

# Evaluation of Illuminance Providing Performance in Intelligent Lighting Systems Using Narrow Beam Lighting

Ryoto TOMIOKA<sup>\*\*</sup>, Mitsunori MIKI<sup>\*</sup>, Shinya DAINAKA<sup>\*\*</sup>, Hiroto AIDA<sup>\*</sup>

(Received October 20, 2017)

We proposed an Intelligent Lighting System (ILS) that provides required illuminance to each user, and introduced this system into actual offices. From demonstration experiments in actual offices in Japan, we reported that suitable illuminance differs according to the person and the type of work in which that person is engaged. In the ILS, we generally mount wide-range angled lighting fixtures on the ceiling at general intervals (1.8 m). However, in this installation method, the system cannot provide the required illuminance to each user in some cases because of wide-range lighting distribution and relations between the lighting layout and office layout. This paper presents the results of an evaluation of illuminance-achieving accuracy when changing the lighting distribution and setting intervals. In addition, we verified an ideal relative layout between lighting fixtures and desks, and measured the illuminance uniformity at each desk when using narrow-distribution luminaires. This research contributes ILS to improve illuminance and achieve accuracy.

**Key words :** Intelligent Lighting System, office, system evaluation

**キーワード :** 知的照明システム, オフィス, システム評価

## 知的照明システムにおける狭角型照明を用いた照度実現精度の検証

富岡 亮登, 三木 光範, 提中 慎哉, 間 博人

### 1. 序論

近年, オフィス環境が執務者に及ぼす影響についての研究が広く行われており, オフィス環境を改善することが, 執務者の知的生産性の向上につながると報告されている<sup>1)</sup>. オフィス環境のうち, 光環境に着目した研究では, 個々の執務者に対し, 執務に最適な明るさ(照度)を提供することがオフィス環境の改善に有効であることされている<sup>2)</sup>. また, オフィスビルの増加により, オフィスビルでのエネルギー消費量は年々

増加傾向にあり, 問題となっている. オフィスビルにおける全エネルギー消費量のうち, 約25%を照明が占めている<sup>3)</sup>. したがって, オフィス照明の省電力化が, オフィス全体のエネルギー消費量の削減につながる.

そこで著者らは, オフィス環境において, 執務者の知的生産性の向上と消費電力の削減を目標として, 最小限の電力で, 各執務者が要求する照度を個別に提供する知的照明システムの研究を行っている<sup>4-6)</sup>. 実用化に向けた実証実験として, 知的照明システムのプロ

\* 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:+81-06-6321-6952, Fax:+81-06-6321-6952, E-mail:rtomioka@mikilab.doshisha.ac.jp

トタイプを複数のオフィスに導入した。実証実験の結果、大半の執務者が JIS 基準の 700 lx よりも低い照度を要求し、さらに約半数の執務者は IES recommended light levels: Normal work space の 500 lx よりも低い照度を要求した。また、照明の消費電力においては、知的照明システム導入前の通常の照明環境と比べ、40%程度の削減効果が得られた<sup>7)</sup>。

実証実験を行ったオフィスを含め、従来のオフィスの執務エリアでは標準的な照明環境として、フロア全体に一律に同じ照度を提供するため、広い配光を持つ照明を利用する。このような環境に知的照明システムを導入した場合、照明 1 灯あたりが照度を与える範囲が広いため、隣り合う執務者が大きく異なる照度を要求した場合に同時に執務者が希望する照度を提供できない問題が生じる。

そこで本研究では、照明の配光角と設置間隔を変更した様々な環境下において、個別照度の実現精度を比較した。知的照明システムでは執務者が要求する照度を満たすと同時に、消費電力の最小化も目指すため、照明環境の違いによる消費電力量に関する考察を行う。これらの検証により、標準的な執務エリア以外のエリアに知的照明システムを導入する際のシステムの性能を検証することもできる。知的照明システムに使用する照明環境を見直すことで、個別照度実現精度の高い知的照明システムの構築を目指す。

## 2. 知的照明システム

### 2.1 知的照明システムの概要

知的照明システムはオフィスの天井照明を個別に制御し、照明の明るさを変化させることにより、各執務者が要求する照度を個別に最小の消費電力で任意の場所に提供するシステムである。知的照明システムでは照明の明るさの指標として、鉛直下方向の光度を用いる。以降、本研究では照明の光度は鉛直下方向の光度のことを指す。

知的照明システムの構成を Fig. 1 に示す。知的照明システムは、複数の調光可能な照明器具、照明制御装置、執務者の机上面の照度を測定する複数の照度センサ、電力計を一つのネットワークに接続して構成す

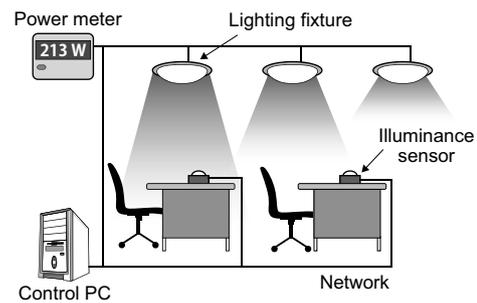


Fig. 1. Constitution of ILS.

る。照明制御装置は、執務者が予め設定した要求照度（以降、目標照度と呼ぶ）の情報、各照度センサから取得する机上面の照度情報、および電力系の電力情報を用いて現在の照明の点灯パターンの有効性を評価する。点灯パターンの評価の後、照明の明るさに微小な変更を加え、変更後の点灯パターンを再び評価し、評価結果を比較することにより、変更後の照明の明るさを採用するかを決定する。これを知的照明システムの制御の 1 ステップとする。このステップを繰り返すことにより、各執務者が要求する照度を省電力で実現する照明点灯パターンを実現する。なお、目標照度は、知的照明システムの動作中でも、ユーザインターフェイスを通じて随時変更が可能である。

知的照明システムにおける照明制御は、各執務者の目標照度を実現することと、消費電力を最小化の 2 つを目的とした最適化問題として捉える。制御アルゴリズムには、大域的最適化問題のアルゴリズムである Simulated Annealing (SA) を基礎とし、回帰係数によって近傍設計を行う手法を組み込んだ適応的近傍アルゴリズム<sup>6)</sup>や、高速に照明制御を行うための数理計画法を用いたアルゴリズム<sup>7)</sup>を用いることができる。本稿では、基礎的な知的照明システムを用いて個別照度実現精度の検証を行うため、SA を用いた適応的近傍アルゴリズムを用いた。

### 2.2 実オフィスに導入した場合の問題点

通常のオフィス照明は、部屋全体を均一に照らすように設計されている。このため、オフィスでは一般的に、配光角が広い照明（ベースライト）が天井照明器具として採用される。ベースライトを用いて知的照明

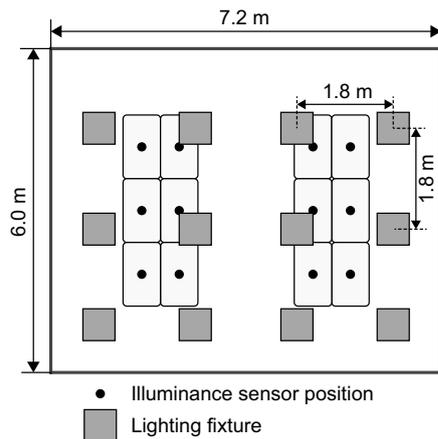


Fig. 2. Floor plan view of standard small office environment.

システムを構成した場合、1台の照明器具が照度を提供する範囲が広範囲となる。そのため知的照明システムの照明制御アルゴリズムに基づいて点灯パターン最適化を行っても、すべての執務者の目標照度を実現できない場合がある。

オフィスの執務エリアには Fig. 2 に示すような対向島型レイアウトが広く用いられる。例えば、日本のオフィスでは一般的に 120 cm × 70 cm のデスクが用いられる。また、標準的なオフィスの天井高は 2.6 m であり、床からデスクの作業面までの高さは、JIS で推奨されている 0.75 m が広く採用される。これらの標準規格から、照明器具と作業面の鉛直方向の距離を 1.85 m と考えると、1/2 照度角が 110° 程度の標準的な照明器具では、鉛直下方向の照度の 1/2 の照度が得られる範囲が、直径約 4 m となる。このような照明環境とデスクレイアウトが、知的照明システムの目標照度実現精度が悪化する要因となっている。

また、近年のオフィスでは、会議室やサイレントルームなどに標準執務エリアとは異なる照明環境を採用することがある。例えば会議室では、照度を抑えて落ち着いた雰囲気を演出するために配光角が狭いベースダウンライトのみで照明環境を構成することがある。著者らは、標準執務エリア以外のエリアにも知的照明システムの導入を検討している。しかし、従来の知的照明システムでは、配光角の広い汎用的な照明が設置さ

Table 1. Lighting fixtures used in the experiment.

	Angle [deg]	Flux [lm]	Type
Wide	110	3430	Baselight
Middle	49	2220	Downlight
Narrow	26	1300	Downlight

れた環境のみを想定していたため、様々なエリアに知的照明システムを導入するためにはそれ以外の照明環境における知的照明システムの動作を検証する必要がある。これらの問題から、照明の配光角と設置間隔が、知的照明システムの照度実現精度に与える影響を検証する必要がある。

### 3. 照明の配光角と設置間隔を変更した場合の個別照度実現精度の検証

#### 3.1 実験概要

知的照明システムに用いる照明の配光角と設置間隔が個別照度実現精度に与える影響を評価するため、配光角と設置間隔を変えた種々の環境下で知的照明システムを動作させ、目標照度の実現度合いを比較する実験を行った。

実験は Fig. 2 に示す小規模な模擬オフィス環境で行った。配光角の条件を変更するため、照明には Table 1 に示した種々の配光角を持つ照明器具を用いた。また、天井への照明の均等な設置間隔は、0.6 m 間隔のグリッド天井システムへの設置を想定し、0.6 m, 1.2 m, 1.8 m の均等な配置間隔とした。Fig. 2 の照明レイアウトは、1.8 m 間隔で照明を設置した際の一例である。照明の設置間隔が広い場合、照明とデスクの相対位置関係が、個別照度実現精度に影響を与えるため、照明に対してデスクを 0.6 m 間隔で照明をずらし、照明とデスクの全ての相対位置関係のもとで実験を行った。Fig. 3 に異なる相対位置関係を 2 例示す。12 席全てに執務者が在席する状況を想定し、各デスクの目標照度は実オフィスでの知的照明システムの実証実験で頻りに選択された、300 lx, 500 lx, 700 lx のいずれかにランダムに設定した。

個別照度実現精度は、上記の各照明条件で、ランダムに座席を設定して 100 回の試行を行い、式 (1) に示

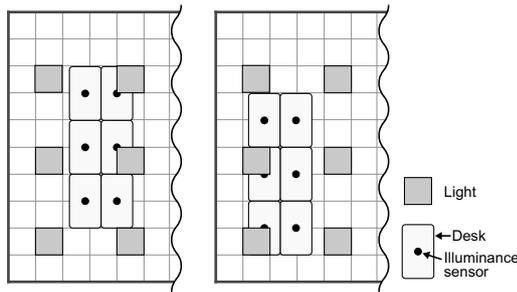


Fig. 3. Different relative positions between lighting fixtures and desks in the floor plan view.

す照度平均誤差率を算出することにより評価した。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|\Delta L|}{L_t_j} \times 100 \quad (1)$$

$$\Delta L = \begin{cases} 0 & L_t_j \leq L_c_j \leq L_t_j + L_a \\ L_t_j - L_c_j & L_c_j \leq L_t_j \\ L_t_j + L_a - L_c_j & L_c_j > L_t_j + L_a \end{cases}$$

$E$ : Average difference rate of target and actual illuminance [%],

$n$ : Num. of sensor,  $j$ : Sensor index,

$L_c$ : Actual illuminance [lx],

$L_t$ : Target illuminance [lx],  $L_a$ : Allowance [lx]

### 3.2 実験結果と考察

Table 2 と Fig. 4 にそれぞれの照明環境における照度平均誤差率を示す。また Fig. 4 の Min は前節で述べた 100 通りの目標照度分布のうち、最も目標照度と提供照度の誤差が小さかったデータの値を、Max は目

Table 2. Difference rate of target and actual illuminance yielded by the experiment.

Light (Angle)	Installation interval		
	0.6 m	1.2 m	1.8 m
Wide (110°)	16.8	17.2	16.4
Middle (49°)	8.3	8.1	-
Narrow (26°)	0.1	13.7	-

標照度と提供照度の誤差が最も大きかったデータの値を示す。なお、中角配光を持つ照明 (Middle) および狭角配光を持つ照明 (Narrow) を 1.8 m 間隔で均等に設置した場合、レイアウト条件によっては照明によって照度が提供できない位置が存在する。したがってこれらの条件は適切でない照明環境と定義し、検証実験は行っていない。広角配光を持つ照明 (Wide) を、オフィスにおいて全執務者に均一照度を提供する際の設置間隔である、1.8 m 間隔で設置し、知的照明システムを動作させた場合、 $E$  は 16.4 % となった。このときの各執務者の目標照度と、照度平均誤差率  $E$  を測定した 300 ステップ目における、各照度センサの照度分布および照明の点灯パターンは Fig. 5 の通りである。照度平均誤差率を下げることを目的に、110 度の配光を持つ Wide 照明の設置間隔を 1.8 m よりも小さくしても、平均誤差率に変化は見られなかった。

検証条件の中で、最もよい平均誤差率を示したのは、26 度の配光を持つ Narrow 照明を 0.6 m 間隔で設置した環境であった。狭い配光を持つ照明を狭い間隔で設置するため、Fig. 6 に示すように細かい制御が可能となる。この照明の設置間隔を 1.2 m 以上にすると、照度平均誤差率が著しく悪化し、デスクによっては照度誤差率が 70 % を超える場合もあった。これは、照明の配光角が狭く、光が提供されない着座位置が存在するためである。

ダウンライトの中では広めの配光である Middle 照明を用いた環境では、1.2 m, 1.8 m で設置したときの照度平均誤差率が同程度となった。したがって、Middle

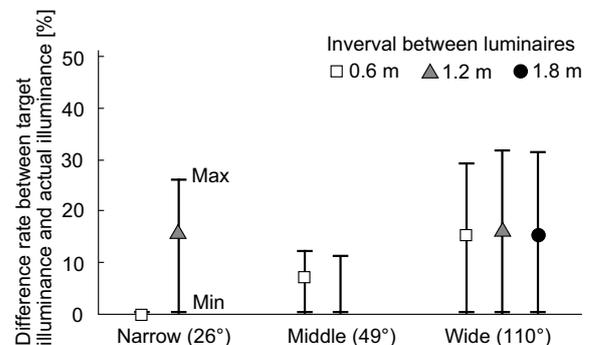


Fig. 4. Difference rate of target and actual illuminance yielded by the experiment.

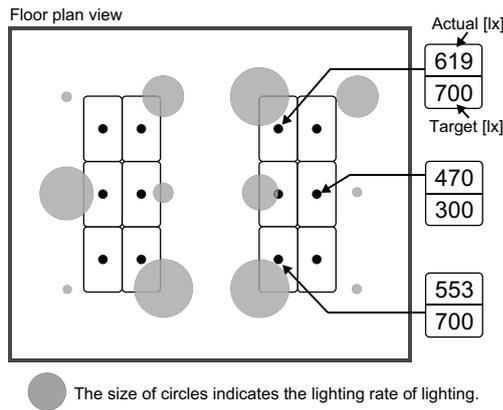


Fig. 5. Distribution of illuminance and lighting with wide angle lights (interval of 1.8 m).

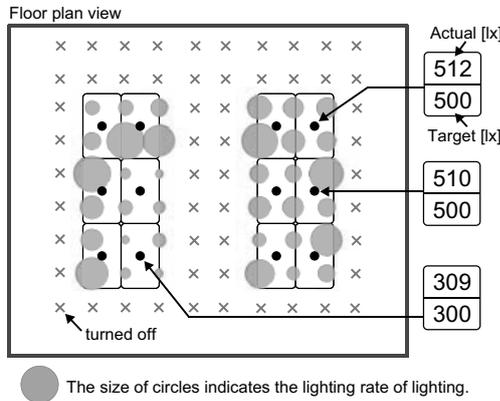


Fig. 6. Distribution of illuminance and lighting with narrow angle lights (interval of 0.6 m).

照明の適切な設置間隔は 1.2 m であると結論付けることができる。

Table 3 に、上記と同じ実験環境において算出した消費電力値を示す。本検証実験により、従来の Wide 照明を 1.8 m で設置した場合よりも、Narrow 照明を 0.6 m 間隔で設置した場合のほうが、消費電力が小さくなることが明らかとなった。したがって、標準執務エリアに狭角型照明を導入することは、個別照度実現精度の向上だけでなく、省電力化にも貢献する。

Table 3. Power consumption in the experiment.

Light (Angle)	Power consumption[W]		
	60 cm	120 cm	180 cm
Wide (110°)	637	550	578
Middle (49°)	130	87	63
Narrow (26°)	204	178	89

#### 4. 個別照度実現精度が高い知的照明システムに必要な狭配光照明の必要設置台数の検証

##### 4.1 実験概要

オフィスにおいて、個別照度実現精度が高い知的照明を構築する場合、配光角が狭い照明を狭い間隔で設置する必要があるが、この場合、照明の設置台数が増大してしまうという問題が挙げられる。しかし、Fig. 6 に示すように、机上面から遠い照明は消灯するため、予めシミュレーションによりデスクレイアウトに合わせて照明設置レイアウトを決定することで照明台数の増加を抑えることができる。

一般的なオフィス環境における必要な照明台数を検証するため、Fig. 7 に示す中規模オフィス環境において、知的照明システムの動作を行い、必要最小限の照明台数を比較する実験を行った。座席数は 40 席であり、全座席に執務者が在籍している状況を想定する。目標照度は 300 lx, 500 lx, 700 lx からランダムに設定し、100 回の試行を行った。

照明環境は、Table 1 の Wide 照明（一般的なベースライト）を 1.8 m 間隔で設置した環境と Narrow 照明（最も配光角が狭いダウンライト）を 0.6 m 間隔で設置した環境で比較した。Fig. 7 は 1.8 m 間隔で設置した照明レイアウトを示している。この場合の設置台数は 45 台であるが、設置間隔を 0.6 m 間隔にすると、Fig. 8 に示すように設置台数は 9 倍の 405 台となる。

##### 4.2 実験結果

前述した条件下で知的照明システムを動作させ、目標照度分布に関わらず常に点灯率が 0% の照明を不要照明とした。Fig. 8 の左側の環境の 405 灯のうち、不要照明を取り除くと、右の図のように 176 灯の環境となる。照明器具の設置位置とデスクの相対位置関係に

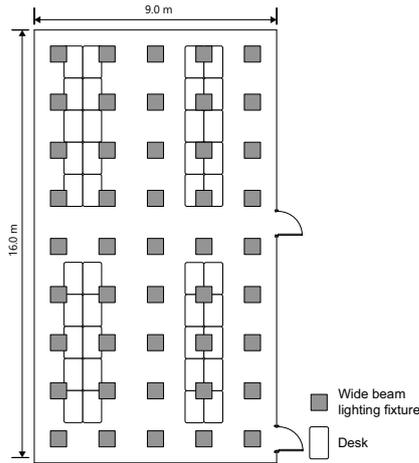


Fig. 7. Floor plan view of middle sized office environment with 40 desks and 45 base lights.

Table 4. Minimum number of necessary light.

Interval [m]	Angle [deg]	Number of luminaires	Number of necessary luminaires	Uniformity
1.8	110	45	45	0.73
0.6	26	405	80 ~ 176	0.89

より、不要照明の台数は異なるため、種々のレイアウトにおいて不要照明数を考慮することができる。Table 4 に必要最小限の照明台数を示す。

26°の狭角配光を持つ照明（Narrow）を設置した環境では、照明とデスクのレイアウトの関係により、照度センサ1台に対する照明台数が変わる。Fig. 8では、右側の島と左側の島で、照明とデスクの相対位置が異なる。左側の島では照度センサ1台あたり2灯の照明が、右側の島では照度センサ1台あたり3灯の照明が対応している。照明とデスクの相対位置関係を左側の島のように固定すると、照明の設置台数を最小限に抑えた上で個別照度実現精度の高い知的照明システムを構築できる。部屋全体で、左側の島のような相対位置になるようにデスクを配置すると、必要照明数は80灯となる。一方、部屋全体で右側の島のような相対位置関係になるようデスクを配置すると、必要照明は120灯となる。従って、配光角が狭い照明を用いて知的照明システムを構築する際は、照明とデスクの相対位置関係を調整することが重要である。

この場合の机上面A3領域における平均均斉度は0.9となるため、任意に個別の照度を提供する手法として

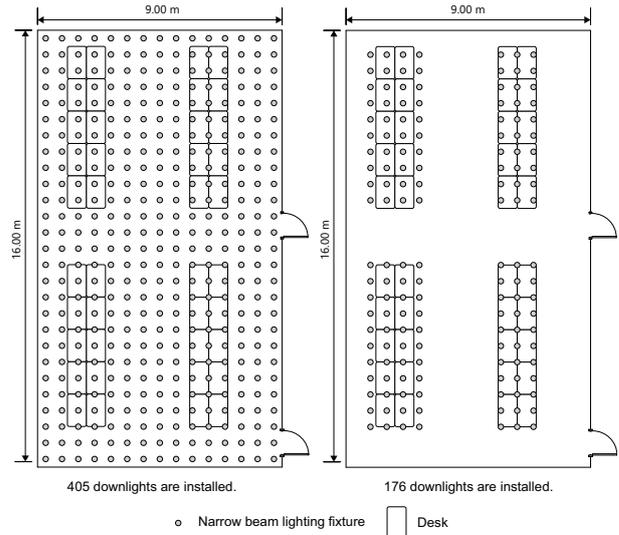


Fig. 8. Floor plan view of middle sized office environment with 40 desks and downlights.

タスクライトを用いる場合よりも高い均斉度を得ることができる。したがって、知的照明システムに用いる照明を広い配光を持つベースライトからダウンライトに変更する場合、予め照明レイアウトを決定することで必要な設置台数を高々3倍に抑えることができる。

近年のオフィスでは、火災報知器や照明、空調、スピーカなどの天井設備の設置を容易に行えるよう、グリッド天井システムが採用されることが多い。このような背景から、オフィスのデスクレイアウトが可変であるオフィスにおいても、デスクレイアウトに応じて照明レイアウトを変更する運用方法が考えられる。

## 5. むすび

本研究は、均一照度を提供する広い配光角を持つ照明を一般的な設置間隔である1.8 m間隔で設置した環境に知的照明システムを導入した場合、日本のオフィスで広く採用されている対向島型レイアウトのオフィスでは全ての執務者が要求する目標照度を同時に実現できない場合があるという問題に対し、知的照明システムに最適な照明配光特性と設置間隔についての検証結果を示した。さらに、今までに我々が知的照明システムを導入した標準的な執務エリアではなく、会議室やサイレントルームといった環境への知的照明システ

ムの導入を目指す上で、本研究による検証結果は知的照明システムに適した照明環境を構築する上で重要な意味をなす。

オフィスに合わせた照明環境を構築することで、フレキシブルな知的照明システム環境を構築できる。これにより、オフィスに知的照明システムを導入するメリットが更に高まり、さらに知的照明システムを応用する環境の幅が広がるため、本研究により知的照明システムの普及を進めることができると考えている。

### 参考文献

- 1) P.R.Boyce, N.H.Eklund, S.N.Simpson, “Individual Lighting Control Task Performance, Mood, and Illuminance”, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, **29**, 131-142 (2013).
- 2) B.Roisin, M.Bodart, A.Deneyer, P.D’Herdt, “Lighting Energy Savings in Offices Using Different Control Systems and Their Real Consumption”, *Journal of Energy and Buildings*, **40**, 514-523 (2008).
- 3) J. C. Lam, A. L. S. Chan, “Energy Audits and Surveys of Air-conditioned Buildings”, *Proc. Australian and New Zealand Architectural Science Association Conference*, **23** 49-54 (1995).
- 4) M. Miki, T. Hiroyasu, K. Imazato, “Proposal for an Intelligent Lighting System, and Verification of Control Method Effectiveness”, *Proc IEEE CIS*, **94**, 520-525 (2004).
- 5) F. Kaku, M. Miki, T. Hiroyasu, M. Yoshimi, S. Tanaka, T. Nishida, N. Kida, M. Akita, J. Tanisawa, T. Nishimoto, “Construction of Intelligent Lighting System Providing Desired Illuminance Distributions in Actual Office Environment”, *Artificial Intelligence and Soft Computing*, **6114**, 451-460 (2010).
- 6) M.Miki, K.Imazato, M.Yonezawa, “Intelligent Lighting Control Using Correlation Coefficient Between Luminance and Illuminance”, *Proc. IASTED Intelligent Systems and Control*, **497**, 078, 31-36 (2005).
- 7) S. Tanaka, M. Miki, T. Hiroyasu, M. Yoshikata, “An Evolutional Optimization Algorithm to Provide Individual Illuminance in Workplaces”, *Proc IEEE Int Conf Syst Man Cybern*, 941-947 (2009).