

メタメリズムアート制作のための油絵の具の混合比率推定

宮崎 大輔[†] 高橋可菜実^{†,††} 馬場 雅志[†] 青木 広宙^{†,†††}
 古川 亮[†] 青山 正人[†] 日浦 慎作[†]

Mixing ratio estimation of oil paints for metamerism art work

Daisuke MIYAZAKI[†], Kanami TAKAHASHI^{†,††}, Masashi BABA[†], Hirooki AOKI^{†,†††}, Ryo FURUKAWA[†], Masahito AOYAMA[†], and Shinsaku HIURA[†]

あらまし メタメリズムとは、ある光源下で異なる色として知覚される2つの物体が別の光源下で同じ色として知覚される現象である。本論文では、メタメリズムを利用したトリックアートを実現する技術を提案する。本研究は、特定の光源下で等色される油絵の具の混合比率を自動的に推定することを目的とする。2種類の光源下における3種類の混合塗料で生起するメタメリズムを扱う。また、混合した油絵の具の反射は現実の反射に忠実な数式モデルで表現する。

キーワード 条件等色, コンピュータ支援アート, トリックアート, マルチスペクトル, 油絵の具, 反射モデル

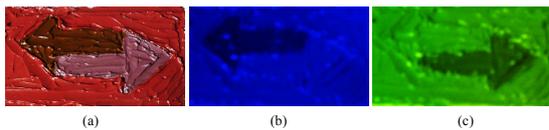


図1 (a) 計算によって得られた3種類の混合塗料, (b) 青い光源下の塗料, (c) 黄色い光源下の塗料

Fig. 1 (a) Three kinds of mixed paints computed by the proposed method, (b) those illuminated by blue light, (c) those illuminated by yellow light.

1. はじめに

ある光のもとで異なる色として認識される二つの物体が別の光のもとで同じ色として認識される現象は条件等色(メタメリズム)と呼ばれる。本研究ではメタメリズムを利用したトリックアートを実現するための技術を提案する。具体的には特定の光源下でメタメリズムを発生させるための絵の具の調合割合を自動算出することを目的とする。

衣服や印刷物の色が蛍光灯下と太陽下で変化するメ

タメリズムはアパレル業界, 印刷業界, 広告産業, デザイナーや写真家などには悩みの種として知られている。これまでそのように問題視されてきたメタメリズムを本研究では有効利用する。メタメリズムを確認する上では市販のものとしてはメタメリズム色票(演色性検査カード)があるが, メタメリズムをユーザの望む光源下で生起させる塗料を一般人が手に入れることは難しい。絵の具の調合割合を自動的に計算するソフトウェアを開発することで, アパレル業界や広告産業などの一般人(分光スペクトルなど光学の専門知識を有しない人々)でもメタメリズム作品を制作できるようになる。提案手法は多数の油絵の具のマルチスペクトルデータベースを用いて, トリックアート作品を作るための油絵の具の混合比率を計算する。本論文では3種類の混合塗料を作成し(図1(a)), ある光源下ではあるペアが等色され(図1(b)), 別の光源下で別のペアが等色されるようにする(図1(c))。

2. 関連研究

デジタル技術を使って芸術作品を作るメディアアート作品はここ数十年で飛躍的に増加した。特に, プロジェクタを利用した大型建築物へのプロジェクションマッピングはここ数年で大幅に着目を浴びている。しかし, そのようなメディアアート作品が世の中にあふれてくると, 見慣れてしまうという問題がある。一方,

[†] 広島市立大学情報科学研究科, 広島県
 Graduate School of Information Science, Hiroshima City University, Ozukahigashi 3-4-1, Asaminami-ku, Hiroshima city, 731-3194 Japan

^{††} 現在, 株式会社 MRP

^{†††} 現在, 千歳科学技術大学

アナログなトリックアートは人々を驚かせることが出来るものの、既存のアート技術では見慣れてしまっている。そこで、コンピュータの支援によるアナログのトリックアートを作る研究が行われるようになった。これにより、今までは人の頭脳では作るのが難しかった新たなアート作品を作ることが出来るようになった。Hersch と Chosson [1] はモアレを利用して意図した絵柄が表示されるような技術を開発した。Mitra と Pauly [2] は三方向から光を照射したときに意図した影絵が出来るような立体物を作る技術を開発した。Yue ら [3] は集光により意図した図形が表現出来るような透明物体をデザインする技術を開発した。Papaz ら [4] は下地の絵に透明物体を載せたときに意図した図形が表現出来るように透明物体をデザインする技術を開発した。Nonoyama ら [5] は多波長プロジェクタを利用してカラーカメラとモノクロカメラで異なる映像が撮影される技術を開発した。Kawai [6] は平面の板にエンボス加工をすることで照射する光源方向を変えると陰影が変わることで立体感を表現する技術を開発した。Amano [7] は平面にプロジェクタを照射して陰影が変化するように見せることで立体感を表現する技術を開発した。これらの研究分野を本論文ではコンピュータ支援アートイリュージョンまたはコンピューショナルアートと呼ぶことにする。本研究では Valluzzi [8] が制作したようなメタメリズムアートを扱う。Valluzzi [8] は意図した図形を表現することを目的とはしていなかったが、本研究では意図した図形を表現できるように、メタメリズムを生起させる絵の具の調合を目的とする。

メタメリズムを扱った研究は古くから存在するが、メタメリズムをアート目的に利用できるように工夫された研究は少ない。Bala ら [9] はメタメリズムを利用して透かしを作る研究を行った。CMYK プリントでは黒色の印刷を K インクで表現することも出来るし、CMY インクを使うことも出来る。そこで、黒色を表現するのに K インクを使った物体色と CMY インクを使った物体色を計算した。それらは自然光のもとでは同じ色として観測されるが、ある特定の波長の LED を照射することで違う色として観測される。LED については、二種類それぞれのスペクトル分布を見比べて最も差が大きい波長の LED を用意している。本研究では、Bala ら [9] の研究とは逆に、ユーザが指定した光源において最もメタメリズムを生起する絵の具を調合する。また、4 色のインクだけでは表現できないス

ペクトル分布も表現できるようにするため、より多くの種類の絵の具の中から最適な絵の具の組み合わせを選択する。

Drew と Bala [10] は Bala ら [9] の手法で作った二種類の物体色を一般的なカメラで撮影し、その色を 3×3 行列で変換することでメタメリズムを強調する手法を提案した。また、31 色の仮想的な LED を用意し、個々の LED を点灯・消灯する全ての組み合わせに対して最もメタメリズムが生起する組み合わせを探索する手法を提案した。なお、用意した LED のスペクトル分布は現実には存在しない物であったため、Drew と Bala [10] の論文では実物体での実験は行われていない。本研究は人間の目で観測することを目的としているため、観測後の色を 3×3 行列で変換してメタメリズムを強調することは出来ない。そこで、本研究では絵の具を調合する際に、最もメタメリズムが強調される調合割合を計算する手法を提案した。また、現実に存在する光源のスペクトル分布を利用して実物を使った実験も示している。

Finlayson ら [12,13] はメタメリズムを生起させるスペクトル分布を計算する手法を提案した。与えられた RGB 値または XYZ 値と同じ色として観測される多数のスペクトル分布を推定する手法を提案した。同じ色と観測されるスペクトル分布は理論上は無限に存在するものの、マクベスカラーチェッカーのスペクトル分布の線形和で表現できるスペクトル分布に制限した。本研究では現実の絵の具で再現することを目的としているため、マクベスカラーチェッカーのスペクトル分布ではなく油絵の具のスペクトル分布をデータベースとして利用した。また、光とは異なり物体色はスペクトル分布の線形和ではなく減法混色で表現されるため、本研究では物体色に適した反射モデルで計算している。

メタメリズムを確認するための教材として利用するため、中川ら [14-16] は複数の LED を簡単に点灯・消灯できる実験装置を製作した。Kobayashi ら [17] は波長の異なる 2 種類の LED で培地を照射したときの画像を利用して培養コロニーを検出する手法を提案した。

Morimoto ら [18] はメタメリズムの重要性を説き、文化財のデジタルアーカイブには分光スペクトル分布の計測が欠かせないことを指摘した。Johnson と Fairchild [19] はメタメリズムの重要性を説き、CG の生成においても RGB ではなくスペクトル分布から色を計算する必要があることを示した。

Miyazaki ら [11] は、ユーザが指定した光源に対し

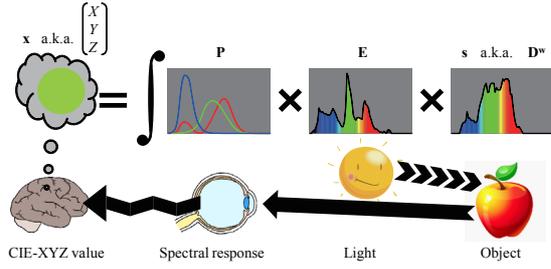


図2 可視光の知覚の仕組み
Fig. 2 Principle of perceiving visible light.

て最もメタメリズムを生起させる絵の具の割合を計算する手法を提案した。Miyazaki らは2種類の光源のもとで2種類の物体色の間で発生するメタメリズムを扱ったが、本研究では2種類の光源のもとで3種類の物体色の間で発生するメタメリズムを扱う。また、Miyazaki らは加法混色として物体色を表現したが、本研究では物体色の表現に適した反射モデルを使用する。

3. 反射光の知覚

人間の色の知覚を表現する代表的な方法に、CIE (国際照明委員会) が定義した XYZ 表色系がある。視細胞から得られた刺激をもとに脳が知覚する色を表現することができ、 X と Y と Z はそれぞれ赤と緑と青の色の認識と対応している。JIS Z8120 の定義によれば可視光の波長の下界は約 360 ~ 400nm で上界は約 760 ~ 830nm である。本研究では 400nm ~ 800nm の範囲の光を扱う。波長 λ における X , Y , Z の等色関数をそれぞれ $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ と表したとき、観測される X , Y , Z は以下のように表される (図2)。

$$X = \int_{400}^{800} E(\lambda)S(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

$$Y = \int_{400}^{800} E(\lambda)S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda, \quad (2)$$

$$Z = \int_{400}^{800} E(\lambda)S(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda. \quad (3)$$

ここで、 $E(\lambda)$ は光源のスペクトル分布を表し、 $S(\lambda)$ は物体表面のスペクトル反射率を表す。上の式はスペクトル分布を連続関数として表現しているが、現実に計測するスペクトル分布は離散的な値である。本研究では 400 ~ 800nm の光を N_b 個に等間隔で離散化した波長のデータを利用する。観測値を $\mathbf{x} = (X, Y, Z)^T$ と表すと、式 (1)、式 (2)、式 (3) は以下のように表される。

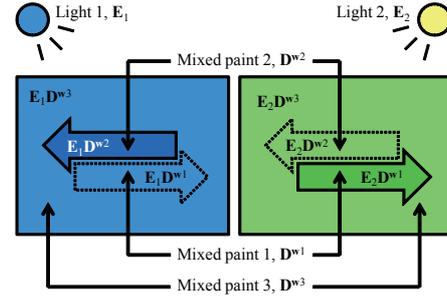


図3 2光源・3物体色におけるメタメリズム
Fig. 3 Metamerism of three sets of mixed paint illuminated by two different lights.

$$\mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{E}\mathbf{s}. \quad (4)$$

等色関数の離散データを $3 \times N_b$ 行列 \mathbf{P} で表し、その 1 ~ 3 行目にそれぞれ X と Y と Z の等色関数を配置する。

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 & \cdots & \bar{x}_{N_b} \\ \bar{y}_1 & \cdots & \bar{y}_{N_b} \\ \bar{z}_1 & \cdots & \bar{z}_{N_b} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

観測される物体のスペクトル分布を $N_b \times 1$ ベクトル \mathbf{s} で表す。照射する光源のスペクトル分布は $N_b \times N_b$ 対角行列 \mathbf{E} で表す。

$$\mathbf{E} = \text{diag}(E_1, E_2, \dots, E_{N_b}). \quad (6)$$

4. 提案手法

この節では、メタメリズムを生起させる油絵の具の割合を自動的に算出する手法について述べる。2種類の異なる光源を光源1と光源2のように表記する。また、複数の油絵の具を混合して作った3種類の異なる絵の具を混合塗料1と混合塗料2と混合塗料3のように表記する。光源1のもとでは混合塗料1と混合塗料3が同じ色と明るさで見えて混合塗料2と混合塗料3が異なる色と明るさに見え、光源2のもとでは混合塗料2と混合塗料3が同じ色と明るさで見えて混合塗料1と混合塗料3が異なる色と明るさに見えるような現象を再現することが本研究の目的である (図3)。

4.1 節では絵の具を調合した際の反射率の算出に利用する数学モデルを説明する。4.2 節では目的を達成するために最小化すべきコスト関数を説明する。

4.1 混色モデル

絵の具を混合するために必要な N_p 種類の絵の具の分光反射率のデータベースを $N_b \times N_p$ 行列 \mathbf{D} で表す。

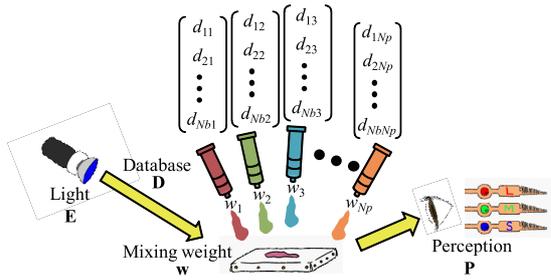


図4 油絵の具の混合
Fig.4 Mixing oil paints.

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1N_p} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2N_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N_b1} & d_{N_b2} & \cdots & d_{N_bN_p} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

この N_p 個の絵の具を N_p 個の混合割合で混ぜて混合塗料を作成する．混合比を $N_p \times 1$ ベクトル w で表す（図4）．

Miyazaki ら [11] は絵の具の混合を加法混色と仮定して混合塗料のスペクトル反射率を計算したが、実際の絵の具は減法混色である．そこで、絵の具に適した反射モデルを使用する必要がある．

水彩絵の具のモデルとしては Curtis ら [20] のモデルがある．水彩絵の具の場合、下地の色や水分の量により観測される色が調合したときとは異なる．そのため、本研究の目的には適さない．

油絵の具の反射率は Tominaga ら [21] がそのスペクトル反射率を実測している．Tominaga ら [21] は実際の油絵の具を計測した結果、油絵の具の拡散反射成分は塗布した厚さに依存せず、溶き油の量にも依存しないという結論を得た．多層の反射を表現する方法として Kubelka-Munk の理論があるが、塗布した厚さに依存しないという Tominaga らの知見に基づけば Kubelka-Munk のモデルは油絵の具には適していない．また、塗布した厚さに依存しないということは透過性が低く、ダイポールモデルなどの表面下散乱のモデルも油絵の具には適していない．すなわち、油絵の具は Lambert 反射モデルで表現できることを意味する．Tominaga ら [22] は油絵の具の拡散反射成分が Lambert 反射モデルで表現できることを利用して、照度差ステレオ法により絵画の表面法線を推定した．

Tominaga ら [21] の知見にもとづき、本研究でも油絵の具の拡散反射成分のモデルとして Lambert 反射モ

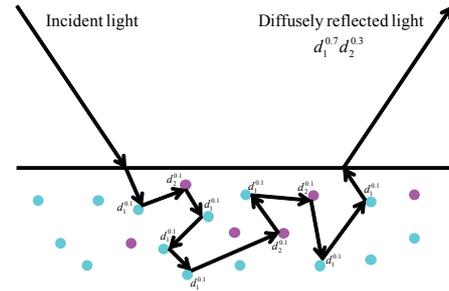


図5 混合塗料の拡散反射
Fig.5 Diffuse reflection of mixed paint.

デルを使用する．なお、本研究の目的には無関係のため、本研究では鏡面反射成分は扱わない．これは、本研究では絵画としての美しさを目的としておらず、どの方向から観測してもトリックアートとして成立していないといけなことを目的としており、鏡面反射の再現に注力する意義がないからである．

理想的な拡散反射を仮定しているため、物体内部に入射した光は十分な回数だけ内部粒子にランダムに反射して出射する．また、理想的な拡散反射なので粒子のサイズや密度の影響を受けない．このとき、混合塗料の分光反射率は以下の式で計算される．

$$s = D^w \equiv \begin{pmatrix} d_{11}^{w_1} \times d_{12}^{w_2} \times \cdots \times d_{1N_p}^{w_{N_p}} \\ d_{21}^{w_1} \times d_{22}^{w_2} \times \cdots \times d_{2N_p}^{w_{N_p}} \\ \vdots \\ d_{N_b1}^{w_1} \times d_{N_b2}^{w_2} \times \cdots \times d_{N_bN_p}^{w_{N_p}} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

このモデルは透過のモデルとして知られており、ND (neutral density) フィルタの透過光の輝度計算などに利用されている．物質に侵入した光が、内部の粒子に反射・吸収されて光が出射する点では透過光も拡散反射光も同様の現象である．

式 (8) のモデルを具体例をもとに説明する．反射率が $d_1(\lambda)$ の絵の具を 70% と、反射率が $d_2(\lambda)$ の絵の具を 30% 混ぜ合わせた場合、その混合塗料の反射率は図 5 から分かる通り $d_1(\lambda)^{7/10} d_2(\lambda)^{3/10}$ となる．理想的な拡散反射なので物体内部で十分な回数だけ内部粒子に反射するため、混合比率と同じ確率で粒子に反射するからである．

式 (8) の 1 行を取りだしたものを式 (9)–(10) に示す．

$$s_i = \exp(w_1 \log d_{i1} + w_2 \log d_{i2} + w_3 \log d_{i3} + \cdots + w_{N_p} \log d_{iN_p}) \quad (9)$$

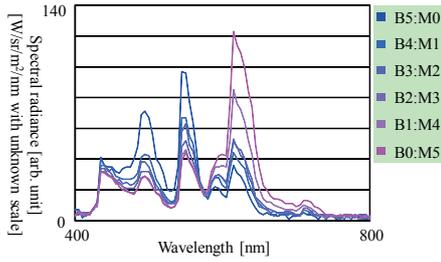


図 6 混合塗料の混合比の違いによるスペクトル分布の変化 (HORIZON BLUE と LIGHT MAGENTA)
Fig. 6 Difference of spectral distribution with different mixing ratio of two paints, HORIZON BLUE and LIGHT MAGENTA, illuminated by artificial sunlight.

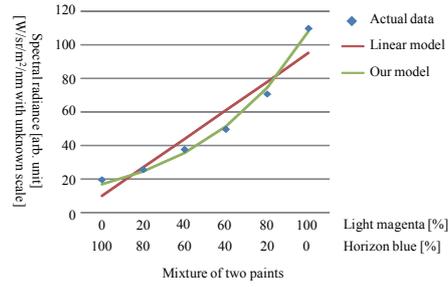


図 7 混合塗料の混合比の違いによる輝度の変化 ($\lambda = 625nm$)
Fig. 7 Intensity plot with different mixture ratio of two paints ($\lambda = 625nm$).

$$= d_{i1}^{w_1} d_{i2}^{w_2} d_{i3}^{w_3} \dots d_{iN_p}^{w_{N_p}}. \quad (10)$$

式 (9) と式 (10) は同じ式であるが, $\log 0$ を避けるため計算する際は式 (10) を使う. 式 (9) のように, このモデルは対数空間における線形方程式で表現されている. 我々はこの絵の具の調合モデルを指数混色モデル (exponential color mixing model) と呼んでいる. なお, このモデルは反射率のモデルであり, 陰影の表現には別途 Lambert 反射モデルで計算するが, 本研究の目的に陰影は不要であるため陰影の計算はおこなわない.

実際にこの反射モデルが妥当かどうか判断するために, 実際の油絵の具を混ぜ合わせてそのスペクトル分布を計測した. 図 6 はホリゾンブルー (B) とライトマゼンタ (M) を 5:0, 4:1, 3:2, 2:3, 1:4, 0:5 の 6 段階の割合で混ぜ合わせた顔料のスペクトルデータを取ったものである. 図 7 は図 6 のうち 625nm の波長のデータを抽出したものである. 図 7 の縦軸が撮影された輝度を示し, 横軸がホリゾンブルーとライトマゼンタの混合比を示している. 図 7 の直線は加法混色として計算した場合 [11–13] の輝度で, 図 7 の曲線は式 (8)–(10) のモデルで計算した場合である. 絵の具は減法混色であるため, 加法混色で想定していた輝度よりも暗くなる傾向がある. 式 (8)–(10) は絵の具の反射の表現に適しているため, 本研究ではこのモデルを利用する.

4.2 目的関数

本研究が目的とする見え (図 3) を実現するために最小化すべきコスト関数 $F(\cdot)$ は以下ようになる.

$$F(\mathbf{P}, \mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{D}, \mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3) = \|\mathbf{PE}_1\mathbf{D}^{\mathbf{w}_1} - \mathbf{PE}_1\mathbf{D}^{\mathbf{w}_3}\|^2 + \|\mathbf{PE}_2\mathbf{D}^{\mathbf{w}_2} - \mathbf{PE}_2\mathbf{D}^{\mathbf{w}_3}\|^2$$

$$- \|\mathbf{PE}_1\mathbf{D}^{\mathbf{w}_2} - \mathbf{PE}_1\mathbf{D}^{\mathbf{w}_3}\|^{0.5} - \|\mathbf{PE}_2\mathbf{D}^{\mathbf{w}_1} - \mathbf{PE}_2\mathbf{D}^{\mathbf{w}_3}\|^{0.5}, \quad (11)$$

$$\{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3\} = \underset{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3}{\operatorname{argmin}} F(\mathbf{P}, \mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{D}, \mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3), \quad (12)$$

$$\text{s.t. } \sum_{n=1}^{N_p} w_{1n} = 1, \sum_{n=1}^{N_p} w_{2n} = 1, \sum_{n=1}^{N_p} w_{3n} = 1, \\ 0 \leq w_{1n}, 0 \leq w_{2n}, 0 \leq w_{3n}, \\ \{n = 1, \dots, N_p\}.$$

式 (11) は $\mathbf{PED}^{\mathbf{w}}$ すなわち $\mathbf{x} = (X, Y, Z)^T$ の差を利用している. xy 色度の差ではなく XYZ 値の差を利用しているため, 色度だけでなく明度も考慮した式になっている. 本研究の目的はトリックアートであり, 例えば光源 1 のもとでは混合塗料 1 と混合塗料 3 が同じ色と明るさに見えるような条件などを課す必要がある. 色度が同じであっても明度が異なってしまうと, 明度差によって絵の模様の区別ができてしまい, 混合塗料の境界が知覚されないようなトリックアートを実現することができない. 同様の理由により, 算出した混合塗料には正規化などの条件は課さない. 色度に差があることがメタメリズムの本質であるが, トリックアートとして成立させるため, XYZ 値の差で評価するような目的関数にしている.

式 (12) は制約条件のついた複雑な関数であるため, 安定して解くために Nelder-Mead 滑降シプレックス法にもとづく焼きなまし法 [23] を利用した. Nelder-Mead 滑降シプレックス法はコスト関数を最小化するアルゴリズムの一種である. 式 (11) のコスト関数は二次形式ではなく, さらに負の値を取ることがあるため, Newton 法や Levenberg-Marquardt 法は適

用できない．そのため，最急降下法や共役勾配法や Nelder-Mead 滑降シプレックス法で解く必要がある．最急降下法や共役勾配法はコスト関数が C^1 級（一次微分可能）の滑らかなさを必要とするが，Nelder-Mead 滑降シプレックス法はコスト関数に微分可能性を要求しない．式 (11) は滑らかな関数ではあるが，データベースのスペクトル分布は滑らかな分布ではないため，念のため Nelder-Mead 滑降シプレックス法を利用した．Nelder-Mead 滑降シプレックス法は安定に解を求めるために好んで利用されることがあり (Takamatsu ら [24] および MATLAB (The MathWorks, Inc.) の `fminsearch` 関数)，本研究でもこのアルゴリズムを利用した．また，式 (11) は単峰性を持たず，局所解に陥りやすい問題である．そこで，局所解に陥るのを避けるため，焼きなまし法を利用した．マルチスペクトルデータを利用して何らかのパラメータを推定する問題では焼きなまし法が有効であることを指摘している論文があるため [25, 26]，本研究でもこのアルゴリズムを利用した．Nelder-Mead 滑降シプレックス法と焼きなまし法を組み合わせたアルゴリズムの実装は Press ら [23] のソースコードを利用した．

なお，式 (11) は加算と減算が用いられているが，乗算と除算を代わりに用いてもよい．事前の予備実験ではどちらの場合でも同様の結果が得られることが確認された．しかし，乗算と除算を用いた場合，分母が 0 に近くなると計算が不安定になる．予備実験ではその現象は確認できなかったし，分母に正の定数を加えることで安定化が出来るものの，念のため本研究では式 (11) を用いることにした．乗算と除算は対数をとると加算と減算になるため，コスト関数を乗算・除算で表すか加算・減算で表すかには本質的な違いはない．

式 (11) の第 1 項と第 2 項は 2 乗することで重みを大きくし，第 3 項と第 4 項は 0.5 乗することで重みを小さくした．人間の視覚はわずかな色の違いや明るさの違いでも強調して認識される．そのため，色と明るさが同じになるようにする第 1 項と第 2 項の重みを大きくし，色と明るさが異なるようにする第 3 項と第 4 項の重みは小さくした．同じ色にするスペクトル分布を見つけ出すことは難しく，異なる色になるスペクトル分布は無限に存在することも理由の一つである．事前の予備実験では，全ての項を 2 乗にした場合よりも式 (11) のほうが安定して解が求まることが経験的に確認された．



図 8 ハイパースペクトルカメラ HSC-1700
Fig. 8 Hyper-spectral camera HSC-1700 manufactured by Eba Japan Co., Ltd.

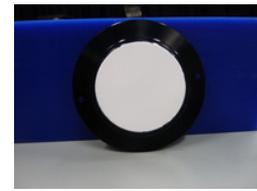


図 9 標準白色拡散板
Fig. 9 Diffuse white reflectance standard.

5. 実験結果

400nm ~ 800nm の分光スペクトルデータはハイパースペクトルカメラ HSC-1700 (図 8) で撮影した．400nm ~ 800nm を 5nm ごとに合計 81 バンド ($N_b = 81$) の輝度を計測することが出来る．29 種類 ($N_p = 29$) の異なる色の油絵の具 (図 10) を人工太陽灯で照射したスペクトル分布を測定した．なお，本研究では色度だけでなく明度も影響するため，29 種類の絵の具のデータベースの中には明度を調節するための白色と黒色の絵の具も含まれている．人工太陽灯 (図 11) はプロブライト V という名称で色温度は 6500K で演色性能は Ra98 である．これら 29 種類のスペクトル分布を，人工太陽灯で照射した白色完全拡散板 (図 9) のスペクトル分布で割った分光反射率をデータベース D として利用した．なお，図 12 に 29 種類の油絵の具全てのスペクトル分布を示しているが，この図で示したスペクトル分布は人工太陽灯で照射したスペクトル分布であり，これに白色拡散板のスペクトル分布で割った分光反射率をその後の処理に利用している．

初めに 29 色 ($N_p = 29$) で混合割合を計算し，その中で調合割合がしきい値より大きい 10 色 ($N_p = 10$) の絵の具で再度混合割合を計算した．これは現実的に絵の具を調合する際に混ぜる絵の具の数が多いと作業が繁雑になることが理由であり，提案アルゴリズムに起因する問題ではない．提案手法で計算された絵の具のスペクトル分布を図 13 に示す．図 13(a) が 3 種の混合塗料の分光反射率である (輝度のスペクトルではなく反射率である)．図 13(b) が 2 種の光源の分光放射輝度であり，短波長側にピークを持つ光を光源 1，長波長側にピークを持つ光を光源 2 と呼ぶものとする．図 13(d)(f) と図 13(e)(g) はそれぞれ光源 1 と光源 2 で



図 10 データベースとして利用した 29 種類の油絵の具

Fig. 10 29 types of oil paints included in the database.



図 11 人工太陽灯プロブライツ V

Fig. 11 Artificial sunlight Probright V manufactured by Nippon Paint Co., Ltd.

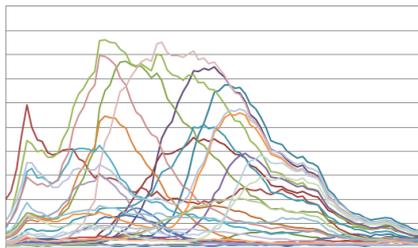


図 12 油絵の具データベースとして使用した 29 種類のスペクトル分布 (なお、この図は人工太陽灯で照射して得られた観測輝度のスペクトル分布であり、白色拡散板のスペクトル分布を除外して得られるスペクトル反射率ではない)

Fig. 12 Whole 29 spectral distributions of oil paintings used as database. These spectral distributions represent the observed intensity, and do not represent spectral reflectances; namely, the spectral distribution of those are not divided by the spectral distribution of the artificial sunlight.

3 種の混合塗料が照射されたときの反射光の分光放射輝度である。図 13(c) で示した等色関数にある通り長波長側の近赤外領域の光はヒトには知覚できないため光源 1 と光源 2 のピーク波長付近 (図 13(f)(g)) に着目すると、光源 1 では混合塗料 1 と混合塗料 3 の輝度が等しくなり、光源 2 では混合塗料 2 と混合塗料 3 が等しくなっていることが分かる。推定した調合割合をもとに実際に絵の具を調合して視覚的に確認し (図

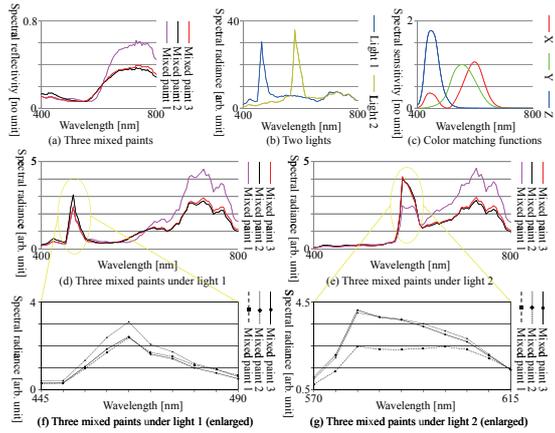


図 13 提案手法で求めた絵の具のスペクトル分布

Fig. 13 Spectral distribution of mixed paints computed by the proposed method.

表 1 使用した干渉フィルタ

Table 1 Interference filters used in experiments.

本論文での名称	波長	フィルタ種別
青	460 nm	バンドパス
緑	560 nm	バンドパス
赤	660 nm	バンドパス
水色	~550 nm	ショートパス
黄色	577 nm	バンドパス

1), 図 3 で想定した通りの結果が得られていることが分かった。光源 1 での輝度の明暗の順序が逆転しているように見える原因は分かっていないが、絵の具を電子天秤で計って手動で攪拌する際の誤差ではないかと推測している。なお、絵の具を実際に塗布する際は層状に塗るのではなく、完全に全ての色の絵の具が混ざるまでかき混ぜたのち、下地が見えないように塗布する。2 色の光源は図 14 と図 15 の干渉フィルタを利用した。人工太陽灯のサイズが大きいため、光源の前にフィルタを設置するのではなく、カメラの前にフィルタを設置して撮影した。干渉や分光や蛍光などのように波長の変化が起きるようなことのない理想的な Lambert 物体を対象としているため、光源の前にフィルタを設置した場合とカメラの前にフィルタを設置した場合で同じ光を観測することが可能である。

計算は絵の具の種類ごとに行い、画素単位で計算するわけではない。この場合、3 種類の混合塗料を計算させる。Intel Xeon CPU 2.50GHz をシングルコア動作させた場合の計算時間は、29 色のデータベースを利用した場合で 19.16 秒だった。

表 1 に示すフィルタを利用した実験を図 16 と図 17



図 14 青の狭帯域フィルタ
(ピーク=460nm,
バンド幅=10nm)
Fig. 14 Blue narrow band filter
(peak = 460 nm,
bandwidth = 10 nm).

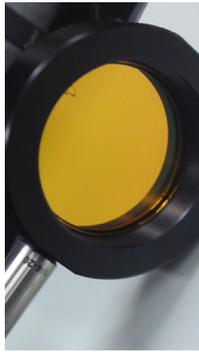


図 15 黄色の狭帯域フィルタ
(ピーク=577nm,
バンド幅=10nm)
Fig. 15 Yellow narrow band filter
(peak = 577 nm,
bandwidth = 10 nm).

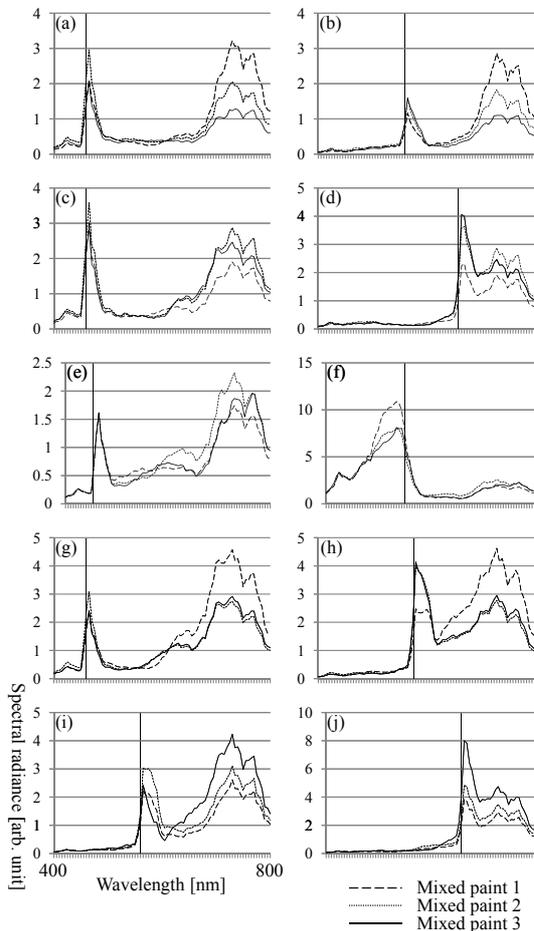


図 16 スペクトル分布の生成結果 1-5
Fig. 16 Generated results of spectral distributions 1-5.

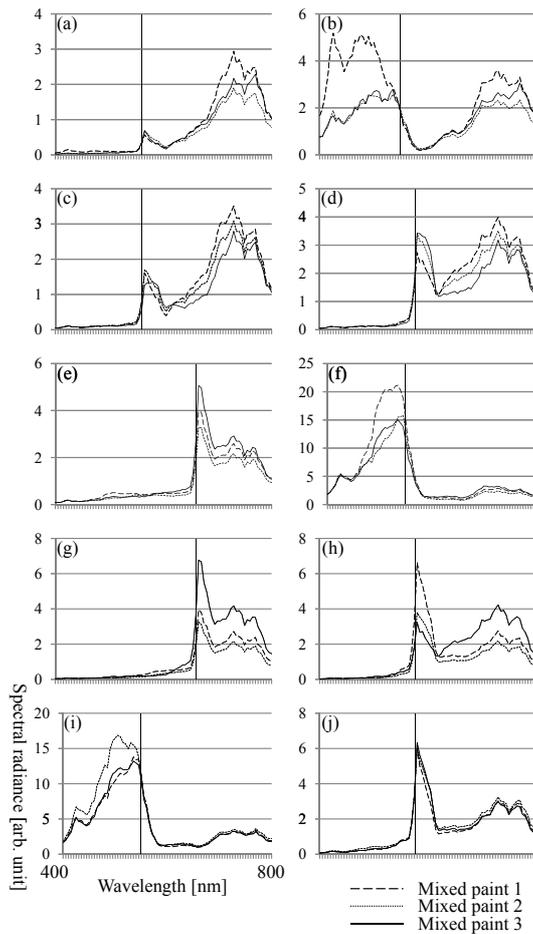


図 17 スペクトル分布の生成結果 6-10
Fig. 17 Generated results of spectral distributions 6-10.

および表 2 に示す．狭帯域フィルタ（バンドパスフィルタ）4 種と広帯域フィルタ（ショートパスフィルタ）1 種の全ての組み合わせで実験をおこなった．なお，図 16 と図 17 に含まれる 20 個の図に 1 つずつ描かれた縦の線は表 1 に記載された波長を表している．実験結果としては提案手法で計算されたスペクトル分布を示しており，実際の絵の具の調合はおこなっていない．そのため， $L^*a^*b^*$ 色空間から求めた色差ではなく，ディスプレイモニターで結果を確認する都合上，求めた CIE-XYZ 値から CIE-RGB 値に変換して結果を確認した．表 2 の上部 3 列目と下部 5 列目が小さく，上部 5 列目と下部 3 列目が大きければ目的に合致した結果が得られていることになる．緑と水色の組み合わせを除き，想定通りの結果が得られている．しかし，

表2 結果の RGB 差
Table 2 RGB difference of results.

図	光源 1	塗料 1 と 3	条件	塗料 2 と 3
16(a)	青	5.36	<	37.9
16(c)	青	5.11	<	22.7
16(e)	青	7.61	<	8.94
16(g)	青	1.31	<	16.6
16(i)	緑	10.9	<	48.2
17(a)	緑	21.0	<	3.26
17(c)	緑	5.93	<	13.8
17(e)	赤	8.42	<	8.65
17(g)	赤	11.2	<	19.7
17(i)	水色	0.863	<	54.4
図	光源 2	塗料 1 と 3	条件	塗料 2 と 3
16(b)	緑	22.9	>	20.2
16(d)	赤	19.3	>	9.82
16(f)	水色	62.0	>	1.45
16(h)	黄色	31.0	>	22.4
16(j)	赤	28.9	>	14.4
17(b)	水色	105	>	6.02
17(d)	黄色	21.2	>	4.94
17(f)	水色	69.7	>	0.22
17(h)	黄色	58.4	>	1.17
17(j)	黄色	8.32	>	8.18

全体的に水色のフィルタとの組み合わせで RGB の差が目的を十分満足するような結果になっていない。水色のフィルタは広帯域のスペクトル分布を持つ光であるため、限られたデータベースから目的とするスペクトル分布を持つ絵の具を調合することが狭帯域の光と比べて困難であったものと思われる。データベースの表現できるスペクトル分布の限界について、6. 節で考察する。

6. 考 察

本研究で扱う問題に解が存在するかどうかは油絵の具のデータベースに依存する。もしデータベースのスペクトル分布が 81 個の（対数空間における）正規直交基底であれば、どのようなスペクトル分布でも表現することが可能であるので、必ず解が存在する（ただし、2つの光源のスペクトル分布が同一であるような不良設定問題は除く）。しかし、現実の油絵の具のスペクトル分布が線形独立であるとは限らない。絵の具は顔料でできている。顔料には鉱物からできている無機顔料と植物からできている有機顔料の 2 種類がある。つまり、現実の絵の具に使われている顔料の種類は有限である。

そこで、取得した全 29 種類の絵の具のデータベースに主成分分析を行った。図 12 に取得したデータベースのスペクトル分布を示す。式 (9) に示すように、本来

表3 第 9 固有値までの累積寄与率
Table 3 Cumulative proportion of variance from the first eigenvalue to the ninth eigenvalue.

	固有値	寄与率 (%)	累積寄与率 (%)
1	46.17	57.00	57.00
2	22.36	27.60	84.60
3	8.34	10.30	94.90
4	2.43	3.00	97.89
5	0.71	0.87	98.77
6	0.53	0.66	99.43
7	0.24	0.29	99.72
8	0.13	0.15	99.87
9	0.04	0.05	99.92

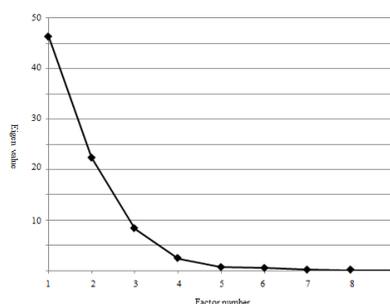


図 18 第 9 固有値までのスクリープロット
Fig. 18 Scree plot of the top nine PCs.

はスペクトル反射率の対数を主成分分析で解析すべきであるが、絵の具のデータベースのおおまかな性質を確認することが目的であるため計算の簡便さのため絵の具の取得データをそのまま主成分分析で処理をした。全ての絵の具のスペクトルを白色拡散板のスペクトルで除算しても全体の中での個々の性質の違いに変化がないということ、対数関数は単調増加関数であるためスペクトルの大小関係が変化しないこと、後述する既存研究で既知の事実を本実験で使用するデータで再確認することが目的であること、解析した結果は他の用途に使用することがないこと、などが理由である。

主成分分析の結果得られた上位 9 個の固有値、寄与率、累積寄与率を表 3 に示す。図 18 に上位 9 個の固有値のグラフを、図 19 に上位 4 つの固有ベクトルのグラフを示す。表 3 の通り、累積寄与率は第 4 固有値までで 95% を超え、第 6 固有値で 99%、第 9 固有値で 99.9% を超える。これはすなわち、29 種類の絵の具のデータベースであっても 4~9 種類と同程度の情報量しか持たないことを意味する。

Parkkinen ら [27] は様々な種類の物質のスペクトル分布を解析し、そのスペクトル分布のデータベース

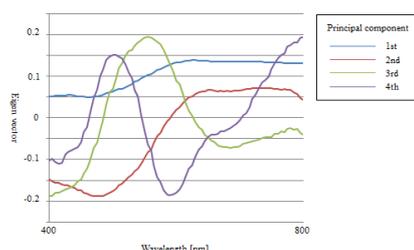


図 19 第 4 主成分までのグラフ
Fig. 19 PCs of the largest four eigenvalues.

は 8 個程度の基底関数で表現可能であることを示した。Judd ら [28], Cohen ら [29], Maloney [30], Vrhel ら [31] も同様の解析を行い、同様の結論を得ている。特に, Tominaga ら [32] は油絵の具のデータベースを用いて同様の結論を得ている。本実験により, 本研究で使用する油絵の具データベースでも同様の性質があることを確認できた。

本実験により, 現実の絵の具では任意のスペクトル分布を表現することは不可能であることが示された。提案手法は出来る限りメタメリズムが生起されるように焼きなまし法で計算されているが, メタメリズム生起の条件や光源色, 絵の具のデータベースによっては望む解が得られるとは限らない。一方, 4~9 種類程度の絵の具でもメタメリズムを生起させることが可能であることも分かる。実験においては, 全 29 種類の絵の具の割合割合をそのまま使うのではなく, その中から比率の大きい物を 10 個程度選び, その選んだ絵の具で再度割合割合を求めてから絵の具を割合している。

7. おわりに

本研究によって, 2 光源・3 物体色間でのメタメリズムの生起を確認することができた。今回はユーザが指定した光源のもとでメタメリズムを発生させることを目的とした。本研究および Miyazaki ら [11] の研究では絵の具の割合によりメタメリズムの強調を行い, Drew と Bala [10] は LED 光源の組み合わせによりメタメリズムの強調を行った。今後は絵の具の割合だけでなく最適な光源のスペクトル分布を自動的に計算することにより, 本研究や既存研究 [10,11] よりも強くメタメリズムを生起させることを検討している。その際の光源として, 任意のスペクトル分布を表現できるプログラマブル光源を利用することを検討している [33]。Miyazaki ら [11] は 2 光源・2 物体色間でのメタメ

リズムを扱ったが, 本研究は 2 光源・3 物体色間という, より厳しい問題を扱った。実験では狭帯域フィルタを利用した光源でなければ満足いく結果が得られず, 明度の差を利用したトリックアートの実現はできたものの, 色度の差を利用したメタメリズムアートの実現としては不十分であった。本論文では 2 光源・3 物体色という厳しい条件での実験を通して, メタメリズムアートとして成立させるための限界を示すことができた。今後は 2 光源・2 物体色間でのメタメリズムを対象を絞って, より表現豊かなメタメリズムアートの実現を目指す。

Morović ら [34] は 11 色のインクを使ったプリンタは, 様々な物体色のスペクトル分布を印刷するのに役立つということを論じた。他の研究者も 4 色以上の種類のインクを使ったプリンタの研究を行っている [35,36]。プリンタメーカーと共同で, 様々な物体色のスペクトル分布を印刷することが可能なプリンタを開発することが今後の課題である。

スペクトル分布の計測機を持たない一般ユーザでも市販の油絵の具 (ホルベイン製) を利用してメタメリズムアート作品を制作できるように, 本研究で得られた油絵の具のスペクトル分布のデータベースとソフトウェアはウェブ上で提供する [37]。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金 (課題番号: 24700176, 若手研究 (B)) および科学研究費補助金 (課題番号: 22135003, 新学術領域研究) による助成を受けた。また, 兵庫県立大学浅田尚紀教授から助言を受けた。記して謝意を表す。

文 献

- [1] R. D. Hersch and S. Chosson, "Band moiré images," *SIGGRAPH 2004 Papers*, pp. 239–247, 2004.
- [2] N. J. Mitra and M. Pauly, "Shadow art," *ACM Trans. Graph.*, vol. 28, no. 5, article 156, 7 pages, 2009.
- [3] Y. Yue, K. Iwasaki, B. Chen, Y. Dobashi, and T. Nishita, "Pixel art with refracted light by rearrangeable sticks," *Computer Graphics Forum*, vol. 31, no. 2, pp. 575–582, 2012.
- [4] M. Papas, T. Houit, D. Nowrouzezahrai, M. Gross, and W. Jarosz, "The magic lens: refractive steganography," *ACM Trans. Graph.*, vol. 31, no. 6, article 186, 10 pages, 2012.
- [5] M. Nonoyama, F. Sakaue, and J. Sato, "Multiplex image projection using multi-band projectors," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) Workshops*, 2013.
- [6] N. Kawai, "Bump mapping onto real objects," *ACM SIGGRAPH 2005 Sketches*, article no. 12, 2005.

- [7] T. Amano, "Shading illusion: A novel way for 3-D representation on the paper media," in *Proceedings of Procams 2012 Workshop on CVPR2012*, W11.01, pp. 1–6, 2012.
- [8] R. Valluzzi, "LEDs illuminat metamerism in abstract art - no 2," <http://www.youtube.com/watch?v=fyJHlinM730>, 2012.
- [9] R. Bala, K. M. Braun, and R. P. Loce, "Watermark encoding and detection using narrowband illumination," in *Proceedings of Seventeenth Color Imaging Conference*, pp. 139–142, 2009.
- [10] M. S. Drew and R. Bala, "Sensor transforms to improve metamerism-based watermarking," in *Proceedings of 18th Color Imaging Conference*, pp. 22–26, 2010.
- [11] D. Miyazaki, K. Nakamura, M. Baba, R. Furukawa, M. Aoyama, S. Hiura, and N. Asada, "A first introduction to metamerism art," *SIGGRAPH ASIA Posters*, 2012.
- [12] A. Alsam and G. Finlayson, "Metamer sets without spectral calibration," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 24, no. 9, pp. 2505–2512, 2007.
- [13] G. D. Finlayson and P. Morovic, "Metamer sets," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 22, no. 5, pp. 810–189, 2005.
- [14] 中川貴, "照明と反射のスペクトルと色の関係を確認する実験," *日本色彩学会誌 第 34 巻 SUPPLEMENT*, pp. 108–109, 2010.
- [15] 中川貴, 松原裕之, "条件等色色票の色を一致または乖離させる照明方法," *日本色彩学会誌 第 35 巻 SUPPLEMENT*, pp. 104–105, 2011.
- [16] 中川貴, "メタメリズム実験に使う LED 照明装置の試作," *日本色彩学会誌 第 36 巻 SUPPLEMENT*, pp. 128–129, 2012.
- [17] K. Kobayashi, T. Yamada, A. Hiraishi, S. Nakauchi, "Real-time optical monitoring of microbial growth using optimal combination of light-emitting diodes," *Optical Engineering*, vol. 51, no. 12, pp. 123201-1–123201-8, 2012.
- [18] T. Morimoto, T. Mihashi, and K. Ikeuchi, "Color restoration method based on spectral information using normalized cut," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 5, no. 3, pp. 226–233, 2008.
- [19] G. Johnson and M. Fairchild, "Full-spectral color calculations in realistic image synthesis," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 19, no. 4, pp. 47–53, 1999.
- [20] C. J. Curtis, S. E. Anderson, J. E. Seims, K. W. Fleischer, and D. H. Salesin, "Computer-generated watercolor," in *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '97)*, pp. 421–430, 1997.
- [21] S. Tominaga and S. Nishi, "Surface reflection properties of oil paints under various conditions," *Proc. SPIE 6807*, 2008.
- [22] S. Tominaga, H. Ujike, and T. Horiuchi, "Surface reconstruction of oil paintings for digital archiving," *Proc. IEEE Southwest Symposium on Image Analysis & Interpretation*, pp. 173–176, 2010.
- [23] W. H. Press et al., "Numerical recipes in C: the art of scientific computing," *Cambridge: Cambridge University Press*, 994 p., 1997.
- [24] J. Takamatsu, Y. Matsushita, and K. Ikeuchi, "Estimating camera response functions using probabilistic intensity similarity," in *Proceedings on IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 8 p., 2008.
- [25] A. Ikari, R. Kawakami, R. T. Tan, and K. Ikeuchi, "Separating illumination and surface spectral from multiple color signals." In *Digitally archiving cultural objects* (pp. 297–321), Springer US, 2008.
- [26] P.-R. Chang and T.-H. Hsieh, "Constrained non-linear optimization approaches to color-signal separation," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 4, no. 1, pp. 81–93, 1995.
- [27] J. P. S. Parkkinen, J. Hallikainen, and T. Jaaskelainen, "Characteristic spectra of Munsell colors," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 6, no. 2, pp. 318–322, 1989.
- [28] D. B. Judd, D. L. MacAdam, and G. W. Wyszecki, "Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 54, pp. 1031–1040, 1964.
- [29] J. Cohen, "Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips," *Psychonomical Science*, vol. 1, pp. 369–370, 1964.
- [30] L. T. Maloney, "Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 10, pp. 1673–1683, 1986.
- [31] M. J. Vrhel, R. Gershon, and L. S. Iwan, "Measurement and analysis of object reflectance spectral," *Color Res. and Appl.*, vol. 19, pp. 4–9, 1994.
- [32] S. Tominaga and N. Tanaka, "Spectral image acquisition, analysis, and rendering for art paintings," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 17, no. 4, pp. 043022-043022-13, 2008.
- [33] Y. Fu, A. Lam, I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, "Separating reflective and fluorescent components using high frequency illumination in the spectral domain," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 457–464, 2013.
- [34] P. Morović, J. Morović, J. Arnabat, and J. M. García-Reyero, "Revisiting spectral printing: a data driven approach," in *Proceedings of 20th Color Imaging Conference*, pp. 335–340, 2012.
- [35] D.-Y. Tzeng and R. S. Berns, "Spectral-based six-color separation minimizing metamerism," in *Proceedings of IS&T/SID Eighth Color Imaging Conference*, pp. 342–347, 2000.
- [36] 永田泰弘, "7色印刷による色票の印刷," *日本色彩学会誌*, vol. 30, no. 1, pp. 42–43, 2006.
- [37] D. Miyazaki, <http://www.cg.info.hiroshima-cu.ac.jp/miyazaki/>.

(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)

宮崎 大輔 (正員)



2000 東大・理・情報科学科卒・2005 同大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻博士課程了・博士(情報理工学)・2008 広島市立大学着任, 現在准教授・物理ベースビジョンの研究に従事・論文賞(VSMM-00)受賞, 研究奨励賞(コニカミノルタ-14)受賞・MIRU2011 出版委員長・OAI, IJCVSP 編集委員・情報処理学会, 画像電子学会, IEEE, ACM 各会員。

Abstract Metamerism is a phenomenon where two objects recognized as having different colors under one light are also recognized as having the same color under another light. This research proposes technology for actualizing artistic illusion that exploits metamerism. Specifically, the purpose of the research relates to automatic calculation of blending ratios of oil paints that cause metamerism to occur under specific light sources. We entails metamerism occurring between three types of object colors under two types of light sources. Also, we utilize plausible reflection model for the mixture of oil paints.

Key words metamerism, computer-aided art, art illusion, multispectra, oil paint, reflection model