

## Visualization System of the Feasibility of Individual Illuminance in Intelligent Lighting System

Hiroataka ITO<sup>\*</sup>, Mitsunori MIKI<sup>\*\*</sup>, Keiko ONO<sup>\*\*\*</sup> and Yoshihiro KASAHARA<sup>\*</sup>

(Received January 10, 2012)

We have proposed an Intelligent Lighting System that provides required illuminance for required locations. The Intelligent Lighting System is controlling lighting to realize illuminance required by users. However, when the target illuminance among nearby users differs greatly, it may be physically difficult to realize the target illuminance of many users. Therefore, it is desirable for a user to be able to check the feasible illuminance. In this research, we propose a system for visualization of the estimated range of the feasible illuminance. By using the proposed system, users can check the range of feasible illuminance.

**Key words** : light control, optimization, office environment, illuminance, visualization

キーワード : 照明制御, 最適化, オフィス環境, 照度, 可視化

### 知的照明システムにおける個別照度の実現範囲可視化システム

伊藤 博高, 三木 光範, 小野 景子, 笠原 佳浩

#### 1. まえがき

近年の情報技術の発展や環境変化により, オフィスワーカーの知的生産性, 創造性および快適性を向上させるために, オフィス環境が果たすべき役割や効果について見直す必要が出てきている<sup>1)</sup>. オフィス環境がワーカーの生産性に与える効果に関する研究は広く行われており, オフィス環境を改善することにより, 生産性が向上すると報告されている<sup>2, 3)</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有効であると言及されている<sup>4)</sup>.

このような観点から, 著者らは個別照度を提供する照明システム(知的照明システム)を提案している<sup>5)</sup>. 知的照明システムは, ネットワークに接続された制御装置搭載の照明器具, 照度センサ, および電力センサから構成している. 制御装置が照度センサからの照度情報, および電力センサからの消費電力情報に基づき,

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

Telephone:+81-774-65-6924 E-mail:hito,ykasahara@mikilab.doshisha.ac.jp

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

Telephone:+81-774-65-6930,6780,Fax:+81-774-65-6716 E-mail:mmiki@mail.doshisha.ac.jp

<sup>\*\*\*</sup> Department of Electronics and Informatics, Ryukoku University, Kyoto

Telephone:+81-775-43-7495 E-mail:kono@rins.ryukoku.ac.jp

最適化手法により各照明器具を制御することによって、任意の場所にユーザが要求する明るさを提供する。現在は、複数のオフィスビルにプロトタイプシステムを導入し、実用化に向けた検証実験を行っている。

導入している知的照明システムでは、ユーザが Web ユーザインタフェースを用いて照度センサに目標照度を設定し、照明がその目標照度を満たすように光度を変更していく。照明が必要な場所に必要な明るさを提供することにより、省エネルギー効果があることを確認している<sup>6)</sup>。

しかしながら、近くに在席しているユーザ同士の目標照度が一定値以上異なる場合など、各ユーザの目標照度をすべて満たすことが物理的に困難な状況も生じる。このような場合、ユーザは目標照度を満たせていないことに対して、知的照明システムが機能していないと判断し、ストレスを感じる可能性がある。また、目標照度が満たされない場合において、ユーザは少しでも照度を自身の要求する照度に近づけるために、目標照度に過剰な値を設定する場合もある。その際、過剰な目標照度を設定しているユーザの周囲のユーザには明るすぎる、あるいは暗すぎる照度環境となる場合もあり、執務に支障が出る可能性がある。そのため、実現可能な目標照度をユーザが判断できることが望ましい。

そこで本研究では、実現可能な目標照度の範囲をシミュレーションにより推定し、その範囲の可視化を行うことで、実現可能な目標照度をユーザが判断できるようにする。

## 2. 知的照明システム

### 2.1 知的照明システムの概要

知的照明システムとは、それぞれの照明器具の協調動作によってユーザの要求する照度（目標照度）を満たすシステムである。複数の照明器具と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により構成している。各照明器具には制御装置を搭載しており、各照明器具がそれぞれ各ユーザの目標照度を満足させ、かつ消費電力量を最小化する光度へと自律的に変化さ

せる。知的照明システムでは、照明が照度センサに及ぼす明るさの大きさを回帰分析により学習することで、照明の光度を最適なパターンへと迅速に変化させることを可能としている。以下、照明が照度センサに及ぼす明るさの大きさを影響度と呼ぶ。

### 2.2 回帰分析による影響度の把握

知的照明システムにおいて照明の光度を最適なパターンへと迅速に変化させるためには、照明が照度センサに及ぼす影響度の把握が重要となる。なぜなら、照度センサに及ぼす影響度を把握することで、その影響が大きい、すなわちその付近にある照度センサに応じた光度変化を行えるためである。

そこで知的照明システムでは、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、式 (1) 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。

$$y_j = r_{ij} \times x_i + \beta \quad (1)$$

$y$ :観測値,  $x$ :説明変数,  $r_{ij}$ :回帰係数  $\beta$ :定数項

式 (1) 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。そこで、知的照明システムでは照明の光度変化量を説明変数  $x_i$  とし、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。なお、回帰分析の手法として最小二乗法を用いる。これにより、照明が照度センサに及ぼす影響度を回帰係数として数値化することが可能となる。

### 2.3 目的関数

知的照明システムは照度センサの目標とする照度（目標照度）を満たし、かつ電力量が最小となるよう照明の光度を自律的に求める。すなわち、これらを目的関数に定式化する必要がある。照明  $i$  の目的関数を式 (2) に示す。

$$f_i = P + w \sum_{j=1}^n g_{ij} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

$$g_{ij} = \begin{cases} 0 & It_j < Ic_j < 1.06 \times It_j \\ R_{ij}(Ic_j - It_j)^2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

$n$ : 照度センサの数,  $m$ : 照明の数,  $w$ : 重み

$P$ : 消費電力,  $Ic$ : 現在の照度,  $It$ : 目標照度,  $T$ : 閾値

$r$ : 照明  $i$  に対する照度センサ  $j$  に関する回帰係数

照明の光度を設計変数とし, 式 (2) の関数  $f_i$  を最小化することを目的とする.  $f_i$  は現在の照度  $Ic$  と目標照度  $It$  の照度差を表す  $g_j$  と消費電力量  $P$  から成る.

$g_j$  は現在の照度が目標照度を下回っていた場合および現在の照度が目標照度の 1.06 倍を上回っていた場合, かつ, 回帰係数  $r$  がある程度大きい (閾値  $T$  以上) 場合に加算される. これは, 人間の目には認識できない照度変化範囲は, 照度の 0.92~1.06 倍と報告されているためである<sup>7)</sup>. これにより, 回帰係数が低い照度センサが目標照度を下回っていた場合には目的関数値は加算されない. ゆえに, 回帰係数の高い, すなわちその照明が与える影響の強い照度センサにのみ最適化の対象を絞ることができる. なお, 回帰係数の閾値には 0.1 を用いる. これは予備実験により定めた値である.

消費電力量  $P$  は電力計から取得する. また,  $g_j$  には重み  $w$  を乗算しており, 重み  $w$  の設定によって目標照度への収束を優先するか, 消費電力の最小化を優先するかを設定することができる. なお, 重み  $w$  には 1.0 を用いる. この値より大きくすると実現照度と目標照度の差は少なくなるが, 消費電力は増加する. 一方, この値より小さくすると消費電力はより最小化されるが, 実現照度と目標照度の差は大きくなる. ここでは, 予備実験により実現照度と目標照度の差を 50 lx にする基準で求めた値がこの値である.

## 2.4 オフィスへの導入

現在, 我々は知的照明システムの実用化に向けて多くのオフィスへ導入を行い, 検証実験を行っている. 知的照明システムは, システムの制御形態として分散制御方式と集中制御方式の双方を用いることができる. 導入したシステムは, 集中制御方式を採用し, 1 台のコンピュータですべての照明器具を制御するため, そのコンピュータが知的照明システムの制御に用いる各照明の光度情報や照度センサの照度情報などのすべての情報を管理している. また, ユーザは知的照明システムの Web ユーザインタフェース (以下 UI) を用いて目標照度の設定を行う. UI を Fig. 1 に示す.

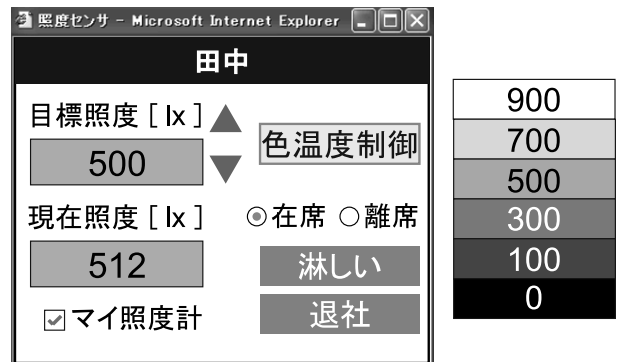


Fig. 1. UI of Illuminance Sensor.

この画面においてユーザは目標照度の変更, 現在照度の確認および在席離席の設定を行う. 目標照度の変更にはアップダウンボタンを押すことにより 50 lx 刻みで設定できる. また, 目標照度の数値をクリックすることで Fig. 1 右側のプルダウンメニューが表示され, その中から目標照度を選択することも可能である. その他に, 照度センサ UI では照明の色温度の制御を行う画面への遷移ボタンや, 目標照度の設定されていないユーザの照度センサに最小の目標照度を設定する淋しいボタンを実装している. 最小の目標照度を設定することで, 照明は消灯している状態から最小点灯光度で点灯するため, 周囲を少し明るくすることができる.

検証実験においても, 知的照明システムはユーザが要求する照度を実現し, 従来の照明の消費電力量と比

較して50%程度削減が可能であるという良好な結果を出している<sup>6)</sup>。

## 2.5 導入により生じた課題

オフィスでの検証実験において、ユーザが要求する目標照度を物理的に満たせない状況も存在した。物理的に満たせない状況とは、照明の制御限界を超えた実現不可能な明るさを要求している場合、あるいは近くに在席するユーザ同士の目標照度が一定値以上異なる場合である。知的照明システムでは、天井照明の制御を行っているため、隣り合う場所に一定値以上異なる目標照度をそれぞれ実現することは困難であり、照明の消費電力量および各照度センサの目標照度と照度の誤差を最小化する制御を行っているため、照度はその最適化された値に収束する。

ユーザは目標照度を満たせていない場合、システムが機能していないと判断し、ストレスを感じる可能性がある。また、ユーザが目標照度に要求する照度以上の過剰な値を設定するという事も生じている。目標照度に過剰な値を設定することにより、そのユーザの周囲のユーザに影響が生じる可能性もある。この問題は、周囲のユーザの目標照度を確認するのに手間がかかることや、目標照度がどの範囲まで満たすことができるかを確認できないことに起因すると考えられる。そのため、知的照明システムが実現可能な各ユーザの目標照度の範囲を推定する。この範囲を照度実現範囲と呼ぶ。そして、システムがユーザに照度実現範囲を提示することにより、この問題を解消する。

## 3. 照度実現範囲の可視化

### 3.1 照度の推定

照度センサが実測する照度に影響を及ぼす要素には、知的照明システムが制御を行っている照明による照度とそれ以外の照明や太陽光などの外光による照度がある。知的照明システムの制御により実現可能な照度範囲を推定するには、これらの要素を推定する必要がある。

照度は逐点法により式(3)で表される<sup>8)</sup>。

$$I = \frac{L}{A \times \cos \theta} \oint_{S_e} \frac{dS_e \cos \theta \cos \delta}{p^2} \quad (3)$$

$I$ :照度 [lx],  $L$ :光度 [cd],  $S_e$ :光源面

$A$ :光源面の面積 [ $m^2$ ],  $p$ :光源との距離 [m]

$\theta$ :光源面と受照点との仰角 [rad]

$\delta$ :光源と被照面との仰角 [rad]

式(3)より、照度および光度は線形関係にあることがわかる。また、式(3)の各項は、光度を除き、光源の形状や光源との位置関係などに応じて変化する値である。そのため、これらが変化しない環境下においてはこれらの係数は定数とみなせ、式(3)は式(4)で表すことができ、各照明の光度と影響度を用いることで照度を推定することが可能となる。

$$I = R \times L \quad (4)$$

$I$ :照度 [lx],  $R$ :影響度 [lx/cd],  $L$ :光度 [cd]

なお、知的照明システム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しており、影響度の値として回帰係数を用いている。

外光による照度を推定するには、まず知的照明システムの制御に用いている各照明の最新の光度情報と回帰係数から知的照明システムが制御を行っている照明による照度の推定を行う。そして、各照度センサが実測した最新の照度から推定した照度を差し引くことにより抽出する。

式(5)に外光を導出する式を示す。

$$D_j = I_j - \sum_{i=1}^n (R_{ij} \times L_i) \quad (5)$$

$D$ :外光による照度 [lx],  $I$ :照度 [lx]

$R$ :影響度 [lx/cd],  $L$ :光度 [cd]

推定した外光をそれぞれの場所の照度の下限值として知的照明システムの制御シミュレーションを行う。

### 3.2 シミュレーションによる照度実現範囲の推定

シミュレーションでは以下の処理を繰り返すことにより照度実現範囲の推定を行う。

1. 初期化パラメータ（初期光度，外光照度，目標照度，回帰係数など）を設定
2. 照度実現範囲を求めるユーザの目標照度を最大（最小）値に設定
3. 知的照明システムの制御と同様の最適化を実行
4. 収束後の照度が影響のあるユーザの目標照度を実現している場合，その時の照度実現範囲を求めるユーザの目標照度を，実現範囲の最大（最小）値に設定し，終了
5. 収束後の照度が影響のあるユーザのうち1人以上の目標照度を実現していない場合，その時の照度実現範囲を求めるユーザの照度を目標照度に設定し，項目3に戻る

なお，項目4および5に記した照度実現範囲を求めるユーザに影響のあるユーザは，照度実現範囲を求めるユーザに影響を与えている照明から同様に影響を受けているユーザである．照度実現範囲を求めるユーザの照度センサと各照明の回帰係数に対して，閾値以上の照明に影響のある照明とし，それらの照明と各照度センサの回帰係数に対して，閾値以上の照度センサを持つユーザに影響のあるユーザとする．なお，閾値に関しては，2.3節の目的関数に用いた閾値と同様の0.1とした．

以上の処理により求めた照度実現範囲の最大値および最小値を用いて範囲の可視化を行う．

### 3.3 UIへの実装

求めた照度実現範囲をユーザが把握するには，その範囲をユーザに提示する必要がある．そこで本研究では，現在使用しているUIを基として照度実現範囲を実装する．Fig. 2および3に照度の実現可能範囲を実装したUIを示す．

照度の実現可能範囲を実装したUIは，従来のUIのホーム画面から目標照度変更画面に遷移し，その画面にて目標照度の設定を行うようにしている．Fig. 2の目標値変更ボタンを押すことにより，その時点での照度実現範囲の推定を行い，その範囲を実装したFig. 3

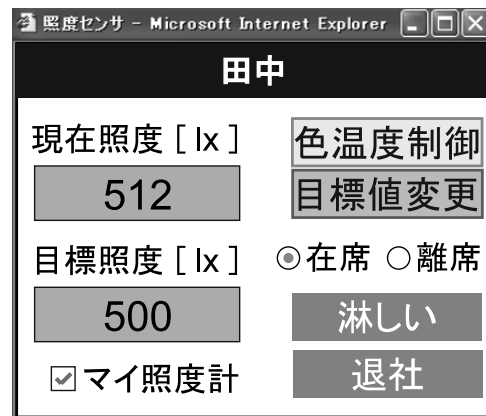


Fig. 2. Home Screen.

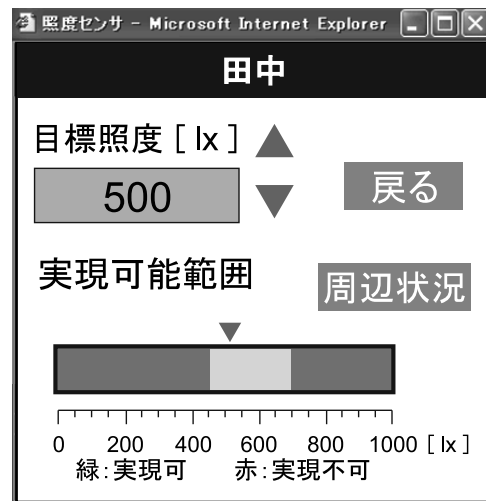


Fig. 3. Screen to Change the Target Illuminance.

の目標照度変更画面が表示される．照度の実現可能範囲は緑と赤のバーで表し，緑は実現可能な範囲，赤は実現不可能な範囲とした．また，周辺状況ボタンでは，影響のあるユーザの目標照度および実現照度の確認を行うことができる．Fig. 4に周辺状況確認画面を示す．

これにより，どのユーザが設定している目標照度が自身の照度実現範囲に影響しているかを把握することができる．例えば，Fig. 4では，低めの照度を要求しているユーザが多いため，高い照度は実現しにくいということを判断することができる．

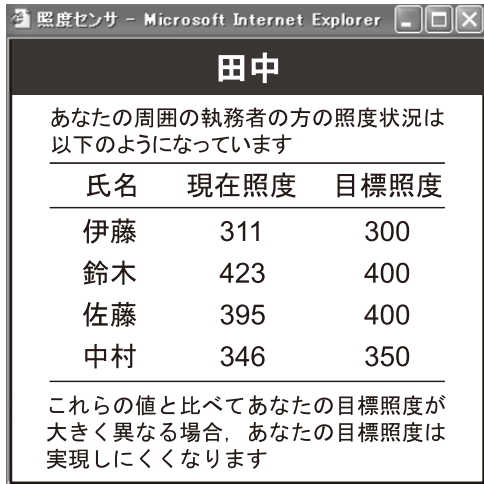


Fig. 4. Screen to Check the Circumstances Surrounding.

4. 照度実現可能範囲の有効性の検証

4.1 実験概要

本実験では、被験者が従来 UI と実現照度範囲の可視化を行った提案 UI をそれぞれ使用し、各被験者が執務に最適と思われる目標照度を設定し、それぞれ 15 日間普段と同様の執務を行う。被験者は、20 代前半の男女 9 名とし、実験終了後に以下の項目についてアンケートを実施した。

- アンケート項目 1  
目標照度の実現範囲は役立ったか
- アンケート項目 2  
従来の UI と提案 UI のどちらがよかったか

4.2 実験環境

本実験を行うにあたり、実執務空間に知的照明システムの構築を行った。実験環境を Fig. 5 および 6 に示す。Fig. 5 は実験環境を天井から見た平面図であり、Fig. 6 は側面図である。Fig. 5 に示すように、10 台のデスクの真上にそれぞれ照明器具を設置する。また、デスクの大きさは横 1.1 m、縦 0.7 m である。

4.3 結果および考察

アンケート項目 1 および 2 における結果を Fig. 7 および 8 に示す。

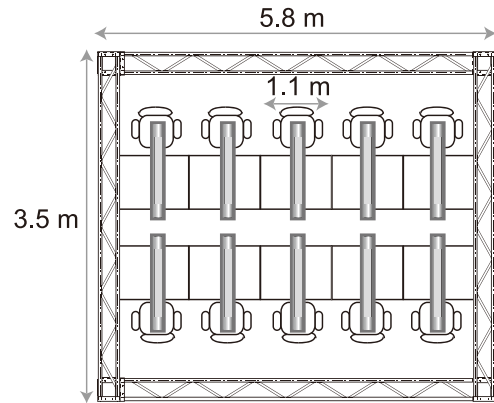


Fig. 5. Top View.

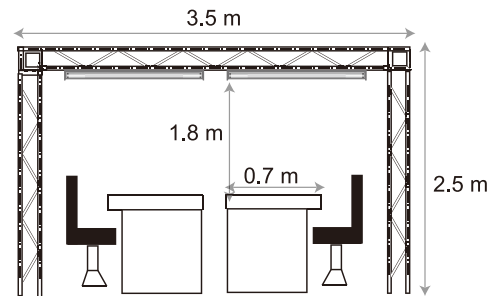


Fig. 6. Side View.

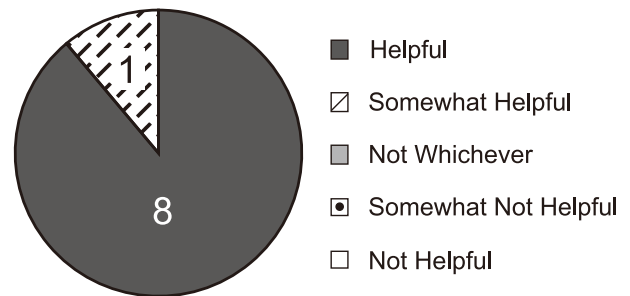


Fig. 7. Result of Evaluation Item 1.

アンケート項目 1 の結果、目標照度の実現範囲に関しては、全被験者から役立ったという回答が得られた。被験者からは、従来の UI を使用していた場合には、自身の設定する目標照度が実現できるかどうかを判断することが容易ではなかったため、設定した目標照度を実現できていない場合もあったが、目標照度の設定の際に実現範囲がわかることで、入力を目安となったという意見が得られた。

また、アンケート項目 2 の結果、9 名中 6 名の被験

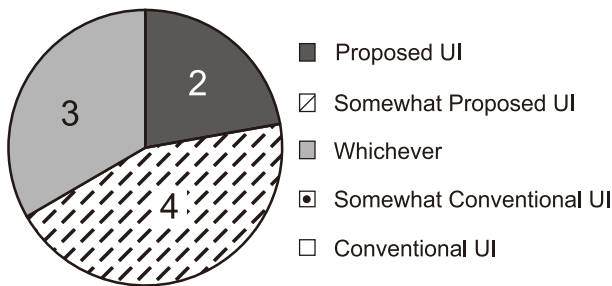


Fig. 8. Result of Evaluation Item 2.

者から従来 UI より提案 UI の方がよかったという回答が得られた。被験者からは、実現照度範囲を可視化することにより、なぜ目標照度を満たせなかったのかわかったという意見やわかりやすく使いやすくなったという意見が得られた。また、どちらでもよいと回答していた被験者からは、目標照度を実現範囲内に設定できていることが多く、あまり気にしなかったという意見が得られた。

以上の結果より、知的照明システムにおいて実現照度範囲を可視化することは有効だと考えられる。

## 5. まとめ

本稿では、知的照明システムにおける目標照度の実現可能な範囲の推定を行い、ユーザインタフェースへの可視化を行った。目標照度の実現可能な範囲の可視化を行ったユーザインタフェースを数名の被験者に使用してもらったところ、従来のユーザインタフェースよりわかりやすく使用しやすいという意見が得られた。

この手法を用いることにより、ユーザが要求する照度を満たせない原因を容易に判断できるようになり、目標照度が実現できていない場合に生じる知的照明システムに対するストレスは軽減されることが考えられる。

## 参考文献

- 「クリエイティブ・オフィス推進運動実行委員会」の開催について  
<http://www.meti.go.jp/press/20070615008/20070615008.html>, 参照 Nov.30.2011.
- 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, オフィスワークの生産性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 2006, Vol.1, No.1322, pp.151-156, 2006
- 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 No.568, pp.33-39, 2003
- Peter R. Boyce, Neil H. Eklund, S. Noel Simpson, Individual Lighting Control: Task Performance, Mood and Illuminance JOURNAL of the Illuminating Engineering Society, pp.131-142, 2000
- 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, Vol.22, No.3, pp.399-410, 2007
- 三木 光範, 加來 史也, 廣安 知之, 吉見 真聡, 田中 慎吾, 谷澤 淳一, 西本 龍生, 実オフィス環境における任意の場所にユーザが要求する照度を提供する知的照明システムの構築, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J94-D, No.4, pp.637-645, 2011
- 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, No.5, pp.346-351, 2001
- 社団法人 照明学会, 照明ハンドブック, オーム社, 2003