

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 3月31日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22700352

研究課題名（和文）

色空間の三次元網羅刺激を用いた表面色の情報表現の解明

研究課題名（英文） Understanding the neuronal representation of surface color through the extensive stimuli set across three dimensional color space

研究代表者

鯉田 孝和 (KOIDA KOWA)

豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・特任准教授

研究者番号：1045222

研究成果の概要（和文）：

表面色の脳内情報表現を解明するために、広輝度レンジの視覚刺激を表示可能なディスプレイを開発し、輝度と表面色認知に関わる実験を行った。開発したディスプレイにより10万：1の輝度比率をもつ画像の同時呈示が可能となった。装置の実効性は、動物行動実験、ヒト心理物理実験から確かめられ、光沢感・金属感といった表面色の属性知覚には輝度値の高さが重要であることが示された。

研究成果の概要（英文）：

High dynamic range display was developed for understanding neural representation of surface colors. A hundred thousand luminance contrast ratio was achieved by the display, and their effectiveness was examined by behavioral experiment of animals and human psychophysical experiments. These results suggested that luminance would be an important cue to understand the surface properties, such as glossiness and metallic perceptions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：脳神経科学・神経科学一般

キーワード：認知神経科学、視覚、色覚、実験心理学、ディスプレイ、脳・神経、生理学

1. 研究開始当初の背景

色は物体識別のための有効な手がかりである。物理現象としての「色」とは、光の分光分布の偏りであり、多くの場合物体の表面で起こる光の吸収と反射に由来する。光の吸収の波長特性は物質の分子組成を反映しているため、食料の判断や血色状態といった生

体にとって極めて重要な情報が色に含まれることになる。このとき知覚される色は、物体に属した特徴として認識される。これを**表面色知覚**と呼ぶ。

色刺激は三次元の空間、二つの色度と一つの輝度で定義することができる。このことから二次元の色覚と、一次元の明るさ感覚とい

う互いに独立な特性として色覚の研究は行われてきた。しかし、色を表面属性として考える場合、色情報と輝度情報は独立ではない。反射面の色の鮮やかさと輝度にはトレードオフの関係があるからである。このような特性を持つ表面色の情報表現を正しく測定するためには、(1)色と輝度が組み合わされた色空間の三次元網羅刺激による応答特性の記録を、(2)照明環境を厳密にコントロールしたうえで行う必要があるが、これまでシステマチックに測定が行われた研究はない。

三次元色空間を扱う意義

表面色は反射強度に物理的な制限がある。すべての波長で100%の反射をする表面は白色であり、部分的な波長領域で光の吸収が起きると色がつく。つまり色づいた表面は、白色よりも輝度が低くなる。色づいた表面が最大どれだけの反射強度を持ちうるかは理論的に計算可能であり、表面色の色空間の形が示されている(MacAdam's limit: 図1)。色空間の形はいびつである。青は輝度が非常に低く、黄色は高い。赤は高彩度な刺激が存在するが、緑やシアンは高彩度な刺激が存在しない。視覚系はこの拘束条件下に適応して発達したと考えられる。実際にそれを示す心理データとして、彩度が高い刺激は輝度が低くても明るく見える現象(ヘルムホルツ・コールラウシュ効果)が挙げられる。この現象は、白色で強く応答する細胞と、青で強く応答する細胞で、輝度応答の特性が違うという可能性を示唆している

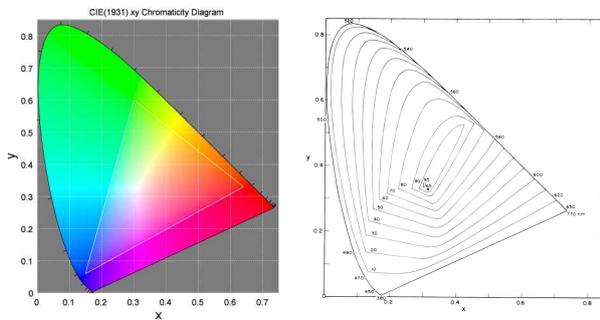


図1: 表面色の色空間。色を数値表示する CIE-xy 色度図(左)と、色づいた反射面が持ちうる反射強度の最大値を示す等高線(右)。照明光の白色と同じ色度で最大輝度が得られ(図の中央部)、反射面の彩度が上昇するに従って輝度は下がる(図の周辺部)。ただし等高線の形状は同心円形状ではなく、色相(中心から方位)ごとに、反射強度の限界輝度は異なることがわかる。理想的な色素を想定した際の理論限界ではあるが、実際の反射物体であっても類似した色相特性を持つ。

照明環境コントロールの必要性

色と輝度の拘束条件を議論するためには、刺激の輝度が反射率として何%に相当するのかを明確にする必要がある。これまでの研

究では、背景刺激として一様な灰色を呈示し、部屋の照明は暗くしていた。この条件では、灰色背景が反射率何%の物体面に相当するのかわからず、テスト刺激の反射率を推定する手がかりが無いことになる。さらに室内が暗いことで視野全体としては暗順応していることになるが、このような視野全体での順応状態が色や明るさの知覚に影響することが知られている(2002年に国際照明委員会によって色の見えのモデルとして勧告; CIECAM02)。そこで本研究では、明るく照明された室内に観察者(動物)を配置し、刺激ディスプレイ画面上での背景刺激の灰色が、反射率として何%に相当するのかわからずにした条件で実験を行うことで、表面色認知の神経機構の理解を目指すこととした。

以上の実験がなぜこれまで困難だったのかということ、刺激を表示するためのディスプレイが無かったからである。特に以下に示す3つの特性に制限がある。

(1)明るさが足りない

照明をつけた部屋でディスプレイを見る場合、発光しているような画像は表示することができない。これはディスプレイの白色強度は、画面のそばに白い紙を置いた場合と同じ程度の明るさを想定して作られているからである。

(2)黒さが足りない

近年の液晶テレビやプロジェクタは、光の強度を上げることを主眼に開発されている。その一方で、黒浮きと呼ばれる問題がある。これは黒を表示したときに黒がわずかに灰色がかかる現象であり、最高輝度が高いほど顕著である。一般的なディスプレイの白と黒の輝度比率は、500:1程度にとどまる。

(3)色域が狭い

図1の色度図の内側に書かれた三角形は、一般的なディスプレイで表示可能な色の範囲である。この外側の色は表示することができない。しかし、自然界に存在する物体色はこの色域の外側に位置することが珍しくない。また、画像の輝度を高くすると、表示できる色域は図の三角形領域より急激に狭まる。

これらの問題を克服するために、ディスプレイを開発する必要がある。色と明るさだけをコントロールするのであれば、LEDなどの光源を直接コントロールすることで視覚刺激を提示することは可能かもしれない。しかし、照明環境をコントロールするためには、周辺刺激として常に同一輝度の灰色を表示する必要があり、ニューロンの選択的応答を調べるためには、刺激の輪郭形状を自由に変わることが求められる。開発したディスプレイを用いて自由に色刺激を呈示して実験を行えば、表面色の神経表現を知るため重要な手がかりが得られると予想される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、表面色認知の特性とその神経メカニズムについての理解である。その際に、照明環境をコントロールした実験ブース内で、広い輝度レンジの刺激を呈示することで、表面の反射を模擬した見えから発光した刺激の見えまでの幅広い刺激条件を用意し心理実験および神経活動記録実験を行う点に特徴がある。申請期間内で申請者は、刺激を呈示するためのディスプレイの開発とそれを用いた心理実験、そして動物実験の3項目について研究をすすめることとした。

3. 研究の方法

ディスプレイの開発方法

液晶ディスプレイとプロジェクターを組み合わせることで、刺激の明るさレンジを大きく拡張する装置を開発する。一般に液晶ディスプレイには画面の裏にバックライトと呼ばれる一様な白色光を放つ板があり、画像は手前の液晶面で光がフィルターされることで作られる。ここでバックライトを取り外し、液晶の裏側からプロジェクターで画像を投影すると、バックライトの光を場所ごとに自由にコントロールできることになる。プロジェクターと液晶ディスプレイに同一の画像情報を送ると、明るいピクセルはより明るく、暗いピクセルはより暗くなり、広ダイナミックレンジの表示が可能になる。以上の装置を作成し、実際に高ダイナミックレンジの画像が同時表示可能かどうか測定して確かめる。

ヒト心理物理実験の方法

(1) 金色認知

市販品の高輝度型液晶ディスプレイを用いて、輝きの知覚と関係の深い金色知覚についての特性を明らかにする。実験は、ヒトを対象としたカラーネーミング法で行う。一様なパッチ画像と光沢表面を模擬した画像を呈示し、被験者は画像の色名を、基本11色名(赤、青、黄、緑、オレンジ、紫、ピンク、茶、白、黒、灰)と肌色、そして金、銀、銅、の15単語のどれかで呼称する。色度図上での分布ならびに、繰り返しと被験者間での一貫性を指標として、金色認知の特性を評価する。

実験は高輝度型ディスプレイ(CCL254i2, TOTOKU製、1~750 cd/m²まで呈示可能)を用いることで、カラーサンプルを輝度94 cd/m²(一様パッチの場合)または1~300 cd/m²(光沢画像の場合)の明るい強度で表示する。光沢画像は3Dグラフィック・レンダリングソフト(LightwaveおよびRadiance)による合成画像で、表面の鏡面反射と拡散反射パラメーターを複数段階設定することで金属感の感じられる画像から、マットな材質感を用意

した(ここでは金属条件のみの結果を示す)。画像の色は色度一定で、図3に示す範囲で様々な色を表示する。一様なパッチ画像はシルエットが同一で、内面が一様に塗られている。

(2) 光沢感評価

標準的な輝度特性を持つディスプレイであっても、金属表面を写真撮影して表示した場合、明るさ感や光沢感ほどの程度得られるのかをレーティング実験により確かめる。視覚刺激として金属の実素材サンプルを作成し、これを写真撮影することで金属感のある画像を用意した。一般的な輝度レンジのディスプレイを用いる場合、金属光沢の暗部からハイライトまでの広い輝度ダイナミックレンジを表示することはできない。金属光沢が感じられる露光強度を設定し撮影行くと、画像の光沢部位のピクセルは、大半が白飛びした。この刺激条件で、被験者は見えの光沢感を評価する。比較のため、金属サンプルとして20個、その他の素材としてガラス・プラスチック・木・石・皮・布を用意した。被験者は画像を見て、明るさ感、光沢感、を7段階で評価する。

動物実験の方法

動物実験では、まず単純なディスプレイを作成して行動実験を行う。広輝度ダイナミックレンジ呈示が可能な装置として、レーザーと発光ダイオードを用いて任意に色と明るさをコントロールする装置を制作し、動物の行動実験から色覚の特性を明らかにすることで、装置の有効性を実証する。

実験はカニクイザル4頭を用いて、光の検出閾値測定と、色弁別測定を行う。視覚刺激は発光ダイオードならびにレーザーを複数配置した光源を用意し、黒い箱の底部に密閉する。箱の内部壁面は白色に塗られており、色を混ぜる積分球としての役割を果たす。箱の側面には一部に直径8 mmの穴が開けられており、光はこの開口部から外部に発せられ、動物に呈示される。開口と光源は箱内で直行しており、直接光源の光が外に出ることはない。検出閾値測定実験では592 nmのオレンジ色、660 nmの赤色光源を用いた。刺激はどちらかの光源が様々な強度(0.02~20 cd/m²)で呈示され、動物は光が呈示されたときにボタンを押すと報酬を得る。光の強度に対して検出確率を測定することで、知覚確率曲線が得られ、検出閾値が決定できる。色弁別測定実験では、560 nmの黄緑色、660 nmの赤色の光源を用いた。刺激は2つの光源の様々な強度比で混色し呈示される。同じ光源ボックスが三種類用意され横方向に並置されことで、刺激は三種類が呈示されることになる。3つの刺激うち1つはターゲット、残り2つはディストラクターとなり、動物はターゲットを見つけて該当するボタンを押すことで

報酬を得る。ターゲットの位置は毎トライアルごとにランダムである。ターゲットの色は毎トライアル同じ強度の黄色である。ディストラクターの2つは互いに同一の色と強度を持ち、毎トライアルごとに赤から緑までの様々な明るさを含むセットからランダムに選び出される。ディストラクターセットはターゲットと同一の色輝度も含まれる。ターゲットとディストラクターの色が類似している条件では誤答が増えることが予想されるが、その類似条件を定量的に求めることで、色弁別能の特性を明らかにすることができる。

4. 研究成果

得られた研究成果は以下の三点である。

(1) 広い輝度レンジを持つディスプレイを開発した。(2) 心理実験により、輝きの認知に関わる金色知覚について明らかにし、高輝度型ディスプレイと標準的な明るさのディスプレイを利用する手法を確立した。(3) サルの行動実験により、分光検出感度と色弁別能を測定し、開発した刺激呈示装置の有効性を実証した。以上の成果について、順に述べる。

(1) 広い輝度レンジの刺激を呈示可能なディスプレイを開発した。

現時点で、一般的なディスプレイより 100 倍以上表現域が広い $1000 \sim 0.01 \text{ cd/m}^2$ の同時提示を達成した (図 2)。この視覚刺激の見えは、輝いている面から漆黒までに対応する。装置は、液晶ディスプレイとして 17 イ

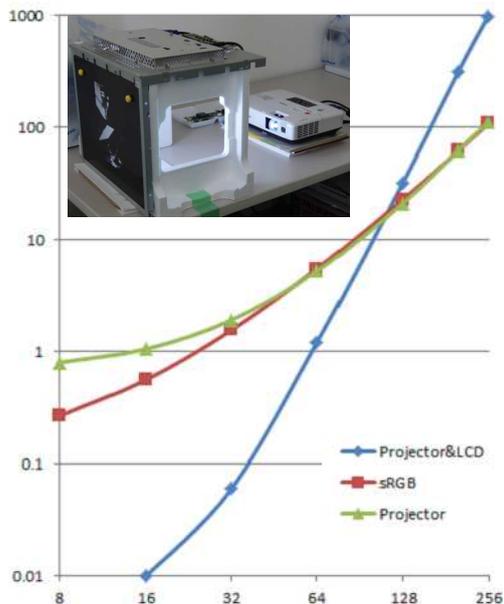


図 2 : ディスプレイの輝度レンジ測定結果。一般的なディスプレイ (sRGB) と、プロジェクター単体だけを動作させた場合の輝度を併記する。横軸は表示画像のデジタル強度、縦軸は測定された輝度値である。インセットは装置の外観写真。

ンチ EIZO-L567 (ナナオ製)、プロジェクターとして EB1915 (EPSON 製) を用いた。画面表示の位置調整後に、表示される画像の測光を行った。測光は色彩輝度計 (CS200, コニカミノルタ製) にて行い、直径 3 cm の円形領域に任意の強度の白色を提示し、円形の中央部分から測定した。測定用画像の周辺には $15 \times 15 \text{ cm}$ の灰色 (0.5 cd/m^2) の周辺刺激が常に表示される。得られた性能は、5 Log unit (10000:1 輝度比) 以上に達しており、一般的なディスプレイと比較して暗黒部の黒さに大きな差がある。測定装置の感度限界が 0.01 cd/m^2 であるため、デジタル入力値 16 DIGIT 以下では測定ができなかった。また、表示可能な色域は、プロジェクター単体で表示した色域とほぼ同等であった。

(2) ヒトを対象とした心理物理実験による輝き認知に関する研究

① 金色認知実験 :

6名の被験者の色名呼称の結果から、一般的なパッチ画像の場合は基本色名と肌色、光沢画像では基本色名と金、銀、銅によって色度領域が明瞭に分割されることが分かった (図 3)。呼称の繰り返しへの一貫性ならびに、被験者間の一致度に注目すると、基本色名も金銀も同等に安定して呼称されることが分かった。コントロール実験として、一般的な CRT ディスプレイ ($0.1 \sim 100 \text{ cd/m}^2$) に同じ画像を表示したところ、輝度レンジは平均 10 cd/m^2 程度となり、観察者が 5 分以上暗順応行っても、刺激に暗さが感じられ、金色領域で茶色や黄色といった光沢感の減少と推定される結果が得られた。以上の結果から、色の見え、特に光沢感を含む画像の場合、刺激輝度の絶対強度が重要である可能性が示唆される。

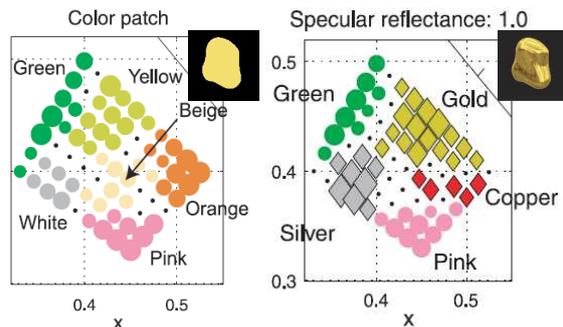


図 3 : カラーネーミングの結果。左 : 一般的なパッチ画像を用いた場合。右側 : 金属光沢を模擬した画像を用いた場合。図は CIE-xy 色度図の白～黄色の領域を拡大して表示している。6 人の被験者が 2 回応答した結果から、一貫性の高い応答結果を大きいシンボルでカラー表示し、一貫性が 50% 以下の結果を黒点で示す。金色 (GOLD) に代表される金属光沢が、基本色名と同程度に安定して色名呼称されている。(Okazawa, et al., 2011)

annual meeting. San Diego, CA,
USA (2010年11月16日)

他

〔図書〕(計1件)

日本色彩学会【編】部分執筆、東京大学出版
会、新編色彩科学ハンドブック 第3版、総
ページ数 1792 (348~349) (2011年4月20
日発行)

〔その他〕

雑誌論文の解説記事：

[http://www.nips.ac.jp/scinfo/2011
okazawa-A%20.html](http://www.nips.ac.jp/scinfo/2011okazawa-A%20.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鯉田 孝和 (KOIDA KOWA)

豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融
合研究所・特任准教授

研究者番号：10455222