

自然画像における形状認知：注意による領域・物体の選択

研究代表者 酒井 宏 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
研究協力者 杉原 忠 理化学研究所・脳科学総合研究センター・研究員

1. 研究概要

(研究目的)

本研究では、形状知覚の皮質メカニズムを計算論的に理解し、これを実画像に適応できる画像理解アルゴリズムとして提案することを目的とする。特に、形状知覚の柱となる2つの基礎機構である、(1)局所的な図方向の自立的な群化、(2)注意による選択、について計算論的に理解し、(3)注意による群化の変調によって領域・物体が選択されることを基礎とした、知的な形状認知を実現するアルゴリズムを提案する。

具体的には、図方向選択性細胞の反応が同期により群化する過程が、空間的注意・特徴的注意によって変調されることによって、知覚される図が決定されることを示す。特に、空間的注意による領域の選択・特徴的注意による物体の選択を実現する。

平成21年度は、形状知覚の柱となる基礎機構である、

- ・面の形成 と、
- ・注意による面の選択 について研究を進めた。

具体的には：

- (1) 局所図方向の群化による大域的面の形成モデルを提案した。
- (2) 知覚される面の形成が輪郭の同期に依存することを心理物理学的に明らかにした。
- (3) 空間にむける注意による図知覚の変調・領域の選択を心理物理学的に明らかにした。

平成22年度は、さらに研究を進め、

- ・注意による物体の選択 について研究を進める。

具体的には：

- (1) 特徴的注意による図知覚の変調・物体の選択を心理物理実験により明らかにする。
- (2) 図方向群化の注意による変調をシミュレーション実験と心理実験の比較から明らかにする。

本研究は、膨大でそれ自身は無作為な局所情報を、どのように選択・統合して、意味のある大域的形状を知覚するかという、人の画像理解における本質にアプローチするものである。提案するアルゴリズムは、単に物理的な形状を検出するのではなく、画像全体のなかで注意を向ける位置・対象を選択し、人間と同様な画像理解(同じものを見ること)を可能にする。これは、人との知的な対話システムを実現する等、情報爆発時代の重要な基礎技術になると期待できる。

(平成21年度の主要成果)

1. 局所図方向の群化による大域的面の形成モデル

輪郭に沿った図方向細胞モデルが発火同期によって群化・統合する過程が、注意によって変調を受け、形成される面が選択される機序を計算論的に明らかにした。H20 までに構築した物体周囲・領域検出モデルを基に、生理学的に忠実なプラットフォーム・モデルを構築した。このモデルによるシミュレーション実験の結果、図方向細胞の onset synchronization によって面が形成されることが判った。

2. 知覚される面の輪郭同期への依存

モデルから予測された、図方向細胞の同期によって面が形成されることが、最新の生理学実験によって確認された。このことは、輪郭が同期しないで呈示されると、面の形成が阻害されることを予測する。輪郭が曖昧であれば、図方向が逆転する可能性もある。知覚される面の輪郭同期への依存を心理物理実験によって測定した。その結果、自然画像輪郭でも、図方向は輪郭がより同期する方向に知覚されることが判った。

3. 空間的注意による図知覚の変調：領域の選択

空間的に何処に注意を向けるかによって、どれだけ図（物体領域）知覚が変化するかを定量的に明らかにするために、心理物理実験を行った。多様な局所手掛りを内在する輪郭(自然画像)を呈示して、注意によって変化する図方向判断の変調程度を測定した。その結果、注意は多様な図方向手掛かりの種類に依存せずに、一定の変調を導くことが判った。

このように、形状認知の皮質メカニズムを計算論的・心理物理学的に理解し、これを実画像に適応でき人と同様の理解を生じる画像理解アルゴリズムとして提案することを目的とした研究を行った。具体的には、面形成のメカニズムを提案し、このモデルが予測する輪郭同期の必要性を心理実験によって示した。さらに、空間にむける注意による図知覚の変調を測定し、図知覚を導く局所手掛り(Gestalt 要因)と注意が相反する場合を中心に検討し、両者の関係を定量的に示した。

面知覚モデルは LNCS(2009)に発表したほか、国内外の学会で発表した。このうち2件が優秀研究発表賞（映像情報メディア学会）・ベストプレゼンテーション賞（日本視覚学会）を受賞するなど、注目が集まった。

2. 局所図方向の群化による大域的面の形成モデル

本研究では、輪郭に沿った図方向細胞モデルが発火同期によって群化・統合する過程が、注意によって変調を受け、形成される面が選択される機序を計算論的に明らかにすることを目的としている。そこでまず、H20 までに構築した物体周囲・領域検出モデルを基に、生理学的に忠実なプラットフォーム・モデルを構築した(図1)。このモデルは、次の生理学的データに立脚する：

- ・空間的注意によって V1 細胞が変調される
(Lee, *et al*, *Nat. Neurosci*, 1999; Reynolds & Chelazzi, *Ann. Rev. Neurosci* 2004)。
- ・特徴に基づいた注意によって V2 図方向細胞が変調される
(Qiu, Sugihara & von der Heydt, *Nat Neurosci*, 2007; Rolls & Deco, 2002)。

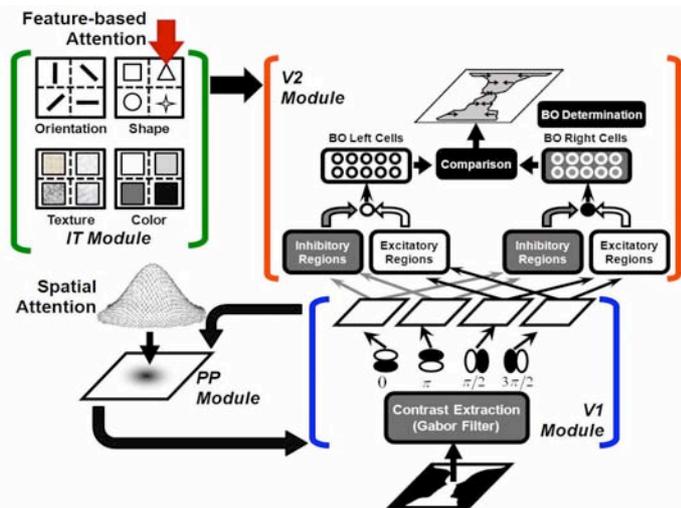


図 1. 図方向細胞の群化が、空間的注意と特徴に基づく注意によって変調され、知覚される図・形状が変化するモデル。

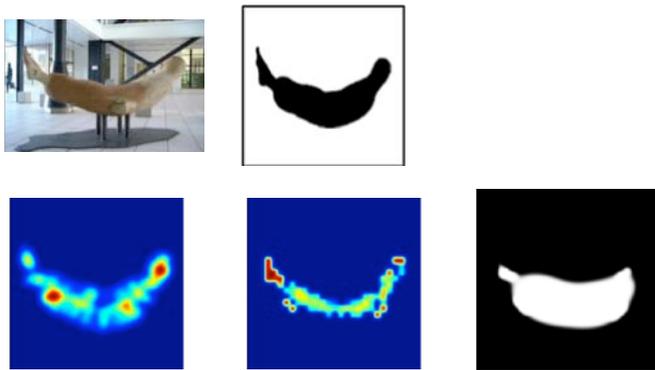


図2. 面の検出モデルの計算例. (左上)原自然画像. ここでは形状だけに注目して、画像中から物体の面を抜き出す(右上). (右下)モデルが再現した面形状. この例では再構成誤差は16%であった. (中央下)は、モデルが内部表現としてもつ中心軸. (左下)は、数学的に計算した中心軸表現. (Hatori & Sakai, LNCS 2009)

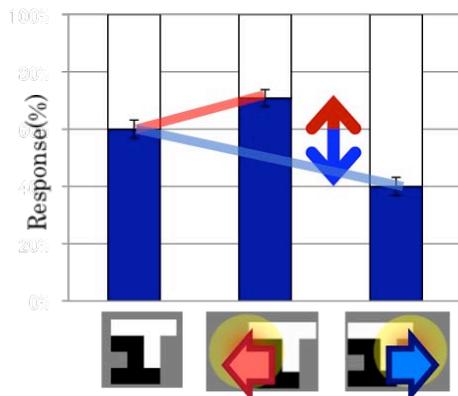


図3. シミュレーション結果の例. 中央の白黒境界からみて左右どちらに図があるかが曖昧なブロック刺激. 左棒が注意が無い場合. 注意を向けた方向(左右向矢印で方向を表示)が、図として知覚されやすくなる. 縦軸は反応強度(0~100%). なお、この刺激の場合は、注意が無いと右が図と判断される頻度がやや高い(60%).

モデルを NEXUS, MATLAB, NEURON を利用して構築し、単純なブロック図形および自然画像刺激のシミュレーションを実施した。シミュレーションの結果、図方向細胞が刺激呈示時に同期(onset synchronization)すると、面が形成されることが判った。人工図形・自然画像のいずれでも、同程度の再現性が得られた。図2に例を示す。

このモデルに図方向が曖昧なブロック刺激を入力して、注意を与えない場合、特定の空間位置に注意をあたえる場合、についてシミュレーション実験を行った。その結果、注意を向けた方向に図を知覚する傾向を再現した(図3)。

3. 知覚される面の輪郭同期への依存

面形成モデルでは、輪郭が呈示時に同期(onset synchronization)する必要があることが示された。最新の生理学実験では、同一物体の輪

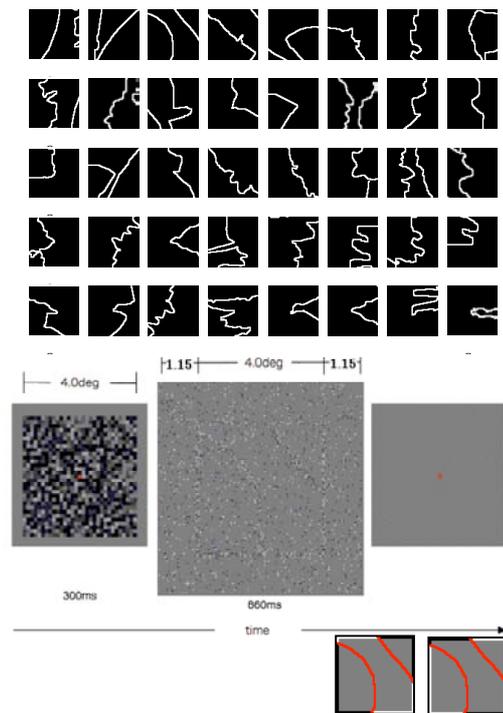


図4. (上)刺激とした自然画像パッチの例. (中)実験パラダイム. 中央のように、点滅するドットで輪郭と正方形の枠を呈示する. (右下)輪郭と枠の半分が同期する. 同期する枠と輪郭によって構成される面が知覚される.

郭に反応する図方向選択性細胞が、onset synchronization を示すことが報告された(Dong, et al., J. Vision, 2008)。これらのことは、輪郭がどのように同期するかによって知覚される面が変化することを示唆する。

本研究では、図方向が曖昧な輪郭を点滅するドットによって呈示し、それらの同期を変更したときに、知覚される面が変化するかを心理物理実験によって研究した。具体的には、自然画像の小領域を切り出したパッチ(図4上)を用意し、その輪郭と、輪郭を囲む正方形の枠を、周期的に点滅するドットで呈示した。輪郭がどちら側の枠と同期するかを変化させた(図4下)。輪郭と同期する枠が囲む部分が面と知覚されやすくなることが期待される。

実験の結果、輪郭の Gestalt 成分 (e.g., 凸・閉合・平行) に関わらず、同期する側が面と知覚されやすことが判った(図5)。ただし、Gestalt 要因が極めて強い場合は、同期による変調の程度は低下した。この結果は、輪郭が同期することによって、それを手掛かりとして面が形成され、物体が背景から分離されることを示す。一般には、物体が視野内に現れるときには、その輪郭は同時に出現するため、onset synchronization が発生する。これが面の形成を生起することは合理的と考えられる。

4. 空間的注意による図知覚の変調：領域の選択

空間的に何処に注意を向けるかによって、どれだけ図(物体領域)知覚が変化するかを定量的に明らかにするために、心理物理実験を行った。本研究では、局所手掛り(類似性・近接性等の Gestalt 因子)と、大域的手掛り(注意)が相反する場合のダイナミクスに最大の興味をもつ。局所情報から図方向が明らかな場合には、注意による図方向の逆転は生じないが、曖昧な図形では容易に逆転が生じると予測される。この時の知覚を評価するために：

- ・ 図方向が曖昧なブロック刺激を呈示して、図方向判断の反応時間を測定した。
- ・ 多様な局所手掛りを内在する輪郭(自然画像)を呈示して、図方向判断の反応時間を測定した。
- ・ 注意による反応時間の変調程度を測定した。

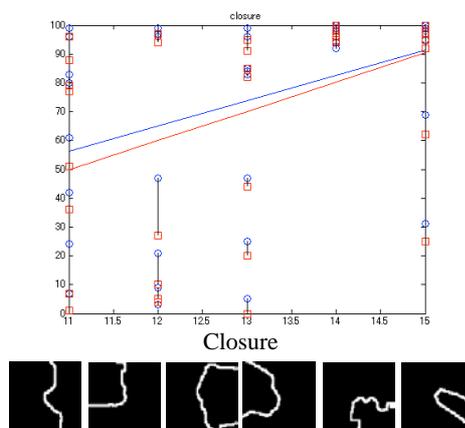


図5. 同期によって知覚される図方向が変化し、知覚される面が逆転する。線で結ばれた○と□が、同一刺激の同期2状態を示す。横軸は Gestalt 要因の強度(ここでは閉合度)、縦軸は知覚される面の方向。同期した側(○)に面が知覚されやすい。直線は回帰直線。有意に正の傾きとなり、閉合性がまずと正答率が上がっている。

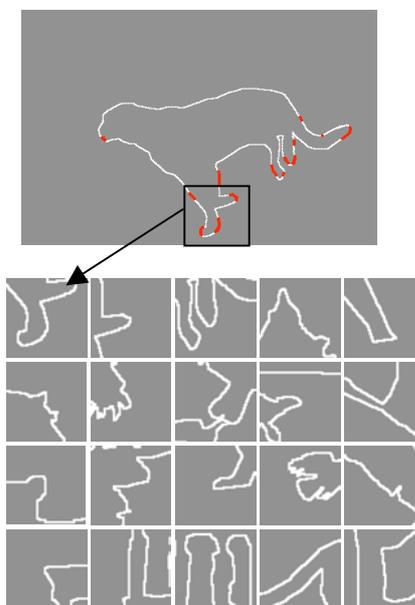


図6: 空間的注意による図方向知覚変化の実験で呈示する刺激。自然画像(上)から抽出した刺激の例(下)。

- ・空間的注意による図知覚の変調の程度を、局所手掛りをパラメータ(説明変数)として、多変量解析によって評価した。

具体的には、多様な局所情報を内在する自然画像の一部分(図6; 視野角約 15° の範囲)を呈示する。注意位置を変化させて、知覚される図を判断させる(図7)。定量的に厳密な心理物理実験では、数十を超える刺激を実験に用いることは現実的ではない。実験結果から容易に他重回帰分析が成立することを目論んで、実験計画法により最適な刺激を選択した。具体的には、輪郭に内在する各種の局所手掛かりを算出し、それぞれの手掛かりが様々な値をとる刺激を選択した。

実験の結果、図方向知覚は Gestalt 因子として知られる要因(e.g., 凸、閉合、平行)の程度が大きいほど、反応時間が短かった(図8)。図方向知覚に要する反応時間は、注意の影響を受け、注意が向けられた方向に図があると判断する時間が短かった。局所手掛かりと注意の効果には有意の交互作用が見られなかった。このことは、局所的な手掛かりと注意は動作回路が独立している可能性を示唆する。

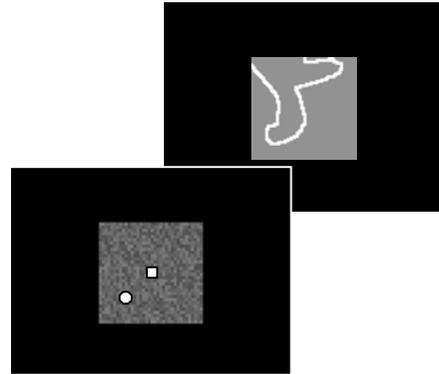


図7: 空間的注意による図方向知覚変化の実験パラダイム。指定位置(白点:ここでは刺激の左下に呈示)に注意を向ける。固視点(中央口)の左右どちら側が手前に見えるかを回答する。注意の強度は、検査位置(中央口)からの注意点(左下○)の距離によって制御する。

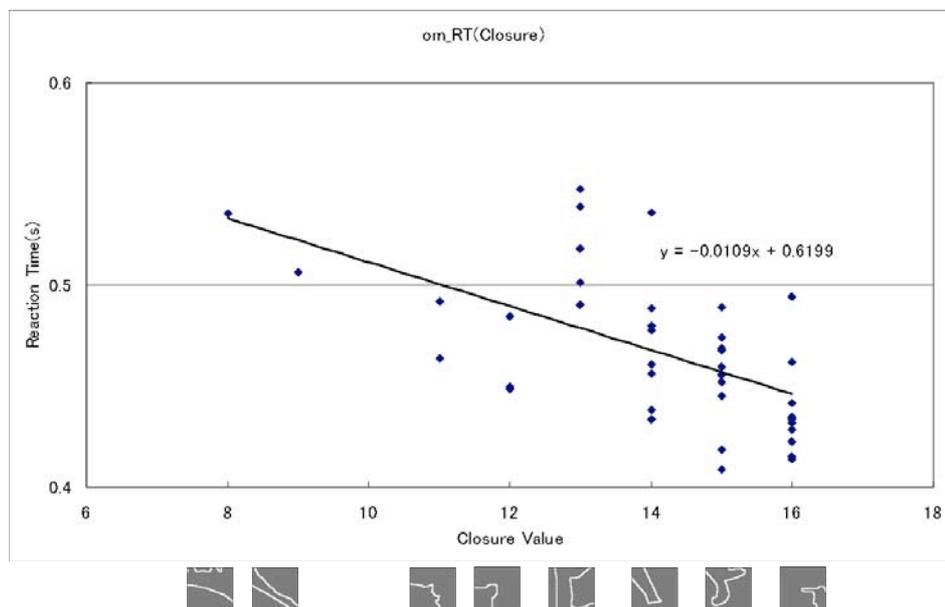


図8: 自然画像輪郭の図方向知覚に要する時間。横軸は閉合度。閉合度が高くなるほど(輪郭が閉じているほど)、図方向知覚は早くなる。このことは、閉合度が図方向知覚の因子になっていることを示す。

5. 今後の展望

注意は、特徴に対して選択的に働くことが知られている。空間的配置に関わりなく、ある特徴をもった物体が選択される。特徴的注意も空間的注意と同様のフレームワークで動作すると考えられる。本研究では、最も顕著で操作しやすい運動方向への注意を利用して、特徴的注意についても研究を進める。

まず、特徴的注意が図方向知覚・面知覚に動作するかどうかを心理物理学的に検討する。同一方向に運動するランダムドットの集合によって単一面(図)を構成し、画像中の2領域を、直交して運動する2群のドットによって構成する(図9)。この刺激を呈示する直前に、いずれかの運動方向に注意をむけておく。そうすると、その運動方向によって構成される面が、図として知覚されやすくなると予測される。この時の知覚を評価するために：

- ・運動方向によって構成される2面における、図方向判断とその反応時間を測定する。
- ・一方の運動方向に注意を向けたときの、図方向判断と反応時間の変調程度を測定する。

特徴注意による図知覚の変調の程度を、局所手掛りをパラメータ(説明変数)として、多変量解析によって評価する。

具体的には、H21年度の心理実験と同一の自然画像輪郭を利用して、輪郭を境に運動方向を変えた刺激を作成する。これらの心理物理実験から、図方向を誘導する局所手掛りの強度と、空間的注意・特徴的注意の強度の競合関係が定量的に得られる。この結果から、図方向と物体位置が相反する場合に、知覚を大域的なものに誘導するために必要な注意の性質・強度が算出可能になる。また、それぞれの刺激に対して、知覚の反転しやすさがランク付けされる。

Familiar object (FO)は、主観によって「見るもの」を変える手掛かりとなる。たとえば、人の形は複雑な光景の中でも「注意」を引く。ここでは、FOが写り込んだ自然画像を刺激に混ぜて実験を行う。FOの変調程度を評価し、これによって familiarity をひとつのパラメータとして解析する。

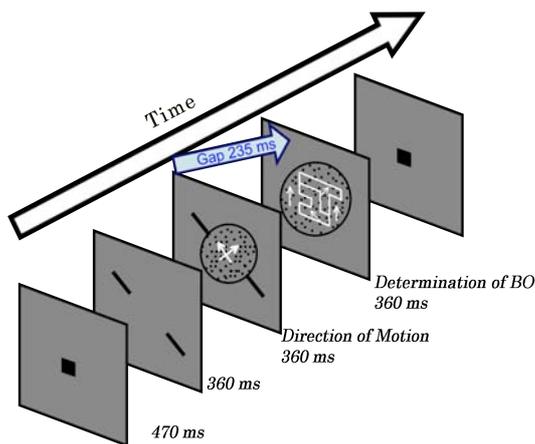


図9：特徴に基づく注意による図方向知覚の変調を測定する心理物理実験。斜線方向の運動弁別を行わせることによって、その運動方向へ注意を誘導する。その後、曖昧な図方向をもつ刺激を呈示する。注意を向けた方向が図と知覚されやすくなると期待される。

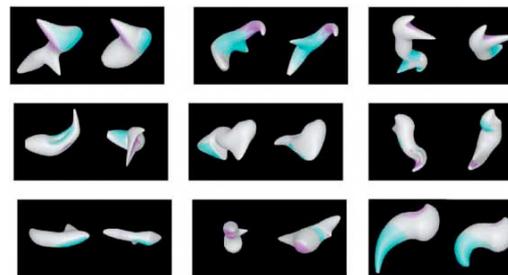


図10：IT野細胞が強く反応する3次元刺激の例 (Yamane, *et al.*, *Nat Neurosci* 2008)。比較的大きな曲面(着色領域)が、単一細胞によって表現されている。

さらに、本研究では、図方向群化の注意による変調を計算論的に研究する。心理実験と同一の刺激についてモデルのシミュレーションを行なって、モデルの同期と遷移について、その時間と程度を測定してランク付け、心理実験のランクと比較する。すなわち、

- ・ 局所的図方向が注意によって変調され、大域的な図へと誘導されるモデル特性を、知覚特性と比較する。

これによって、知覚特性を実現する計算論的本質を明らかにする。また、familiar object についてもランクを比較する。モデルには familiarity を評価する機能は含まれていない。モデルと知覚の差異は、familiarity に由来する。変調程度を評価し、心理物理実験の基礎データとする。面を構成する中心軸表現は、容易に3次元へと拡張できる。2次元では輪郭に接する円によって表現するが、3次元では面に接する球によって表現する。提案するモデルを3次元に拡張し、高次視覚野と同程度の3次元形状表現(図 10)の実現を試みる。

研究成果リスト

論文

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 (2009)

Proceedings of International Conference on Neural Information Processing (ICONIP) 2008

Lecture Note in Computer Science, Vol.5506, 301-309

Priority of depth over motion in ambiguous binocular perception.

K. Sakai, M. Ogiya and Y. Hirai

[in submission]

Consistent and robust determination of border ownership based on asymmetric surrounding contrast.

K. Sakai, H. Nishimura, S. Kondo and R. Shimizu

[in submission]

受賞

映像情報メディア学会平成21年度優秀研究発表賞

「特徴に基づく注意が図方向知覚に及ぼす影響」

沖めぐみ、酒井 宏

日本視覚学会 2010 年冬季大会ベストプレゼンテーション賞

「鏡面ハイライトと陰影の知覚的統合」

明治涼子、酒井 宏

招待講演

“物体表象につながる輪郭処理”

「視覚認識機能のモデル実現のための協調的システムの研究」

東北大学, 電気通信研究所, 仙台市, 2009 年 11 月 24 日

"面の知覚と形状の表現"

「日本神経回路学会 公開講座」

玉川大学, 東京都, 2009 年 3 月 10 日

その他、学会発表、研究解説等は、<http://www.cvs.cs.tsukuba.ac.jp/> を参照 (Google などで「計算 視覚」「vision science」などと検索)。