

# Estimate Daylight Illuminance using the Model Formula of Daylight Illuminance Distribution

Mitsunori MIKI<sup>\*</sup>, Hiromitsu NAKABAYASHI<sup>\*\*</sup>, Hisanori IKEGAMI<sup>\*\*</sup>, Shohei MATSUSHITA<sup>\*\*</sup>,  
Sho KUWAJIMA<sup>\*\*</sup>, Takeshi TANIGUCHI<sup>\*\*</sup> and Hiroto AIDA<sup>\*</sup>

(Received January 20, 2014)

From the result of field tests in an Intelligent lighting system, we found out that new method for an Intelligent lighting system, without installing the illuminance sensor on a desk, is needed. In this control method, the estimation of daylight illuminance on desk surface is needed. Therefore, we are studying the estimation of daylight illuminance. In the estimation of daylight, which have been proposed, significant amount of time was needed to explore the model formula and the measurements of daylight illuminance. Hence, in this paper, we derived the model formula of daylight illuminance by verifying daylight illuminance distribution, and proposes a method to estimate the daylight illuminance on the desk by using the derived formula. We verified the daylight illuminance distribution in the room and derived the model formula. By deriving the model formula, it is eliminating the need for the required search time and the measurement to generate the model formula for estimating daylight illuminance.

**Key words :** daylight, illuminance, daylight illuminance distribution

**キーワード :** 外光, 照度, 外光照度分布

## 外光照度分布のモデル式を用いた外光照度推定手法

三木光範, 中林弘光, 池上久典, 松下昌平, 桑島奨, 谷口武, 間博人

### 1. まえがき

近年, オフィスにおける執務者の知的生産性, 創造性および快適性の向上に注目が集まっている. オフィス環境改善の観点から執務において個人ごとに最適な照度を提供することが有効であり, 執務者の生産性が向上すると報告されている<sup>1,2)</sup>. 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<sup>3)</sup>. しかし, 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, 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好まないためである. このため, 天井照明を用いて, 各執務者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, 任意の場所に執務

<sup>\*</sup> Department of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

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

<sup>\*\*</sup> Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6924, E-mail: hnakabayashi, hikegami, smatsushita, skuwajima@mikilab.doshisha.ac.jp

者の要求する明るさを提供する知的照明システムの研究を行っている<sup>4)</sup>。知的照明システムでは、執務者が1人1台、照度センサを保持し、各執務者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。そうすることで外光などリアルタイムに変化する影響を含め要求照度を実現する。また、電力が最小となる最適な点灯パターンで要求照度を実現することができる。現在、東京や福岡の複数のオフィスにおいて、実環境における知的照明システムの実証実験を行っている<sup>5)</sup>。検証実験の結果、執務者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ない状況が存在することがわかった。そこで、照度センサをパーティションの上のような執務の妨げにならない場所に設置し、執務者の机上面に個別照度環境を実現する新たな制御手法を提案している。この制御手法を用いて執務者の机上面に要求照度を提供するためには、指定された場所の照明照度の計算および外光照度を推定する必要がある。

外光照度の推定の研究は、既に行われている。前報では、一日分の室内における外光照度の計測結果より生成されたモデル式を用いた外光照度の推定手法を提案している<sup>6)</sup>。このモデル式と室内に設置した照度センサから得られる照度値を基に外光照度を推定する。この手法では、外光照度分布の計測は晴れの日である必要があり、計測時はその室内で執務ができない。また、推定誤差の少ないモデル式の探索に膨大な時間がかかる。実際にこの手法を用いて構築されたシステムをオフィスで運用するためにはこれらの問題を解決する必要があると考える。

本稿では室内の外光照度分布について検証を基に外光照度分布のモデル式を導出し、導出したモデル式を用いることで机上面の外光照度を推定する手法を提案する。室内の外光照度分布についてモデル式の導出を行った。モデル式を導出することで、モデル式を生成するために必要な計測や探索時間を不要にする。本手法を用いることでオフィスにおいて外光照度推定を必要とするシステムの運用が容易になると考える。

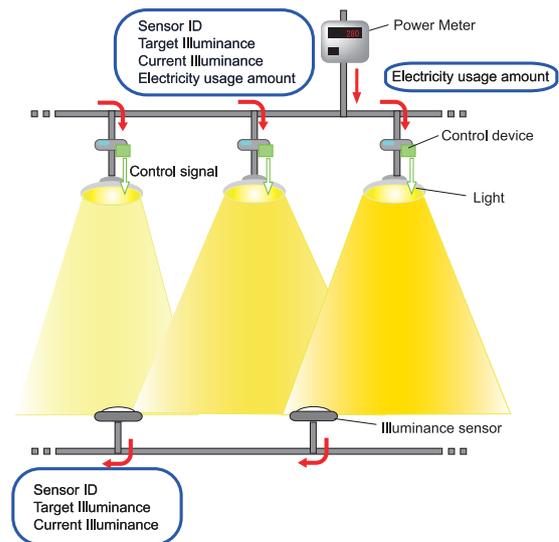


Fig. 1. Configuration of intelligent lighting system.

## 2. 知的照明システム

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。各照明の明るさ（光度）を変化させることによってユーザの要求する照度を提供し、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。

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、および電力計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、消費電力の最小化を行う。

## 3. 外光照度推定手法

### 3.1 従来の外光照度推定手法

従来手法では、室内の外光照度分布をモデル式として定式化し、室内に設置した照度センサより得られた照度値から回帰分析を用いて室内の外光照度推定を行っていた。室内の外光照度分布のモデル式を生成するためには、その室内の外光照度をある程度網羅できる晴れの日の外光照度分布が必要である。そのためモ

デル式の生成には計測に関して天気の条件があり、その日の室内は執務ができない状況になる。また、この手法ではモデル式をランダムに生成する。ランダムに生成されたモデル式から推定誤差の少ないモデル式を探索し、室内の外光照度分布のモデル式を決定する。しかし、これではモデル式の探索効率が悪く、モデル式の決定に膨大な時間がかかる。

本手法では、室内の外光照度分布について検証することでモデル式を生成し、机上面の外光照度を推定する。外光照度分布について検証を行う。検証結果からモデル式を導出することで晴れの日の一日の外光照度ログを計測するといったモデル式を生成するための条件が不要となる。

### 3.2 提案手法の概要

前述で述べたように従来手法ではモデル式の生成のために晴れの日の一日分の外光照度分布を計測する必要がある。また、推定誤差の少ないモデル式を探索するために膨大な時間がかかるといった問題がある。

そこで外光照度分布について検証し、検証結果からモデル式を導出した。本稿では、導出したモデル式を用いることで室内の机上面の外光照度を推定する手法を提案する。室内に設置した照度から得られた照度値から回帰分析を用いて導出したモデル式の係数を決定する。求めたモデル式を用いて室内における机上面の外光照度を推定する。本手法では、モデル式の生成に一日分の外光照度ログを計測する必要がない。また、モデル式をランダムに生成しなくてもよいため、探索時間が不要となる。本手法を用いて構築したシステムの導入・運用は容易になると考えられる。

### 3.3 外光照度分布のモデル式の導出

室内においてブラインドを装備した窓をもつ室内であれば外光照度の出現状況は窓面の方位に依存しないことが報告されている<sup>7)</sup>。外光照度分布のモデル式を導出することにより、すべての窓面方位に対応した外光推定が可能となると考える。

オフィスにおいて室内に入射してくる外光は窓面のブラインドによって拡散光になると考えられる。拡散性のある点光源の場合、照度に関して距離の逆二乗則、

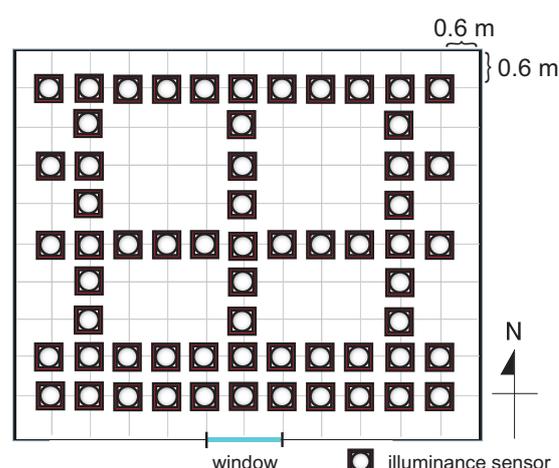


Fig. 2. Experiment environment.

コサイン特性およびコサイン四乗則などの法則がある<sup>8,9)</sup>。しかし、実際の光源には大きさがあるためこれらの法則が成り立つには光源からの距離を十分にとる必要がある。本手法では、設置された照度センサから得られる実測値を用いて回帰分析を行い、モデル式の係数を決定することで前述の条件を考慮しなくてよいと考える。これらを踏まえて室内の外光照度分布のモデル式を以下のように導出した。

$$z = \sum_{i=0}^2 y^i \sum_{j=0}^4 \beta_{5i+j} \cos^j \theta \quad (1)$$

$z$ : その位置の外光照度値,  $y$ : 光源と推定位置における垂直方向の距離  $\theta$ : 光源と被照面との仰角,  $\beta_i$ : 係数

照度センサが設置されている場所の実測照度値から回帰分析を用いて式 (1) に示す係数を決定し、室内の外光照度分布を推定することで任意地点の机上面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推定することができる。

## 4. 検証実験

### 4.1 外光照度推定精度と照度センサ配置の検証

本手法を用いた際の外光照度推定精度と照度センサ配置について Fig.2 の実験環境で検証を行った。窓面に対して垂直方向および平行方向に設置した照度センサの配置間隔と外光照度推定精度についての検証結果

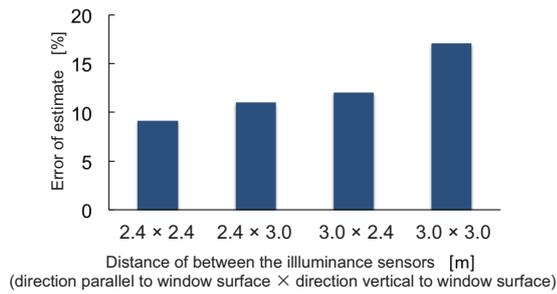


Fig. 3. Error of estimate and installation distance between the illuminance sensors.

を Fig.3 に示す。Fig.3 の検証結果から垂直方向および平行方向における照度センサの配置間隔が 3.0 m 以外は推定精度がよいことがわかる。照度センサの配置間隔がいずれかの方向のみ 3.0 m の場合、推定精度に差はわずかである。また、もう一方の方向の照度センサの配置間隔に関しても、2.4 m 間隔で照度センサを配置できる。よって、照度センサの配置間隔は、最大間隔 3.0 m と 2.4 m までの配置間隔ならば、推定精度に差はないと考える。

オフィスレイアウトの基準として、机と机の間隔は人が通れるほどの間隔が必要である<sup>10)</sup>。照度センサをパーティション上に設置することを考慮すると、照度センサと照度センサの間隔は約 3 m 必要である。もう一方の方向はパーティション上に照度センサを設置すればよいので、等間隔もしくは外光分布を考慮した配置に設置すればよいと考える。検証結果から、オフィスレイアウトを考慮した照度センサ配置が可能であると考える。

#### 4.2 外光照度推定実験

本手法の有効性を示すために外光照度分布推定実験を行った。外光照度実測に必要な照度センサの配置について 4.1 節の検証結果および光の減衰について考慮し、Fig.4 に示す実験環境を構築した。実験では 7 時から 20 時までにおける Fig.4 中の×印の外光照度を推定する。なお、有効性検証のため実際には Fig.4 中の×印の位置にも照度センサを配置し、照度実測値と推定値の誤差率を算出することで、手法の有効性を示す。

前章で述べた外光照度分布の推定式および Fig.4 の

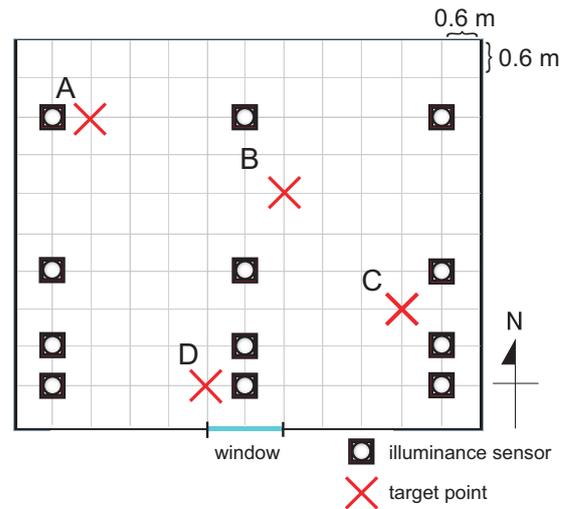


Fig. 4. Illuminance estimating position.

配置に設置された照度センサから得られる実測値を用いて ABCD の各地点における外光照度を推定した。ABCD 各地点における実測照度値を Fig.5 に、推定式による推定照度値を Fig.6 に示す。

実験の結果、すべての地点において平均誤差は 7.6 lx であり、最大誤差は地点 D において 59 lx であった。オフィスの机上面照度の JIS 照度基準が 750 lx であること<sup>11)</sup>と最小知覚変動比が -6 % から +8 % であることから<sup>12)</sup>、50 lx 以内の推定誤差はオフィス照度環境の許容範囲内である。よって、平均誤差 7.6 lx はオフィス照度環境において十分小さいと考える。また、推定誤差が 50 lx を超えたのは地点 D のみであり、13 時間のうち約 3 分間であった。よって、本手法により、従来手法が必要であった推定誤差の少ないモデル式の探索時間および晴れの日の外光照度ログを必要とせず、外光照度の高精度推定が可能であることが確認できた。

#### 5. まとめ

前報で提案されている外光照度の推定手法は、推定誤差の少ないモデル式の探索に膨大な時間が必要であり、かつ一日分の室内における外光照度を計測する必要があった。実際にこの手法を用いた構築されたシステムをオフィスで運用するにはこの問題を解決する必

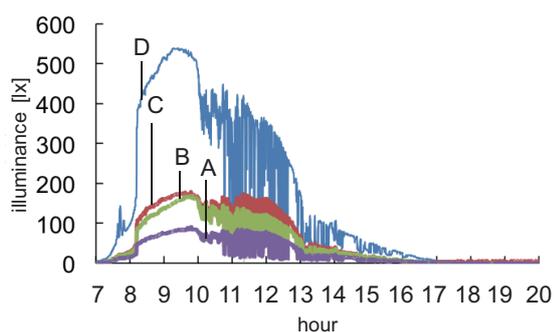


Fig. 5. Real measured illuminance.

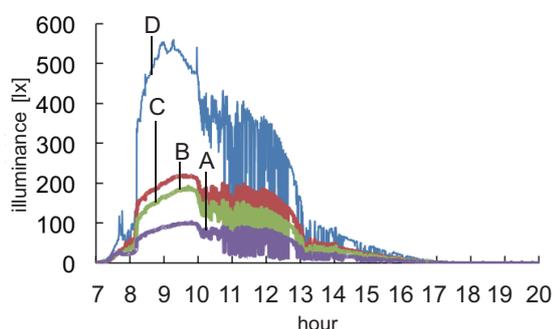


Fig. 6. Estimated illuminance.

要がある。

そこで本稿では、室内の外光照度分布について検証し、検証結果から導出したモデル式を用いることで机上面の外光照度を推定する手法を提案した。

本手法を用いる際の照度センサの設置位置を検討するため、照度センサの配置間隔と推定精度の検証を行った。検証結果と光の減衰を考慮して照度センサの設置位置を決定し、本手法の有効性を検証するため外光照度推定実験を行った。一日のうち7時から20時までの任意地点の外光照度を推定した。実験の結果、全地点の平均誤差が7.6 lx および最大誤差 59 lx であった。オフィスの基準照度 750 lx と最小知覚変動比が -6 % から +8 % であることから、50 lx 以内の照度誤差はオフィス照度環境の許容範囲である。このことから平均誤差 7.6 lx は非常に小さい誤差であると考えられる。また、推定した地点のうち1地点のみが13時間のうち約3分間、照度誤差が50 lx 以上となった。これより、従来手法において必要であった推定誤差の少ないモデル式の探索時間および晴れの日の外光照度ログを必要とせず、外光照度の高精度推定が可能である

ことが確認できた。

本研究の一部は、同志社大学理工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) P. Boyce, N. Eklund, N. Simpson, "Individual Lighting Control Task Performance, Mood, and Illuminance," J. of the Illuminating Engineering Society, 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", ヒューマンインタフェースシンポジウム, 1[1322], 151-156(2006).
- 3) K.Yamakawa, K.Watabe, M.Inamura, H.Takeda, "A Study on the Practical Use of a Task and Ambient Lighting System in an Office", Journal of light and visual environment, 24[2], 15-18(2000).
- 4) M. Miki, T. Hiroyasu, K.Imazato, "Proposal for an Intelligent Lighting System, and Verification of Control Method Effectiveness," Proc IEEE CIS, 520-525(2004).
- 5) 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.mori.co.jp/img/article/100225.pdf>
- 6) 三木 光範, 池上 久典, 吉井 拓郎, 東 陽平, "照度分布の定式化によるリアルタイム外光照度分布推定手法", 同志社大学理工学研究所報告, 54[1], 29-32(2013).
- 7) 塩田 岳夫, 佐藤 隆二, 栖崎 正也, 山中 俊夫, 森 正義, "窓面方位と室内昼光照度の関係", 学術講演梗概集.D, 環境工学, 1213-1214(1993).
- 8) 牛山 善太, "光源光度データからの照度分布の予測", [http://www.osc-japan.com/wp-content/uploads/2013/02/ODN\\_LED-7.pdf](http://www.osc-japan.com/wp-content/uploads/2013/02/ODN_LED-7.pdf)
- 9) 松下 進, 図解入門 よくわかる最新照明の基本と仕組み (秀和システム, 東京都, 2008), p.162-172.
- 10) 小林 修一, "より快適な環境をつくらう 総務が知っておきたいオフィスレイアウトの基本と応用", 企業実務, 50[3], 78-82(2011).
- 11) 日本工業標準調査会, "事務所の照度基準 (JIS Z91110)", <http://www.ibaraki-sanpo.jp/publicity/tool/pdf/checklist/015syoudo.pdf>

- 12) 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**[5], 346-351(2001).