

分光推定法に基づく画像投影型カラーシミュレータの精度向上

非会員 山本昇志[†], 非会員 植田久美子[†], 正会員 津村徳道[†], 非会員 中口俊哉[†], 正会員 三宅洋一^{††}

本論文では、プロジェクタ画像投影を利用した印刷物のカラーシミュレータにおいて、RGBなどの低次元の色彩計測値から推定された分光反射率を用いることにより、簡易な計測で高精度な色制御が実現できることを示した。これまで我々は、インキ量の増減に対する印刷物の色変化を投影像の重ね合わせで表現可能なカラーシミュレータを構築してきた。プロジェクタ投影画像を高精度に制御することにより、試行錯誤が必要な色調整作業の軽減や色見本による作業者支援などが期待できる。しかしながら投影像の高精度な制御には分光反射率情報が必要であり、計測コストの低減が実用上の課題であった。今回提案する手法では、低次元の計測値から推定された分光反射率を用いることにより、簡易な計測で高精度な色制御が実現可能となる。通常、低次元の計測値から高次元の分光反射率を正確に推定するには、可視光波長領域で5~6バンドの計測値が必要となる。しかし今回我々は、絶対的な分光反射率の推定ではなく、投影による色変化の予測に十分な分光反射率の推定を目的として低次元数の選択やバンドの最適化を実施した。その結果、3バンド計測値で投影による各色変化を最大色差 $E^*94=2$ 以下の精度で再現できることを明らかにした。

キーワード: プロジェクタ, 複合現実感, カラーシミュレータ, 分光推定

1. まえがき

デジタルメディア時代の到来と共に、さまざまな媒体でのカラーマッチングがますます重要となっている¹⁻³⁾。中でも静止画(写真やプリンタ出力、印刷物などの紙媒体メディアを含む)は、画像のみで情報を正確に伝達するため、動画と比べて、忠実な色再現が必要とされる。そのため、出力の最終的な色管理には、未だ人間の高度な調整能力と熟練な技が要求されている。また、この色調整作業は試行錯誤的に幾度となく繰り返されるため、生産性向上と色再現の正確さを両立させることが写真やプリンタ、印刷業界の課題である。この課題に対して、色調整作業後の静止画出力を推定して、作業者が仕上がりを確認できるカラーシミュレータの開発が望まれている^{4,5)}。カラーシミュレータの開発にはハーフトニングの面積率変化やインキ膜厚変化に対する発色予測と、予測した発色変化を作業者に正確に伝達する表示再生技術の確立が必要である。

発色予測はインキ供給量の増減に対して膜厚やドットゲイン変化を計算し、供給量変化に応じた発色変化を推定する技術であり、これまでに多くの研究が行われている^{6,7)}。予測された結果はプルーフとしてモニタに表示したり、数値目標として用いることで、色調整作業を支援する⁸⁾。しかし実際の色調整作業は絵柄全体での色バランスも考慮しなければならないため、現在の印刷物全体がどのような色に変わるのかを直感的に知る必要がある。そこで我々は発色予測から得られた色変化をプロジェクタ画像として生成し、実際の印刷物上に重ねて投影する仮想的なカラーシミュレータ用ディスプレイシステムを開発した⁹⁻¹²⁾。システム全体構成とプロジェクタ画像重ね合わせの手法を図1に示す。このシステムは既存の印刷物へ直接、画像パターンを投影するため、モニタのような発光色としてではなく、実印刷物と同じ反射色としての質感一致が実現できる。また、印刷物全体の色がインキ供給量に応じて直接的に変化するため、全体色バランスの調整工程で繰り返される試行錯誤作業の削減の効果が期待できる。しかしながらプロジェクタ投影像の高精度な制御には現在の印刷物の分光反射率情報が必要であり、印刷物全面に渡って分光反射率情報を取得しなければならない。計測の簡易化を目的として、RGBなどの低次元の色彩計測で得た反射比率を用いたシステムを検討したが、分光反射率を用いた手法と比べてプロジェクタ投影画素値の算出過程で誤差が生じる結果となった¹³⁾。

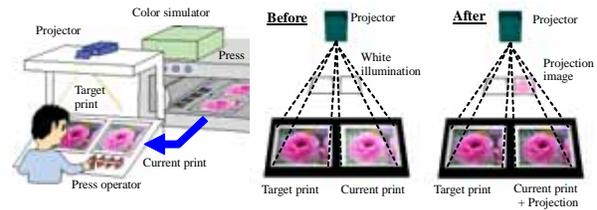


図1 プロジェクタを用いた色調整システム

そこで本論文では RGB などの低次元の色彩計測値から推定された分光反射率を用いることにより、簡易な計測で高精度なプロジェクタの色制御が実現できる手法を提案する。低次元の色彩計測値から分光反射率を推定する方法は、予めシステムで生じる分光反射率変化を主成分分析して求めた低次元の計測値を用いることにより、近似的な分光反射率を推定できる^{14,15)}。通常、分光反射率計で得られるような絶対的な分光反射率の推定には可視光波長領域で5~6バンドの計測値が必要となるが^{16,17)}、今回、我々は投影による色変化の予測に十分な分光反射率の推定を目的として、より少ない計測次元数の選択やフィルタ分布の最適化を実施した。2節ではまず、分光反射率を基本としたプロジェクションシステムにおける投影画素値の算出方法を説明し、同時に従来法である低次元出力の反射比率を用いた方法を説明する。3節において提案する分光推定法による投影画素値の算出方法を説明し、4節でプロジェクタ投影画像を算出するために最適な計測次元数の選択やバンドの決定を行った。5節では4節で決定した低次元計測出力からインキ供給量変化に対するプロジェクタ投影画像を計算し、実際の印刷物上に重ねあわせ実験を行った。インキ供給量が異なる2つの印刷物の一方にプロジェクタ画像の投影を実施し、両者の色一致精度の評価を行うことにより、システムの有効性を考察した。

2. プロジェクタを用いた色の重ねあわせ制御

2.1 分光反射率を用いたプロジェクタ投影画像の算出

我々のディスプレイシステムは、インキ供給量の変化によって生じる印刷物の色変化をプロジェクタ投影画像として生成する。そのため印刷物の色変化に応じたプロジェクタの画素値を正確に算出しなければならない。そこで本節ではまず、光線追跡に基づいたプロジェクタ画素値の決定方法について述べる。図2に本シ

[†] 千葉大学大学院 自然科学研究科

^{††} 千葉大学 フロンティアメディカル工学研究センター

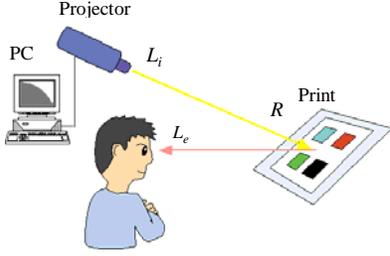


図2 観察者に伝達されるプロジェクタ輝度の光線経路

システムの全体構成と、プロジェクタの輝度が観察者まで到達する光線の軌跡を示す。プロジェクタ、印刷物、観察者の位置がそれぞれ決定されるとき、観察者に届く反射輝度は(1)式で表すことができる⁽⁹⁻¹²⁾。

$$L_e(x, y, \lambda) = L_i(x, y, \lambda)R(x, y, \lambda) \quad (1)$$

ここで、 L_i はプロジェクタの放射輝度、 R は印刷物の分光反射率、 x, y は印刷物紙面上の位置、 λ は波長で 380~780nm を示す。

プロジェクタの投影画像は接続された PC から制御することができ、PC で生成された入力画像の RGB 画素値に応じて投影される各画素の輝度は一意に決定できる。通常、投影される画像の輝度はそれぞれ波長的に独立な RGB フィルタを通過した光の混合結果として表現される。よって、PC で生成された画像値と、投影される画像の輝度はそれぞれお互いに独立な 3 つの基底ベクトルを持つ信号成分として表すことができる。そのため、両者の関係は(2)式で正確な対応付けが可能である⁽¹⁸⁾。

$$L_e(d_r, d_g, d_b, \lambda) = C_r(d_r)V_r(\lambda)R(\lambda) + C_g(d_g)V_g(\lambda)R(\lambda) + C_b(d_b)V_b(\lambda)R(\lambda) + L_o(\lambda)R(\lambda) \quad (2)$$

ここで d_r, d_g, d_b は RGB 画素値であり、8 ビット階調で表現される。 C_r, C_g, C_b はスプライン補間によって計算される主成分係数であり、 V_r, V_g, V_b は主成分分析から求められる三原色に対する基底、 L_o はプロジェクタへ入力される RGB 画像値が (0,0,0) のときの輝度を示す。

次にインキ供給量変化で生じる印刷物の色変化に対応した投影画像の生成方法について述べる。ここでは、現状印刷物 (Current print) とインキ供給量を変化させた目標印刷物 (Target print) を用意して、両者の分光反射率の差から投影すべき画像の算出方法を導出する。図 3 に目標となる印刷物と現状の印刷物から反射される輝度を比較するシステムの概要と光線軌跡を示す。

図 3 において、印刷物と観察者の距離は十分あり、紙面位置による角度の違いが反射率に影響を及ぼさないと仮定する。(2)式を用いて目標印刷物からの反射輝度 $L_e^{TP}(\lambda)$ は(3)式で表すことができる。

$$L_e^{TP}(\lambda) = C_r^{TP}(d_r^{TP})V_r(\lambda)R^{TP}(\lambda) + C_g^{TP}(d_g^{TP})V_g(\lambda)R^{TP}(\lambda) + C_b^{TP}(d_b^{TP})V_b(\lambda)R^{TP}(\lambda) + L_o(\lambda)R^{TP}(\lambda) \quad (3)$$

ここで、 $R^{TP}(\lambda)$ は目標印刷物の分光反射率を示す。一方、現状印刷物からの反射輝度 $L_e^{CP}(\lambda)$ は(4)式で表される。

$$L_e^{CP}(\lambda) = C_r^{CP}(d_r^{CP})V_r(\lambda)R^{CP}(\lambda) + C_g^{CP}(d_g^{CP})V_g(\lambda)R^{CP}(\lambda) + C_b^{CP}(d_b^{CP})V_b(\lambda)R^{CP}(\lambda) + L_o(\lambda)R^{CP}(\lambda) \quad (4)$$

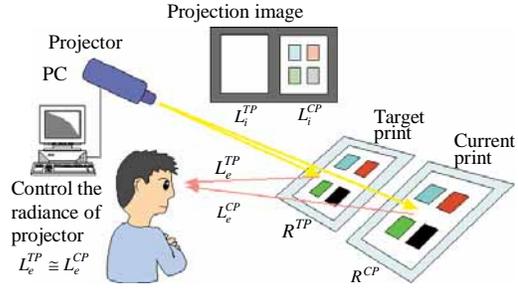


図3 目標印刷物と現状印刷物による光線経路

同様に、 $R^{CP}(\lambda)$ は現状印刷物の分光反射率を示す。現状印刷物と目標印刷物の色変化をプロジェクタ投影画像として算出するためには、目標印刷物からの反射輝度 $L_e^{TP}(\lambda)$ と現状の印刷物からの反射輝度 $L_e^{CP}(\lambda)$ が等しくなるように $d_r^{CP}, d_g^{CP}, d_b^{CP}$ の値を決定すればよい。しかしながら $d_r^{CP}, d_g^{CP}, d_b^{CP}$ の値は RGB8 ビット階調で表現される入力信号であるのに対して、基底ベクトルや分光反射率は多次元の分光情報であり、直接的に(3),(4)式から $d_r^{CP}, d_g^{CP}, d_b^{CP}$ の値を求めることはできない。そこで、(3),(4)式で用いている分光反射輝度を一旦、XYZ 三刺激値に変換して、XYZ 三刺激値とプロジェクタ入力信号である RGB 画素値の対応から $d_r^{CP}, d_g^{CP}, d_b^{CP}$ の値を求める。分光放射輝度から XYZ 三刺激値への変換は(5)式を用いて実施される。

$$X_i = \int_{380}^{780} L_i(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda, \quad Y_i = \int_{380}^{780} L_i(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda, \quad Z_i = \int_{380}^{780} L_i(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \quad (5)$$

ここで、 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ は CIE 等色関数を示している。この変換を用いると、現状の印刷物からの反射輝度 $L_e^{CP}(\lambda)$ を示す(4)式は(6)式のように変形される。

$$X_e^{CP} = C_r^{CP}(d_r^{CP}) \int_{380}^{780} V_r(\lambda)R^{CP}(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda + C_g^{CP}(d_g^{CP}) \int_{380}^{780} V_g(\lambda)R^{CP}(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda + C_b^{CP}(d_b^{CP}) \int_{380}^{780} V_b(\lambda)R^{CP}(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda + \int_{380}^{780} L_o(\lambda)R^{CP}(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \quad (6)$$

刺激値 Y_e^{CP}, Z_e^{CP} についても同様に変形される。これら三刺激値をマトリックス表記にすると最終的に(4)式は(7)式のように表現することができる。

$$\begin{bmatrix} X_e^{CP} \\ Y_e^{CP} \\ Z_e^{CP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xr} & A_{xg} & A_{xb} \\ A_{yr} & A_{yg} & A_{yb} \\ A_{zr} & A_{zg} & A_{zb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_r^{CP}(d_r^{CP}) \\ C_g^{CP}(d_g^{CP}) \\ C_b^{CP}(d_b^{CP}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、行列要素 A は

$$A_{mn} = \int_{380}^{780} V_n(\lambda)R^{CP}(\lambda)\bar{m}(\lambda)d\lambda \quad (m = x, y, z, n = r, g, b) \quad (8)$$

であり、 X_0, Y_0, Z_0 は L_0 に対する三刺激値を示す。プロジェクタの画素値は、目標印刷物からの反射三刺激値 $X_e^{TP}, Y_e^{TP}, Z_e^{TP}$ と現状印刷物からの反射三刺激値 $X_e^{CP}, Y_e^{CP}, Z_e^{CP}$ が等しくなるように決定されるため、主成分係数 $C_r^{CP}(d_r^{CP}), C_g^{CP}(d_g^{CP}), C_b^{CP}(d_b^{CP})$ は(8)式中の

$X_e^{CP}, Y_e^{CP}, Z_e^{CP}$ の代わりに $X_e^{TP}, Y_e^{TP}, Z_e^{TP}$ を代入して, (9)式に示した逆行列を解くことより算出できる.

$$\begin{bmatrix} C_r^{CP} \\ C_g^{CP} \\ C_b^{CP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_r^{CP} \\ d_g^{CP} \\ d_b^{CP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xr} & A_{yg} & A_{zb} \\ A_{yr} & A_{yg} & A_{yb} \\ A_{xr} & A_{zg} & A_{zb} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_e^{TP} \\ Y_e^{TP} \\ Z_e^{TP} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

最終的に, 計算された C_r, C_g, C_b に対応したプロジェクタの画素値は, 図4に示すスプライン補間を用いて決定できる.

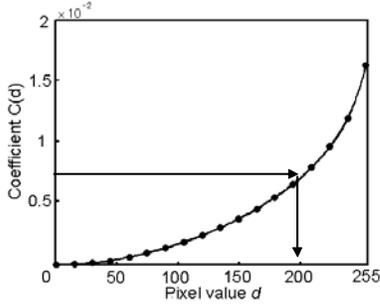


図4 画素値とスプライン係数の関係

2.2 三刺激値の反射比率を用いた投影画像の計算方法

2.1節で示したプロジェクタ投影画像の計算方法は分光反射率を用いているため, 近似などが施されていない正確な計算方法である. しかしながら分光反射率情報は多次元の情報であり, 計測や計算に非常にコストがかかる. 従来, 我々は簡易化を目的として, 分光反射率の代わりに三刺激値の反射比率を用いた方法を実施していた¹³⁾. この方法は, 計測された Y_{xy} 値を (10)式で XYZ に変換して, 得られた XYZ 刺激値から直接, 反射比率を求める. この方法を用いると, 観察される輝度は(11), (12)式で表現される.

$$X = \frac{x}{y} Y, \quad Y = Y, \quad Z = (1-x-y) \frac{Y}{y} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} X_e^{CP} \\ Y_e^{CP} \\ Z_e^{CP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R^{CP} & 0 & 0 \\ 0 & Y_R^{CP} & 0 \\ 0 & 0 & Z_R^{CP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i^{CP} \\ Y_i^{CP} \\ Z_i^{CP} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$X_R^{CP} = X_e^{CP} / X_e^W, \quad Y_R^{CP} = Y_e^{CP} / Y_e^W, \quad Z_R^{CP} = Z_e^{CP} / Z_e^W \quad (12)$$

ここで, $X_i^{CP}, Y_i^{CP}, Z_i^{CP}$ は現状の印刷物に照射されるプロジェクタ放射輝度の三刺激値表現, $X_e^{CP}, Y_e^{CP}, Z_e^{CP}$ は現状の印刷物から放射される輝度の三刺激値表現, X_e^W, Y_e^W, Z_e^W は標準白色板を計測したときの三刺激値表現であり, 印刷物の反射比率を計算するための基準として使用される. 三刺激値の比を分光反射率の代わりに用いて, 現在の印刷物の色を目標の印刷物の色になるようにプロジェクタの画素値を求める.

$$\begin{bmatrix} C_r^{CP} \\ C_g^{CP} \\ C_b^{CP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_r^{CP} \\ d_g^{CP} \\ d_b^{CP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xr} & B_{yg} & B_{zb} \\ B_{yr} & B_{yg} & B_{yb} \\ B_{xr} & B_{zg} & B_{zb} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_R^{CP} & 0 & 0 \\ 0 & Y_R^{CP} & 0 \\ 0 & 0 & Z_R^{CP} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_e^{TP} \\ Y_e^{TP} \\ Z_e^{TP} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで, 行列要素 B は

$$B_{mn} = \int_{380}^{780} V_n(\lambda) \bar{m}(\lambda) d\lambda \quad (m=x, y, z, n=r, g, b) \quad (14)$$

となる. (12)式から明らかなように, この手法では反射比率を三刺激値から求めているため, 分光反射率を用いた手法に比べて, 計測や計算が簡易に実施できる. しかしながら, 三刺激値は元々分光反射率を等色関数で重み付けして積分した結果であり, 比率を計算することにより等色関数の重みは打ち消しあってしまう. そのため, 得られた反射比率は等色関数が重み付けする波長範囲での平均値を求めていることと同意であり, 分光反射率が本来持っている色彩情報が欠落する. その結果, 投影すべき画像の計算過程において, 彩度が高いサンプルに対する投影画像の算出結果に誤差が生じる.

3. 分光推定手法を用いた投影画像の計算方法

2.1節で述べたように, プロジェクタ投影画像の計算は分光反射率を用いて正確に実施される. 一方, 2.2節で述べたように, 三刺激値の反射比率を用いた方法は, 計測や計算のコストを低減することが可能であるが, 投影画像の算出に誤差が生じる. そこで, 本論文では RGB カメラなど低次元計測値からの分光反射率推定法を用いることで, 投影画像の算出の正確さとシステムのコスト低減を両立させる手法を提案する. 低次元計測値からの分光推定法の基本式は(15)式によって表すことができる.

$$\begin{bmatrix} \hat{r}_{380} \\ \hat{r}_{390} \\ \vdots \\ \hat{r}_{780} \end{bmatrix} = G \mathbf{v} = \begin{bmatrix} D_{1,380} & D_{2,380} & \cdots & D_{n,380} \\ D_{1,390} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \\ D_{1,780} & \cdots & & D_{n,780} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで \hat{r} は推定された分光反射率, v_n は n 次元バンド出力, $D_{n,\lambda}$ は変換行列であるマトリックス G の要素を示している. 変換行列マトリックス G は(16)式に示すように, 実測した分光反射率 \mathbf{r} と推定した分光反射率 $\hat{\mathbf{r}}$ の誤差が最小になるように求められる.

$$e = \langle \|\mathbf{r} - \hat{\mathbf{r}}\|^2 \rangle \rightarrow \min \quad (16)$$

変換行列を求める手法はさまざまな手法が提案されているが, 我々は Wiener 推定法を適用した^{14,15)}. これはインキ供給量を変化させた複数の印刷サンプルの分光反射率と, そのサンプルに対応した低次元計測値の関係を最小二乗誤差計算で対応付ける方法であり, 変換行列は(17), (18)式で求められる.

$$G = R_{rv} R_{vv}^{-1} \quad (17)$$

$$R_{rv} = \langle \mathbf{r} \mathbf{v}' \rangle, \quad R_{vv} = \langle \mathbf{v} \mathbf{v}' \rangle \quad (18)$$

ここで, $\langle \rangle$ は分光反射率サンプルに対するアンサンプル平均を示す. 求めた変換行列を用いることにより, RGB カメラなどの低次元バンドで測定した信号 \mathbf{v} から印刷物の推定分光反射率 $\hat{\mathbf{r}}$ が計算される. 求めた分光反射率を(3), (4)式に適用することにより, 従来の分光反射率を用いる方法と同様の計算式で, 投影画像を正確に求めることができる.

4. 分光推定法における低次元計測の特性決定

4.1 最適化計算フロー構築と次元数の決定

分光推定法を用いて精度良くプロジェクタ投影画像を計算するためには、(16)式を満足するための低次元計測数とそのフィルタ特性を決定しなければならない。これら低次元計測数とそのフィルタ特性は目的とするシステムにより異なる。通常、分光反射率計で得られるような絶対的な分光反射率の推定には、可視光波長領域で4~5バンドの計測次元数が必要となるが、我々は投影による色変化の予測に十分な分光反射率の推定を目的として、より少ない計測次元数の選択やフィルタ特性の最適化を実施した。

図5にプロジェクタ投影による色変化予測の計算過程を示す。目標の印刷物からの反射輝度は、初期のプロジェクタの輝度と目

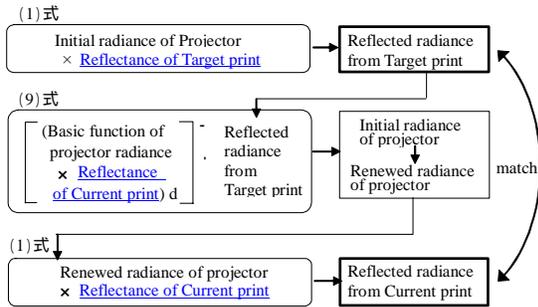


図5 プロジェクタ投影による色変化予測の計算過程

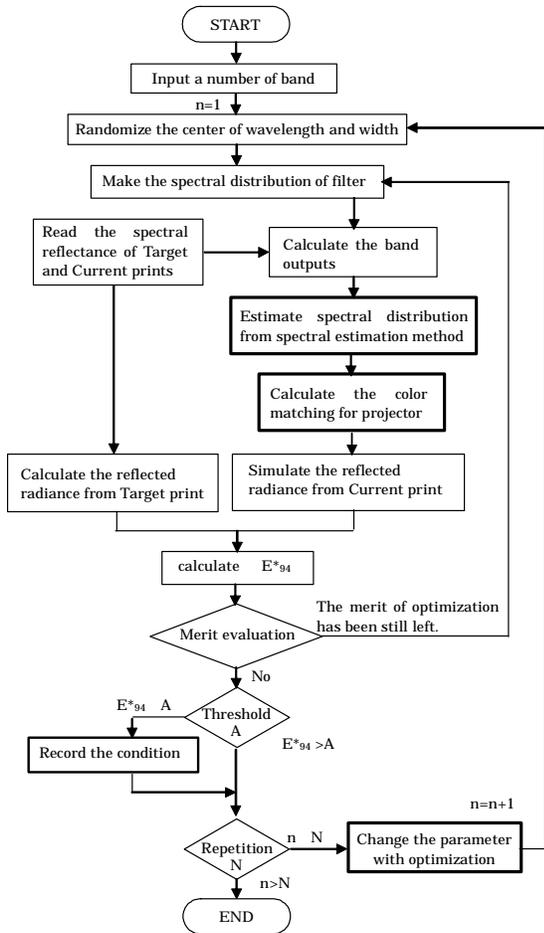


図6 投影画像の精度を評価値とした最適化計算フロー

標印刷物の分光反射率で計算できる。次に算出した目標印刷物からの反射輝度と現状印刷物の分光反射率を用いることで、現状印刷物から反射される輝度が推定される。このとき、推定された輝度が目標の印刷物からの反射輝度と等しくなるように、更新すべきプロジェクタの投影輝度を決定する。最終的に、更新されたプロジェクタの投影輝度と現状印刷物の分光反射率を用いて、現状印刷物から反射される輝度が推定できる。この反射輝度と目標印刷物からの反射輝度との一致精度を評価することにより、色変化予測の計算精度を見積もることが可能である。この計算過程において、目標印刷物及び現状印刷物の分光反射率の項に分光推定法で求めた分光反射率が適用される。

分光推定法の低次元計測数とそのフィルタ特性の決定は、前述のプロジェクタ投影による色変化予測を含めて実施される。そこで両者特性を決定するために、図6に示す最適化計算シミュレーションを構築した。最適化計算において、低次元計測数は2,3,4,5の4段階に変化させ、それぞれの計測数での最適フィルタ分布を算出する。フィルタ分布は干渉フィルタ等で実現可能なガウシアン分布に従うと仮定し、各フィルタの中心周波数と半値幅を決定すべき値として最適化を実施する。

まず、任意の低次元計測数が設定された後、各フィルタの中心周波数と半値幅に乱数発生させた値を代入することでフィルタ分布が決定される。決定されたフィルタ分布を使用して、印刷物の分光反射率とプロジェクタの分光放射輝度分布を畳み込み積分することにより、各フィルタ分布での出力が計算される。ここで、最適フィルタの選択は使用する印刷物の色範囲全てに対して行われなければならない。そこで、計算に用いる分光反射率は標準的なプロセスインキで印刷されたサンプルの計測値を用いる。インキの組み合わせはC, M, Y, K, CM, CY, MY, CMYで、それぞれ20,40,60,80,100%で網点面積率が変化したサンプルを用意した、それぞれの分光反射率は、分光測色計(Spectro-Lino, GretagMachbeth)で予め計測されている。

次に、分光推定法を用いて、各フィルタ分布による出力から分光反射率が推定される。ここで、分光反射率を推定するためには変換行列Gを求める必要がある。変換行列は(18)、(19)式から決定されるが、計算で使用するサンプルはプロジェクタ投影の色変化予測で用いたサンプルと同様のインキで印刷された81色のサンプルを用いた。この81色サンプルは1次色C,M,Y,K,2次色CM,CY,MY,及び3次色CMYで構成されており、それぞれ10%ピッチで網点面積率が変化した印刷物と白紙である。

最終的に、推定された分光反射率を用いて、プロジェクタ投影画像を計算する。目標となる印刷物と現状印刷物の組み合わせは、表1に示す32通りの組み合わせとした。図5に示した投影画像の計算に代え、目標となる印刷物からの反射輝度と、算出したプロジェクタ画像と重ね合わせた現状印刷物からの反射輝度が求まる。32通りの組み合わせに対して、それぞれの色の違いを色差 E^*_{94} で評価して、32組中の最大色差を評価値とする^[19]。評価値において、最適化計算における収束メリットがまだ存在している場合には、各フィルタ分布の中心周波数や半値幅を変化させて、色差が最小になるまで繰り返し計算を行う。評価値が一定しきい値以下に収束した場合のみ、各フィルタ分布が記録される。更に最適化計算の収束はランダムに発生させた初期値に依存する場合があるため、最適化計算は1つの低次元計測数に対して1000回繰り返し行われる。

ここで、図6に示した低次元計測数とフィルタ分布の最適化計算は、2つの箇所でも色差評価が可能である。1つは分光推定法で算出された分光反射率であり、実測した反射率と推定した反射率の違いが色差として評価できる。もう1つはプロジェクタ投影を行った最終結果であり、目標となる印刷物からの反射輝度と、プロジェクタ画像を重ね合わせた現状印刷物からの反射輝度の色差が計算できる。これら2つの色差評価について、低次元計測数を2,3,4,5と変化して得た結果を図7に示す。

図7はそれぞれ32色組み合わせの平均と最大値を示している。ここで、本研究では色一致の許容値を $E^*_{94}=2$ とした。この許容値は人間が色の違いを認識しない限界値である⁽²⁰⁾。図7の結果から、絶対的な分光反射率一致が色差 E^*_{94} 2 を満足するためには4~5次元数の計測が必要であることがわかる。一方、プロジェクト投影画像の計算も含めた場合、3次元数の計測で目標印刷物からの反射輝度と現状印刷物からの反射輝度が色差 E^*_{94} 2 で一致できることが明らかである。3次元数の計測で推定された具体的な分光反射率を図8に示すが、この2つのグラフは投影画像重ね合わせ精度が最も良い場合と悪い場合の例である。このグラフから明らかのように、中間過程である絶対的な分光反射率の一致は必ずしも完全ではない。しかしながら、分光反射率が持つ低次元の主成分情報だけでプロジェクトの投影画像が正確に計算できる。

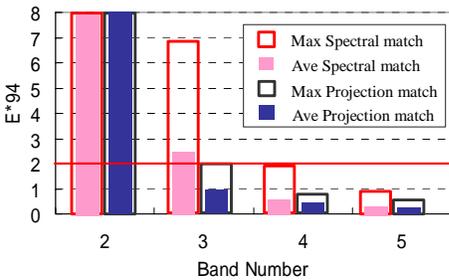


図7 分光反射率推定と投影画像重ね合わせ精度の結果

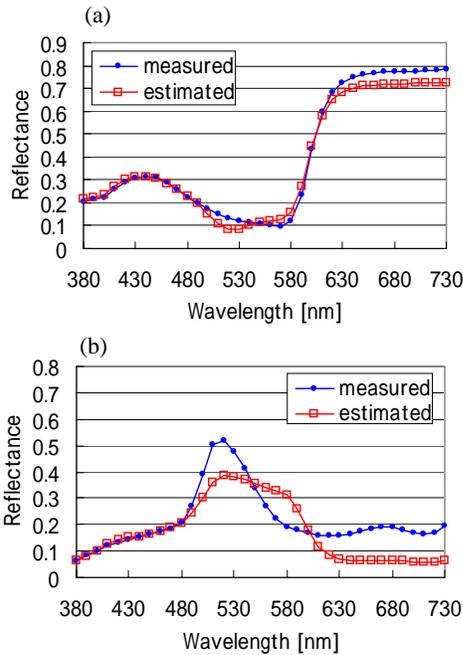


図8 分光推定法による分光反射率の推定結果(3バンド)
(a) 推定誤差最小の結果
(b) 推定誤差最大の結果

4.2 低次元計測のフィルタ分布の決定

図9はプロジェクト投影画像の算出に最適なものとして決定されたフィルタ分布を示す。本来、分光推定法を適用する場合、このフィルタ分布を持つカメラを特別に製作する必要がある。ところが

今回決定したフィルタ分布は xyz 等色関数と非常に似通っていることが図9からわかる。この xyz 等色関数の分布を持つ三刺激値色彩計は市販品として販売されており、このフィルタを代用することで、特別に製作するコストを低減することができる。そこで、xyz 等色関数をフィルタ分布とした計測値を用いて、分光推定によるプロジェクト投影画像の算出精度を評価した。

4.1 節で構築したプロジェクト投影画像の算出シミュレーションにおいて、分光推定を行うフィルタ分布を最適化したフィルタ、xyz 等色関数フィルタの両者を用いて投影画像の色差評価を行った。前節と同様に、32組の色組み合わせに対する発生色差の結果を図10に示す。ここで比較のために、2.2 節で説明した従来法である XYZ 三刺激値の反射比率を用いる方法での評価結果も図10のグラフ上に追記している。最適化で求めたフィルタと xyz 等色関数フィルタの比較において、一部の色で xyz 等色関数フィルタを使用した場合に誤差が増加するが、32組の平均値としては最適化で求めたフィルタとほぼ変わらない性能であった。また、両者とも従来の反射比率法に対しては、プロジェクト投影画像の算出精度が大幅に改善されている。よって、xyz 等色関数をフィルタ分布とした計測方法は、最適選択で求めたフィルタを用いる方法より、精度とコスト面で実用性を満足したシステムが実現できる。

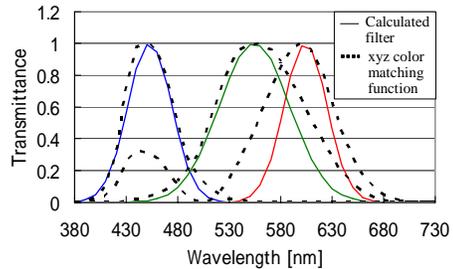


図9 最適化結果のフィルタ分布(3バンド)

表1 投影画像の算出評価に用いたサンプルの組合せ

No.	Target	Current									
1	C100	C70	9	Y100	Y70	17	CM100	CM70	25	MY100	MY70
2	C70	C40	10	Y70	Y40	18	CM70	CM40	26	MY70	MY40
3	C40	C20	11	Y40	Y20	19	CM40	CM20	27	MY40	MY20
4	C20	Paper	12	Y20	Paper	20	CM20	Paper	28	MY20	Paper
5	M100	M70	13	K100	K70	21	CY100	CY70	29	CMY100	CMY70
6	M70	M40	14	K70	K40	22	CY70	CY40	30	CMY70	CMY40
7	M40	M20	15	K40	K20	23	CY40	CY20	31	CMY40	CMY20
8	M20	Paper	16	K20	Paper	24	CY20	Paper	32	CMY20	Paper

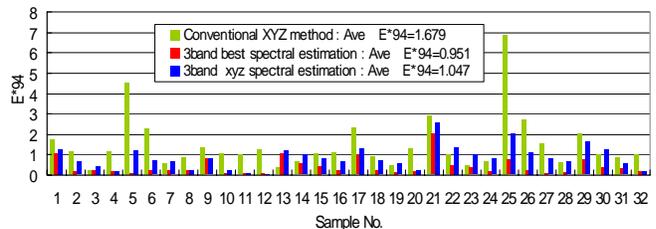


図10 計算による投影画像の算出精度の比較

5. プロジェクト投影画像による色合わせ実験

本節では前節までに検討した分光推定によるプロジェクト投影画像生成を実際のシステムに適用して、その再現精度を実験的

を確認した．比較として分光反射率を直接用いる手法，三刺激値の反射比率を用いる手法もそれぞれ実験を行った．実験システムの構成を図 11 に示す．投影装置としては色再現域が広い LCD プ

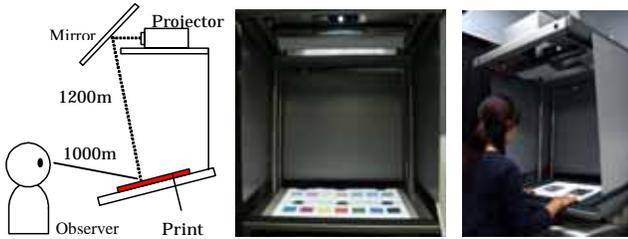


図 11 実験システムの構成

ロジェクタ (EMP-TW200H, EPSON) を観察デスクの上側に設置し，投影光はミラーを介して観察面に導かれる．観察デスク面には目標となる印刷物と現状の印刷物が設置されており，それぞれの位置はプロジェクタ投影画像と正確に対応付けられている．目標となる印刷物は C, M, Y, CM, CY, MY, CMY それぞれ 100% 網点面積率の 7 色を用意した．現状の印刷物は同じ色の組み合わせで，70% 網点面積率のサンプルを用いた．両印刷物は同じ色同士，上下に配置されており，色の違いが容易に比較できる．

初期状態において，両方の印刷物には白色画像 ($R, G, B=255, 255, 255$) が投影されている．各サンプルの色は分光反射率計で予め計測されており，分光手法の場合は分光反射率をそのまま用いて現状印刷物へ投影するプロジェクタ画像を計算する．三刺激値比率の場合は計測した分光反射率を CIE 等色関数で XYZ に積分換算して，求めた反射比率からプロジェクタ投影画像を求める．分光推定手法の場合は 4 節の結果に基づき，xyz 等色関数で積分した値を計測出力として分光反射率を推定して，プロジェクタ投影画像を計算した．各手法でのプロジェクタ投影画像の算出結果を元に，現状印刷物に照射している部分の投影画像のみを変化させ，目標印刷物との色差で評価した．再現結果を図 12，色差評価結果を図 13 に示す．

結果を 7 色の色差平均で評価した場合，分光手法は平均色差 $E'_{94}=1.25$ ，三刺激値比率手法は平均色差 $E'_{94}=1.88$ ，分光推定法は平均色差 $E'_{94}=1.27$ であった．プロジェクタ自体の再現精度が色差 $E'_{94}=1$ 程度存在するため，図 10 のシミュレーション

結果よりマッチング精度は劣化する．しかしながら，通常，人間が色違いを認識する色差は $E'_{94}=2$ 程度であることを考慮すると，分光的手法及び分光推定法は実用的に十分な精度を持つ²⁰⁾．一方，三刺激値の比率を用いた手法はプロジェクタ投影画像の計算過程での誤差が大きく発生し，最大で $E'_{94}=3$ を超える結果となった．

6. 結論

正確な色再現を行う上で色調整作業は煩雑かつ手間のかかる作業であるため，我々はこの調整作業を軽減すべく，インキ量の増減に対する印刷物の色変化を投影像として仮想的に表現可能なカラーシミュレータを構築してきた．しかしながらこのシミュレータにおいて，正確な投影画像の算出に分光反射率情報が必要であり，計測コストが高くなることが課題であった．そこで本論文では低次元の色彩計測値から推定された分光反射率を用いることにより，簡易な計測で高精度なプロジェクタの色制御が実現できる手法を提案した．

実際に，計測次元数やフィルタ分布は，プロジェクタ投影画像の算出誤差を最小にする最適化計算によって求められた．その結果，3 次元数の計測で，プロジェクタ投影画像を正確に計算することが可能であることを明らかにした．また，フィルタ特性は最適選択されたフィルタ分布に近い三刺激値色彩計のフィルタで $E'_{94} 2$ を満足することを確認した．

最終的に，インキ供給量の異なる目標印刷物と現状印刷物を用意し，計算で求めた投影画像を現状印刷物の上に重ね合わせ，両者の色一致精度を確認した．その結果，分光的手法では 7 色の平均色差が $E'_{94}=1.25$ ，最大色差が $E'_{94}=2.1$ ，三刺激値の比率を用いた手法では平均色差が $E'_{94}=2.5$ ，最大色差が $E'_{94}=3.4$ ，本提案である分光推定法では平均色差が $E'_{94}=1.27$ ，最大色差が $E'_{94}=2.1$ であった．人間の色分別能力が色差 $E'_{94}=2$ 程度であること考えると，分光推定法は分光的手法と同様に，実用的に十分な精度を持つ．計測器の取り扱い容易さ，計測の高速性から鑑みて，分光推定を用いたディスプレイシステムが実用的にも最適であり，簡易な計測で正確な仮想色調整支援を行うことができる．

謝辞

本研究を含めたプロジェクタベースのディスプレイシステム研究は総務省の戦略的情報通信研究開発の支援を受けて実施した．

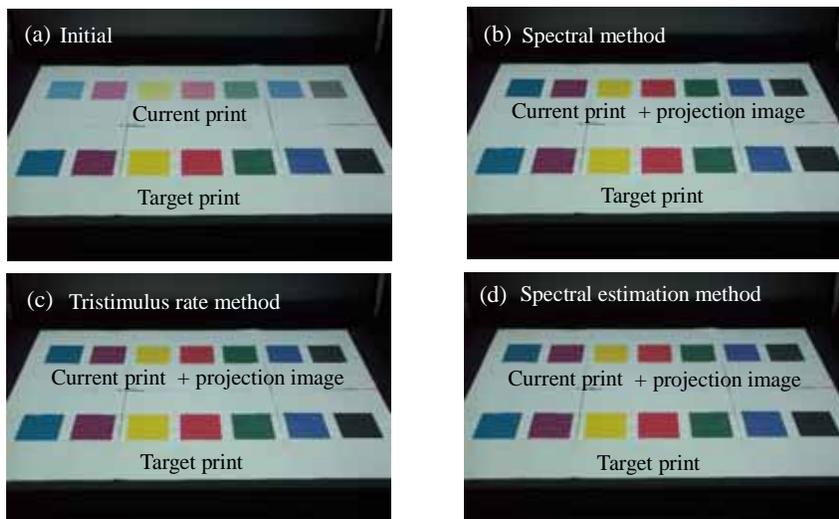


図 12 各手法を用いた投影画像によるカラーマッチング結果

- (a) 分光反射率を用いた方法
- (b) 三刺激値の反射比率を用いた手法
- (c) 分光推定法を用いた方法

【参考文献】

- 1) 小寺, “色空間の発展”, 日本画像学会誌, Vol.43, No.2, pp.73-81, (2004).
- 2) M.J Vrhel, H.J.Trussell, “Color Device Calibration: A Mathematical Formulation”, Image Processing, IEEE Trans.,Vol. 8, Issue 12, pp.1796-1806, (1999).
- 3) 三宅, “デジタルアーカイブのための画像入力”, 画像電子学会誌, Vol.33, No.5, PP.691-695, (2004).
- 4) 山本, 中村, 金子, 尾崎, 服部, “オフセット印刷機用色調管理システムの開発”, 三菱重工技報, Vol.33, No.5, (1996).
- 5) 赤塚, 山本, 青木, 山下, 田阪, “印刷機械を支える先進技術”, 三菱重工技報, Vol.40, No.6, (2003).
- 6) N. Usui, “Print Simulator (the 1st report)”, Proc. IS&T s 2000 PICS Conference, pp. 177-182, (2000).
- 7) P. Emmel, R. D. Hersch, “Modeling Ink Spreading for Color Prediction”, Journal of Imaging Science and Technology, 46, 3, pp.237-246, (2002).
- 8) 山口, 作田, “印刷産業用液晶カラーモニタ画質 -ソフトブルーにおけるカラーマネージメント液晶モニタの性能と検証-”, Proc. of JMQA2006, pp.16-19, (2006).
- 9) 植田, 山本, 中口, 津村, 三宅, “画像コンテンツを考慮した投影型プロジェクタの色再現”, 日本写真学会年次大会講演要旨, pp.28-29, (2004).
- 10) 山本, 鶴瀬, 津村, 中口, 三宅, “投影型高輝度プロジェクタによる質感表現技術”, カラーフォーラム JAPAN2004 論文集, pp.79-82 (2004).
- 11) 山本, 鶴瀬, 植田, 津村, 中口, 三宅, “DLP プロジェクタ照明下における物体の質感表現”, 日本写真学会誌, 68 巻 6 号, pp.510-517, (2005).
- 12) S.Yamamoto, M.Tsuruse, K.Takase, N.Tsumura, T.Nakaguchi, Y.Miyake, “Real-Time Control of Appearance on the Object by using High Luminance PC Projector and Graphics Hardware”, The 13th Color Imaging Conference, (2005).
- 13) S.Yamamoto, K.Ueda, N.Tsumura, T.Nakaguchi, Y. Miyake, “Projector-based color simulator for print industry”, IEICE trans., Vol.E89-A, No.11, pp.2962-2969, (2006).
- 14) 三宅, “分光画像処理入門”, 東京大学出版会, (2006).
- 15) 津村, 羽石, 三宅, “重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定”, 光学 第27巻 7号 pp.384-391 (1998).
- 16) H. Haneishi, T. Hasegawa, A. Hosoi, Y. Yokoyama, N. Tsumura, Y. Miyake, “System design for accurately estimating the spectral reflectance of art paintings”, Applied Optics, 39, 35, pp.6621-6632, (2000).
- 17) S.Yamamoto, H.Nagai, N.Tsumura, T. Nakaguchi, Y.Miyake, “Development of Multispectral Scanner Used LEDs Array for Digital Color Proof,” Proceedings of SPIE, Vol.5668, pp.247-254, (2005).
- 18) N. Tamura, T. Ishii, N. Tsumura, Y. Yoshida, Y. Yamamoto, Yoichi Miyake, “Evaluation of Image Quality on Reflective-type LCD: Calibration Based on the PCA”, IS&T PICS Conference, pp.368-371, (2001).
- 19) McDonald, R and Smith KJ, “CIE94 a new colour-difference formula”, J. Soc. Dyers Col.111, pp.376-379, (1995).
- 20) ISO/TC130 Activities and ISO Standards, “The Standardization of Graphic Technology, Japan Printing Machinery Association”, (May, 2005).
<http://www.color.org/JapanColor2005English.pdf>

【著者紹介】



山本昇志 (非会員)

1991年, 静岡大学大学院光電機械工学専攻修士課程修了。現在, 千葉大学大学院自然科学研究科博士後期課程在籍。計測画像工学, 色再現工学, 質感再現工学の研究に従事。IS&T, 日本写真学会, 画像電子学会会員

植田久美子 (非会員)



2004年, 千葉大学大学院自然科学研究科修士課程修了。現在, ㈱凸版印刷IT開発本部に勤務。セキュリティ・システム開発に従事。



津村徳道 (正員)

1995年, 大阪大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。現在, 千葉大学工学部情報画像工学科助教授。医用画像工学, 計測画像工学, 色再現工学, 質感再現工学の研究に従事。IS&T, 日本光学会, 日本写真学会, 日本医用画像光学会, 電子情報通信学会, 各会員。



中口俊哉 (非会員)

2003年, 上智大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。現在, 千葉大学工学部情報画像工学科助手。2001-2003年, 日本学術振興会特別研究員。画像解析, 画質評価, 医用画像処理, 組合せ最適化に関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, IS&T, 日本写真学会, 各会員。



三宅洋一 (正員)

1968年, 千葉大学大学院修士課程修了。京都工芸繊維大学助手, 助教授, 千葉大学工学部助教授を経て, 1989年, 同教授。1978-1979年スイス連邦工科大学研究員。1997年, ロチェスター大学客員教授。2003年よりフロンティアメディカル工学研究開発センター長。医用画像工学, 画像評価, 色再現工学の研究に従事。IS&T フェロー・名誉会員, 日本光学会, 電子情報通信学会, 各会員。工学博士。