

Lights Out Control of Lighting System to Realize Individual Lighting Environment in the Situation without Daylight

Mitsunori MIKI^{*}, Takuro YOSHII^{**}, Masato YOSHIMI^{*} and Yoshihiro KASAHARA^{**}

(Received October 13, 2011)

It is not necessary to use evolutionary algorithm for the Intelligent Lighting System that we study under the environment without daylight. Therefore we suggest lighting control algorithm to realize individual lighting environment using illuminance simulation. This system optimizes luminance of lighting fixture. So it realizes the target illuminance instantly with minimum power consumption. However, the unstable luminance exists when a lamp is used for this system. Therefore we establish the threshold in the darkest brightness (the smallest lighting luminous intensity) from lights out by this suggestion technique and solve a problem by converting the unstable luminous intensity into the thinkableness luminous intensity and show the effectiveness.

Key words : lighting control ,energy saving, illuminance

キーワード : 照明制御, 省エネルギー, 照度

外光のない状況下において個別照度環境を実現する 照明制御システムの消灯制御

三木光範・吉井拓郎・吉見真聡・笠原佳浩

1. はじめに

我々は任意の場所に任意の明るさ（照度）を提供し、省エネルギーを実現する知的照明システムの研究を行っている¹⁾。知的照明システムは照明器具、照明制御装置、照度センサ、および電力計から構成される。知的照明システムでは、各ユーザが机上面に設置された自身の照度センサに要求する照度（要求照度）を設

定することで、その照度を実現し、かつ電力が最小となる点灯パターンを最適化手法を用いて実現することができる。現在、著者らは知的照明システムの実用化に向け、東京都内のいくつかオフィスにおいて、実証実験を進めている²⁾。

実証実験の結果、オフィスビルには窓がなく、外光の影響を受けない空間も存在した。そのような環境下では、後述する照度シミュレーションに基づき、各照

^{*} Department of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

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

^{**} Graduate School of Engineering, Doshisha University, Kyoto

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

明を消灯状態から実現可能な最も明るい明るさ（最大点灯光度）の間で光度の最適化を行い、各照明を最適化された光度で点灯させる。これにより、各照明は省エネルギーな点灯パターンでユーザの要求する明るさ（要求照度）を瞬時に満たすことが可能である。しかし、蛍光灯照明を用いる際、消灯状態から実現可能な最も暗い明るさ（最小点灯光度）における光度間において、光度の不連続性が存在する。

そこで、本研究は光度の不連続性が存在する間（不安定光度間）に閾値を設け、実現できない光度を実現可能光度に変換することで問題を解決する。

2. 知的照明システム

知的照明システムは、照明器具、照明制御装置、移動可能な照度センサ、および電力計を1つのネットワークに接続することで構成される。各照明の光度を変化させることによってユーザの要求する照度を提供し、かつ省電力な状況を実現するシステムである。各照明器具には学習判断をする制御装置が備えられているため、自律的に動作することが可能である。Fig. 1 に知的照明システムの構成を示す。

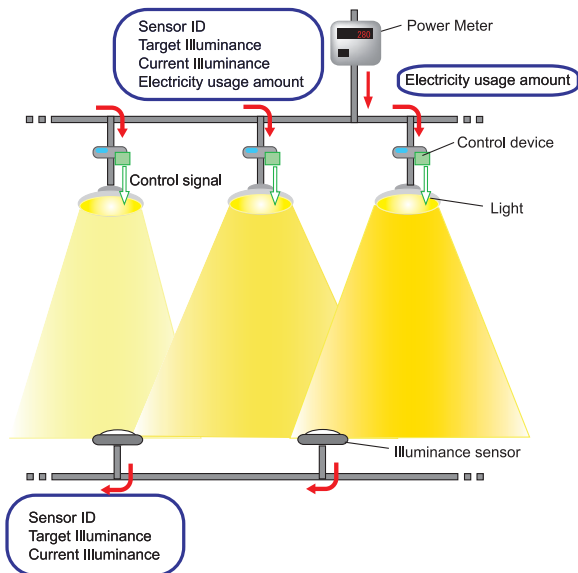


Fig. 1. Configuration of intelligent lighting system.

次に、本アルゴリズムに用いる目的関数について説明する。知的照明システムの目的は各ユーザの要求す

る照度を実現し、消費電力を最小にすることである。このため、各照明制御装置は自身の光度を最適化する最適化問題として捉える。そこで、各照明制御装置は自身の光度を設計変数とし、ユーザの要求照度という制約条件の下、消費電力を最小化する最適化問題を解く。そのための目的関数を式 (1) のように設定する。

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

$$g_i = \begin{cases} (It_i - Ic_i)^2 & I_* \leq |It_i - Ic_i| \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

P : Power consumption, w : Weight,

Ic : Current illuminance, It : Target illuminance,

n : Number of target points,

I_* : Threshold about illuminance difference

目的関数は消費電力量 P と照度制約 g_j からなる。また、重み w を変化させることで電力と照度の優先度を変化させることができる。照度制約は現在照度と要求照度の差をある閾値以内とすることから式 (2) のように与える。照度差に関する閾値 I_* は最小知覚変動比⁴⁾を基に、現在照度が要求照度の +6 % から -8 % の範囲内となるように設定する。

学習判断を行う各照明制御装置は他の照明制御装置からの情報を得ることなく、照度センサから得られる照度情報、および電力系から得られる電力情報に基づき、自身の動作に対する有効性を検証する。その後、目的関数を最小化するように制御を行うことで照度の制約条件を満たしつつ、消費電力量の最小化を行う。

3. 外光のない状況下における照明制御

3.1 制御手法の提案

知的照明システムは進化的アルゴリズムを用いることにより、電力センサおよび照度センサからの情報をもとに、常に光度の最適化をおこなっている。これは、知的照明システムが太陽光やタスクライト等の外的影響に対応できるようにするためである。

しかし、オフィスビルには窓のない空間のように、外的影響のないオフィス環境も存在する。そのような状況下では進化的アルゴリズムを用いる必要はなく、照度シミュレーションに基づく光度の最適化を行い、その結果を各照明の光度に反映させることにより瞬時に目標照度を実現することが可能となる。

3.2 照度シミュレーションに基づく照明制御アルゴリズム

ユーザが照度を要求する位置は固定された机上面であるため、任意の位置ではなく特定の位置における照度シミュレーションを行うことを考える。

ある照明が強く点灯すると、ある照度センサの照度値が大きく増加するといったように、光度と照度には強い因果関係がある。光度と照度の関係は、式 (3) で表される⁵⁾。

$$\begin{aligned} E &= \frac{L}{2} \oint_{S_e} d\beta \cos \delta \\ L &= \frac{I}{A \times \cos \delta} \end{aligned} \quad (3)$$

E : Illuminance, L : Luminance,

S_e : Surface of light source, $d\beta$: Angle of S_e ,

δ : Gun elevation with light source and surface,

I : Luminous intensity,

A : Area of surface of light source

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、輝度と光度を除き、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) で表すことができる。以下、この定数を影響度係数 (Influence Factor) と呼ぶ。

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

E : Illuminance, R : Influence factor,

I : Luminous intensity

式 (4) に示すように、影響度係数 R を算出することで、光度および照度の関係を数値化することができ

る。すなわち、影響度係数 R により、照明が照度センサに及ぼす影響の強弱を数値化できるとともに、光度情報から現在の照度を予測することが可能である。影響度係数は以下の方法により決定することが可能である。

1. 照度センサを指定の位置に設置する
2. 全ての照明を消灯する
3. 照明を 1 灯のみ任意の点灯光度で点灯する
4. 照度センサから得られる照度値を記録する
5. 項目 3) から 項目 5) を照明台数分だけ繰り返す

上記の流れによって得られた影響度係数に基づき、任意の光度で点灯した際の特定の位置における照度を計算から求めることができる。

次に、式 (1) の目的関数における消費電力量について説明する。消費電力量は照明の光度と電力量光源の効率を表す指標として発光効率 [lm/W] が用いられているように、照明の光度と消費電力量は比例関係にある。照明鉛直下方の光度と消費電力量の関係を Fig. 2 に示す。

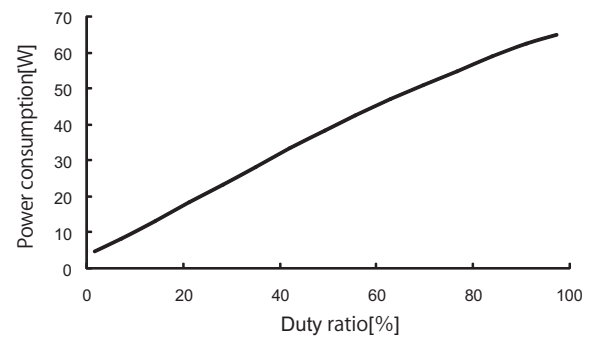


Fig. 2. Relations of luminous intensity and power consumption.

Fig. 2 より、各照明の光度から消費電力量を算出できる。

以上より、上記で示した影響度係数、および消費電力量に基づき計算機内で目的関数を最小化することができる。そして、最小化された目的関数における光度を各照明に反映させることで、省エネルギーな点灯パターンで目標照度を瞬時に満たすことが可能である。

3.3 照明の調光特性

一般的に、照明はパルス信号幅の割合（Duty 比）を変化させることで、明るさを変化させる。また、Duty 比が高いほど明るく点灯し、低いほど暗く点灯する。一般的な LED 照明および蛍光灯照明の光度と Duty 比の関係を Fig. 3 に示す。

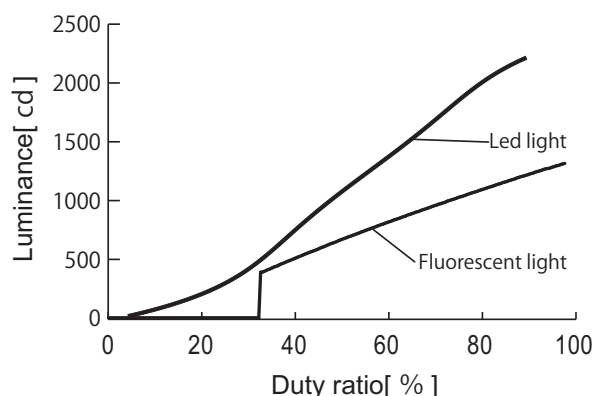


Fig. 3. Relations of luminous intensity in each lights and duty ratio.

LED 照明は発光ダイオードを利用し点灯しているため、低い点灯光度を安定し実現することができる。しかし、蛍光灯照明は放電現象を利用し発光しているため、消灯状態から最小点灯光度までの光度幅が大きく、不安定光度間では照明が点灯したり、しない状況が存在する。

前節で述べた照度シミュレーションにより、最適化し得られた光度が不安定光度間である場合、正確な照度をユーザの指定する位置に提供することができない。そこで、不安定光度間における光度を、安定し実現できる光度へ変換する必要がある。

3.4 実現可能光度への変換

蛍光灯照明を用いて照明を制御する場合、光度の不連続性を考慮する必要がある。このため、不安定光度間に閾値を 2 つ設け、不安定な光度を消灯、もしくはは最小点灯光度のどちらかに分類する。

Fig. 4 のように、消灯に近い光度を閾値 T_L とし、点灯に近い光度を閾値 T_H とする。

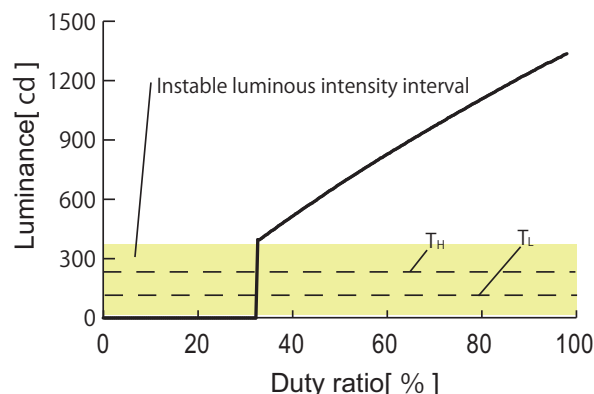


Fig. 4. Convert to stable luminous intensity.

実現可能光度への変換の流れを以下に示す。

1. 照度シミュレーションに基づき、光度の最適化を行う
2. 不安定光度間で、消灯から閾値 T_L の間の光度は消灯とする。また、閾値 T_H から最小点灯光度の間は最小点灯光度とする
3. 項目 2) の条件を基に、再度最適化を行う
4. 項目 2) から 項目 4) を数回繰り返す
5. 最適化された光度が閾値 T_L から閾値 T_H の場合、その照明は最小点灯光度とする
6. 決定された光度で各照明を制御する

上記の流れにより、光度の不連続性が存在する蛍光灯照明であっても、ユーザの要求照度を満たしつつ、かつ省エネルギーな点灯パターンで照明制御を行うことができる。

4. 実験結果と考察

提案手法の有効性を検証するため、動作実験を行った。2011 年の 4 月 6 日、窓のないオフィスを模擬した実環境にシステムを構築し、動作実験を行う。照明は最小点灯光度（401 cd）から最大点灯光度（1336 cd）の間で調光可能な昼白色蛍光灯を使用する。

実験は2種類行う。1つ目は実現可能光度への変換を行わず、光度の最適化が行われる範囲を最小点灯光度（401 cd）から最大点灯光度（1336 cd）にした場合である。2つ目は光度の最適化が行われる範囲を消灯（0 cd）から最大点灯光度（1336 cd）とし、前章で述べた実現可能光度への変換を行う場合である。実験環境はユーザ数4名を想定して要求照度地点を Fig. 5 に示すように配置する。要求照度地点 A, B, C, および D とし、要求照度を A は 400 lx, B は 500 lx, C は 600 lx, D は 700 lx とする。

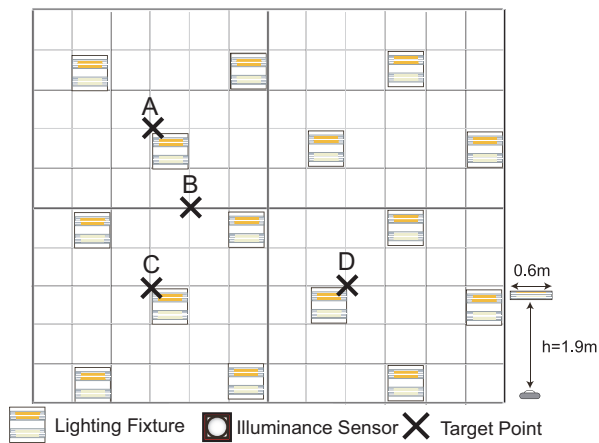


Fig. 5. Experimental environment.

最適化が行われる光度の範囲を最小点灯光度（401 cd）から最大点灯光度（1336 cd）とし、要求照度地点 A, B, C, および D の光度および照度状況を Fig. 6 に示す。

次に、最適化が行われる光度の範囲を消灯（0 cd）から最大点灯光度（1336 cd）とし、要求照度地点 A, B, C, および D の光度および照度状況を Fig. 7 に示す。

Fig. 6 と Fig. 7 より、点灯光度間に違いがあっても、省エネルギーな点灯パターンで要求照度を実現できていることが分かる。次に、各点灯状況における省エネルギー性について検証を行う。各点灯状況における消費電力量を Table 1 に示す。

Table 1 より、照明が消灯するように制御を行うことで消費電力量が2割程度削減できたことが分かる。消灯なしの場合では、影響度係数が低い照明において

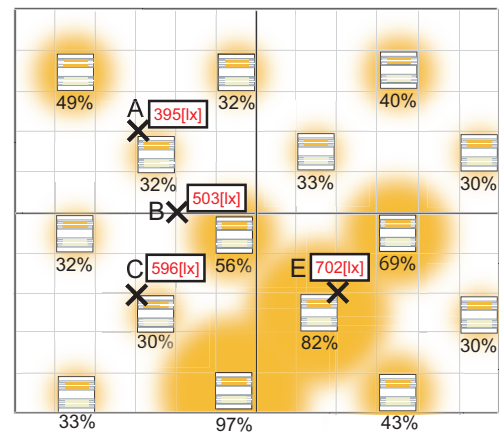


Fig. 6. Luminous intensity and illuminance (lights on pattern) .

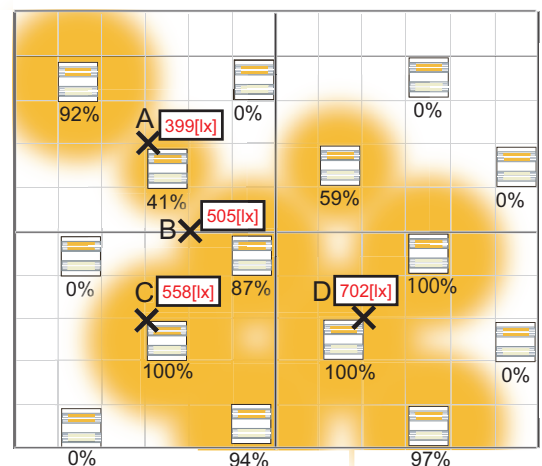


Fig. 7. Luminous intensity and illuminance (lights out pattern) .

も、最適化される光度の範囲が最小点灯光度以上であるため、最小点灯光度となる。その光度を考慮し、要求照度を実現するため影響度係数が高い照明でも点灯光度が抑えられる状況が存在する。そのため、消費電力量に無駄が生じる。一方、消灯ありの場合では調光範囲に消灯が含まれているため、影響度係数が低い照明は消灯することができる。

上記の結果から、提案手法は消費電力量の観点から

Table 1. Power consumption in each lighting situation.

Power Consumption	
Lights on pattern	Lights out pattern
450 W	380 W

従来手法による性能を維持し，消費電力量の観点から有意であることを示した．

5. まとめ

実証実験の結果，オフィス空間には太陽光などの影響を受けない窓のない空間も存在していることが分かった．そのような環境下では照度シミュレーションに基づく最適化を行い，各照明の光度に反映させることで，目標照度を瞬時に満たすことが可能である．しかし，蛍光灯照明を用いて照度シミュレーションを行う場合，消灯から点灯間における光度は不安定である．

そこで，本提案手法では消灯から最も暗い明るさ（最小点灯光度）に閾値を設け，不安定な光度を実現可能光度に変換することで問題を解決する．蛍光灯照明を用いて実験を行った結果，不安定な光度を実現可能光度に変換することで，照明を消灯させることができた．さらに，消費電力量も削減されることが確認できた．

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) S.Inoue and MITSUBISHI ESATE COMPANY Ltd, “Towards the City of the Future”, http://www.jetro.org/documents/green_innov/Shigeru.Inoue_Presentation.pdf
- 3) S.Tanaka, M.Miki, T.Hiroyasu and M.Yoshikata, “An Evolutional Optimization Algorithm to Pro-

vide Individual Illuminance in Workplaces”, Proc IEEE Int Conf Syst Man Cybern, Vol.2, pp.941-947, 2009.

- 4) 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(5), pp.346-351, 2001.
- 5) 社団法人 照明学会, 照明ハンドブック, オーム社, 2003.