

2光源・3物体色間におけるメタメリズム生起のための絵の具の調合

Mixing paints for generating metamerism under 2 lights and 3 object colors

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

[†]広島市立大学

[†]Hiroshima City University

Contact information: <http://ime.info.hiroshima-cu.ac.jp/>

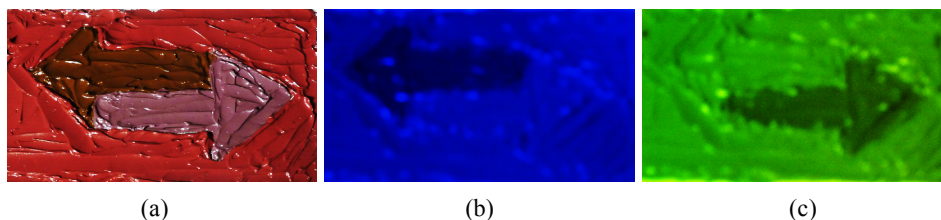


図1 (a) 計算によって得られた3種類の混合塗料, (b) 青い光源下の塗料, (c) 黄色い光源下の塗料

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。一方で, 近年ではメタメリズムを有効活用する動きもある。Balaら[1]は, 2種類の印刷物を作り, 適切に選択されたLEDを照射すると埋め込まれた透かしが見える研究を発表した。Valluzzi[2]は, 異なる色のLEDを照射することで作品の模様が変化するメタメリズムアートを制作した。Miyazakiら[3]は, ユーザーが指定した光源に対して最もメタメリズムを生起させる絵の具の調合割合を計算する手法を提案した。

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があるが, メタメリズムをユーザー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。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。より厳しい状況でメタメリズムを生起できることを確認することで応用範囲の広さを実証する。

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, プロジェクター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, 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[4]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[5]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。楽ら [6,7] 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。Papazis ら [8] 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。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[2] が制作したようなメタメリズムアートを扱う。Valluzzi[2] 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 [1] 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 プリンタでは黒色の印刷を 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 インクを出来るだけ使って CMY インクを出来るだけ使わない物体色と CMY インクを出来るだけ使って K インクを出来るだけ使わない物体色を計算した。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 [1] 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[9] は Bala ら [1] 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[9] 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 [10,11] 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

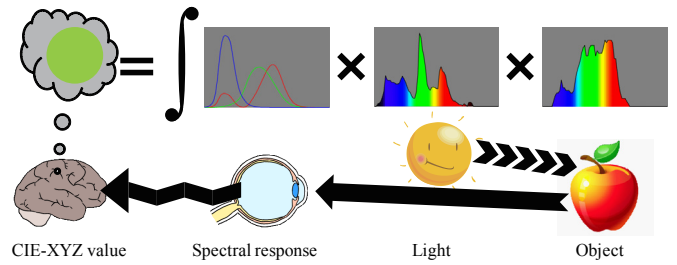


図 2 可視光の知覚の仕組み

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 [12-14] 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。本研究ではユーザの指定した光源のもとで、最もメタメリズムが生起する絵の具の調合割合を計算する手法を提案する。

森本ら [15] 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[16] 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性があることを示した。本研究ではメタメリズムをアートに利用することで、メタメリズムの有用性を示す。

Miyazaki ら [3] は、ユーザが指定した光源に対して最もメタメリズムを生起させる絵の具の調合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. 反射の原理

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。本研究では $400 \sim 800\text{nm}$ 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。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。

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 & \cdots & \bar{x}_{N_b} \\ \bar{y}_1 & \cdots & \bar{y}_{N_b} \\ \bar{z}_1 & \cdots & \bar{z}_{N_b} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

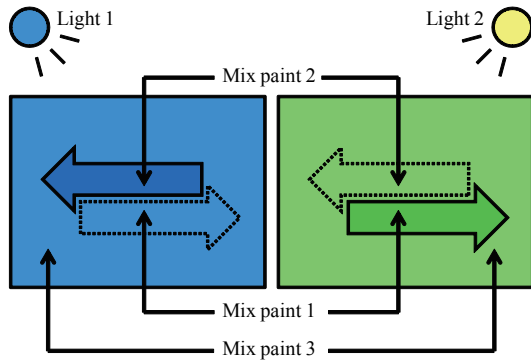


図3 2光源・3物体色におけるメタメリズム

観測される物体のスペクトル分布を $N_b \times 1$ ベクトル 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 E で表す．

$$E = \text{diag}(E_1, E_2, \dots, E_{N_b}). \quad (2)$$

光源 E で照射された物体 s の反射光は Es で表される．よって，人間が知覚される三刺激値 X, Y, Z は PEs のように計算できる（図2）．

4. 提案手法

この節では，メタメリズムを発生させる油絵の具の調合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で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）．

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 D で表す．

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1N_p} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2N_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N_b1} & d_{N_b2} & \dots & d_{N_bN_p} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

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．

Miyazaki ら [3] 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 [17] 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．

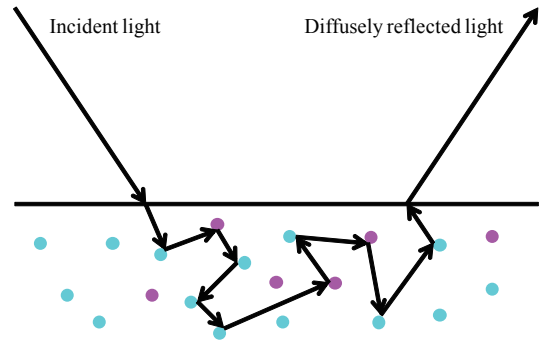


図4 混合塗料の拡散反射

油絵の具の反射率は西ら [18] がそのスペクトル反射率を実測している．西ら [18] 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西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．氏家ら [19] 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．

西ら [18] 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．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．

$$s = D^w \equiv \begin{pmatrix} d_{11}^{w_1} \times d_{12}^{w_2} \times \dots \times d_{1N_p}^{w_{N_p}} \\ d_{21}^{w_1} \times d_{22}^{w_2} \times \dots \times d_{2N_p}^{w_{N_p}} \\ \vdots \\ d_{N_b1}^{w_1} \times d_{N_b2}^{w_2} \times \dots \times d_{N_bN_p}^{w_{N_p}} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

このモデルは透過のモデルとして知られている．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 (4) 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からも分かる通り $d_1(\lambda)^{7/10} d_2(\lambda)^{3/10}$ 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．

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5はホリゾンブルー (B) とライトマゼンタ (M) を

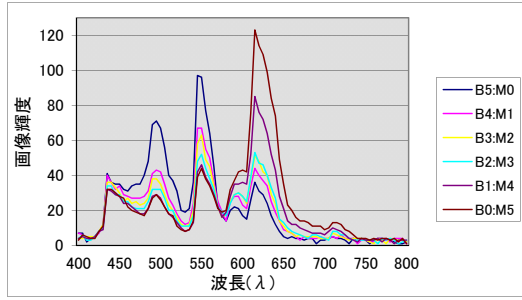


図5 混合塗料の混合比の違いによるスペクトル分布の変化 (HORIZON BLUE と LIGHT MAGENTA)

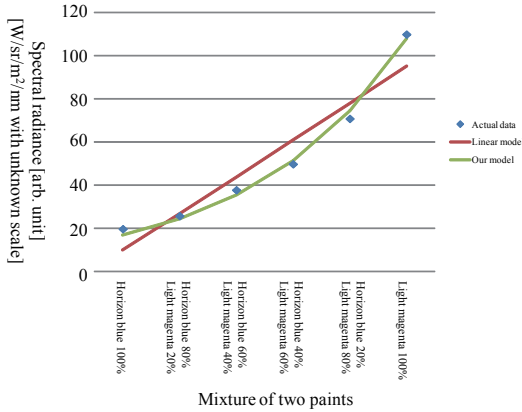


図6 混合塗料の混合比の違いによる輝度の変化 ($\lambda = 625nm$)

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6は図5のうち 625nm の波長のデータを抽出したものである．図6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6の直線は加法混色として計算した場合 [3,10,11] の輝度で，図6の曲線は式(4)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(4)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．

以上により，最小化すべきコスト関数 $F(\cdot)$ は以下の通りになる．

$$\begin{aligned}
 F(\mathbf{P}, \mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{D}, \mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3) = & \\
 & \|\mathbf{PE}_1\mathbf{D}^{\mathbf{w}_1} - \mathbf{PE}_1\mathbf{D}^{\mathbf{w}_3}\|^2 \\
 & + \|\mathbf{PE}_2\mathbf{D}^{\mathbf{w}_2} - \mathbf{PE}_2\mathbf{D}^{\mathbf{w}_3}\|^2 \\
 & - \|\mathbf{PE}_1\mathbf{D}^{\mathbf{w}_2} - \mathbf{PE}_1\mathbf{D}^{\mathbf{w}_3}\|^{0.5} \\
 & - \|\mathbf{PE}_2\mathbf{D}^{\mathbf{w}_1} - \mathbf{PE}_2\mathbf{D}^{\mathbf{w}_3}\|^{0.5}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3\} = & \\
 \operatorname{argmin}_{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3} F(\mathbf{P}, \mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{D}, \mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3), & \quad (6)
 \end{aligned}$$

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

式(6)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 [20] を利用した．Nelder-Mead 滑降シプレックス法は線形計画法のシプレックス法ではなく，コスト関数を最小化するアルゴリズムの一種である．式(5)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 C1 級 (一次微分可能) の滑らかさを必要とするが，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(5)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 [21]，本研究でもこのアルゴリズムを利用した．また，式(5)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 [22,23]，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 [20] のソースコードを利用した．

なお，式(5)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(5)を用いることにした．

式(5)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するようにする第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(5)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．

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7)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8)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，



図7 ハイパースペクトルカメラ HSC-1700



図8 データベースとして利用した 29 種類の油絵の具

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9)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10)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13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、その中で混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複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。求めた調合割合をもとに実際に絵の具を調合して図3で想定した通りの結果が得られていることを視覚的に確認した(図1)。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11と図12の干渉フィルターを利用した。人工太陽灯のサイズが大きいため、光源の前にフィルターを設置するのではなく、カメラの前にフィルターを設置して撮影した。干渉や分光などのように波



図9 人工太陽灯プロブライトV

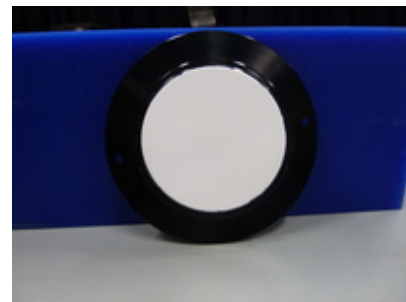


図10 標準白色拡散板

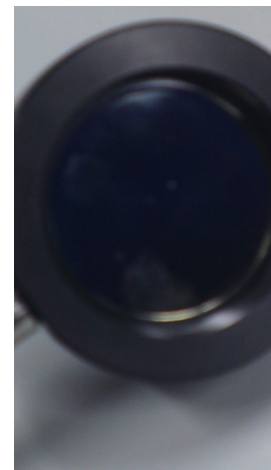


図11 青フィルター

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ーを設置した場合とカメラの前にフィルター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

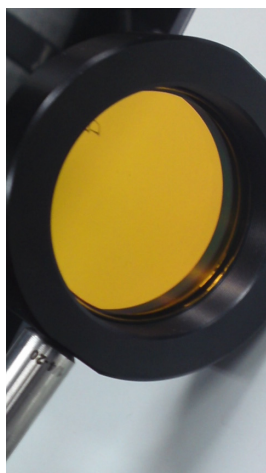


図 12 黄フィルター

表 1 第 9 固有値までの累積寄与率

	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

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．

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．絵の具というのは、顔料（粒）でできている．顔料には土や岩石からできている顔料と植物からできている顔料の 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 13 に取得したデータベースのスペクトル分布を示す．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 1 に示す．図 14 に上位 9 個の固有値のグラフを，図 15 に上位 4 つの固有ベクトルのグラフを示す．表 1 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 [24] は様々な種類の物体のスペクトル分布

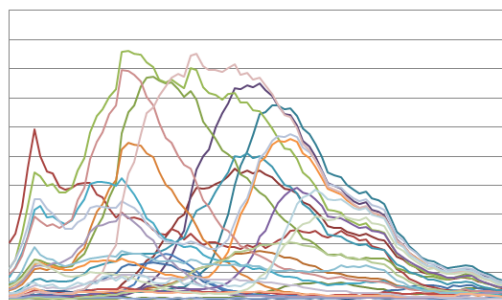


図 13 データベース中の全ての種類の絵の具のスペクトル分布（注：ここで示しているのは人工太陽灯で照射したスペクトル分布であり，分光反射率ではない）

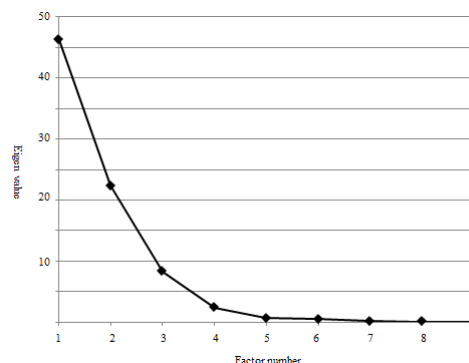


図 14 第 9 固有値までのスクリープロット

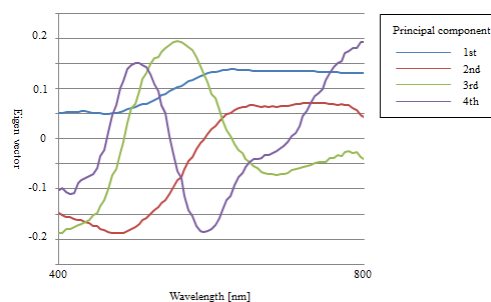


図 15 第 4 主成分までのグラフ

を解析した結果，上位 8 つの基底関数でデータベース中の全ての物体色を完全に表現することが可能であることを示した．同様の解析は Judd ら [25]，富永 [26]，Cohen [27]，Maloney [28]，Vrhel ら [29] も行っており，同様の結論に至っている．本実験では，これらの論文の主張が油絵の具においても有効で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発生させることが可能であることも分かる．実実験においては，全 29 種類の絵の具の調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

再度調合割合を求めてから絵の具を調合している。

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が、最適なメタメリズムを発生させる光源を光源データベースから自動的に選出または調合する手法を今後開発する予定である。

Morovič [30] 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 [31,32]。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。

本研究および Miyazaki ら [3] の研究では絵の具の調合によりメタメリズムの強調を行い、Drew と Bala [9] 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。今後は絵の具の調合だけでなく光源の組み合わせも最適な物を自動的に選択することにより、本研究や既存研究 [3,9] 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。

今後、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、油絵の具のスペクトル分布のデータベースと広く普及している市販の照明のスペクトル分布とソフトウェアをウェブ上で提供する方向で検討している。

参考文献

- 1) 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.
- 2) R. Valluzzi, "LEDs illuminat metamerism in abstract art - no 2," <http://www.youtube.com/watch?v=fyJH1inM730>, 2012.
- 3) 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.
- 4) R. D. Hersch and S. Chosson, "Band moiré images," SIGGRAPH 2004 Papers, pp. 239–247, 2004.
- 5) N. J. Mitra and M. Pauly, "Shadow art," ACM Trans. Graph., vol. 28, no. 5, article 156, 7 pages, 2009.
- 6) Y. Yue, 岩崎慶, 陳炳宇, 土橋宜典, 西田友是, "所望の集光模様を生成する透明物体の一設計法," Visual Computing / グラフィクスとCAD 合同シンポジウム, 2011.
- 7) Y. Yue, 岩崎慶, 陳炳宇, 土橋宜典, 西田友是, "所望の集光模様を生成するための連続面からなる透明物体の形状設計法," Visual Computing / グラフィクスとCAD 合同シンポジウム, 2012.
- 8) 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.
- 9) M. S. Drew and R. Bala, "Sensor transforms to improve metamerism-based watermarking," in Proceedings of 18th Color Imaging Conference, pp. 22–26, 2010.
- 10) A. Alsam and G. Finlayson, "Metamer sets without spectral calibration," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 24, no. 9, pp. 2505–2512, 2007.
- 11) G. D. Finlayson and P. Morovic, "Metamer sets," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 22, no. 5, pp. 810–189, 2005.
- 12) 中川貴, "照明と反射のスペクトルと色の関係を確かめる実験," 日本色彩学会誌 第34巻 SUPPLEMENT, pp. 108–109, 2010.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 西省吾, 富永昌治, "油絵具の分光反射特性の計測と解析," 日本色彩学会誌, vol. 32, no. 4, pp. 260–270, 2008.
- 19) 氏家広之, 齋藤一, 堀内隆彦, 富永昌治, "キャンバスに描かれた油彩画の計測とレンダリング," 日本色彩学会誌 第32巻 SUPPLEMENT, pp. 30–31, 2008.
- 20) W. H. Press et al., "Numerical recipes in C: the art of scientific computing," Cambridge: Cambridge University Press, 994 p., 1997.
- 21) 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.
- 22) 猪狩壮文, R. T. Tan, 池内克史, "Interference filter を用いて取得した反射光スペクトルの光源スペクトル・分光反射率分離," 画像の認識・理解シンポジウム, vol. 2, pp. 477–482, 2004.
- 23) 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.
- 24) 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.
- 25) 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.
- 26) 富永昌治, "光と色の計測と表現 - コンピュータビジョンの観点から -," 情報処理学会研究報告, vol. 2010-CVIM-172, no. 39, 2010.
- 27) J. Cohen, "Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips," Psychonomical Science, vol. 1, pp. 369–370, 1964.
- 28) 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.
- 29) 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.
- 30) P. Morovič, J. Morovič, 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.
- 31) 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.
- 32) 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.