

多目的シミュレーテッドアニーリングを用いた知的 LED 照明システム

Intelligent LED Lighting System using Multi-Objective Simulated Annealing

日和 悟
Satoru HIWA

Abstract: In recent years, the lighting system using Light Emitting Diode(LED) attracts attention. In this paper, we propose Intelligent LED Lighting System, which can provide the light of various colors by controlling a luminous intensity of RGB 3-Color LED. Multi-Objective Simulated Annealing(MOSA) was applied as algorithm for controlling this system, and the error of the RGB value in measuring points was used for its objective function. The result of simulation showed that MOSA is the effective algorithm for this system.

1 はじめに

照明システムの高度化が進むにつれ、照明システムに対する要求は省エネルギー性やユーザビリティなどに留まらず、個々のユーザの要求に沿った環境を提供することが望まれている。その一例として、光の色を変えることによる部屋の雰囲気制御が挙げられる。人間の気分は光の色によって左右されることがある。例えば蛍光灯の白い光と白熱灯のオレンジ系統の光を比べれば、蛍光灯の光の方が人間の緊張感が高まり、逆に白熱灯の光は気分を和やかにするだろう。このことをオフィスに应用すると、午前中は白系統の光を提供すれば社員の緊張感が高まって仕事の効率が上がり、午後は暖色系の光に変えれば、落ち着いた雰囲気では会議や談話が円滑に進むなどといった効果が期待される。これらのことはオフィスに限らず、店舗における商品のディスプレイなどにも応用可能であり、光の色を制御することにより、我々の生活環境は大きく変化すると考えられる。

本研究では、RGB3 色の LED を使い、それらの光度を自律的に制御することによって、任意の場所に任意の色の光を提供する知的 LED 照明システムの提案を行う。さらに、このシステムを制御するアルゴリズムとして、Serafini によって提案された多目的シミュレーテッドアニーリング¹⁾を適用し、シミュレーションを用いてその有効性を検証する。

2 知的 LED 照明システムとは

知的 LED 照明システムは、任意の場所に任意の色を提供する照明システムである。さまざまな色の光を作り出すための光源として、カラー電球や発光ダイオード(Light Emitting Diode: LED) などがある。この中でも LED は、信号機や電光掲示板、携帯電話のバックライトなどの用途としてすでにその需要は高く、最近では省電力・長寿命などの特徴から、照明用途としても期待さ

れている。

そこで本研究では、光源として RGB3 色の LED を使い、それらの光度を個々に制御することで、自律的に任意の場所に任意の色の光を提供する。

3 知的 LED 照明システムの構成

知的 LED 照明システムは、RGB3 色の LED を正方形のパネルに多数埋め込んだ LED パネルと、光の色を感じし数値化する色彩照度計から構成される (Fig. 1)。Fig. 1 の (b) のように、LED パネルを任意の高さに設置し、その下の任意の場所に色彩照度計を複数個設置する。ユーザは目標色の情報を色彩照度計に設定するだけで、要求した色の光が提供されるような点灯パターンが実現される。

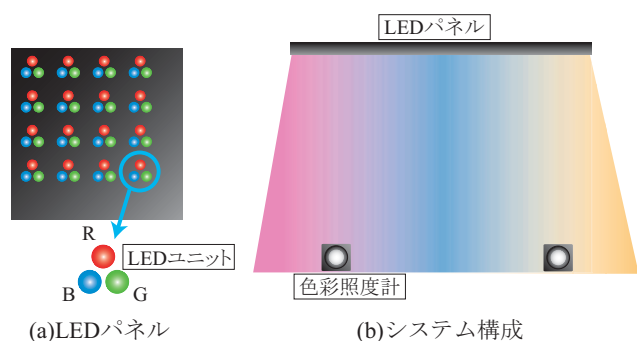


Fig. 1 知的 LED 照明システムの構成

Fig. 1 の (a) のように、LED パネルには RGB3 色の LED を固めて配置する (以下、これを LED ユニットと呼ぶ)。すなわち、LED パネルには、縦横同数の LED ユニットが任意の数だけ設置されている。

4 知的 LED 照明システムの制御方法

本節では、知的 LED 照明システムの具体的な制御方法について述べる。

4.1 制御の難しさ

知的 LED 照明システムを最適化問題と捉えると、複数地点における光の色を最適化する問題とみなすことができる。具体的には、複数地点における目標色と現在の色との誤差を最小化する問題と定義できる。しかしこのような状況において、すべての地点における色誤差を同時に最小化することは非常に困難である。例えばある地点の誤差を最小化しようとした場合、他の地点での誤差が大きくなるといった状況が考えられる。すなわち、複数地点における色誤差が互いにトレードオフの関係をもつ場合が存在するということであり、LED の数の増加、計測地点の増加に伴い、このトレードオフの関係は強くなる。

このようなトレードオフの関係を考慮しつつ、互いに競合する複数目的のもとで最適解を求める問題は、多目的最適化問題と呼ばれ、非常に難しい問題である。

4.2 多目的シミュレーテッドアニーリングの適用

4.1 節より、知的 LED 照明システムは多目的最適化問題であることがわかった。これを解くための多目的最適化アルゴリズムとして、本研究では多目的シミュレーテッドアニーリング (Multi-Objective Simulated Annealing: MOSA) を用いる。MOSA は本来単目的の最適化問題を解くためのアルゴリズムであったシミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing: SA)²⁾ を、重み係数法を用いて多目的最適化問題に適用可能としたアルゴリズムである。MOSA のアルゴリズムを Fig. 2 に示す。

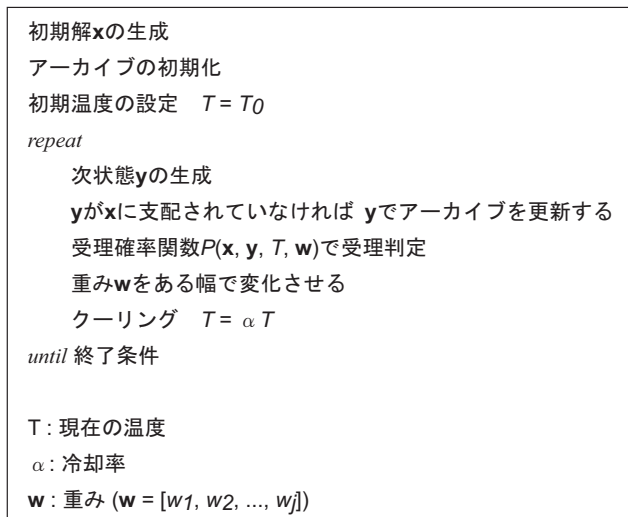


Fig. 2 MOSA のアルゴリズム

受理確率関数 $P(x, y, T, w)$ はいくつか提案されているが、本研究では比較的安定した解探索が可能である³⁾ Rule SL(Scalar Linear) を用いる (式 (1))。

$$P(x, y, T, w) = \min \left\{ 1, \exp \left(\frac{\sum_{j=1}^p w_j \Delta f_j}{T} \right) \right\} \quad (1)$$

式 (1) において、 $\Delta f_j = f_j(x) - f_j(y)$ であり、目的関数値の変化量を表す。重み w_j は各目的関数への重みであり、すべての目的関数への重みの和は常に 1 となる。この重みが探索の方向を制御しており、探索の中で重みを一定の幅でランダムに変化させることにより、広範囲の探索を行うことができる。本研究では変化の幅は Serafini の論文で用いられている $[-0.05, 0.05]$ とした。

4.3 目的関数

本研究では、設計変数を各 LED の光度、色を表す座標系に RGB を用いるものとし、目的関数を式 (2) のように定める。

$$f_j(x) = (\Delta R_j^2 + \Delta G_j^2 + \Delta B_j^2)^{\frac{1}{2}} + \lambda(\Delta K_{Rj}^2 + \Delta K_{Gj}^2 + \Delta K_{Bj}^2) \quad (2)$$

$(j = 1, \dots, J)$

$(\Delta R_j, \Delta G_j, \Delta B_j)$ は計測点における現在の RGB 値と目標 RGB 値との誤差である。よって式 (2) の最初の項は、現在の RGB 値と目標 RGB 値との RGB 空間におけるユークリッド距離である。 $(\Delta K_{Rj}, \Delta K_{Gj}, \Delta K_{Bj})$ は RGB 比の誤差を表している。RGB 比は RGB 値の要素のうち 0 でない要素で他の要素を割ったものである。例えば $(R, G, B) = (200, 100, 200)$ ならば、 R は 0 でないので、すべての要素を R で割り、 $(K_R, K_G, K_B) = (1.0, 0.5, 1.0)$ となる。 R が 0 のときは G で割り、 G も 0 のときは B で割るように指定している。 $(R, G, B) = (0, 0, 0)$ の場合は、 $(K_R, K_G, K_B) = (0, 0, 0)$ とする。重み λ は RGB 比を重視する度合いを定めるパラメータである。なお、各目的関数は計測点に対応しているため、目的関数の数と計測点の数は一致する。

5 数値実験

知的 LED 照明システムの制御アルゴリズムとしての MOSA の有効性を検証するため、シミュレーターによる実験を行う。任意の計測点における RGB 値は、RGB 各色の LED により得られる照度を 255 段階に変換する。このとき、照度の最大値が RGB 値で 255 となるように変換する必要がある。そこで、最も高い照度得られる LED パネル中央直下における照度が RGB 値で 255 となるように、照度を RGB 値 255 段階に変換する。つまり、赤の LED がすべて最大光度で点灯した場合、パネル中央直下の計測点における RGB 値の R の値は 255 となる。照度の算出には、LED を点光源とみなし逐点法

4) を用いた。逐点法とは、任意の点の照度を近似的に算出する方法である。

5.1 実験概要

ここでは、計測点の位置を変えて4つの環境で実験を行い、計測点の色誤差の間にトレードオフの関係が存在するかを検証する。さらに、MOSAによって解候補が得られるかを検証する。

5.2 実験環境

実験環境は、縦横それぞれ10個のLEDユニット(総計300個のLED)を2[cm]間隔でパネルに埋め込み、パネルを高さ10[cm]に設置した環境を想定する。このとき、パネルの縦横の長さはそれぞれ18[cm]である。LEDユニットの直径は無視する。また、計測点は2点とする。

2つの計測点をそれぞれ計測点1、計測点2と呼ぶ。実験を行う4つの環境をTable 1に示す。

Table 1 計測点の位置

	計測点1 (x, y)	計測点2 (x, y)
環境1	(0.06, 0.06)	(0.0, 0.0)
環境2	(0.06, 0.06)	(0.08, 0.08)
環境3	(0.06, 0.06)	(0.12, 0.12)
環境4	(0.06, 0.06)	(0.18, 0.18)

設定したRGB値は、すべての環境において計測点1が $(R, G, B) = (200, 0, 0)$ 、計測点2が $(R, G, B) = (0, 100, 200)$ とする。なお、シミュレーションの関係上、計測点の位置を表すために座標を与えなければならない。座標はFig. 3のように、長さの単位を[m]として与える。Fig. 3には実験で用いた計測点の座標が矢印で示されている。で表されている部分は、その真上10[cm]の位置にLEDユニットがあることを示す。

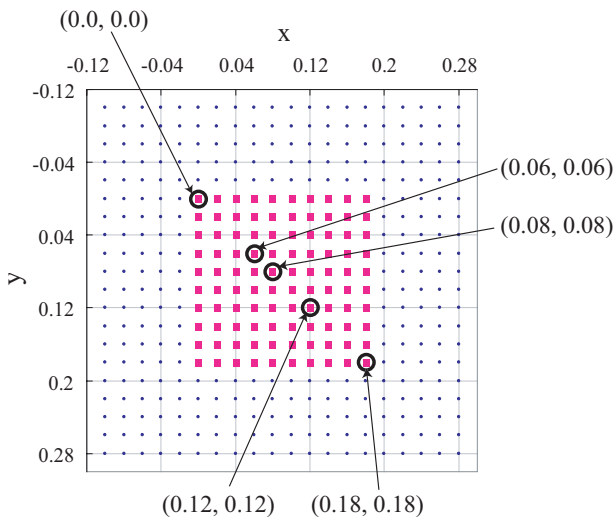


Fig. 3 計測点の座標

次に、MOSAのパラメータをTable 2に示す。なお、試行回数は10とする。

Table 2 MOSAのパラメータ

パラメータ	値
評価計算回数	163200
クーリング数	32
最高温度	100
最低温度	1.0
近傍(光度)[cd]	± 0.1
RuleSLの重みの初期値	$(w_1, w_2) = (0.5, 0.5)$
目的関数のRGB比への重み	1000
LEDの初期点灯光度[cd]	2.0
LEDの最大点灯光度[cd]	2.0
アーカイブのサイズ	100

5.3 実験結果と考察

5.3.1 トレードオフの関係の存在

Table 1の各環境において得られた非劣解集合をFig. 4に示す。なお、Fig. 4では、各試行で得られた非劣解集合をすべてプロットしている。これらの結果より、Table 1のすべての環境において、計測点の色誤差の間にトレードオフの関係があることがわかる。また、目的関数値のばらつきを見ると、計測点間の距離が最も近い環境2のときに、トレードオフの関係が最も顕著に現れている。

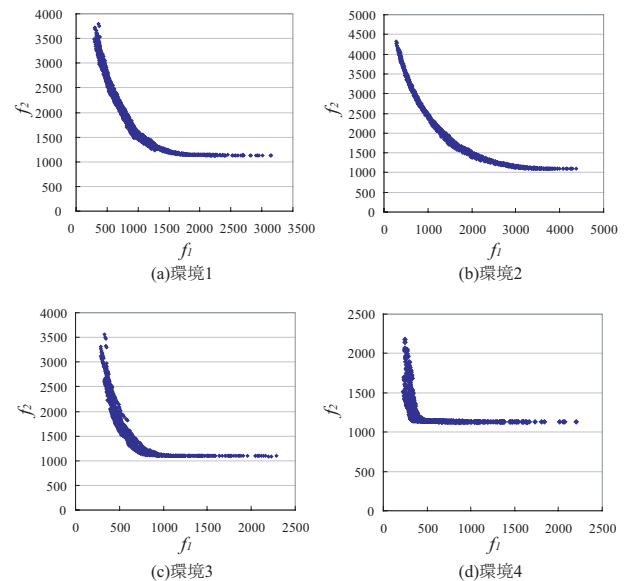


Fig. 4 各環境において得られた非劣解集合

5.3.2 計測点の色

10試行の結果のうち、ある1試行の結果の非劣解集合から、 f_1 の値が最小値、中央値、最大値になってい

るときの計測点の RGB 値を Table 3 ~ Table 6 に示す。ここで、 f_1 は計測点 1 の色誤差を表すため、 f_1 が最小値であるということは、計測点 1 の色誤差が最も小さくなるということである。また、トレードオフの関係が存在するため、 f_1 が最大のときは f_2 は最小、 f_1 が最小のときは f_2 は最大となる。結果より、 f_1 の値が大きくなるにつれ、計測点 1 の RGB 値が目標 RGB 値である $(R, G, B) = (200, 0, 0)$ から遠ざかっていることがわかる。

Table 3 環境 1 での結果における計測点の RGB 値

f_1 の値	計測点 1 (R, G, B)	計測点 2 (R, G, B)
最小値	(161, 50, 63)	(78, 29, 44)
中央値	(130, 58, 91)	(54, 38, 65)
最大値	(109, 74, 138)	(45, 45, 90)

Table 4 環境 2 での結果における計測点の RGB 値

f_1 の値	計測点 1 (R, G, B)	計測点 2 (R, G, B)
最小値	(163, 47, 60)	(165, 55, 72)
中央値	(110, 63, 107)	(102, 70, 124)
最大値	(84, 74, 141)	(80, 80, 156)

Table 5 環境 3 での結果における計測点の RGB 値

f_1 の値	計測点 1 (R, G, B)	計測点 2 (R, G, B)
最小値	(149, 46, 62)	(115, 60, 92)
中央値	(123, 52, 70)	(79, 67, 114)
最大値	(109, 68, 122)	(76, 77, 153)

Table 6 環境 4 での結果における計測点の RGB 値

f_1 の値	計測点 1 (R, G, B)	計測点 2 (R, G, B)
最小値	(159, 45, 52)	(54, 34, 69)
中央値	(146, 45, 62)	(40, 39, 73)
最大値	(132, 87, 137)	(48, 49, 94)

5.4 追加実験

前節までの実験により、知的 LED 照明システムにおいて、各計測点の色誤差の間にはトレードオフの関係が存在することがわかった。また、制御アルゴリズムとして MOSA を適用することで、解候補を提示することが可能であることがわかった。しかしながら、あらゆる状況で計測点間のトレードオフの関係が存在するとは限らず、すべての計測点の色誤差を同時に最小化することができる、「解が存在する環境」も存在すると考えられる。

そこで本節では、「解が存在する環境」が存在するかを検証する。

5.4.1 実験環境

すべての計測点の色誤差を同時に最小化することができると思われる最も簡単な環境として、すべての計測点の目標 RGB 値が同じである場合が考えられる。そこで実験環境として Table 7 のような環境を考える。なお、MOSA のパラメータは前節の実験と同じものを用いる。試行回数は 10 とした。

Table 7 「解が存在する環境」を想定した環境

	位置 (x, y)	目標 RGB 値 (R, G, B)
計測点 1	(0.0, 0.0)	(80, 0, 0)
計測点 2	(0.18, 0.18)	(80, 0, 0)

5.4.2 実験結果と考察

実験により得られた非劣解集合を Fig. 5 に、ある 1 試行における目的関数空間での探索履歴を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の は初期点、 は探索終了点を表す。さらに、ある 1 試行における非劣解集合から、 f_1 の値が最小値、中央値、最大値のときの各計測点の RGB 値を Table 8 示す。

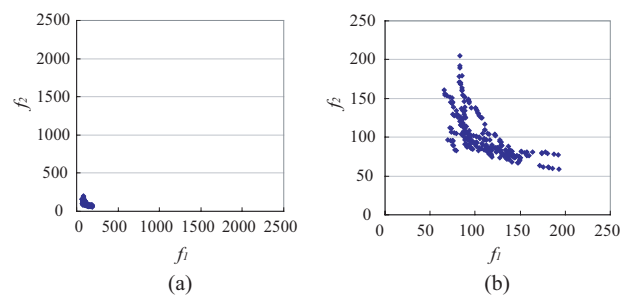


Fig. 5 追加実験において得られた非劣解集合

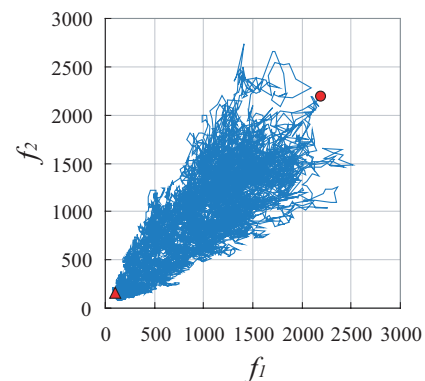


Fig. 6 目的関数空間での探索履歴

Table 8 追加実験での計測点の RGB 値

f_1 の値	計測点 1 (R, G, B)	計測点 2 (R, G, B)
最小値	(91, 15, 15)	(89, 20, 19)
中央値	(86, 18, 17)	(89, 14, 20)
最大値	(85, 23, 20)	(89, 13, 16)

Fig. 5を見ると, 目的関数値に大きな差が見られない. Table 8を見ても, RGB 値にも大きな差がないこともわかる. また, Fig. 6より, 探索終盤は原点に向かって探索が収束していく傾向が見られる. 以上のことから, この環境はトレードオフのない環境であると考えられる. また, そのような状況においても MOSA は妥当な解を提示できる.

6 まとめ

本研究では, 任意の場所に任意の色の光を提供する知的 LED 照明システムの提案を行い, 計算機によるシミュレーションを行った. その結果, 複数の計測点の色誤差の間にトレードオフの関係が存在する場合があることを確認し, 多目的最適化アルゴリズムである MOSA による制御の有効性を示した. また, トレードオフが存在しない状況も存在し, そのような状況においても MOSA が有効であることがわかった.

参考文献

- 1) Serafini P., Simulated Annealing for multiple objective optimization problems, *Proceedings of the Tenth International Conference on Multiple Criteria Decision Making*, Taipei 19-24.07, vol.1, 87-96, 1992.
- 2) Kirkpatrick, S., Gelett, Jr. C. D., and Vecchi, M. P., Optimization by simulated annealing, *Science*, Vol. 220, No.4598, 671-680, 1983.
- 3) 實田健, 単目的および多目的シミュレーテッドアニーリングにおける温度パラメータ, 同志社大学大学院工学研究科修士論文, 2004.
- 4) 池田紘一, 他 (編). 電気工学ハンドブック, 42 編, 電気学会, 第 6 版, 2001.