

# Energy Saving of an Intelligent Lighting System in Real Office and Verification of Presence Management using Web UI

Mitsunori MIKI\*, Hisanori IKEGAMI\*\*, Sho KUWAJIMA\*\*, Yohei AZUMA\*\*, Hiromitsu NAKABAYASHI\*\*, Shohei FUJIMOTO\*\*, Takeshi TANIGUCHI\*\* and Hiroto AIDA\*

(Received January 20, 2014)

We research and develop an intelligent lighting system to improve office workers comfort and to reduce the power consumption. We introduced the Intelligent Lighting System to the real office. In this paper, we report the Intelligent Lighting System in the real office using WebUI for worker's presence information. We show that the Intelligent Lighting System can reduce electric power consumption drastically. And we report a problem in validation experiments in an office, as only some workers enter presence information, unnecessary lights keep lighting. We are considering to improve entry presence information.

**Key words :** intelligent lighting system, office

**キーワード :** 知的照明システム, オフィス

## 実オフィスにおける知的照明システムの目標照度実現性と WebUIによる在席管理の検証

三木光範, 池上久典, 桑島奨, 東陽平, 中林弘光, 藤本祥平, 谷口武, 間博人

### 1. 序論

地球温暖化防止が世界の重要な課題として取り上げられ、我が国においてもエネルギー使用量を大幅に削減することは、緊急の課題として取り組まれている。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、照明に対する省エネルギー対策は重要な課題である。

また、オフィス環境がオフィスワーカの生産性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で、ワーカの生産性が向上することが報告されている<sup>1,2)</sup>。特に、オフィス環境のうち照明環境に着目した研究では、執務に最適な明るさ(照度)を個人ごとに提供することがオフィス環境の

\* 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:+81-774-65-6930, Fax:+81-774-65-6716, E-mail:hikegami@mikilab.doshisha.ac.jp

改善に有効であることが言及されている<sup>3)</sup>。このように執務に最適な明るさを個人ごとに提供することは、タスク照明を用いることで容易に実現可能である。しかしながら、現在のオフィスでは、フロアに均一な明るさを提供する天井照明が一般的であり、タスク照明を採用することは容易ではない。この為、既存の天井照明を用いて、個人ごとに最適な明るさを提供する照明システムが必要となる。このような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<sup>4,5)</sup>。

知的照明システムは、任意の場所に任意の明るさを提供することで、ワーカの知的生産性の向上や消費電力量の削減を実現するシステムである。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することで構成される。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、自律分散最適化アルゴリズムを用いて、目標照度を実現しつつ低消費電力となる最適な点灯パターンを実現する。

知的照明システムは、実験室での検証<sup>5)</sup>の後、実際のオフィスへ導入を行い、その有効性を検証している。本稿では実オフィスに導入した知的照明システムの目標照度実現性と実オフィス運用における課題について報告する。知的照明システムでは、目標照度を実現するために、各ユーザはWebユーザインターフェース（以後、Web UIとする）を用いて設定を行う。各ユーザの設定照度は、個人ごとに大きく異なるが、各ユーザの目標とする照度を実現する。各ユーザの目標照度は、オフィスの基準照度である750 lxよりも低く設定された。その結果、実現される照度の平均値は大きく減少し、消費電力も大きく減少する。また、ユーザの離席や退社によって、明るさが不要な場所に位置する照明が消灯を行うことで、さらに高い省エネルギー性の実現を行う。

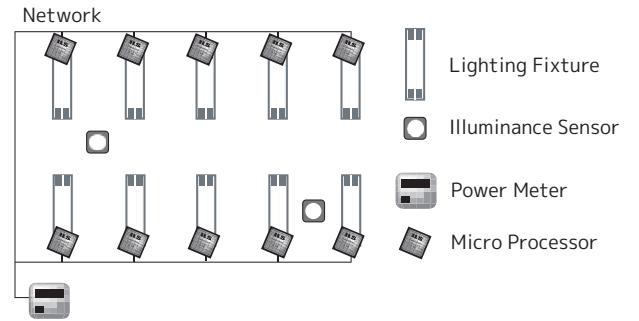


Fig. 1. Configuration of the intelligent lighting system.

## 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（照度）を提供する照明制御システムである。調光が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。知的照明システムは、要求照度を満たす最適な点灯パターンを実現するために、この問題を最適化問題として定義する。照度情報および消費電力量情報をフィードバックしながら、進化的アルゴリズムに基づく最適化手法を用いて、制御装置が照明の明るさ（光度）を制御する。これにより、ユーザが要求する明るさを実現し、不必要的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各照明が自律的に求める。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 eq.(1) に示す。

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

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

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

$i$  : 照明 ID,  $j$  : センサ ID,  $w$  : 重み [ $W/lx^2$ ],  $P$  : 消費電力量 [ $W$ ],  $Ic$  : 現在の照度 [ $lx$ ]

$It$  : 目標照度 [ $lx$ ],  $T$  : 閾値,  $r_{ij}$  : 照明  $i$  に対する照度

センサ  $j$  の回帰係数

eq.(1) に示すように目的関数  $f_i$  は、消費電力量  $P$ 、および照度センサ  $j$  の目標照度に関する制約を表すペナルティ項  $g_{ij}$  からなる。ペナルティ項  $g_{ij}$  には、現在照度と目標照度との差を用いており、目標照度が満たされない場合にのみペナルティを掛けている。これにより、目標照度と現在照度が離れるほど、目的関数値が大きく増加する。また、各照明の光度変化量と照度センサで測定された照度変化量から算出した回帰係数がある程度小さい（閾値  $T$  未満）場合には 0 を乗算する。つまり、回帰係数の低い照度センサが目標を満たさない場合には、目的関数値が増加しない。ゆえに、回帰係数の高い、すなわちその照明が影響を与える照度センサにのみ最適化の対象を絞ることができる。これにより、目標照度を満たす精度が向上する。

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

著者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回帰係数を用いた適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient : ANA/RC)<sup>6)</sup> を提案した。ANA/RC では、各照明の光度変化量と照度センサで測定された照度変化量から算出した回帰係数を用いて、照明の光度が各照度センサの照度に影響を与える度合い（以下、影響度とする）を学習し、状況に応じた近傍設計に基づく光度変化をさせることで、最適な光度へと素早く変化させることができる。回帰係数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、回帰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。2.5 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回帰係数を計算する
7. 目的関数値が改良した場合、その光度を確定する
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する
9. 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、消灯を行い、項目 2 へ戻る
10. 照明が消灯しており、消灯時に影響があった照度センサに 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い、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、照度センサから遠い位置にある照明は、光度を抑えることで、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、ユーザが離席しており、明るさが不必要的場所に位置する照明は消灯を行うことで、さらに高い省エネルギー性を実現する。

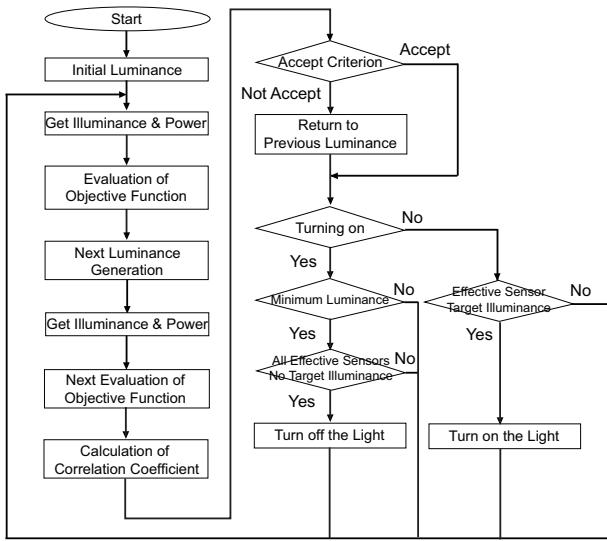


Fig. 2. Control algorithm.

## 2.4 回帰分析による影響度把握

知的照明システムは個別照度環境を提供することで、省電力な状態を素早く実現する。このため、照明が照度センサに及ぼす影響度を把握することは重要である。なぜなら、影響度を把握することで、照明が大きな影響を与える照度センサにのみ、最適化の対象を絞ることができるためである。

ANA/RCでは、回帰分析を用いて照明が照度センサに及ぼす影響度を把握する。回帰分析は、説明変数を変化させた際に観測値がどのように変化するかという2変数間の因果関係を定式化する手法である。この因果関係は、eq.(2)に示す説明変数 $x_i$ と観測値 $y_j$ の関係式により明示できる。

$$y_j = r_{ij} \times x_i + \beta \quad (2)$$

$y$  : 観測値,  $x$  : 説明変数,  $r$  : 回帰係数  $\beta$  : 定数項

eq.(2)に示すように、回帰係数 $r_{ij}$ の大きさによって因果関係が数値化される。ANA/RCでは探索の1試行における照明の光度変化量を説明変数 $x_i$ 、照度センサの照度変化量を観測値 $y_j$ として回帰分析を行う。回帰分析の手法には最小二乗法を用いる。

## 2.5 近傍設計

ANA/RCでは、解の探索過程において局所最適解に陥らないために、すべての照明において同一の近傍

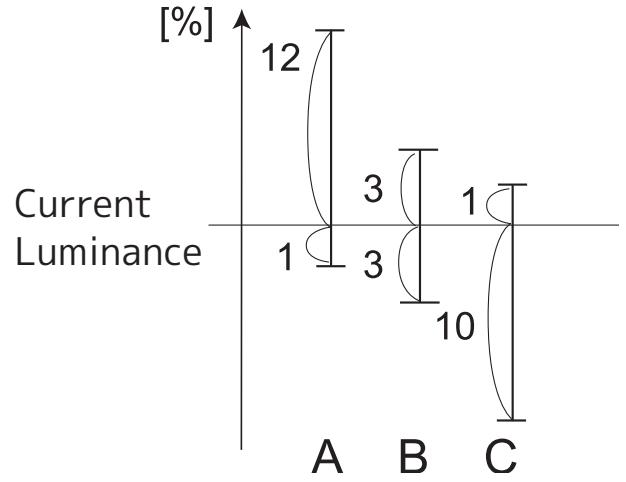


Fig. 3. Design of neighborhood luminous intensity change rate.

を用いているのではなく、状況に応じて複数の近傍を使い分けている。具体的には、Fig. 3に示すように、現在の光度値の-1%から12%までの範囲で次光度を生成する増光近傍(A), -3%から3%までの中立近傍(B), および-10%から1%までの減光近傍(C)の3種類の近傍を用いている。なお、これらの近傍幅は構築する環境に応じて適切な値となるようチューニングする必要があり、構築する環境ごとに予備実験が必要である。

以上の3種類の近傍を、eq.(3)に基づいて決定する。

$$N_{ij} = \begin{cases} A & r_{ij} \geq T \text{ and } Ic_i < It_j \\ B & r_{ij} \geq T \text{ and } Ic_i \geq It_j \\ C & r_{ij} < T \end{cases} \quad (3)$$

$N_{ij}$  : 照度センサ $j$ による照明 $i$ の近傍

$T$  : 閾値, A : 増光近傍, B : 中立近傍, C : 減光近傍

$r_{ij}$  : 照明 $i$ に対する照度センサ $j$ の回帰係数

$Ic$  : 現在照度,  $It$  : 目標照度

eq.(3)に示すように、2.4節で述べた回帰係数が近傍決定において重要なパラメータとなる。なぜなら照明が照度センサに及ぼす影響度を回帰係数が表しているためである。照度センサが目標照度を満たしていない場合、その照度センサに与える影響が大きい照明に増光近傍を設定し、照明が増光しやすくする。逆に、

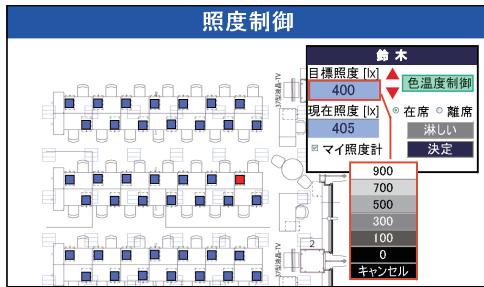


Fig. 4. User interface of the intelligent lighting system.

全ての照度センサに対して与える影響が小さい照明には減光近傍を設定することで、照明が減光しやすくし、消費電力量の削減を図る。以上の近傍設計によって、局所最適解に陥りにくくなるだけではなく、迅速に目標照度を実現することが可能となる。閾値  $T$  は eq.(1) のものと同じ値である。

なお、照明は各照度センサに対して、独立して近傍決定を行う。つまり、1つの照明器具につき、照度センサごとに異なる近傍が定まる。これらのうち、最も増光傾向の高い近傍を、その照明器具の近傍とする。すなわち、増光近傍 (A)、中立近傍 (B)、減光近傍 (C) の順に近傍の優先順位が高い。

## 2.6 Web ユーザインターフェース

知的照明システムでは、目標照度の設定ならびに、在席・離席情報の入力を各ユーザが Web ユーザインターフェース（以下、Web UI とする）を用いて行う。Fig. 4 に知的照明システムのユーザインターフェースを示す。

各ユーザは自席に着席時に、Fig. 4 の座席位置を表示したユーザインターフェースにアクセスすることで座席配置図が表示される。その中から、自席を選択することで、選択した座席が赤色となると同時に、個人ごとのページが表示される。表示された個人ページから目標照度や在席情報の入力を行う。目標照度の設定は、目標照度設定欄をクリックすることで 200 lx 毎に設定することが可能である。また、微調整を行う場合は、目標照度設定欄横のボタンをクリックすることで、50 lx 毎の設定も可能である。在席・離席ボタン



Fig. 5. LED lighting.

にチェックを入れることで、在席・離席情報の入力をを行う。在席ボタンにチェックを入れると、入力された目標照度が設定される。また、離席ボタンにチェックを入れると、目標照度 0 lx が設定される。

## 3 実環境における知的照明システムの検証結果

### 3.1 構築システムの概要

知的照明システムは、これまでの研究室での検証実験により、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ことを確認している<sup>7)</sup>。しかし、実際のオフィスでは照明数やオフィスワーカ数が多く、照明や照度センサ数の増加によるシステムへの影響や長期運用に耐える耐久性など、実用化に向けて検証を行うべき課題は多い。そこで、我々は本システムを東京ビルディング（東京都千代田区）の三菱電機株式会社本社オフィスの一部に導入し、検証実験を行った。システムを 2009 年 12 月 20 日（日）に設置し、検証実験を 2010 年 1 月から 2011 年 3 月の期間に行った。

本検証実験は、三菱電機照明株式会社製のグリッド天井用 LED 照明器具 30 台、DeltaOHM 社製の照度センサ 42 台を用いて行った。Fig. 5 に使用した照明器具を、Fig. 6 に使用した照度センサを示す。各オフィスワーカのデスクに照度センサを設置し、目標照度の設定は各ユーザの PC から Web UI にアクセスし行った。初期導入時の照度センサを設置したデスクの状況を Fig. 7 に示す。また、照明配置を Fig. 8 に、照度センサ配置を Fig. 9 に示す。



Fig. 6. Illuminance sensor.

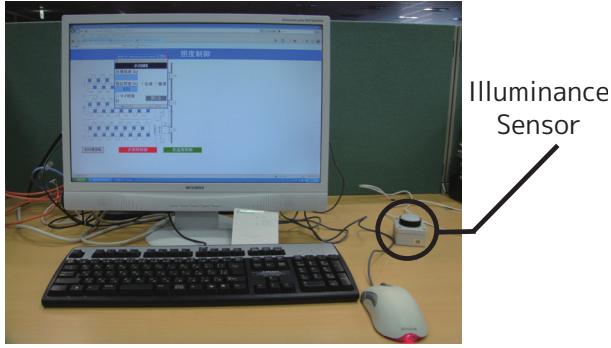


Fig. 7. Desk situation for an illuminance sensor.

### 3.2 システム構成

知的照明システムは、自律分散制御であるために、システムの制御形態として分散制御ならびに、集中制御のどちらもとることが可能である。既存ビルへの導入のため、照明ごとに制御装置を搭載することはコストの観点から容易ではない。そこで、本システムは集中制御方式を用いて構築を行った。

本システムの構成は、システム制御 PC1 台、照明器具 30 台、照明の明るさをコントロールするための調光制御器 6 台、照度センサ 42 台、集線装置 (64ch) 1 台、および A/D 変換機 1 台である。システム構成図を Fig. 10 に示す。

知的照明システムの制御には、各照度センサの照度情報ならびに消費電力量情報が必要である。照度情報の取得は、各照度センサを集線装置に集め、制御 PC に接続する。照度センサからの照度情報はアナログ信号で出力されるため、A/D 変換器を介してデジタル信号に変換し、制御 PC に送信を行う。また、消費電力量情報の取得は、電力量と照明の光度は比例関係にあるため、今回は照明の光度を基に推定を行った。予備実験で照明の光度と電力量の関係を調査し、光度より推定する電力量を照明台数分加算することで、全

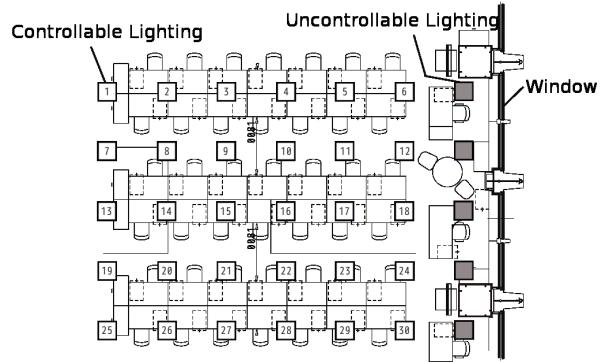


Fig. 8. Layout of lightings.

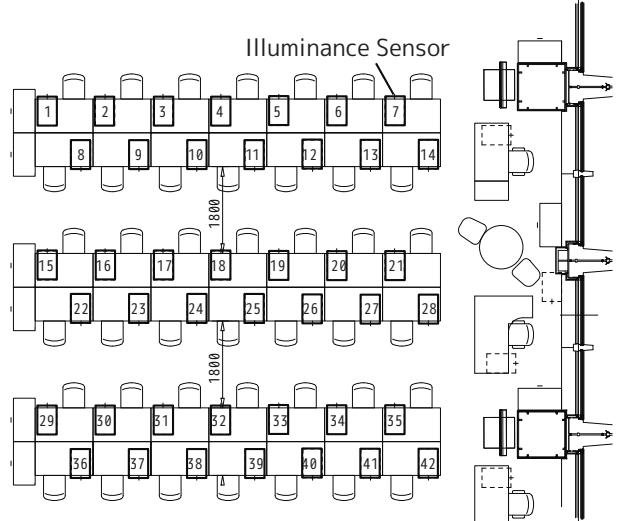


Fig. 9. Layout of illuminance sensors.

体の消費電力量を推定する。

### 3.3 実験結果および考察

本システムを約 1 年間に渡り稼働させ、様々な実験条件の基で検証を行った。検証の結果、目標照度を実現し、高い省エネルギー性を実現できることがわかった。2010 年 10 月 20 日 (木) における照度センサ 41 の照度履歴を Fig. 11 に、照度センサ 33 の照度履歴を Fig. 12 に示す。Fig. 11 ならびに Fig. 12 の横軸は時間、縦軸は照度値を示す。

Fig. 11 より、8 時頃や 16 時頃にユーザが在席情報の入力を行うことで、設定された目標照度を満たしていることがわかる。このことより、ユーザの要求に応じて、照度を実現できていることがわかる。一方で、Fig. 12 より、常に在席状態のままであるユーザが存

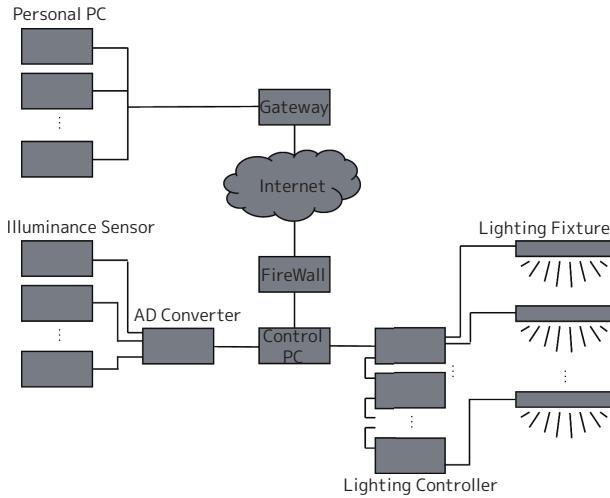


Fig. 10. Configuration of the introduced system.

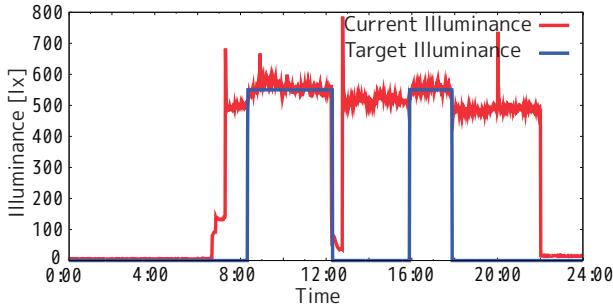


Fig. 11. History of illuminance on sensor 41.

在することができた。このことより、Web UI を用いた在席・離席情報の入力が正しく行われていない現状がわかった。

次に、2010 年 10 月 20 日（木）の 1 日間で、Web UI を用いて在席情報を入力していたユーザ数の推移を Fig. 13 に、2010 年 10 月の 1 ヶ月間に Web UI を用いて在席・離席状態の入力を行ったユーザ数を Fig. 14 に示す。Fig. 13 の横軸は時間、縦軸は在席状況人数を示し、Fig. 14 の横軸は日付、縦軸は Web UI 使用者数を示す。

Fig. 13 より、早朝や深夜の時間帯に在席情報の入力が行われていないことより、20 名程度のユーザは常に在席状態のままであることが分かる。また、Fig. 14 より、10 月の 1 ヶ月間（土・日・祝日は除く）の平均で、Web UI を用いて在席入力のみを行ったユーザは 5 名、離席入力のみを行ったユーザは 4.65 名、在席・離席の両方の入力を行ったユーザは 3.85 名であった。このことより、全ユーザの約 1 割のみしか在席・

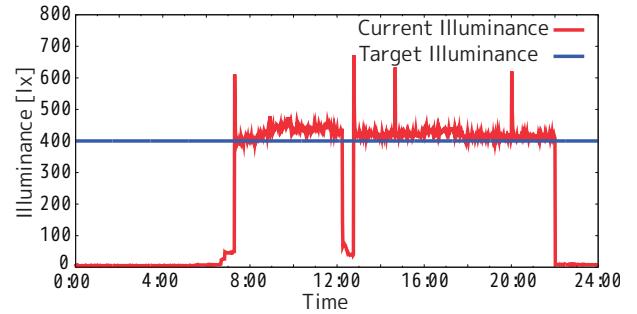


Fig. 12. History of illuminance on sensor 33.

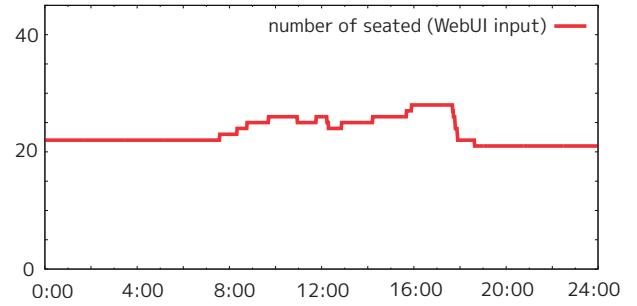


Fig. 13. People who input their seated information (2010/10/20).

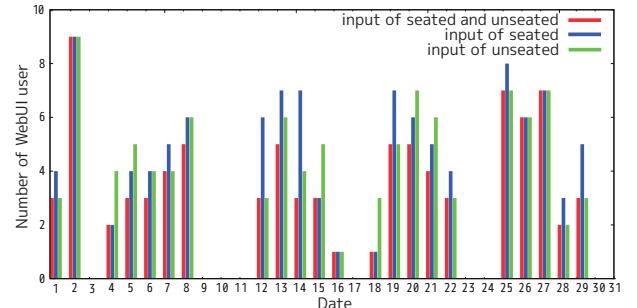


Fig. 14. People who input their seated information (2010/10).

離席に応じて、在席状態の入力を行っていないことがわかった。

実際はユーザが離席や退社によって、不在となり明るさが不要となった場所においても、不必要的照明が点灯していると言える。そういうことから、省エネルギーの観点から改善するべきであり、ユーザの在席・離席情報の入力状況の改善は重要な課題である。

#### 4. 結論

我々はオフィスにおける執務者の快適性向上と照明の消費電力の削減を両立する知的照明システムの研究・開発を行なっている。実際のオフィスに導入した

結果、各執務者に個別照度環境を提供することによって、執務快適性の向上と大幅な消費電力の削減を実現した。本稿では実オフィスに導入した知的照明システムの目標照度実現性と実オフィス運用における課題を報告した。実オフィスの検証実験によって、WebUIを用いる在離席判定では、一部のユーザしか在離席情報を入力していないことがわかった。在離席情報を正確に取得することで、知的照明システムの省エネルギー性能を更に向上させることができる。現在はオフィスの社員証に多く使用される非接触ICカードを用いて、在席・離席情報の入力を実現する知的照明システムを考えている。

本研究の一部は、同志社大学理物理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) 大林史明, 富田和宏, 服部瑠子, 河内美佐, 下田宏, 石井裕剛, 寺野真明, 吉川榮和, “オフィスワーカ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, [1322], 151-156(2006).
- 2) 西原直枝, 田辺新一, “中程度の高温環境下における知的生産性に関する被験者実験”, 日本建築学会環境系論文集, [568], 33-39(2003).
- 3) Peter R. Boyce, Neil H. Eklund, S. Noel Simpson, “Individual Lighting Control: Task Performance”, Mood and Illuminance JOURNAL of the Illuminating Engineering Society, 131-142(2000).
- 4) M.Miki, T.Hiroyasu, K.Imazato, “Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness”, Proc. CIS, 520-525(2004).
- 5) 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], 399-410(2007).
- 6) S.Tanaka, M.Miki, T.Hiroyasu, M.Yoshikata, “An Evolutional Optimization Algorithm to Provide Individual Illuminance in Workplaces”, Proc IEEE Int Conf Syst Man Cybren, 2, 941-947(2009).
- 7) 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, 130[5], 750-757(2010).