

擬似的な陰影を知覚させる油絵の具の混合

宮崎 大輔¹ 實重 貴文^{1,†1} 馬場 雅志¹ 古川 亮¹ 青山 正人¹ 日浦 慎作¹

概要：メタメリズムとはある光源下では2つの物体が異なる色として知覚されるが別の光源下では同じ色として知覚される現象である。本研究では、メタメリズムを利用したトリックアートの作成手法を提案する。与えられた光源下でメタメリズムが生起する条件を満たす油絵の具を提案手法によって計算する。実験では、2光源・4物体色の中で生起されるメタメリズムについて計算をおこなった。これにより擬似的な陰影を表現することができ、二次元の絵画が三次元の物体として知覚されるトリックアートを実現することができた。

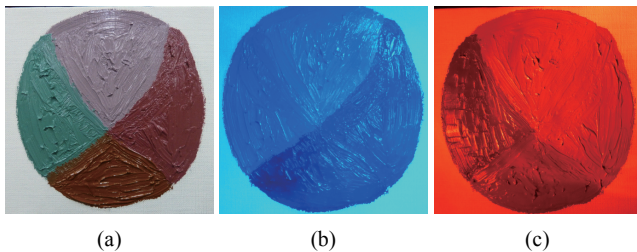


図1 (a) 計算によって得られた4種類の混合塗料, (b) 青い光源下の塗料, (c) 赤い光源下の塗料

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4種類の混合塗料を作成し(図1(a)),ある光源下では左上から光が照射されたような陰影として知覚され(図1(b)),別の光源下では右上から光が照射されたような陰影として知覚される(図1(c))アート作品を制作する。

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生起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

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,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,すなわちコンピュータ支援アートの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Chossou[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。Papas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

¹ 広島市立大学
Hiroshima City University, Ozukahigashi 3-4-1, Asaminami-ku, Hiroshima city, 731-3194 Japan

^{†1} 現在,株式会社山陰合同銀行
Presently with The San-In Godo Bank, Ltd.

る技術を開発した．Nonoyama ら [5] は多波長プロジェクト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ト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．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．また，本研究では Kawai[6] や Amano[7] と同様の仮想陰影アートを制作する．本研究は Kawai[6] のように微細加工を必要とせず，また，Amano[7] のようにプロジェクトを必要としない．

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．同じ色として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], [15], [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 3 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 4 種類の物体色の間で発生するメタメリズムを扱う．油絵の具の混合には，本研究でも Miyazaki ら [11] の反射モデルを使用した．また，Miyazaki らはキャンパス上でデザインが変化するアートを制作したが，本研究では擬似的な陰影による立体知覚のアートを制作する．

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）．

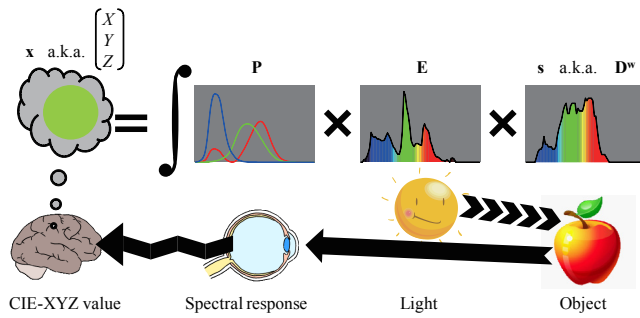


図2 可視光の知覚の仕組み

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

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

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

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 $x = (X, Y, Z)^T$ と表すと、式(1)、式(2)、式(3)は以下のように表される。

$$x = PE_s. \quad (4)$$

等色関数の離散データを $3 \times N_b$ 行列 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。

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

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

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

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4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と混合塗料4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2が同じ明るさとなり、それより暗い混合塗料3と混合塗料4が同じ明るさになるように調合割合を算出する。また、光源2のもとでは混合塗料1と混合塗料4が同じ明るさとなり、それより暗い混合塗料2と混合塗料3が同じ明るさになる

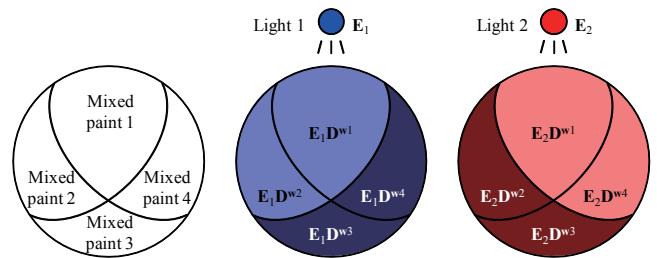


図3 4つの混合塗料が2つの異なる光源下で照射されたときに感じる擬似的な陰影

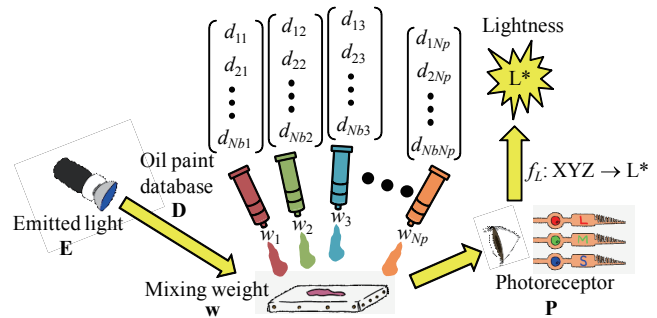


図4 油絵の具のデータベースを利用して油絵の具を調合

ように調合割合を算出する。これらの条件を満たす調合割合を算出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 D で表す。

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

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)。

油絵の具の反射率はTominagaら[20]がそのスペクトル反射率を実測している。Tominagaら[20]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[21]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 [20] 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。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射出する。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。Miyazaki ら [11] は絵の具の混合は減法混色であることを利用して混合塗料のスペクトル反射率を計算する手法を提案した。Miyazaki らはこの絵の具の調合モデルは指数混色モデル (exponential color mixing model) と呼び、混合塗料の分光反射率を以下の式で表現した。

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

式 (8) の 1 行を取りだしたものを式 (9)–(10) に示す。

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

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

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。また、 $0 \log 0 = 0$ が成り立つため、このモデルでは $0^0 = 1$ が定義される。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。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。

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。

$$\{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3, \mathbf{w}_4\} = \underset{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3, \mathbf{w}_4}{\operatorname{argmin}} F(\mathbf{P}, \mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{D}, \mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3, \mathbf{w}_4), \quad (11)$$

$$F(\mathbf{P}, \mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{D}, \mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3, \mathbf{w}_4) = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6, \quad (12)$$

where,

$$C_1 = \begin{cases} c_1^4 & (c_1^2 > T_1) \\ c_1 & (c_1^2 \leq T_1) \end{cases}, \quad C_2 = \begin{cases} c_2^4 & (c_2^2 > T_1) \\ c_2 & (c_2^2 \leq T_1) \end{cases},$$

$$C_3 = \begin{cases} c_3^4 & (c_3^2 > T_1) \\ c_3 & (c_3^2 \leq T_1) \end{cases}, \quad C_4 = \begin{cases} c_4^4 & (c_4^2 > T_1) \\ c_4 & (c_4^2 \leq T_1) \end{cases},$$

$$C_5 = \begin{cases} I_1 & (c_5 \geq 0) \\ I_2 & (T_2 < c_5 < 0), \\ I_3 c_5^{-1} & (\text{otherwise}) \end{cases},$$

$$C_6 = \begin{cases} I_1 & (c_6 \geq 0) \\ I_2 & (T_2 < c_6 < 0), \\ I_3 c_6^{-1} & (\text{otherwise}) \end{cases},$$

$$T_1 = 100, \quad T_2 = -1,$$

$$I_1 = 100000, \quad I_2 = 1000, \quad I_3 = \frac{I_2}{(-T_2)^{-1}},$$

$$c_1 = (100|f_L(\mathbf{PE}_1 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_1}) - f_L(\mathbf{PE}_1 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_2})|),$$

$$c_2 = (100|f_L(\mathbf{PE}_1 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_3}) - f_L(\mathbf{PE}_1 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_4})|),$$

$$c_3 = (100|f_L(\mathbf{PE}_2 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_1}) - f_L(\mathbf{PE}_2 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_4})|),$$

$$c_4 = (100|f_L(\mathbf{PE}_2 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_2}) - f_L(\mathbf{PE}_2 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_3})|),$$

$$c_5 = (100f_L(\mathbf{PE}_1 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_3}))^2 + (100f_L(\mathbf{PE}_1 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_4}))^2$$

$$- (100f_L(\mathbf{PE}_1 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_1}))^2 - (100f_L(\mathbf{PE}_1 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_2}))^2,$$

$$c_6 = (100f_L(\mathbf{PE}_2 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_2}))^2 + (100f_L(\mathbf{PE}_2 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_3}))^2$$

$$- (100f_L(\mathbf{PE}_2 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_1}))^2 - (100f_L(\mathbf{PE}_2 \mathbf{D}^{\mathbf{w}_4}))^2,$$

$$\sum_{n=1}^{N_p} w_{1n} = 1, \quad \sum_{n=1}^{N_p} w_{2n} = 1, \quad \sum_{n=1}^{N_p} w_{3n} = 1, \quad \sum_{n=1}^{N_p} w_{4n} = 1,$$

$$0 \leq w_{1n}, 0 \leq w_{2n}, 0 \leq w_{3n}, 0 \leq w_{4n}, \{n = 1, \dots, N_p\}.$$

関数 $f_L(X, Y, Z)$ は (X, Y, Z) を $L^*a^*b^*$ 色空間の明度 L^* に変換する関数である。式 (11) 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 滑降シンプレックス法にもとづく焼きなまし法 [22] を利用した。図 5 で模式的に示す通り、 C_1 は不連続点を持つ単調増加関数である。提案手法は C_1 を最小化しようとするため (式 (12)), 単調増加関数の性質から結果的に c_1 が最小化されることになる (図 5)。コスト値 c_1^2 がしきい値 T_1 を超えると大きなペナルティを科すことで、コスト値がしきい値以下になるようにする。また、しきい値以下の勾配を緩やかにすることで、しきい値以下という条件さえ満たせばある程度のコストの肥大を許す効果が得られる。ある程度条件を緩和することで、他の条件を同時にできる限り満たすことが出来るように、自由度の高いパラメータ推定を実現している。推定するパラメータが多く、満たすべき条件も多いため、最小化計算にある程度自由度をもたせることで、目的とするパラメータを得られやすくする狙いがある。

図 6 で模式的に示す通り、 C_5 は不連続点を持つ単調増加関数である。提案手法は C_5 を最小化しようとするため (式 (12)), 単調増加関数の性質から結果的に c_5 が最小化されることになる (図 6)。コスト値 c_5 が 0 を超えるとか

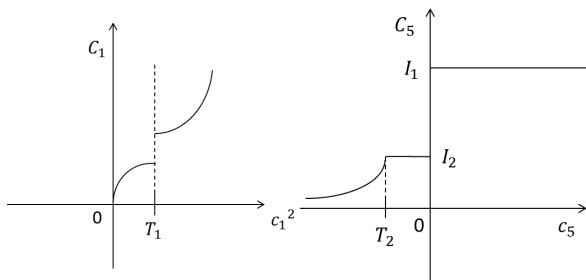


図5 コスト関数 C_1 の模式図 図6 コスト関数 C_5 の模式図

なり大きなペナルティを科すことで、コスト値が0以下になるようにする。コスト値が0を超えると明暗が逆転してしまい、意図した陰影を表現できないため、このような関数を設定している。また、コスト値がしきい値 T_2 を超えている間は一定の大きなペナルティを科すが、 T_2 をわずかも下回ると必ずコスト値が下がるようにすることで、コスト値が T_2 以下になりやすいように工夫している。

コスト関数 C_1-C_5 の表現は試行錯誤によって決めた。本研究では推定するパラメータや満たすべき条件が多いため、解くことが比較的難しい問題である。現実的に実用可能な手法にするため、安定して推定できるコスト関数を試行錯誤により模索した。その結果として得られた表現が C_1-C_5 であり、実用的に安定してパラメータを推定する手法を実現することができた。

式(11)は、 $a*b*$ の差ではなく L^* 値の差を利用しているため、色度を考慮せず明度のみを考慮した式になっている。本研究の目的は擬似的な陰影を表現することであるため、明度のみを考慮した。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、明度の差で評価するような目的関数にしている。なお、色度を利用していないため、光源としては狭帯域のLEDを利用する。

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。20種類 ($N_p = 20$)の異なる色の油絵の具(図9)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、本研究では明度を活用するため、20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10)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20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8)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。メタメリズムを生起させるための光源としてLEDを使



図7 ハイパースペクトルカメラ HSC-1700



図8 標準白色拡散板



図9 使用した油絵の具



図10 人工太陽灯
プロブライトV

用する。LEDを標準白色板に照射して標準白色板をマルチスペクトルカメラで計測すると暗すぎて計測できないため、LEDを直接マルチスペクトルカメラで計測する。また、LEDは直接撮影すると明るすぎるため、NDフィルターと呼ばれる減光するためのフィルターを用いて撮影する。図11と図12は、実験で用いた青色と赤色のLEDである。

LEDには電圧降下があり、電圧を決めても流れる電流は予想ができない。そしてこの順電圧と逆方向の耐電圧はとても低い。そこで電流を一定にできる定電流回路が必要になる。また、LEDは流せる電流に限界があるため、LEDの電気回路では流す電流を同じにする必要がある。そこで定電流ダイオード(CRD)を使用する。定電流ダイオードは加える電圧や負荷抵抗が変化しても、常に一定の電流を供給できるダイオードである。LEDを3個直列につなぎ、その組み合わせを並列につないで電気回路を作成した。作成した回路図を図13に示す。図13をブレッドボードに実装した写真を図14に示す。

LEDの明るさは約0.015~30[cd]であるため、ハロゲンランプの約800[cd]に比べて暗いことがわかる。そのため本研究ではLED45個をブレッドボードに実装した。

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、4種類の混合塗料を計算させる。20色の絵の具を用いてメタメリズムの生起実験を行っ

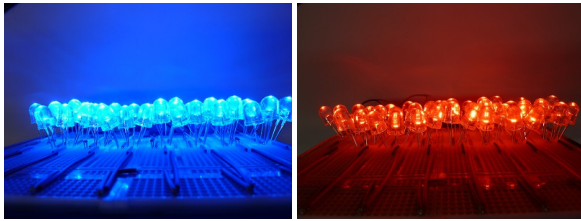


図 11 青色 LED

図 12 赤色 LED

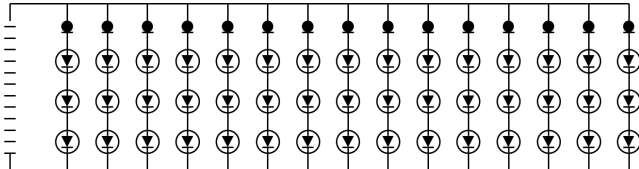


図 13 LED の電気回路の回路図

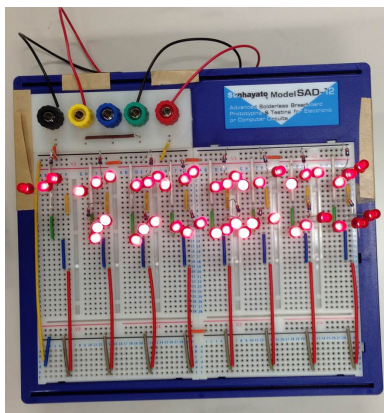


図 14 ブレッドボードに配置された LED の回路

た．表 1 は，20 色の絵の具を調合するために求めた，塗料 1，塗料 2，塗料 3，塗料 4 に対する調合割合を示したものである．図 15 は，LED1(青色 LED) を照射したときのシミュレーション結果の画像である．図 16 は，LED2(赤色 LED) を照射したときのシミュレーション結果の画像である．青色 LED を用いた際には，図 15 の塗料 1 と塗料 2 が，また塗料 3 と塗料 4 が同じ色に見え，塗料 1 と塗料 2 の方が明るく見える．赤色 LED を用いた際には，図 16 の塗料 1 と塗料 4 が，また塗料 2 と塗料 3 が同じ色に見え，塗料 1 と塗料 4 の方が明るく見える．このシミュレーション結果の RGB 値を，表 2 に示す．提案手法で計算された絵の具のスペクトル分布を図 17 に示す．図 18 は 4 つの混合塗料が 2 つの光源で照射されたときのスペクトル分布である．短波長側（光源 1，青色 LED）における 4 つの混合塗料のスペクトル分布においても，長波長側（光源 2，赤色 LED）における 4 つの混合塗料のスペクトル分布においても，想定通りの結果が得られ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 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．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

表 1 絵の具の調合割合

絵の具	塗料 1	塗料 2	塗料 3	塗料 4
オーレオリン	0.000	0.000	0.000	0.092
カドミウムオレンジ	0.011	0.000	0.163	0.046
ゴールドオーカー	0.026	0.000	0.000	0.035
コバルトグリーン	0.006	0.000	0.054	0.000
コバルトバイオレットライト	0.000	0.000	0.000	0.000
コンポーズグリーン	0.011	0.408	0.000	0.058
ジョーンブリアン NO.4	0.085	0.000	0.000	0.000
ターコイズブルー	0.000	0.017	0.270	0.000
パーマメントホワイト	0.146	0.000	0.000	0.087
バイオレットグレイ	0.122	0.006	0.000	0.011
ブリリアントピンク	0.106	0.000	0.000	0.035
マースイエロー	0.000	0.032	0.029	0.000
マンガニズブルー	0.192	0.457	0.000	0.000
ミネラルバイオレット	0.000	0.055	0.146	0.000
モーブ	0.000	0.000	0.053	0.247
ライトマゼンタ	0.230	0.000	0.000	0.046
レモンイエロー	0.000	0.000	0.000	0.132
ローズバイオレット	0.000	0.000	0.000	0.103
透明ブラック	0.000	0.024	0.286	0.000
透明レッド	0.064	0.000	0.000	0.108

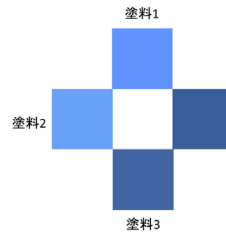


図 15 青色 LED での計算結果

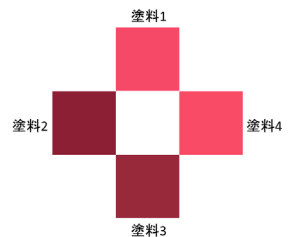


図 16 赤色 LED での計算結果

表 2 RGB 値（シミュレーション：青色 LED，赤色 LED）

	R	G	B
青色 LED × 混合塗料 1	97	148	255
青色 LED × 混合塗料 2	105	162	246
青色 LED × 混合塗料 3	65	101	163
青色 LED × 混合塗料 4	58	93	152
赤色 LED × 混合塗料 1	246	72	103
赤色 LED × 混合塗料 2	141	31	53
赤色 LED × 混合塗料 3	152	42	60
赤色 LED × 混合塗料 4	251	75	103

き混ぜたのち，下地が見えないように塗布する．

6. おわりに

本研究によって，2 光源・4 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．本研究で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，擬似的な陰影を表現す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調合によりメタメリズムの強調を行い，Drew と Bala[10] は

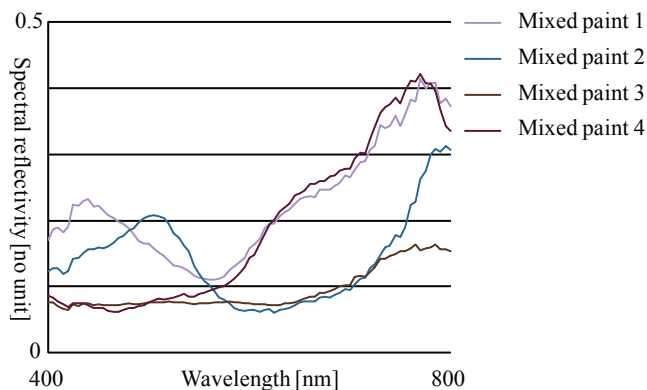


図 17 4つの混合塗料のスペクトル反射率

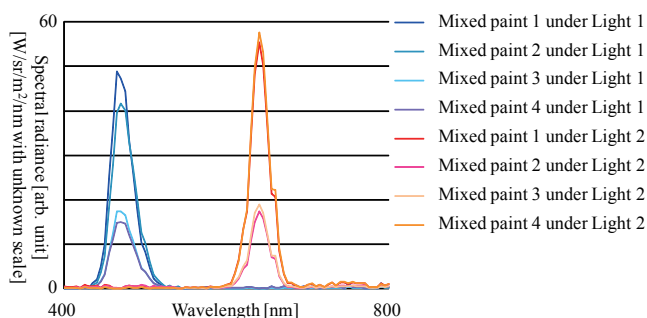


図 18 2つの光源下における4つの混合塗料のスペクトル分布

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。

Miyazaki ら [11] は 2 光源・3 物体色間でのメタメリズムを扱ったが、本研究は 2 光源・4 物体色間という、より厳しい問題を扱った。狭帯域のスペクトル分布を持つ LED を使用することで、明度の違いを利用したトリックアートを実現した。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。今後は 2 光源・2 物体色間でのメタメリズムに対象を絞って、より表現豊かなメタメリズムアートの実現を目指す。

そのためには、任意のスペクトルを作ることができる、干渉フィルタなどを使用して実験を行う必要がある。そのことによって、複数の物体色間などのより複雑な条件下でのメタメリズムの生起が実現するのではないかと考えられる。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ブル光源を利用することを検討している [23]。

Morović ら [24] 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論じた。Tzeng ら [25] は 6 色 (のうち選択された 4 色) のインクを使ったプリンタを開発した。永田 [26] は 7 色プリンタで色票を印刷している。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 LED 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 LED のスペクトル分布のデータベースはウェブ上で提供する*1。

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。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] R. D. Hersch and S. Chosson, "Band moiré images," *SIG-GRAPH 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. Pappas, 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 SIG-GRAPH 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. Takahashi, M. Baba, H. Aoki, R. Furukawa, M. Aoyama, and S. Hiura, "Mixing paints for generating metamerism art under 2 lights and 3 object colors," in *IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, pp. 874–882, 2013.
- [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. 810–819, 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

*1 <http://www.cg.info.hiroshima-cu.ac.jp/~miyazaki/>

- 作,” 日本色彩学会誌 第 36 卷 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] S. Tominaga and S. Nishi, “Surface reflection properties of oil paints under various conditions,” *Proc. SPIE 6807*, 2008.
- [21] 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.
- [22] W. H. Press et al., “Numerical recipes in C: the art of scientific computing,” *Cambridge: Cambridge University Press*, 994 p., 1997.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.