

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700206

研究課題名(和文) Classification Image法に基づく脳内色表現の数理モデル構築

研究課題名(英文) Construction of color representation models in the human visual system based on classification image method

研究代表者

永井 岳大 (Takehiro, Nagai)

山形大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40549036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、心理物理実験と逆相関法を組み合わせたClassification Image法を用いて脳内における色情報表現の数理モデルを構築することを目的とした。得られた成果は以下の通りである。1. ランダム色ノイズ刺激に対する多数の被験者応答を脳内色表現モデルで解析することにより、心理課題に関わる脳内色表現の特性を抽出する方法を確立した。2. 上記方法より、低次元な反対色表現が色コントラスト知覚に関わることを示唆した。3. 同一の色刺激に対しても、心理課題により、関与する脳内色表現が異なることを示した。

研究成果の概要(英文)：Our aim was to construct numerical models of color representation in the human visual system using a psychophysical reverse correlation method. The results of our project are as follows. 1. We established a method to estimate color representation properties in the human visual system that is based on an analysis of a huge number of observers' responses for randomly colored stimuli using color representation models. 2. Our results suggested that rather low-level opponent color representation contributes to color contrast perception using the method above. 3. Our results suggested that different color representations are involved in different tasks of color perception even for an identical color stimulus.

研究分野：視覚心理物理学

キーワード：色覚 逆相関法 心理物理学

1. 研究開始当初の背景

「色」は最も基本的かつ重要な視覚属性の一つであり、また様々な映像技術に活用されている。脳内における色情報表現を数理モデルで表現することにより、眼への入射光と色知覚の関連が容易に理解できるようになるため、脳内色情報表現の数理モデル化は基礎研究としての色覚研究において非常に重要な課題となっている。

従来は、多色テクスチャ刺激を用いたノイズマスキング法あるいは時間的に色が変化する刺激を見続けるコントラスト色順応法と呼ばれる心理物理実験により主に脳内色情報表現が調べられてきた (Hansen & Gegenfurtner, 2006, Webster & Mollon, 1991 など)。これらの手法は、生理学的知見との対応などから脳内色表現に関する情報が得られることが示されており、その点では非常に有効である。しかし、これらの手法では、各実験の刺激が有する色分布パラメータに関わる色表現情報しか取得できないため (事前に設定したパラメータに関する情報のみが得られるという意味で一般的に「順相関法」と呼ばれる)、数理モデル化という目的に対しては断片的な情報しか得られないという欠点があった。

ところで、近年、視知覚に強く関わる視覚刺激中の成分を抽出する心理物理学的手法として、Classification Image 法 (以下、CI 法と呼ぶ) が提案された (Gold et al., 2000 など)。CI 法とは、ランダムなノイズを重畳した視覚刺激に対し被験者の心理応答を取得し (例えば見える、見えない、などの Yes/No 応答が多い)、多数回の試行の後に被験者応答に基づきノイズ刺激を分類・解析することで、被験者応答に関わるノイズ中の画像情報を推定する手法である。CI 法は、対象とする刺激パラメータを事前に決定するのではなく、被験者応答に基づきランダムノイズ中の情報を事後抽出することから、上述した順相関法に対し「逆相関法」と呼ばれる。CI 法は錯視の可視化や顔認知など、様々な視覚科学分野で適用例が増えている。このように多くの利点がある CI 法を色覚研究に適用した例がいくつか報告されている。しかし、一般的な CI 法の手順に従った解析では、色知覚に関わる画像情報や脳内色情報表現を適切に抽出できないことが指摘されている (Esker, 2009) ため、CI 法に基づく色覚研究は現状ではあまり進んでいない。

2. 研究の目的

本研究では、CI 法のデータがランダムノイズ刺激から生成され、様々な刺激パラメータ成分を豊富に含むことに着目し、CI 法に基づき脳内色情報表現の数理モデル化を行うことを目指す。一度 CI 法の実験手順によりランダム色刺激と被験者の色知覚の対応関係のデータを取得してしまえば、色知覚を決定

する画像要因は数理解析を様々な角度 (パラメータ) に着目して行うことにより事後抽出できると期待される。これは、従来のノイズマスキング法が様々な色分布パラメータの影響を心理物理実験により逐次検討していたことと比べて大きなメリットになると考えられる。また、単純に CI 法を色覚研究に適用すると適切な結果が得られない問題に対し、CI 法の解析方法を拡張することで対処可能であると考えられる。そこで本研究では、色覚研究にも適用できるよう CI 法を拡張した新たな心理物理学的逆相関法を提案し、効率的に脳内色表現を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 心理物理実験

本研究は CRT ディスプレイに呈示される視覚刺激を用いた心理物理実験により遂行された。色光の物理量を非常に厳密に統制するために、Cambridge Research System 社の Bits++ を介して刺激を呈示することで、RGB それぞれの発光体について 14bit 階調という超高解像度の色光作成を実現した。

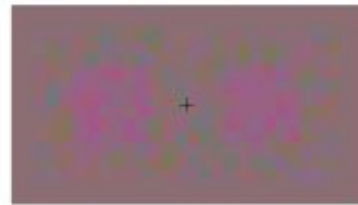


図1 呈示刺激の例。

図1に呈示刺激の例を示す。呈示刺激は左右2つの同一色の正方形 (シグナル正方形) から構成される信号画像と、多色テクスチャであるノイズ画像の2つを、60Hz でフリッカ合成することで作成された。刺激色は、DKL 色空間と呼ばれる、輝度、赤緑 (0° - 180°)、青黄 (90° - 270°) の3軸からなる色空間の等輝度平面上で定義された。信号正方形の色度の色角度 (色相) は、 45° 、 135° 、 225° 、 315° の4条件であった。ノイズ画像の色度は、白色点を中心とする分布からランダムに選択された順応色付近条件 (Near) と、信号色方向と一致する有彩色分布からランダムに選ばれた順応色外条件 (Away) の2条件であった。

心理物理実験の各試行では、ノイズ画像の各要素の色度が色分布内からランダムに選ばれることにより、左右のシグナル正方形の見た目の上での色コントラストが試行毎に変化した。この刺激は灰色背景上に 0.75 ms 間呈示され、被験者は、左右のシグナル正方形のどちらがより強い知覚の色コントラストを持つか (背景色からより強く異なっているように見えるか) を、刺激の呈示後または呈示中に二肢強制選択法により応答した。こ

の手続きを各被験者、各実験条件において1,000 試行繰り返した。Near 条件と Away 条件の試行は、別のセッションで行われた。

(2)基本的 CI 解析

はじめに、従来どおりの CI 法の解析手法を実験結果に適用した。実験から得られるデータは、ノイズ色度とそれに対する被験者応答(“右”または“左”)の組合せであった。そこで、被験者にコントラストがより高いと応答された領域のノイズ色度を“高コントラスト色群”, 他方の領域のノイズ色度を“低コントラスト色群”と分類した。その後、ノイズテクスチャ要素ごとに各群内で色度を平均し、さらに群間の色度差を計算することで得られる画像を Classification Image(CI)と呼ぶこととした。すなわち、CI には、被験者により色コントラストが高いと判断されるときと低いと判断されるとき画像情報の違いが反映されることになる。

CI の一例を図 2 に示す。中央の黒四角形に囲まれた部分がシグナル正方形領域である。図 2 から明らかなように、全ての条件において、シグナル正方形領域内では他領域と異なる色に変調していた。また、この色変調は、単純にシグナル色と一致した色になっていたわけではなく、シグナル色とは少し異なる色が得られた。したがって、この領域内の色度(CI 色と呼ぶ)が被験者の色コントラスト判断特性を反映していると考えられるため、この CI 色を再現するために適した色表現モデルについて解析を進めることとした。

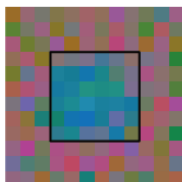


図 2 実験から得られる CI の例。この図は 135° のシグナル色を判断した場合の結果を示す。

(3)数理モデル解析

解析には、等輝度平面上で色選択性を持つ多数のメカニズムから構成される多数メカニズムモデルと呼ばれるモデルを用いた(D' Zmura, Knoblauch, 1998 など)。このモデルは、色覚に関する心理物理実験の解析でしばしば用いられ、また生理学研究などから得られる初期視覚野の脳細胞応答の特性とよく一致するものであることから、脳内色表現を表したものであると考えることができる。このモデルでは、メカニズムごとに、異なる色相に感度ピークを持ち、様々な感度幅を持つと仮定されている(例えば、赤色に感度ピークがあり、黄~赤~青の広い色相に感度を持つようなメカニズムが想定される)。すなわち、ある色光が入力されると、その色光の色相に大小様々な感度を持つ複数のメカニズムが

応答することになる。このモデルでは、知覚される色(つまりモデル出力)は複数のメカニズムの応答バランスにより決定される。このモデル内のメカニズムのパラメータとして、その数や感度を持つ色相の幅、メカニズム応答の足しあわせ特性など様々なものが考えられるが、ここでは感度幅は固定し、メカニズム数を 1 から 8 まで変化させた場合を考える。

一般的な CI 解析では、画像そのものを被験者応答によって分類する。それに対し、本研究における解析では、画像をモデル出力に変換してから被験者応答によって分類することを特徴としている。このアプローチは、被験者の応答に関わる色表現を推定することを目指したものである。具体的には、シグナル正方形部分のノイズ色成分に対するモデル出力とそれ以外の部分に対するモデル出力を計算し、その差が大きければ、知覚される色コントラストも大きくなると仮定した。その上で、モデル中のメカニズム数が 1~8 のそれぞれの場合において、被験者応答に最も良く合致するようにモデル中の各メカニズムの感度の大きさと感度ピーク色相を説明変数としてステップワイズロジスティック回帰分析により推定した。

モデルの評価は、被験者応答の再現性により行った。すなわち、最適化されたモデルは被験者の感覚と同様にランダムノイズ中のシグナル色のコントラストを出力することになるので、その出力に基づき被験者と同じ実験をおこなった場合の結果をシミュレートし、どの程度被験者に近い CI (例: 図 2) を出力したかにより、モデル性能を評価した。

解析に用いるモデルとして、皮質下より低次元な色情報表現に対応する反対色モデルも用いた。反対色モデルは上述した多数メカニズムモデルとほとんど同じ構成を持つが、メカニズム数が 4 であり、その感度ピーク色相が赤・青・緑・黄(0°, 90°, 180°, 270°)に固定されている点が異なる。多数メカニズムモデルと反対色モデルの性能を比較することで、色コントラスト判断に関わる色情報表現を探ることが可能となる。

4. 研究成果

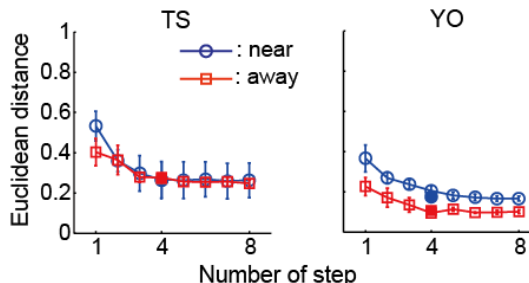


図 3 最適化されたモデル出力と被験者応答の差分

(1) モデルと被験者応答の違い

結果の一例として、最適化されたモデルの

出力と被験者応答の差分を図3に示す。横軸はメカニズム数、縦軸は色空間内のユークリッド距離として表したモデル出力と被験者応答の差分である。白抜きシンボルが多数メカニズムモデルの結果、横軸4の箇所にある塗りつぶしシンボルが反対色モデルの結果を示す。モデルと被験者応答との差分はメカニズム数1から4の間で大きく減少し、ステップ数4以降はほとんど変化しなかった。また、反対色モデルと被験者応答間の差分は、マルチプルメカニズムモデルの結果とほとんど同じだった。モデル間の性能を比較するために、反対色モデル、多数メカニズムモデルのメカニズム4、メカニズム数8の3モデルのユークリッド距離を分散分析により解析したところ、有意な主効果は見られなかった。シミュレーション結果と統計解析結果から、被験者の色コントラスト知覚応答を再現するためには、4つのメカニズムがあれば十分であり、さらに言えば、多数メカニズムモデルではなく反対色メカニズムでも十分であることが示唆された。

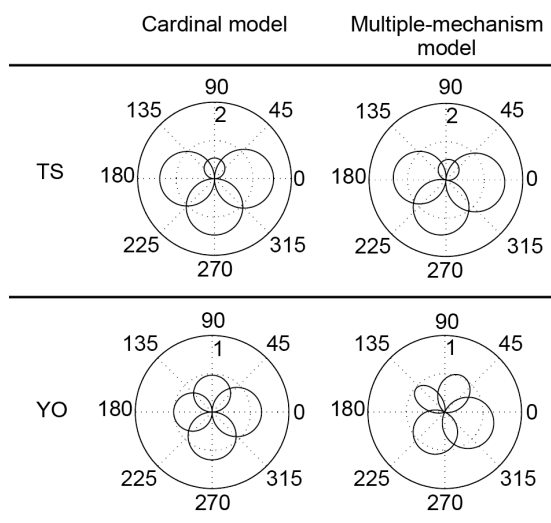


図4 最適化されたメカニズムの感度特性

(2)最適化されたモデルの感度特性

図4に最適化された反対色モデルとメカニズム数4の多数メカニズムモデルの感度特性を示す。多数メカニズムモデルの場合、被験者にもよるが、反対色メカニズムの高感度色(0°、90°、180°、270°)以外の色に感度を持つメカニズムが選択された。しかし、反対色モデルは4つのメカニズムの感度バランスを調整するだけで、今回の実験結果を多数メカニズムモデルと同程度のパフォーマンスで説明できた。すなわち、今回の実験で用いた色コントラスト判断課題においては、色メカニズムが4つ以上存在し、メカニズムの高感度色が色空間内で広域に広がっていれば、メカニズムの高感度色がどこにあっても被験者応答の予測が可能となると考えられる。したがって、色コントラスト知覚には、複雑な色表現を有する高次色表現ではなく、

反対色メカニズムのように比較的単純な色表現が関与する可能性が高いと言える。

しかしながら、今回のモデル出力結果では、被験者応答に対し少なくとも0.2程度のユークリッド距離(色差)が残った。実際の被験者のCI色のコントラストの強さは0.479というユークリッド距離であるため、0.2は無視できない大きさの残差である。したがって、解析に使用した色覚モデルは完全に今回の実験結果を再現できたとはいえない。被験者応答をより良く再現するためには、今回用いたモデルのメカニズム出力に非線形処理を加える、メカニズム間の出力足しあわせ特性を変更するなど、モデル改良が必要なのである。

本研究の成果をまとめると以下の通りとなる。従来の色覚CI法に、色表現モデルに基づく解析を組み合わせることで、色判断に関わる脳内色表現を推定する新たな心理物理学的逆相関法を確立した。単純なCI法では反対色モデルと多数メカニズムモデルの区別が難しいことが指摘されていたが(Esker, 2009)、提案手法は図3のように色知覚の記述により適したモデルを定量的に評価することができる。提案手法を用いることにより、色コントラスト知覚に関わる色表現としては、多数のメカニズムに基づく複雑な色表現より、反対色メカニズムあるいはその線形変換という単純な色表現が関わる可能性が高いことが示された。今後、この手法を様々な色知覚課題へ適用していくことにより、さらに色知覚に関わる色表現が明らかになっていくことが期待される。本報告書では結果は未掲載であるが、細かな色の識別(色弁別)と、大きな色差の感覚的判断(閾上の色差判断)では、関わる色表現が異なることが明らかになった。したがって、異なる視覚課題に対し提案手法を随時適用し色表現を明らかにしていくアプローチの妥当性が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

1. T.Sato, T.Nagai, S.Nakauchi: Reverse correlation analysis of chromatic contrast perception based on chromatic mechanism models. *Optical Review*, 21(5), 526-540, 2014. DOI: 10.1007/s10043-014-0083-0. 査読有.
2. T.Nagai, H.Kimura, & S.Nakauchi: Color signal integration for color discrimination along a long-range apparent motion trajectory. *Multisensory Research*, 26(3), 241-265, 2013. DOI: 10.1163/22134808-00002415. 査読有.

〔学会発表〕(計5件)

1. T.Sato, T.Nagai, I.Kuriki, S.Nakauchi: Dissociation of neutral

- chromatic points for color discrimination and color appearance under incomplete chromatic adaptation. The 23rd symposium of the International Colour Vision Society, Tohoku University (Miyagi), July 3-7, 2015 (accepted).
2. 中山和輝, 川島祐貴, 山内泰樹, 永井岳大: 明るさ方向のコントラスト順応に対する明るさと輝度の寄与の比較. 日本視覚学会 2015 年冬季大会, 工学院大学(東京), 2015 年 1 月 25 日.
 3. 佐藤智治, 永井岳大, 栗木一郎, 中内茂樹: 不完全順応における色の見えと色弁別の基準点. 日本視覚学会 2015 年冬季大会, 工学院大学(東京), 2015 年 1 月 24 日.
 4. 佐藤智治, 永井岳大, 中内茂樹: 色覚メカニズムモデルに基づく色コントラスト知覚特性の逆相関解析. 映像情報メディア学会 HI 研究会, 沖縄産業支援センター(沖縄), 2013 年 12 月 6 日.
 5. T.Sato, T.Nagai, & S.Nakauchi: Chromatic signal detection on a heterochromatic texture with a color distribution away from an adaptation color. Vision Sciences Society 2012 Annual Meeting, Florida, U.S.A., May 11, 2012.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永井 岳大 (NAGAI, TAKEHIRO)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 40549036