

計算モデルを利用した3次元照明システムのON/OFFパターン制御

ON/OFF Pattern Decision of Three-dimensional Lighting System Using a Calculation Model

室巻孝郎¹・南裕樹²
Takao MUROMAKI and Yuki MINAMI

1. はじめに

オフィスを想定した環境などにおいて、業務内容や執務者好みに合わせて柔軟な調光制御を行う知的照明システム¹⁾が提案されている。知的照明システムとは、執務者が設定した目標照度を実現するように、照明の調光を個別に行う分散制御システムである。知的照明システムは、調光可能な照明器具、照明制御装置、照度センサなどを備えたシステムとして構成される。照度センサの情報をフィードバックしながら、必要な場所に必要なだけの照度を提供可能となっており、執務者の知的生産性向上につながることが期待される。また、神ら²⁾は照度センサ搭載型LED照明を用いた調光システムを提案しており、外部コントローラを必要としないコンパクトな構成としている。この他、外村ら³⁾は鉛直方向に移動可能な照明器具を用い、照度センサを設置した場所に希望する照度を提供する知的照明システムを提案している。

従来の照明システムは、対象とする面に所望の照度を提供するシステムであったが、本研究では、鉛直方向に移動可能な照明器具を用いて3次元空間内の所望の場所に必要なだけの照度を提供する照明システムを提案する。著者らはこれまでに、進化型計算を用いたセンサレスの点灯制御手法⁴⁾を実装していたが、照明の個数が増えると計算量が増大し、解を得るまでに多くの時間を要する、あるいは解の精度が低下するという問題があった。一方、著者らは照度センサを用いずに2次元の床面に所望の照度分布を実現する照明のON/OFFパターン決定手法⁵⁾を提案している。この手法は、計算負荷の少ない反復アルゴリズムとなっており、照明の個数が増加しても急激な計算量の増加は無いという特長を有している。そこで、従来のON/OFFパターン決定手法を、3次元空間内で照明を移動可能なシステム（以下、3次元照明システムと呼ぶ）に適用することで、3次元空間内の各照明のON/OFF制御を行う。

2. 3次元照明システム

本研究で対象とする3次元照明システムの概要について説明する。図1に3次元照明システムの概念図を示す。各照明は天井から吊り下げる形で取り付けられており、吊り下げているケーブルの長さを調節することにより、空間内の照明高さを指定することができる。ただし、空間を格子状に分割したグリッド内にLED照明を配置するものとする。また、LED照明は床面を照らすのではなく、配置された場所から全方位に照度を提供する。図1中の白丸はON（点灯）の照明、黒丸はOFF（消灯）の照明を表している。

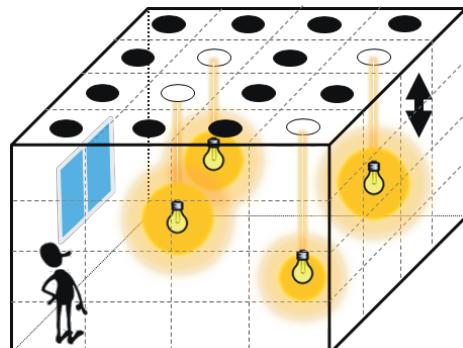


図1 3次元照明システムのイメージ図

3. ON/OFFパターン決定問題と計算モデルを用いたON/OFFパターン決定アルゴリズム

3.1 問題設定

事前に与えられた目標照度の分布（以下、目標照度分布と呼ぶ）に対し、各LED照明のON/OFFパターンを決定するための問題設定について述べる。空間内にN個のLED照明が配置されているとする。空間内の位置を p で表し、その位置における照度を $\phi(p)$ と表記する。事前に設定された目標照度分布は256階調グレースケールで表されるものとし、各位置の照度を読み取ることにより、目標照度が与えられる。なお、照度は[0, 1]に正規化されている。

一方、LED照明のON/OFFパターンが決まれば、式(1)に示す配光モデル（照明の中心位置の照

1 舞鶴工業高等専門学校 機械工学科 准教授

2 大阪大学大学院 工学研究科機械工学専攻 准教授

度と中心からの距離 s に応じて照度を決定するモデル)に基づいて各位置の照度を算出する。

$$f_i(s) = \alpha \exp\left(-\frac{s^2}{\beta}\right) \quad (1)$$

ここで、添え字 i は照明の番号を表している。係数 α は最大照度、係数 β は照度の拡散度合 (距離に応じて照度がどの程度減衰するか) を表しており、予備実験により決定する定数である。各照明の点灯により作成される照度分布 f_i を重ね合わせることにより空間内の照度分布が形成される。配光モデルに基づいて算出された位置 p における照度を $\psi(p)$ と表記し、次式で定義する。

$$\psi(p) = \sum_{i=1}^N f_i \quad (2)$$

なお、 i 番目の LED 照明の ON/OFF パターンを表す変数を $z_i \in \{0,1\}$ とする。 $z_i = 1$ が ON (点灯) 状態、 $z_i = 0$ が OFF (消灯) 状態に対応する。

以上より、目標照度分布と等しくなるように各照明の ON/OFF パターンを決定するという問題は、目標照度分布 ϕ と照明の ON/OFF により作成される照度分布 ψ との差が最小となるように ON/OFF パターン z_i を決定する問題として、次式で定式化される。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && J = \|\phi - \psi\| \\ & \text{with respect to} && z_i \quad (i = 1, \dots, N) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)の問題は照明の個数 N に応じて設計変数が増加する。また、ON/OFF パターンは離散値であるが、照明の位置は連続量となっており、離散量と連続量が混在する最適化問題となっている点に難しさがある。本研究では、照明の位置を離散値として扱うことで、問題を緩和する。そのため、照明を配置する候補地点をあらかじめ設定した計算モデルを与える。さらに、ネットワークモデルを導入することで、問題の近似解を効率よく求めるアルゴリズムを提案する。

3.2 計算モデル

本研究で数値計算を行う際に使用する 3 次元照明モデルを図 2 に示す。 $120 \times 120 \times 100$ の空間内に、LED 照明を配置する候補地点を $5 \times 5 \times 4 = 100$ 個用意した。左右の間隔は 25、上下の間隔は 30 空いている。各候補地点において LED 照明の ON/OFF を決定する。なお、同じ縦の列に位置し、高さが異なる照明が同時に ON (点灯) になることを許容する。

センサレスの ON/OFF パターン決定アルゴリズムを実行する際に必要となるネットワークモデルについて説明する。これは、数値計算を行う際に使用する仮想的なものであり、事前に与えられる目標照度分布に対し、照明が ON あるいは

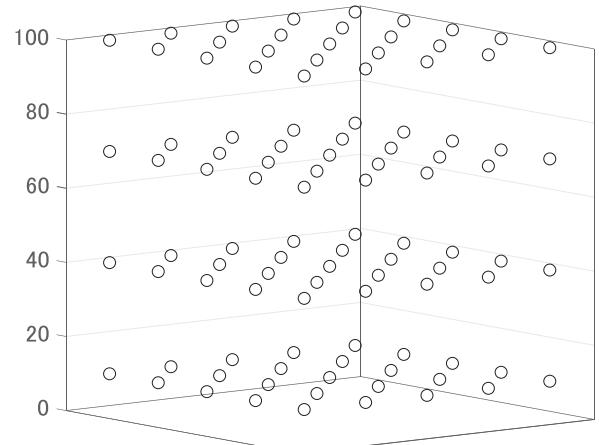


図 2 3 次元照明システムの計算モデル

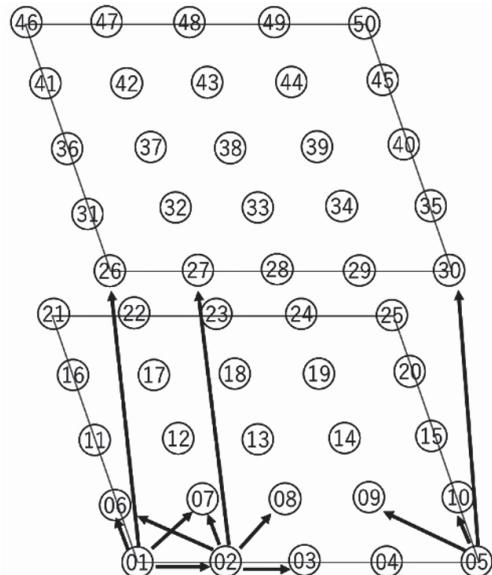


図 3 ネットワーク構造 (一部)

OFF の場合に生じる照度の過不足を近傍の照明に伝達する役割を果たす。ネットワークモデルは設計者が自由に設定することができ、事前に与えるものである。ネットワーク構造の例を図 3 に示す。丸数字は計算モデルにおける照明番号、矢印は照度の過不足情報を伝達する方向を示している。たとえば、1 番の照明は 2, 6, 7, 26 番の照明に照度の過不足情報を伝達する。

3.3 ON/OFF パターン決定アルゴリズム

ON/OFF パターン決定問題(3)は、各照明の ON/OFF パターン z_i についての組み合わせ最適化問題となっている。原理的には、すべての ON/OFF パターンを調べることにより最適な ON/OFF パターンを見つけることができるが、計算に多くの時間を要することになる。本研究では、ネットワーク構造を活用した反復アルゴリズムを用いて ON/OFF パターンを決定する。このアルゴリズムでは、ある照明で生じた目標照度との差を、ネットワークを通して伝達することにより、

その近傍の照明が照度の過不足を補うことで全体として誤差の影響を小さくする。

反復アルゴリズムは以下のように与えられる。

$$\begin{cases} x_i(k+1) = \phi(p_i) - \sum_{j \in N_i} a_{ji} \{z_j(k) - x_j(k)\} \\ z_i(k) = Q(x_i(k)) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 x_i は補正された目標照度を表す変数、 k は反復ステップ数、 N_i は照明*i*に過不足情報を反映させる照明の集合、 Q は[0, 1]の実数値を0か1に四捨五入的に丸める量子化の操作を表している。 $(z_i - x_i)$ は、照度の過不足情報であり、近傍の照明からネットワークを介して伝達された過不足情報に重み a_{ij} をかけて足し合わせた量と目標照度 ϕ との差により次の状態を決定する。重み a_{ij} は次式で与えられる。

$$a_{ij} = \frac{\exp(-\|p_i - p_j\|)}{\sum_{l \in \Gamma_i} \exp(-\|p_i - p_l\|)} \quad (5)$$

ここで、 p_l は*l*番目の照明の位置、 Γ_i は照明*i*から情報を受け取る照明の集合を表している。この集合は、予め与えられるネットワーク構造(どの照明同士で情報の伝達を行うか表すもの)によって決まる。ネットワーク構造は、設計者が自由に決められるものであるが、上記のアルゴリズムが効果的に動作するためには、すべての照明が通信路で接続されている(孤立した照明が無い)状態で、かつ単方向となっていることが望ましい。また、式(5)の形で重み係数を決定することにより、距離が近い照明ほど誤差の影響を受けやすくなり、距離が近い照明同士で過不足を補うようにしている。

このアルゴリズムの特長は、計算がシンプル且つ計算量が少ないことである。3次元照明システムのように、照明の数が多くなったときのメリットが大きいといえる。

4. 計算例

図2に示した3次元照明システムのON/OFFパターン決定例を紹介する。目標照度分布として図4に示す分布を使用する。この分布は、空間内に2つ明るい部分が存在する分布である。各領域内で段階的に目標照度が変化しており、数値で目標照度を示している。なお、空間内で照度が指定されていない所の照度は0とする。

照度の過不足情報を伝達するネットワークは図3に示したものを使用する。ただし、ネットワーク構造の一部を示したものとなっており、図2に示した4つの層の内、一番下の層と下から2番目の層を示している。各照明は自分と隣接しており、自分より大きな番号の照明に情報を伝達す

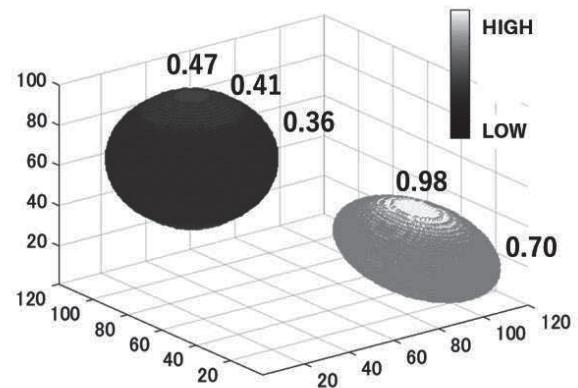


図4 目標照度分布

る。なお、同一平面内であれば対角線上に位置する照明も隣接しているものとして扱う。たとえば、2番の照明は3, 6, 7, 8, 27番の照明に過不足情報を伝達するので、 $\Gamma_2 = \{3, 6, 7, 8, 27\}$ となる。また、一番上の層の照明については、同一平面内で隣接する照明のみに過不足情報を伝達する。ON/OFFパターン決定アルゴリズムの反復回数は10回とし、補正された目標照度を表す変数 x_i の初期値はすべて0とする。

提案アルゴリズムを用いて点灯パターンを決定した結果を図5に示す。図中の○で示した照明はON(点灯)、×で示した照明はOFF(消灯)を示している。9, 10, 15, 62番の照明がON(点灯)になっており、図2に示した目標照度分布内の2つの明るい部分に対応した照明がON(点灯)になっていることが分かる。一方、ネットワーク構造を利用せず(式(4)において係数 a_{ij} をすべて0とおいた場合)、単純2値化の手法を用いてON/OFFパターンを決定した結果を図6に示す。9, 10, 15番の照明がON(点灯)となっており、片方の部分に対応する照明しかONになっていないことがわかる。

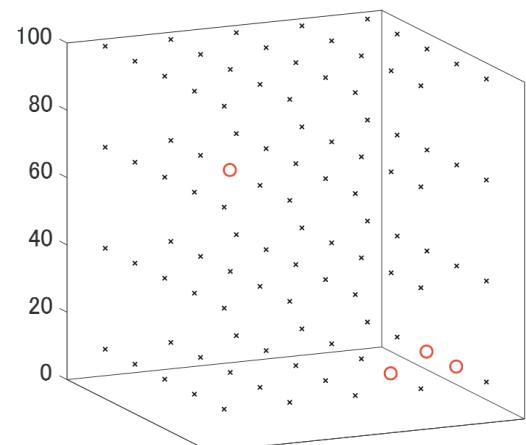


図5 ON/OFFパターン(ネットワーク構造あり)

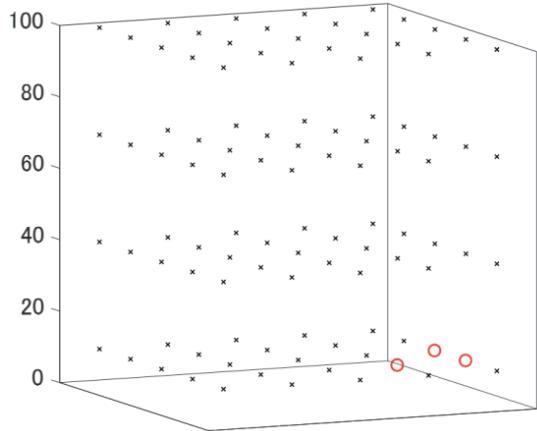


図6 ON/OFF パターン（ネットワーク構造無し）

提案手法と単純2値化手法の結果について、目標照度分布との差の評価を行う。式(1)の配光モデルにおいて、 $\alpha = 1$, $\beta = 0.25$ と設定し、 $120 \times 120 \times 100$ の領域を10刻みで照度の評価を行うものとする。式(3)のJの評価にはフロベニウスノルムを使用した。提案手法については、 $J = 4.077 \times 10^3$ 、単純2値化の場合は $J = 4.089 \times 10^3$ となり、提案手法の方が差が小さくなる結果が得られた。

5. おわりに

本研究では、ネットワーク構造を利用した3次元照明システムのON/OFFパターン決定手法について述べた。センサを使用せず、目標照度との過不足情報を伝達して各照明のON/OFFパターンを決定するアルゴリズムを提案した。計算例に

より、与えられた目標照度分布に対応するON/OFFパターンが得られることを確認するとともに、ネットワーク構造を利用しない単純2値化のON/OFF決定法と比べて誤差を小さくすることができた。

今後は、ネットワーク構造の違いがON/OFFパターン決定に与える影響について調査する。また、3次元照明システムにおいて同じ縦の列に照明を配置できない場合などの制約を想定した問題の定式化を行う。

謝辞：本研究はJSPS科研費 18K18324の助成を受けたものである。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 三木, 廣安, 今里, 池田：知的照明システムの提案および制御方式の有効性の検証, 日本機械学会第14回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 04-38, 55/58 (2004)
- 2) 神, 小林, 栗山：照度センサ搭載型LED照明を用いた自律分散型調光制御, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム, 1684/1689 (2013)
- 3) 外村, 三木, 川田, 間：鉛直方向に移動可能な照明を用いた知的照明システムの検証, 同志社大学ハリス理化学生研究報告, Vol.57, No.1, 18/25 (2016)
- 4) 室巻, 辻, 南:三次元照明システムの製作と点灯制御, 舞鶴工業高等専門学校紀要, Vol.53, 19/22 (2018)
- 5) 室巻, 南, 徳永：分散型LED照明システムの照度パターン制御実験, 設計工学, Vol.51, No.2, 118/126 (2016)

(2020.12.11受付)

ON/OFF Pattern Decision of Three Dimensional Lighting System Using a Calculation Model

Takao MUROMAKI* and Yuki MINAMI

*Corresponding author: t.muromaki@maizuru-ct.ac.jp

Abstract: In this paper, we propose an ON/OFF pattern decision method for a three-dimensional lighting system. The three-dimensional lighting system is composed of multiple LED lighting units that can be arranged in the space. Each LED lighting unit is placed in a box created by dividing the space into grids. This discretized model is called a calculation model. We introduce a virtual network model to communicate the excess and deficiency of illuminance. The ON/OFF patterns are determined to supply an illuminance distribution similar to a desired one.

Figure 1 shows an example of the desired illuminance distribution. There are two bright areas. The displayed illuminance is normalized between [0, 1]. Figure 2 shows the ON/OFF pattern obtained by the proposed algorithm. The LED lights are turn on in two areas corresponding to the bright area in Fig. 1.

Key words: Illuminance distribution, Three-dimensional lighting system, ON/OFF pattern, Optimization

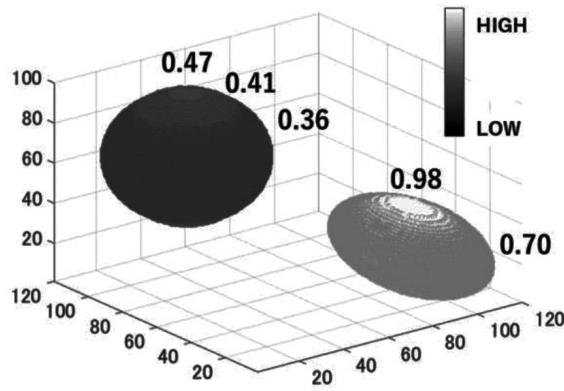


Fig.1 Desired illuminance distribution

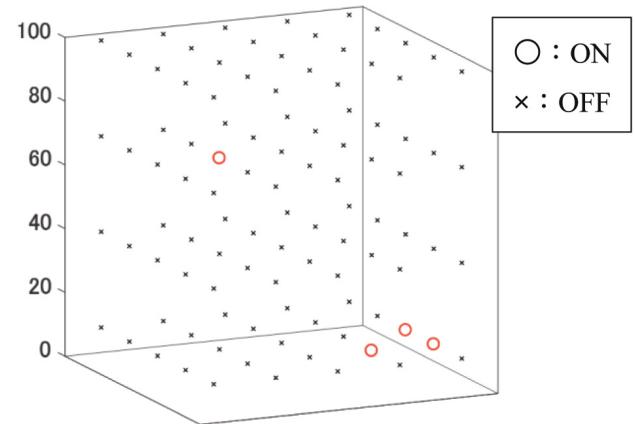


Fig.2 ON/OFF pattern obtained by proposed algorithm