

多原色による分光的画像再現 ——観察者メタメリズムの影響を解消するディスプレイ——

山口 雅浩^{*1,*3}・村上 百合^{*2,*3}・大澤 健郎^{*3,*4}・内山 俊郎^{*3,*5}

Spectral Color Image Reproduction by Multiprimary Display: Discounting Observer Metamerism

Masahiro YAMAGUCHI^{*1,*3}, Yuri MURAKAMI^{*2,*3}, Kenro OHSAWA^{*3,*4} and Toshio UCHIYAMA^{*3,*5}

The individual variation in color matching functions of human observers causes the mismatch in the color perception between the color of real object and the color displayed on monitors, even if the colorimetric match is achieved. The problem is called observer metamerism. This article introduces a solution for this problem by the multispectral imaging and the multiprimary display, in which the color reproduced on the display perceptually matches the color of real object. The experimental results using six-primary display demonstrate that the perceptual color difference due to the observer metamerism is apparently noticeable for actual human observer. It is also shown that the influence of observer metamerism is reduced by the spectral color reproduction on the multiprimary display.

Key words: observer metamerism, color matching function, multispectral imaging, multiprimary display, spectral color reproduction

映像技術の利用分野が拡大するとともに、高精細・大画面という大きな流れに加えて、色の再現性の向上も重要な課題として注目されている。印刷物のディスプレイ上への色表示、遠隔医療における顔色の再現、電子商取引での商品サンプルの色、電子美術館や博物館では絵画や文化遺産の色を忠実に記録して再現することなど、実物の色を忠実に再現する技術は幅広い応用が期待できる。

従来の多くのカラー映像機器では、実物の色を忠実に再現できていないが、近年、デジタルカメラ、プリンターやディスプレイ等において、機器の色再現特性の違いを補正するカラーマネージメントの技術の導入も進みつつある。しかし、これらは三原色に基づいているため、色再現の性能に限界がある。これに対して、三原色の限界を超えた映像色再現を目指し、スペクトルに基づく色再現を行う技術の開発が進められている¹⁻⁵⁾。マルチスペクトル画像

入力や多原色表示などの技術を用いることにより、高精度な色情報の入力、撮影時と異なる照明光源下での忠実な色再現、多原色表示によるディスプレイの色再現範囲の拡大、定量的な色・スペクトル情報を用いた高度な色情報処理、人間の視覚特性の個人差（観察者メタメリズム）を考慮した色再現などが可能になる。

本稿では、マルチスペクトルと多原色に基づく色再現を行うことにより、異なるメディア間での色の不一致の一因ともいわれる観察者メタメリズムの影響を低減し、実物の色と表示色を視覚的に一致させる技術を紹介する。

1. マルチスペクトルと多原色に基づく映像色再現技術

最近、マルチスペクトル画像入力や、スペクトルに基づく色再現の研究は活発化しつつある。国際照明委員会(CIE)においても、技術委員会 TC8-07 として Multispec-

^{*1} 東京工業大学大学院理工学研究科附属 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259) E-mail: guchi@isl.titech.ac.jp

^{*2} 東京工業大学フロンティア創造共同研究センター (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

^{*3} 情報通信研究機構赤坂ナチュラビジョンリサーチセンター (〒107-0052 東京都港区赤坂 2-17-28 NTT 赤坂ビル)

^{*4} 現所属：オリンパス(株) (〒192-8512 東京都八王子市久保山町 2-3)

^{*5} 現所属：(株)NTT データ技術開発本部 (〒104-0033 東京都中央区新川 1-21-2 茅場町タワー)

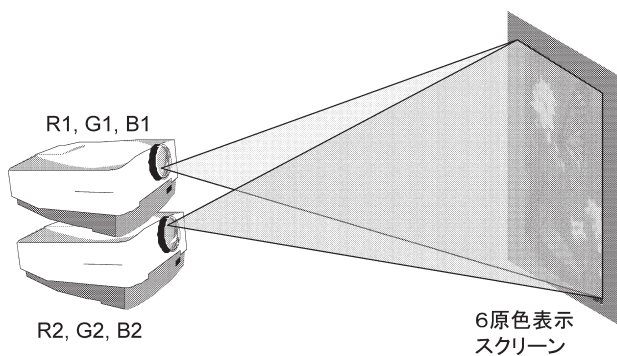


図1 2台のプロジェクターを用いた六原色システムの構成図。各プロジェクターから異なる三原色（R1, G1, B1とR2, G2, B2）を投影し、スクリーン上で重ね合わせることで六原色の画像を表示する。

tral Imaging が設置され、データ交換のためのフォーマットなどに関する検討が行われている⁹⁾。ここでは、筆者が関係する、情報通信研究機構（NICT）赤坂ナチュラビジョンリサーチセンター（NV-RC）において開発されている技術^{1,2)}の概要を紹介する。

NV-RC で開発している色再現処理は、スペクトルベース色再現システムとよばれる仕組みに基づいて行われる。その特徴は、分光反射率、分光放射輝度あるいは任意照明光源下の測色値といった、物理的なモデルに基づく標準色空間を用いる点である。マルチスペクトルカメラ（MSC）などから得た画像に、機器の特性や照明光源分光分布などの情報（プロファイル）を付して処理を行うことで、入力された原データの情報を失うことなく忠実な色再現を行う。本システムでは、映像入出力とも三原色を含む任意の原色数の機器を用いることができる。

マルチスペクトルの画像を入力する機器としては、16バンドの回転フィルターホイール方式 MSC¹⁾、2台の3バンドカメラと特殊な干渉フィルターを用いた、6バンド動画 HDTV カメラなどが開発されている。また、多原色により表示装置の色域を拡大することを目的として、原色のスペクトルを改造した2台のプロジェクターから投影された映像を重ね合わせることにより、六原色表示を行う方法が提案されている（図1）⁷⁾。NV-RC では、この原理に基づき、8台の液晶プロジェクター（Victor DLA-G 10）を用い、2×2画面の貼り合わせ約 2000×2000 画素六原色投射型ディスプレイシステム¹⁾、改造された SXGA の DLP プロジェクターを2台用いた、フロントプロジェクション型六原色 DLP ディスプレイなどを開発している。ほかにも、四原色フラットパネル型液晶ディスプレイの試作も行われている。六原色 DLP では、従来の三原色のディスプレイと比較して、再現される色域の体積（ $L^*a^*b^*$ 空間）が約 1.8

倍に拡大されている。

多原色ディスプレイにおいて測色的な色再現を行う場合、再現目標の三刺激値を4以上の原色光の組み合わせにより表示するので、同じ色を表示するのに複数の信号値の組み合わせが存在する。すなわち、表示装置の原色数を M とすると、 M 個の各原色の画素を変調する信号値を求める必要がある。このような変換を「多原色分解」とよぶ。測色的な色再現を行う場合には、 $3 \rightarrow M$ 次元の多原色分解となり、信号値の選択に自由度が存在する。本稿で取り上げる等色関数のバリエーションを考慮した色再現は、この多原色表示における自由度を利用している。このとき、各画素について分光放射輝度またはマルチスペクトル信号値（ N 次元）が与えられ、そこから多原色信号値を求めることになる（ $N \rightarrow M$ 次元の多原色分解）。これは一種の分光の色再現といえる。

これまでに、 $3 \rightarrow M$ 次元の多原色分解法として、①行列切り替え法⁸⁾、②等輝度面線形補間法⁹⁾、③メタメリックブラック法¹⁰⁾、④球面平均法¹¹⁾を開発し、性能や画質の比較を行っている。 $N \rightarrow M$ 次元の多原色分解については、第4章で述べる。

なお、多原色表示においては、測色的な色再現を行う場合でも、等色関数の個人差の影響が発生する。 $3 \rightarrow M$ 次元の多原色分解で、滑らかなグラデーションを多原色ディスプレイに表示する場合、測色的には存在するはずのない等高線状の模様が観察される（以下、擬似輪郭とよぶ）¹²⁾。これは、ディスプレイの特性のモデル化に誤差が含まれていることが一因だが、等色関数の個人差も同程度の影響がある。擬似輪郭が知覚されないようにするためには、測色値の変化に対して信号値の連続性が保たれるような多原色分解手法を用いる必要がある。

2. 等色関数のバリエーションを考慮した色再現

人間の視覚系は3種類のセンサー（錐体）で色を知覚しているため、異なるスペクトルで同じ色を表現すること（条件等色）ができる。従来の色再現技術は、CIE が定めた等色関数を用いた条件等色の原理に基づく。しかし、等色関数には、バリエーションがあることも知られている。CIE の等色関数は、標準観察者とよばれる仮想的な観察者の特性であり、実際には各個人は異なる特性をもつ。

CIE が規定している CIE 1931 等色関数は、2° 視野での標準として、現在でも広く用いられている。そのもとになる比視感度に対する修正提案や、その後の測定データと CIE 1931 等色関数に乖離があるとの報告もあるが、CIE の標準は変更されていない。観察者間の等色関数のばらつ

きについては、おもに Stiles と Burch のデータ (CIE 1964 等色関数のもとになった 10° 視野 49 名の実験結果) を用いた検討が行われている¹³⁾。1989 年には、観察者間の等色関数のばらつきを見積もるために、standard deviate observer が定められている。等色関数のばらつきの原因としては、遺伝子に起因する分光感度の違いや、瞳の色の違い、年齢差 (高齢者の水晶体の黄化) 等が挙げられる。また、網膜の黄斑の影響で、色が呈示される大きさ (視野角) によっても、等色関数は変化する。

このように、CIE が規定している等色関数は、必ずしも絶対的に信頼できるものではなく、実際の等色関数にばらつきがあることは知られているにもかかわらず、等色関数の測定 of 煩雑さなどから、広範囲な等色関数の測定結果は、十分に得られているとはいえない。また、これまでのカラーの映像機器は三原色に基づいているため、詳細なデータを集めても利用方法が存在しなかったことも、十分な研究が行われていない一因と考えられる。

等色関数の個人差が無視できない場合、2 種類の刺激が呈示されたとき、ある人には同じ色に知覚されても、別の人には異なる色に見える現象が発生する。これは、観察者メタメリズムとよばれ、標準的な等色関数に基づく色再現では解決できない問題である。三原色のディスプレイでは、標準観察者の等色関数を用いて色再現を行うと、標準観察者には実物とディスプレイ上の色が同等に観察できても、標準観察者とは異なる特性の観察者には異なる色として知覚されてしまう (図 2 (a))。

これに対して、実物からの反射光のスペクトルをディスプレイで再現 (分光色再現) すれば、どのような観察者にも、実物とディスプレイ上の画像が同じ色として知覚される (図 2 (b))。マルチスペクトル画像入力と多原色表示を用いることにより、表示される分光分布を多次元で制御できるので、実物からの反射光のスペクトルを近似して再現することが可能になる。

例えば、六原色表示では、6 自由度があるので、異なる 2 種類の等色関数をもつ観察者に対して、同時に等色を与えることは容易に理解できる¹⁴⁾。また、実際の等色関数のばらつきがどのような性質をもつかがわかれば、比較的少ない原色数で、多数の観察者に対して近似的に等色させることも可能と予想できる。このような技術は、テキスタイルや印刷の色調整など、高精度な色再現が必要な分野への応用が期待される。

以下では、まず NV-RC で開発された六原色ディスプレイを用いて、映像色再現における個人差の影響について実験的に調べた結果を紹介する。また、第 4 章では、個人差

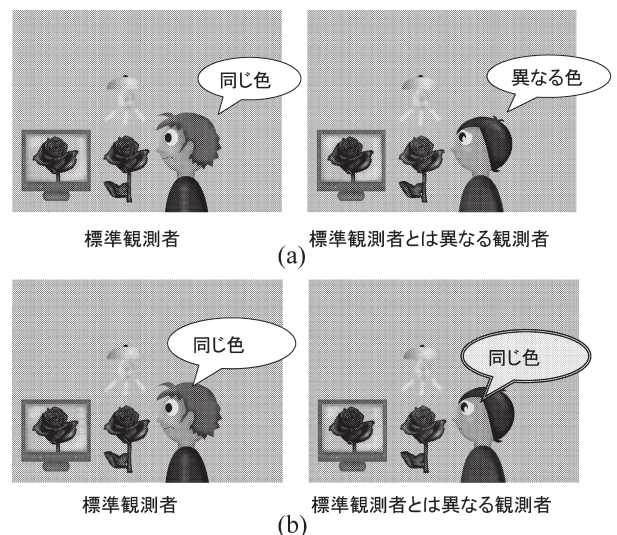


図2 分光色再現に基づく観察者メタメリズムの影響を解消する色表示の概念図。(a) 三刺激値を再現するディスプレイ。標準観察者に対して等色させた場合、標準観察者と異なる特性をもつ観察者は実物と表示色を異なる色として知覚される。(b) スペクトルを再現するディスプレイを用いれば、標準観察者、標準観察者とは異なる特性をもつ観察者が同時に実物と再現色を同じ色と知覚することができる。

の影響を考慮した多原色表示を行うための信号処理方法について述べ、第 5 章で、実際に多原色表示によって観察者メタメリズム影響を解消できることを示すために行われた、いくつかの実験結果を紹介する。

3. 六原色ディスプレイを用いた等色実験¹⁵⁾

実際の等色関数の個人差は、どの程度色再現に影響するのであろうか。本章では、1 章に述べた六原色ディスプレイを利用して、個人差の影響を定量的に調べる実験を行った結果を紹介する。実験では、六原色ディスプレイの 2 台のプロジェクターから再現される、異なる三原色の組を用いて、異なるスペクトル分布をもつ表示色ペアを等色させる。図 3 は、等色した 2 つの表示色におけるスペクトル分布の例である。実験は、12 人の被験者により行い、そのうち 3 名は本実験を 10 回行った。観察者は、一方の表示色の信号値を調整して 2 つの表示色を等色する。等色した後、分光計で 2 つの領域のスペクトルを測定し、 $L^*a^*b^*$ 色差を計算した。その結果を表 1 および図 4 に示す。この差は、「実際の観察者が同じ色と感じる色光を、標準観察者が観察したときに知覚される色差」と考えることができる。2 つの表示色は、観察者により等色されたにもかかわらず、大きな色差を生じている。また、個人内のばらつきよりも、明らかに個人間のばらつきが大きい。

なお、この実験で得られた差が、等色関数の適用方法に

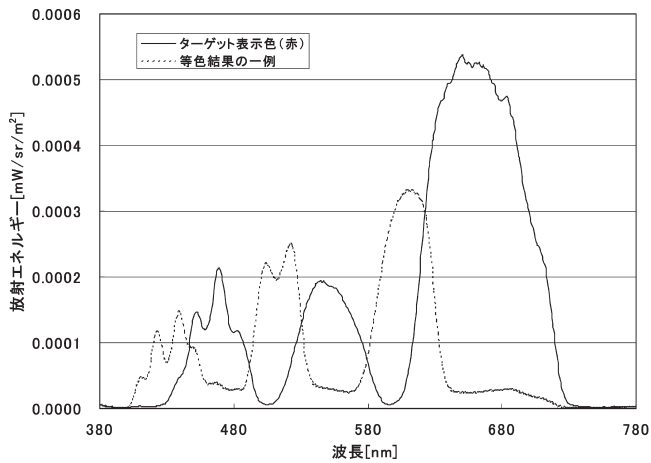


図3 六原色ディスプレイを用いて表示した2つの表示色のスペクトルの例(赤)。これらは等しいCIE 1931三刺激値をもつ。

起因するものでないことを確認するために、短波長領域での補正に有効といわれるJudd修正等色関数およびCIE 1964 10°視野等色関数を適用したところ、色により色差の増減はあるものの、人間の知覚できるレベルを大きく超える色差である点が変わらなかった。また、念のため、本実験で用いた分光放射輝度計の精度、表示色光の偏光方向の影響についても確認したが、測定精度に対する影響については無視できるレベルであった。

以上のように、異なるスペクトルで表示された2つの色光は、標準観察者と実際の観察者の間、および実際の観察者相互の間で、明らかに異なる色と知覚されるレベルの差がみられている。このように、観察者メタメリズムは、従来の条件等色に基づく色再現技術の精度に、大きな影響を及ぼしている可能性がある。

4. 観察者メタメリズムの影響を解消するための信号処理方法

観察者メタメリズムに対応した多原色分解手法としては、複数の観察者に対する三刺激値の誤差を最小にすることを目標とした刺激値近似法^{16,17)}や、等色関数を多次元に拡張した多次元測色値再現法¹⁴⁾、標準観察者に対する三刺激値のマッチングの条件を満たしたうえで再現されるスペクトルの誤差を最小とするスペクトル近似法¹⁷⁾、などが提案されている。ここでは、スペクトル近似法の考え方を説明し、また同様の方法で、刺激値近似や多次元測色値再現も実現できることを述べる。

いま、MSCから分光推定を行うことなどによって求めたスペクトル $Q_t(\lambda)$ を再現することを考える。再現目標の $Q_t(\lambda)$ と、 M 原色の加法混色により再現した色とのス

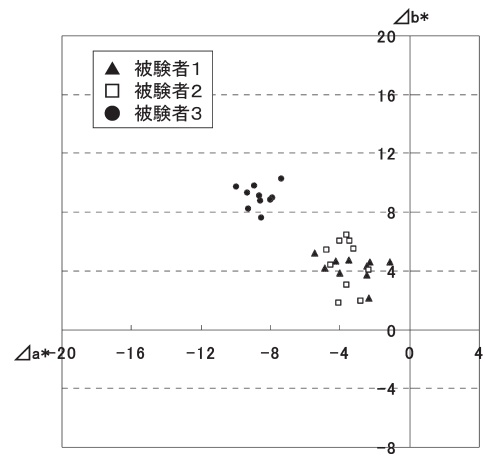


図4 3人の被験者により10回の等色実験を行った結果の例。標準観察者が同一色と知覚する点を原点とし、そこからのずれをCIE L*a*b*空間での色差で表現している。

表1 観察者に等色された2つの表示色間での色差(CIE L*a*b*空間における10名の観察者の平均および最大)。

色票	平均/最大	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
赤	平均	-1.40	-5.50	7.36	9.52
	最大	-2.37	-11.87	11.34	15.51
緑	平均	-0.93	-8.07	6.95	11.54
	最大	-2.99	-15.80	13.73	20.94
青	平均	-1.11	-10.95	15.57	19.12
	最大	-1.86	-16.00	21.58	25.95

ペクトル二乗誤差 E は、以下の式で与えられる。

$$E = \int \left[Q_t(\lambda) - \left\{ \sum_{i=1}^M a_i P_i(\lambda) + b(\lambda) \right\} \right]^2 d\lambda \quad (1)$$

ここで、 $P_i(\lambda)$ および $b(\lambda)$ は原色光とバイアス光のスペクトル、 a_i は i 番目の原色の信号値(ここでは輝度に対して線形と仮定する)を表す。 E を十分小さくする a_i を求めれば分光的な色再現を行えるが、原色数は限られているため、近似精度は高くない。スペクトルの近似精度が不十分であると、観察者に対する三刺激値の誤差は大きくなってしまふ。そこで、標準観察者の三刺激値が一致することを拘束条件として、式(1)の最適化問題を解く。拘束条件を定式化すると、

$$\int C_k(\lambda) Q_t(\lambda) d\lambda = \int C_k(\lambda) \left\{ \sum_{i=1}^M a_i P_i(\lambda) + b(\lambda) \right\} d\lambda \quad (2)$$

となる。ここで、 $C_k(\lambda)$ ($k=1,2,3$)は標準観察者の等色関数を表す。また、信号値 a_i は

$$0 \leq a_i \leq 1 \quad (3)$$

の条件を満たす必要がある。

以上より、スペクトル近似法における信号値 a_i の算出

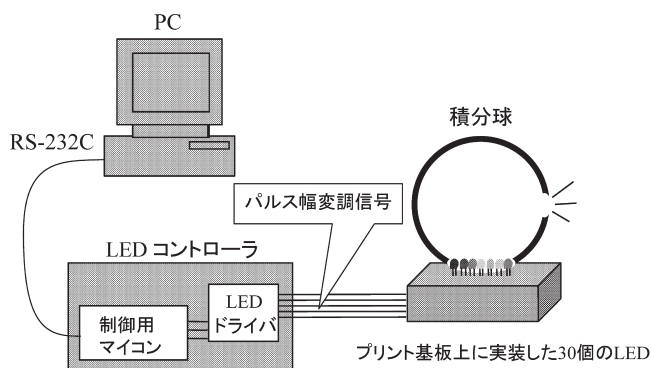


図5 LEDを用いた電子色票システムの構成図。基板上にはんだ付けされた7種30個のLED、積分球、コントローラ、PCから構成される。各LEDの発光強度はコントローラによるパルス幅変調で制御される。LEDを覆うように配置した積分球の内部で7色の光が混色する。積分球には、LEDの穴以外に直径20mmの開口があり、ここから混色した光を観察する。

は、(2)の等式、(3)の不等式の拘束条件のもと、式(1)の目的関数を最小化する最適化問題となる。この目的関数は凸関数であるため、勾配がゼロである点は唯一の最適解であることが保証される。このような拘束条件付最適化問題は、二次計画法や縮小勾配法、ラグランジュ未定乗数法と繰り返し計算を組み合わせた計算法などによって、解くことができる。また、計算量を削減する方法として、まずラグランジュの未定乗数法により a_i を求め、求めた a_i が不等式の条件を満たしていれば、それを解として採用し、満たしていない場合のみ、反復的アルゴリズムにより解を求める、という方法も提案されている。

一方、もし、あらかじめ複数の観察者の等色関数が得られていれば、その複数の観察者に対して、観察者メタメリズムを最小にする多原色信号値を求めることもできる。その場合、式(1)の目的関数のかわりに、

$$E = \sum_{k=1}^K \left[\int C_k^c(\lambda) Q_i(\lambda) d\lambda - \int C_k^c \left\{ \sum_{i=1}^M a_i P_i(\lambda) + b(\lambda) \right\} d\lambda \right]^2 \quad (4)$$

とおけばよい。ただし、 $C_k^c(\lambda)$ は複数の観察者の等色関数に対応するものであり、例えば L 人の観察者を考えたとき、 $K=3L$ 個の等色関数を用いる。また、多数の観察者の等色関数を主成分分析することなどによって、 K 個の関数(多次元等色関数)を求め、これを $C_k^c(\lambda)$ としてもよい。このような考え方で、複数の観察者の等色関数を得られている場合に、それを用いて多原色信号値を算出する手法もいくつか提案されているが、現状では複数の観察者の等色関数として利用できるものは限られており、実用面では今後の研究が必要である。

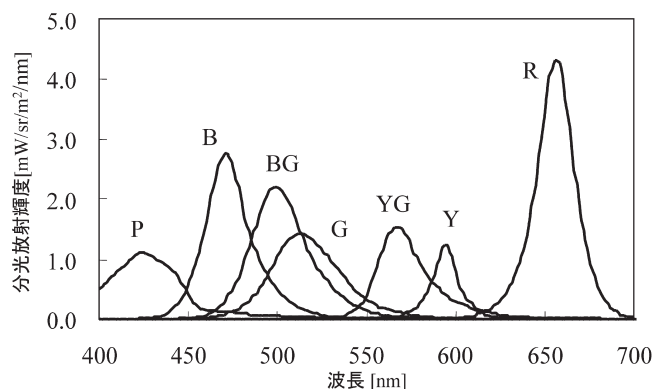


図6 原色として用いた7色のLEDの発光スペクトル。

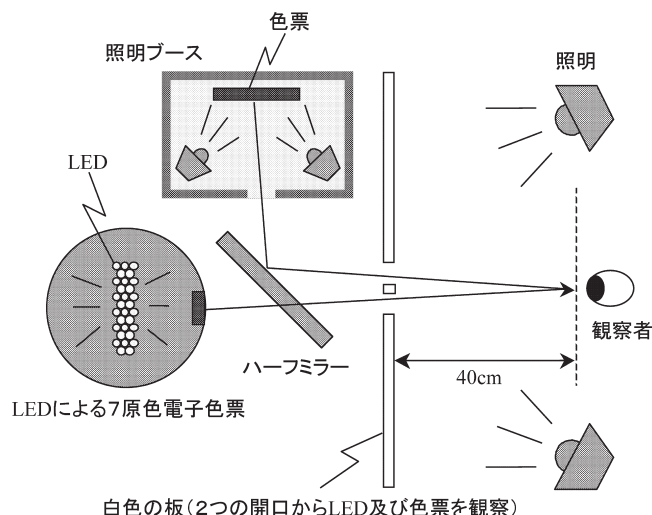


図7 七原色電子色票を用いた実験の配置。

5. 多原色表示システムを用いた実験

実際に観察者メタメリズムの影響がどの程度低減できるかを確認するには、一般的に用いられる標準色空間上の評価では不十分である。もし、各個人の等色関数が測定されていれば、数値的な評価が可能であるが、等色関数の測定は容易ではない。そこで、提案手法の効果を裏づけるために、いくつかの視覚実験が行われている。以下では、七原色電子色票と六原色ディスプレイを用いて行われた実験の結果を紹介する。

5.1 七原色LED電子色票¹⁷⁾

本節では、7色のLED(light-emitting diode)を用いた七原色電子色票システム(図5)による実験結果を紹介する。図6に、本システムで用いている7色のLEDのスペクトルを示す。実験の配置は、図7に示すように、観察者とスクリーンとの距離は約40cmで、一辺が0.8cmの正方形の窓(視野角1.1°相当)が2つ隣り合って配置されている。ハーフミラーを介して、左の窓から七原色電子色票

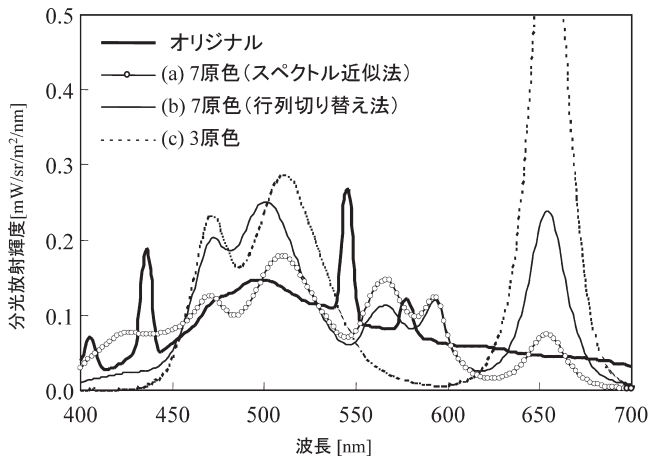


図8 6500 K の相対色温度の照明光下における bluish green の色票のスペクトルと七原色電子色票システムにより再現された3種類のスペクトル。

の再現光を、右の窓から色票の反射光を観察する。色票は、色温度 6500 K の光源で照明されている。色票には、Macbeth ColorChecker の bluish green (以下 BG と表記)、magenta (以下 MA) の2色を用いている。なお、スクリーンは白色で、室内の照明は点灯し、観察者は明順応状態にある。

実験では、まず、色票からの反射光スペクトルを、観察者の目の位置に分光放射輝度計を配置して測定した。そして、計測したスペクトルを再現するための七原色信号値を、提案手法、行列切り替え法⁹⁾、B、G、R の原色のみを用いた 3×3 の行列による変換 (以下 BGR 三原色法と表記)、の3種類の手法により求める。そして、これらの信号値により七原色電子色票で再現された色のスペクトルを計測した。BG の色票のスペクトルと、その再現結果を図8に示す。また、スペクトルの再現誤差と、CIE 1931 等色関数を用いて算出した色差を表2に示す。3手法とも、表示システムのモデル化誤差などの影響により測色値は完全に一致してはいないが、離間比較ではほぼ知覚されないレベルの差であり、本実験で問題とはならないと考えられる。

被験者は、BG については6名、MA に対して4名である。左窓に2種類の再現色が順番に呈示され、被験者はどちらの再現が右窓の色票の色に近いかを答える。表3に、この実験結果を示す。BG については、ほとんどの被験者が、提案手法が最も実物に近いと答えている。MA については、BGR 三原色法に対してはすべての被験者が提案手法のほうが実物に近いと答えたが、提案手法と行列切り替え法の比較では、両者を選んだ人数は同数であった。表2に示す通り、BG では、提案手法のスペクトル再現誤差は行列切り替え法より小さいが、MA ではほぼ同じとなって

表2 2色の色票を七原色により再現したときのスペクトルおよび色の再現誤差 (色再現誤差は標準観測者の色空間における色差を表している)。

再現手法		色票	
		BG	MG
スペクトル再現誤差	七原色 (提案手法)	0.46	0.70
	七原色 (行列切り替え法)	0.74	0.73
	BGR 三原色法	1.80	1.96
色再現誤差 E^*ab	七原色 (提案手法)	0.99	1.49
	七原色 (行列切り替え法)	1.12	1.69
	BGR 三原色法	1.44	0.65

表3 七原色電子色票を用いた視覚実験結果。2種類の色票 (BG: bluish green, MG: magenta) に対して、提案手法と行列切り替え法、BGR 三原色法のそれぞれを視覚的に比較し、より実物に近いと選択した人数を示す。

比較手法	BG	MG
提案法/行列切り替え法	6/0	2/2
提案法/BGR 三原色法	5/1	4/0

いる。三原色表示は、どちらの七原色表示よりもスペクトル再現誤差が大きい。この結果と視覚的な比較実験の結果から、スペクトルの再現誤差を小さくすることで、視覚的な誤差を抑制できることが確認できる。

5.2 六原色ディスプレイを用いた画像表示による評価¹⁸⁾

これまでに、5章1節で述べた実験と同様に六原色ディスプレイに色票を表示し、これを実際の色票と比較する実験も行われ、4章に述べたスペクトル近似法の有効性は実証されている¹⁾。本節では、それに加えて、多数の色が混在している一般の画像を用いて行った実験結果について述べる。

この実験では、入出力機器に高い色再現精度が要求される。そこで、画像撮影には16バンドMSCを用い、多原色表示には六原色DLPプロジェクターを用いている。入力システム、表示システムのそれぞれについて、画像の中心付近における色再現精度をMacbeth ColorChecker 24色を用いて実験的に評価した結果、入力・出力系とも平均色差 $\Delta E^*ab=1$ 程度、最大色差 $\Delta E^*ab=2\sim 2.5$ と十分小さな色差の値となり、色再現システム全体で実物比較実験が可能な色再現精度が得られている。

実験で用いた撮影画像を図9に示す。背景や大きさの違いが見えに影響しないように、背景も含めた照明ブース全体をMSCで撮影し、実物大で六原色表示を行った。配置は、図10のように被写体をスクリーンの隣に置き、スクリーンには、スペクトル近似法と他の多原色分解法によって再現された画像を並べて表示した。なお、ディスプレイ上の表示位置により若干原色スペクトルが異なるので、その



図9 実験に用いた画像の一例。実物の色は背景が薄い青、模様が緑、青、ピンク色で構成されている。

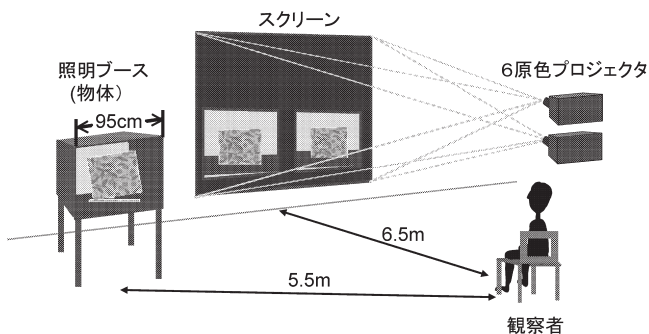


図10 比較実験の配置。被験者は両眼自由視でスクリーン上に再現された2種類の画像と照明ブース内の実物を比較し、色再現の意味で実物に近い再現画像を選択する。

影響の補正を行っている。スペクトル近似法と比較する手法は、等輝度面線形補間法⁹⁾、行列切り替え法⁸⁾、擬似三原色表示である。擬似三原色表示とは、六原色中2色を同一の信号値で制御することで、擬似的に三原色を構成する方法である。実験には淡い水色地と淡いクリーム色地の服生地¹⁾の2枚を用いているので、擬似三原色表示にすることで、色域外になる画素はみられなかった。被験者には、多原色分解手法を伏せ、表示位置や呈示順序はランダムに変化させて回答させた。

被験者はいずれも、色再現に関心がある11名である。「区別がつかない」という回答も認め、これを除いたものを有効な回答（有効回答の割合は89.4%）とした。表4は、各手法について、色再現の意味で実物に近いと回答された数を表している。この結果から統計的な検定を行った結果、スペクトル近似法の有効性が検証されている。

以上の実験から、多数の色が混在している一般の画像でも、スペクトル近似法に基づいて六原色で再現した場合に、三刺激値の一致に基づく多原色分解法と比較して実物に近い色を知覚できるといえる。すなわち、基礎的な実験ではあるが、画像表示において、多原色による観察者メタメリズムの影響低減の効果が実証されている。

表4 六原色による画像再現結果と実物比較において、より実物に近いと選択された回数。

比較手法	選択された回数
提案法/等輝度面線形補間法	32/8
提案法/行列切り替え法	40/3
提案法/擬似三原色法	32/3

本稿では、マルチスペクトルと多原色による映像色再現システムのひとつの機能として、観察者メタメリズムの影響を解消する色再現が可能であることを解説した。グラフィックアートなどの分野で課題となる、測色値を一致させても実物と表示色の見えが合わないという問題に関しては、見えのモードの不一致や実物と画像の大きさの違いなども影響するが、表示の際の工夫によってこれらを一致させることも可能である¹⁹⁾。そのうえで、ここで述べたような方法を用いることにより、実物と表示色を視覚的に一致させる技術が確立するものと考えられる。

さらに、筆者らのグループでは、個人の等色関数を測定し、ここで述べたような観察者メタメリズムの影響を解消する色再現技術の効果を検証する実験を進めている²⁰⁾。今後、より幅広い等色関数の測定データを収集し、多原色など高度な色再現技術への活用を図ることが期待される。

なお、ここで紹介した研究は、NICTのナチュラルビジョンの研究開発プロジェクト（総括責任者：大山永昭東工大教授）、東京工業大学とオリンパス(株)、(株)NTTデータの共同研究などとして行われたものである。また、「色の見えの個人差に関する研究体」（代表：内川恵二東工大教授）のメンバーとの有益な議論のもとに実施されている。一部の実験結果は、筆者の所属する研究室の大学院生によるものである。なお、第5章1節の七原色LED電子色票は、倉敷紡績(株)との共同研究により試作された。関係諸氏に深く感謝します。

文 献

- 1) M. Yamaguchi, T. Teraji, K. Ohsawa, T. Uchiyama, H. Motomura, Y. Murakami and N. Ohya: "Color image reproduction based on the multispectral and multiprimary imaging: Experimental evaluation," Proc. SPIE, **4663** (2002) 15-26.
- 2) 山口雅浩: "ナチュラルビジョン—多原色に基づく新しい映像システム—", 映像情報メディア学会誌, **58** (2004) 1722-1727.
- 3) 平成11年度～平成15年度“ナチュラルビジョンの研究開発プロジェクト”成果報告書, 通信・放送機構 (2000-2004).
- 4) B. Hill: "Optimization of total multispectral imaging systems: Best spectral match versus least observer metamerism," Proc. SPIE, **4421** (2002) 481-486.
- 5) H. Haneishi, T. Hasegawa, A. Hosoi, Y. Yokoyama, N. Tsumura and Y. Miyake: "System design for accurately

- estimating spectral reflectance of art paintings,” *Appl. Opt.*, **39** (2000) 6621–6632.
- 6) T. Jetsu, P. Herzog, M. Yamaguchi, T. Jääskeläinen and J. Parkkinen: “Standardization of Multispectral Image Formats,” *10th Congress of the International Colour Association (AIC), Colour 05* (2005) pp. 125–128.
 - 7) T. Ajito, T. Obi, M. Yamaguchi and N. Ohya: “Expanded color gamut reproduced by six-primary projection display,” *Proc. SPIE*, **3954** (2000) 130–137.
 - 8) T. Ajito, K. Ohsawa, T. Obi, M. Yamaguchi and N. Ohya: “Color conversion method for multiprimary display using matrix switching,” *Opt. Rev.*, **8** (2001) 191–197.
 - 9) H. Motomura: “Color conversion for multi-primary display using linear interpolation on equi-luminance plane method (LIQUID),” *SID J.*, **11** (2003) 371–378.
 - 10) F. König, K. Ohsawa, M. Yamaguchi, N. Oyama and B. Hill: “A multiprimary display: Optimized control values for displaying tristimulus values,” *Proc. PICS Conference* (2002) pp. 215–220.
 - 11) H. Kanazawa: “Color conversion method for multiprimary displays using a spherical average method,” *The Society for Imaging Science and Technology & The Society for Information Display (IS&T/SID), 12th Color Imaging Conference* (2004) pp. 65–69.
 - 12) Y. Murakami, N. Hatano, J. Takiue, M. Yamaguchi and N. Ohya: “Evaluation of smooth tonal change reproduction on multi-primary display: Comparison of color conversion algorithms,” *Proc. SPIE*, **5289** (2004) 275–283.
 - 13) W. S. Stiles and J. M. Burch: “N.P.L. colour-matching investigation: Final report (1958),” *Opt. Acta*, **6** (1959) 1–26.
 - 14) K. Ohsawa, F. König, M. Yamaguchi and N. Ohya: “Multi-primary display optimized for CIE1931 and CIE1964 color matching functions,” *Proc. SPIE*, **4421** (2001) 939–942.
 - 15) K. Ohsawa, T. Teraji, F. König, M. Yamaguchi and N. Ohya: “Color matching experiment using 6-primary display,” *Proc. 3rd International Conference on Multispectral Color Science* (2001) pp. 85–88.
 - 16) F. König, K. Ohsawa, M. Yamaguchi, N. Ohya and B. Hill: “A multiprimary display: Discounting observer metamerism,” *Proc. SPIE*, **4421** (2001) 898–901.
 - 17) Y. Murakami, J. Ishii, T. Obi, M. Yamaguchi and N. Ohya: “Color conversion method for multi-primary display for spectral color reproduction,” *J. Electron. Imaging*, **17** (2004) 701–708.
 - 18) T. Uchiyama, M. Yamaguchi, H. Haneishi and N. Ohya: “A visual evaluation of the image reproduced by color decomposition based on spectral approximation for multiprimary display,” *International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGIV) 2004* (Aachen, Germany, 2004) pp. 281–285.
 - 19) 羽佐間歩, 岡嶋克典, 横井健司, 内川恵二, 山口雅浩, 喜多絃一: “多色刺激を用いたCRTディスプレイと色票間の知覚的カラーマッチング”, カラーフォーラム JAPAN 2002 論文集 (2002) pp. 13–14.
 - 20) 鎌田正智, 山内泰樹, 村上百合, 中野靖久, 小尾高史, 山口雅浩, 大山永昭, 内川恵二, 小宮康宏: “任意スペクトル提示装置を用いた等色関数の測定に関する基礎検討”, 第50回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (2002) p. 1088.

(2005年3月4日受理)