

色光・照度を制御可能な ペーパーユーザインタフェースの提案

大黒 智貴¹ 間 博人¹ 松井 健人² 山下 大輔² 三木 光範¹

概要：LED 照明技術の発展に伴い色光を制御可能なフルカラー LED 照明が登場した。照明環境の色光と照度を適切に制御することでユーザの作業効率向上やリラックス効果を得ることができる。しかしながら、多くの場合調光には情報機器の操作を必要とするため、誰もが容易に調光可能な環境が整備されているとは言えない。また、色光と照度は互いに影響を及ぼすため、ユーザが要求する色光と照度を同時に提供することは難しい。そこで本研究では、情報機器の制御を直感的に行う手法として、誰もが慣れ親しんでいる紙を UI に使用する。そして、フィードバック制御を行うことでユーザが要求する色光と照度を同時に提供する、色光・照度制御システムを構築する。提案手法では、照明の色光を紙に着色した色へ近づける色光制御を行い、紙に示された UI に手をかざすことで照度制御を行う。また、提案手法の精度を検証するため、目標の色光を定めた上で照度を段階的に変化させ、目標とする色光・照度の実現可能性を評価した。結果として、目標とする色光を提供しつつ任意の照度への照度制御を実現した。

キーワード：色光制御, 照度制御, ユーザインタフェース

Color-Lighting and Illuminance Control by using Paper UI

OKURO TOMOKI¹ AIDA HIROTO¹ MATSUI KENTO² YAMASHITA DAISUKE² MIKI MITSUNORI¹

1. はじめに

LED 照明技術の発展に伴い色光を制御可能なフルカラー LED 照明が登場した。照明環境の色光と照度を適切に制御することでユーザの作業効率向上やリラックス効果を得ることができる [1], [2], [3]。また、LED 照明は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つ。これらの理由から、現在オフィスや家庭での利用が進んでおり、今後フルカラー LED 照明が照明光として多く用いられることが予想される。

フルカラー LED 照明を用いることで、様々な色合いや明るさを表現することが可能である。しかし、調光には色情報などのデジタルデータを入力する必要があるため、多

くの場合情報機器の操作が必要となる。そのため、情報機器に慣れ親しんでいないユーザは調光制御が容易ではなく、誰もが容易に調光可能な環境が整備されているとは言えない。また、照明の明るさを変化させると照明の色合いも同時に変化するため、ユーザが要求する色光と照度を同時に提供することは難しい。そこで本研究では、これらの問題を解決し、フルカラー LED 照明を誰もが直感的に制御可能とすることを目的として、ペーパー UI を用いた色光・照度制御システム (Color-lighting and Illuminance Control System using Paper UI: CICS/PUI) を構築する。

CICS/PUI では、色鉛筆やクレヨンなどの画材を用いて UI とする紙に着色することで目標とする色光を指定する。そして、UI に手をかざすことで照度を制御する。また、フィードバック制御を行い、現在の照明の色光を指定した目標の色に近づけることで、照度を変更した場合においても目標とする色光を実現する。

¹ 同志社大学理工学部
Faculty of Science and Engineering, Doshisha Univ.

² 同志社大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha Univ.

2. 関連研究

紙を UI に用いることで情報機器の制御を容易にする手法は、多くの研究で提案されている。Jadoo は、イラストと文字および専用のコードが印刷された紙を UI に使用したシステムである [4]。ユーザは UI をスキャンすることで、目的の情報をコンピュータ上に表示することが可能である。Jadoo では、紙を UI に用いることでマウスやキーボードなどの入力デバイスを用いずに情報機器の直感的な制御を実現した。Chand らは、Jadoo を使用することで情報機器に慣れ親しんでいないユーザにおいても情報機器を活用することができたとしている。

PaperID は、RFID タグを配置した紙を UI に使用したシステムである [5]。ユーザは、紙面上の RFID タグに手を触れることで、様々な情報をリーダに送信することが可能である。Li らは、PaperID を用いることでフルカラー LED 照明の調色制御を実現した。PaperID では、UI 上の RFID タグに手を触れることで色光を決定し、タグ上で手を振ることで照明の明るさを制御する。しかし、RFID を使用するため UI の作成に費用がかかる点や、信号の受信に専用のリーダが必要となるといった課題が存在する。そこで、本研究では、専用のパターンを印刷した紙を用いて作成可能な UI を提案する。

3. 色光と照度

3.1 色光

色光とは可視光線であり、人が色を認識可能な光である。色光の色のことを光色と呼び、人は主に錐体と呼ばれる視細胞で光色を認識する。人は、目に入射した色光に対して、錐体が刺激を受け、刺激の大きさに応じた電気信号を脳に伝達することで光色を認識する。また、光色を定量化するための尺度として表色系が存在する。表色系を用いることで色同士の差である色差の算出が可能となる。本実験では、L*a*b*表色系における色差を用いて目標の色光環境の実現について評価する。また、L*a*b*値の算出のため、RGB 表色系と XYZ 表色系を用いる。

RGB 表色系とは色光の 3 原色の混合比によって色を表す仕組みである。赤 (Red)、緑 (Green)、青 (Blue) を色光の 3 原色と呼び、可視光スペクトル領域の長波長域を混合することで、赤が得られる。同様に、中波長域を混合することで緑が、短波長域を混合することで青が得られる。また、赤、緑、青を同じ割合で混合することで、白 (White) が得られ、混合する割合を変化させることで、様々な色を表現することが可能となる。しかし、色の認識は人の感性に基づくため、色光の 3 原色の混合のみでは全ての色を表現することは可能ではない。

XYZ 表色系は、RGB 表色系の特徴を補うために考案された表色系である。XYZ 表色系では、色光から得られる

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する。この色覚の強さを数値化したものを等色関数と呼び、等色関数と色光の分光分布より XYZ が得られる。それぞれ、X が赤の色味、Y が緑の色味と明るさ、Z が青の色味を表す。XYZ の計算式を式 1、式 2、式 3 に示す。

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

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

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

λ : 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 表色系の特徴として、色同士の差を考えた場合、人が認識する変化量と色空間の変化量が一致しないという点がある。そのため、色差を定量的に表現することが可能ではない。そこで、色差の算出が必要となる場合は、次に述べる L*a*b*表色系が用いられる。

L*a*b*表色系は、XYZ 表色系を変換することで導出される色空間である。それぞれ、L*が明度を表し、a*が赤から緑方向の色度、b*が黄から青方向の色度を表す。XYZ 表色系を L*a*b*表色系に変換する計算式を式 4、式 5、式 6 に示す。なお、ホワイトポイントとは L*a*b*表色系を構築する際に基準として用いる白色の座標値である。本稿では、CIE が規定する標準光源 D65 を白色として定義した [6]。

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

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

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

X, Y, Z: 変換する 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、人の色の変化の認識に対して、ほとんど均等な歩度を持つ均等色空間である。そのため、色差は空間内の 2 点のユークリッド距離を求めることで算出可能である。L*a*b*表色系における色差の計算式を式 7 に示す。

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

本実験では、L*a*b*表色系における色差 ΔE を用いて、目標とする色光環境の実現について評価する。また、色差を測定する際の指標として、JIS が規定する工業利用における色差の許容範囲を使用する [7]。

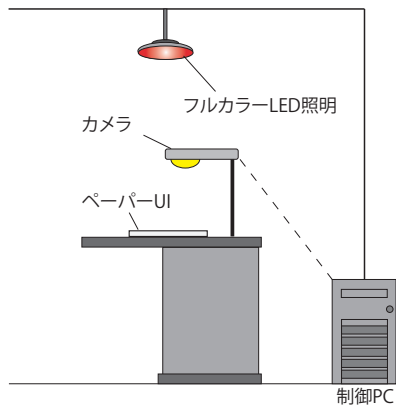


図 1 CICS/PUI の構成図

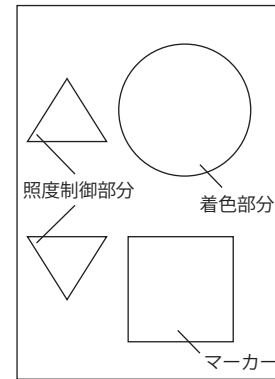


図 2 ペーパー UI

3.2 照度

照度とは、光源によって照らされている照射面の明るさの指標であり、単位は lx である。快適であると感じる照度は人によって異なることや、執務者の作業内容によっても適切な照度は異なることがわかっている [8]。そのため、JIS 規格では作業内容によって異なる照度を推奨している [9]。例えば、製図や組み立てなどの精密作業では 1000 lx 以上の高照度環境を推奨しており、図書閲覧や事務作業などでは 750 lx 程度の中照度を推奨している。

また、加齢に伴い適切な照度は変化することがわかっている [10]。眼に入射した光の網膜に達するまでの光量は、年齢が高くなるに従い減少する。そのため、高齢者では若年者よりも高い照度が必要となる。

照度は照明環境において重要な指標であり、個人の好みや作業内容、年齢によっても適切な照度は異なることから、誰もが容易に照度を変更可能な手法を提案する。

4. ペーパー UI を用いた色光・照度制御システム (CICS/PUI)

4.1 CICS/PUI の概要

本研究では、ペーパー UI を用いた色光・照度制御システム (CICS/PUI) を構築する。CICS/PUI の目的は、フルカラー LED 照明を誰もが直感的に制御可能とすることである。そのため、CICS/PUI では誰もが慣れ親しんでいる紙を UI として使用し、色を塗ることや手をかざすといった誰にでも行える動作をもとに調光を行う。また、CICS/PUI の UI をペーパー UI と呼び、ペーパー UI を用いてフィードバック制御を行うことで、ユーザが要求する色光・照度を実現する。

CICS/PUI の構成図を図 1 に示す。CICS/PUI は、フルカラー LED 照明、カメラおよび制御 PC を同一ネットワーク上に接続して使用する。また、ペーパー UI はカメラの撮影範囲内に設置する。CICS/PUI の特徴として、ネットワークに接続する必要のない UI を用いて情報機器の制御を実現したという点が挙げられる。

Pseudocode 1 Get a target color values

```
target_rgb : target color values.
picture : a picture of the Paper UI.
object : a object.
shape : shape type of the object.
get_picture() : get a picture of the Paper UI.
detect_object(picture) : detect simple geometric shapes.
analyze_shape(object) : analyze shape type of the object.
get_rgb(object, picture) : get a rgb values of the object.
```

```
1: picture = get_picture()
2: object = detect_object(picture)
3: shape = analyze_shape(object)
4: if shape = circle then
5:   target_rgb = get_rgb(object, picture)
6: end if
```

4.2 ペーパー UI と UI の解析方法

カメラは撮影した画像を定期的に制御 PC に送信する。制御 PC は送信された画像を解析することで調光制御を行う。調光の際に使用するペーパー UI を図 2 に示す。ペーパー UI には、着色部分とマーカーおよび照度制御部分がある。ユーザは着色部分に色を塗ることで目標とする照明の色光を指定する。

制御 PC が目標とする色の色情報を取得する際の手順を Pseudocode 1 に示す。picture は get_picture を用いて取得したペーパー UI の画像である。picture に存在する幾何学的形状を detect_object により抽出する。object には抽出した形状が格納される。analyze_shape を用いて抽出した形状を解析し、shape が円であれば円内の RGB 値を取得する。取得した RGB 値が目標とする色の色情報である。

また、調光が開始されるとペーパー UI 上に照明光が照射される。マーカーは現在の照明の色光を調べるために使用する。マーカー内の RGB 値が着色部分内の RGB 値に近づくよう繰り返し調光を行い、目標とする色光を実現する。

制御 PC が現在の照明色の色情報を取得する際の手順を Pseudocode 2 に示す。Pseudocode 1 との違いとして、Pseudocode 2 では shape が四角形の時 RGB 値の抽出を

Pseudocode 2 Get a current color values of the marker

current_rgb : current color values of the marker.

```
1: picture = get_picture()
2: object = detect_object(picture)
3: shape = analyze_shape(object)
4: if shape = square then
5:   current_rgb = get_rgb(object, picture)
6: end if
```

Pseudocode 3 Detect user behavior

rgb : store rgb color values.
flag : indicate user behavior.
picture[3] : a picture of the Paper UI.
bs(picture, picture) : apply background subtraction between two pictures.

```
1: picture[0] = get_picture()
2: object = detect_object(picture[0])
3: shape = analyze_shape(object)
4: picture[1] = get_picture()
5: picture[2] = bs(picture[1], picture[0])
6: if shape = triangle then
7:   rgb = get_rgb(object, picture[2])
8: end if
9: if rgb > 0 then
10:   flag = 1
11: else
12:   flag = 0
13: end if
```

行う。Pseudocode 1, Pseudocode 2 のように RGB 値の抽出対象を分けることで、着色部分とマーカーそれぞれにおける色情報の取得を実現した。

また、色光制御を行う際、任意のタイミングで照度制御部分に手をかざすことで、照度を上昇もしくは下降させることが可能である。照度制御部分では、背景差分法を用いた画像解析を行いユーザの動作を検出する。背景差分法とは、観測画像と事前に取得した画像を比較することで、観測画像にのみ存在する物体を抽出する手法である。

制御 PC がユーザの動作を検出する際の手順を Pseudocode 3 に示す。はじめに、ユーザが照度制御部分に手をかざす前の画像を取得する。取得した画像を picture[0] に格納し、picture[0] に存在する幾何学的形状を抽出し、解析を行う。次に、ユーザが照度制御部分に手をかざしている状態の画像を取得し picture[1] に格納する。また、bs により picture[1] と picture[0] の差分を算出し picture[2] に格納する。そして、shape が三角形のとき get_rgb を用いて picture[2] における照度制御部分の RGB 値を取得する。最後に、取得した RGB 値を解析することにより、ユーザの動作を検出する。

4.3 CICS/PUI の調光アルゴリズム

CICS/PUI は、フルカラー LED 照明の信号値をランダ

Pseudocode 4 LCA/CD

diff : current color difference.
sig : current signal value of a light source.
color : color of a light source. R, G, B etc.
get_sig(color) : get current signal value of a light source.
choose_color1() : choose a light source randomly.
rand(number, number) : generate random values in a specific range.
control(color, sig) : control led lighting.

```
1: color = choose_color1()
2: sig = get_sig(color)
3: if diff < 20 then
4:   sig += sig * rand(-0.1, 0.1)
5:   control(color, sig)
6: else if diff < 30 then
7:   sig += sig * rand(-0.2, 0.2)
8:   control(color, sig)
9: else if diff < 50 then
10:  sig += sig * rand(-0.3, 0.3)
11:  control(color, sig)
12: else
13:  sig += sig * rand(-0.5, 0.5)
14:  control(color, sig)
15: end if
```

ムに変化させ、繰り返し調光を行うことで目的の色光環境を実現する。調光制御における目的関数を式 8 に示す。

$$f_i = \sqrt{(L^* - L'^*)^2 + (a^* - a'^*)^2 + (b^* - b'^*)^2} \quad (8)$$

L^* , a^* , b^* : 目標の色光の色情報

L'^* , a'^* , b'^* : 現在の色光の色情報

目的関数を最小化する手法として、本研究では 2 種類の調光アルゴリズムを提案する。LCA/CD(Light Controlling Algorithm based on Color Difference) は、現在の色差に応じて信号値の変化量を変更するアルゴリズムである。一方、LCA/NT(Light Controlling Algorithm based on Number of Trials) は、色差が改善するまでの調光制御の試行回数によって信号値の変化量を変更するアルゴリズムである。

LCA/CD の擬似コードを Pseudocode 4 に示す。diff は現在の色差、sig は光源の信号値、color は光源の色をそれぞれ格納する。まず、choose_color1 により光源の色をランダムに選択する。次に、get_sig を用いて choose_color1 において選択した光源色の現在の信号値を取得する。そして、現在の色差ごとに定められた範囲によって、sig をランダムに変化させる。最後に、control を用いて照明の調光を行う。

LCA/NT の擬似コードを Pseudocode 5 に示す。num は色差が改善するまでの試行回数を格納する。まず、choose_color2 により光源の色を順番に選択する。次に、get_sig を用いて choose_color2 において選択した光源色の現在の信号値を取得する。そして、num の値ごとに定められた範囲によって sig をランダムに変化させる。最後に、

Pseudocode 5 LCA/NT

```

num : number of trials until color difference is improved.
choose_color2() : choose a light source in order.

1: color = choose_color2()
2: sig = get_sig(color)
3: if diff > 25 then
4:   if num < 30 then
5:     sig += sig * rand(-0.2, 0.2)
6:     control(color, sig)
7:   else if num < 50 then
8:     sig += sig * rand(0.2, 0.3) or
9:     sig += sig * rand(-0.3, -0.2)
10:    control(color, sig)
11:   else if num < 70 then
12:     sig += sig * rand(-0.3, 0.4) or
13:     sig += sig * rand(-0.4, -0.3)
14:    control(color, sig)
15:   else
16:     sig += sig * rand(0.4, 0.5) or
17:     sig += sig * rand(-0.5, -0.4)
18:    control(color, sig)
19:   end if
20: else
21:   sig += sig * rand(-0.1, 0.1)
22:   control(color, sig)
23: end if

```

control を用いて照明の調光を行う。

本実験では、高速な色光制御手法の提案を目的とし、それぞれ異なる指標を用いて調光を行う LCA/CD と LCA/NT について、調光速度の高速性を評価する。

5. 評価

5.1 実験概要

CICS/PUI を用いた場合における、目標の色光・照度環境の実現可能性について評価する。検証実験は照度を固定した場合と変化させた場合の二通りに関して、目標とする色光の実現可能性を検証する。また、照度を固定した場合において、現在の色差をもとに調光制御を行う LCA/CD と、色差が改善するまでの試行回数をもとに調光制御を行う LCA/NT について、調光速度の高速性を評価する。加えて、照度を変化させた場合において、照度変化が実現されているかについて検証する。

5.2 実験環境と実験機器

検証実験は制御する照明以外を全て消灯した暗室で行う。使用機器は、Philips 製フルカラー LED 照明 Hue1 台、Sekonic 製照度センサ 1 台、カメラ 1 台、制御 PC1 台およびペーパー UI である。実験風景を図 3 に示す。本実験では Hue をペーパー UI の真上 60 cm、カメラをペーパー UI の真上 22 cm、照度センサをペーパー UI のマーカー右横 12 cm の位置に設置した。また、ペーパー UI の着色に用いる画材として、サクラクレパス クレパス太巻を使用し

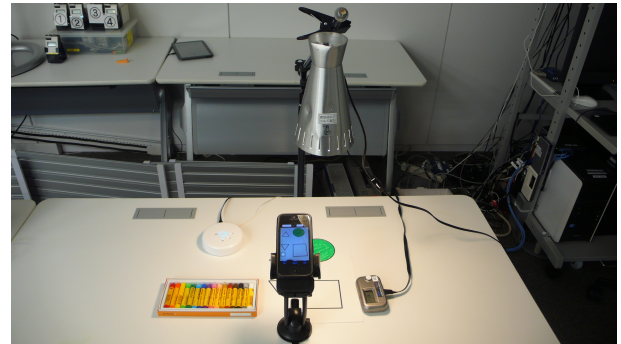


図 3 実験風景

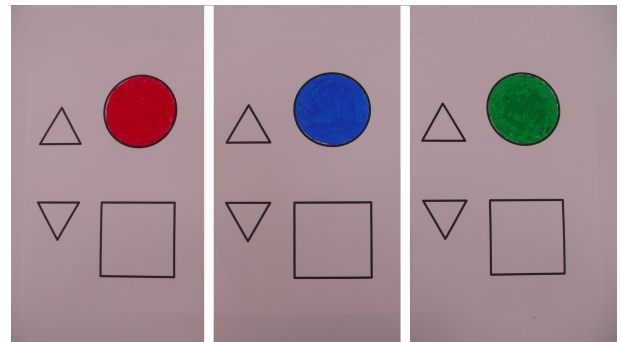


図 4 実験に使用したペーパー UI

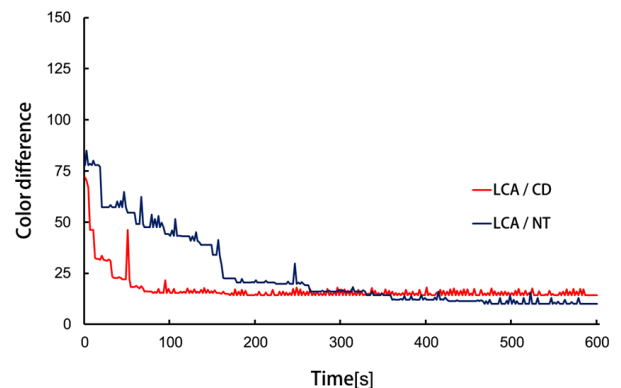


図 5 ペーパー UI を赤に着色した場合における色差の履歴

た。ペーパー UI に着色した色は赤、青、緑の 3 色である。実験に使用したペーパー UI を図 4 に示す。

5.3 照度を固定した場合における色光実現精度の検証 実験内容

照度を固定した場合において、目標とする色光環境の実現可能性を検証した。また、現在の色差をもとに調光制御を行う LCA/CD と、色差が改善するまでの試行回数をもとに調光制御を行う LCA/NT について、調光速度の高速性を評価した。目標の色光は赤、青、緑とし、照度を 90 lx に固定した。なお、検証時間は 600 秒とする。

実験結果

ペーパー UI を赤に着色した場合における色差の履歴を図 5 に、青に着色した場合における色差の履歴を図 6 に、

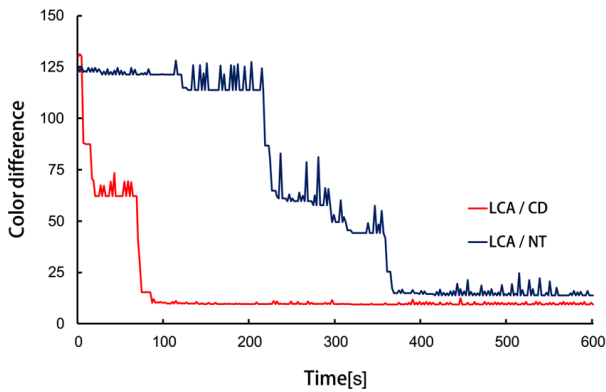


図 6 ペーパー UI を青に着色した場合における色差の履歴

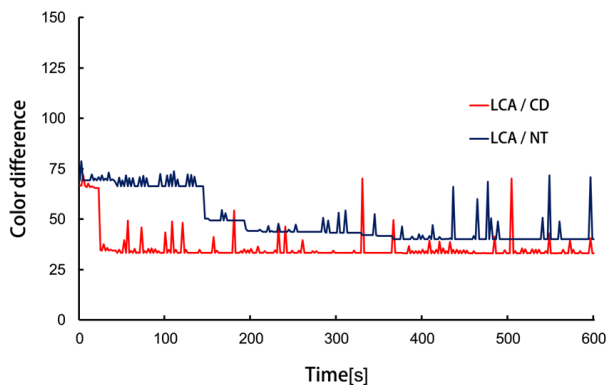


図 7 ペーパー UI を緑に着色した場合における色差の履歴

緑に着色した場合における色差の履歴を図 7 にそれぞれ示す。JIS では、人が同じ色と認識する色差の上限は 25 であるとしている。図 5、図 6 より、目標とする色光が赤と青の場合において、色差が 25 より小さいことから、目標の色光に近い色光環境が実現されていることがわかる。しかし、図 5 より、目標とする色光が緑の場合において色差の変動幅が大きいことから、色光の探索が終了していないと言える。また、図 5、図 6、図 7 より、すべての場合において、色差が悪化した場合は悪化する前の色光に戻す動作を実現していることが確認できる。

また、図 5、図 6 より、色差の収束に要する時間は LCA/CD を使用した場合において、LCA/NT を用いた場合より短いことがわかる。理由として、LCA/NT は色差が改善するまでの試行回数に基づいて色光探索幅を変更するため、色光の探索に時間がかかることが挙げられる。そのため、図 5、図 6、図 7 のいずれの場合においても、調光開始初期における色差の改善幅は LCA/CD の方が大きい。ゆえに、速度の観点から見た色光探索性能は LCA/CD の方が良いと言える。

しかし、LCA/CD の欠点として、局所解に陥る可能性が高いことが挙げられる。なぜなら、現在の色差によって探索範囲を決定しているため、色差が変化しない限り、探索範囲の最大値と最小値が一定の値をとるためである。一方、LCA/CD では色差が改善するまでの試行回数に応じ

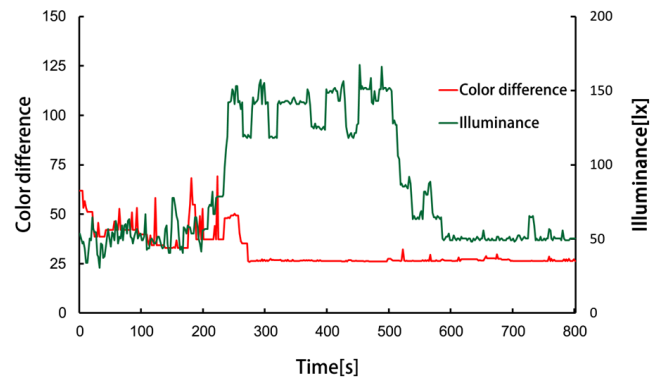


図 8 ペーパー UI を赤に着色し LCA/CD を用いた場合における色差と照度の履歴

て探索範囲を拡大するため、広い範囲から解の探索が可能である。そのため、LCA/CD と LCA/NT の長所を取り混ぜることで、より良いアルゴリズムの構築が可能であると考える。

5.4 照度を変化させた場合における色光実現精度の検証 実験内容

照度を変化させた場合において、LCA/CD と LCA/NT の二通りについて、目標とする色光・照度環境の実現可能性を検証した。目標の色光は赤、青、緑とし、初期照度を 50 lx、目標照度を 120 lx に設定した。検証時間は 800 秒であり、実験開始後 200 秒の間は初期照度を維持し、200 秒から 300 秒の間で目標照度まで照度を上昇させた。その後、300 秒から 500 秒の間は目標照度を維持し、500 秒から 600 秒の間で照度を下降させ、800 秒までの間、初期照度を維持した。

実験結果

ペーパー UI を赤に着色した場合における色差と照度の履歴を図 8、図 9 に、青に着色した場合における色差と照度の履歴を図 10、図 11 に、緑に着色した場合における色差と照度の履歴を図 12、図 13 にそれぞれ示す。また、300 秒から 500 秒における目標照度との誤差を図 14 に示す。加えて、照度を固定した場合における色差の誤差を図 15 に、照度を変化させた場合における色差の誤差を図 16 に示す。

色差と照度の履歴から、すべての場合において、照度の上昇と下降を実現できていることがわかる。また、すべての場合において、一度は目標照度である 120 lx に到達していることがわかる。しかし、図 12、図 13 より、目標照度を維持できているのは目標の色光が緑の場合のみである。また、図 14 より、目標照度との誤差の平均は、目標の色光が緑の場合において小さいことがわかる。理由として、照度に与える影響が照明の色光によって異なることが推測される。実際に、図 8、図 9、図 12、図 13 の照度の波形を確認すると、目標とする色光が同色の場合、パターンが

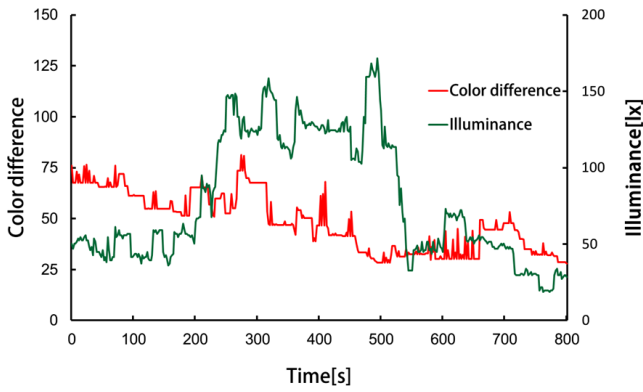


図 9 ペーパー UI を赤に着色し LCA/NT を用いた場合における色差と照度の履歴

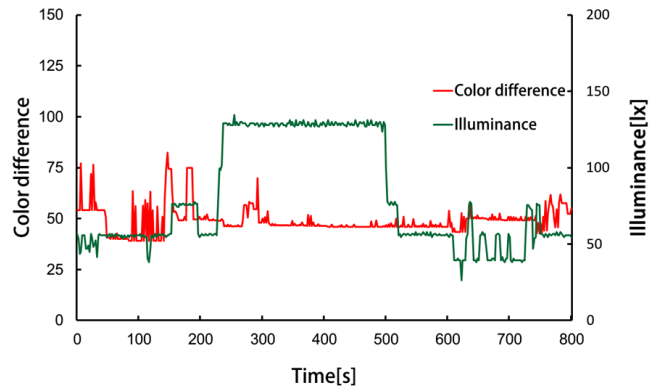


図 12 ペーパー UI を緑に着色し LCA/CD を用いた場合における色差と照度の履歴

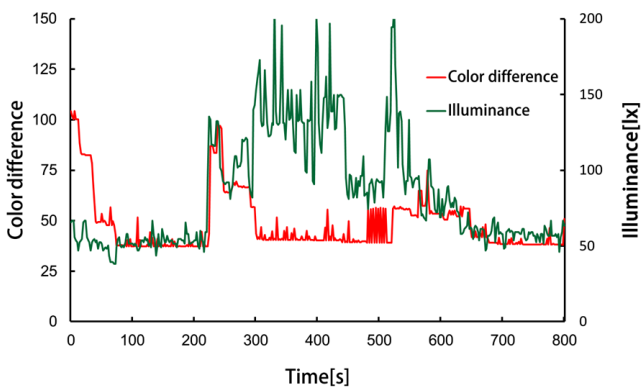


図 10 ペーパー UI を青に着色し LCA/CD を用いた場合における色差と照度の履歴

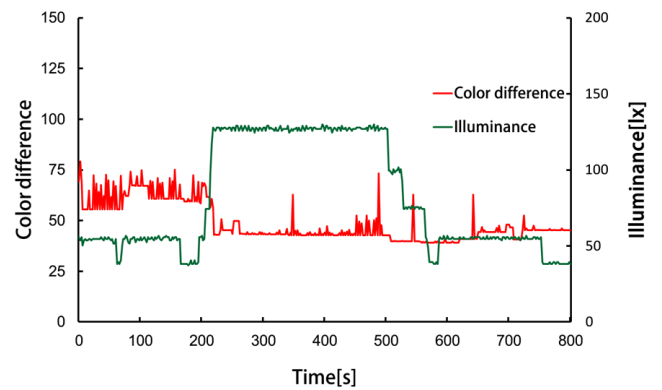


図 13 ペーパー UI を緑に着色し LCA/NT を用いた場合における色差と照度の履歴

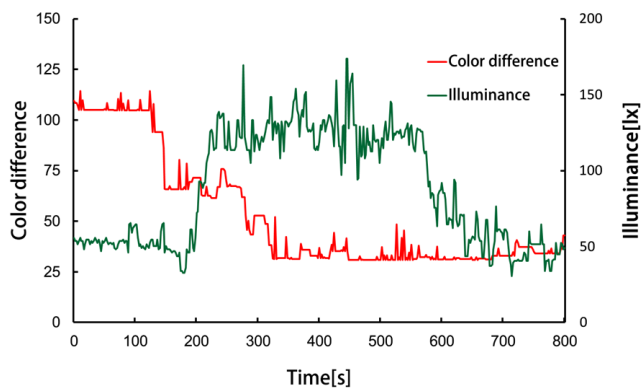


図 11 ペーパー UI を青に着色し LCA/NT を用いた場合における色差と照度の履歴

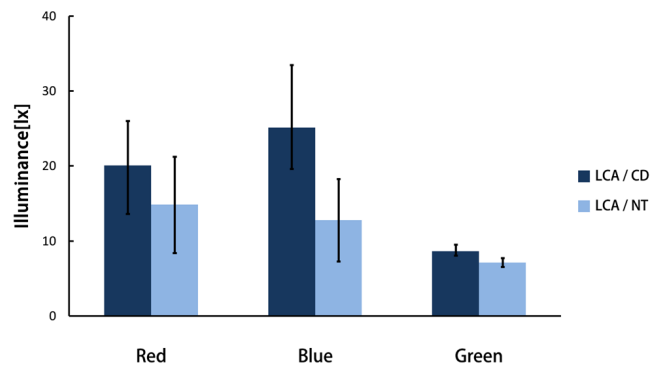


図 14 300 秒から 500 秒における目標照度との誤差

類似していることがわかる。

また、色差に関して、図 12、図 13 より、目標とする色光が緑の場合は、照度変化が色差の変化に与える影響は少ないことがわかる。一方、図 9、図 10 では、照度が変化すると色差が大きくなっていることが確認できる。加えて、図 9、図 10 では、照度変化に影響を受けた色差が色光制御により改善されていることがわかる。また、図 8 では、色差が収束していることがわかる。しかし、図 8 以外では、色差は収束しているとは言えず、どの色を着色した場合にお

いても、照度を固定した場合と比較すると最終的な色差が大きい。考えられる要因として、照度を変化させた場合では、照度変化が色差に影響を及ぼす場合があり、色光探索に時間がかかることが挙げられる。実際に、図 15、図 16 より、照度を固定した場合の方が変化させた場合に比べて色差の誤差は小さい。

5.5 考察

照度を固定した場合において、目標とする色光が赤と青の場合は、目標の色光に近い色光環境を実現した。しかし、目標の色光が緑の場合、色差は収束しているとは言え

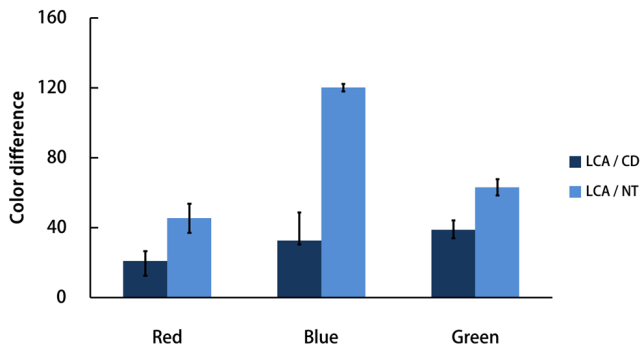


図 15 照度を固定した場合における色差の誤差

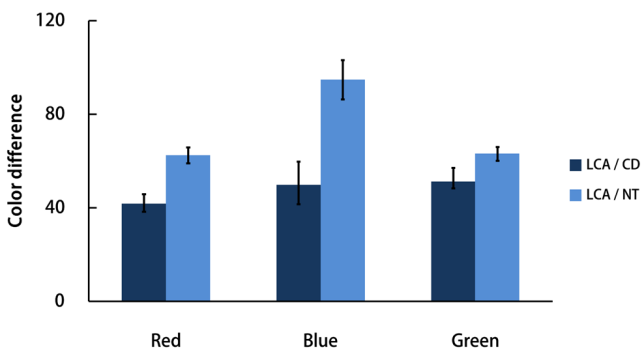


図 16 照度を変化させた場合における色差の誤差

ない。また、色差をもとに色光探索の範囲を変化させることで、色差の収束に要する時間を短縮可能であることがわかった。しかし、色差のみで探索範囲を指定した場合、局所解に陥る可能性が存在する。したがって、今後もアルゴリズムの改善が必要であると考えられる。

照度を変化させた場合の照度変化の履歴から、色光制御時におけるペーパー UI を用いた照度の上昇および下降を実現したと言える。しかし、目標照度を保持することが可能であったのは、目標とする色光が緑の場合のみであった。理由として、照明の色光によって照度に与える影響が異なることが推測される。加えて色差の履歴から、照度を変化した場合と照度を固定した場合の最終的な色差を比較すると、どの色を着色した場合においても照度を変化させた場合の方が大きいことがわかった。考えられる要因として、照度を変化させた場合では照度変化が色差に影響を及ぼす場合があり、色光探索に時間がかかることが挙げられる。また、照度変化が色差に与える影響は、照明の色光によって異なることが推測できた。今後は、照度変化が色差に与える影響について、色ごとに影響を明らかにする必要があると考える。加えて、赤、青、緑以外の色においても検証実験を行い、すべての色に最適な色光と照度の制御手法を考案する必要がある。

6. 結論と今後の展望

本研究では、色光と照度を直感的に制御可能とすること

を目的として、ペーパー UI を用いた色光・照度制御システム (CICS/PUI) を構築し精度の検証を行った。ペーパー UI は紙を用いた UI であり、ユーザは UI に着色することで目標とする照明の色光を指定し、手をかざすことで照度を制御する。CICS/PUI では、現在の照明の色光を指定した目標の色に近づけるためにフィードバック制御を行う。フィードバック制御により、照明の照度を変更した場合においても色光の目標値を実現する。著者らは CICS/PUI の構築を行うとともに、CICS/PUI を用いた場合における目標とする色光・照度環境の実現可能性を検証した。結果として、照度を固定した場合と変化させた場合の両方の場合において、目標とする色光へと近づく制御を確認した。また実験結果より、ペーパー UI に手をかざすことで、照度を上昇・降下させる照度制御を実現した。

今後の展望として、調光アルゴリズムの改善を検討している。色光探索が終了しない色が存在することや、照度変化を行った場合に色光探索に時間を要したことから、調光アルゴリズムの改善が必要であると考えられる。そのために、赤、青、緑以外の色を目標とした場合についても検証実験を行い、照度と色光の関連性を明らかにする必要がある。

参考文献

- [1] 大林史明, 富田和宏, 服部瑠子, 河内美佐, 下田 宏, 石井裕剛, 寺野真明, 吉川榮和: オフィスワークのプロダクティビティ改善のための環境制御法の研究—照明制御法の開発と実験的評価, ヒューマンインタフェースシンポジウム, Vol. 1, No. 1322, pp. 151–156 (2006).
- [2] 三木光範, 谷口由佳, 吉見真聡: 創造的業務における最適な照度および色温度, 照明学会誌, Vol. 96, No. 8A, pp. 437–441 (2012).
- [3] 李 東起, 江 欣宸, 古賀誉章, 平手小太郎: LED 照明の光色が作業空間における不快感に与える影響に関する基礎的研究, 日本建築学会技術報告集, Vol. 17, No. 35, pp. 201–204 (2011).
- [4] Chand, A. and Dey, A. K.: Jadoo: a paper user interface for users unfamiliar with computers, *CHI'06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 1625–1630 (2006).
- [5] Li, H., Brockmeyer, E., Carter, E. J., Fromm, J., Hudson, S. E., Patel, S. N. and Sample, A.: PaperID: A Technique for Drawing Functional Battery-Free Wireless Interfaces on Paper, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 5885–5896 (2016).
- [6] Ohta, N. and Robertson, A. R.: CIE standard colorimetric system, *Colorimetry: Fundamentals and Applications*, pp. 63–114 (2006).
- [7] JIS Z 8721: 色の表示方法—三属性による表示 (1993).
- [8] Boyce, P. R., Eklund, N. H. and Simpson, S. N.: Individual lighting control: task performance, mood, and illuminance, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Vol. 29, No. 1, pp. 131–142 (2000).
- [9] JIS Z 9110: 照明基準総則 (2011).
- [10] 栗田正一: 新時代に適合する照明環境の要件に関する調査研究報告書, 技術報告, 照明学会 (1985).