

プロジェクタ・カメラシステムを用いた情報提示における 提示色フィードバック

Color Feedback in Information Presentation Using a Projector Camera System

川上 大樹† 山下 淳‡ 金子 透† 浅間 一‡

Daiki Kawakami†, Atsushi Yamashita‡, Toru Kaneko†, Hajime Asama‡

†静岡大学 ‡東京大学

†Shizuoka University, ‡The University of Tokyo

E-mail: yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract

色の見え方には個人差がある。中でも、眼球内で色を感じる3つの錐体のうち、いずれかが働いていない場合、特定の色の組み合わせにおいて色の判別が困難になる。本研究では、プロジェクタとカメラで構成されたシステムを用いて、実物体に判別困難な色の組み合わせが存在した時に、その配色部分を判別可能な色に変換し、色名を表示する。そのとき提示色フィードバックによって観測される色が目標の色になるように制御することで、色覚障害者に判別可能な色で色情報の提示を行う。

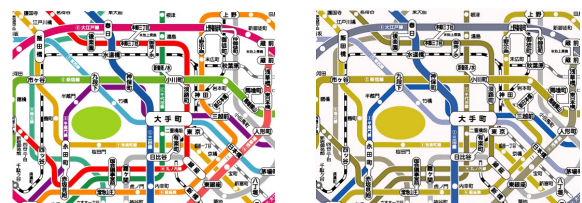
1 序論

色の見え方(色覚)には個人差がある。人間は光に対する赤、緑、青錐体(L, M, S錐体)の反応値の比によって色を知覚しているが、3つの錐体のいずれかの機能が一部低下したり、働いていない場合、特定の色同士を見分けることが困難になり、日常生活で不自由に感じることがある。

全ての錐体に欠損がない状態を3色覚、L錐体が欠損している状態を1型2色覚、M錐体が欠損している状態を2型2色覚、S錐体が欠損している状態を3型2色覚、2種類以上の錐体が欠損している状態を1色覚と呼ぶ[1]。

図1(a)の路線図に対して2型2色覚での見え方をシミュレートした結果が図1(b)である。この路線図では路線を色で区別しているため、図1(a)に対し、図1(b)では、特定の色の路線の区別が付きにくくなっていることがわかる。

近年では、ユニバーサルデザインやバリアフリーなどにより高齢者や障害者の自立支援が進められている。色覚に関して、色のみで区別せずに形状や色名などを併用して区別する、見分けやすい色の組み合わせを



(a) 3色覚 (b) 2型2色覚シミュレーション
(全ての錐体が欠損無し) (緑色を感じる錐体が欠損)

図1 色覚の個人差の例(路線図)

するなどの支援が進められている。しかし、それは一部の路線図などでしか実施されておらず、配備が不完全である。

色覚特性に対する支援の研究には、筒井らが構築したシステムがある[2]。このシステムは、HMD(Head Mounted Display)、小型カメラ、PCから構成される装置を用いて、カメラから取得された画像から判別困難な配色を検出し、HMDにより判別が困難な部分に境界線を表示する。このような方法で、色情報を提示するものである。しかし、このシステムではHMDを装着することにより使用者に拘束感を与えることや、色情報提示の方法が境界線表示しかないため実際には何色であるのかが分からず、会話で色名を用いる必要がある場合やスイッチなど色名で何かを指定される場合などに問題が生じる可能性がある。

そこで、色情報を提示する方法としてプロジェクタを用いて、判別が困難な配色が存在した場合に色情報を提示する、どこでも使えて色覚の個人差に対応した補助システムが有効であると考えられる。従来研究にはプロジェクタ・カメラシステムにより、判別困難な配色部分に境界線や色名などの色情報を提示する研究[3]がある。しかしこの研究では、あらかじめ入力された色で色情報を投影しているため特定の配色にしか対応できない、対象の色や反射特性を考慮していないため観測される色が目標の色にならないといった問題が

ある．

そこで，本研究では，提示色フィードバックにより観測される色が目標となる色になるように制御することで，様々な配色に対して色情報を投影することを可能にする．

2 研究目的

本研究では，プロジェクタ・カメラシステムにおける提示色フィードバックによって，観測される色が目的の色になるように制御し，あらかじめ色を入力することなしに色覚障害者に判別可能な色で色情報の提示をするシステムを提案する．ここで，カメラは色情報取得に用い，プロジェクタは色情報提示に用いる（図2）．

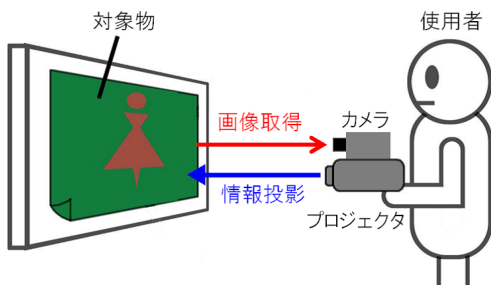


図2 システム概略図

本研究で提案する手法では，図3のように判別が困難な配色が存在した場合，判別が困難な配色部分を検出し，それを判別可能な色に変換し色名表示を行うことで色情報を提示する．図3(a)は，判別が困難な配色が存在する対象物の例である．図3(a)に対して，2型2色覚シミュレーションを行った結果が図3(b)である．図3(b)を見ると分かるように，図3(a)において赤色領域と緑色領域の判別が付きにくくなっている．図4(a)は，図3(a)に対して本研究で提案する手法により色情報を提示した結果である．図4(b)は，図4(a)の2型2色覚シミュレーション結果である．図3(b)では判別できなかった赤色と緑色の領域が，図4(b)では色の変換と色名表示を行うことで判別できるようになっていることがわかる．



(a) 3色覚 (b) 2型2色覚シミュレーション

図3 色情報の提示対象

3 色情報提示

提案手法では，ポスターなどの平面物体を対象とし，図2に示すようにプロジェクタ，カメラを構成要素と

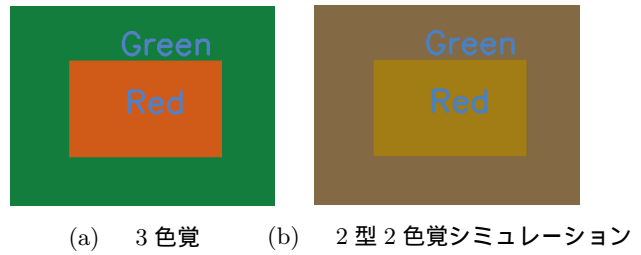


図4 色情報提示方法

するシステムを用いる．まずカメラにより取得された画像から判別困難な色の組み合わせを検出し，片方の色を判別可能な色に変換し，判別困難な配色部分に色名を表示した画像を生成する．そして提示色フィードバックにより，生成された画像と観測される見かけが等しくなるよう処理を行う．

3.1 判別可能な色への変換

判別困難な配色を判別可能な色へ変換する手順を図5に示す．まず取得した画像に対して，ISODATA アルゴリズム [4] を用いて，取得画像中の各画素の xy 色度値でクラスタリングをして色の領域に分割する．その色領域の代表色を算出し，代表色同士が判別困難になっている色領域の組を検出する．判別困難な配色の検出手法については，3.2 節で述べる．判別困難な配色が検出された場合，色領域同士が判別可能になるよう片方の色領域の色変換を行う．色変換を行う色領域は，変換の影響をなるべく減らすため領域面積の小さい方とする．

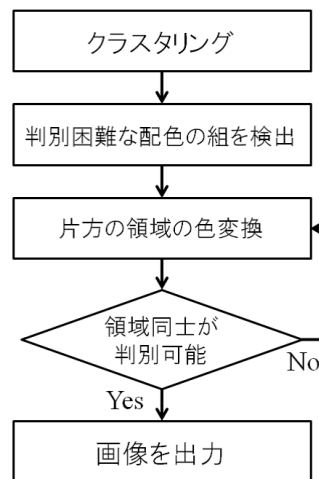


図5 色変換方法

色の変換を R, G, B や X, Y, Z 等の表色系の表すパラメータを変えることで行うと，色覚障害者に判別可能な色を体系的に求めることができず，全探索的に求めることになり効率的ではない．

本研究では $L^*a^*b^*$ 表色系の表すクロマネティクス指

数 b^* ，明度 L^* を変更することで色の変換を行う．図6に $L^*a^*b^*$ 表色系を示す． L^* が色の明度を表し， a^* が緑から赤へ， b^* が青から黄への色相の要素を表している．

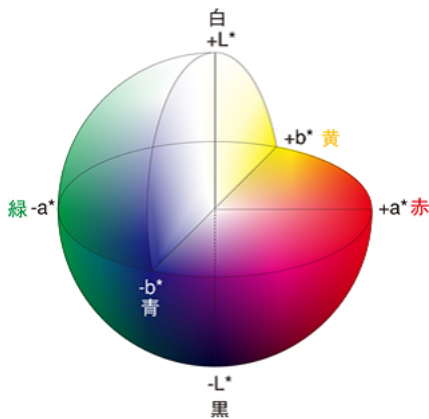


図6 $L^*a^*b^*$ 表色系

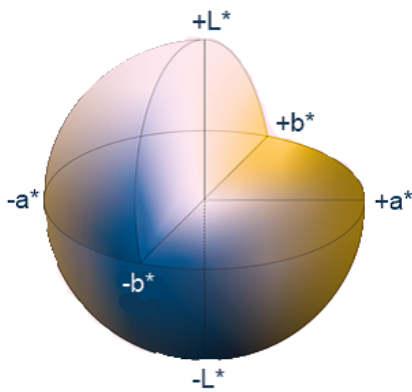


図7 $L^*a^*b^*$ 表色系
(2型2色覚シミュレーション)

図6に対して2型2色覚シミュレーションを行った結果を図7に示す．図7を見ると， a^* の方向に色を変化させたとしても色はあまり変化しないことがわかる．そのため本研究では，クロマネティクス指数 b^* ，明度 L^* の2種類のパラメータを変更することにより判別可能な色への変換を行う．色の変換方法を以下に示す．

まず，変換する色領域の代表色の b^* を変化した時の色差 ΔE_{Lab} を式(1)より求め，それがしきい値をこえるときの b^* の値を求める．そして b^* の変更のみで十分な色差が得られない場合，色差がしきい値を超えるまで L^* を変化させる．こうして求められた値と代表色の値の差を変換値とする．

$$\Delta E_{Lab} = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (1)$$

色差は2色覚の色覚モデルから再現した2色覚者が見ている色から求める．色覚モデルについては，3.4節で詳しく述べる．

3.2 判別困難な配色の検出

本研究では，判別困難な配色の検出に混同色線を用いる．混同色線は，色覚の種類により与えられる xy 色度図上の異なる場所に混同色中心と呼ばれる座標から放射状に伸びる直線である．

混同色中心の座標は，1型2色覚が， $x_p = 0.7465$ ， $y_p = 0.2535$ ，2型2色覚が， $x_d = 1.4000$ ， $y_d = -0.4000$ ，3型2色覚が， $x_t = 0.1748$ ， $y_t = 0.0044$ である [1]．

3点ある混同色中心のうち，1点の混同色中心から無限に引かれる線のグループがその色覚の混同色線である． xy 色度図における2型2色覚の混同色線と混同色中心を図8に示す．同一直線の混同色線上となる色はその色覚の人にとって判別困難であることがわかっている．よって，色同士が同一混同色線上に位置するかどうかを判定することで，それらの色が判別困難であるかを判定することができる．本研究では，取得画像中の各画素の色を xy 色度図上に投影し，投影された点と混同色中心を結ぶ直線を混同色線とする．

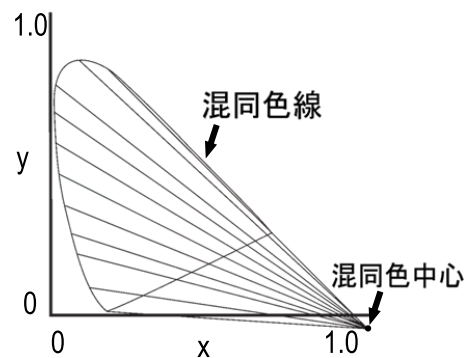


図8 2型2色覚の混同色中心と混同色線

例えば，画像中のある画素の色が xy 色度図において図9の点Aとして与えられた場合，混同色線は直線 L_1 のようになる．同様に点Bの混同色線は L_2 ，点Cと点Dの混同色線は L_3 のようになる．点Aと点Bの場合，それぞれの混同色線 L_1 ， L_2 のなす角が大きいため，点Aと点Bは判別可能な配色であると判定される．点Aと点Cの場合，それぞれの混同色線 L_1 ， L_3 のなす角は小さいが， xy 色度図上での距離が遠いため判別可能な配色であると判定される．一方，点Cと同じ混同色線上の点Dでは，点Aとの xy 色度図上での距離が近いいため，判別困難な配色と判定される．

3.3 色名表示

判別困難な配色部分に色名を表示する．まず，判別困難となっている配色の重心位置を算出し，その位置を色名表示位置とする．重心位置が複数の配色で重なっている場合は，重心から最も近い領域の色の画素を表示位置として算出する．そして表示に用いる色は，3.1

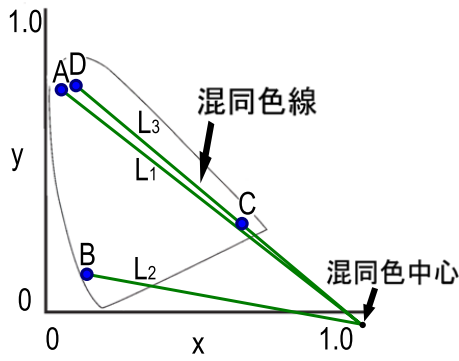


図 9 判別困難な配色

節で述べた手法と同様に表示箇所の色に対してしきい値以上の色差となる色を求める。

3.4 色覚モデル

3.1 節で述べたように，判別可能な色に変換する処理において色差は 2 色覚モデルから再現した 2 色覚者が見ている色で求める。その求め方について下記に示す [5]。

まず $L^*a^*b^*$ 表色系から XYZ 表色系へ変換する。次に LMS 錐体の分光感度値と XYZ との対応関係は，

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.155 & 0.543 & -0.0031 \\ -0.155 & 0.457 & 0.0329 \\ 0.0 & 0.0 & 0.016 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

で与えられる。そして 1 型 2 色覚と 2 型 2 色覚の LMS 錐体のそれぞれの分光感度値を $L_p M_p S_p$ および $L_d M_d S_d$ とすると，

$$\begin{bmatrix} L_p \\ M_p \\ S_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0 & 2.02 & -2.52 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} L_d \\ M_d \\ S_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.49 & 0.0 & 1.25 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (4)$$

と求められる。よって，式 (3)，式 (4) から求められた LMS 値から，式 (2) の逆行列より XYZ を求め， XYZ 表色系から $L^*a^*b^*$ 表色系に変換することで，1 型 2 色覚，および，2 型 2 色覚での $L^*a^*b^*$ 表色系の値を求めることができる。

4 提示色フィードバック

提示色フィードバックに用いた手法は，天野らの提案する手法 [6] をベースに構築した。天野らの提案する手法では，反射率推定とモデル予測制御を用いることで見かけの制御を体系的に行うことを可能にしている。図 10 に提示色フィードバックの制御図を示す。

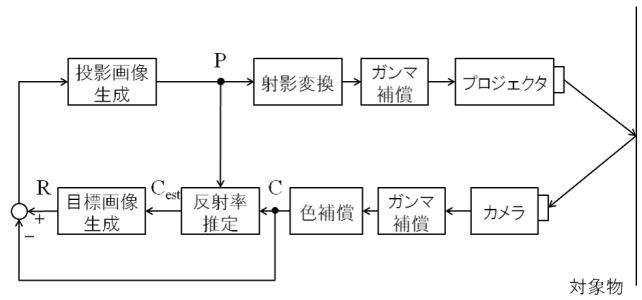


図 10 提示色フィードバック制御図

この手法を実装するためには，カメラとプロジェクタのカラーキャリブレーションと，プロジェクタの入力 RGB 値とカメラの出力 RGB 値の入出力特性の線形化を行うことが必要であるため，それらを行う。

4.1 カラーキャリブレーション

プロジェクタから投影される光の分光強度特性とカメラで撮影される画像の分光感度特性は異なる。提示色フィードバックを行うためには，プロジェクタとカメラの色空間において整合性がとれている必要があるためカラーキャリブレーションを行う。本研究では，以下に示す処理手順でカラーキャリブレーションを行う [7]。

まず，プロジェクタより R, G, B 単色光を白色平面に投影し，そのときカメラより取得された画像において，R, G, B チャンネルそれぞれの画素値平均 m_R, m_G, m_B を求める。次に，これらの値より色彩変換行列 K' を以下の式で求める。ただし， m_{*1}, m_{*2}, m_{*3} はそれぞれ，R, G, B チャンネルの単色光を投影した際に得られる画素値平均である。

$$K'_{3 \times 3} = M^{-1} \det(M) \quad (5)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{R1} & m_{R2} & m_{R3} \\ m_{G1} & m_{G2} & m_{G3} \\ m_{B1} & m_{B2} & m_{B3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

プロジェクタとカメラの色補償を行うには，このように求められた色彩変換行列 $K'_{3 \times 3}$ を用いて入力画像の画素値 (Im_R, Im_G, Im_B) を

$$\begin{bmatrix} Im'_R \\ Im'_G \\ Im'_B \end{bmatrix} = K'_{3 \times 3} \begin{bmatrix} Im_R \\ Im_G \\ Im_B \end{bmatrix} \quad (7)$$

と変換し， (Im'_R, Im'_G, Im'_B) を補償結果としてプロジェクタ・カメラ系に入力する。

4.2 入出力特性の線形化

一般に，プロジェクタはガンマ特性の影響により入出力特性は非線形である。入出力特性が非線形であると，提示色フィードバックにおいてフィードバックが収

束するまでのステップ数が多くなるといった問題が発生する．よって，本研究では以下の方法でプロジェクタの入出力特性の線形化を行う [8]．

R, G, B それぞれでガンマ値が異なるためチャンネルごとに線形化の処理を行う．まず，プロジェクタの R チャンネルの入力値を 256 段階 (0~255) に設定し，順に入力値をあげて白色平面に投影する．そして，ガンマ補正をしない ($\gamma = 1$) カメラより取得された画像より，投影部分の画素値平均を求める．測定結果を基にプロジェクタ入力値とカメラ出力値の関係が線形性を満たすようなルックアップテーブルを作成する．このテーブルには輝度値ごとに，補正後の出力輝度値が目標とする直線上の値となる補正パラメータが格納されている．G, B チャンネルでも同様の処理を行い，ルックアップテーブルを作成する．

そしてプロジェクタから投影するとき，このルックアップテーブルを用いて補正を行うことで，入出力特性の線形化を行う．

4.3 処理手順

提示色フィードバックに用いた手法は，天野らの提案する手法 [6] をベースに構築した．その処理手順を図 11 に示す．

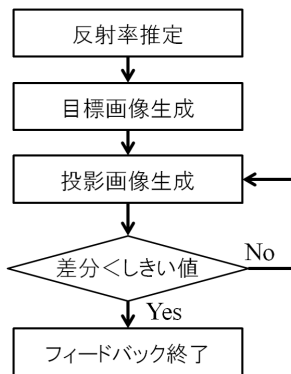


図 11 提示色フィードバック処理手順

まず最大の輝度の光 $(1, 1, 1)^T$ および最小の輝度の光 $(0, 0, 0)^T$ が投影されたときに取得される画像 C_{full} および C_0 を得る．最大および最小の輝度の光とは，R, G, B チャンネルの値がすべて 255 および 0 の光である．次に対象物に対して白色光を投影し，反射率 \hat{K} を求める．投影画像を P，現在の見かけを C とすると反射率 \hat{K} は以下のように表される．

$$\hat{K} = \text{diag}[C ./ \{(C_{full} - C_0) \odot P + C_0\}] \quad (8)$$

./ と \odot は要素ごとの除算と積算を意味する．

反射率 \hat{K} と白色光を投影したときに取得される画像 $C_{white} = (1, 1, 1)^T$ より，白色光が投影されている状況での見かけ C_{est} は，

$$C_{est} = \hat{K} C_{white} \quad (9)$$

と推定できる．

この推定された画像 C_{est} に 3.1 節, 3.3 節で述べた手法で色変換・色名表示を行い目標画像 R とすることにより，現在の見かけ C との差から負帰還を構成することで任意の見かけの制御を実現することができる．目標画像を $R(t+1)$ とすると操作量 $P(t+1)$ は以下の式で求めることができる．

$$P(t+1) \approx \hat{K}(t)^{-1} (1 - \alpha) \{R(t+1) - C(t)\} ./ (C_{full} - C_0) + P(t) \quad (10)$$

ここで， α はチューニングパラメータであり定数である．この式から投影画像を求めることができる．

目標画像とカメラから得られた画像の差分の合計がしきい値未満になるか，差分の合計値が収束するまで投影画像を求める処理を繰り返す．この処理によって求められた投影画像を投影することで観測される見かけと目標画像を一致させることができる．

5 実験

5.1 実験条件

実験装置はコンピュータ，プロジェクタ，カメラから構成され，対象物に対して図 12 のようにプロジェクタとカメラを配置した．実験は，蛍光灯による照明のある室内で行った．

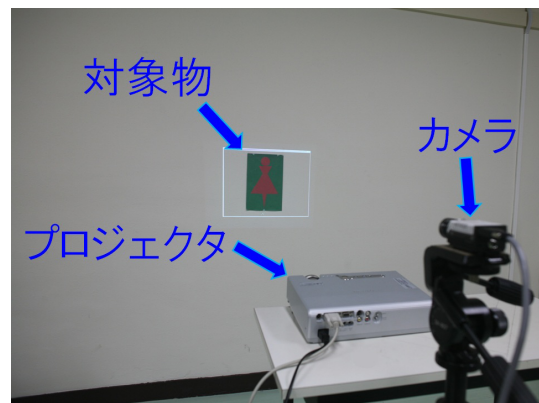


図 12 実験装置構成

実験には，対象物として図 13(a) に示すシンボルマークが印刷された紙を使用し，これに対して色情報を投影する．図 13(a) に対して 2 型 2 色覚シミュレーションを行うと図 13(b) のような結果になり，暗赤色と暗緑色の判別が困難であることがわかる．

そこで，図 13(a) に対して第 3 章で述べた手法を用いて，判別困難な配色部分を判別可能な色に変換し，判別困難な配色部分に対して色名を表示した画像を生成する．そして，生成した画像を提示色フィードバック

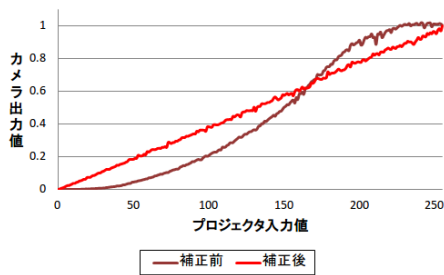


図 13 対象物

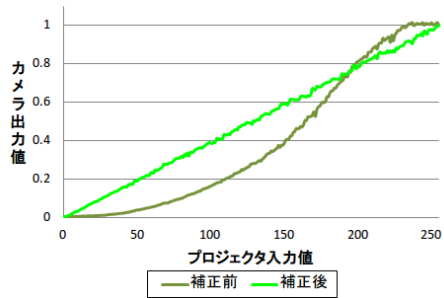
の目標画像として第 4 章で述べた手法で現在の見かけと目標画像が一致するように制御する．これらの処理により，暗赤色と暗緑色の領域と色名の判別を可能にする．

5.2 実験結果

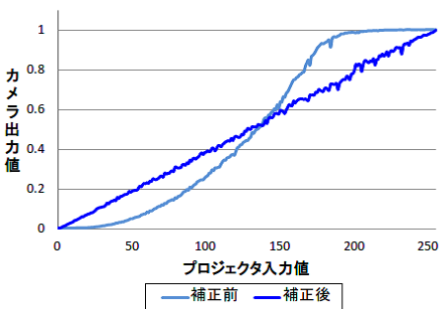
実験では，まず光学キャリブレーションとして 4.2 節で述べた手法でプロジェクタの入出力特性の線形化を行った．R, G, B チャンネルごとに線形化を行った結果を図 14 に示す．補正前はプロジェクタとカメラの入出力関係は非線形となっていたが，補正後は線形に近づいていることがわかる．



(a) R チャンネル



(b) G チャンネル



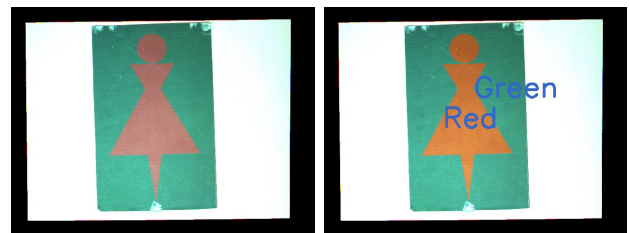
(c) B チャンネル

図 14 入出力特性の線形化

次に，4.1 節で述べた手法を用いて，カメラとプロジェクタ間のカラーマッチングに使用される変換行列を求めた．

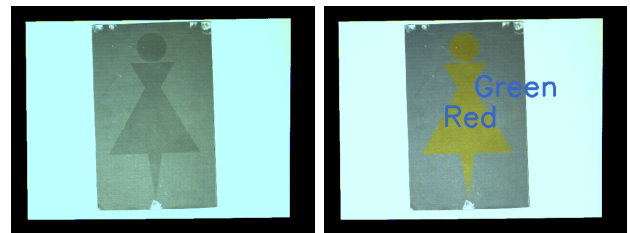
最後に，提示色フィードバックの結果を示す．まず最大および最小の輝度の光が投影されたときの画像 C_{full} ， C_0 を取得した．次に白色光を投影し式 (8) より反射率 \hat{R} を求めた．図 15(a) は式 (9) から推定された白色照明下での見かけである．これに色変換・色名表示の処理を行った結果が図 15(b) である．赤色領域と緑色領域が判別困難と判断され，面積の小さい赤色領域の色を $\Delta b^* = 22$ ， $\Delta L^* = 0$ だけ変換した．そして，赤色領域と緑色領域に対してそれぞれ Red, Green という色名を表示した．

図 16 に色変換前と色変換後の画像の 2 型 2 色覚での見え方のシミュレーション結果を示す．図 16(a) は赤色領域と緑色領域が判別困難になっており色差は $\Delta E_{Lab} = 9.87$ である．図 16(b) での赤色領域と緑色領域の色差は $\Delta E'_{Lab} = 34.10$ となっている．色差は，13~25 が系統色名で区別が付く程度の色の差で，25 を超えると別の色と認識される [9]．このことから 2 つの色領域が判別可能になっていることがわかる．また，色名を表示することでそれぞれの領域の色名を判別することが可能になっている．



(a) 推定画像 (b) 色変換・色名表示結果

図 15 色変換結果



(a) 色変換前 (b) 色変換後

図 16 2 型 2 色覚シミュレーション結果

図 15(b) を目標画像として，チューニングパラメータを $\alpha = 0.8$ に設定し，提示色フィードバックを行った．フィードバックのステップごとに取得された画像を図 17 に示す．図 17 の取得画像と目標画像の画素値の差の平均を求めた結果を図 18 に示す．投影前をステップ 0 としている．フィードバックは 4 ステップで収束して，処理時間は，目標画像の生成で 1.09 秒，フィードバックで 0.80 秒であった．収束時の取得画像と目標画像の画素値の差の平均は 18.3 となった．

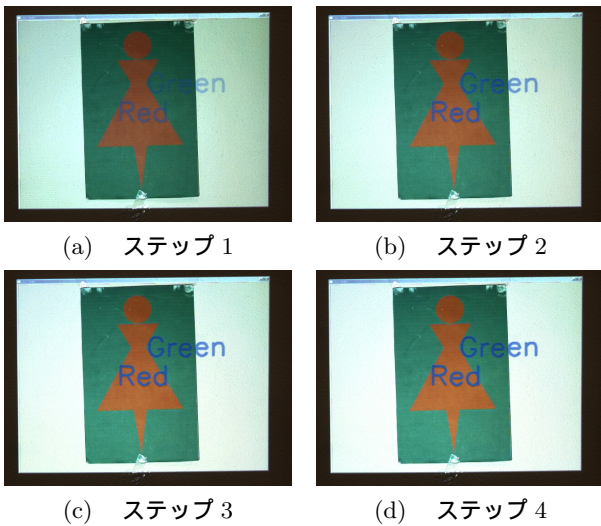


図 17 ステップごとのフィードバック結果の変化

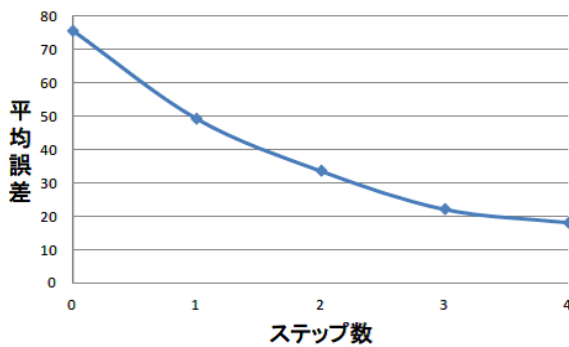


図 18 平均誤差の変化

図 19 は目標画像と結果画像の画素値の差の絶対値を取った結果であり，差が 0 のとき黒色になる．黒色以外の場合は，赤色成分が出ているところは R チャンネルで誤差があるを表して，緑色，青色成分が出ているところはそれぞれ G チャンネル， B チャンネルで誤差があることを表している．図 19 を見ると，投影画像と対象物の位置合わせ誤差が 1pixel 程度あることが原因でエッジ部分に誤差が出ているが，フィードバックが成功していることがわかる．

6 結論

プロジェクタ・カメラシステムによる提示色フィードバックによって，観測される見かけを目標とする見かけに変化させることができた．また，事前の色の入力なしに判別困難な配色を判別可能な配色に変換し，判別可能な色で色名を表示することができた．

今後の課題としては，色情報の提示方法の種類の増加，平面以外の対象物への対応などがある．



図 19 差分画像

7 謝辞

本研究の一部は科研費（24650093）の助成を受けた．

参考文献

- [1] 篠田博之，藤枝一郎：色彩工学入門 定量的な色の理解と活用，森北出版，2007.
- [2] 筒井崇洋，青木公也：“ウェアラブル式色バリアフリーシステム”，動的画像処理利用化ワークショップ 2008 予稿集，pp.282-285，2008.
- [3] 宮木理恵，山下淳，金子透：“プロジェクタ・カメラシステムを用いた色覚障害者への色情報提示”，電気学会論文誌 D, Vol.131-D, No.4, pp.497-504, 2011.
- [4] Paul M. Mather: Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction, 3rd Edition, Wiley, 2004.
- [5] 目黒光彦：“色覚障害を克服するカラー画像の色変換処理”，電気通信普及財団研究調査報告書, Vol.21, pp.449-508, 2006.
- [6] 天野敏之，加藤博一：“モデル予測制御を用いたプロジェクタカメラ系によるアピランス制御”，電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J94-D, No.8, pp.1368-1375, 2010.
- [7] 天野敏之，加藤博一：“プロジェクタカメラフィードバック系によるアピランス強調”，画像の認識・理解シンポジウム 2008 予稿集, pp.79-86, 2008.
- [8] 吉田壮伸，堀井千夏，佐藤宏介：“複合現実博物館のための反射特性に基づくプロジェクタ投影テクスチャ”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.9, No.1, pp.97-104, 2004.
- [9] 東陽一，郡司秀明: DTP テクニカルキーワード 250, 日本印刷, 2005.