 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。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。図 2 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。

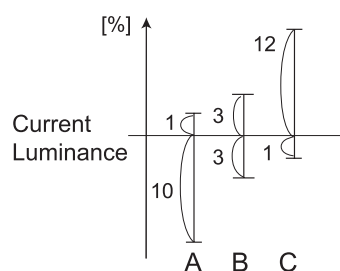


図 2 近傍設計

Fig. 2 Three types of the neighborhood

3. 知的照明システムにおける省エネルギー性向上を実現する消灯制御

3.1 消灯制御の必要性

知的照明システムでは, 最適化アルゴリズムを用いてユーザごとに, 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消費電力が大きく減少し, 省エネルギー性が高い [7].

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, ユーザの離席や退社によって, 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, 照明制御に用いているためである。照明を消灯させると, 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。全ユーザが退社し, 環境の変化が起こり得ない場合は壁に設置してある照明の電源スイッチを用いて

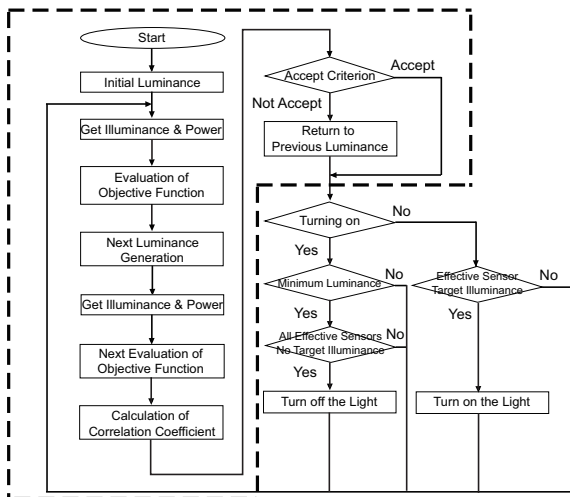


図3 照明制御アルゴリズム
Fig. 3 Control algorithm

照明を消灯しても問題はないが、ユーザ（照度センサ）に対して動的な環境の変化が起こりうる場合は、照明は最小の明るさ以上で常に点灯する必要があった。

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のランダムな変化から照明と照度センサの概略的な位置把握が行えない。そのため、事前に照明と照度センサの概略的な位置関係を把握を行う。位置関係を近いと判断した照度センサは影響がある照度センサであるとしてデータベースに登録し、消灯ならびに点灯制御に用いる。

オフィスでは各デスクに照度センサを固定することが一般的なために、位置関係を把握することは可能である。位置関係の把握は、事前に照明を一灯ずつ点灯させ、その際に各照度センサで測定された照度値を基に行う。

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に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、点灯制御を組み込んだ照明制御アルゴリズムのフローチャートを図3に示し、以下に本アルゴリズムの流れを説明する。図3の破線で囲んだ部分は、消灯ならびに点灯制御を組み込んでいない場合における知的照明システムの制御を示す。

- (1) 2.3節で示した照明制御を行う
- (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、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、目標照度への収束と適応的な消灯および点灯制御を可能とする。

4. 知的照明システムにおける消灯制御の有効性評価

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。実験は、大学における学生居室に仮設天井を設け、図4(A)および(B)に示す環境を構築し、昼白色照明10灯および照度センサ10台を用いて行う。図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の識別名ならびに被験者名を表す。今回の実験で用いた蛍光灯の調光範囲は20から100%である。実験に用いたパラメータを表1に示す。

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。

在席・離席のスケジュールは図5の通りである。図5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、組み込まない場合を実システムを用いて実験を行う。すなわち、10人の目標照度や在席・離席のスケジュールを設定し、システムがどのように動作を行うかを示す。

4.2 実験結果および考察

4.2.1 照度収束の検証

提案システムの照度収束について検証を行う。従来システムと提案システムにおけるSensor Hの照度と目標照度の履歴を図6に示す。図6の横軸は時間、縦

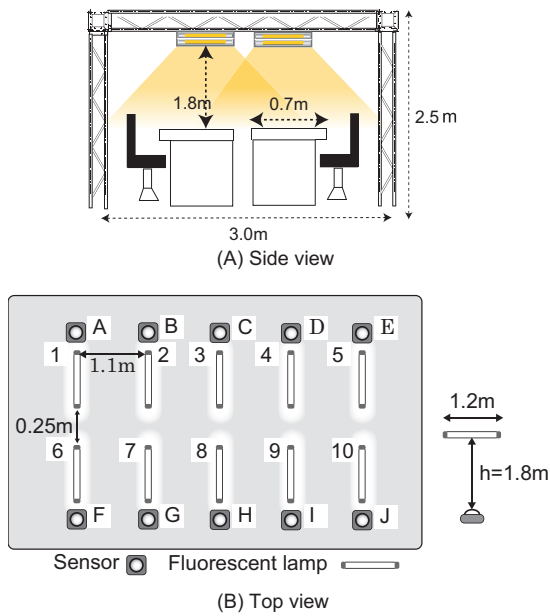


図 4 実験環境
Fig. 4 Experiment Environment

表 1 パラメータ
Table 1 Parameters

Number of fluorescent lamps	10
Number of illuminance sensors	10
Weight	1.0
Target illuminance [lx]	0, 400, 500, 600
Maximum luminance [cd]	1050
Minimum luminance [cd]	210
Initial luminance [cd]	1050

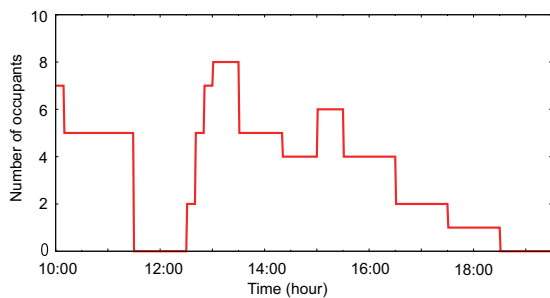
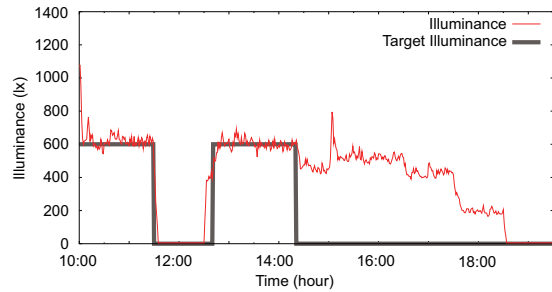
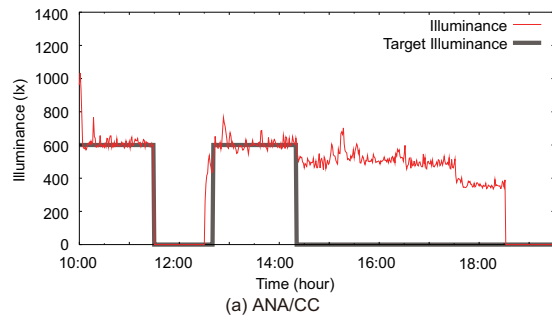


図 5 在席者数の推移
Fig. 5 Number of seat occupancy

軸は照度を示す。

図 6 より、ユーザが在席し、目標照度 600 lx が設定されている時間領域において、従来システムと提案システムは目標照度と現在照度の誤差が小さく、目標を満たしていることがわかる。また、目標照度 600 lx



(a) ANA/CC

(b) ANA/CC with an Additional Energy-Saving Mechanism
図 6 照度履歴 (照度センサ H)
Fig. 6 History of illuminance (Sensor H)

が設定されている 12 時 40 分から 14 時 20 分の時間帯における従来システムならびに提案システムの各照明の点灯光度 [%] および各照度センサの照度を図 7 に示す。図中の括弧内は目標照度を、その上の値は現在照度を示す。

図 7 より、従来システムでは消灯する照明がなかったのに対して、提案システムでは Sensor H に影響を与えない照明、すなわち照明 4, 5 および 10 の 3 台が消灯している。つまり、ユーザの離席により消灯制御が有効に動作していると言える。

4.2.2 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図 8 に示す。図 8 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 [8]、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。18 時 30 分より、従来システムの消費電力が 0% となっているのは、全ユーザが離席し、壁に設置してある照明の電源スイッチにより消灯したためである。図 8 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

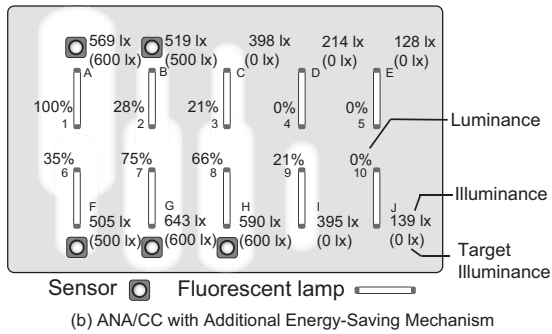
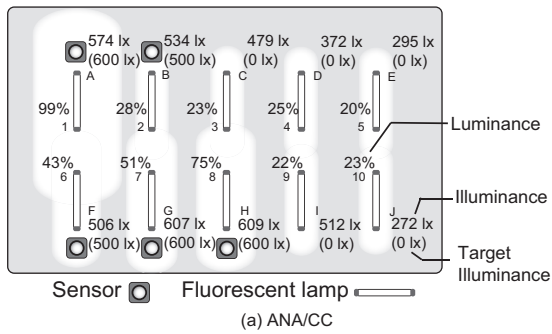


図7 点灯状態

Fig.7 Luminance(Effect of the additional energy-saving mechanism)

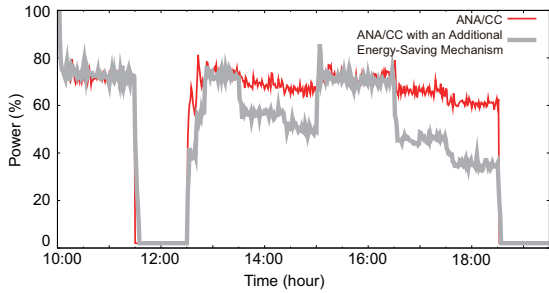
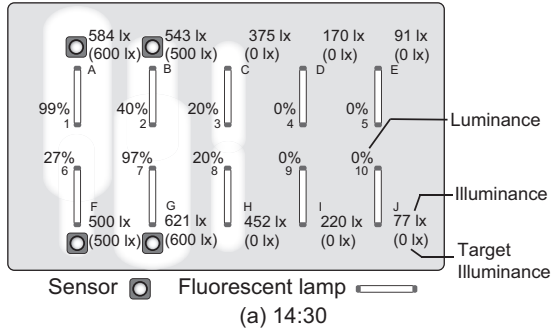


図8 消費電力量の推移

Fig.8 History of electric power

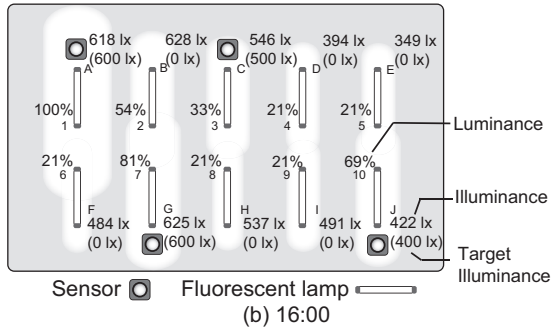
時から 16 時では、両システムにおいて消費電力量は同一であった。これは、提案システムにおいて、離席者のパターンによって照明が消灯しなかったためである。離席パターンによる省エネルギー性の違いについては、4.2.3 項に述べる。消費電力量は従来の知的照明システムと比較して、一日の合計で約 13%の削減が可能となった。この結果から、消灯メカニズムを用いることで、さらなる省エネルギー性を実現でき、提案システムが有効であると言える。

Electric power : 49.2%



(a) 14:30

Electric power : 72.6%



(b) 16:00

図9 在席者の配置の違いによる点灯状態

Fig.9 Luminance(Effect of the location of seat occupancy)

4.2.3 離席パターンによる省エネルギー性の検証

提案システムにおける離席パターンによる省エネルギー性について検証する。図9にユーザ在席率40%の各照明の点灯光度 [%] および各照度センサの照度および、そのときの消費電力量を示す。図9(a)では被験者C, D, E, H, I, およびJが離席し、(b)では被験者B, D, E, F, H, およびIが離席している。

図9より両パターンにおいて、各被験者の目標照度を満たしていることがわかる。しかしながら、図9(a)では消灯している照明は照明4, 5, 9および10の4灯あるのに対して、図9(b)では消灯している照明は存在しない。この差は、図9(a)では離席したユーザが集中して配置しているのに対して、図9(b)では離席したユーザが分散して配置しているためである。在席者が分散していることで、影響する照明が分散し、消灯した照明がなかった。これにより、図9(a)での離席パターンでは、49.2%の消費電力であるのに対して、図9(b)での離席パターンでは、72.6%となった。同じ在席率である場合でも、離席パターンにより消費電力量が約23%異なることが分かった。

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の方式を改良し、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照明の光度を常にランダムに増減することで、制御に必要なパラメータを動的に学習しつつ、照明の制御を行っている。このため、照明は最小点灯光度以上で点灯することが不可欠であり、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高い省エネルギー性を実現することを確認した。

謝辞 この研究は NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）研究開発プロジェクト名「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。

文 献

- [1] 財団法人省エネルギーセンター. <http://www.eccj.or.jp/officebldg/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] Fumiya Kaku, Mitsunori Miki, Tomoyuki Hiroyasu, Masato Yoshimi, Shingo Tanaka, Takeshi Nishida, Naoto Kida, Masatoshi Akita, Junichi Tanisawa, Tatsuo 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] 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の変動知覚に関する研究, 照明学会誌, Vol.85 No.5, pp.346-351, 2001
- [6] 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
- [7] Shingo Tanaka, Mitsunori Miki, Tomoyuki Hiroyasu, Mitsuharu 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

- [8] 照明学会, 照明ハンドブック. 第2版. オーム社. 2003
(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)



三木 光範 (正員)

1950 年生. 1978 年大阪市立大学大学院工学研究科博士課程終了, 工学博士. 大阪市立工業研究所研究員, 金沢工業大学助教授を経て 1987 年大阪府立大学工学部航空宇宙工学科助教授, 1994 年同志社大学工学部教授. 研究分野はシステム工学, 最適化, 並列処理など. 最近は並列処理と最適化を組み合わせた技術をオフィス照明の分野に展開し, 知的照明システムを研究・開発している. 著書は「工学問題を解決する適応化・知能化・最適化法」(技法堂出版) 等多数. IEEE, 情報処理学会, 人工知能学会, システム制御情報学会, 日本機械学会, 計算工学会等各会員. 超並列計算研究会代表. 経済産業省産業技術審議委員など歴任. 知的オフィス環境コンソーシアム会長. NEDO 技術開発機構「省エネルギー照明システムの研究開発」プロジェクトリーダー.



米本 洋幸

現在, 株式会社 NTT データ. 2012 年, 同大学大学院工学研究科修士課程終了. 知的照明システムにおける新たな制御アルゴリズム等の研究に従事.



小野 景子

2003 年同志社大学大学院工学研究科修士課程修了. 2007 年同志社大学大学院工学研究科博士課程修了. 博士(工学). 2009 年同志社大学研究開発推進機構省エネルギー照明システム研究センター特定任用研究員(助教). 2010 年龍谷大学理工学部電子情報学助教授. 並列処理, 最適設計, 進化計算等の研究に従事. 情報処理学会, 電気学会, 進化計算学会, 建築学会会員



長野 正嗣

2011 年, 同志社大学工学部インテリジェント情報工学科卒. 同年, 同大学院工学研究科修士課程入学. 知的照明システムにおけるワイヤレス照度センサを用いた制御アルゴリズムの研究に従事.

Abstract We propose the additional energy-saving mechanism in the Intelligent Lighting System. In the case of no user, it turns off the unnecessary lights and, in the case of user, 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, Office Environment, Lighting Control, Intelligent, Optimization