

An Intelligent Lighting System to Provide Individual Lighting using the Estimation of Daylight

Mitsunori MIKI* , Takuro YOSHII** and Hisanori IKEGAMI***

(Received January 15, 2013)

When we introduced a lighting system to realize individual lighting environments into real office, difficulties arose in placing illuminance sensors on users' workplaces. This study hence proposes a new approach to control a lighting system intended to realize individual lighting environments without placing illuminance sensors on users' workplaces. This system uses illuminance sensors for measuring not the illuminance on workplaces but that of daylight: it optimizes lighting based on simulations for different luminous intensities of lighting and patterns of daylight illuminance distribution which are estimated from measurements by daylight illuminance sensors. An experiment to converge illuminance at target positions into target illuminance levels was conducted in a setting with 15 fluorescent lights and 9 illuminance sensors, which was intended to simulate a real office. The result indicated that such a system can realize illuminance levels required by individual users with minimum power consumption responding to changing daylight conditions.

Key words : daylight, lighting control, illuminance

キーワード : 外光, 照明制御, 照度

外光の推定を基に個別照度を実現する知的照明システム

三木光範, 吉井拓郎, 池上久典

1. まえがき

著者らは、天井照明だけを用いて任意の場所にユーザの要求する明るさを提供する知的照明システムを提案している¹⁾。知的照明システムは照明器具、照明制御装置、照度センサ、および電力計から構成される。知的照明システムでは、各ユーザが机上面に設置され

た自身の照度センサに要求照度を設定することで、その照度を実現し、かつ電力が最小となる点灯パターンを最適化手法を用いて実現することができる。

現在、著者らは知的照明システムの実用化に向け、東京や福岡のいくつかオフィスにおいて、実環境における検証実験を行っている²⁾。この検証実験より、ユー

* 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 Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone:+81-774-65-6924, E-mail:tyoshii@mikilab.doshisha.ac.jp

*** Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone:+81-774-65-6924, E-mail:hikegami@mikilab.doshisha.ac.jp

ザの机上面には書類が多く、照度センサを設置することが容易ではない状況が存在することがわかった。そこで、本研究では照度センサをパーティションの上など容易に設置できる場所に設置し、ユーザの指定した場所に個別照度環境を実現する新たな知的照明システムの制御手法を提案する。この制御手法はシミュレータを用いて机上面の照度を推定することで、机上面に照度センサを設置しなくとも、各ユーザの要求する照度を実現することができる。本稿では、提案システムを構築し、実オフィスを模擬した環境下において動作実験を行う。

2. 知的照明システム

2.1 知的照明システムの構成

知的照明システムは、照明器具、照明制御装置、移動可能な照度センサ、および電力計を1つのネットワークに接続することで構成される。各照明の光度を変化させることによってユーザの要求照度を提供し、かつ省電力な状況を実現するシステムである。各照明器具には学習判断をする制御装置が備えられているため、自律的に動作することが可能である。Fig. 1 に知的照明システムの構成を示す。

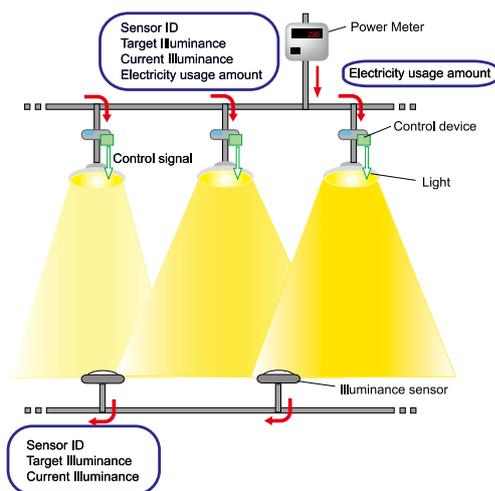


Fig. 1. Configuration of Intelligent Lighting System.

学習判断を行う各照明制御装置は他の照明制御装置からの情報を得ることなく、照度センサから得られる

照度情報、および電力系から得られる電力情報に基づき、自身の動作に対する有効性を検証する。その後、知的照明システム全体で照度の制約条件を満たしつつ、使用電力量の最小化を行う。

2.2 回帰分析を用いた適応的近傍アルゴリズム

知的照明システムでは、照明制御アルゴリズムの違いによって、要求照度への収束速度や、精度は大きく異なる。知的照明システムにおける制御は、Simulated Annealing (SA) を照明制御用に改良したアルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient : ANA/RC) ³⁾ を用いている。

ANA/RC では、設計変数を各照明の光度とし、照度を要求照度以上にするという照度制約の下、消費電力量を最小にする。さらに回帰分析によって、各照明が各照度センサに与える影響を学習し、それらに応じて光度を変化させることで、最適な光度へ迅速に変化させることができる。ANA/RC の制御の流れを以下に示す。

1. 初期光度で点灯する
2. 現在光度における照度情報 (要求照度, 現在照度) および消費電力量を取得する
3. 現在光度における目的関数値を計算する
4. 次光度を生成し、次光度で点灯する
5. 次光度における照度情報および消費電力量を取得する
6. 各照度センサは照度情報を、電力計は消費電力量をネットワークに送信する
7. 各照明は項目 6. の情報を取得し、次光度における目的関数の評価を行う
8. 回帰分析を行い、影響度を推定する
9. 目的関数の評価値が改良された場合は次光度を受け取り、そうでない場合は元の光度に戻す
10. 項目 2. から項目 9. を光度値の 1 回の探索とし、繰り返す

以上の項目 2. から項目 9. を探索の 1 ステップ (約 2 秒) とし, この処理を繰り返すことによって照明が各照度センサに与える影響を把握し, 最小の消費電力で要求照度を実現する. また, ANA/RC では項目 8. で求める影響度を用いて, 評価および次光度の生成を行うことで, 素早く最適な光度へと変化することができる.

次に, 本アルゴリズムに用いる目的関数について説明する. 知的照明システムの目的は各ユーザの要求照度を実現し, 消費電力を最小にすることである. このため, 各照明制御装置は自身の光度を最適化する最適化問題として捉える. そこで, 各照明制御装置は自身の光度を設計変数とし, ユーザの要求照度という制約条件の下, 消費電力を最小化する最適化問題を解く. そのための目的関数を式 (1) のように設定する.

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

$$g_i = \begin{cases} (It_i - Ic_i)^2 & I_* \leq |It_i - Ic_i| \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

P : 消費電力量, w : 重み, n : ユーザ数

Ic : 現在照度, It : 要求照度, I_* : 照度差に関する閾値

目的関数は消費電力量 P と照度制約 g_j からなる. また, 重み w を変化させることで電力と照度の優先度を変化させることができる. 照度制約は現在照度と要求照度の差をある閾値以内とすることから式 (2) のように与える. 照度差に関する閾値 I_* は最小知覚変動比⁸⁾を基に, 現在照度が要求照度の +6% から -8% の範囲内となるように設定する.

3. 実オフィスにおける検証実験

2009 年 4 月から, 東京や博多のオフィスにおいて, 知的照明システムの実証実験を行っている.

三菱地所株式会社エコツツェリア (東京都千代田区新丸の内ビルディング) における知的照明システムの導入状況を Fig. 2 に示す. 知的照明システムはこのように, 照度センサを机上面に設置し, ユーザは要求

照度を入力する. これにより, 前章で述べた照明制御アルゴリズムに基づいて, ユーザの机上面に目標となる明るさを実現することができる.



Fig. 2. An experimental intelligent lighting system in a real office.

しかし, 実証実験の結果, 一部のオフィスでは机上面に書類が多く, ユーザの机上面に照度センサを設置することが容易ではない状況が存在した. このような場合, 照度センサは机上面の隅やパーティションの上に置かれており, ユーザの要求照度と机上面の照度が異なっていた. 照度センサがパーティション上に置かれている状況を Fig. 3 に示す.



Fig. 3. A situation prohibiting the placement of an illuminance sensor on the workplane (example).

知的照明システムでは, 照度センサの置かれた場所

が要求照度となるように最適制御を行う。このような位置に照度センサを置くと、ユーザの机上面に要求照度を実現することができない。また、机上面に照度センサが置かれていた場合においても、書類などで照度センサの受光部が隠れることで、知的照明システムの制御ができなくなる。

これら問題を解決するため、照度センサを机上面ではなくパーティションの上など容易に設置できる場所に設置し、個別照度環境を実現する新たな照明制御アルゴリズムを提案する。

4. 外光の推定に基づく照明の最適制御

4.1 提案手法の基本原則

前章で述べたように、実際のオフィスではユーザの机上面に照度センサを設置することが容易ではない状況が存在した。そこで、ユーザの机上面に照度センサを設置せず、ユーザの指定した場所に要求照度を省エネルギーな点灯パターンで実現する新たな制御アルゴリズムを提案する。

ユーザの指定した場所において要求照度を省電力で実現するために、式 (1) に示す目的関数をシミュレーションによって最小化する。これにより、最適な点灯パターンを決定し、各照明をその光度で点灯する。また、照度センサをパーティションの上などの設置が容易である場所に設置し、計測した照度分布を基にユーザの指定する場所の外光を推定することで、シミュレーションの精度を高める。

本提案手法は照明と照度センサ、および集中制御機器から構成される。そして、消費電力は各照明の光度和として置き換えるため、電力計を用いる必要はない。また、これまでの知的照明システムとは異なり、各照明に制御装置を搭載する分散制御形態をとることはできず、集中制御機器を用いて制御を行う。提案システムの概要を Fig. 4 に示す。なお、Fig. 4 はシステムを部屋の上から見た図である。

4.2 提案手法

式 (1) に示す目的関数をシミュレーションによって最小化するため、ユーザの指定する場所の現在照度

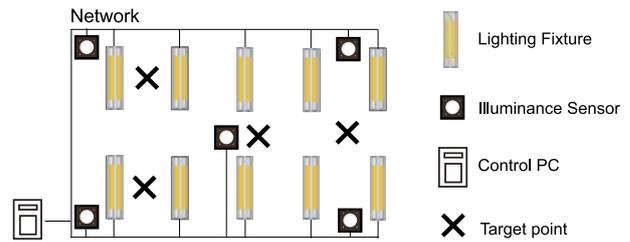


Fig. 4. Illustrative configuration of the proposed system.

I_c , および消費電力量 P を推定する必要がある。

消費電力は各照明の光度と比例していることから、消費電力量 P を各照明の光度和として置き換え、シミュレーションに用いる。次に、ユーザの指定する場所の現在照度 I_c は、式 (3) に示すように各照明光による照度 (照明照度) と窓から入る外光 (外光照度) の和である。照明照度は 4.3 節で述べる照度シミュレータを用いて照度を算出し、外光照度についても、4.4 節で述べる手法を用いて時々刻々と変化する外光を推定する。

$$I_c = I_a + I_e \quad (3)$$

I_c : 要求照度, I_a : 照明光による照度 (照明照度)

I_e : 外光による照度 (外光照度)

以上により、式 (1) をシミュレーションで最小化することができる。本提案手法の制御の流れを以下に示す。なお、照度センサの設置位置および要求照度設定位置は初期値として与える。

1. 要求照度設定位置に要求照度を実現し、かつ消費電力が最小となる各照明の最適光度を式 (1) を基に求め、その光度で各照明を点灯する (外光による照度を 0 lx とする)
2. 各照度センサから照度データを取得する
3. 照度シミュレータにより求めた照度センサ設置場所における照明照度と計測された照度の差を求め、これが外光照度となる

4. 得られた外光照度を基に部屋全体の外光分布を推定し、要求照度設定位置の外光照度を求める
5. 要求照度設定位置における要求照度から、その場所の外光照度を差し引いた照度を要求照度とする
6. 式 (1) に示す目的関数をシミュレーションによって最小化し、その光度で点灯する
7. 項目 2) から 項目 5) を繰り返す

これにより、机上面に照度センサを設置せず、従来の知的照明システムと同様に外光の変化に対応しつつ、省エネルギーな点灯パターンで要求照度を達成することができる。

4.3 照度シミュレータ

ある部屋の任意の位置における照度計算手法についてはこれまで逐点法や光束法、モンテカルロ法を用いた照度計算など様々な手法が研究されている⁴⁾。しかし、これらの手法で精度を高める際には、照明器具の光束、保守率、配光曲線や部屋の壁の反射率など様々なパラメータを設定する必要があり、一般的には実際の環境でこのようなパラメータの値を得ることは容易ではない。

そこで、本提案手法では条件を限定することで、簡易な手法で精度の高いシミュレーションを行う。ユーザが照度を要求する位置は固定された机上面であるため、任意の位置ではなく特定の位置における照度シミュレーションを行うことを考える。本提案手法では、各照明がある点灯光度で点灯した際に特定の場所に及ぼす照度を計測することで、その場所に及ぼす照明の影響度係数を記録する。この影響度係数を用いることで、前述したパラメータを考慮することなく、ある位置における照度を高精度でシミュレートすることが可能である。各照明の任意の点灯状況における特定の場所の照度を以下の式 (4) を用いて算出する。

$$I = \sum_{i=1}^n R_i \times L_i \quad (4)$$

I : 特定の場所の照度 (照明照度), R_i : 影響度係数

L_i : 光度, n : 照明数

この手法を用いることで、照度センサを設置した場所では、計測照度から照明照度の差をとることにより、照明を消灯しなくても外光照度を算出できる。

4.4 外光シミュレータ

本提案手法では、ユーザの指定する場所の外光照度を推定する必要がある。これまでに、外光分布を求める手法は数多く研究されており、これらの手法は太陽の位置や雲量、窓材料の透過率などから外光分布を求めることが可能である^{5, 6)}。しかし、これらの手法はブラインドのない状態を想定していたり、ブラインドを想定した場合にはブラインドによる影響を細かく与える必要がある。また、リアルタイムな天候の変化による外光照度の変化を求めることができない。

そこで、照度センサの設置が容易である場所に設置し、計測照度から照明照度を差し引いた外光照度を基に、最小二乗法を用いて外光分布関数を推定する。

Fig. 5 のように実験環境に 39 台の照度センサを設置し、外光分布を計測する実験を行った。様々な天候や時間帯の外光計測データを基に、室内における外光分布モデル式の導出を行った。

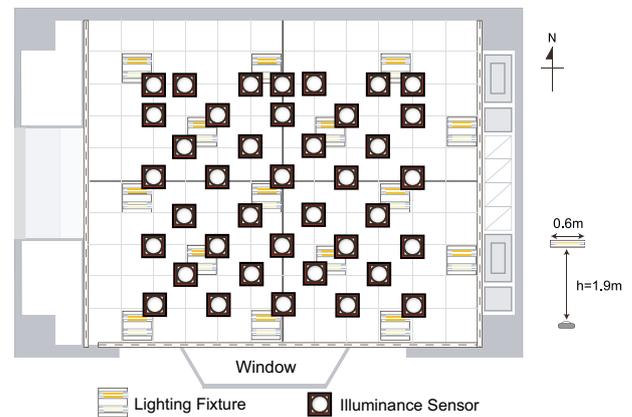


Fig. 5. Light from outside measurement system.

多くのモデル式を試行錯誤し、室内の外光分布に最もよくあてはまるモデル式を導出した。本実験環境下で用いるモデル式を式 (5) に示す。なお、ここで示す式 (5) は、5.1 節で示す Fig. 6 の照度センサの配置を基に決定したモデル式である。

$$z = \beta_0 + \beta_1 x^4 y^3 + \beta_2 x^3 y^4 + \beta_3 x^3 y^2 + \beta_4 x^2 y^4 + \beta_5 x y^3 + \beta_6 x y^2 + \beta_7 y \quad (5)$$

x, y : 部屋の位置座標, z : その位置における外光照度

照度センサが設置されている場所の計測照度から照明照度を差し引いた外光照度から, 最小二乗法を用いて式 (5) に示す係数を決定し, 任意の位置の外光照度を推定する. このモデル式を用いることで, 時々刻々と変化する外光照度を高精度で推定することができる.

5. 動作実験

5.1 動作実験の概要

提案手法の有効性を検証するため, 動作実験を行った. 実験は 2011 年の 4 月 6 日, 晴れの日 7 時から 19 時まで合計 12 時間, オフィスを模擬した実環境にシステムを構築し, 動作実験を行う.

実験環境は照度センサ 9 台, およびユーザ数 4 名を想定して要求照度地点を Fig. 6 に示すように配置する. 要求照度地点 A, B, C, および D とし, 要求照度を A は 400 lx, B は 500 lx, C は 600 lx, D は 700 lx とする. また, これらの地点には実験データ計測用照度センサを設置した. 実験中は外部視野の確保と採光を両立するため, ブラインドの角度を外向き 45° とした⁷⁾. そして, 照明は最小点灯光度 (401 cd) から最大点灯光度 (1336 cd) の間で調光可能な昼白色蛍光灯を使用する. なお, 照明の最小点灯光度時を 30% とし, 最大点灯光度時を 100% とした.

動作実験では, 30 秒ごとに要求照度地点の推定された外光照度を基に, 点灯パターンを変更する. そして, 各要求照度地点において要求照度を実現できているかを検証する. 照度値データは毎秒取得し, 正確な外光を計測するため 1 分ごとに 2 秒間照明を消灯する. ただし, この消灯は提案アルゴリズムが正しく動作しているか検証を行うためのものであり, 実オフィスにおいて提案アルゴリズムを用いる場合, 消灯は行わない.

本実験では最小知覚変動比⁸⁾を基に, 照度値が要

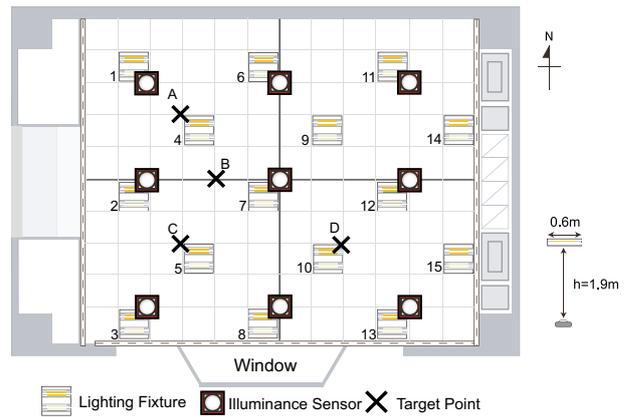


Fig. 6. Experimental environment.

求照度の +6% から -8% の範囲である際に, 要求照度を実現できていると定義する.

5.2 動作実験の結果および考察

要求照度地点 A, B, C, および D の照度履歴を Fig. 7 に示し, 1 分ごとに照明を消灯して計測した外光履歴を Fig. 8 に示す.

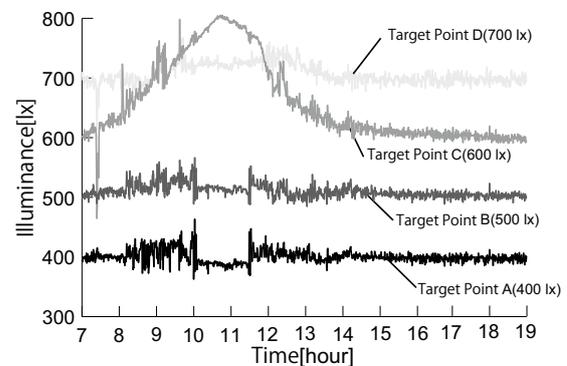


Fig. 7. History of the measured illuminance data.

Fig. 7 より, C 地点の 10 時から 12 時までの時間帯を除き, 各要求照度地点は 1 日を通して要求照度を実現できている. そこで, C 地点の要求照度が満たされていない時間帯において, 計測照度が要求照度よりも 100 lx 以上高くなっている原因を Fig. 8 の外光履歴より考察する.

Fig. 8 の 10 時頃から 12 時頃をみると, 外光照度が各要求照度地点において高かったことが分かる. 特に要求照度 600 lx である C 地点において, 10 時頃から

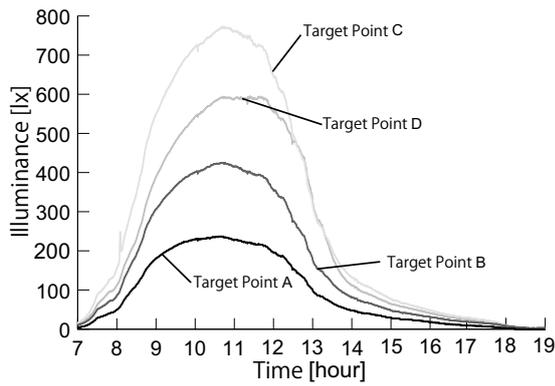


Fig. 8. History of the measured light from daylight data.

12 時頃には外光のみで 700 lx を超える照度となっており、要求照度を 100 lx 以上超える外光であった。この結果から、C 地点では外光照度が高い時間帯において、物理的に要求照度が実現不可能であったことが分かる。

次に、省エネルギー性について考察を行う。外光照度が最も高い 11 時頃の各照明の点灯状況を Fig. 9 に示す。

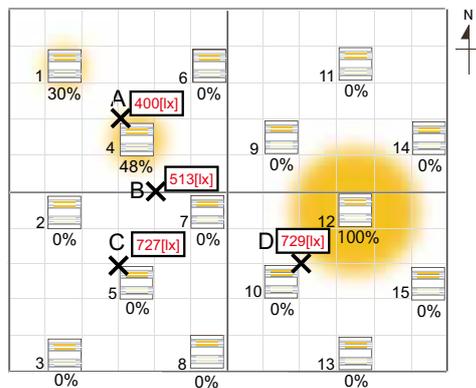


Fig. 9. Each luminous intensity about 11:00.

Fig. 9 に示す時間帯では、外光による照度が高い時間帯であるため、多くの照明が消灯していた。そのような中、物理的に要求照度が実現できない C 地点を除き、省エネルギーな点灯状況で要求照度を実現できていることが分かる。次に、外光照度の影響が少しある 14 時頃の各照明の点灯状況を Fig. 10 に示す。

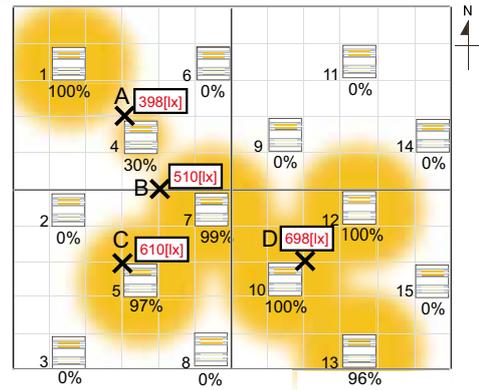


Fig. 10. Each luminous intensity about 14:00.

Fig. 10 では、外光照度の影響を受けながら、省エネルギーな点灯状況で各要求照度を実現できていることが分かる。最後に、外光がない 18 時頃の各照明の点灯状況を Fig. 11 に示す。

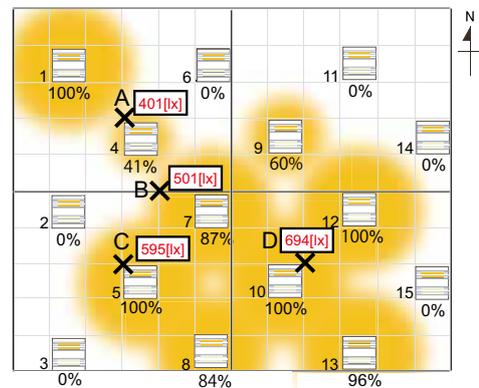


Fig. 11. Each luminous intensity about 18:00.

Fig. 11 より、外光がない状況下においても、各照明は省エネルギーな点灯状況であった。

これらの光度履歴より、省エネルギーな点灯パターンであったことが分かる。

以上の結果から、要求照度が物理的に実現不可能であった時間帯を除き、ユーザの指定した場所に要求照度を実現することができた。また、各照明の光度履歴と点灯状況より、省エネルギーな点灯パターンであつ

たことが分かる。これより、従来の知的照明システムと同様に省エネルギーな点灯状態で各照明は点灯し、かつ机上面に照度センサを置かずに要求照度地点に要求照度を実現することができた。

6. むすび

福岡や東京都内のいくつかのオフィスにおいて知的照明システムの実証実験を行った結果、机上面に照度センサを設置することが容易ではない状況が存在した。そこで、照度センサを机上面ではなく容易に設置できる場所に設置し、そこから得られる照度を基に外光分布の推定を行い、ユーザの指定した場所に要求照度を提供する新たな制御アルゴリズムを提案した。

提案手法では、机上面に照度センサを設置しないため、机上面の照度を外光、および照度に関するシミュレーションを基に算出する。そして、式(1)で示した最適化問題をとき、得られた光度を基に照明制御を行う。

提案手法の有効性について検討するため、照度センサ9台、およびユーザ数4名を想定して、実オフィスを模擬した環境で動作実験を行った。この実験により、提案システムの有効性を示し、照度センサを設置する場所とユーザが要求照度を要求する場所が一致していない場合においても、窓からの外光を推定し、個別照度環境を実現できることが分かった。

参考文献

- 1) M. Miki, T. Hiroyasu, and K. Imazato, "Proposal for an Intelligent Lighting System, and Verification of Control Method Effectiveness," Proc IEEE CIS, **1**, 520-525 (2004).
- 2) 同志社大学, 三菱地所株式会社, 森ビル株式会社, "「丸の内」と「六本木」で「知的照明システム」の実証実験を同時に開始", <http://www.mec.co.jp/j/news/pdf/mec100225.pdf>.
- 3) S. Tanaka, M. Miki, T. Hiroyasu and M. Yoshikata, "An evolutionary optimization algorithm to provide individual illuminance in workplaces", Proc IEEE SMC, **1**, 941-947 (2009).
- 4) 大谷義彦, 大川守, 内田暁, 山家哲雄, "モンテカルロ法を用いた照度計算の検討について", 照明学会誌, **82**, 105-111 (1998).
- 5) 菊池卓郎, 井川憲男, "All Sky Model-Lを導入した昼光照明計算プログラムの性能検証," 日本建築学会環境系論文集, **73**, 865-871 (2008).
- 6) 一ノ瀬雅之, 石野久彌, 村上周三, 郡公子, 井上隆, 木下泰斗, "外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「best」の開発(その25) 昼光利用照明計算について", 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, **1**, 1101-1104 (2008).
- 7) 株式会社ニチベイ, "ブラインドによる省エネ効果", http://www.nichi-bei.co.jp/jsp/environment/use/documents/leaflet_business.pdf.
- 8) 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**, 346-351 (2001).