

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 5月30日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21330165

研究課題名（和文） 視覚情報の脳内での分離・統合に関する研究

研究課題名（英文） Integration and separation of visual information in the human visual cortex.

研究代表者

栗木 一郎 (KURIKI ICHIRO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：80282838

研究成果の概要（和文）：色や形、運動など、視覚情報の特徴要素に対応する脳内信号がどのように分離統合しているかについて、脳活動計測実験を行う事によって調べた。まず色刺激に対する脳活動の分類解析により、錐体反対色軸の4色以外に、少なくともその中間方向4色に対応して独立の神経活動が生じる事を示す結果を得た。また、色情報と視覚的運動の情報の結合について、知覚のリンクに特に着目して研究を行った。被験者の知覚応答に対応して脳活動が変化した部位を特定したところ、比較的初期の視覚野と運動に選択的に応答する部位の脳活動が対応を示した。この結果は先行研究の結果をさらに絞り込んだ形で、脳内で知覚に対応した色と運動の結合信号が存在する部位について示唆を得た。色と形の情報の結合について、脳活動の分類解析によって調べたところ、色と線分（形状の素片）の傾きの情報が結合した信号が視覚野の広い範囲に存在する事を示す結果を得た。これらの結果を総合すると、脳内での視覚情報は特徴要素間での結びつきが強いもの（形と色）と、部位によって分離・統合している可能性が高いもの（運動と色）が存在する事を示した。また、高次からの逆行性の信号と、低次から順向性に処理される信号がどのように相互作用しているかを今後明らかにする必要がある事が明らかになった。

研究成果の概要（英文）：We investigated how elements of visual information are separated and integrated in the human visual cortex, by classifying brain activity in relation to visual stimuli. It has been clarified that color signals are encoded in the brain not as the combination of cone-opponent signals, and it was demonstrated the presence of neurons selective to each hue in no less than eight hue directions. For the combination of color and motion signal in the brain with strong relation to the human visual percept, we have found that brain activities recorded in several lower-level visual cortex and a higher level cortex could have been classified into the classes correspond to the subjective report. For the combination of form and color the orientation of a short line element, which is the elementary signal of shape at the lower level of visual cortex, and color information are linked tightly across wide area of visual cortex. In summary, our results suggest that some elements of visual information are tightly linked throughout the visual cortex, and some others are linked at a localized area in the human visual cortex. Also, it was suggested that feed forward and feed back signals must be dissociated in the future study on this topic.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2010年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：実験心理学

科研費の分科・細目：感覚・知覚

キーワード：脳内表現，視覚情報処理，色覚，運動視，機能的MRI

1. 研究開始当初の背景

人間の視覚情報処理は，運動・形状・色・奥行き（立体視）など様々な特徴の情報が抽出され，特徴ごとの情報処理を経た後，大脳の高次レベルでそれらが統合されると考えられている。しかし，このような視覚刺激の特徴要素の統合を示唆する心理物理学的な知見は存在していたものの，実際に脳内において視覚信号の特徴要素がどのように分離・統合しているかを示した先行研究は存在しなかった。そこで本研究では，脳活動データの分類解析という方法を応用してその問題の解明を試みた。

2. 研究の目的

本研究課題では，視覚情報の分離・統合が脳内のどの部位で行われているか，心理物理学で用いられる刺激を用いて非侵襲計測した際の脳活動パターンから明らかにすることを試みた。視覚情報の特徴の中で，形状(方位)と色，運動と色などの基本的な視覚特徴の組み合わせについて，脳活動パターンの分類解析を用いた検討を試みた。

3. 研究の方法

視覚的運動(visual motion)と色の結合を例に考えてみる。第一次視覚野 V1 では色と運動方向の情報は独立に扱われているが，レチノトピーによって定まる局所的な視野（受容野）に対応したコラムの中で運動と色の信号が独立して存在し，それらのコラムが V1 に広く点在していると考えられる。従って，ランダムドットの運動方位と色を組み合わせた刺激を用いて，「運動方向が異なって色が同じ刺激ペア」に対する脳活動を比較した場合，運動方向選択性の神経細胞の活動と色選択性の神経細胞の活動の差異は，非侵襲計測の空間解像度では非常に小さいと予測され，脳活動データは分類不可能と予測される。

同じ理由で「運動方向が同じで色が異なる刺激ペア」に対しても，V1 では同じ予想が成り立つ。一方，V4 など色に対して選択的に活動する脳部位では「運動が同じで色が異なる刺激ペア」に対する脳活動は分類可能で，「運動が異なって色が同じ刺激ペア」に対しては不可能だと予測される。MT など運動に対して選択的に活動する部位では，逆の傾向を示すと考えられる。さらに高次の脳部位において，色と運動の情報を統合している部位では色と運動の特徴がリンクした形で扱われてい

ると考えられ，運動と色のいずれかが異なれば，別の脳活動パターンとして分類可能となることが予想される。見方を変えれば，脳内の各部位において刺激特徴に対応した脳活動パターンの分類がどの程度可能かにより，どの程度独立して視覚情報の各特徴が扱われているかを評価することも可能だと考えられる。

機能的MRI (functional MRI: fMRI) によって，様々な視覚刺激に対して得た脳活動を分類解析 (classification analysis) することによって，脳内での視覚の要素信号の分離および統合の様子を明らかにすることを試みた。

4. 研究成果

(1) 色に対する脳活動の分類解析.

まず，色情報の脳内での表現形式については研究開始時点では確固たる研究報告が無かったため，色の情報を主に扱っている部位の脳活動測定から開始した。また，分類解析に関する技術を確立する目的で，以下の実験を行った。色に対する反応，視覚的運動に対する反応について，個別の信号を扱っている脳内部位について調べた。

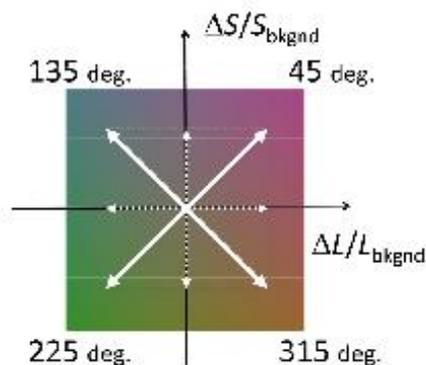


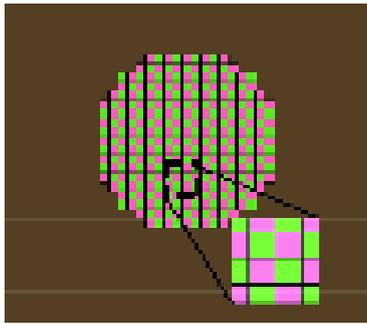
図1. 分類解析のための色の選択. (Kuriki et al., 2011)

視覚情報処理の初期の過程では，色の情報はL錐体とM錐体の応答の差分と，S錐体の応答によって形成される2軸（錐体応答反対色システム）に対応した信号で符号化されている。図1の横軸，縦軸はそれを表しているが，この図でマゼンタ(45 deg.)とグリーン(225deg.)のペア，シアン(135deg.)とオレンジ(315deg)の2つの色のペアは横軸と縦軸に対応する錐体応答反対色チャンネルの刺激量が等しくなる。すなわち，この2つの色の

ペアは初期視覚情報処理過程の信号と同じ符号かでは判別がつかない色の組み合わせである。仮に脳内でこの応答が判別できれば、それはその脳部位にはマゼンタ/シアン/グリーン/オレンジに対応した個別の神経活動が存在する事を示唆している。

このような色のペアを図2のような形で呈示し、記録した脳活動の分類解析を行うことにより、脳内での色情報の符号化について調べた。

(a)



(b)

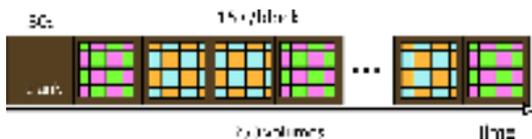


図2 (a) 刺激の模式図. (b) 呈示順序. (Kuriki et al., 2011)

分類解析では、線形サポートベクターマシン (linear SVM) を用い、それぞれの色のペアに対して取得した 30 ブロックの信号のうち 1 ブロックの信号をランダムに除外して SVM を学習させた分類器を作成し、除外したブロックの脳活動信号を分類させることを 1,000 回程度繰り返して正答率を計算した。

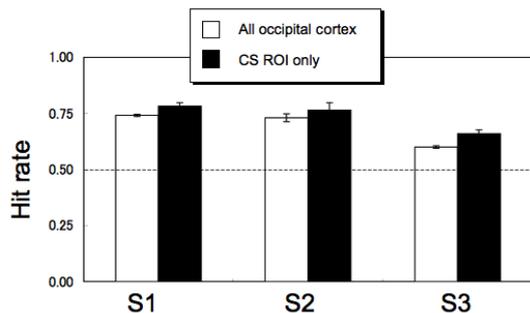


図3. 分類解析の結果. 白いバーは後頭葉の全ての voxel を用いた際の結果, 黒いバーは第一次視覚野の voxel のみの結果 (Kuriki et al., 2011). エラーバーは 95%信頼区間を示す。

分類器は2つの色のペアのうち、どちらのペアに対する脳活動かを分類するため、チャン

スレベル (偶然の正答率) は 50%となる. 図3に示したように、3名の被験者すべてにおいて、チャンスレベルより有意に高い正答率を示す結果を得た。

さらに、4色を別々の刺激として呈示し、それぞれの色刺激に対して記録した脳活動を分類解析によって解析する実験を行った結果、4種類の色刺激に対応する脳活動をチャンスレベルよりも有意に高い正答率で分類する事が可能であったことから、4種類の色に対する神経活動が個別のパターンを示す事がわかった。

これらの結果により、脳内での色の表現形式が錐体反対色システムの応答によって記述されているのではない事を示している。

(2) 視覚的運動と色の情報の結合.

前述のように運動情報だけを扱う部位では、色の情報を区別できず、色情報だけを扱う部位では運動情報が区別できない。従って、色と運動の情報が組み合わさらないと正解できない視覚刺激に対し、分類解析で正答率がチャンスレベルより有意に高い部位は、色と運動の信号が結合した部位だと言える。

研究開始直後に発表された他の研究によると、色と運動の情報が結合した信号は視覚野の広い範囲に存在する可能性が指摘された (Seymour et al., 2009). 一方、その信号は単に物理的な刺激の変化に対応した脳活動だけを抽出したもので、知覚との対応付けが不十分であるという指摘もあった。そこで我々は、知覚的に運動と色が密接にリンクした部位を抽出するため、以下の実験を行った。

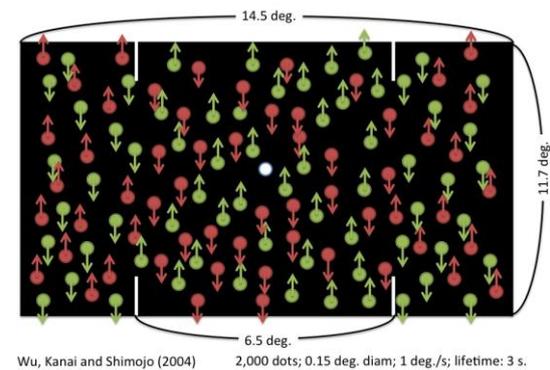


図4. 色と運動の結合に関する研究の視覚刺激. Wu et al., (2004)を改変。

図4は、赤と緑のドットが上下にスライドしながら動いている。白いマークで示された部分よりも外側の周辺では、中心視野と逆方向に赤/緑のドットが動いている。このような視覚刺激を 15 秒程度観察していると、周辺視野の赤いドットが中心視野と同じ方向に見えたり、逆になったりする知覚交代が起き、15 秒間に 1~3 回程度で生起することがわかった。そこで、被験者に知覚される運動方

向をボタン押しで報告させ、被験者の報告と一致した脳活動変化を示す脳内部位を分類解析によって特定する方法で研究を進めた。図5は6名の被験者の結果を示しており、第二次(V2)、第三次視覚野(V3)と、運動に選択的に反応する視覚野(MT+)において、チャンスレベルより有意に高い傾向を示した。

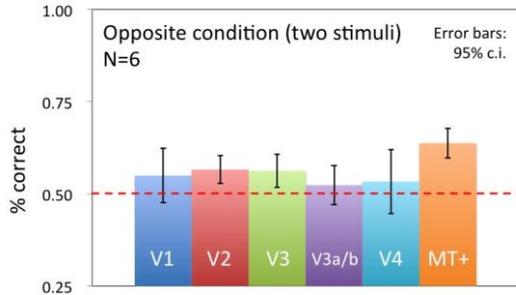


図5. 知覚に対応した色と運動の結合信号に関する脳活動の分類解析の結果. エラーバーは95%信頼区間を示す.

先行研究では、図5に示したほぼ全ての視覚野において、チャンスレベルよりも有意な信号が得られたと報告しているが、本研究のように、知覚とのリンクに限定して測定を行った脳活動データの分類を行うと、対応する信号はごく一部に限られることが示された。

一方で、初期視覚野のV2あるいはV3における脳活動データが分類できた事が、単なるボトムアップ型の情報処理の結果だけで得られた脳内信号による結果か、MT+など高次からのフィードバック信号によるものかが明らかではない。この点は、今後の課題として研究を進める必要があると考える。

(3) 色と形の結合について

色と形の信号の結合についても脳活動の分類解析によって調べる研究を行った。

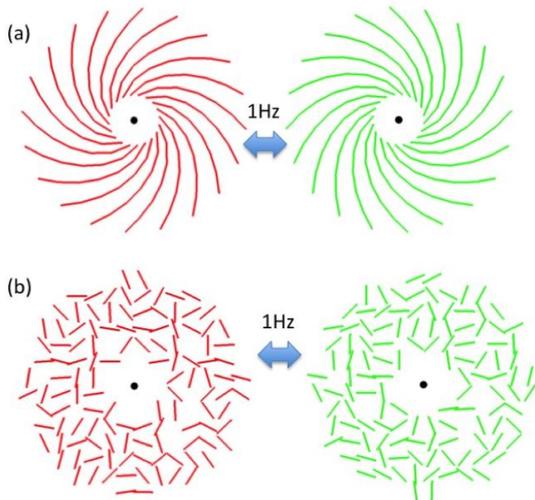


図6. 色と形の結合刺激。(a)大域的な形状の情報を含むスパイラル刺激。(b)大域的な

形状の情報を含まないランダム刺激。

研究開始後に報告された他のグループの先行研究(Seymour et al., 2010)では、スパイラル型の刺激に色をつけ、形状の向き(時計回り/半時計回り)と色(赤/緑)の組み合わせについて分類解析を行った(図6(a)). その結果、初期視覚野を含む広い範囲において、色と形の情報が結合した信号の存在を報告した。

しかし、Seymourらが用いたスパイラル型の刺激は大域的な形状の情報を含んでおり、この情報が高次視覚野からのフィードバック信号を生起させている可能性が否定できない。そこで、低次の視覚野に存在する、色と形の結合信号が高次からのフィードバックによる物かどうかを明らかにするため、以下の実験を行った。

図6(b)はSeymourらの用いたスパイラル型の刺激を短い線分で作成した時に、傾きの情報を保持したまま位置をランダムに並べ替えて作成した図形である。(b)の刺激の配置はランダムに並べ替えられるため、高次視覚野で扱っていると考えられる形状の信号では分類ができず、色と傾きの局所的信号を用いないと分類ができない。従って、もし(b)は低次視覚野では分類でき、高次視覚野では分類できない可能性を予想して実験を行った。

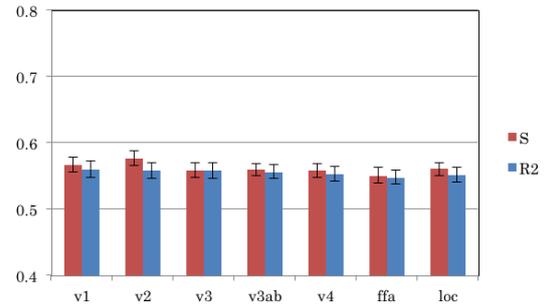


図7. スパイラルとランダム刺激に対する分類解析の正答率. エラーバーは95%信頼区間を示す.

図7に示すように、いずれの刺激に対してもチャンスレベルよりも高い成績で、高次の視覚野(FFA: fusiform face area, LOC: lateral occipital complex)を含め正答率が高かった。この結果は、ランダムに配置された図形のような比較的low-levelの形状情報についても色の信号が組み合わせられた形で扱われている可能性を示唆する結果であった。

(4) まとめ

これらの脳活動分類による研究の結果、視覚情報の特徴要素ごとに組み合わせられる様態が異なる可能性を示唆する結果を得た。特に、色と運動の信号の実験結果については、

高次視覚野からのフィードバックによる影響など、脳内での視覚信号のフローを追跡した研究が必要である事を強く示唆していると考えられる。

また、色刺激に対する脳活動の分類解析の結果から、脳内での色の情報は赤/緑、青/黄といった色の要素成分の合成信号ではなく、個別の色相に対応して活動する神経細胞によって符号化されている可能性が高い事を示している。その数は、錐体反対色の4色に加え、少なくとも4色に対応する色選択性細胞が存在し、少なくとも合計で8色に対して個別の色相に選択的に反応する細胞の存在を示す結果を得る事ができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

1. 栗木一郎・中村慎吾・繆 仁軍・徳永留美・松宮一道・塩入 諭. 脳活動信号の分類解析に基づく視覚情報の分離・結合に関する検討. *映像情報メディア学会技術報告*, 35(51), 41-44, 2011. (査読無)
 2. 繆 仁軍・徳永留美・栗木一郎・松宮一道・塩入 諭. 視覚系の色と形の結合における局所特徴処理と大域特徴処理の比較. *映像情報メディア学会技術報告*, 35(44), 95-100, 2011. (査読無)
 3. 堀内孝治・栗木一郎・松宮一道・塩入 諭: 色の見えに関する空間的文脈効果における視覚的気づきの影響. *VISION*, 22, 203-206, 2010. (査読無)
 4. 中村慎吾, 栗木一郎, 松宮一道, 徳永留美, 塩入 諭: fMRI を用いた視覚的運動情報と色情報の知覚的結合に関する研究. *電子情報通信学会技術研究報告*. 110(228), 25-29, 2010. (査読無)
 5. Ichiro Kuriki, Shingo Nakamura, Pei Sun, Kazumichi Matsumiya, Kenichi Ueno, Keiji Tanaka, Satoshi Shioiri and Kang Cheng. Decoding Color Responses in Human Visual Cortex. *IEICE, E94-A*, 2, 473-479, 2011. (査読有)
 6. 栗木一郎: 色の錯視とは何か. *光学*, 39(3), 89-95, 2010. (査読無)
- [学会発表] (計16件)
1. 栗木一郎・中村慎吾・繆 仁軍・徳永留美・松宮一道・塩入 諭. 脳活動信号の分類解析に基づく視覚情報の分離・結合に関する検討. 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会. 2011年12月9日. 東北大学.
 2. 繆 仁軍・徳永留美・栗木一郎・松宮一道・塩入 諭. 視覚系の色と形の結合における局所特徴処理と大域特徴処理の比較. 電子情報通信学会 HIP 研究会, 2011年11月11日. 東北大学.
 3. 繆 仁軍, 徳永留美, 栗木一郎, 松宮一道, 塩入 諭. 「色と形の局所的・大域的特徴に関する脳活動信号の分類解析」生体生命工学研究会. 2011年10月26日. 東北大学.
 4. 栗木一郎, 中村慎吾, 徳永留美, 松宮一道, 塩入 諭: 知覚に関連した色と運動視情報の脳内での統合に関する研究. 第34回日本神経科学大会. 2011年9月15日. パシフィコ横浜.
 5. 楊 嘉楽, 金沢 創, 山口真美, 栗木一郎. 乳児のカテゴリカル色知覚における脳活動 -NIRS による検討-日本視覚学会 2011年夏季大会. 2011年8月3日. 九州大学.
 6. Ichiro Kuriki: Hue-selective mechanisms in human visual cortex. *International Colour Vision Society annual meeting (ICVS 2011)*, Kongsberg, Norway, 2011.
 7. Koji Horiuchi, Ichiro Kuriki, Rumi Tokunaga, Kazumichi Matsumiya, Satoshi Shioiri: The effect of color-luminance correlations in surrounding stimuli on color constancy under interocular suppression. *Vision Sciences Society annual meeting*, May 7, 2011, Florida, U. S. A.
 8. 中村慎吾, 栗木一郎, 松宮一道, 徳永留美, 塩入 諭: fMRI を用いた視覚的運動情報と色情報の知覚的結合に関する研究. 電子情報通信学会 HIP 研究会, 2010年10月14日. 東北大学.
 9. Ichiro Kuriki: Decoding color responses in human visual cortex. IMQA2010, 2010年5月14日. 東京理科大学.
 10. Jiale Yang, So Kanazawa, Masami Yamaguchi, Ichiro Kuriki: Color constancy in 4-5-month old infants. *Vision Sciences Society annual meeting*, May 11, 2010. Florida, U. S. A.
 11. 楊 嘉楽, 金沢 創, 山口真美, 栗木一郎: 4-5ヶ月児におけるカテゴリカル色知覚. 日本基礎心理学会第29回大会, 2010年11月28日. 関西学院大.
 12. 楊 嘉楽, 金沢 創, 山口真美, 栗木一郎: 4-5ヶ月の乳児における色恒常性. 日本基礎心理学会第28回大会, 2009年12月5日. 日本女子大学.
 13. 栗木一郎: 脳活動計測を用いた色覚メカニズムの研究. Optics & Photonics Japan シンポジウム「色彩工学と色覚

研究の最前線」, 2009年11月25日.
新潟市.

14. 栗木一郎, 孫 沛, 上野賢一, 田中啓治, 程 康: fMRIによるヒト視覚野神経細胞の色選択性に関する研究. 第32回日本神経科学大会, 2009年9月16日. 名古屋国際会議場.
15. 中村真吾, 栗木一郎, 松宮一道, 孫 沛, 上野賢一, 田中啓治, 程 康, 塩入諭: 脳活動のパターン解析による色相選択性細胞の存在の検証. 日本視覚学会2009年夏季大会. 2009年7月21日. 京都工芸繊維大学.
16. 栗木一郎: 脳内の色情報表現. 第48回眼光学学会総会シンポジウム12「色覚を科学する」2009年6月29日. 東京国際フォーラム.

[図書] (計4件)

1. 栗木一郎: 新編 色彩科学ハンドブック第3版, (分担執筆), 朝倉書店 (2011).
2. 栗木一郎: 知覚心理学, 第三章「色覚」(分担執筆), ミネルヴァ書房 (2011).
3. 栗木一郎: 映像情報メディア工学大辞典 (項目執筆; 3.4 色覚情報処理: 高次機能, 4.6 分光感度と明るさへの順応), 映像情報メディア学会編, オーム社(2010).
4. 栗木一郎: 視覚心理入門ー基礎から応用視覚までー, 3.1 脳機能の非侵襲計測 (分担執筆), 内川恵二監修・映像情報メディア学会編, オーム社 (2009).

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.vision.riec.tohoku.ac.jp/ikuriki/project/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗木 一郎 (KURIKI ICHIRO)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号: 80282838

(2) 研究分担者

塩入 諭 (SHIOIRI SATOSHI)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号: 70226091

松宮 一道 (MATSUMIYA KAZUMICHI)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号: 90395103

徳永 留美 (TOKUNAGA RUMI)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号: 80573914