

三次元照明システムの製作と点灯制御

室巻孝郎¹・辻優希²・南裕樹³

要旨：本稿では、三次元照明システムの設計製作と点灯パターン制御について述べる。三次元照明システムは、空間内の任意の位置に配置可能な複数個のLED照明ユニットから構成される照明システムであり、照明ユニット毎に明るさを調節することができる。各照明ユニットの位置と明るさを同時に制御することにより所望の照度分布を実現する。目標照度分布が与えられたときに、実際の照度分布との差を評価関数として設定した。評価関数を最小化する最適化手法として差分進化を使用した。16個の照明ユニットから成る実験装置（1000mm×1000mm×500mm）を製作し、動作確認を行った。

キーワード：照度分布、LED照明、点灯パターン、最適化

1. はじめに

近年、居住者のQOL向上や居住空間のスマート化に資する次世代型照明システムの開発が進められている¹⁾。著者らもこれまでにFig. 1に示すロボティック照明システムを開発している^{2),3)}。これは、パン・チルトの回転機構を有する複数のLED照明から構成される照明システムである。ロボティック照明システムは、点灯パターンと照射角度を個別に制御することにより、任意の場所（床面）に必要なだけの照度を提供することができる。また、Fig. 1に示す例のように、緊急時の誘導経路を照らし出す用途で使用したり、不審者を照明の光で追尾することも可能である。多様な応用が期待されるロボティック照明システムであるが、照明自身は天井に固定されており、床面の照度分布を制御することが主目的となっていた。一方で、空間内の任意の位置に必要なだけの明るさを提供するには照明自身が移動できることが求められていた。

このような背景のもと、LED照明が空間内を自由に移動可能な三次元照明システムを製作することにした。三次元照明システムをFig. 2に示す。LED照明を天井からつり下げることで高さ調節を可能とし、吊り下げ装置を平面内で移動させることにより、空間内の任意の位置にLED照明を配置することができる。また、調光機能を有するLED照明を複数配置することにより、必要な場所（空間内の指定された位置）に必要なだけの明るさを提供するシステムとなっている。

本稿では、三次元照明システムの実験機を製作し、動作確認を行ったので報告する。また、目標照度分布が与えられたときの各照明ユニットの位置および点灯パターンの制御についても述べる。最後に、三次元照明システムの今後の展望についてまとめる。

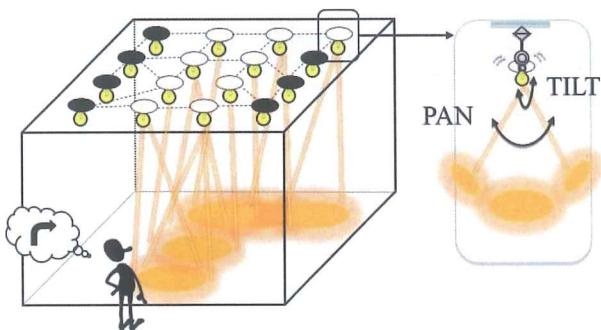


Fig. 1 Robotic lighting system

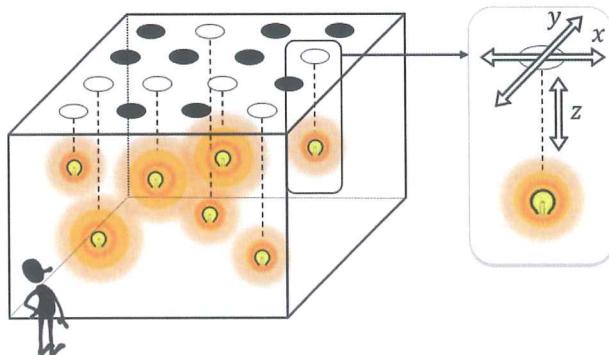


Fig. 2 Three dimensional lighting system

2. 三次元照明システム

開発した三次元照明システムの概観をFig. 3に示す。照明ユニットが移動可能な範囲は縦1000 [mm]、横1000 [mm]、高さ500 [mm]となっており、床から

1 舞鶴工業高等専門学校 機械工学科 講師

2 舞鶴工業高等専門学校 総合システム工学専攻
2年

3 大阪大学大学院 工学研究科 講師

530 [mm]の高さに照明ユニットを取り付けている。照明ユニットの構成を Fig. 4 に示す。照明ユニットは LED 照明とステッピングモータを用いた電動ウインチで構成されている。照明ユニットは幅・奥行方向の平面移動が可能となっており、ワイヤを巻き取ることにより、LED 照明の高さを調節することができる。ただし、本実験装置において照明ユニットの平面移動は手動で行っている。照明ユニットは 16 個配置している。次に、LED 照明について Fig. 5 に示す。立方体ベースの各面にパワー LED (OSW4XNE3C1S)を取り付けており、6 つの LED は同時に点灯・消灯する。なお、LED 照明の調光やステッピングモータの駆動には Arduino を使用する。

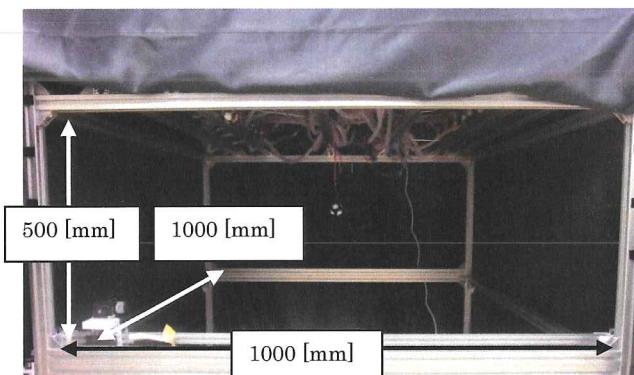


Fig. 3 Overview of the developed three dimensional lighting system

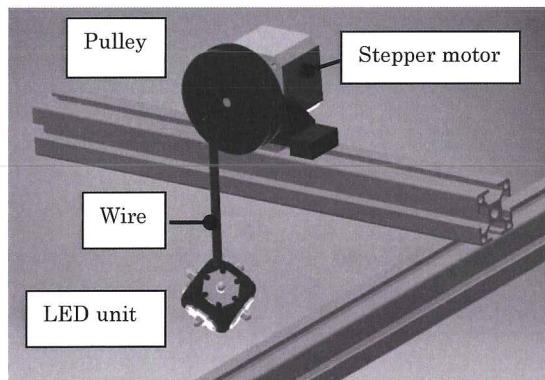


Fig. 4 Configuration of light unit



Fig. 5 Magnified image of LED unit

3. 点灯制御

3. 1 点灯制御問題の定式化

各照明ユニットの点灯パターンと位置を決定するための点灯制御問題について述べる。本研究では、空間内の照度分布を Fig. 6 のようにボックスの配列に置き換えたボリュームデータで表現する。なお、あるボックスの中心(x, y, z)における照度を $g(x, y, z)$ と表す。同じように(x, y, z)における目標照度分布の照度を $t(x, y, z)$ と表す。ここで、LED 照明の照度分布のモデル化および照度の計算に関して以下の仮定を設ける。

- LED 照明の照度分布は上下左右対称とする
- 各照明の照度分布は重ね合わせが成り立つ
- LED 照明の出力の強さと照度分布の最大値は比例する

1 つ目の仮定は、6 つの LED の個体差を計算上無視するものである。2 つ目の仮定は、複数の LED 照明の照度が重なる地点では足し合わせて照度を計算するというものである。3 つ目の仮定は、最大出力時の照度分布に[0,1]の係数をかけることにより、任意の出力で点灯させた場合の照度分布を計算するためのものである。以上の仮定の下、照度分布 $g(x, y, z)$ は 16 個の照明ユニットの照度分布の和として以下のように表される。

$$g(x, y, z) = \sum_{i=1}^{16} \alpha_i f_i(x, y, z) \quad (1)$$

ここで、 α_i は LED 照明の出力を表す[0, 1]の係数、 f_i は i 番目の照明ユニットが最大出力で点灯した場合の(x, y, z)における照度を表している。 $\alpha_i = 0$ のときは LED 照明が点灯していない状態を表しており、 $\alpha_i = 1$ のときは LED 照明が最大出力で点灯している状態を表している。また、目標照度分布 $t(x, y, z)$ との差は式(2)で表される。

$$W = \sum_{x, y, z} |t(x, y, z) - g(x, y, z)| \quad (2)$$

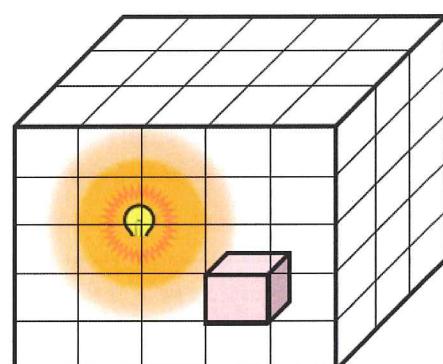


Fig. 6 Three dimensional volume data representation of illuminance

式(2)を最小化する点灯パターンと位置が最適解である。したがって、点灯制御問題における決定変数は、各照明ユニットの位置(x, y, z) および LED 照明の点灯の強さを表す係数 α_i を合わせた 4 変数(x_i, y_i, z_i, α_i) に照明ユニットの個数 16 を掛け合わせた 64 個の変数になる。三次元照明システムの点灯制御問題を式(3)に示す。

$$\min W = \sum_{x,y,z} |t(x,y,z) - g(x,y,z)| \quad (3)$$

with respect to $(x_i, y_i, z_i, \alpha_i) \ (i=1, \dots, 16)$

3. 2 差分進化 (Differential Evolution)

式(2)の評価関数を最小化し最適解を求めるため、本研究では、差分進化(Differential Evolution, DE)の中の大域探索性と局所探索性を持つ DE/rand-to-best/1/bin⁴⁾を用いる。DE/rand-to-best/1/bin の基本的な流れを以下の Step 1)~6)に示す。

Step 1) n 個の初期個体 X_i を探索空間内に生成し、初期集団 $P = \{X_i; i=1, \dots, n\}$ を構成する。すべての個体を評価し、最良個体 X_{best} を生成する。

Step 2) 終了条件(繰り返し回数)を満足すればアルゴリズムは終了し、最終的に得られた X_{best} を解とする。

Step 3) 各個体 X_i に対し集団 P からお互いに重複しないように 3 個体 X_{r1}, X_{r2}, X_{r3} をランダムに選択し、変異ベクトル M_i を式(4)のように生成する。

$$M_i = X_{r1} + F'(X_{best} - X_{r1}) + F(X_{r2} - X_{r3}) \quad (4)$$

Step 4) 変異ベクトル M_i と親ベクトル X_i を交叉し、子ベクトル X_i^{child} を式(5)を適用し生成する。式(5)において、 j は個体番号 $i=1, \dots, n$ の中からランダムに選ばれた値であり、 $u[0,1]$ は、 $[0,1]$ の一様乱数、 CR は交叉率である。

$$X_i^{child} = \begin{cases} M_i & (u[0,1] \leq CR \text{ or } i=j) \\ X_i & (u[0,1] \geq CR \text{ and } i \neq j) \end{cases} \quad (5)$$

Step 5) 子ベクトル X_i^{child} を評価し、親ベクトル X_i よりも良ければ子ベクトルを生存者集団 P' に加える。そうでない場合は親ベクトルを P' に加える。

Step 6) 集団 P を生存者集団 P' に置き換える、Step 2) に戻る。

なお、個体 X_i は、照明ユニットの位置および LED 照明の点灯の強さを表す係数 α の組で表される決定変数を並べたベクトルである。スケーリングファクター F, F' など、DE に用いる各パラメータはベンチマーク問題を用い、試行錯誤的に決定する。

4. 実験例

Fig. 7 に示す目標照度分布に対して点灯制御を行った。Fig. 7 の目標照度分布は一定間隔で照度の

等高線を描いた図であり、(25, 75, 20)および(75, 25, 30)の位置を中心に明領域が配置されている。差分進化の各パラメータについては、スケーリングファクター $F = 0.80, F' = 0.2$, 交叉率 $CR = 0.95$, 個体数 100, 最大世代数 10000 とした。

得られた最良個体の点灯位置と明るさの情報を Table 1 に示す。4 つの照明ユニットが点灯することになった。なお、各照明の位置(x, y, z)について、整数に丸めて表記している。各照明の位置を確認すると、 x 座標および y 座標については、目標照度分布の明領域の中心に近い値となり、 z 座標については、明領域の中心位置より小さい値となる傾向が見られた。Table 1 に示した位置と明るさで LED を点灯させたときの様子を Fig. 8 に示す。手前左側と奥右側の 2 つの明領域に照明が集まっていること、目標照度分布に近い照度分布となっていることを目視で確認した。ただし、実際の分布がどの程度の誤差を有しているかについて、定量的な評価をしていないため、今後は照度計を導入した測定が必要である。

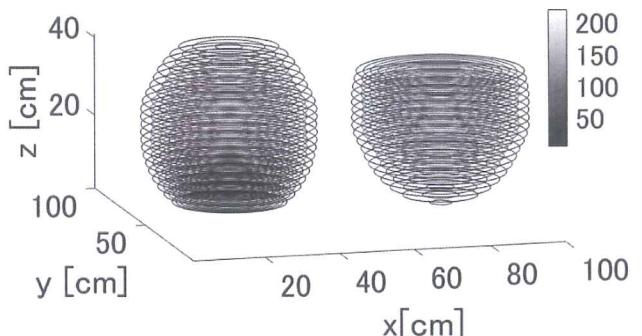


Fig. 7 Desired illuminance distribution

Table 1 Position and brightness of obtained solution

Light	x [cm]	y [cm]	z [cm]	α
L ₁	16	74	0	0.35
L ₂	35	75	6	0.78
L ₃	74	26	11	0.77
L ₄	79	26	29	1.00



Fig. 8 Experimental result

5. おわりに

本研究では、ミニチュアスケールの三次元照明システムを製作し、点灯制御実験を行った。各照明ユニットの位置と明るさを決定するため、点灯制御問題を定式化し、差分進化を用いて解を求めた。得られた解は、与えられた目標照度分布の明領域に照明が集まるという、人間の直感に近いものであった。

今回製作した装置では、LED 照明が 6 つ同時に点灯していたが、各 LED の点灯を個別に決定することにより、特定の方向に光を出さないという使用法が可能になる。必要な場所に必要な明るさを提供するだけでなく、不要な場所には明るさを提供しないことができれば、さらなる省エネルギーおよび利便性の向上につながるものと考えられる。

謝辞：本研究は公益財団法人 JR 西日本あんしん社会財団平成29年度公募助成の補助を受けて行われた。関係各位に謝意を表する。

参考文献：

- 1) 山口浩平, 三木光範, 上南遼平, 寺井大地, 間博人 : 実オフィスにおけるスマートフォン型照度センサを用いた知的照明システムの構築, 同志社大学ハリス理化学研究報告, 57-1, pp. 26-33, 2016.
- 2) 室巻孝郎, 南裕樹, 徳永泰伸 : 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, 51-2, pp. 118-126, 2016.
- 3) 室巻孝郎, 南裕樹, 徳永泰伸 : ロボティック照明システムの分散型照射角度制御, 電気学会論文誌 C, 137-1, pp. 120-126, 2017.
- 4) 阪井節子, 高濱徹行 : パラメータ相関を考慮した適応型差分進化アルゴリズム JADE の改良, 数理解析研究所講究録 1939, pp. 114-124, 2015.

(2018. 1. 12 受付)

DEVELOPMENT OF THREE DIMENSIONAL LIGHTING SYSTEM AND LIGHTING CONTROL

Takao MUROMAKI, Yuki TSUJI and Yuki MINAMI

ABSTRACT : In this paper, we describe a development of three dimensional lighting system and a proposal of lighting control method. The three dimensional lighting system is composed of multiple LED lighting units that can be arranged at arbitrary positions in the space. The lighting pattern can be adjusted for each lighting units. By controlling the position and the lighting pattern of each lighting unit, a desired illuminance distribution is realized. We introduce an evaluation function which evaluates the difference between a supplying illuminance distribution and a desired one. The differential evolution (DE) is used to solve the minimization problem with the evaluation function. We develop an experiment system with 16 LED lighting units. The effectiveness of the optimization method is confirmed through the experiment with the developed system.

Key Words : Illuminance distribution, LED light, Lighting pattern, Optimization