

室内の外光分布のモデル化を 用いて個別照度環境を実現する照明システム

A Lighting System to Realize Individual Lighting Environments Using Model of the Indoor Daylight Distribution

三木 光範*¹
Mitsunori Miki

吉井 拓郎*²
Takuro Yoshii

廣安 知之*³
Tomoyuki Hiroyasu

吉見 真聡*¹
Masato Yoshimi

米本 洋幸*²
Hiroyuki Yonemoto

*¹同志社大学 理工学部

Department of Science and Engineering, Doshisha University

*²同志社大学 大学院 工学研究科

Graduate School of Engineering, Doshisha University

*³同志社大学 生命医科学部

Department of Life and Medical Sciences, Doshisha University

This study hence proposes a new approach to control a lighting system intended to realize individual lighting environments without placing illuminance sensors on users' workplanes. This system uses illuminance sensors for measuring not the illuminance on workplanes 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 environment. The result indicated that such a system can realize illuminance levels required by individual users with minimum power consumption responding to changing daylight conditions.

1. はじめに

近年、オフィスにおいて、オフィスワークの知的生産性、創造性、および快適性の向上に注目が集まっている。また、執務に最適な照度を個人ごとに提供することがオフィス環境改善の観点から有効であると報告されている [1, 2]。オフィスにおいて、個人ごとに照度を提供できる照明システムとしては、タスクアンビエント照明が有効である [3]。しかしながら、日本では多くのオフィスにおいてタスクアンビエント照明は用いられていない。その理由は、フロアに均一の明るさを提供する天井照明が一般的に設置されており、またオフィスの多くがタスクアンビエント照明を追加するコストを嫌うからである。このため、天井照明を用いて、各オフィスワークに最適な明るさを提供する照明制御システムが必要である。

このような背景から、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 [4]。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する照度（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。

これまで知的照明システムは我々の研究室において、その有効性を検証してきた [5]。現在、著者らは知的照明システムの実用化に向け東京都内のいくつかのオフィスにおいて、実環境における実証実験を進めている [6]。この実証実験より、ユー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い、その有効性を示す。

2. 実オフィスにおける検証結果

知的照明システムは、照度センサの設置している場所に要求照度を実現するシステムである。

2009年4月から、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ている。知的照明システムが導入されているオフィスビルは以下の通りである。

- コクヨ株式会社エコライブオフィス品川
(東京都港区東京ショールーム)
- 三菱地所株式会社都市計画事業室
(東京都千代田区大手町ビルディング)
- 三菱地所株式会社ビル管理企画部
(東京都千代田区大手町ビルディング)
- 三菱地所株式会社エコツェリア
(東京都千代田区新丸の内ビルディング)
- 森ビル株式会社本社オフィス
(東京都港区六本木ヒルズ森タワー)
- 三菱電機株式会社本社オフィス
(東京都千代田区東京ビルディング)

三菱地所株式会社エコツェリア（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図1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、照明制御

連絡先: 吉井 拓郎, 同志社大学, 大学院工学研究科, 情報工学専攻, 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3, 0774-65-6924, tyoshii@mikilab.doshisha.ac.jp

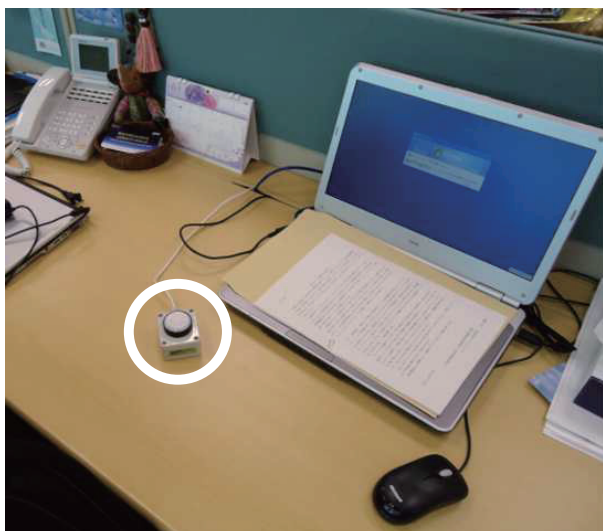


図 1: 知的照明システムの導入状況

アルゴリズムに基づき各照明の光度を変化させることで、ユーザの机上面に要求照度を実現することができる。

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図 2 に示す。



図 2: 照度センサが机上面に設置できない状況

このような場所に照度センサを置くと、ユーザの机上面の照度と要求照度は異なってしまう。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に支障をきたすことが分かった。

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。

3. 昼光分布の推定に基づく照明の最適制御

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された照度を電力が最小となる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実現するために、シミュレーションによって机上面の照度を推定する。また、照度センサをパーティションの上など設置が容易である場所に設置し、実測した照度分布を基に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。

本提案手法はシミュレーション上で外光を推定するため、これまでの知的照明システムとは異なりユーザや照度センサの位置情報を必要とする。要求照度を提供するのは主に机上面であるため、ユーザが照度を要求する位置情報について設定は容易である。

本提案手法は照明と照度センサ、および集中制御器から構成される。提案手法では照度センサの照度情報と各照明の光度情報を基にシミュレーション上で最適な点灯パターンを決定し、個々の照明の点灯光度を決定する。そのため、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、集中制御器を用いて制御を行う。提案システムの概要を図 3 に示す。なお、図 3 はシステムを部屋の上から見た図である。

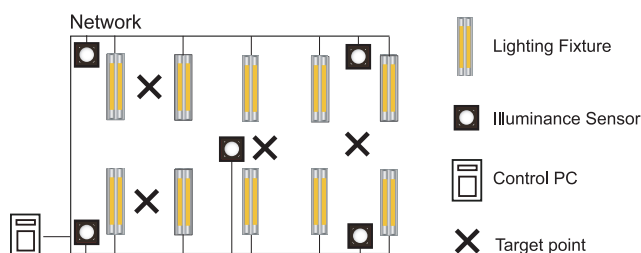


図 3: 提案システムの概要

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照度計算を基に求め、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. 照度センサから照度データを取得する
3. 照度計算により求めた照度センサ設置場所における照度と計測された照度の差を求める。これが外光による照度となる
4. 得られた外光による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による照度を求める
5. 要求照度設定位置における要求照度から、その場所の外光による照度を差し引いた照度が照明による照度にできるだけ一致するように照明の光度を最適化する
6. 項目 2) から 項目 5) を繰り返す

提案手法の目的は照度センサが設置されていない各ユーザの要求照度を実現し、外光の変化に対応しつつ消費電力を最小にすることである。このため、各照明の光度（明るさ）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、目的関数を式 (1) のように設定する。ただし、照度センサは机上面に設置しないため、照度 L_c は式 (2) のように照明による照度（照明照度）と外光による照度（外光照度）の和である。

$$f = P + \sum_{j=1}^n (Lc_j - Lt_j)^2 \quad (1)$$

P : 消費電力, n : ユーザの数, Lc : 照度, Lt : 要求照度

$$Lc = La + Le \quad (2)$$

La : 照明による照度, Le : 外光による照度

式 (2) の La 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実測し、その場所に及ぼす照明の影響度をデータベースに記録する。この値から、各照明の任意の点灯状況における特定の場所の照明照度を算出する。

照度センサを設置した場所では、実測照度から照明照度の差をとることにより、外光を算出できる。この算出された外光を基に部屋全体の外光照度分布を最小二乗法を用いて任意の場所の外光 Le を推定する。そこで、モデル式を導出するため、図 4 のように実験環境に 39 台の照度センサを設置し、室内の外光分布を計測する。

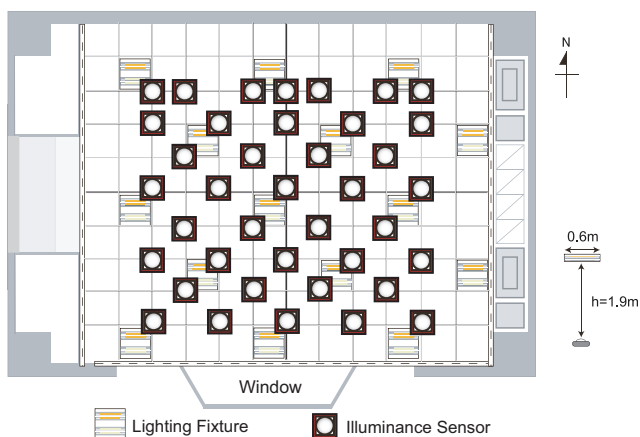


図 4: 外光計測システム

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。導出したモデル式を式 (3) に示す。本提案手法では、位置座標を (x, y) 、その場所での外光を z としたとき、モデル式を基に外光分布関数を推定する。

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

4. 動作実験

提案手法の有効性を検証するため、動作実験を行った。2011 年 4 月 9 日、晴天の 11 時から 18 時までの合計 7 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図 5 に示すように配置する。要求照度地点 A, B, C および D における要求照度をそれぞれ 300, 400, 500 および 600 lx とする。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 15 灯使用する。

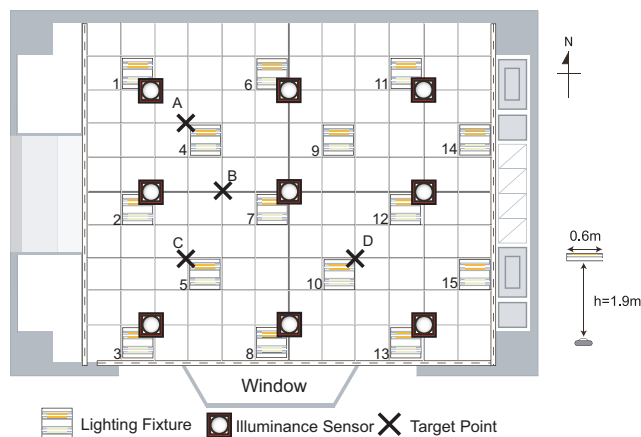


図 5: 実験環境

動作実験では、30 秒ごとに推定された外光分布を基に、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。そこで、本実験では照度が要求照度の ± 50 lx の範囲である際に要求照度を実現できている [8] と定義する。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。

外光照度の計測のために消灯した際の照度データを取り除いた照度履歴を図 6 に示す。なお、縦軸は照度値、横軸は時間である。

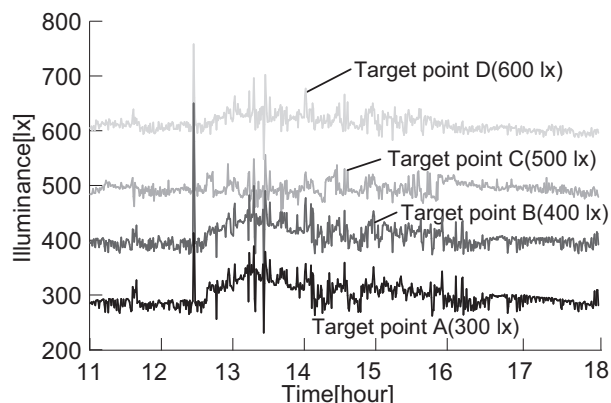


図 6: 照度履歴

次に、消灯を行い計測した実際の外光照度履歴を図7に示す。

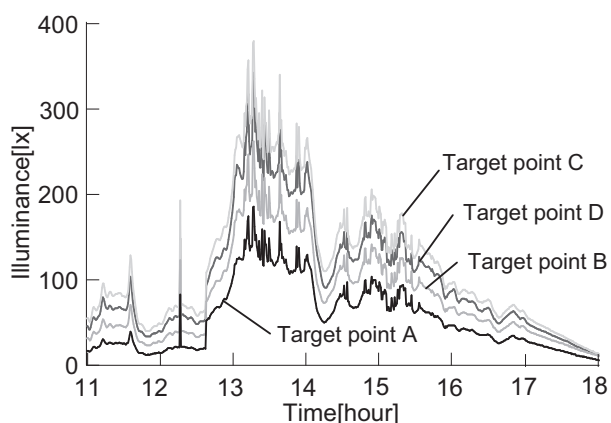


図7: 外光照度履歴

図6と図7より、外光が激しく変化する状況において、各要求照度地点は要求照度の ± 50 lxの範囲で照度が収束することを確認した。

次に各照明の光度情報を基に、省エネルギー性について考察を行う。各要求照度地点付近にあるLight 5, 7および10と各要求照度地点から離れているLight 11, 13および15の光度履歴を図8に示す。

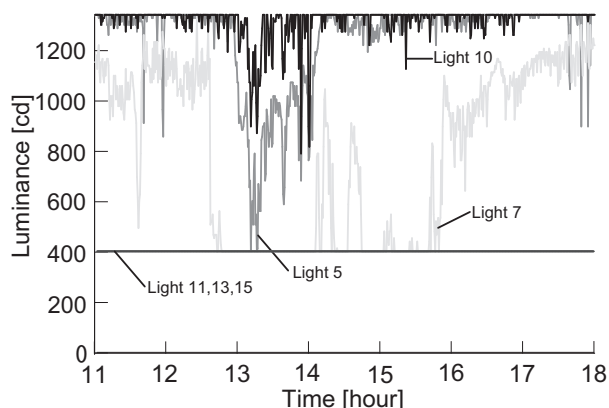


図8: 各照明の光度履歴

図8より、各要求照度地点付近の照明は外光が変化するとともに、光度が変化していることが分かる。また動作実験の間、要求照度地点から離れている照明については、最小点灯光度で点灯していた。これらの光度履歴より、各照明の点灯パターンは省エネルギーであったことが分かる。

以上の結果から、照度センサを設置する場所とユーザが要求照度を希望する場所が一致しない場合においても、要求照度を省エネルギーな点灯パターンで実現できた。

5. むすび

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、机上面の照度をシミュレーションにて算出する。机上面の照度は照明照度と外光照度の和である。照明照度を各照明の任意の点灯状況と影響度データベースを基に算出する。また、特定の場所に設置した照度センサより得られた外光照度とモデル式から、任意の場所の外光を推定する。そして照度シミュレーションを用いて、式(3)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希望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] Peter R. Boyce, Neil H. Eklund, S. Noel Simpson. Individual lighting control: Task performance, mood, illuminance. *IJES*, pp. 131–142, 2000.
- [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 Vol.1, No.1322*, pp. 151–156.
- [3] 稲沼實, 渡部耕次, 坪田裕二, 坂田克彦. オフィスにおけるタスク・アンビエント照明方式の適応性に関する実証的研究. *日本建築学会計画系論文集 (548)*, pp. 9–15, 2001.
- [4] 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.
- [5] M.Miki, Y.Kasahara, T.Hiroyasu, M.Yoshimi. Construction of illuminance distribution measurement system and evaluation of illuminance convergence in intelligent lighting system. *IEEE Sensors2010 Acoustic and Optical Sensing Systems*, 2010.
- [6] 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>.
- [7] Nichibei. 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. *照明学会誌 Vol.85(5)*, pp. 346–351, 2001.