

平成21年5月28日現在

研究種目： 基盤研究 (C)
 研究期間： 2007~2008
 課題番号： 19530648
 研究課題名 (和文) 図地分離を導く因子の同定とその皮質メカニズムの解明
 研究課題名 (英文) Factors for Figure-Ground Segregation and Its Cortical Mechanisms
 研究代表者
 酒井 宏 (SAKAI KO)
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
 研究者番号： 80281666

研究成果の概要：

知覚現象としての図地分離に注目して、疑似ランダム刺激と計算統計的手法を利用した心理物理実験と計算論的モデルのシミュレーション実験により、図地分離を導く刺激因子を客観的・定量的に明らかにした。さらに、初・中期視覚野(V2, V4)の細胞が示す図方向選択性は周囲変調を起源とすることを示し、この周辺特性が図地分離を導く刺激特性と一致することを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野： 計算視覚科学

科研費の分科・細目： 心理学・実験心理学

キーワード： 実験系心理学, 認知科学, 神経科学, 脳・神経, 画像・文章・音声等認識

1. 研究開始当初の背景

視覚系の目的は、何処に何があるかを判断することである。このときの最も根本的な問題は、背景(地)から物体(図)を切り分けることである。これによって処理すべき対象がはじめて決定できる。最近になって、図地分離に関する生理学的研究が R. von der Heydt らによって進められ、初・中期視覚(V2, V4)の半数以上の皮質細胞が図方向選択性を示すことが報告された(Zhou *et al*, *J. Neurosci.*, 2000)。我々は、図方向選択性がどのような皮質メカニズムによって実現されているのかを、計算論的に研究してきた。この結果、図方向選択性は初期視覚野(V1, V2)細胞の

周辺抑制・促進を起源としているという提案をするに到った(e.g. Sakai & Nishimura, *J. Cognitive Neurosci.*, 2006)。この提案は、広域的な輪郭の解釈を必要とせず図方向が決められるという意味で革新的である。

本研究では、知覚現象としての図地分離に注目する。この研究は、図方向知覚を導く刺激因子を客観的・定量的に明らかにする点で高い学術的価値をもつ。特に、面知覚に関連する遮蔽・透明視・主観的輪郭といった広範な知覚現象を普遍的に理解し、さらに形状認知・脳内の形状表現を理解するための重要な示唆を与える。また、図方向知覚への注意の作用を理解することによって、初期視覚過

程にどのように注意が作用するのかについても重要な示唆を与える。さらに、これらの知覚現象が生理学的機能で説明されることを計算論的モデルによって定量的に示す点で、**真に学際的な新しい脳科学分野を提案する価値をもつ。**

2. 研究の目的

本研究は、知覚・認知の根本的問題である図地分離メカニズムの解明を目的として、(1) 図地分離を導く因子とそれらの相互関係を、客観的・定量的に明らかにする。同時に、(2) 初・中期視覚野 (V2, V4) の細胞が示す図方向選択性のメカニズムが、図方向因子の起源となっていることを明らかにする。

具体的には、

- ・ランダムブロック刺激を呈示する心理物理実験を行って、図と知覚されやすい刺激のもつ特徴(図方向因子)を明らかにする。
- ・初期視覚 (V1, V2) で観察される非対称な周囲抑制・促進(文脈依存性)を基礎として図方向知覚を実現する計算論的モデルを提案する。
- ・計算論的モデルにランダムブロック刺激を呈示する計算実験を行って、心理実験によって求められた図方向因子がどのような周囲抑制・促進の特徴に起因するかを明らかにする。また、注意が図方向知覚に作用する機構を提案する。

図方向を決める因子 (e. g. 近接性・類似性・平行性・サイズ・T字分岐等) は、従来は単純化された図形について経験的・定性的にしか説明されていなかった。**疑似ランダム刺激と計算統計的手法を利用した独創的な実験**によって、図方向因子とそれら相互の関係が定量的に明らかになる。これによって、遮蔽や透明を含んだ複数の因子が混在する様々な形状についても、知覚される図方向が説明できるようになる。**Gestalt 因子をはじめて現代化する革新性**をもつといえる。また、注意を因子として扱うことによって、様々な形状に対する図方向の反転や潜時変化といった効果が理解できるようになる。

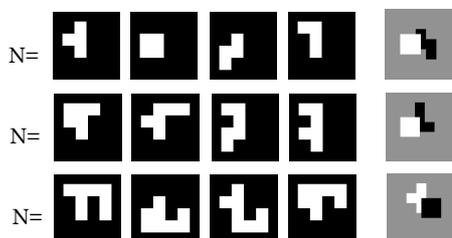


図1: 心理物理実験で用いるランダムブロック刺激の例。(左4列)上・中・下段は、それぞれ4, 6, 8個のブロックから構成され、自由度2, 4, 6をもつ。自由度が大きいほど複雑な形状が生じる。(右列)遮蔽を含んだ刺激の例。

さらに、非対称な周囲抑制・促進によって、図方向知覚が実現することを提案する点に独創性がある。これは、周囲構造の様々な特徴が、図方向知覚の特徴を導く点で説得力のある提案である。すなわち、細胞ごとに異なる多様な周囲抑制・促進構造により、多様な図形に対して有効な図方向知覚が実現し、同時に高い頑健性が実現する。このことは、**ヒトの示す多様な図形に対する高い頑健性の起源を説明する点で革新的**である。

3. 研究の方法

(心理物理実験1: ランダムブロック刺激を使った図方向因子の探索)

刺激が内在するどの特徴が図方向知覚と強い関係をもつかを明らかにするために、心理物理実験をおこなう。具体的には:

- ・ランダムブロック刺激を生成し、それぞれの図方向判定に要する反応時間を計測する(図1)。

この方法は、ホワイトノイズをつかった逆相関法によるプロファイル測定と同様の原理であり、あらゆる形の刺激をテストしたことと等価となるため一般性が高い (e. g. Sakai & Tanaka, *Vision Res.* 2000)。ランダム刺激を利用すると実験が長時間になる障害があるが、本研究では計算論的モデルによって事前に予測をおこなって最適な刺激を選択することにより、この問題を解決する。なお、刺激に依存して有意に異なる反応時間が測定できることは、予備実験によって確認した。

- ・反応時間(図方向知覚の難易度)と、刺激が内在するどの特徴とに関係があるか

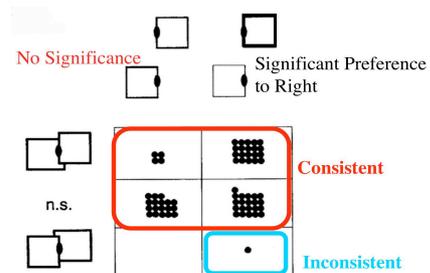


図2: 図方向選択性の一貫性の例 (V2)。黒丸が細胞1個を示す。列は、正方形刺激への図方向選択性が右(右列)または無い(左列)ものを示す。行は、重なった四角形刺激への図方位選択性(上から右・無・左)を示す。赤で囲んだ細胞は、刺激に関わらず図が右にあると反応するなど、一貫性があるもの。青で囲んだものは矛盾した反応を示すもの。ほとんどの細胞が一貫性を示す。(Zhou, et al. 2000)

を解析する。

反応時間と刺激特徴の関係は、計算統計解析・多変量解析によって客観的・定量的に導く。まず、可能性のある様々な特徴(e.g. 鉛直線分長, 水平線分長, コーナー数, 凸性, 平行性, 面積, これらの空間分布)について最適化多重回帰分析を実施して、因子として可能性の高い特徴を選定する。次に、選定した特徴の中で統計的有意性が示されるものについて、多変量解析を実施して図方向因子とそれらの相互作用を同定する。

(計算実験1: ランダムブロック刺激を使った周囲構造特徴の探索)

周囲抑制・促進のどのような特徴が、頑健な図方向選択性を実現するのかを明らかにするため、計算論的モデルを利用したシミュレーション実験をおこなう。ランダムな周囲構造をもつ多様なモデル細胞を多数用意し、心理物理実験1で作成したランダム刺激を呈示(入力)する。心理実験では、反応時間を図方向知覚の難易度とした。ここでは、モデル細胞が示す刺激に対する一貫性(図2)を図方向決定の難易度とする。具体的には:

・図と知覚されやすい刺激群に対して、高い一貫性を示す周囲構造の特徴を明らかにする。

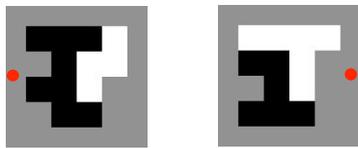


図3: 注意効果測定実験の刺激2例(100ms呈示)。指定位置(赤点)に注意を向ける。左右どちらの図形が手前に見えるかを回答する。

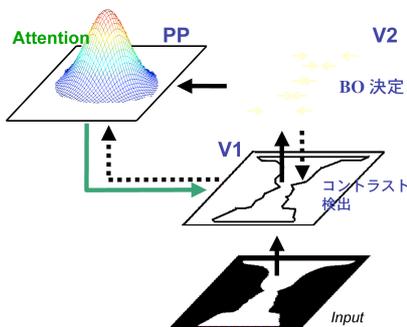


図4: 空間的注意(PP)の初期視覚(V1)への作用(モデル)の概略図。V1で検出されるコントラストが注意位置周辺で強化される。これがBO決定に与える影響を検討する。

心理実験で「図と知覚されやすい」とされた刺激群が、モデルでも図と決定されやすくするためには、どのような周囲構造の特徴が必要かが求められる。これによって、**図方向因子を実現するために必要な周囲構造の特徴**が明らかになる。

・全ての刺激に対して、高い一貫性を示す周囲構造の特徴を解析する。

これによって「**図方向決定が上手な**」周囲構造の特徴が明らかになる。この周囲構造の特徴と、心理実験で得られた図方向因子に正の相関があることが期待される。

・全ての周囲構造に対して、高い一貫性を与える刺激の特徴を解析する。

これによって、**計算論的に「図と決定されやすい」刺激の特徴**が明らかになる。この刺激特徴と、心理実験で得られた図方向因子に強い相関があることが期待される。

(心理物理実験2: 図方向知覚における注意効果の特徴)

多義図形に代表されるように、注意は図方向知覚に大きな影響を与えることが知られている。図方向が曖昧な場合には、注意が向けられた方向に図があると知覚されやすい。本実験では、**注意を1つの因子としてその効果を定量的に測定**する(図3)。さらに、心理物理実験1で求められた因子との優劣性・相互作用を解析する。

(計算実験2: 初期視覚に作用する注意のメカニズム検討)

V2細胞における図方向決定潜時は50ms程度であるが、これは注意位置によってほとんど変化しない(Sugihara, Qiu & von der Heydt, *SFN*, 2003)。このことは、低次視野に注意が作用していることを示唆する。本研究で提案する周囲抑制・促進に基づく皮質メカニズムが、注意の作用を実現するかどうかを検討する。具体的には、**注意がV1に作用したときのコントラスト強度の変化が、V2の図方向選択性細胞モデルに及ぼす影響**を解析する(図4)。

4. 研究成果

(心理物理実験1: ランダムブロック刺激を使った図方向因子の探索)

刺激が内在するどの特徴が図方向知覚と強い関係をもつかを明らかにするために、心理物理実験をおこなった。具体的にはランダムブロック刺激を生成し、それぞれの図方向判定に要する反応時間を計測した。実験の結果、閉合性、凸性は顕著な傾向を示したが、平衡性、近接性、類似性は有為な傾向を示さなかった。図5に、閉合性と反応時間の関係

を例示する。これら因子間に有為な相互作用は認められなかった。また、輪郭に対して、図方向と同側にある直交成分、反側にある同方位成分が、反応時間と負の相関をもつことが判った。

(計算実験 1 : ランダムブロック刺激を使った周囲構造特徴の探索)

周囲抑制・促進のどのような特徴が、頑健な図方向選択性を実現するのかを明らかにするため、計算論的モデルを利用したシミュレーション実験を行った。ランダムな周囲構造をもつ多様なモデル細胞を多数用意し、心理物理実験で作成したランダム刺激を呈示(入力)して、一貫性を計測した。続いて、心理実験で検討した因子について、モデルの一貫性ととの相関を解析した。その結果、心理実験と同様に、閉合性、凸性は顕著な相関を示したが、平衡性、近接性、類似性は有為な傾向を示さなかった。さらに、これらの因子を統合して、心理実験が示す知覚特性と、モデルが示す一貫性の関係を解析した。図6に両者の関係を例示する。ヒト知覚とモデルの一貫性は良い一致を示した。この結果は、V2, V4に見られる B0 選択性細胞が知覚的な図方向決定因子の起源であることを示唆する。

(心理物理実験 2 : 図方向知覚における注意効果の特徴)

多義図形に代表されるように、注意は図方向知覚に大きな影響を与えることが知られている。図方向が曖昧な場合には、注意が向けられた方向に図があると知覚されやすい。本実験では、注意を1つの因子としてその効果を定量的に測定した。この結果を図7Aに示す。いずれの刺激に対しても、注意を向けた側が図として知覚されやすい傾向が観察された。

(計算実験 2 : 初期視覚に作用する注意のメカニズム検討)

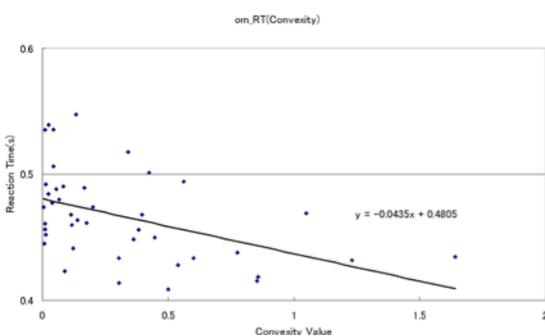


図5: 心理物理実験によって測定したヒトの図方向判断に要した時間。凸度が増すほど、反応時間が短くなる。このことは凸度が図方向因子であることを示す。

本研究で提案する周囲抑制・促進に基づく皮質メカニズムが、注意の作用を実現するかどうかを検討した。具体的には、注意がV1に作用したときのコントラスト強度の変化が、V2の図方向選択性細胞モデルに及ぼす影響を解析した。この結果を図7Bに示す。い

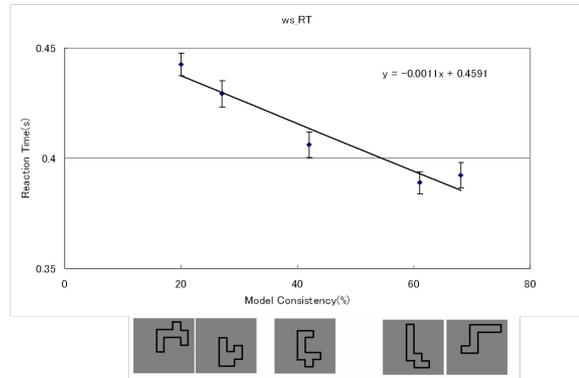


図6: ヒトの図方向判断の反応時間とモデルの示す一貫性の関係。モデルにとって容易な(一貫性の高い)刺激ほど、反応時間が短い。

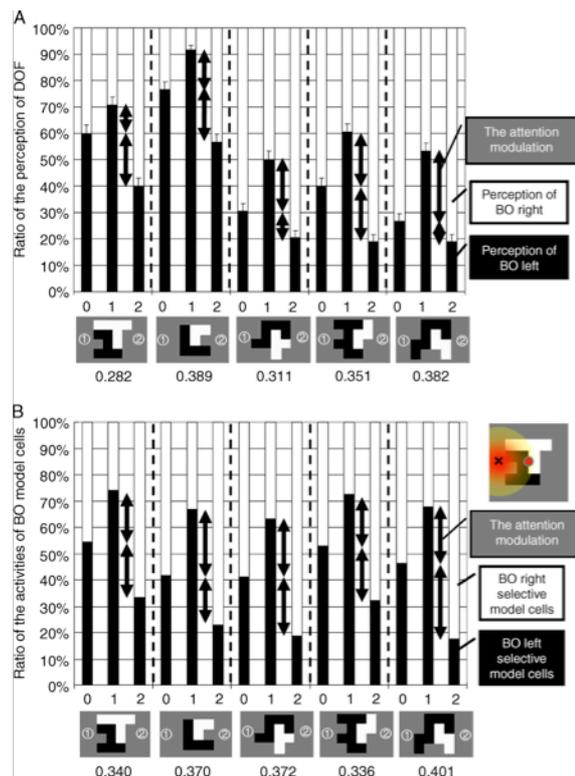


図7: 注意による図方向知覚の変調(A)と、モデルが示した図方向決定の変調(B)。下の刺激を呈示したとき、注意がない場合(左棒)、注意を左右それぞれに向けた場合(中・右棒)の知覚率を示す。いずれも注意を向けた側が図として知覚されやすい。

ずれの刺激に対しても、注意を向けた側が図として判断されやすい傾向が観察された。変調の程度は、心理実験で求めた変調と同程度であった。これらの結果から、注意によって変調を受ける低次視覚野の影響によって、図方向決定が変調を受けることが示唆された。

以上のように、ランダムブロック刺激を利用した心理物理実験によって、図地分離を導く因子を客観的・定量的に同定し、これが初期・中期視覚皮質に見られる周辺変調に起源を持つことを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- 1) Robust detection of medial-axis by onset synchronization of border-ownership selective cells and shape reconstruction from its medial-axis. Y. Hatori and K. Sakai (2008) *Lecture Note in Computer Science* [in press] 査読有
- 2) Orientation and spatial frequency dependency in border-ownership dependent tilt aftereffect. T. Sugihara, Y. Tsuji and K. Sakai (2008) *Journal of Optical Society of America, A*, Vol.25, No.6, 1426-1434 査読有
- 3) Spatial attention in early vision for the perception of border ownership. N. Wagatsuma, R. Shimizu and K. Sakai (2008) *Journal of Vision*, Vol.8, No.7, 22, 1-19 査読有
- 4) Representation of medial axis from synchronous firing of border-ownership selective cells. Y. Hatori and K. Sakai (2008) *Lecture Note in Computer Science*, Vol.4984, 18-26 査読有
- 5) Effect of spatial attention in early vision for the modulation of the perception of border-ownership. N. Wagatsuma, R. Shimizu and K. Sakai (2008) *Lecture Note in Computer Science*, Vol.4984, 348-357 査読有
- 6) Direction of figure is determined by asymmetric surrounding suppression/ facilitation. H. Nishimura and K. Sakai (2007) *Neurocomputing*, Vol.70, 1920-1924 査読有
- 7) Simultaneous determination of depth and motion in early vision. K. Sakai and S. Katsumata (2007) *Neurocomputing*, Vol.70, 1819-1823 査読有
- 8) Border-ownership dependent tilt aftereffect without completeness of a figure. T. Sugihara, Y. Tsuji and K. Sakai (2007) *Journal of Optical Society of America, A*, Vol.24, No.1, 18-24 査読有

[学会発表] (計30件)

- 1) Independence of space-based and feature-based attention in the determination of figure direction. N. Wagatsuma, R. Shimizu and K. Sakai (2008) *BMC Neuroscience* 2008, 9 (Suppl 1), 116 (*Seventeenth Annual Computational Neuroscience Meeting: CNS*2008*), Portland, OR, USA, July 21, 2008
- 2) Robust representation of medial axis by the onset synchronization of border-ownership Y. Hatori and K. Sakai (2008) *Neuro 2008, Annual Meeting Abstract for Japan Neuroscience Society*, P2-k09, Tokyo, July 10, 2008
- 3) Spatial attention in early vision modulates the perception of the border-ownership. N. Wagatsuma, R. Shimizu and K. Sakai (2008) *Neuro 2008, Annual Meeting Abstract for Japan Neuroscience Society*, Tokyo, P1-j03, July 9, 2008
- 4) Contrast Modulation by Spatial Attention for the Perception of Figure Directions. N. Wagatsuma, R. Shimizu and K. Sakai (2008) *Journal of Vision, Vision Sciences Society, 2008 Annual Meeting Abstract*, vol.8-6 p882, Naples, FL, USA, May 10, 2008,
- 5) Surround modulation reproduces the robust perception of border-ownership including Gestalt factors. K. Sakai, H. Nishimura, N. Wagatsuma and R. Shimizu (2007) *Society for Neuroscience, 2007 Annual Meeting Abstract*, 229.7 (oral presentation, in top 10%), San Diego, CA, USA, Nov. 4, 2007
- 6) Properties of synaptic transmission activated by UV and IR laser photolysis and its analysis. H. Kojima, T. Maruo, S. Katsumata, S. Tojou, Y. Nakazato, M. Tsukada, S. Okabe and K. Sakai (2007) *Society for Neuroscience, 2007 Annual Meeting Abstract*, 360.17/K27, Yokohama, Nov. 4, 2007
- 7) Analysis of synaptic transmissions by UV and IR laser photolysis. H. Kojima, T. Maruo, S. Katsumata, S. Tojou, Y. Nakazato, M. Tsukada, S. Okabe and K. Sakai (2007) *Neuro 2007, Annual Meeting Abstract for Japan Neuroscience Society*, O1P-F09 (Oral presentation, in top 20%), Yokohama, Sep. 11, 2007
- 8) Figure/ground segregation in natural images based on surround modulation in early vision. S. Watanabe, H. Nishimura and K. Sakai (2007) *Neuro 2007, Annual Meeting Abstract for Japan Neuroscience Society*, P2-e28, Yokohama, Sep. 11, 2007

9) Characteristics of surround modulation and stimulus shape for consistent determination of border ownership.

H. Nishimura, Y. Tsuji and K. Sakai (2007)
Neuro 2007, Annual Meeting Abstract for Japan Neuroscience Society, P3-f04, Yokohama, Sep. 11, 2007

10) A crucial role of surrounding modulation for border-ownership determination.

H. Nishimura, S. Watanabe and K. Sakai
Perception, Vol.36, 216 (*European Conference on Vision and Perception 2007, Abstract*), Arezzo, Italy, Aug. 30, 2007

〔図書〕 (計 1 件)

1) 測定・解析理論

酒井 宏, 永井岳大, 杉原 忠 (2008)
感覚・知覚の科学 (5 卷 3 章), 内川恵二 編,
朝倉書店, 38-67

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 宏 (SAKAI KO)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・
教授
研究者番号 : 80281666