

For Reduction of Lighting Control Numbers of the Intelligent Lighting System via BACnet

Takeshi TANIGUCHI^{**}, Mitsunori MIKI^{*}, Risa KAWASHIMA^{**}, Takuma YOSHIDA^{**},
Hiroto AIDA^{*}

(Received April 17, 2015)

We are doing research on the improvement of office environment. By improving the office environment, it can be expected effects such as stress reduction and improvement of intellectual productivity of office user. Therefore, we have conducted studies by focusing on light office environments, it has been proposed a distributed controlled illumination system (Hereinafter, intelligent lighting system) for implementing individual illuminance. The implemented lighting pattern of the optimal illumination intensity required by the office's intelligent lighting system can be expected to effect energy savings. Intelligent lighting system is a system to be configured to connect a network of its own power meter, intelligent lighting system control computer, lighting, and the illuminance sensor. For that reason, the running cost of the control of the system and maintenance of equipment and the initial cost at the time of introduction is required. Therefore, we propose the intelligent lighting system constructed with the BACnet to facilitate the running costs and initial costs that are required to introduce intelligent lighting system. In addition, we have resolved issue regarding bottleneck of the gateway.

Key words : BACnet, lighting control, illuminance

キーワード : BACnet, 照明制御, 照度

BACnet を用いた知的照明システムの照明制御台数の削減について

谷口武, 三木光範, 川島梨沙, 吉田拓馬, 間博人

1. まえがき

近年, オフィスビルの照明が執務者に及ぼす影響に関する研究が広く行われている. 多くのオフィスにおいて, 各執務者は同じ光環境の中で執務を行っている. しかし, 各執務者には異なった好みの照明環境があり, 好みの環境で執務を行うことで知的生産性, 創造性,

および快適性が向上すると考えられている¹⁻³⁾.

一方, 省エネルギー性の向上も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. オフィスビルにおける照明の消費電力はビル全体の約 20 % を占めているが, 執務者が求める明るさよりも明るく点灯している場合や不要な

* 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: +81-774-65-6924, E-mail: ttaniguchi, rkawashima, tyoshida@mikilab.doshisha.ac.jp

場所で点灯している場合が多い。そこで、このような照明環境を改善することで照明の消費電力を削減し、省エネルギーに貢献することができる⁴⁻⁶⁾。

このような背景から、著者らは照明環境に着目し、個々の執務者の要求に応じた照度を提供する知的照明システムを提案した。また、本システムは執務者の要求する照度を最小限の電力で実現することが可能であり、照明の消費電力を削減できる⁷⁾。知的照明システムは、東京都内および福岡の実オフィスでの検証実験により、知的照明システムを導入した場合と一般の照明器具を用いた場合を比較した結果、50%の消費電力の削減を確認した⁸⁾。

検証実験により知的照明システムの有効性を実証しているため、今後は、システムの導入と運用について検討する必要があると考えられる。そこで、著者らは、オフィスビルの標準プロトコルである BACnet を用いた知的照明システムの新たなシステム構成を提案している⁹⁾。これまでの検証実験で、BACnet を用いても知的照明システムが構築可能であることを実証し、提案システムが導入と運用の容易化を実現可能であることを実証している。

しかし、BACnet を用いた照明制御には、BACnet 照明ゲートウェイの通信量に課題点がある。BACnet 照明ゲートウェイは、照明の頻繁な個別制御が行われることを想定していないため、1秒間に制御可能な照明制御台数は少なく設計されている(本論文で用いた機器では、1秒間に80台まで)。知的照明システムは、頻繁な照明の個別制御を行うため、1秒間に制御可能な照明台数に限界があると、制御に遅延が発生すると考えられる。そこで、知的照明システムが一度に制御する照明台数を削減する手法を提案する。一度に制御する台数を削減することが可能になることで、BACnet 照明ゲートウェイへの負荷を削減することができる。そこで、本研究では、知的照明システムが一度に制御する照明台数を削減して制御し、その有効性について検証する。

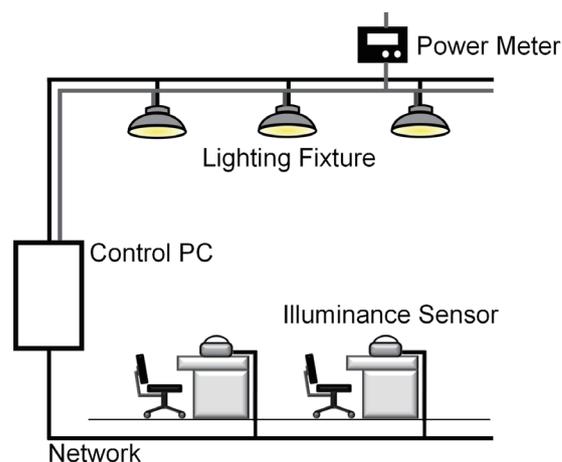


Fig. 1. Configuration of the intelligent lighting system.

2. 知的照明システム

2.1 知的照明システムの概要と構成

知的照明システムとは、各執務者にとって最適な照度と色温度を提供し、各執務者の知的生産性、創造性、および快適性の向上に期待ができる照明制御システムである。また、各執務者によって最適な照度を、消費電力が最小限になるような最適な点灯パターンで実現するため、省エネルギー性の向上も可能である。さらに、各執務者が要求する照明環境を実現する結果として、照明の消費電力を削減することも可能である。これは、多くの執務者は一般的なオフィスの照明環境が明るすぎると感じており、一般のオフィスよりも明るさを抑えた照明環境を選好するためである⁸⁾。

次に、知的照明システムの構成について記述する。知的照明システムは、知的照明システム制御コンピュータ、照明、照度センサ、電力計、および独自のネットワークで構成されるシステムである。それぞれの執務者は、それぞれ好みの目標照度を設定することができ、知的照明システムはそれぞれの目標照度を満たすように各照明を制御する。そこで、現在の照度が目標照度を満たしているか調べるために、各執務者の机上面に照度センサを設置する必要がある。知的照明システムのネットワーク構成図を、Fig. 1 に示す。

Fig. 1 のように、知的照明システムは、知的照明シ

システム制御コンピュータ，調光が可能な複数の照明，複数の照度センサ，および電力計を独自のネットワーク上に接続することで構築しているシステムである。知的照明システムの制御コンピュータは，各執務者の机上面に置かれた照度センサから照度情報を取得し，目標照度を満たすようにそれぞれの照明の光度を制御する。このとき，照明が変化していることを執務者が気づかないように，各照明の光度を人には感知できない範囲¹⁰⁾で制御する。

2.2 知的照明システムの照明制御アルゴリズム

ここでは，知的照明システムのアルゴリズムについて述べる。知的照明システムでは，Simulated Annealing(SA)をもとにした適応的近傍アルゴリズム (Adaptive Neighborhood Algorithm using Regression Coefficient:ANA/RC)を用いる¹¹⁾。ANA/RCを用いて，設計変数を各照明の光度，制約条件を各照度センサの目標照度とし，目的関数を照明全体の消費電力と照度ペナルティとする最適化問題を各照明ごとに自律分散的に解く。照度ペナルティとは，照度センサから取得した照度が目標照度を満たしていないときのペナルティを指す。ANA/RCでは，各照度センサに対する各照明の影響度合い(照度/光度影響度と称す)を最適解を求めると，照度変化と光度変化に関する回帰分析により推定する。以下にANA/RCの制御の流れを示す。

- (1) 各照度センサの目標照度を設定
- (2) 各照明を初期点灯光度で点灯
- (3) 照度センサと電力計から照度と電力を取得
- (4) 目的関数(後述)に基づき，評価値を計算
- (5) 照度/光度影響度に応じて各照明の次光度を生成し，生成した次光度で点灯
- (6) 照度センサと電力計から照度と電力を取得
- (7) 項目(5)における点灯状況の評価値を計算
- (8) 各照明の光度変化量と各照度センサの照度変化量から回帰分析を行い照度/光度影響度を推定

- (9) 目的関数に基づく評価値が改善された照明は次光度を受取り，改善されない照明は次光度生成前の光度に戻す

- (10) 項目(3)に戻る

各照明の目的関数は式(1)で表される。

$$f = P + w \sum_{j=1}^n g_j \quad (1)$$

$$P = \sum_{i=1}^m L_i$$

$$g_j = \begin{cases} 0 & (Ic_j - It_j) \geq 0 \\ R_j(Ic_j - It_j)^2 & (Ic_j - It_j) < 0 \end{cases}$$

$$R_j = \begin{cases} r_j & r_j \geq T \\ 0 & r_j < T \end{cases}$$

n : 照度センサの数, m : 照明の数

w : 重み, P : 消費電力量, Ic : 現在の照度

It : 目標照度, L : 光度, r : 照度/光度影響度係数,

T : 閾値

式(1)に示すように，目的関数 f は消費電力量 P と制約条件 g からなる。制約条件 g は現在照度が目標照度を上回る場合は0となり，満たさない場合は現在照度と目標照度の差を2乗した値となる。ただし，光度変化と照度変化に関する回帰係数が閾値 T 未満の場合，その照度センサに対してその照明は影響を与えないと考え，その照明の影響 R_j を0とする。これにより，光度変化と照度変化に関する回帰係数の高い，すなわち照度センサに強い影響を及ぼす照明の光度を最適化する。また制約条件 g 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か，省エネルギー性を優先するかを決めることができる。

2.3 知的照明システムの課題点

知的照明システムの有効性は実オフィスでの検証実験でも実証されているが，本システムの導入や運用については課題点がある。本システムを導入するには，フロアやテナント毎に，新たに知的照明システム制御

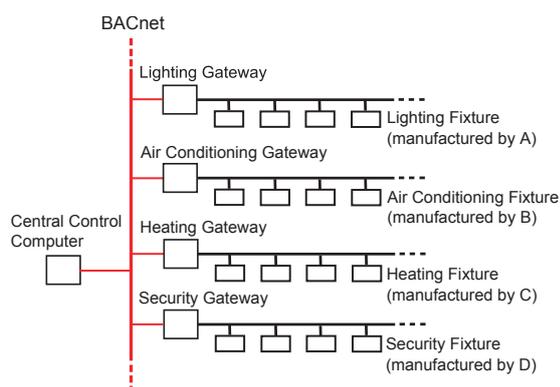


Fig. 2. Centralized management control of the system using BACnet.

コンピュータや独自のネットワークを用意する必要があり、導入にはコストがかかる。また、本システムを運用するために、知的照明システム制御コンピュータの保守が必要となるので、運用にもコストがかかる。そのような課題点を解決するために知的照明システムの新たなシステム構成を提案する必要がある。そこで、知的照明システムの導入と運用のコスト削減を目的とし、BACnet を用いた知的照明システムを提案する。

3. BACnet

BACnet は、オフィスビルに備わっているネットワークのための通信規格であり、ASHRAE, ANSI, ISO などにおいて標準規格とされている⁹⁾。BACnet は、一般的な通信プロトコルとは違い、対象のデータまでもオブジェクトという形で規定し、BACnet に接続される制御装置をオブジェクトの集合体として標準化している。そのように規定することで、相互接続性を確保することが可能となり、異なるベンダで構築されたシステムを相互的に接続できる。

BACnet により、ビル内のシステムを相互接続可能とすることで、Fig. 2 に示すように様々なベンダのシステムを集中管理制御により総合的に制御可能となる。合理的なビル管理ができることから、近年、BACnet を用い、ビル内のシステムを集中管理制御しているオフィスビルが増加している⁹⁾。

4. BACnet 型知的照明システム

4.1 BACnet 型知的照明システム開発の目的

BACnet で照明を制御しているオフィスビルに導入可能な BACnet 型知的照明システムには以下の 3 つの利点を持たせることが可能になる。1 つ目は、Fig. 2 に示すように、導入するベンダ毎に照明制御方式が異なっている場合でも、BACnet を介した照明個別制御により、各ベンダの照明制御方式に依存することなく知的照明システムを構築できる点である。その結果、知的照明システムのシステム構成がベンダに関係なく統一することが可能になる。

2 つ目は、知的照明システムの導入と運用の容易化が可能となる点である。ビルに備わっている BACnet を用いてシステムを構成することで、各ベンダの既存の照明をそのまま利用することが可能になる。また、知的照明システム集中制御コンピュータと照度センサをビルに備わっている IP ネットワークに接続するだけでシステムを構築することが可能になる。そのため、知的照明システムを導入する際の改修工事の費用を削減することが可能になる。また、集中管理制御により各ベンダのエリア内の照明個別制御が可能になるため、ビル内の知的照明システムの運用を総合的に行うことが可能になり運用の容易化も可能である。

3 つ目は、照明だけではなく、空調やブラインドと協調して制御を行うことで、さらなる執務空間の最適化を実現することが可能になる点である。これは、システムの相互接続により、照明だけではなく、空調、ブラインドなどと協調して制御することが可能なためである。

近年、BACnet でビル内のシステムを制御しているビルが増加している背景と、以上 3 つの利点から、著者らは BACnet で照明を制御しているオフィスビルに導入可能な BACnet 型知的照明システムの開発を行った。

4.2 BACnet 型知的照明システムの概要と構成

BACnet 型知的照明システムとは、BACnet 通信プロトコルを用いた知的照明システムである。従来の知的照明システムでは、知的照明システム制御コンピュー

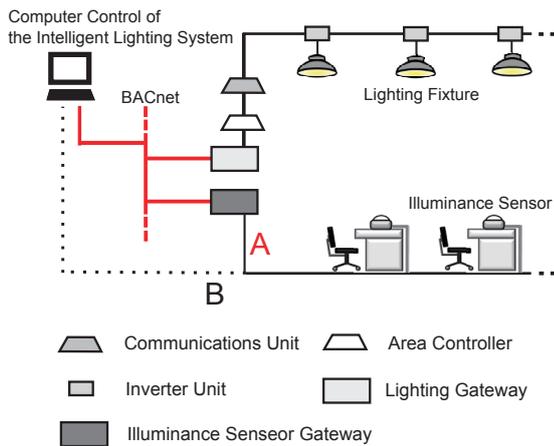


Fig. 3. BACnet type intelligent lighting system configuration.

タ、照度センサ、照明、および電力計を1つの独自ネットワークで接続して構成していた。一方、BACnet 型知的照明システムは、Fig. 3 に示すように、知的照明システム制御コンピュータ、照度センサ、照明、および電力計を BACnet に別々に接続して構成するシステムである。そのため、既に BACnet で照明を制御しているビルにおいて、知的照明システム制御コンピュータ、照度センサ、照明、および電力計を1つのネットワークに接続し直す必要がない。また、知的照明システム中央制御コンピュータにより、ビル内で稼働する複数の知的照明システムを総合的に監視、制御可能となる。このように、BACnet を用いて知的照明システムを構築することでシステム運用のコストが削減できる。

なお、Fig. 3 の分岐 A, B は、それぞれ本来の BACnet のシステム構成と本論文でのシステム構成を示している。分岐 A は、照明と同じように照度センサも BACnet を介したシステム構成であり、分岐 B は、照度センサからの情報を BACnet を介さずに取得するシステム構成である。本論文で用いた照度センサは BACnet に接続する環境が整っていないため、分岐 B のシステム構成で知的照明システムを構成した。

本論文では、三菱電機株式会社製の BACnet 通信対応の送受信機器と LED 照明を用いてシステムの構築を行った。本実験で用いた実際の BACnet 対応の送受信機、LED 照明との接続の様子を Fig. 4 に示す。

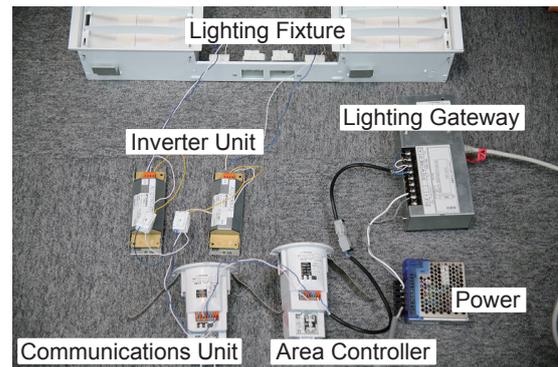


Fig. 4. Signal transceiver corresponding to BACnet.

4.3 課題点と解決手法

BACnet を用いた照明個別制御には、1秒間に制御可能な照明台数に限界がある。本論文で用いた三菱電機株式会社製の BACnet 送受信機では、1秒間で最大 80 台の照明が制御可能である。これは、BACnet を用いた照明制御では、頻繁な照明の個別制御を想定していないため、Fig. 3 に示す BACnet 照明ゲートウェイのスペックは高く設計されていないのが理由である。そのため、本システムを大規模環境に導入した際、全ての照明制御を行うのに従来の制御時間以上の時間を要すると考えられる。

そこで、BACnet を用いた照明個別制御の遅延問題を解決するために、知的照明システムが一度に制御する照明台数を削減する手法を提案する。本提案手法では、知的照明システムが決定した次照明点灯光度と現照明点灯光度の差分が大きいものから順に任意の照明台数のみ照明制御を行う。提案手法を用いた知的照明システムが従来と同等の制御結果を得ることができれば、知的照明システムが一度に制御する照明台数を削減することが可能になると考えられる。そのため、提案手法を用いない場合よりも照明台数が多い環境であっても知的照明システムを制御することが可能になると考えられる。

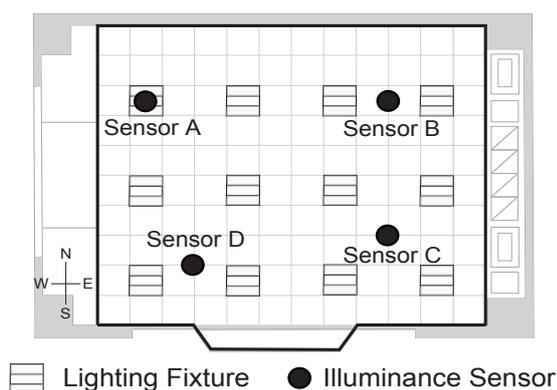


Fig. 5. Illuminance sensor layout plan and LED lighting.

5. 提案手法を用いた検証実験

5.1 実験概要

提案手法の有効性を検証するために、BACnet を用いた知的照明システムを用いて検証実験を行う。本論文は、照明制御台数を削減しても従来と同様に照度収束が可能であるかを検証することを目的とする。そこで、BACnet を用いて構築した BACnet 型知的照明システムにおいて、一度に制御する照明台数を削減して制御を行った制御結果と、従来の知的照明システムの制御結果を比較する。

本論文で検証した実験環境（照明と照度センサの位置）を Fig. 5 に示す。Fig. 5 に示す通り、照明 12 台、照度センサ 4 台を用いた実環境で検証実験を行う。本論文では、提案手法を用いた知的照明システムは、一度に制御する照明台数を 5 台（全照明の 5 割強）として制御を行う。また、照度センサ A, B, C および D の目標照度は、それぞれ、600, 500, 400, 700 lx とする。また、本論文で用いる照度センサは BACnet に対応していないため、照度センサにおいては BACnet を介さず、中央制御コンピュータに測定結果を直接送信するシステム構成とする。

5.2 検証実験結果

検証実験の結果について示す。Fig. 6 と Fig. 7 は、それぞれ、従来手法（照明制御台数の削減無し）の照度履歴と提案手法（照明制御台数の削減有り）の照度履歴を示したグラフである。グラフの縦軸は、照度値

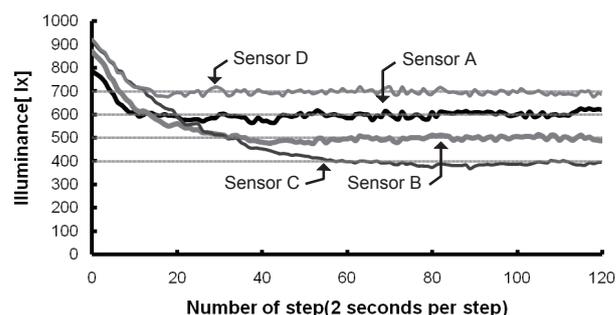


Fig. 6. Illumination convergence of Conventional Method.

[lx] を、横軸は、知的照明システムのステップ数（2 秒/1 ステップ）を示している。これらの結果から、照明台数を 7 台（照明全体の 5 割強）削減しても、従来の知的照明システムと同等のステップ数で目標照度への収束が可能であることが確認できる。つまり、知的照明システムにおいて、1 度に制御する照明台数の削減が可能であることが分かった。これは、知的照明システムでは、照明と照度センサの位置関係と各照度センサの目標照度の実現度を基に、各照明の光度変化幅を動的に変化させていることが理由であると考えられる。つまり、急速な減光や増光が必要でない照明は、照明光度の微調整を行っているため、それらの照明を制御しなくても収束に影響がなかったと考えることができる。

このことから、1 秒間に制御可能な照明台数に限界がある BACnet を用いた知的照明システムにおいて、提案手法はゲートウェイにかかる負荷を削減可能であり、有効であると言える。

しかし、本論文では、削減する照明台数を 7 台（全照明の 5 割強）と任意に決定して実験を行った。そのため、今後の展望として、一度に制御できる照明台数（全照明台数に対する割合）の限界を調べる必要があると考えられる。

6. むすび

BACnet を用いて知的照明システムの構築を行うことで、大規模環境における、知的照明システムの導入と

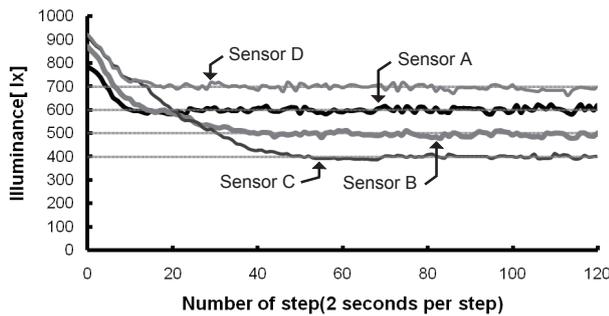


Fig. 7. Illumination convergence of Proposed Method.

運用の容易化を実現した。しかし、BACnet 照明ゲートウェイにより、BACnet を用いた照明制御には制御台数に限界があり、知的照明システムの制御に遅延を発生させる。そこで、知的照明システムが一度に制御可能な照明制御台数を削減する手法を提案した。検証実験の結果、知的照明システムが一度に制御する照明台数（全照明の 5 割強）を削減しても、従来と同等の制御結果を実現することを実証した。その結果、提案手法を用いることで、BACnet 照明ゲートウェイの負荷を軽減することが可能になった。提案手法を用いて、一度に制御できる照明台数を何台（全照明台数の割合）まで削減可能であるのかを検証するのが今後の課題である。

この研究は三菱電気株式会社の補助を受けて実施した。ここに謝意を表す。

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*, **29**[1], 131-142(2000).
- 2) O. Seppanen, W. J. Fisk, "A Model to Estimate the Cost-Effectiveness of Improving Office Work through Indoor Environmental Control", *Proceedings of ASHRAE*, **111**[2], 663-672(2005).
- 3) M. J. Mendell, G. A. Heath, "Do Indoor Pollutants and Thermal Conditions in Schools Influence Student Performance? A Critical Review of the Literature", *Indoor Air*, **15**[1], 27-52(2005).
- 4) F. Rubinstein, M. Siminovitch, R. Verderber, "Fifty Percent Energy Saving with Automatic Lighting Controls", *IEEE Transactions Industry Applications Society*, **29**[4], 768-773(1993).
- 5) P. J. Littlefair, "Predicting Lighting Energy Use Under Daylight Linked Lighting Controls", *Building Research and Information*, **26**[4], 208-220(1998).
- 6) D. H. W. Li, J. c. Lam, "An Investigation of Daylighting Performance and Energy Saving in a Daylight Corridor", *Energy and Buildings*, **35**[4], 365-373(2003).
- 7) 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).
- 8) M. Miki, T. Hiroyasu, K. Imazato, "Proposal for an Intelligent lighting System, and Verification of Non-control Method Effectiveness", *Proc. IEEE CIS*, 520-525(2004).
- 9) BACnet Website <http://www.bacnet.org> (accessed May 13, 2015) .
- 10) T. Shikakura, H. Morikawa, Y. Nakamura, "Research on the Perception of Lighting Fluctuation in a Luminous Offices Environment", *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, **85**[5], 346-351(2001).
- 11) 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*, **2**, 941-947(2009).