

Realtime Estimate Daylight Illuminance Distribution using the Formulation of Daylight

Mitsunori MIKI^{*}, Hisanori IKEGAMI^{**}, Takuro YOSHII^{***} and Yohei AZUMA^{**}

(Received January 15, 2013)

Lighting energy consumption in office buildings, accounts for 25 % of the entire energy consumption in office buildings. Therefore lighting energy saving is highly required in Japan. In recent years, daylight utilizing in an office and lighting control system to respond to daylight changes have been proposed. In this paper, we propose daylight-Formulate to accurately estimate daylight intensity distribution in the room which is important in the consideration of daylight. We formulate daylight intensity distribution, based on the illuminance measured from a few points and estimate daylight intensity distribution in the room. We can estimate 96.8 % of the external light illuminance within 50 lx error.

Key words : illuminance distribution, using daylight, office, daylight

キーワード : 照度分布, 昼光利用, オフィス, 外光

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

三木光範, 池上久典, 吉井拓郎, 東陽平

1. まえがき

2011年の東日本大震災を受け、近年の日本では、より一層省エネルギー推進の動きが強まっている。中でもオフィスビルにおける照明の消費エネルギーはオフィス専有部における消費エネルギーの40%、オフィスビル全体の消費エネルギーの約25%を占めており¹⁾、オフィスにおける照明の消費エネルギー削減は急務である。これを受けて、近年では昼光をよく取り入れたオフィスビルの提案²⁾が行われており、既存の

オフィスビルに対しても、昼光変化に対応するシステム³⁾や昼光を考慮した照明制御システム⁴⁾が開発されている。昼光利用の促進や昼光を考慮したシステムを開発するためには、既存の照明設備以外の外光が机上面照度に及ぼす影響を算出する必要がある。しかしながら、昼光がオフィス全体に及ぼす影響を高精度で計測および推定することは極めて困難である。

現在では、日本各地の標準気象データ⁵⁾や拡張メダス気象データ⁶⁾などが整備されており、天空光

^{*} 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

^{***} Graduate School of Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6924, E-mail: tyoshii,yazuma@mikilab.doshisha.ac.jp

からのシミュレーションによって室内机上面の照度分布を求める手法が存在するが、窓の大きさ、窓の透過率、ブラインドの角度、壁面の反射率の変化など多くのパラメータを考慮する必要がある。そのため既存のオフィスにおける照度環境の測定には、照度シミュレーションではなく、数点の計測点を基に室内の照度分布を推定する手法が用いられている^{7, 8)}。面積の広いオフィスにおいては、照度推定に多くの計測点を必要とするため、30台の照度センサを接続しての多点同時照度計測システム⁹⁾や168台の照度センサを接続した大規模照度計測システム¹⁰⁾などが報告されている。しかしながら、日光のみ計測することは困難である上に、これらの大規模計測システムを実際のオフィス環境で展開するのは容易ではなく、現実的でない。また、日光利用・日光制御のための外光照度分布の推定は、室内に入射する光の量が時々刻々と変化するため、ある程度短時間サイクルで推定可能である必要がある。

そこで本稿では、少数の照度計測点から室内の外光照度分布を短時間間隔で推定する手法を提案する。大規模な外光照度の推定が容易になり、リアルタイムな外光照度分布推定によって、時々刻々と変化する光環境に対応しなければならない日光利用や日光制御など、日光を考慮したシステムにおいて非常に有効であると考える。本手法を用いることで、一日の机上面外光照度の96.8%を誤差50 lx以内で推定できることを示した。

2. 日光利用システム

執務者の快適性と照明における消費エネルギー削減の観点から、日光による光環境変化にも対応する照明制御システム³⁾が開発され、実証実験が行われている^{11, 12)}。このシステムは外光の影響を考慮した制御を行う必要があるため、目標照度を要求している場所に照度センサを設置し、照度を実測する必要がある。また、各執務者に個別照度を提供するため、執務者の数だけ照度センサが存在していた。本手法により任意地点の外光照度が推定可能となることで、制御に必要

な照度センサ数の削減や設置位置の自由化など様々な展望が見える。このように日光を利用するシステムにおいて本手法は非常に有用な推定手法と考えている。

3. 提案手法

3.1 外光照度分布推定手法の概要

本稿で提案する外光照度推定手法は、実際のオフィス環境で測定することが困難なリアルタイムの大規模照度分布を高精度で推定し、オフィスでの日光を考慮したシステムの制御に対して大きく貢献することを目的とした手法である。ここで、リアルタイムとは設置された照度センサの値が更新されると同時に、その時刻の任意地点の外光照度が算出できる即時性のことを指す。

本手法では、室内の任意地点の外光照度をリアルタイムに推定する。これまでに、外光照度分布を求める手法は数多く研究されており、太陽の位置や雲量、窓材料の透過率などから執務者の机上面の外光分布を求めることは可能である^{13, 14)}。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、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、本稿では室内の数カ所に照度センサを置き、室内の外光照度分布をモデル式として定式化することで、照度センサから得られた値から回帰係数を用いて室内の任意地点の外光照度を推定する手法を提案する。

3.2 定式化に対する季節や天候の影響

本手法の有効性を検証するため、Fig. 1のような実験環境を構築した。また、構築した実験環境の写真をFig. 2に示す。Fig. 1の実験環境において計測した、ある照度センサの7時から19時までの照度履歴のうち、気象庁が公開している気象統計情報における1日の日照時間が5.1時間、0.9時間、0時間、すなわち晴れ、曇り、雨の日のデータをそれぞれFig. 3, Fig. 4, Fig. 5に示す。

外光が室内机上面照度に与える影響が最も大きいのは晴れの日である。予備実験において3通りの天候で

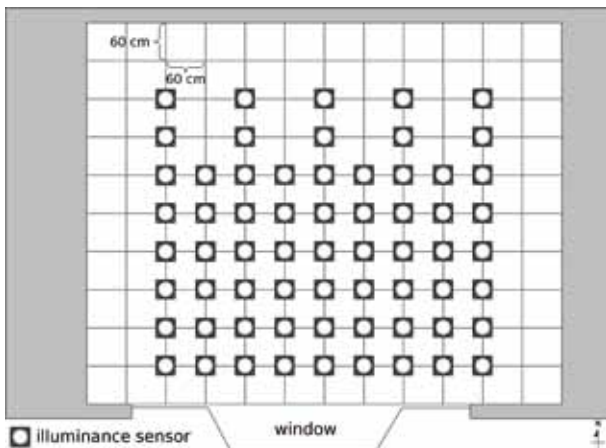


Fig. 1. Experiment environment.

モデル式を生成したところ、曇り、雨の日のモデル式では、晴れの日の外光照度分布を正しく推定することはできなかった。一方、晴れの日の外光照度分布から生成したモデル式では、曇り、雨の日の外光照度分布を高精度で推定することができた。また、年間を通して実験を行った結果、春分の日、夏至、秋分の日、冬至の直近2週間以内の晴れの日の外光照度分布から生成したモデル式の照度推定精度を比較したところ、推定精度に差は見られなかった。

すなわち、机上面照度が高照度となるデータがない曇り、雨の日の外光照度分布では、室内の外光照度分布を正しく定式化することはできない。室内の外光照度分布を定式化するためには、室内の机上面照度が大きく変化する晴れの日の外光照度分布が必要であった。また、季節の違いが照度推定誤差に影響を与えることはなかった。これらの結果から、室内の外光照度分布を定式化するためには、その室内で再現される外光照度が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ことがわかった。

3.3 机上面外光照度値算出式の生成

照度センサの位置座標を (x, y) としたときの室内の任意地点における机上面外光照度値算出式を生成する。モデル式の生成は以下のような手順で行う。

- 1) モデル式の項数と各項をランダムに決定する。
- 2) 各項と誤差項を足し合わせてモデル式を生成する。

(31)



Fig. 2. Experiment environment picture.

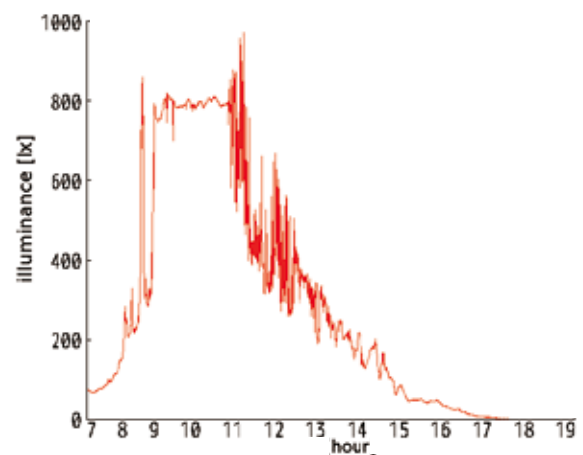


Fig. 3. Illuminance history in fine day.

生成したモデル式の例を式 (1) に示す。

$$z = \beta_1 xy^3 + \beta_2 y + \beta_3 x^3 y^2 + \beta_4 xy^2 + \beta_5 x^4 y^3 + \beta_6 x^2 y^4 + \beta_7 x^3 y^4 + \epsilon \quad (1)$$

x, y : 部屋の位置座標, β_i : 係数,
 z : その位置の外光照度値, ϵ : 誤差項

- 3) モデル式の係数と誤差項を外光照度実測値から回帰分析を用いて決定する。
- 4) ある地点の外光照度実測値に対して下記の条件式が真のときそのモデル式の評価値を+1する。

$$|I_r - I_e| > T$$

I_r : 実測照度, I_e : 推定照度, T : 照度誤差閾値

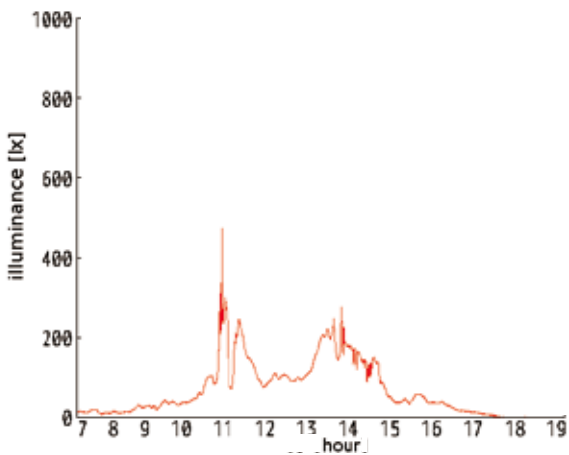


Fig. 4. Illuminance history in cloudy day.

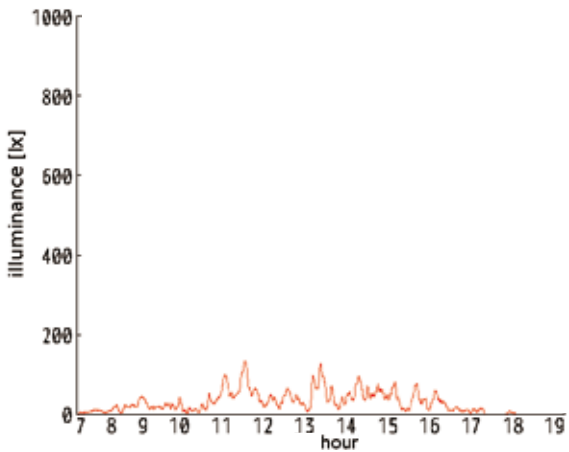


Fig. 5. Illuminance history in rainy day.

- 5) 全実測値に対して項目 3) から項目 4) の評価計算を行う。
- 6) 生成モデル式の評価値がこれまでの全モデル式の評価値よりも良ければ受理。
- 7) 項目 1) から項目 6) を一定回数繰り返すか、ある程度評価値が良いモデル式を得た段階で終了。

条件式 (2) の照度誤差閾値 T は 50 を用いる。オフィスの机上面照度の JIS 照度基準が 750 lx であること¹⁵⁾ と最小知覚変動比が -6% から $+8\%$ であること¹⁶⁾ から、任意地点の照度推定誤差が 750 lx の \pm 約 7%、50 lx 以内であればオフィスにおける昼光利用・昼光考慮システムに対して有効であると考えている。そ

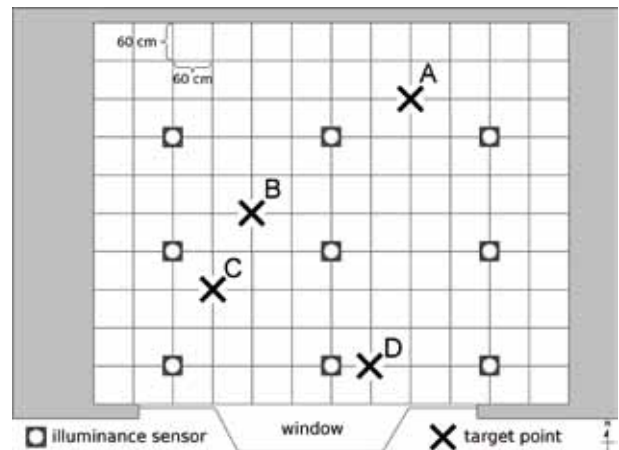


Fig. 6. Illuminance estimating position.

こで、実測値と 50 lx 以上の照度誤差がある場合にペナルティを与える評価方法とした。

4. 有効性検証実験

4.1 外光照度分布推定実験

室内の外光照度分布を定式化することで、任意地点の外光照度分布を高精度で推定できることを示す。Fig. 6 に示す実験環境を構築した。Fig. 6 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. 1 に示す実験環境を構築し、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。構築した実験環境の写真を Fig. 2 に示す。室内の外光照度分布を定式化するため、晴れの日の一日の外光照度分布を計測する。設置した 64 台の照度センサで 10 秒毎に各地点の照度を計測し、7時から19時の外光照度分布を計測する。計測した外光照度分布からモデル式を生成し、ABCDの各地点における外光照度を推定した。生成したモデル式を式 (2) に示す。また、ABCD各地点における実測照度値を Fig. 7 に、モデル式による推定照度値を Fig. 8 に、各地点における実測照度と推定照度との差を Fig. 9 から Fig. 12 に示す。

$$z = \beta_1 x + \beta_2 xy + \beta_3 x^2 + \beta_4 x^2 y + \beta_5 y^2 + \epsilon \quad (2)$$

本手法では、照度誤差が 50 lx 以内のモデル式を生成するために、原則的に、条件式 (2) によるペナルティが 0 のモデル式を生成するまで評価計算を繰り返す

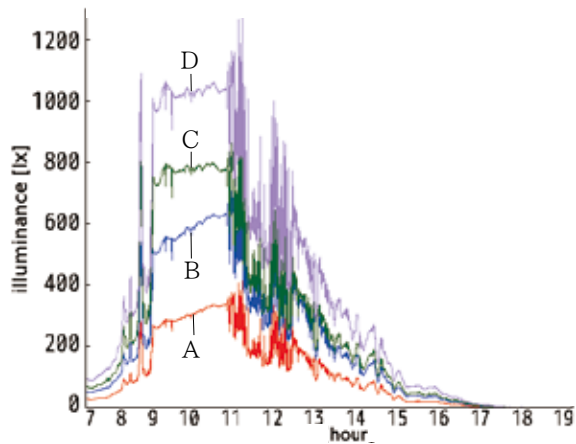


Fig. 7. Real measured illuminance.

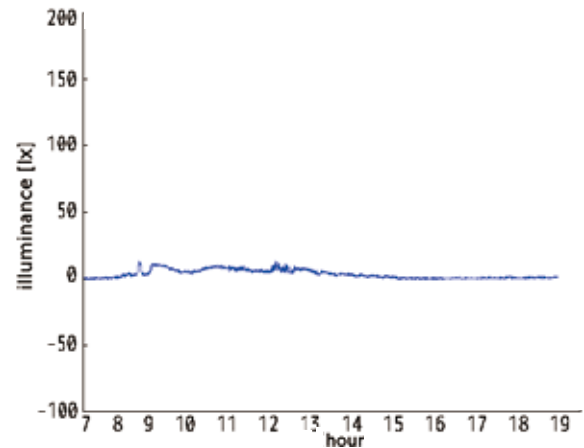


Fig. 9. Error of illuminance on position A.

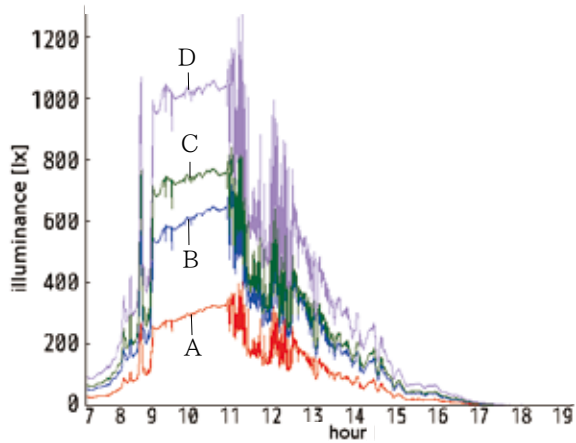


Fig. 8. Estimated illuminance.

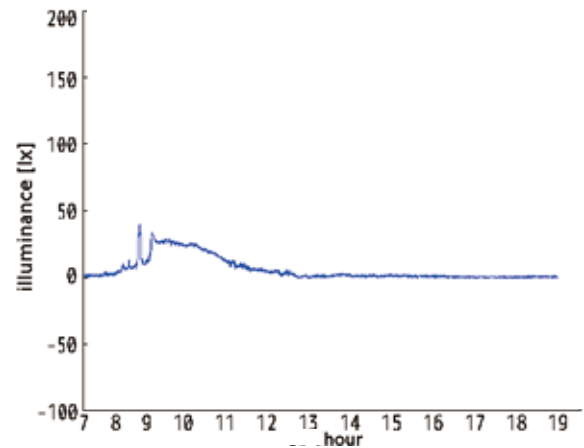


Fig. 10. Error of illuminance on position B.

が、今回のモデル式評価計算過程においては、25000個のモデル式を評価した段階での最も評価の良い式を採用した。生成したモデル式による推定照度値と実測照度値の差が50 lx以上となったのは全実測照度データ276480個*のうち、8948個である。照度推定誤差が50 lxを超え、ペナルティを受けたのは全体の3.2%であり、その最大誤差は76 lxであった。これは12時間の外光照度分布のうち、21分の間、64箇所中1箇所の照度値が最大で76 lxの誤差を持っているという程度であり、この程度であれば実運用に問題ないと考えている。

本手法は本来、照度誤差ペナルティが0になるまで

* 照度値の実測は10秒間隔で行なっている。センサ64台×12時間×60分×60秒÷10秒間隔=276480データである。

評価計算を繰り返すことで、照度誤差閾値 T に設定した精度の外光分布モデル式を生成するものであるが、1日の外光照度分布のデータで評価計算を行うには膨大な時間がかかる。現在はモデル式の生成をランダムに行なっているが、遺伝的アルゴリズムを用いてより効率的に良いモデル式を探索することで、より高精度なモデル式を生成できると考えられる。

5. むすび

本稿では、昼光利用・昼光考慮システムの制御に重要な外光が室内にもたらす照度分布を、室内の外光照度分布を定式化することによって、条件式に設定した閾値50 lx以内の推定誤差で室内の外光照度を推定す

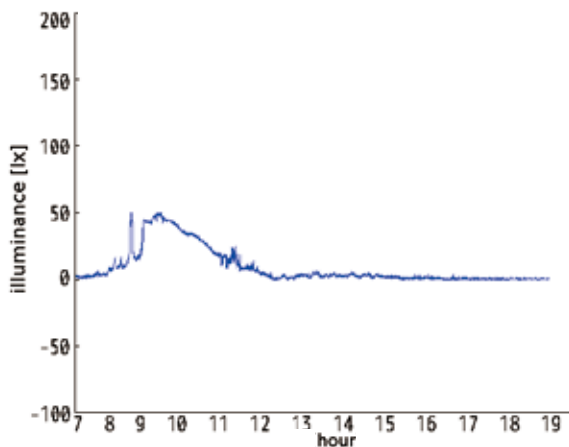


Fig. 11. Error of illuminance on position C.

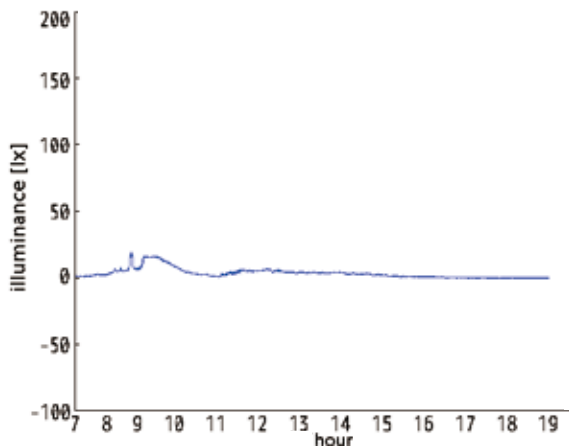


Fig. 12. Error of illuminance on position D.

る手法を提案した。オフィスの基準照度 $750 \text{ lx}^{15)}$ と最小知覚変動比が -6% から $+8 \%$ であること¹⁶⁾ を考慮し、照度誤差が 50 lx 以内であればオフィスでの利用に問題ないと考えられる。

有効性の検証を行うため、室内の机上面 64 箇所に照度センサを設置し、晴れの日の 7 時から 19 時の外光照度を計測した。実験の結果、任意地点の外光照度のうち 96.8% を照度誤差 50 lx 以内で推定できることを示した。また、 3.2% の 50 lx 以上誤差を許容したが、最大誤差は 76 lx であり、これは 12 時間のうち 21 分間、64 箇所中 1 箇所の照度値に最大 76 lx の誤差があるという程度である。この程度であれば実運用に問題ないと思える。

以上より、昼光利用・昼光考慮システムに応用可能な外光照度の高精度推定を達成した。

今後の展望として、本手法は本来、照度誤差ペナルティが 0 になるまで評価計算を繰り返すことで、照度誤差閾値 T に設定した値以下の推定誤差しか持たない外光分布モデル式を生成するものであるが、現在の手法はモデル式の生成をランダムに行っており、良いモデル式の探索効率が悪いいため、遺伝的アルゴリズムなどを用いてより効率的に良いモデル式を探索することで、更に高精度なモデル式を生成することが考えられる。

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) オフィスビルの形態とエネルギーの消費実態, http://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html.
- 2) 甲斐 誠, “照明の実際-7 オフィスビルの昼光照明”, 照明学会誌, 96(4), 244 (2012).
- 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”, 人工知能学会誌, 22(3), 399-410 (2007).
- 4) H. Yoshida and T. Mannam, “Technologies — Panasonic Electric Works Panasonic - Residential Lighting Fixture with Automatic Brightness Adjustment Function by Sensor”, Panasonic Technical Report 57(4), 399-410 (2009), <http://panasonic-electric-works.net/technologies/report/574e/main02.html>.
- 5) 松尾 陽, 日本建築設備士協会, 空調設備の動的熱負荷計算入門, (日本建築設備士協会), 東京都, (1980).
- 6) 赤坂 裕, “41029 拡張アメダス気象データ (EA 気象データ) の整備状況と今後の課題 (年間気象データ, 環境工学 II)”, 学術講演梗概集, D-2, 環境工学 II, 熱, 湿気, 温熱感, 自然エネルギー, 気流・換気・排煙, 数値流体, 空気清浄, 暖冷房・空調, 熱源設備, 設備応用, 2003, 57-60 (2003).
- 7) 鹿島 昭一, 安富 重文, 喜多村 義矩, 田代 健次郎, 五十嵐 直治, “一般事務室の実態調査に基づく照明環境評価”, 日本建築学会計画系環境論文報告集, (365), 30-39 (1986).
- 8) 望月悦子, “日本のオフィス建築における光環境の実態調査”, 照明学会誌, 93(12), 149-152 (2009).
- 9) 荒木 慶和, 坂野 正幸, 熊木 輝明, 田中 大輔, 白鳥 豊, 陳 秀洪, 服部 恭幸, “多点同時照度測定システムの構築”, 照明学会誌, 93(11), 838-841 (2009).
- 10) M.Miki, Y.Kasahara, T.Hiroyasu, and M.Yoshimi, “Construction of Illuminance Distribution Measurement System and Evaluation of Illuminance Convergence in Intelligent Lighting System”, IEEE Sensors2010 Acoustic and Optical Sensing Systems, 2431-2434, (2010).

- 11) 鈴木 真理子, 三木 光範, 田中 慎吾, 吉見 真聡, 中川 明彦, 齋藤 敦子, 福田 麻衣子, “オフィス内フレームを用いた知的照明システムの構築 (オフィスインフォメーションシステム、e-ビジネスモデリング 特集 学生論文)”, 電子情報通信学会論文誌 D 情報・システム, J95-D(3), 549-558 (2012).
- 12) 大学法人同志社大学, 株式会社三井物産戦略研究所, “平成 20 年度～平成 22 年度成果報告書エネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発/自律分散最適化アルゴリズムを用いた省エネ型照明システムの研究開発”, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構成果報告書, Technical Report 20110000000875, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, (2011).
- 13) 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(629), 865-871 (2008).
- 14) 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, 1101-1104 (2008).
- 15) 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>.
- 16) 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, 85(5), 346-351 (2001).