

# 紙をUIとしたアルゴリズム体感可能な色光制御システム

富吉 佑季<sup>1</sup> 間 博人<sup>1</sup> 奥西 亮賀<sup>2</sup> 本谷 陽<sup>2</sup> 三木 光範<sup>1</sup>

**概要：**近年、個人にあった環境を個別で制御する技術に注目が集まっている。その技術の中で、色光を個別で制御する技術について注目する。色光制御システムにおける課題点として、同一屋内のLED照明を個別で制御する場合、昼光や他の照明などの外乱の影響を受ける点が挙げられる。また、遊園地などの娯楽施設での色光制御システムを用いる場面を想定した場合、子どもや高齢者などITリテラシが低いユーザが用いることが考えられる。そこで、紙とクレヨンを用いて、ビジョンセンサでフィードバック制御を行いながら、ユーザが要求する色光に段階的に近付けていく色光制御を行うことでアルゴリズムを体感できる色光制御システムを構築した。そして、提案システムにおける精度検証を行うため、目標の色光環境が実現可能かどうかの検証を行った。

**キーワード：**ユーザーインターフェース、インタフェースデザイン、色光制御

## 1. はじめに

近年、情報工学の発展に伴い、様々な情報端末が開発され、情報端末を用いて実現できることが急増している。しかし、ユーザが利用できるシステムの増加に伴い、機器の操作の難易度が上昇している。機器の操作の難易度が上昇すると、情報リテラシが低いユーザはシステムを使用することができず、デジタルデバイドが問題となっている。この問題は、制御する際に情報端末を用いるのではなく、誰でも直感的に使用可能である紙をクレヨン、色鉛筆およびペンなどの筆記具、画材をUIとして使用することによって解決可能であることが考えられる。

また、光源の発達が進み、特に高輝度青色LEDの登場以降はLED照明が急激に進化している。LED照明は従来照明として用いられてきた蛍光灯と比べ、省電力、長寿命、小型化が容易であるといった特徴を持ち、現在オフィスや家庭でのLED照明の普及が進んでいる。LED照明の特徴として、赤、緑、青といったような色を持つ光である色光を表現することができ、色光制御可能なフルカラーLED照明も登場している [1]。

このため、今後LED照明の普及と共に、色光照明が照明光として利用されることが予想される。色光の特性としては照度や色度が挙げられ、本研究ではこの中でも色度に注目し、目標の色度を実現する照明制御システムの提案、

構築を行い、本システムの検証実験を行う。照明器具として調光可能なフルカラーLED照明を用いることで幅広い色光を実現し、目標の色度に照明を制御する。

そこで、紙とクレヨンを用いて、クレヨンの色を実空間の色光として表現する色光制御システムを提案する。色光制御システムにおける課題点として、同一屋内のLED照明を個別で制御する場合、昼光や他の照明などの外乱の影響を受ける点が挙げられる。そこで、ビジョンセンサでフィードバック制御を行いながら、ユーザが要求する色光に段階的に近付けていく色光制御を行う、紙をUIに用いた色光制御システム (Color-Lighting Control using Paper as UI: CLC/PUI) を構築する。

CLC/PUIを使用すると色光が段階的に目標の色光に近付いていく変化を体感することができるため、ユーザにアルゴリズムを体感することも可能である。アルゴリズムの可視化の研究は複数行われているが [2], [3], [4], CLC/PUIでは色光を利用し、アルゴリズムを体感できるようにする。CLC/PUIを使用することでデジタルデバイドの解消と、アルゴリズムの体感をすることができる。

## 2. 照度と色度について

色光とは、可視光スペクトル内の波長を持った人の感性にとって色のある光のことである。色光の特性としては照度や色度が挙げられ、色光環境を測定する場合、指標として照度や色度が指標として用いられる。

<sup>1</sup> 同志社大学理工学部

Department of Science and Engineering, Doshisha Univ

<sup>2</sup> 同志社大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Doshisha Univ

## 2.1 照度

照度とは光源からの照射面の明るさの指標であり、単位を lx (ルクス) で表わす。照度によって適した作業内容や個人に好み異なることが分かっており [5], また JIS 規格によって、場所の目的により異なる照度が推奨されている [6]。例えば、製図や組み立てなどの精密な作業が必要な場合には 1000 lx 以上の高照度環境が推奨されており、一般的な事務室や会議室、教室などでは、750 lx 程度の中照度が推奨されている。

しかし、上記の規準は紙上作業のみを基準としており、ディスプレイ上での作業を考慮していない。ディスプレイ作業では高照度環境では画面が見えにくくなるといった問題がある。またこれに加え、個人によって明るさの好み異なることを考慮すると、常に同一の照度環境を利用するよりも個別の作業内容に合わせた照度環境を作る必要があると考えられる。

## 2.2 色度

色度とは、物体色や光色に用いられる色の尺度である。色度には複数の表現方法があるが、本実験では RGB 表色系と XYZ 表色系、 $L^*a^*b^*$  表色系を用いる。XYZ 表色系は、CIE で定義される表色系の基準であり、 $xyY$  表色系や  $L^*a^*b^*$  表色系といった他の表色系の値は、XYZ 表色系の値を変換することで得ることができる。色の認識は人の感性に基づくため、光のエネルギー強度のみでは色を表現することはできない。しかし、XYZ 表色系では色を感じる器官である錐体に対して、可視光スペクトルから得られる色覚の強さを数値化することで、感性的な量である色を定量化している。この可視光スペクトルに対する色覚の強さを数値化したものを等色関数と呼び、この等色関数と光のスペクトル分布より、色度を表す 3 値 (X, Y, Z) を得ることができる。XYZ 色度の計算式を式 (1)、式 (2)、式 (3) に示す。

$$X = \sum_{\lambda=380}^{780} I(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

$$Y = \sum_{\lambda=380}^{780} I(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

$$Z = \sum_{\lambda=380}^{780} I(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

$\lambda$ : 波長 [nm]  $I(\lambda)$ : スペクトル強度  
 $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ : 等色関数

XYZ 色度では、Y が明るさ、X と Z が色味の変化を表す。この XYZ 値は数値と色彩の関連がわかりづらく、また数値の変化量と知覚の変化量が比例しない。そのため、その数値からは異なる色の違いの程度 (色度差) を定量的に表現することが出来ない。そのため、色度差が必要な場

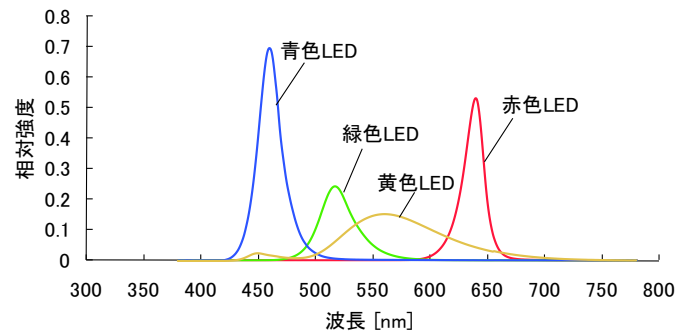


図 1 フルカラー LED 照明における可視光スペクトル

合には  $L^*a^*b^*$  表色系が用いられる。

$L^*a^*b^*$  表色系は、XYZ 値の変換により得られる色度である。それぞれの数は  $L^*$  が明るさ、 $a^*$  が赤から緑、 $b^*$  が黄から青の色味の変化に対応している。 $L^*a^*b^*$  表色系では、ホワイトポイントと呼ぶ基準色を定める。このホワイトポイントの色が  $(a^*, b^*) = (0, 0)$  となるため、計測して得られる  $L^*a^*b^*$  値はホワイトポイントに対して相対的な値となり、ホワイトポイントに用いる色が異なる場合では、同色でも色度の座標位置は変わる。そのため本稿においては  $L^*a^*b^*$  表色系のホワイトポイントとして標準光源 D65 を用いる。XYZ 色度を  $L^*a^*b^*$  表色系に変換する計算式を式 (4)、式 (5)、式 (6) に示す。

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad (4)$$

$$a^* = 500[(X/X_n)^{\frac{1}{3}} - (Y/Y_n)^{\frac{1}{3}}] \quad (5)$$

$$b^* = 200[(Y/Y_n)^{\frac{1}{3}} - (Z/Z_n)^{\frac{1}{3}}] \quad (6)$$

X, Y, Z: XYZ 値

$X_n, Y_n, Z_n$ : ホワイトポイントの XYZ 値

$L^*a^*b^*$  表色系は空間内の色の変化が近似的に一様になるように対応させられているため、空間内の 2 点の色のユークリッド距離を取ることで色度差を表すことができる。式 (7) に色度差  $\Delta E$  の計算式を示す。

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (7)$$

JIS では、工業利用における色度差の許容範囲を段階的に定めているが、目視において判別可能な色度差が色度差が 3.2 以上とされており、色度差が 25.0 を超えると別の色と認識されるとしている [7]。本実験では、この色度差  $\Delta E$  の値より、目標の色度空間を実現できたかを判断する。

フルカラー LED 照明の色度に関して、フルカラー LED 照明にはそれぞれ原色が存在し、その原色の可視光スペクトルとの相対強度として表すことができる。SHARP 製フルカラー LED 照明の相対強度の値を記したグラフを図 1 に示す。

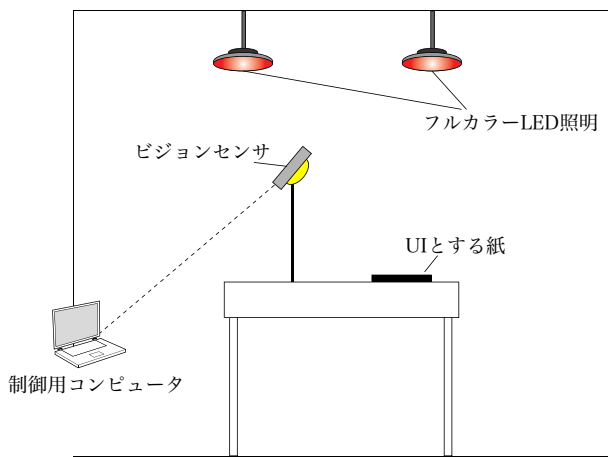


図 2 CLC/PUI のシステム構成図

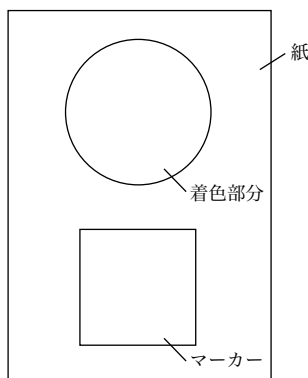


図 3 CLC/PUI の UI

### 3. CLC/PUI

#### 3.1 CLC/PUI の概要

CLC/PUI は UI に紙とクレヨンを用い、任意の場所に任意の色光を提供するシステムである。使用が容易な紙とクレヨンを UI として用いるため誰でも使用できるシステムであり、CLC/PUI を使用することでアルゴリズムを体感することもできる。

CLC/PUI はビジョンセンサ、フルカラー LED 照明および、制御用コンピュータを同一ネットワーク上に接続して使用する。UI とする紙は、ビジョンセンサの範囲内に設置して使用する。CLC/PUI の構成図を図 2 に示す。

#### 3.2 紙による UI とそのセンシング

CLC/PUI は UI として紙を用いる。CLC/PUI の UI を図 3 に示す。UI とする紙には着色部分とマーカーがあり、着色部分にはユーザが要求する色をクレヨンで着色する。マーカーは、マーカー内の RGB 値をビジョンセンサでセンシングすることによって、現在の色光環境を調べることができる。

UI である紙からビジョンセンサで現在の色光環境をセンシングする流れを以下に示す。

- (1) UI の紙からマーカーを検出

- (2) マーカー内の RGB 値を取得

上記の動作を行うことで、ユーザが要求する色光環境と現在の色光環境の RGB 値を比較することができる。

#### 3.3 CLC/PUI の制御アルゴリズム

CLC/PUI の制御は、ビジョンセンサを用いて UI である紙をセンシング対象として定期的に制御用コンピュータへと画像を送信し、その送信された画像から色情報を抽出することで、その値を元にフィードバック制御を行い、これを繰り返すことにより目標の色光環境を提供する。CLC/PUI で目標の色光探索を行うために用いた目的関数を式 (8) に示す。

$$f_i = \Delta R + \Delta G + \Delta B \quad (8)$$

$R$ :赤要素の値,  $G$ :緑要素の値,  $B$ :青要素の値

CLC/PUI は式 (8) で形式化した目的関数を最小化するように制御を行うことで、目標の色光を実現する。CLC/PUI の制御の流れを以下に示す。

- (1) LED の色光を白色光にして点灯
- (2) ユーザが任意の色で UI となる紙に円を描き、目標の色光を選択
- (3) 作成した UI をビジョンセンサの範囲内に設置
- (4) ビジョンセンサが UI 画像を取得
- (5) 画像解析を行い、ユーザーが要求する色の RGB 値を取得
- (6) ビジョンセンサが UI 画像を取得
- (7) 画像解析を行い、現在の色環境の RGB 値を取得
- (8) (7) の色情報を元に目的関数を算出
- (9) ビジョンセンサが UI 画像を取得
- (10) 画像解析を行い、現在の色環境の RGB 値を取得
- (11) 目的関数を算出し、評価値が改善している場合は (6) へ
- (12) 評価値が悪化した場合は前の色光に戻し、(6) へ

上記の動作を 1 ステップとし、LED 照明における各色の要素に対して制御を行う。これを繰り返し制御することで、ユーザの要求する色光環境を提供することができる。

### 4. 評価

#### 4.1 実験概要

CLC/PUI を用いた場合における目標の色光環境の実現について検証する。検証実験は、CLC/PUI を用いて目標の色光へと制御を行い、2.2 節で前述した色度を用いて実現可能か評価した。

#### 4.2 実験環境

検証実験は同志社大学香知館知的システム創造環境実験室で行う。使用機器は、赤・青・緑・黄の 4 色の光源を調光可能な SHARP 製フルカラー LED 照明 29 台、ビジョン

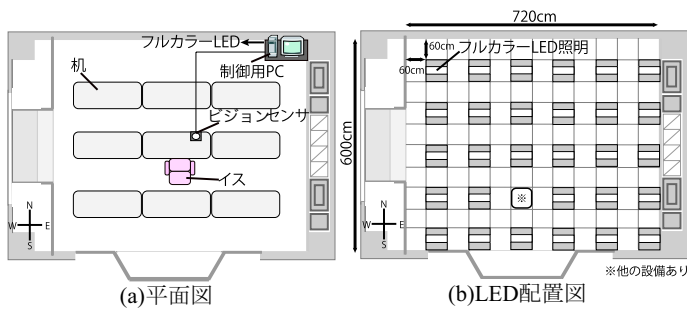


図 4 実験環境

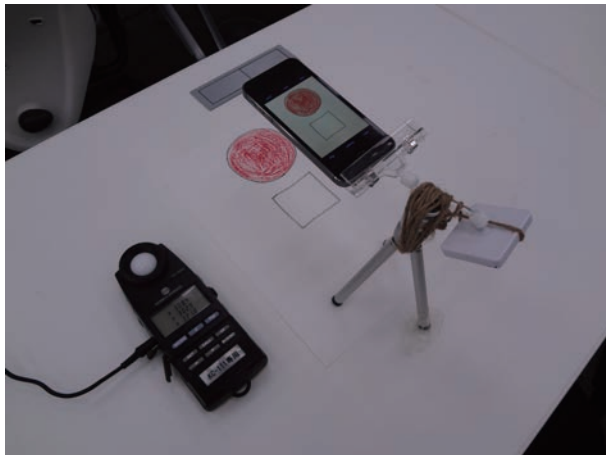


図 5 実験風景

センサ 1 台，制御用コンピュータ 1 台および任意の色の円が描かれた紙を用いて行う．円の色は赤，緑，青の 3 種類とし，目標の RGB 値は赤が [254, 160, 186]，緑が [31, 80, 77]，青が [34, 38, 138] である．

実験環境の見取り図を図 4 に示す．図 4 の (a) は実験環境の平面図，(b) は LED 配置図である．また，実験風景を図 5 に示す．

### 4.3 実験結果

CLC/PUI を用いた場合における目標の色光への実現できるかどうかの検証実験を行った．UI に描く円の色は赤，緑，青の 3 種類とした．目標の色光を赤・青・緑とし，CLC/PUI を制御した場合における色度差の履歴をそれぞれ図 6, 8, 10 に，フルカラー LED 照明の各色光の光度の履歴をそれぞれ図 7, 9, 11 に示す．色度差の履歴は縦軸が目標と現在の色度差を表し，横軸がステップ数を表している．フルカラー LED 照明の各色光の光度の履歴は縦軸が光度値を 0~1000 の値で示し，横軸がステップ数を表している．

図 6 を見ると，赤の円が描かれた紙を UI として使用すると，100 ステップ付近から色度差が小さくなり，目標の色光へと近づいたことが確認できる．特に，280 ステップ付近では色度差が大きく縮まっている．これは図 7 を見るとわかるように，色光の緑と青の値が低くなり，赤と黄色

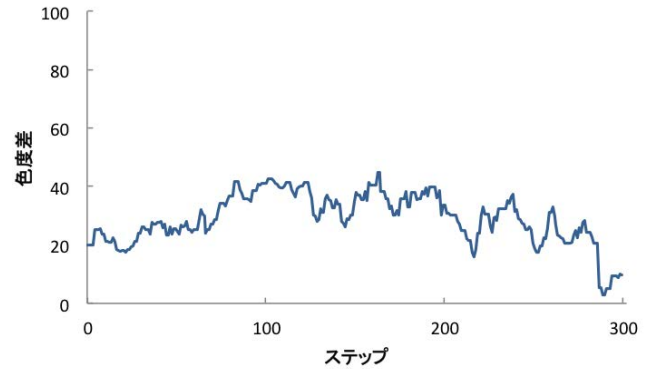


図 6 赤の円が描かれた紙を UI として使用した場合の色度差の履歴

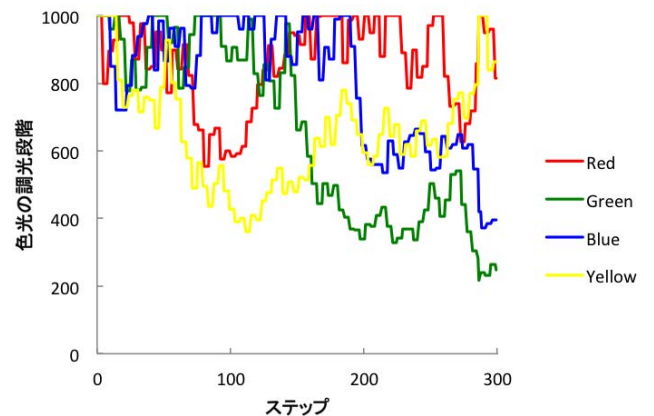


図 7 赤の円が描かれた紙を UI として使用した場合のフルカラー LED の各色光の光度履歴

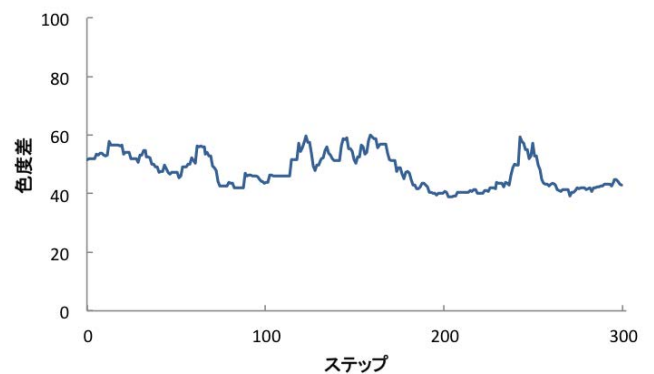


図 8 緑の円が描かれた紙を UI として使用した場合の色度差の履歴

の値が高くなり，目標の色光へと近づいたからである．

図 8 を見ると，緑の円が描かれた紙を UI として使用すると，色光が大きくなった後は色度差が小さくなるように色光制御ができていることが確認できる．これは図 9 を見るとわかるように，色光の青の値が大きくなって色度差が大きくなった後，青の値が小さくなり色度差も小さくなったからである．

図 10 を見ると，青の円が描かれた紙を UI として使用す

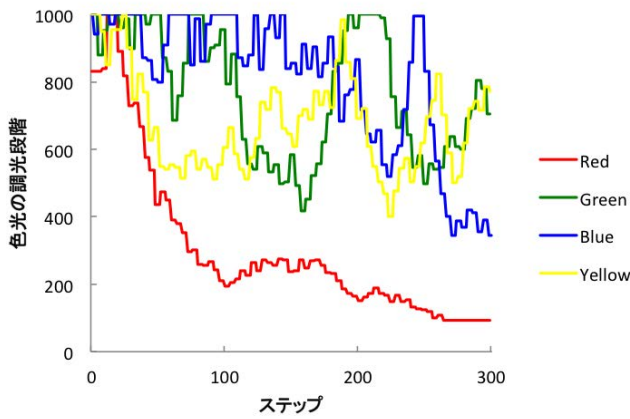


図 9 緑の円が描かれた紙を UI として使用した場合のフルカラー LED の各色光の光度履歴

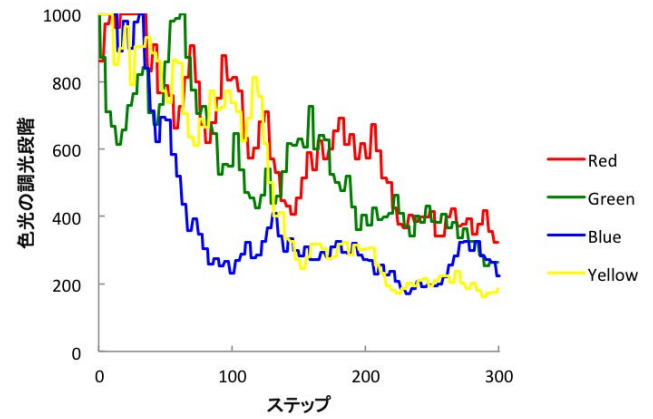


図 11 青の円が描かれた紙を UI として使用した場合のフルカラー LED の各色光の光度履歴

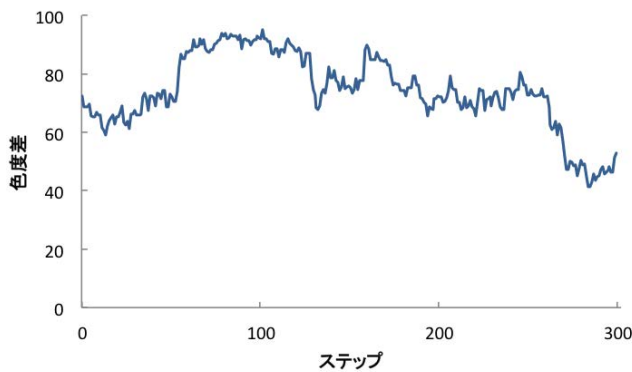


図 10 青の円が描かれた紙を UI として使用した場合の色度差の履歴

ると、100 ステップ付近から色度差が小さくなり、目標の色光へと近づいたことが確認できる。これは図 11 を見るとわかるように、色光の全ての色の値が低くなり、可視光スペクトルの相対強度が大きい青の値が大きい色光環境になったからである。

赤の円が描かれた紙を UI として使用した場合、300 ステップ時の色度と目標の色度とは 9.6 の色度差があり、緑の円が描かれた紙を UI として使用した場合は 43.0 の色度差があり、青の円が描かれた紙を UI として使用した場合は 52.8 の色度差があった。JIS が定める工業利用における色度差の許容範囲では、目視において判別可能な色度差が色度差が 3.2 以上とされており、色度差が 25.0 を超えると別の色という認識になるとされているため、色光環境の探索においては最適解を見つけることはできていない。そのため、今後もアルゴリズムの改善が必要であることが考えられる。

また、赤、緑、青の各色の UI 画像を図 12、13、14 に示す。300 ステップ時の色度と目標の色度との色度差はあるが、図 12、13、14 を見ると、UI 画像の変化からは目標の色光へと近づいているように感じられる。

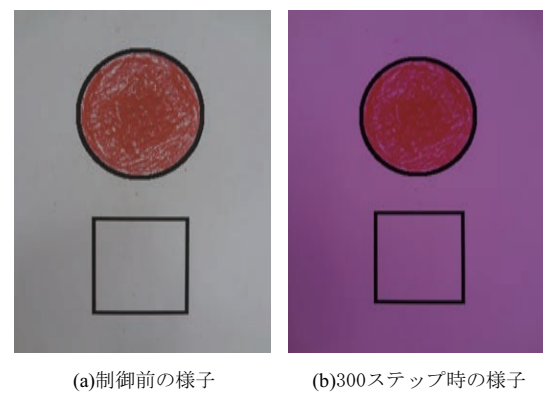


図 12 赤のクレヨンで着色した場合の UI 画像

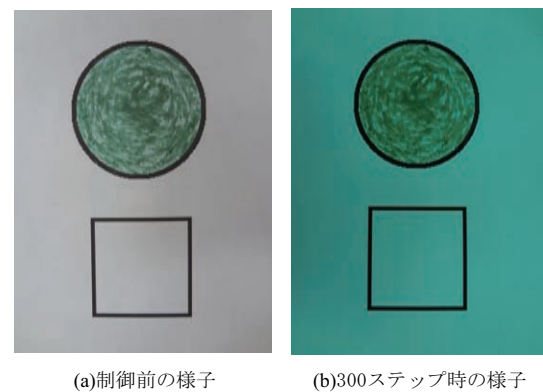


図 13 緑のクレヨンで着色した場合の UI 画像

#### 4.4 考察

上記の結果から CLC/PUI を用いて、目標の色光へと近づいたことがわかった。しかし、色度差が 25.0 以下に収束するように制御できることが理想であり、最適な色光を探索するアルゴリズムの改良が必要である。例えば、色度差が大きくなったステップの次のステップでは色光が小さくなる制御がされるアルゴリズムに改善すると、色度差は小さくなっていくと考えられる。また、アルゴリズムがより体感できるようになり、最適解を探索する速度を高速化することもできる。

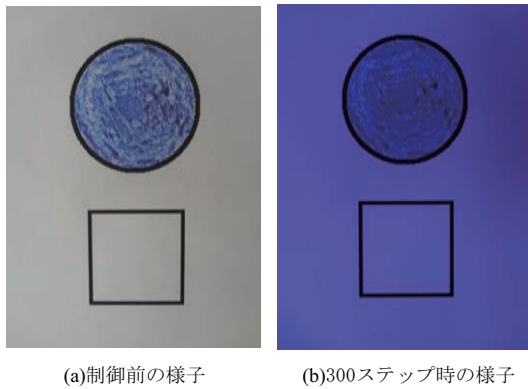


図 14 青のクレヨンで着色した場合の UI 画像

また、図 12, 13, 14 を見ると、300 ステップ時の色度と目標の色度との色度差はあるが、UI 画像の変化からは目標の色光へと近づいているように感じられる。赤、緑、青の円が描かれた紙を UI として使用した場合は目標の色光環境に近づく制御ができていたが、フルカラー LED 照明には実現不可能な色がある。そのため、実現不可能な色をユーザに要求された場合も考慮したアルゴリズムにする必要がある。

## 5. 関連研究

### 5.1 紙を UI とするシステムの研究

紙を UI として用いる研究は他にも行われている。Chandらは紙の UI を用いたシステムである Jadoo を提案し、情報技術に縁のないユーザに Jadoo を体験させる研究を行った [8]。情報技術の使用に慣れているユーザが Jadoo を使用して紙の UI を作成し、その紙の UI を情報技術に縁のない初心者ユーザに渡す。紙の UI には文字とイラストで情報が記述されており、バーコードが載っている。初心者ユーザはバーコードをスキャンすることで、キーボードやマウスを使用することなくコンピュータのモニターで情報を見ることができる。この Jadoo を情報技術に縁のないユーザに体験させる研究の結果、情報技術に全く縁のなかったユーザが情報技術を使用するようになり、紙の UI でさらに情報技術を使いこなすように変化するだろうという推測がなされている。CLC/PUI は、Jadoo と紙の UI を用いる点で関連しているが、情報技術の使用が容易になるだけでなく、色光を使用してアルゴリズムの体感もできるという点で優位性がある。

### 5.2 アルゴリズムの視覚化に関する研究

アルゴリズムの可視化の研究も多数行われている。Staskoらはアルゴリズムをアニメーション化することが学習の助けになるかの研究を行った [2]。その結果、アルゴリズムのアニメーション化はわずかに学習の助けになるという結果が出たが、当初の期待より効果が確認できなかった。そのため、当初の期待よりも学習の助けにならなかった理由の

仮説を立て、より良いアルゴリズムのアニメーション化のガイドラインを作成した。Fouh らや Hansen らもアルゴリズムの可視化の研究を行っており、可視化の方法によっては大きな学習効果があり、講義やテキストなど教材の改善につながる可能性があるとしている [3], [4]。これらの研究と CLC/PUI は、アルゴリズムを可視化している点で関連しているが、CLC/PUI は色光によりアルゴリズムを体感できる。

## 6. 結論と今後の展望

本研究では、紙を UI とし、アルゴリズムを体感できる色光制御システム CLC/PUI を提案した。CLC/PUI は、ビジョンセンサを用いてマーカー内の RGB 値を抽出し、この値を元にフィードバック制御を繰り返すことにより、目標の色光環境を提供する。著者らは CLC/PUI の提案、開発を行い、構築した CLC/PUI で目標の色光環境が実現可能かどうかの実証実験を行った。そして実証実験の結果、目標の色光環境の実現が可能であることが確認できた。

また、CLC/PUI の課題として、ユーザが体感できるアルゴリズムが 1 つしかないことが挙げられる。目標の色光環境を提供できるアルゴリズムを複数用意することで、ユーザが複数のアルゴリズムを体感できるようにする。

## 参考文献

- [1] PHILIPS: Hue. PHILIPS. 入手先 (<http://meethue.com>) (2014.07.13).
- [2] Stasko J., Badre A. and Lewis C.: Do Algorithm Animations Assist Learning? An Empirical Study and Analysis, Proc. INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.61-66, ACM (1993).
- [3] Fouh E., Akbar M. and Shaffer A. C.: The Role of Visualization in Computer Science Education, Computers in the Schools: Interdisciplinary Journal of Practice, Theory, and Applied Research., pp.95-117, 2012.
- [4] Hansen S. R., Narayanan N.H.: On the Role of Animated Analogies in Algorithm Visualizations, Fourth International Conference of the Learning Sciences, pp.205-211, ICLS (2000) .
- [5] Boyce R. P., Eklund N. H. and Simpson S. N.: Individual lighting control: Task, performance, mood, and illuminance., JOURNAL of the Illuminating Engineering Society, pp.131-142, 2000.
- [6] JIS. JISZ9110: 照明基準総則, 2010.
- [7] JIS. JISZ8721: 色の表示方法三属性による表示, 1993.
- [8] Chand A., Dey K. A.: Jadoo: A Paper User Interface for Users Unfamiliar with Computers, Proc. CHI 2006, pp.1625-1630, ACM (2006) .