

Fundamental investigation of a lighting system for adjusting colors using LEDs

Mitsunori MIKI* Satoru HIWA** and Tomoyuki HIROYASU*

(Received July 25, 2005)

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 LEDs. Serafini's Multi-Objective Simulated Annealing(SMOSA) was applied as an algorithm for controlling this system, and the color difference between the current color and the target color at the measuring points was used for its objective function. The result of the simulation confirmed that SMOSA is an effective algorithm for this system, and the proposed intelligent LED lighting system is useful for providing required colors.

Key words : Intelligent lighting system, adjusting colors, LEDs, Simulated Annealing, Multi-objective optimization

キーワード : 知的照明システム, 調色, LED, シミュレーテッドアニーリング, 多目的最適化

LEDを用いた調色用照明システムの基礎的検討

三木光範・日和悟・廣安知之

1. はじめに

自動車や家電製品など,さまざまな人工物の知的化が進む中,三木らは,照明システムを知的化することにより,任意の場所に任意の明るさを提供する知的照明システムを開発し,その有効性を示している¹⁾.知的照明システムは,我々が照明システムに求めてきた,省エネルギー性やユーザビリティといった要求に応え,個々のユーザの望む光環境を提供する有効なシステムである.

しかしながら,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²⁾.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.これ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の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.

* Department of Knowledge Engineering and Computer Sciences, Doshisha University, Kyoto
Telephone:+81-774-65-6930, Fax:+81-774-65-6796, E-mail:mmiki@mail.doshisha.ac.jp, tomo@is.doshisha.ac.jp

** Graduate Student, Department of Knowledge Engineering and Computer Sciences, Doshisha University, Kyoto
Telephone:+81-0774-65-6924, Fax:+81-774-65-6924, E-mail:shiwa@mikilab.doshisha.ac.jp

本研究では、任意の場所に任意の色の光を提供する知的な調色用照明システムを提案し、制御アルゴリズムとそのパラメータについて基礎的な検討を行う。具体的には、光源としてRGB3色の発光ダイオード (Light Emitting Diode: 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 (Serafini's Multi-Objective Simulated Annealing: SMOSA)³⁾ を適用し、シミュレーションによりその有効性を検証する。

2. 知的LED照明システムのご概念と構成

本節では、知的LED照明システムの提案を行い、その具体的な特徴と構成について述べる。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調色用照明システムである。知的LED照明システムでは、多数のLEDが1つの制御装置に接続され、それらの光度を個々に制御する。システムには光の色を検知するセンサ (色彩照度計) が含まれており、ユーザはそのセンサに目的の色を設定し、それを任意の場所に設置するだけで、システムの自律的な制御により、任意の場所に任意の色の光が提供される。

知的LED照明システムはFig. 1およびFig. 2に示すように、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、複数の色彩照度計から構成される。

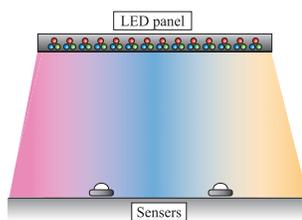


Fig. 1. The structure of an intelligent LED lighting system.

Fig. 1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センサを複数個設置する。LEDパネルにはFig. 2のように、RGB3色のLED1組 (LEDユニット) を固めて配置する。すなわちLEDパネルには、縦横同数のLEDユニットが複数個設置されている。また、パネルに設置されたLEDは集中管理機構にネットワーク接続されており、制御に必要な

な情報がネットワークを介して送受信される。

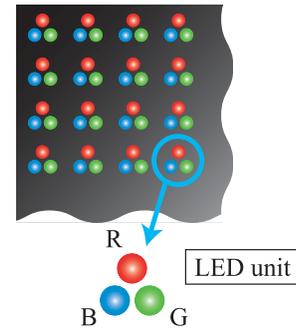


Fig. 2. The LED panel.

3. 知的LED照明システムの制御

知的LED照明システムは集中制御型のシステムである。すなわち、集中管理機構が各照明の光度を制御アルゴリズムに基づき、自律的に調節する。このとき、ユーザが行うべき操作は各センサに対する目標色の設定のみである。以下にシステムによる制御の流れを示す。

1. 各センサが現在の色を計測する。
2. 各センサが現在の色、センサID、目標色の情報を制御装置に返す。
3. 制御装置は取り込んだ現在のセンサ情報から、制御アルゴリズムに基づき、光度を制御する。
4. 上記の動作を繰り返すことで、常に環境情報を感知し、目的を満たすように制御を行う

以上の流れにより、知的LED照明システムは、ユーザの要求した色の光を提供するよう動作する。この動作を実現するには、上記3に示した照明制御アルゴリズムが非常に重要となる。次章から照明制御アルゴリズムについて述べる。

4. 知的LED照明システムと多目的最適化

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。すなわち、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。しかしながら複数地点における色の最適化において、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難しい。

例えば Fig. 3 のように、2 つの計測点にそれぞれ (R_1, G_1, B_1) 、 (R_2, G_2, B_2) という目標色が設定されている場合を考える。図の左側の計測点 1 の目標色 (R_1, G_1, B_1) が紫色で、右側の計測点 2 の目標色 (R_2, G_2, B_2) がオレンジ色であるとすると、計測点 1 の色誤差を最小化しようとした場合、計測点 1 での色が紫色に近づくように、計測点 1 の周囲で青の LED の光度を上げると、計測点 1 は目標色に近づくことが予想されるが、計測点 2 では青色が入ってしまうと目標色であるオレンジ色から離れてしまう。逆に、計測点 2 のオレンジ色に近づけるために、計測点 2 の周囲で緑の LED の光度を上げた場合、計測点 2 は目標色に近づくが、計測点 1 では目標色である紫色から離れてしまう。

このように複数地点における色の最適化では、ある計測点での色誤差を小さくしようとすると、他の地点の色誤差が大きくなる状況が存在する可能性がある。このことを、計測点の色誤差をそれぞれ f_1 、 f_2 と表すと、 f_1 、 f_2 には Fig. 4 のようなトレードオフの関係が存在することになる。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る。また、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と考えられる。

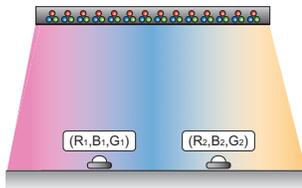


Fig. 3. Optimization of colors at many measuring points.

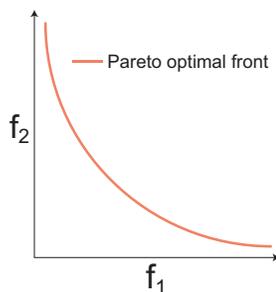


Fig. 4. The Relation of color difference at many measuring points.

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る。多目的最適化問題では、すべての目的関数を同時に最小化する解は存在しない。このため、「ある目的関数値を改善するためには、少なくとも他の 1 つの目的関数値を改悪せざるを得ない解」を求める。このような解の概念は、パレート最適解と呼ばれ⁴⁾、一般にパレート最適解集合が形成する面のことをパレート最適フロントと呼ぶ。また、本論文では、パレート最適解には劣るものの、その時点までに探索した他の解には劣らない解を、パレート解と区別して特に非劣解と呼ぶ。多目的最適化アルゴリズムとしては、以下のものがある。

- 多目的遺伝的アルゴリズム (Multi-Objective Genetic Algorithm: MOGA)⁵⁾
- 多目的シミュレーテッドアニーリング (Multi-Objective Simulated Annealing: MOSA)⁶⁾

これらはいずれも代表的な多目的最適化アルゴリズムであり、さまざまな改良手法が提案されている。MOGA は、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を多目的最適化問題を解くために拡張したものである。GA は多点探索アルゴリズムであるため、MOGA も多点探索アルゴリズムである。多点探索アルゴリズムを LED 照明システムに適用する場合、複数探索点の評価を時間をずらすことで行う必要があるため、点灯パターンの変化が激しくなり、ユーザに不快感を与える。また、計算時間が膨大になるという欠点もある。

一方 MOSA には、Serafini が提案した 1 点探索アルゴリズムの SMOSA (Serafini's MOSA) が存在する。一点探索アルゴリズムでは、ユーザが感じない程度に光度を変化させながら探索を行うことが可能であり、ユーザに不快感を与えることはない。そこで本研究では、知的 LED 照明システムの制御アルゴリズムとして、SMOSA を用いる。SMOSA は Fig. 5 のように、目的関数空間において、 f_1 、 f_2 双方が改善される方向を優先しながらランダムに探索を進めていき、パレート最適解付近ではパレートに沿った探索を行うアルゴリズムである。なお、SMOSA については後に詳しく述べる。

以上のことから、知的 LED 照明システムでは、多目的最適化アルゴリズムを用いた制御により、最終的にはユーザの要求した色を満足させるような点灯パター

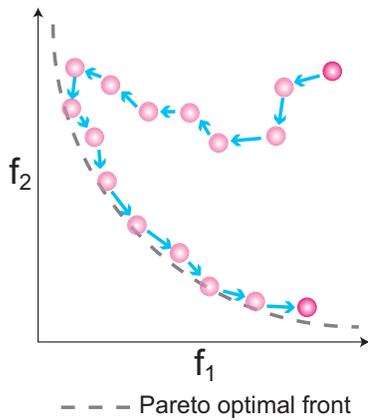


Fig. 5. Search by SMOSA.

ンの候補が非劣解集合として得られることになる．そしてユーザはその候補の中から，自分の要求に最も合っていると判断したものを採用することになる．

5. 多目的シミュレーテッドアニーリング

5.1 SA

シミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing: SA)⁷⁾ は，熱力学のアニーリングを計算機上でシミュレートすることにより，制約条件を満たす解，すなわちエネルギーと呼ばれる目的関数値が最小となる状態 (大域的最小状態) を見つける手法である．通常 SA では単一の目的関数に対して評価を行い，大域的最小状態を探索する．

SA では，現在の解から計算されるエネルギー (目的関数値) と，その解を微小に変化させた後のエネルギーを用いて，式 (1) に示す Metropolis 基準に従い，この微小な変化を採用するか否かの判断を行う．

$$P_{AC} = \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta E < 0 \\ \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

現在の状態 x を微小に変化させて新しく生成された状態 x' は，そのエネルギー E' が現在の状態 x のエネルギー E よりも低ければ，確率 1.0 で受理される．そうでない場合は，次の状態 x' のエネルギー E' と現在の状態 x のエネルギー E との差分 $\Delta E (= E' - E)$ ，および温度パラメータ T を用いて，その摂動が受理される確率を計算し，その確率に従って受理判定がなされる．

このとき温度と呼ばれる制御パラメータが高い場合には，前の状態よりもエネルギーの大きな状態を選択する可能性が高いが，温度が低くなるとエネルギーが小さい状態のみが選択される確率が高くなる．したがって十分高い温度から，徐々に温度を冷却することによって，最小ではない極小 (局所的な最小状態) に陥らずに，大域的な最小状態に到達することができる．Fig. 6 に SA のアルゴリズムの流れを示す．

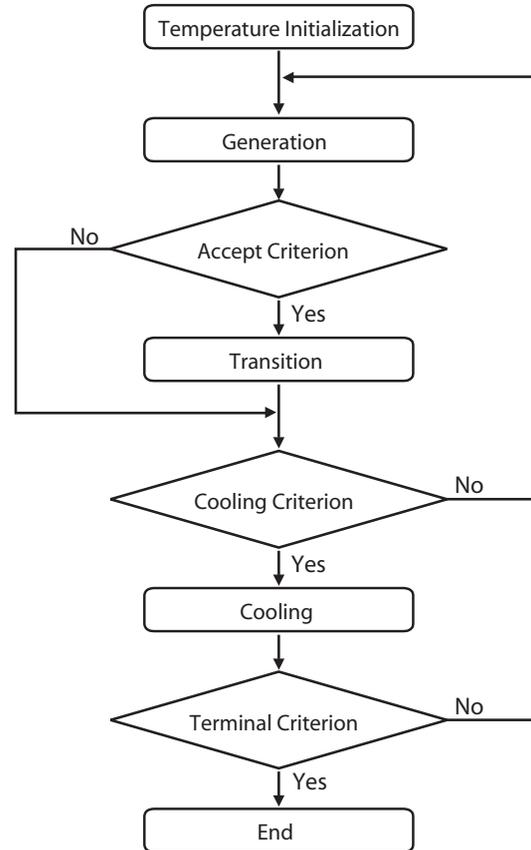


Fig. 6. The algorithm of SA.

5.2 SMOSA

SMOSA と通常の SA で最も大きく異なる点は，次状態の受理判定に複数の評価基準が用いられる点である．5.1 節で述べたとおり，通常 SA では単一の目的関数に対して，式 (1) に示した Metropolis 基準を用いて受理判定を行う．したがって，複数の評価基準をもつ多目的最適化問題に SA を適用する場合，この Metropolis 基準をそのまま使用することはできない．そこで，これまでに多目的最適化問題に適用可能な受理確率関数がいくつか提案されている³⁾．以下に代表的な受理確率関数を示す．

Rule SL

$$P_r = \min \left\{ 1, \exp \left(\frac{\sum_{j=1}^p \omega_j \Delta f_j}{T} \right) \right\} \quad (2)$$

Rule C

$$P_r = \min \left\{ 1, \min_j \left(\exp \left\{ \frac{\omega_j \Delta f_j}{T} \right\} \right) \right\} \quad (3)$$

Rule W

$$P_r = \min \left\{ 1, \max_j \left(\exp \left\{ \frac{\omega_j \Delta f_j}{T} \right\} \right) \right\} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta f_j = f_j(x) - f_j(x')$ であり、 x (現在の解)、 x' (次状態)である。また T は温度、 $\omega_j (\omega_1 + \dots + \omega_p = 1)$ は目的関数 f_j に対する重みを示す。

最も代表的な受理確率関数は式 (2) に示す Rule SL である。この受理確率関数は重み係数法により複数の目的関数を単目的化し、単目的 SA で用いられる Metropolis 基準を用いて受理判定を行う。Rule C は、次状態の候補 x' が現在の解 x を支配している場合のみ受理確率 P_r が 1 となるような関数形をした受理確率関数であり、Rule W は次状態の候補 x' が現在の解 x に支配されていなければ受理確率 P_r が 1 となるような関数形をした受理確率関数である。

2 目的最小化問題における各受理確率関数の $f_1 - f_2$ 平面での等高線の模式図を Fig. 7 に示す。 x が $f_1 - f_2$ 平面上における現在の解の位置である。解候補と二つの目的関数値の差を Δf_j で表し、点 x を原点として Δf_1 軸、 Δf_2 軸を描いてある。

Rule C のように解が改善となる方向への探索を優先するような受理確率関数の場合、パレート最適フロントに対する収束性の向上が期待されるが、解が局所解に陥る可能性が高くなる。一方 Rule W のように解が改悪となる方向への探索を優先するような受理確率関数の場合、パレート最適フロントに対して、幅広い解探索が期待されるが、収束性が悪化する可能性が高くなる。

本研究では比較的安定して良好な解探索が可能であるとされている Rule SL を使用する。また、SMOSA では受理確率関数の重みをステップごとに一定範囲内で変化させるが、本研究では重みの変化の幅は Serafini の論文で用いられている $[-0.05, 0.05]$ とした。

6. 多目的シミュレーテッドアニーリングの適用

6.1 知的 LED 照明システムの制御アルゴリズム

本システムは、LED パネルに配置された多数の LED の光度を、集中制御装置によって個々に調節するシステ

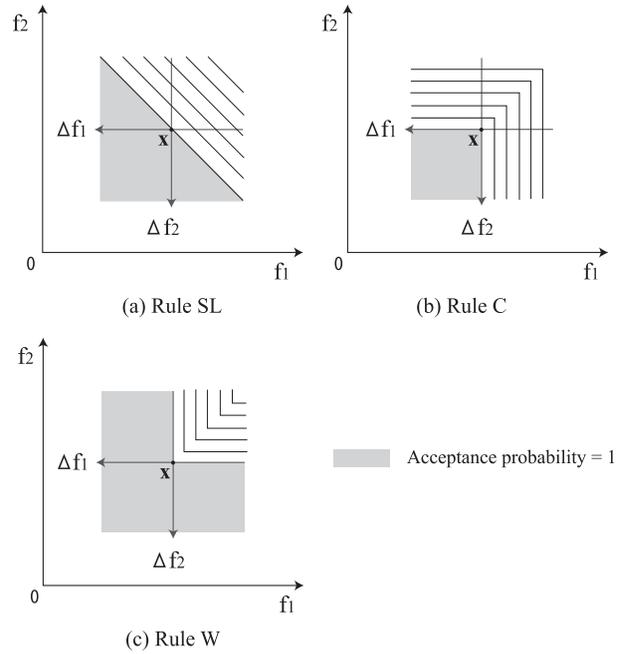


Fig. 7. Acceptance probability functions.

ムである。したがって SMOSA を用いて制御する場合、設計変数は各 LED の光度となる。Fig. 8 に SMOSA を用いた知的 LED 照明システムの制御アルゴリズムのフローチャートを示す。

具体的には以下のような動作を行うことで、目標色を実現する点灯パターンの候補を得ることができる。なお、ユーザはシステムを動作させる前に、初期設定として目標色を設定する必要がある。

1. 現在の光度 x で得られた色と目標色との差から目的関数値を計算する。
2. 定められた近傍内で次光度 x' の生成を行う。
3. 次光度 x' で得られた色と目標色の差から目的関数値を計算する。
4. 次光度 x' がアーカイブ内の任意の解に対して支配されていないならば、 x' をアーカイブに追加し、 x' によって支配される解がある場合はそれを削除する。
5. 1 で求めた目的関数値と合わせて受理判定を行う。
6. 受理確率関数の重みを変化させる。
7. 1~6 を一定期間繰り返した後、クーリングを行う。
8. 1~7 を終了条件を満たすまで繰り返す。

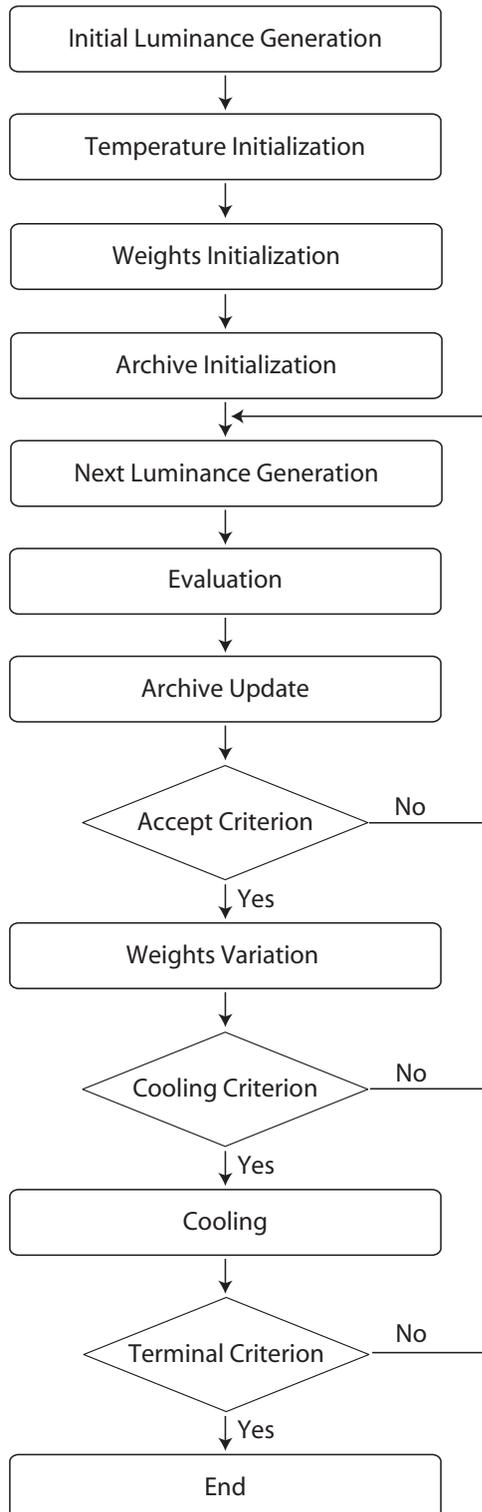


Fig. 8. The control algorithm using SMOSA.

ここで、受理判定に用いる目的関数は非常に重要となるが、目的関数については次節で詳細に述べる。

6.2 目的関数

最適化アルゴリズムの適用においては、その目的関数の設計が重要となる。本研究では、設計変数を各LEDの光度、色を表す座標系にコンピュータ上での色空間として一般的なRGBを用いる。その場合目的関数には、RGB空間における目標色と現在の色とのユークリッド距離を用いることが考えられる。

しかしRGB空間では、ユークリッド距離と人間が感じる2色の差が一致しないため、人間の感性にあった評価を行うことができない。その問題を解決するため、空間内の等距離（色差）が知覚的に等しい差となる均等色空間が提案されている。

本研究では、均等色空間として国際照明委員会 (Commission Internationale de l'Éclairage: CIE) が1976年に定めたCIELUVを用い、この空間でのユークリッド距離を目的関数に用いる。CIELUVは、三次元直交座標 (L^*, u^*, v^*) で表される空間である。

色彩照度計などによる測色では、CIE XYZ表色系という色空間が用いられており、色情報はXYZの3刺激値で得られる。このXYZ表色系は測色の分野で一般的に用いられており、本システムで得られる色情報もXYZ表色系を想定する。したがってXYZ空間からCIELUV空間への変換が必要となるが、RGB, XYZそしてCIELUVの3つの空間における変換式がすでに提案されている⁸⁾。本研究ではこの変換式を用いることで均等色空間における評価を行う。以上より、目的関数を式(5)のように定義する。なお、各目的関数は各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。

$$f_j(x) = \{(\Delta L_j^*)^2 + (\Delta u_j^*)^2 + (\Delta v_j^*)^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

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

7. 数値実験

7.1 調色シミュレータ

知的LED照明システムの制御をシミュレートするため、LEDパネルに任意の点灯パターンを設定すると、そのパターンにより照射されたパネル下部の色状況を仮想的に算出する調色シミュレータの開発を行う。色状況を表現する座標系には、現在一般に普及しているRGBを用いる。以下に詳細を述べる。

本シミュレータでは、Fig. 9のような環境を想定し、色彩照度計の置かれた平面上でどのような光の色が提供されるかをシミュレートする。シミュレーションの結果は Fig. 9 の右に示すように、色彩照度計の置かれた平面を上部から見た場合の画像として得られる。図中の白い枠は LED パネルの大きさを表している。

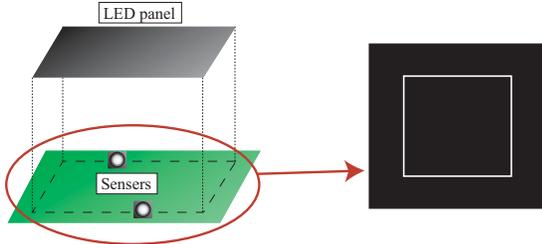


Fig. 9. The simulation environment.

シミュレーションにおいては、パネル下部の任意の点における色状況 (RGB 値) を求めるが、その RGB 値は、RGB 各色の LED の点灯により得られるその地点の照度と比例すると仮定する。なお、照度の算出には逐点法⁹⁾を用いる。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。また、各 LED が最大点灯光度で点灯した場合の、LED パネルの中央直下の照度を基準とし、その照度に対する RGB 値を $(R, G, B) = (255, 255, 255)$ とする。つまり、赤の LED のみが全て最大点灯光度で点灯した場合、パネル中央直下の地点における RGB 値は $(R, G, B) = (255, 0, 0)$ となる。

このようにして開発したシミュレータの出力結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 は青の LED をすべて最大光度で点灯させたときのパネル下部の色状況である。なお、本シミュレータでは RGB の LED300 灯を Fig. 11 のように設置した。パネルは縦横それぞれ 0.18[m] の正方形であり、パネルの高さは 0.10[m] とした。色彩照度計の位置は任意に設定可能である。

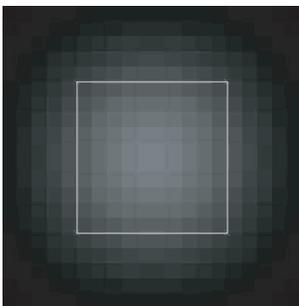


Fig. 10. The output image by the simulator.

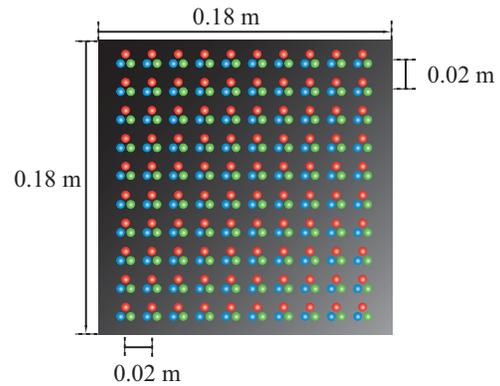


Fig. 11. The LED panel.

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 LED パネルの左隅の真下の地点を原点とし、単位を [m] として座標を与えている (Fig. 12 参照)。

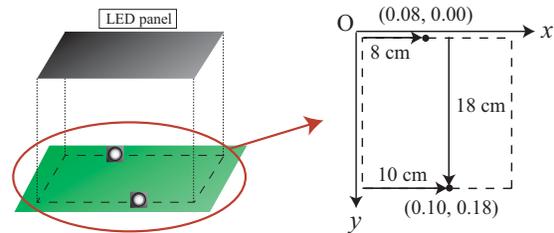


Fig. 12. Coordinates in simulation environment.

7.2 実験概要

知的 LED 照明システムの制御アルゴリズムとしての SMOSA の有効性を検証するため、開発したシミュレータによる実験を行う。

本実験では、まず SMOSA における温度パラメータの検討を行う。5. 節で述べたように、SA において温度パラメータは改悪を制御する重要なパラメータである。温度パラメータの設定が適切でない場合、解精度が著しく悪化するため、このパラメータの適切な設定が必要となる。本実験では、一定温度による SMOSA を、温度 1000 ~ 0.001 の間を等比的に 5 分割した温度に温度 0 を加えた計 7 パターンの温度で実行し、解精度を比較し、温度パラメータが解精度に与える影響について検証する。

実験環境は Table 1, Table 2 に示す 2 つの環境で行った。計測点は 2 点とし、それぞれ計測点 1, 計測点 2 と呼ぶ。なお、LED の初期点灯光度と最大点灯光度はともに 2.0[cd] とした。SMOSA のパラメータ

は Table 3 のように設定した .

Table 1. Environment 1.

	Coordinates (x, y)	The RGB value
Point 1	(0.06, 0.06)	(150, 210, 50)
Point 2	(0.12, 0.12)	(190, 50, 180)

Table 2. Environment 2.

	Coordinates (x, y)	The RGB value
Point 1	(0.08, 0.00)	(50, 100, 175)
Point 2	(0.10, 0.18)	(160, 60, 160)

Table 3. The parameters of SMOSA.

The parameters	The values
Total steps	163200
Cooling steps	32
Neighborhood range [cd]	± 0.1
Initial value of weights	$(w_1, w_2) = (0.5, 0.5)$
Archive size	100

7.3 実験結果と考察

7.3.1 温度パラメータの検討

実験により得られた各温度における非劣解集合を Fig. 13 および Fig. 14 に示す . なお , グラフには 10 試行で得られたすべての非劣解集合をプロットしている . なお , 横軸と縦軸はそれぞれ目的関数値 f_1, f_2 を表す . f_1, f_2 それぞれにおいて値が小さいことが望ましく , すなわち図の左または下にいくほど良い解が得られていることを示す .

非劣解集合より , 2 つの環境において , 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 , いずれの環境についても温度が高くなるにつれて精度が悪くなる傾向が見られる . しかしながら , 環境 1 の温度 0.1 以下の非劣解集合や環境 2 の温度 0.01 以下の非劣解集合については , 図からその精度の優劣を判断し難い . そこで , それらの温度について優越個体割合 (I_{RNI})⁵⁾ とパレートフロントとサンプリング直線に交点に基づく評価手法 (I_{LI})¹⁰⁾ で比較した結果

を Fig. 15 および Fig. 16 に示す . なお , RNI は , Tan らによって提案された 2 つの非劣解集合の比較手法であり , 精度の評価に用いる . LI は Knowels と Corne により提案された , RNI と同様 2 つ以上の非劣解集合の比較を行うための手法である . Fig. 15 および Fig. 16 では , 上の項目に示された温度と , 右の項目に示された温度との比較結果がそれぞれ示されている . 例えば Fig. 15 では , 温度 0 と温度 0.01 の非劣解集合を比較した結果 , 温度 0 での非劣解集合が 52.3 % で優越していることが示されている . また , 温度 0 と温度 0.1 では 97.7 % で温度 0 の非劣解集合が優越している . I_{RNI} と I_{LI} で比較した結果を Fig. 15 および Fig. 16 に示す . なお , 環境 1 の温度 1 以上と環境 2 の温度 0.1 以上の結果は , それぞれ非劣解集合から精度が悪いことが視覚的に判断できるため , 比較対象から省いた .

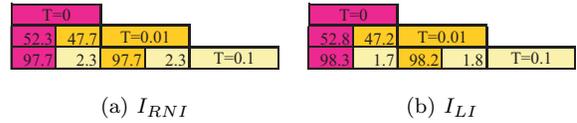


Fig. 15. I_{RNI} and I_{LI} of Environment 1.

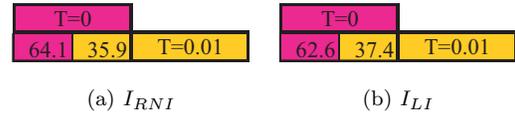


Fig. 16. I_{RNI} and I_{LI} of Environment 2.

I_{RNI}, I_{LI} による比較結果から , いずれの環境においても温度 0 が最も高い精度を示した . 以上より , 温度 0 で最も良好な結果が得られることがわかった .

7.3.2 計測点における RGB 値

ここでは , 先の実験で最も高精度の解を求めることができた温度 0 での結果について , 計測点において実際どのような RGB 値が得られているかを考察する .

温度 0 での結果において , 10 試行で得られた非劣解集合のうち , ある 1 試行の非劣解集合から 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 4 および Table 5 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

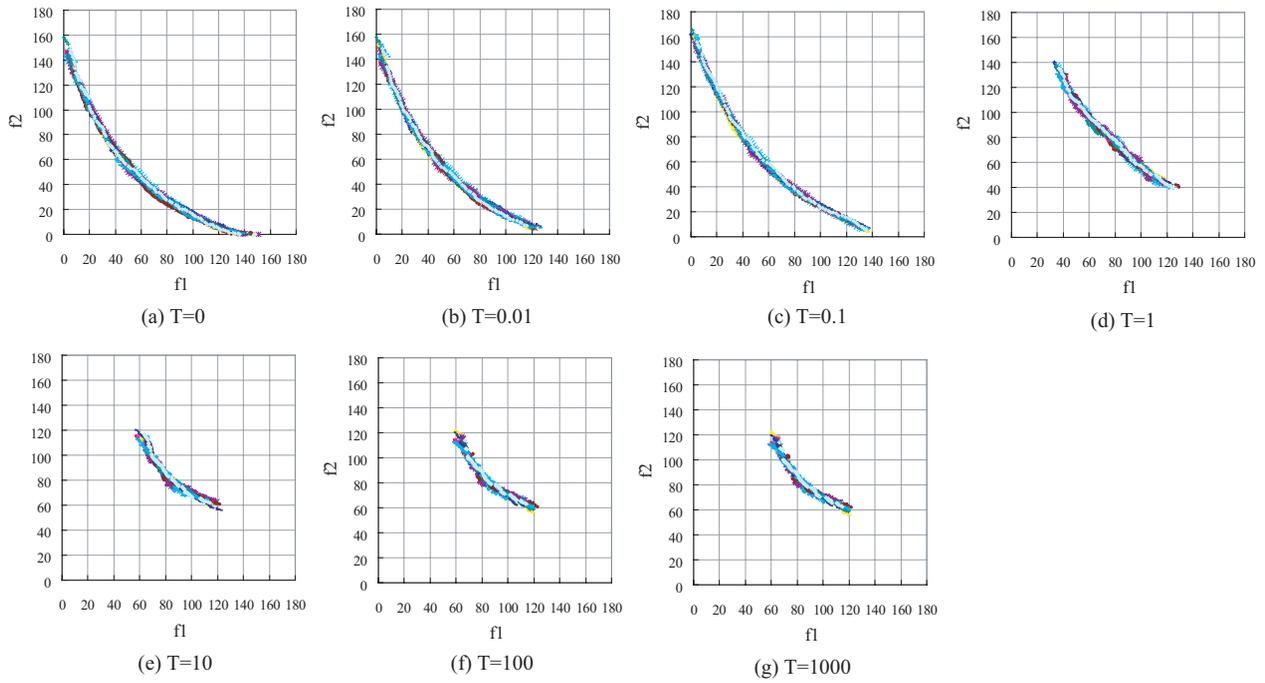


Fig. 13. The nondominated front of Environment 1.

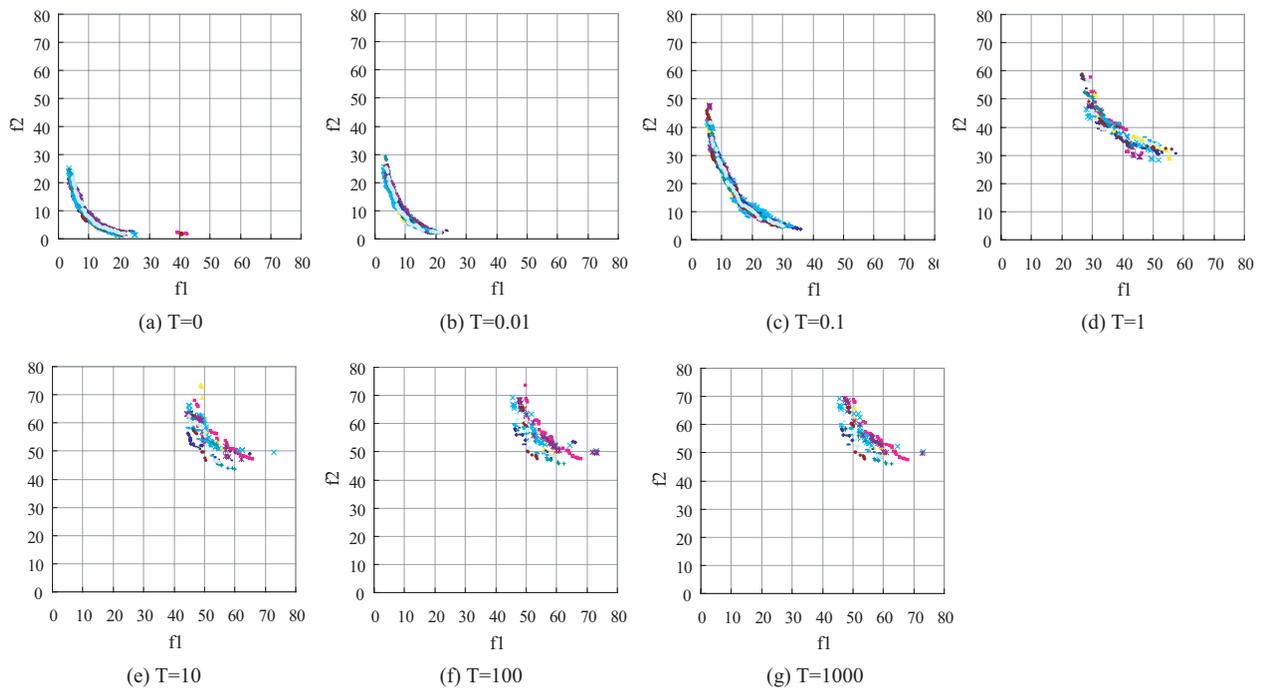


Fig. 14. The nondominated front of Environment 2.

するため, f_1 が最小となるときは, f_2 は最大となり, f_1 が最大のときは, f_2 は最小となる.

Table 4. The RGB values of measuring points(Environment 1).

f_1	Point 1	Point 2
Minimum value	(147, 207, 55)	(156, 176, 88)
Median value	(138, 152, 100)	(162, 99, 151)
Maximum value	(176, 81, 156)	(190, 50, 180)
Target color	(150, 210, 50)	(190, 50, 180)

Table 5. The RGB values of measuring points(Environment 2).

f_1	Point 1	Point 2
Minimum value	(56, 95, 169)	(122, 60, 146)
Median value	(71, 90, 165)	(142, 50, 147)
Maximum value	(95, 89, 159)	(155, 55, 155)
Target color	(50, 100, 175)	(160, 60, 160)

Table 4 より, f_1 が最小のときは計測点 1 の目標色である (150, 210, 50) に非常に近い値を得ており, f_1 が最大, すなわち f_2 が最小のときには計測点 2 の目標色である (190, 50, 180) と完全に一致する解が得られていることがわかる. また, 環境 2 においても同様の結果が得られている. 以上より, 知的 LED 照明システムの制御アルゴリズムとして SMOSA が有効であり, 目的関数の設計も有効であるということがわかった.

8. 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, その具体的な構成および制御方法について述べた. この際, 複数の計測点における色誤差の間にトレードオフの関係が存在することを想定し, 制御アルゴリズムとして多目的最適化アルゴリズムである SMOSA を適用した.

調色シミュレータによる実験を行った結果, SMOSA の探索性能に大きな影響を及ぼす温度パラメータは, 0 が最も良い精度であることがわかった. さらに, 複数計測点における色誤差のトレードオフの関係の存在を確認し, SMOSA による制御を行うことにより, 高

精度の解を求め, 複数の点灯パターンの候補を得ることができた. 以上より, 知的 LED 照明システムという新たな調色用照明システムの有効性が示された.

参考文献

- 1) Miki M and Hiroyasu T and Imazato K. Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness. *Proc IEEE CIS*. 520-525(2004).
- 2) 松下美紀. LED 演出照明の現状と未来. 照明学会誌. 88-3, 149-153(2004).
- 3) Serafini P. Simulated Annealing for multiple objective optimization problems. *Proceedings of the Tenth International Conference on Multiple Criteria Decision Making*.1, 283-294(1994).
- 4) 坂和 正敏, 石井 博昭, 西崎 一郎. ソフト最適化. 日本ファジィ学会編 ソフトコンピューティングシリーズ 第 2 巻. 朝倉書店 (1995).
- 5) Kay Chen Tan and T.H.Lee and E.F.Khor. Incrementing Multi-Objective Evolutionary Algorithms: Performance Studies and Comparisons. *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. 111-125(2001).
- 6) Jaszkievicz A. A comparative study of multiple-objective metaheuristics on the bi-objective set covering problem and the Pareto memetic algorithm. *Working paper RA-003/01*(2001).
- 7) Kirkpatrick, S., Gelett Jr. C. D., and Vecchi, M. P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*.220-4598, 671-680(1983).
- 8) 小林光夫. 均等色空間 (II) -CIELUV と色差-. 日本色彩学会誌. 26-3, 196-204(2002).
- 9) 池田紘一. 電気工学ハンドブック. 電気学会 (2001).
- 10) J. D. Knowles and D. W. Corne. Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy. *Evolutionary Computation*. 8-2, 149-172(2000).