

Lighting Off Mechanism to Adapt to the Movement of Illuminance Sensors in Distributed Control Lighting System to Achieve the Illuminance of the Individual

Mitsunori MIKI^{*}, Yohei AZUMA^{**}, Keiko ONO^{***} and Takuro YOSHII^{****}

(Received April 19, 2012)

In distributed control lighting system, because each light has to know the influence between the luminance of each light and illuminance of each sensor by regression analysis, it cannot turn off the lights from the perspective of movement of the sensor. Hence, by performing movement detection of illuminance sensors, the system lets lights turn on and learns position relations again. As described above, we showed energy-saving to turn off lights according to the position of the sensors.

Key words : energy saving, lighting system, intelligent, optimization, office environment

キーワード : 省エネルギー, 照明システム, 知的, 最適化, オフィス環境

個別照度を提供する分散制御照明システムにおける照度センサの移動に適応する消灯メカニズム

三木光範, 東陽平, 小野景子, 吉井拓郎

1. まえがき

近年, 省エネルギー対策が広く検討されており, オフィスビルにおいても省エネルギーを目指す取り組みが推進されている. 中でもオフィスにおける照明の消費電力量は全体のおよそ 40%を占めており¹⁾, 照明

環境を改善することで消費電力量を大きく削減し省エネルギーに貢献することができる^{2, 3)}. 一方, オフィス照明がオフィスワークに及ぼす影響に関する研究も行われており, オフィス照明を改善することにより生産性が向上することが報告されている^{2, 4)}. 特に, 照明環境に着目した研究では, 執務に最適な明るさ(照

^{*} 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

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

^{***} Department of Electronics and Informatics, Ryukoku University, Kyoto
Telephone:+81-775-43-7495, E-mail:kono@rins.ryukoku.ac.jp

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

度)を個別に実現することでオフィス環境の改善に有効であると言及されている⁵⁾。

このような背景から、著者らはオフィス環境における照明環境に着目し、個々のオフィスワークの要求に応じた照度を省電力で実現する知的照明システムの研究を行なっている⁶⁾。知的照明システムは照明器具、制御装置、照度センサおよび電力センサから構成されており、照度センサおよび電力センサから得た情報を基に最適化手法により制御する。

また、さらなる省エネルギー性の向上を図るため、知的照明システムではオフィスワークに対して影響の小さい照明を消灯する消灯メカニズムを導入している。しかしながら、近年フリーアドレスオフィスというオフィスワークが席を自由に決めるオフィススタイルが登場し普及しつつある。フリーアドレスオフィスでは、可動テーブル席の運用や仕事内容に応じた席の移動等照度センサが移動し得る環境であるため、照度センサの位置が固定であることを前提とする従来の消灯メカニズムでは対応できない。そこで、本研究では照度センサの移動に適応した消灯メカニズムを提案し、その有効性について検証する。

2. 知的照明システム

2.1 知的照明システムの概念

知的照明システムは、Fig.1に示すように、照明、制御装置、照度センサおよび電力センサから構成されている。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量を基に、各照明に設置した制御装置が最適化手法を用いて照明の明るさを変化することで、オフィスワークの要求する照度を実現、および消費電力量の最小化を行う。

2.2 知的照明システムの制御

2.2.1 制御手法

知的照明システムでは、Simulated Annealing (SA)を基盤としたアルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient : ANA/RC)⁷⁾を用いている。SAは、現在の解から近傍の範囲内で近傍解を生成し、目的関数の改善が見られれば近傍

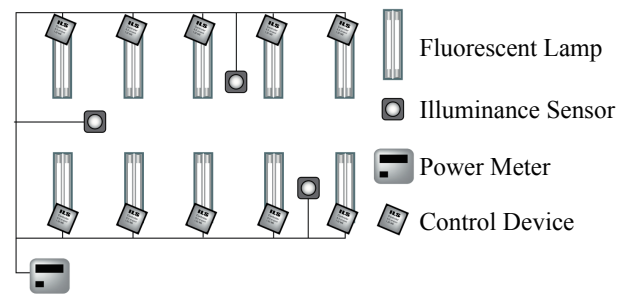


Fig. 1. The construction of a lighting fixture-driven smart lighting system.

解と現在の解を入れ替えるといった局所探索法の代表的な手法である。SAにおける設計変数を照明の明るさ(光度)とし、目的関数を消費電力量と目標照度から現在照度の差の総和として明るさを変化させながら、最適解の導出を行う。しかしながら、SAではランダムに光度を変化させるため最適解の導出に時間を要する。そのため、ANA/RCでは各照度センサに対する各照明の影響度を回帰分析を用いて学習し、影響度に応じて最適な近傍を選択する。これにより、迅速に目標照度を実現し、かつ消費電力量を最小とすることができる。

2.2.2 回帰分析による照度センサに対する照明の影響度の学習

SAにおける探索効率向上のため、ANA/RCでは回帰分析を用いることで各照度センサに対する各照明の影響度の学習を行う。回帰分析は、説明変数 x_i を変化させると観測値 y_j がどのように変化するかという2変量間の因果関係を説明する関係式(回帰式)を導出する手法であり、式(1)のように表される。

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

y_j :照度変化量 [lx], i :照明数, j :センサ数, r :回帰係数
 x :光度変化量 [cd], β :定数項, ε :誤差

式(1)に示す r_{ij} の大きさにより各照明と各照度センサにおける影響度の数値化が可能である。ここで、照度と光度の関係は式(2)のように一次線形関係で表される。そのため、ANA/RC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ことで、照度センサに対する各照明の影響度を学習する。なお、回帰分析には逐次最小二乗法 (Recursive Least Square Method : RLS 法) を用いる。

$$I = \frac{L}{d^2} + \beta \quad (2)$$

I :照度 [lx], L :光度 [cd]

d :照明と照度センサの距離 [m], β :定数項

2.2.3 知的照明システムの制御の流れ

ANA/RC における制御の流れを以下に示す。

1. 照明の初期光度および照度センサの目標照度を設定する
2. 照明を初期光度で点灯させる
3. 照度センサから照度を取得する
4. 電力センサから消費電力量を取得する
5. 後述する目的関数に基づき、目的関数値を計算する
6. 回帰係数に基づき適切な次光度生成範囲 (近傍) を決定する
7. 項目 6 で得られた近傍に基づき、次光度を生成する
8. 項目 7 で得られた光度を用いて照明を点灯させる
9. 照度センサから照度を取得する
10. 電力センサから消費電力量を取得する
11. 項目 8 で点灯させた光度における目的関数値を計算する
12. 照明の光度変化量および照度センサの照度変化量を基に回帰分析を行い影響度を学習する
13. 目的関数の評価値が改良された場合は次光度を受け取り、そうでない場合は元の光度に戻す
14. 項目 3 に戻る

以上の項目 3 から項目 14 までを 1 ステップとし、繰り返し処理を行うことで、目標照度への収束および消費電力量の最小化を実現できる。ANA/RC における目的関数は、照度センサに設定された目標照度と現在照度との差と消費電力量の総和から成り、以下の式 (3) のように定式化する。

$$f_i = P + \omega \times \sum_{j=1}^n g_{ij} \quad (3)$$

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

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

i :照明 ID, j :センサ ID, ω :重み [W/lx]

P :消費電力量 [W], Ic :現在の照度 [lx]

It :目標照度 [lx], L :光度 [cd], T :閾値

r_{ij} :照明 i に対する照度センサ j の回帰係数

式 (3) に示す目的関数は各照明毎に計算する。各照度センサの目標照度を制約条件としたペナルティ g_{ij} は回帰係数 r_{ij} に比例するため、照度センサに対する影響が大きい照明ほどペナルティを増加させないように動作する。また、回帰係数 r_{ij} に閾値 T を設けることで照度センサに対して影響が大きい照明のみが照度センサの設置点に対して強く点灯する。すなわち、照度センサから距離が離れている照明は消費電力量の最小化のみを目的として動作する。また、重み ω の設定によって、目標照度を満足することを優先するか、消費電力量の最小化を優先するか決定することができる。

3. 照度センサの移動に適応する消灯メカニズム

3.1 従来の消灯メカニズム

知的照明システムでは、オフィスワークの目標照度を実現すると共に、消費電力量を最小限に抑えるよう各照明の光度の最適化を行なっている。また、さらに省エネルギー性を向上するために、照度センサに対して影響の小さい照明を消灯する消灯メカニズム⁸⁾を導入している。

一般的なオフィスにおいてオフィスワーカーの座る席は固定であるため、照度センサの位置を固定する事が多い。そのため、各照度センサに対する各照明の影響度を動的に把握する必要がない。従って、各照度センサに対して影響の大きい照明をあらかじめ紐付けしておき、紐付けされていない照明は各照度センサに対して影響が小さいとして消灯する。これにより、オフィスワーカーが離席状態から在席状態に切り替わる際に、照明が消灯していても紐付けされた照明を再び点灯させることができる。

一方で、近年ではフリーアドレスオフィスのように照度センサが移動し得る環境も増加しており、これらの環境下では照度センサの位置が固定であることを前提とする従来の消灯メカニズムでは対応できない。この問題を解決するため、照度センサの移動に適応する消灯メカニズムを提案する。なお、提案する消灯メカニズムは消灯制御と照度センサの移動検知から構成される。

3.2 照明の消灯制御

消灯の判断には、照明と照度センサ間の影響度の把握に用いた回帰係数を利用する。しかしながら、照明間の光度変化量に相関関係がある場合、照明と照度センサの距離が遠くても回帰係数が大きく導出される場合がある。また、照度センサから遠い照明の回帰係数は照度センサに近い照明の光度変化が雑音となるため安定するまでに多くのサンプル数を要する。以上を示す理由から、単純に回帰係数の値により消灯の判断をすることができない。そこで、各照明の保有する回帰係数、およびその他の情報を基に照度センサに対して影響のある照明を抽出する。

以下で照度センサに対して影響のある照明の抽出手法について説明する。なお、知的照明システムでは照明の配置図を必要としなかったが、提案手法では初期条件として各照明は自身に近い照明を把握しているものとし、自身を含めて近傍照明と称す。例えば、Fig. 2のような照明配置に対して、近傍照明はTable 1のように照明IDの集合によって設計する。

ここで、近傍照明は照明IDの集合であるため、あ

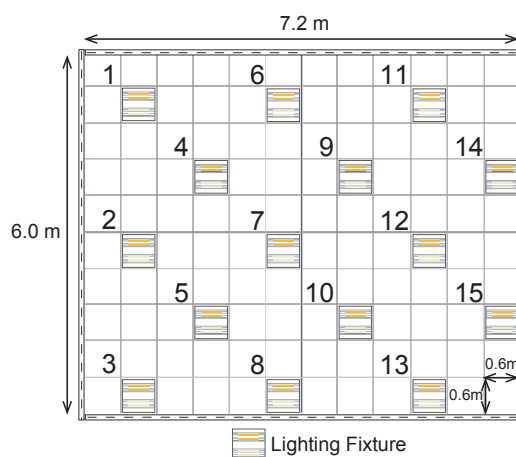


Fig. 2. Example of the arrangement of the lighting (ground plan).

Table 1. Example of the design of the neighborhood lighting group.

ID	The neighborhood lighting group
1	1,2,4,6
2	1,2,3,4,5
3	2,3,5,8
4	1,2,4,6,7
5	2,3,5,7,8
6	1,4,6,9,11
7	4,5,7,9,11
8	3,5,8,10,13
9	6,7,9,11,12
10	7,8,10,12,13
11	6,9,11,12,14
12	9,10,12,14,15
13	8,10,12,13,15
14	9,11,12,14,15
15	10,12,13,14,15

る2灯の照明 i, j の近傍照明において式 (4) のように積集合を行うことで、照明 i, j それぞれに対して距離が近い照明のみを抽出することができる。この際、抽出された要素数が少ないと、照明 i, j 間の距離が遠いと判断できる。

$$I_{ij} = L_i \cap L_j \quad (4)$$

I : 2 灯に近い照明群, i, j : 照明 ID, L : 近傍照明

照度センサに近い照明は影響が大きいため回帰係数も大きくなり、かつ比較的少ないサンプル数でも高精度で導出できる。そのため、回帰係数をソートした結果、上位の照明に対して式 (4) の処理を行うことで、2 灯の照明が近距離にあるか検証することができる。また、回帰係数が小さいものの 2 灯の照明の近距離にある照明を回帰係数の値に影響されずに抽出することができる。照度センサに対して影響のある照明は最大 4 灯程度であるため、複数の回帰係数の高い照明間で式 (4) の処理を行うことで互いに近い照明を抽出することができる。しかし、多くの照明間で行なうと照度センサに対して影響が小さい冗長な照明も抽出されてしまう。そのため、回帰係数の高い照明 3 灯のみに対象を絞り式 (4) の処理を行う。式 (4) はある 2 灯に近い照明の集合であるため、これらの和集合を式 (5) により導出し、それらを照度センサに対して影響のある照明とする。

$$S_{ijk} = I_{ij} \cup I_{ik} \cup I_{jk} \quad (5)$$

S : 3 灯に近い照明群, I : 2 灯に近い照明群

i, j, k : 照明 ID, L : 近傍照明

よって、消灯すべき照明は S_{ijk}^c となる。なお、式 (4) で導出された集合の要素数が 2 未満のときは回帰係数を改めて導出し上記の処理を行う。

3.3 センサの移動検知

照度センサの移動時に一部の照明が消灯していると、光度変化が生じないため回帰係数を正確に導出できない。つまり、照明の消灯制御と照度センサの移動を両立することができないので、照度センサの移動を検知し再度影響度の推定ができるよう消灯している照明を点灯する必要がある。

知的照明システムでは、人の目には感知できない程度の範囲で照明の光度を変化させているため、照度が

急激に変化することはない。しかしながら、照度センサの設置位置に書類や人影が被さるか、照度センサを移動させると急激な照度低下が生じる。よって移動検知には、照度センサの照度変化量を用いる。Fig. 3 に移動検知の流れを示し、以下で移動検知について説明する。急激な照度低下が一定期間継続すると、書類や人影が被さったか、あるいは照度センサの移動を疑う。照度情報のみでは、照度低下の要因が書類や人影によるのか、移動によるのか判断できない。そのため、照明が消灯しているエリアに照度センサを移動させる可能性があることから、消灯中の照明を全て点灯する。照度が安定すると人影による影響が無くなった、あるいは移動が完了したと判断する。この時、書類が被さっていると照度に変化が生じないため、照度が一定であれば書類が被さっていると判断する。照度に変化がある場合は、その時の照度を基に照度低下が人影によるのか、移動によるのか判断する。移動検知後は、移動した照度センサに対する各照明の影響度を改めて学習し消灯制御を行なう。

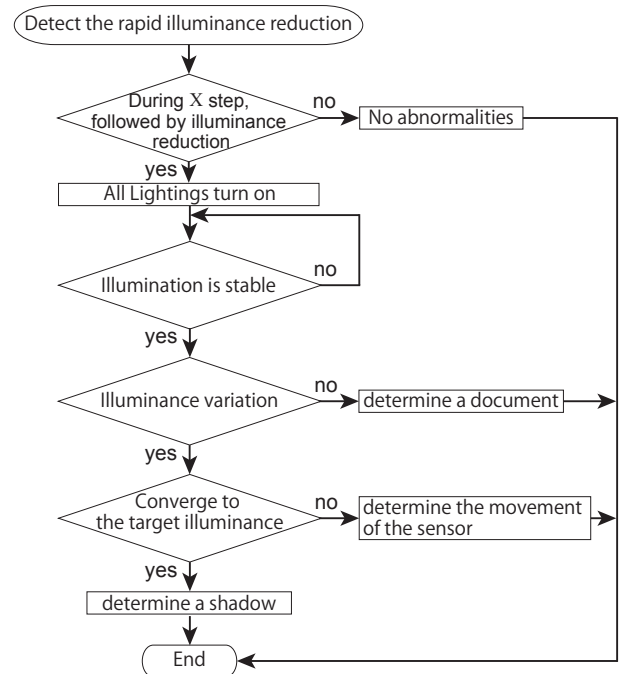


Fig. 3. Movement detection.

4. 検証実験

4.1 実験環境

提案した消灯メカニズムを導入した知的照明システムにおいて、動作検証のための実験を行った。実験環境の平面図を Fig. 4 に示す。実験室は 7.2 m × 6.0 m × 1.9 m の空間で、調光可能な白色蛍光灯 15 灯と移動可能なワイヤレス照度センサを 2 台および照度センサの親機を 1 台設置した。なお、照明の最大点灯光度は 1336 cd である。

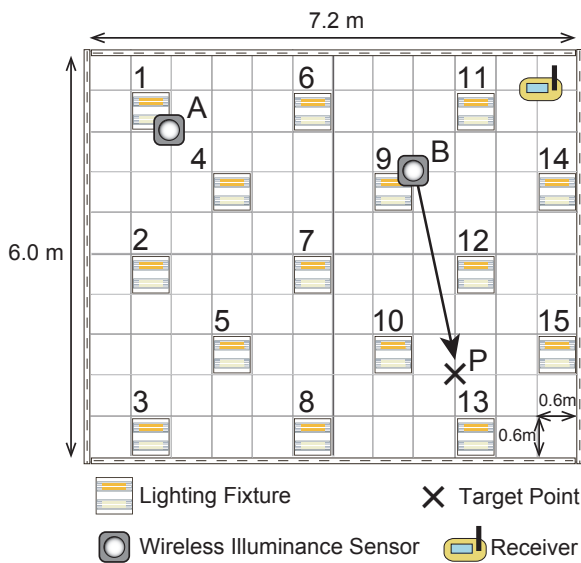


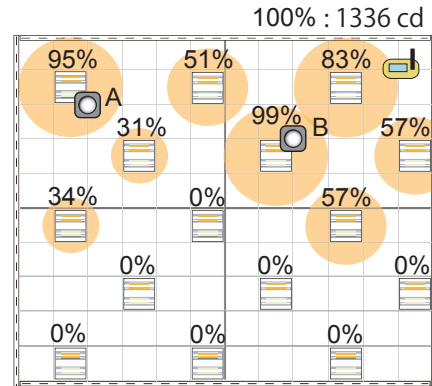
Fig. 4. Experiment environment (ground plan).

4.2 提案した消灯メカニズムの検証

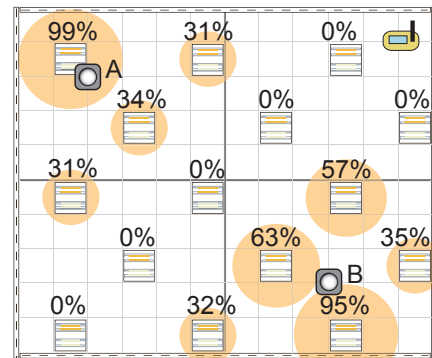
提案手法の有効性を確認するため、各照度センサが目標照度に収束するか検証を行った。各照明の初期状態を 100% 点灯とし、照度センサ A および B に目標照度を 400 lx および 600 lx と設定する。さらに、300 ステップ後に照度センサ B を Fig. 4 に示す地点 P に移動し、照度センサの移動に適応できるかどうか検証を行った。また、提案する消灯メカニズムの有無による消費電力量の比較を行った。なお、1 ステップに要する時間はおよそ 2 秒である。

提案する消灯メカニズムを導入した知的照明システムにおける照度センサの移動前および移動後について各照明の光度分布を Fig. 5 に示す。なお、移動前は 250 ステップ目、移動後は 550 ステップ目の光度分布

について示しており、各照明の光度を円の大きさを用いて表している。



(a) Before the movement of illuminance sensor.



(b) After the movement of illuminance sensor.

Fig. 5. Luminance distribution.

Fig. 5(a) および Fig. 5(b) より、照度センサに近い照明ほど強く点灯していることが分かる。また、照度センサの移動前は Fig. 4 に示す 3, 5, 7, 8, 10, 13 および 15 番の照明が消灯し、移動後は 3, 5, 7, 9, 11 および 14 番の照明が消灯したことを確認した。以上から、照度センサの位置に応じて最適な点灯パターンで点灯していることを確認できた。

次に各照度センサの照度履歴を Fig. 6 に示す。なお、Fig. 6 における縦軸は照度 [lx]、横軸は繰り返しステップ数を示している。Fig. 6 より、各照度センサが目標照度に収束したことを確認した。また、一部の照明が消灯している状態でも照度センサの移動を検知し照度センサの移動後の位置において迅速に目標照度を実現できることを確認した。

次に消費電力量の履歴を Fig. 7 に示す。Fig. 7 にお

ける縦軸は消費電力量 [W], 横軸は繰り返しステップ数を示している. Fig. 7 から本実験環境において, 初期状態の消費電力量を 100% とし消灯を行わない場合と比較するとおよそ 15% 程度の消費電力量を削減できることが確認できた.

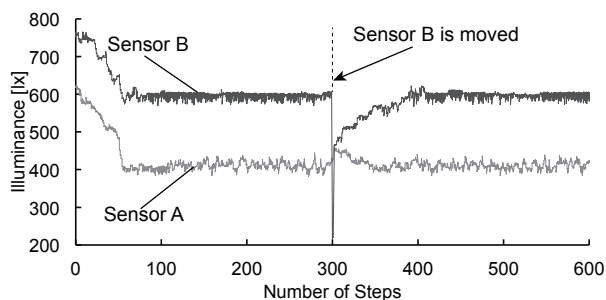


Fig. 6. History of the illuminance of each illuminance sensor.

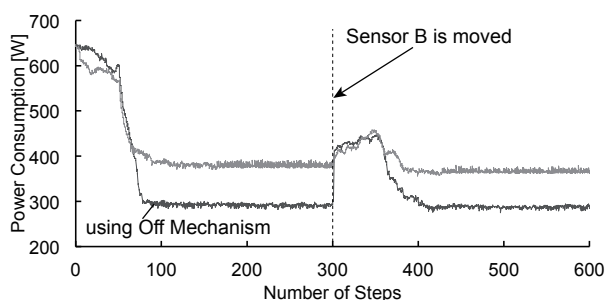


Fig. 7. History of power consumption.

以上の結果より, 従来手法の性能を維持し, 照度センサに影響のない照明の消灯制御による省エネルギー性の向上と照度センサの移動の両立を示した.

5. まとめ

知的照明システムにおける従来の消灯メカニズムは照度センサの位置が固定であることを前提としていた. そのため, 制御中に照度センサを移動することができなかった.

そこで, 照度センサの移動に適応する消灯メカニズムを提案した. 提案手法は, 回帰係数を利用した消灯判断と照度センサの移動検知からなる. 検証実験により, 照度センサの移動の移動に適応し, 照度センサに影響のない照明を消灯することによる省エネルギー性

の向上を確認した.

参考文献

- 1) (財)省エネルギーセンター, オフィスビルにおける照明の消費エネルギー比率, <http://www.eccj.or.jp>, (2008).
- 2) 森本康司, 太田正明, “オフィスにおける照明設備の省エネ制御”, 東芝レビュー, Vol.59(10), pp.22-26 (2004).
- 3) 下田宏, 大林士明, “オフィスビルの省エネルギーとプロダクティビティ照明”, 電気学会論文誌 C, Vol.128(1), pp.2-5 (2008).
- 4) 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 2006, Vol.1(1322), pp.151-156 (2006).
- 5) P. R. Boyce, N. H. Eklund and S. N. Simpson, “Individual Lighting Control: Task Performance”, Mood and Illuminance JOURNAL of the Illuminating Engineering Society, pp.131-142 (2000).
- 6) M. Miki, T. Hiroyasu and K. Imazato, “Proposal for an intelligent lighting system and verification of control method effectiveness”, Proc IEEE CIS, pp.520-525 (2004).
- 7) S. Tanaka, M. Miki, T. Hiroyasu and M. Yoshikata, “An Evolutional Optimization Algorithm to Provide Individual Illuminance in Workplaces”, Proc IEEE Int Conf Syst Man Cybern, Vol.2, pp.941-947 (2009).
- 8) 三木 光範, 廣安 知之, 吉見 真聡, 田中 慎吾, 加来 史也, 米本 洋幸, “消灯メカニズムを組み込んだ知的照明システム”, FIT2009, Vol.1, pp.241-242 (2009).