

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22300090

研究課題名(和文)形状の知覚と皮質表現

研究課題名(英文) Perception and Representation of Shape

研究代表者

酒井 宏 (Sakai, Ko)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：80281666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,600,000円、(間接経費) 3,180,000円

研究成果の概要(和文)：物体認知に至る最も根本的な問題は、形状の知覚とその皮質表現である。本研究では、この問題に心理物理実験・計算論・生理学知見を総合してアプローチして、その知覚現象を明らかにし、それを生起する神経機構の一端を明らかにした。具体的には、(1) 図方向選択性細胞が群化・同期することによって図(面)を表現する機構、(2) 自然輪郭が内在する面(図)を誘導する因子、(3) 曲率選択性の生起原理、(4) 皮質における中心軸による形状表現、について理解を進めた。

研究成果の概要(英文)：A fundamental problem towards object recognition is the perception of shape and its cortical representation. The present study approached this problem by integrating psychophysics, computational analyses and physiological knowledge, in order to reveal the perceptual phenomena and underlying neural mechanisms. Specifically, we investigated the following problems and provided evidence for the underlying mechanisms: (1) mechanisms to group/synchronize B0 selective neurons to produce surface/figure, (2) perceptual factors that induce figure/surface, (3) generation principle for curvature selectivity, and (4) medial axis representation of shape in the visual cortex.

研究分野：視覚科学

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：認知科学 脳・神経 神経科学 画像・文章・音声等認識 感性情報学

1. 研究開始当初の背景

図方向選択性細胞に関する生理学的研究は R. von der Heydt らによって進められ、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(e.g., Qiu, Sugihara & von der Heydt, Nature Neurosci 2007)。申請者は、細胞の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、生理学的モデルを基に、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; Sugihara et al, JOSA, A, 2007; 2008)。

このモデルは、単一細胞が広域的な輪郭の解釈を必要とせず、局所コントラスト分布から図方向を決められるという点で独創的である。一方で、大域情報を用いないために、窓問題(aperture problem)は解決できない。ただし、提案したモデル細胞の図方向正答率は約70%であり、細胞受容野サイズと同様の局所的な画像を見せられた時のヒト被験者の正解率(Fowlkes et al, J. Vision 2007)と一致した。モデルは局所情報からの図方向知覚は良く再現しているといえる。

皮質で形状がどのように表現されているか(shape coding)は、最近になって神経科学的研究が進んでいる。形状の表現は、V1 で始まり(Lee et al, Vision Res 2000)、V4 では様々な2次元形状が表現され(Pasupathy & Connor, Nature Neurosci 2002)、IT では中程度に複雑な物体の部品が表現されていることが明らかになってきた(Tsunoda et al, Nature Neurosci 2001)。さらに、IT では3次元形状がいくつかの表面領域によって表現されていることが判ってきている(Yamane et al, Nature Neurosci 2008)。

2. 研究の目的

視覚系の主目的は物体認知にある。物体認知に至る最も根本的な問題は、形状の知覚とその皮質表現である。本研究では、この問題に心理物理学・計算論・生理学を総合してアプローチして、その知覚現象を明らかにし、それを生起する神経機構を明らかにする。

具体的には、

(1)面知覚は図方向選択性細胞反応の群化を基礎とすることを計算論的・心理物理学的に示す。そして、

(2)面(図)が知覚されるための準大域的な輪郭の特徴を心理物理学的に明らかにし、その特徴は神経群化を起源とすることを知覚と計算の一致から示す。さらに、

(3)2次元面表現から3次元形状表現への変換、(4)形状知覚・表現の神経機構の基礎となるモデルを提案する。

本研究では、図方向細胞群の onset 時に生じる発火同期によって、形状が中心軸によ

て表現(図1)されるとの仮説を心理物理実験と計算論的モデルから検討する。一方、自然画像から抽出した多様な輪郭を利用して(図2)、準大域的(視野角約15~40°)な輪郭のどのような特徴が図(面)を決定する因子となるかを明らかにし、この特徴が神経群化に依存することを示す。さらに、2次元表現から3次元表面セグメントを構成する表現への変換を提案する。

3. 研究の方法

(1)図方向選択性細胞が群化することによって図(面)を表現する機構を、計算論的に検討した。多数の図方向選択性(B0)細胞と中心軸(MA)細胞を、生理学的にリアリスティックなモデル細胞として構築した。輪郭上のモデル細胞が同時に発火した場合、伝搬したパルスは中心軸上に同時に到達し、MA細胞を強く発火させる。形状は、発火するMA細胞の位置と受容野サイズから表現される。MA細胞群の反応を計算し、これらによる形状表現を解析した。

輪郭の同期が図知覚に与える影響を心理物理学的に研究した。具体的には、輪郭の同期程度の変化による図判断の変化を計測した。刺激には、輪郭形状の曖昧性と多様性を実現するために、自然画像中の輪郭形状を利用した。外枠のどちら側を輪郭と同期させるかによって、図方向知覚が変調を受けるかどうかを測定した。

(2)面(図)が知覚されるための準大域的な輪郭の特徴を心理物理学的に明らかにした。輪郭が内在するどのような特徴が面(図)を決定する因子であるかを、心理物理実験によって明らかにした。具体的には、まず自然画像輪郭を呈示して、それぞれの図方向判定に要する反応時間を計測した。自然画像(Berkeley Segmentation Dataset)から視野角約15度幅の領域を選択し、この領域内部の輪郭(準大

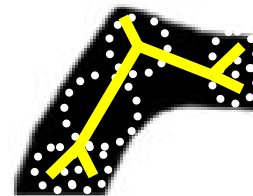


図1：中心軸表現の例。(上)自然画像，(下)予測される表現。輪郭に内接する円の中心位置(太線)と半径(波線)によって任意形状を表現できる。

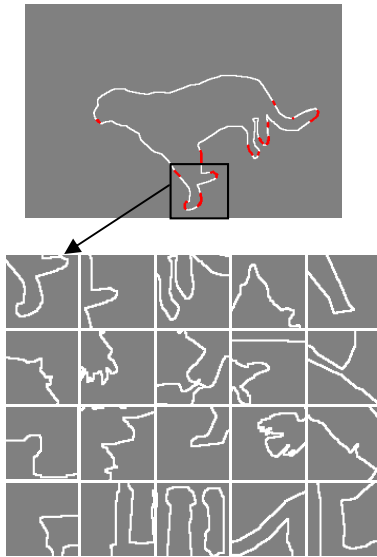


図2：自然画像(上)の輪郭の特徴量を計算する(ここでは赤(灰)で凸性を示す)。特徴量が適当な部分を切り出して呈示刺激とする(下)。刺激を150ms呈示し、指定位置で、図が左右どちらにあるかを回答させる心理実験を実施する。同時に、これらの刺激をモデルへの入力としてシミュレーション実験を実施する。

域的輪郭)を呈示した。刺激特徴と反応時間の関係を計算統計解析・多変量解析によって導く。

(3) 2次元面表現から3次元形状表現への変換・形成の基礎機構となる計算論的モデルを提案し、輪郭の幾何学に基づいて生成される反応について検討した。シミュレーション実験を行って、反応の程度が凸性・閉合性によって変化するかどうかを観察した。さらに、局所的には左右眼像から算出された2つの2次元中心軸表現を融合することによって3次元中心軸を決定するenergy modelを提案し、このモデルが実現する3次元形状表現を計算した。

(4) 腹側経路に沿って形状表現が形成されていくメカニズムを、計算論的に検討した。V4領野の細胞が示す曲率に対する選択性の生起が、符号化における疎性(sparseness)に依存するという仮説を検討した。すなわち、疎性を制御することによって、生理学的に知られるV4の選択性を生起することができるかどうかを検討した。

具体的には、線分(方位)選択性をもつモデルV1細胞の自然画像に対する反応をもとめ、これを入力として疎性を制約とした成分分析を行った。疎性が適当であるときには、適応学習によって算出される基底関数がV2細胞の受容野特性(角選択性)を示す。さらに、モデルV2細胞の反応を入力として、同様に成分分析を行った。このようにして得られた基底関数の疎性への依存性を解析した。単一細胞の曲率選択性だけでなく、群として示す特性も解析した。

4. 研究成果

(1) 図方向選択性細胞が群化することによって、図(面)を表現する機構を計算論的に明らかにした。具体的には、図方向選択性細胞がonset synchronizationによって同期することにより、中心軸表現を構成することを計算論的に示した。MA細胞の反応から面の再構成(逆算)を行って、MA細胞群による形状表現の正確度を評価したところ、高い再現率を実現していることがわかった。

心理物理実験を行って、輪郭の同期が図知覚に与える影響を研究した。輪郭の同期程度の変化による図判断の変化を計測したところ、輪郭を非同期に呈示すると図知覚が成立しにくくなることが明らかになった。このことは、図方向選択性細胞のonset synchronizationが図(面)知覚の基礎となっていること支持する。

(2) 輪郭が内在するどの特徴が面(図)を決定する因子であるかを、心理物理実験によって明らかにした。反応時間と刺激特徴(e.g., 凸性, 並行性, 閉合性)の関係を、最適化多重回帰分析したところ、閉合性が最も面決定に効果があり、続いて凸性が有効であることが示された。

(3) 2次元面表現から3次元形状表現への変換・形成の基礎機構となる計算論的モデルを構築し、輪郭の幾何学に基づいて生成される反応について検討した。凸性・閉合性については、反応の変調程度が小さかったことから、知覚の主要因とはなり得ない可能性が示された。2つの2次元中心軸表現を融合することによって算出した3次元中心軸表現は、ヒトの知覚と同等な形状表現が実現できることが示された。

(4) 形状知覚の機能と神経機構を、その皮質表現と符号化について注目して解析を進めた。V4領野の細胞が示す角・曲率に対する選択性の生起が、符号化における疎性(sparseness)に依存することが判った。疎性が適当であるときには、算出された基底はV4細胞の受容野特性(曲率選択性)を示した。それ以外の不適当な疎性のときには、受容野特性を再現しなかった。単一細胞の曲率選択性だけでなく、群として示す特性(acute-angle preference)が再現された。これらの結果は、疎性が皮質形状表現に重要な役割を果たしていることを示す。

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12件：査読有)

1) Early Representation of Shape by Onset Synchronization of Border Ownership

- Selective Cells in the V1-V2 Network. K. Sakai and Y. Hatori (2014) *Journal of Optical Society of America, A*, Vol.31, No.4, 716-729, doi: 10.1364/JOSAA.31.000716
- 2) Spatial and Feature-Based Attention in a Layered Cortical Microcircuit Model. N. Wagatsuma, T. C. Potjans, M. Diesmann, K. Sakai, T. Fukai (2013) *PLoS ONE*, 06 Dec 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0080788
- 3) Feature-based Attention in Early Vision for the Modulation of Figure-Ground Segregation. N. Wagatsuma, M. Oki and K. Sakai (2013) *Frontiers in Psychology*, Vol.4, Article 123, 17 pages, doi: 10.3389/fpsyg.2013.00123
- 4) Latency Modulation of Border Ownership Selective Cells in V1-V2 Feed-Forward Model. K. Sakai and S. Michii (2013) Proceedings of International Conference on Neural Information Processing (ICONIP) 2013, (Oral Presentation) *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.8228, pp.291-300, doi: 10.1007/978-3-642-42051-1_37
- 5) Sparseness Controls the Receptive Field Characteristics of V4 Neurons: Generation of Curvature Selectivity in V4. Y. Hatori, T. Mashita, K. Sakai (2013) Proceedings of International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN) 2013 (Oral Presentation) *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 8131, pp.327-334, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-40728-4_41
- 6) Consistent and robust determination of border-ownership based on asymmetric surrounding modulation. K. Sakai, H. Nishimura, R. Shimizu and K. Kondo (2012) *Neural Networks*, Vol.33, 257-274
- 7) Structures of Surround Modulation for the Border-Ownership Selectivity of V2 cells. Y. Nakata and K. Sakai (2012) Proceedings of International Conference on Neural Information Processing (ICONIP) 2012 *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.7663, p.383-392 (Oral Presentation)
- 8) Surface-based Construction of Curvature Selectivity from the Integration of Local Orientations. Y. Hatori and K. Sakai (2012) Proceedings of International Conference on Neural Information Processing (ICONIP) 2012 *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.7663, p425-434 (Oral Presentation)
- 9) Decoding of Depth and Motion in Ambiguous Binocular Perception. K. Sakai, M. Ogiya and Y. Hirai (2011) *Journal of Optical Society of America, A*, Vol.28, No.7, 1445-1452
- 10) Medial Axis for 3D Shape Representation. W. Qiu and K. Sakai (2011) Proceedings of International Conference on Neural Information Processing (ICONIP) 2011, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.7062, 79-87
- 11) Roles of Early Vision for the Dynamics of Border-Ownership Selective Neurons. N. Wagatsuma and K. Sakai (2010). Proceedings of International Conference on Neural Information Processing (ICONIP) 2010, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.6443, 99-106 (Oral Presentation)
- 12) Orientation Dependence of Surround Modulation in the Population Coding of Figure/Ground. K. Kondo and K. Sakai (2010) Proceedings of International Conference on Neural Information Processing (ICONIP) 2010, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.6444, 565-573 (Oral Presentation)
- [学会発表](計18件)
- 1) Sparseness for the Representation of Surface in the Construction of Curvature Selectivity in V4. Y. Hatori, T. Mashita, K. Sakai (2013) PRISM2: The science of light & shade, (Oct. 09-10, 2013; Bordeaux, France)
- 2) Sparse Representation in the Construction of Curvature Selectivity in V4. Y. Hatori, T. Mashita, and K. Sakai (2013) 36th European Conference on Visual Perception 2013, P16-177 (Aug. 27, 2013; Bremen, Germany)
- 3) Surface based integration of local orientations for the construction of curvature selectivity -Neural mechanism of sparse coding in V4-. Y. Hatori, T. Mashita, K. Sakai (2013) Neuro 2013, Annual Meeting Abstract for

Japan Neuroscience Society, P2-2-100
(June 22, 2013 ; Kyoto, Japan)

4) Space- and feature-based attention differentially modulates orientation tuning curves in a layered cortical microcircuit model. N. Wagatsuma¹, T. Potjans, M. Diesmann, K. Sakai, T. Fukai (2012)

Society for Neuroscience, 2012 Annual Meeting Abstract, article 673.04 (Oct.16, 2012; New Orleans, LA, USA)

5) Spatio-temporal constrains of surround modulation for border-ownership selectivity. K. Sakai, K.Kondo, S.Michii (2012)

Society for Neuroscience, 2012 Annual Meeting Abstract, article 261.16 (Oct.14, 2012; New Orleans, LA, USA)

6) Curvature selectivity based on the surface representation in lower- to intermediate-level visual corticies. Y. Hatori and K. Sakai (2012)

Society for Neuroscience, 2012 Annual Meeting Abstract, article 261.02 (Oct.14, 2012; New Orleans, LA, USA)

7) A computational study on the representation of curvature constructed from surface-based integration. Y. Hatori and K. Sakai (2012)

Vision Sciences Society, Annual Meeting 2012, Abstract; Journal of Vision, 12, article 63.329 (May 16, 2012; Naples, FL, USA)

8) Perceptual integration of specular highlight and shading. K. Sakai, R. Meiji, T. Abe (2012)

Vision Sciences Society, Annual Meeting 2012, Abstract; Journal of Vision, 12, article 56.445 (May 15, 2012; Naples, FL, USA)

9) Space-based and Feature-based Attention in a Realistic Layered-microcircuit Model of Visual Cortex. N. Wagatsuma, T. Potjans, M. Diesmann, K. Sakai, T. Fukai (2012)

Vision Sciences Society, Annual Meeting 2012, Abstract; Journal of Vision, 12, article 36.409 (May 13, 2012; Naples, FL, USA)

10) Modeling curvature synthesis based on the surface representation in early to intermediate visual areas. Y. Hatori and K. Sakai (2012)

Neuro 2012, Annual Meeting Abstract for Japan Neuroscience Society, P2-a36 (Sep. 19, 2012; Nagoya, Japan)

11) Coding Scheme for the representation of shape in cortical area V4 --- A computational analysis. T. Mashita and K. Sakai (2012)

Neuro 2012, Annual Meeting Abstract for Japan Neuroscience Society, P2-a28 (Sep. 19, 2012; Nagoya, Japan)

12) Perception of border ownership by multiple Gestalt factors. S. Matsuoka and K. Sakai

Asia-Pacific Conference on Vision 2012, Abstract p.63 (oral presentation; July 14, 2012; Incheon, Korea)

13) Medial axis for the cortical representation of 3D shape. W. Qiu and K. Sakai (2012)

Asia-Pacific Conference on Vision 2012, Abstract p.63 (oral presentation; July 14, 2012; Incheon, Korea)

14) Roles of surface representation in early visual areas for the construction of curvature selectivity. Y. Hatori and K. Sakai

Brain Inspired Computing 2012, Poster 1-4 (June 4, 2012; Tsukuba, Japan)

15) Representation of shape in cortical area V2. T. Mashita and K. Sakai

Brain Inspired Computing 2012, Poster 1-5 (June 4, 2012; Tsukuba, Japan)

16) Neural mechanisms for 3D shape representation by medial axis. W. Qiu and K. Sakai

Brain Inspired Computing 2012, Poster 2-4 (June 5, 2012; Tsukuba, Japan)

17) Surface construction from the onset synchronization of border-ownership cells in V1-V2 model. Y. Hatori and K. Sakai (2011)

Vision Sciences Society, Annual Meeting 2011, Abstract; Journal of Vision, 11, 11, article 886 (May, 2011; Naples, FL)

18) Roles of early vision for the dynamics of border-ownership selective cells. N. Wagatsuma, T. Mishima, T. Fukai and K. Sakai (2010)

Vision Sciences Society, Annual Meeting 2010, Abstract, p.173 (May, 2010; Naples, FL)

〔その他〕

ホームページ：

<http://www.cvs.cs.tsukuba.ac.jp>

6．研究組織

(1)研究代表者

酒井 宏 (SAKAI, Ko)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：80281666

(3)連携研究者

杉原 忠 (SUGIHARA, Tadashi)

理化学研究所・脳科学総合研究センター・

研究員

研究者番号： 50300877