

令和 2 年 6 月 24 日現在

機関番号：51201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K13970

研究課題名（和文）方位選択を伴う錯視現象の色選択性～心理物理学的逆相関法による解析～

研究課題名（英文）Hue selectivity of visual Illusion with orientation selectivity

研究代表者

佐藤 智治（佐藤智治）（Sato, Tomoharu）

一関工業高等専門学校・その他部局等・講師

研究者番号：30783120

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ヒトの脳で色情報がどのように表現されているか、その詳細は未解明である。本研究では、周辺刺激とターゲット刺激の方位の関係によって検出感度が増加する錯視現象：Collinear facilitation（CF）の色選択性を調査することで、方位情報を扱う脳の処理段階における色情報表現を推定した。CFによる検出感度は周辺刺激とターゲット刺激の色相によって変化し、感度改善だけでなく、感度抑制もみられた。これらの結果から、CFは脳の初期段階の色情報表現である反対色表現では説明できないメカニズムが関与していることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

方位選択はヒトの脳の初期視覚野が持つ特徴の一つであることから、本研究で明らかになったCollinear facilitationの色選択性に、脳の初期視覚野の特性が反映されている可能性が高い。また、先行研究でも指摘されているが、縞模様の方角や細かさといった視覚的空間情報は輝度の影響が大きい。本研究では輝度ノイズを付加することでCFの色選択性が測定できることを示した。この結果はCFに関与するメカニズムは輝度情報と色情報が複雑に関係している可能性を示す。

研究成果の概要（英文）：The details of how color information is represented in the human brain are still unclear. Collinear facilitation (CF) is the improvement of detection sensitivity of the target when two high contrast flanking stimuli have the same visual properties. We measured hue selectivity of CF in order to estimate color representation in human brain. The measured CF varied with the difference in hue between the target and flankers. In addition, not only improvement of sensitivity but also suppression of sensitivity was observed. These results suggest that the CF cannot be simply explained by the two independent cone-opponent color representation, which is a color representation in the early stages of the brain.

研究分野：実験心理学

キーワード：色覚 心理物理学 視覚情報処理

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヒトの視覚系における色情報表現は処理段階によって変化する。その中でも脳での色情報処理；網膜上の感覚器である錐体細胞の応答信号による表現が、どのように認知的な表現（「赤」や「緑」、「橙」、「紫」などの色名による表現）に変換されるのかは未解明なままである。脳における色情報表現は物体認識に必要な情報抽出過程と考えられ、ヒトの視知覚を理解し、工学的に適用するために重要な知見となることが期待される。

これまでの研究によって、錐体細胞の応答信号による表現が「赤—緑」と「青—黄」の2軸で表現される「反対色表現」に変化することが知られている。さらに、ヒトの初期視覚野 (V1) では反対色表現の2軸以外の中間色相に感度を持つことが心理物理学研究[1]や、fMRI 研究[2]によって明らかになっている。反対色表現以降の色表現は複数の色で表現されていることから「多チャンネルメカニズム」、あるいは「高次色覚メカニズム」と呼ばれる。この多チャンネルメカニズムの色の数や感度幅など、詳細は未解明である。

色情報表現の詳細が未解明なヒトの初期視覚野 (V1) に存在する神経細胞は方位選択や輪郭統合といった空間情報を処理する特徴があることが知られている。例えば、V1 の神経細胞は局所的な線分に応答し、その線分の傾き（方位）に選択的に応答する。そして、局所的な方位選択性細胞の応答を接続し「輪郭統合」が行われる。従って、「方位」と「輪郭」の情報に関係する錯視現象の色選択性を調査すれば V1 の色情報表現を明らかにできると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では方位選択・輪郭統合における色情報表現を調査し、脳内での色覚メカニズムを推定した。実験対象として Collinear facilitation (CF) という現象の色選択性を調査した。

CF は周辺刺激がターゲット刺激と方位や色など共通な成分を持ち、大局的に整列する場合に、ターゲット刺激への検出感度が改善する現象である (図 1)。CF の発生メカニズムは視覚情報の重みづけに相当する「知覚的テンプレート」がボトムアップ的な主観的輪郭線の構築、あるいはトップダウン的な注意によって変化することで生じると考えられている。CF が色でも生じることは先行研究で報告されている[3, 4]が、ターゲット刺激と周辺刺激の色相がずれた場合に CF がどのように変化するのかはわかっていない。

そこで、本研究では CF の色選択性を調査することで、CF が生じると考えられている V1 以降の色情報表現を推定した。

3. 研究の方法

当初の計画では (i) CF の色選択性を明らかにし、(ii) 心理物理学的逆相関法によって CF の知覚的テンプレートを明らかにする計画だった。しかし、第一段階の CF の色選択性の効果をはっきりと測定するのが難しかったため、この問題を解決する方法を模索し研究を推進した。最終的にはターゲット刺激に輝度ノイズを付加することで CF の色選択性を測定することができた。

(1) 実験方法

本研究は心理物理実験による遂行された。LCD ディスプレイに呈示された実験刺激に対して、実験協力者に知覚判断（ターゲット刺激があったかどうか）を判断してもらった。実験協力者は5名だった。

図 1 に実験刺激の例を示す。実験刺激はターゲット刺激と周辺刺激で構成され、それぞれ、Gabor 刺激と呼ばれる縞模様の刺激であった。

色度は DKL 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。各刺激は DKL 空間のある色相方向に沿って色が変化しており、縞模様の中心の色相方向を基準に実験条件を定義した。ターゲット刺激の色は4条件 (0° 、 45° 、 90° 、 135°)、周辺刺激の色は8条件 (0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315°) であった。周辺刺激において、 0° の刺激と 180° の刺激は縞模様のパターンが逆になっており、 0° なら [緑・赤・緑] だが、 180° なら [赤・緑・赤] となる。

ターゲット刺激にはバンドパスフィルタで画像処理された輝度ノイズが付加されていた。輝度ノイズのパターンは毎試行変化した。この輝度ノイズによって輝度による影響を除去することができた。

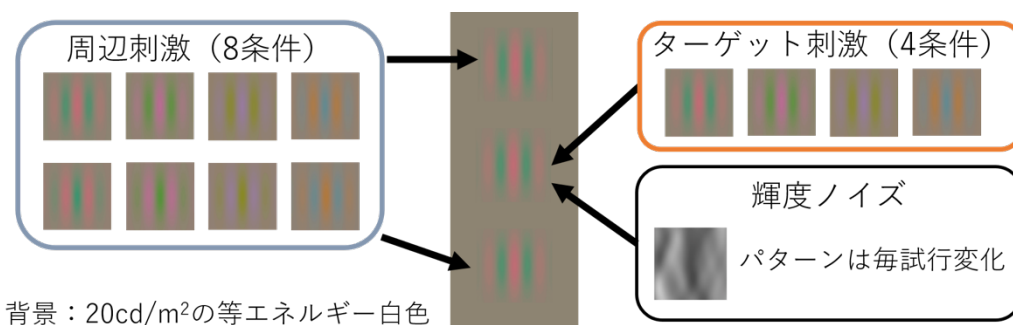


図 1：呈示刺激例

検出閾値の測定には時間的二肢強制選択法を用いた。図2に示した通り、実験協力者には2回刺激が呈示され、どちらか一方にだけターゲット刺激が含まれていた。呈示刺激は500ms間灰色背景上に呈示された。ターゲット刺激のコントラストは実験協力者の回答によって変化した。実験により得られたデータに対して心理測定関数を当てはめ、正答率75%になったコントラストを検出閾値とした。この検出閾値を全実験条件について測定した。また、コントロール条件としてターゲット刺激のみを実験協力者に呈示し検出閾値を測定した。

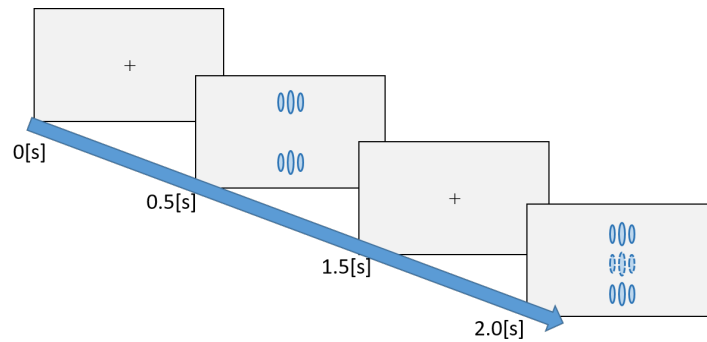


図2. 実験手続き

(2) 解析方法

測定された検出閾値からCFによる検出閾値の変化を評価するために「CF index」を計算した。CF indexは式(1)で定義された。

$$\text{CF index} = \frac{t}{t_0} \quad (1)$$

ここで、 t は各実験条件におけるターゲットの検出閾値であり、 t_0 はコントロール条件のターゲット閾値である。CF indexはターゲット刺激条件ごとに計算した。従って、CF indexの値が1.0未満であれば周辺刺激によって検出閾値が減少（検出感度が改善）し、1.0以上であれば周辺刺激によって検出閾値が増加（検出感度が悪化）したことを示す。

実験により得られたCF indexを定量的に評価するために、CF indexに対して2つのガウス関数を組み合わせたモデルを、最小二乗法により当てはめた。当てはめたモデルは、

$$G = -G_f(A_f, \theta_f, \sigma_f) + G_s(A_s, \theta_s, \sigma_s) + B$$

$$= \sum_{n=1}^2 \left\{ -A_f \exp\left(\frac{(\theta - \theta_f + 2n\pi)^2}{2\sigma_f^2}\right) + A_s \exp\left(\frac{(\theta - \theta_s + 2n\pi)^2}{2\sigma_s^2}\right) \right\} + B, \quad (2)$$

で定義された。ここで、 G_f と G_s はそれぞれ促進（facilitation）と抑制（suppression）の成分を示す。後述する結果において、CF indexは1.0未満だけでなく、1.0以上の値も見られたため、促進と抑制の成分を含んだモデルを導入した。 θ はターゲットと周辺刺激の色相差（ Δhue ）を示し、 θ_f と θ_s はそれぞれ促進と抑制のピーク色相を示す。 σ_f と σ_s は促進と抑制の標準偏差であり、色相選択における感度幅に相当する。 A_f と A_s は各成分の振幅を示す。 B はモデルのベースラインを示す定数項であり、解析の際は1.0で固定した。

4. 研究成果

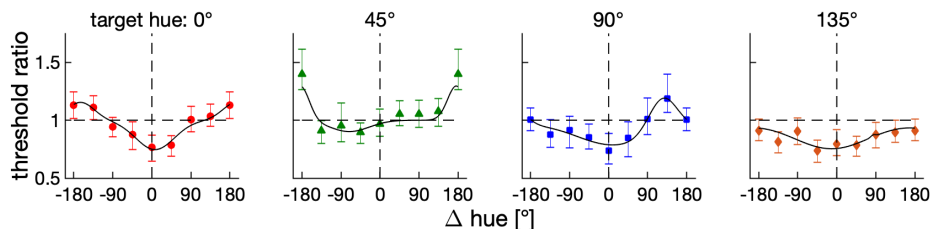


図3. 実験協力者間で平均した閾値比（CF index）：

横軸はターゲット刺激と周辺刺激の間の色相差を、縦軸は閾値比（CF index）を示している。各パネルは上部に示されているターゲット刺激の色相条件（0°、45°、90°、135°）の結果である。各パネルの実線はモデル当てはめの結果を示す。（Sato et al., 2020 より）

CF indexを実験協力者間で平均した結果を図3に示す。ターゲット刺激の色相が45°以外では、ターゲット刺激と周辺刺激の色相が一致したときにCF indexが最小になり、値は1.0未満となった。CF indexが1.0未満になることは周辺刺激によって検出感度が改善したことを意味する。ターゲット刺激の色相が45°の場合は-90°の色相差においてCF indexが最小になった。また、ターゲット刺激の色相が135°条件の場合を除いて、CF indexが1.0以上になる点がある。

在した。これは周辺刺激によって検出感度が悪化したことを示す。検出感度悪化のピークは色相差が $\pm 180^\circ$ の場合（ターゲット刺激の色相が 0° と 45° ）と、 $+135^\circ$ の場合（ターゲット刺激の色相が 90° ）で見られた。ターゲット刺激の色相が 0° の条件において、対称な特性が見られたが、 90° の条件において非対称な特性が見られた。このように、ターゲット刺激と周辺刺激の色相差によって検出感度が変化することがわかった。さらに、周辺刺激による検出感度の変化は改善だけでなく、悪化も見られることがわかった。

得られたCF indexに対して式(2)に示した促進と抑制の2成分を含んだモデルを当てはめ、各実験条件の結果をどのような色選択性メカニズムで説明できるのか推定した。図4にモデル当てはめによって推定されたパラメータを示す。結果として、促進成分は 0° 、 90° 、 135° 方向でピークが見られた。また、その感度幅は $0^\circ - 180^\circ$ 方向（赤-緑）では狭帯域であり、 $90^\circ - 270^\circ$ 方向（青-黄）では広帯域だった。抑制成分は約 180° 、 225° 方向でピークが見られた。このモデル当てはめの結果から、促進は主に反対色表現のような色選択性メカニズムが介在することが示唆され、抑制は反対色表現の中間色相を含むことが示唆された。

本研究の成果をまとめると、①CFによる検出感度の変化は、ターゲット刺激と周辺刺激の色相差によって変化することが明らかになった。②CFによる検出感度の変化は改善だけでなく、悪化も存在することが明らかになった。周辺刺激による検出感度の悪化は、マスキング効果[5]やCrowding[6]といった現象が知られている。本研究のモデル当てはめによって、促進と抑制に相当する色選択性メカニズムが、それぞれ異なるパラメータを持つ可能性が示された。③検出感度の変化は非対称な特性が見られ、反対色表現の2軸以外の中間色相への感度を持つメカニズムの存在が示唆された。実験手法としては、輝度の影響を阻害することでCFの色選択性が明確になることがわかった。脳内には「輝度の色の組み合わせ」に選択的に応答する神経細胞も存在する[7]ことから、CFを調査することで輝度メカニズムと色メカニズムの関係を調査可能だと考えられる。

<引用文献>

- [1]. M. A. Webster and J. D. Mollon, "Changes in colour appearance following post-receptoral adaptation," *Nature* 349, 235-238 (1991).
- [2]. I. Kuriki, P. Sun, K. Ueno, K. Tanaka, and K. Cheng, "Hue Selectivity in Human Visual Cortex Revealed by Functional Magnetic Resonance Imaging," *Cereb. Cortex* 25, 4869-4884 (2015).
- [3]. T. Ellenbogen, U. Polat, and H. Spitzer, "Chromatic collinear facilitation, further evidence for chromatic form perception," *Spat. Vis.* 19, 547-568 (2006).
- [4]. P. C. Huang, K. T. Mullen, and R. F. Hess, "Collinear facilitation in color vision," *J. Vis.* 7, 1-14 (2007).
- [5]. D. Kondo and I. Motoyoshi, "Spatiotemporal properties of multiple-color channels in the human visual system," *J. Vis.* 16, 1-13 (2016).
- [6]. G. J. Kennedy and D. Whitaker, "The chromatic selectivity of visual crowding," *J. Vis.* 10, 1-13 (2010).
- [7]. K. R. Gegenfurtner, "Cortical mechanisms of colour vision," *Nat. Rev Neurosci.* 4, 563-572 (2003)

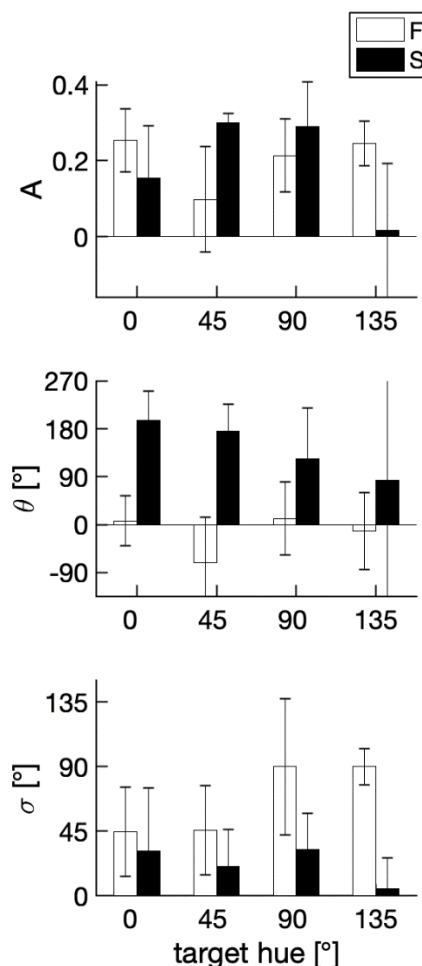


図4. モデル当てはめによって推定されたパラメータ：白は促進成分、黒は抑制成分のパラメータを示す。(Sato et al., 2020 より)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tomoharu Sato, Takehiro Nagai, Ichiro Kuriki	4. 巻 37
2. 論文標題 Hue selectivity of collinear facilitation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America A	6. 最初と最後の頁 A154 ~ A154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/JOSAA.382870	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tomoharu Sato, Takehiro Nagai, Ichiro Kuriki
2. 発表標題 Hue selectivity of collinear facilitation with and without luminance noise
3. 学会等名 The 25th symposium of the International Colour Vision Society（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoharu Sato, Takehiro Nagai, Ichiro Kuriki
2. 発表標題 Chromatic selectivity of collinear facilitation
3. 学会等名 OSA Fall Vision Meeting 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----