

中低次視覚皮質の活動に基づく注意選択決定の時間ダイナミクス

Dynamics of the Saliency Map based on the Integration of Border-Ownership

我妻 伸彦^{*1} 上村 朋弘^{*1} 矢口 博之^{*1}
 Nobuhiko Wagatsuma Tomohiro Uemura Yaguchi Hiroyuki

^{*1} 東京電機大学理工学部
 Tokyo Denki University, School of Science and Engineering

Recent computational study has reported that the allocation of Border-Ownership in the V2 and V4 areas plays a fundamental role in the bottom-up attentional selection [Russell 14]. In order to understand the perceptual mechanism of the bottom-up attentional selection, we investigated the temporal dynamics of this neurally inspired algorithm. In our proposed model, the model cells mediating the attentional selection were represented by a partial differential equation with biological time [Deco 04]. The attentional selection of our model showed agreement with that of the human performance. Our results suggest that the Border-Ownership selectivity in the intermediate-level visual areas has key roles in the bottom-up attentional selection and the object perception.

1. はじめに

外界から投射される膨大な視覚情報は、網膜から大脳皮質の視覚領野へと送られる。その際、我々の視覚系は、視野内にある全ての情報を均等に処理しているわけではない。最も注目すべき物体・空間に焦点を当て、それを重点的に処理している。これが視覚的注意である[Posner 80]。視覚的注意は、情報を取捨選択し、実環境に適応するために生体が持つ知覚戦略である。近年、視覚的注意が生体の神経細胞活動と視覚に変調を引き起こす事が示された[Self 11][Carrasco 11]。このような視覚的注意が動作する皮質メカニズムを理解するための計算論的モデル構築とそのシミュレーション研究が盛んに行われている[Deco 04][我妻 15]。特に、Itti らは、初期視覚野の情報処理メカニズムに注目した注意選択の計算モデル(saliency map)を提案した[Itti 00]。このモデルは、ヒトの注意選択特性を良く説明するが、図地領域分離を担う中低次視覚野の情報処理過程を考慮していない。

物体とその位置を認識するために、最も基礎的かつ、本質的な問題は視野領域中の物体領域(図)を背景(地)から分離する事である(図地領域分離)。この処理において、図と地の境界となる輪郭からの図方向を決定する事が極めて重要となる(図 1)。生体の図方向検出に大きな役割を持つと考えられる神経細胞がサルの中低次視覚野 V2 で発見された[Zhou 00]。この神経細胞は、受容野に投影された境界がどちら側に所属するか(輪郭からどちら側に物体が存在するか)に対して選択性を持つ(Border-Ownership (BO)選択性細胞)。Russell らは、中低次視覚野の BO 選択性細胞による図領域検出を反映した注意選択の saliency map モデルを提案した[Russell 14](図 2)。Itti らの注意選択のモデルと比較して、このモデルは図地領域分離に起因するヒトの注意選択特性を良く再現、説明した。しかし、これら注意選択の計算モデルは、時間経過にともなう神経細胞の反応ダイナミクスが処理過程に反映されていない。そのため、モデルが決定する注意選択が、時間経過により、どのように移り変わっていくかが不明瞭である。

本研究では、ヒトの注意選択特性と時間経過による注意移動

連絡先: 我妻伸彦, 東京電機大学, 埼玉県比企郡鳩山町石坂, Email: nwagatsuma@rd.dendai.ac.jp

のメカニズムを理解するため、Russell らによる先行研究モデル[Russell 14]の注意選択を司るモデル細胞の時間ダイナミクスを検討した。神経細胞の発火率変化の時間ダイナミクス[Deco 04][Wagatsuma 08]と生体の注意選択に重要な復帰抑制効果(Inhibition of Return)[Itti 01][郷地 09]を、Russell らの注意選択を司るモデル細胞に導入し、時間経過に伴う注意選択の空間的变化を計算論的に研究した。シミュレーションの結果、我々の提案モデルは、異なる視覚特徴へと注意を向けるヒトの注意選択特性を再現した。さらに、モデルは時間経過とともに、最大反応を示す空間領域を変化させ、ヒトと類似した視覚探索の特性を示した。これらの結果は、注意選択決定のための視覚情報処理メカニズムを示唆する。

2. 提案モデル

2.1 図地領域分離に基づく注意選択の Saliency Map モデル

提案モデルでは、Russell らが提案する saliency map モデル[Russell 14]と同様のメカニズムを用いて、与えられた入力画像

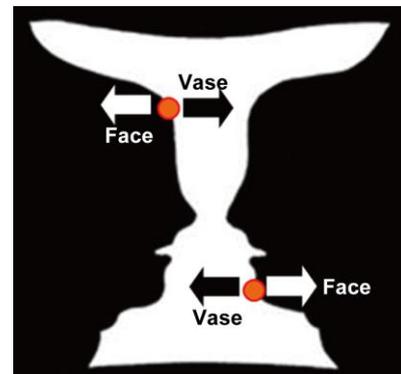


図 1. 図地領域分離による物体知覚の例。図では例として多義図形ルビンのつぼを用いる。図中の輪郭上の○から黒い矢印の方向に図が存在すると考えらるつぼ(Vase)が知覚される。図方向が白い矢印方向へと反転すると顔(Face)が知覚される。輪郭からの図方向が反転することにより、知覚される物体が大きく変化する。

(A) Proto-object Saliency メカニズム

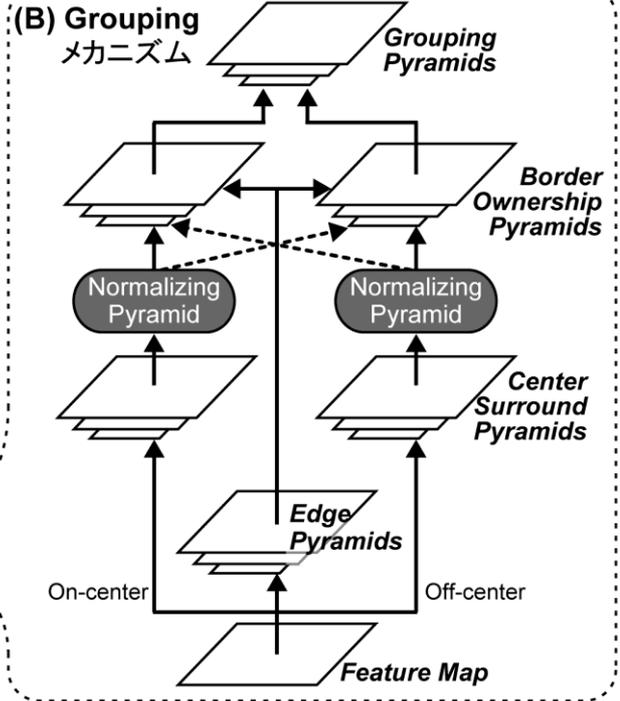
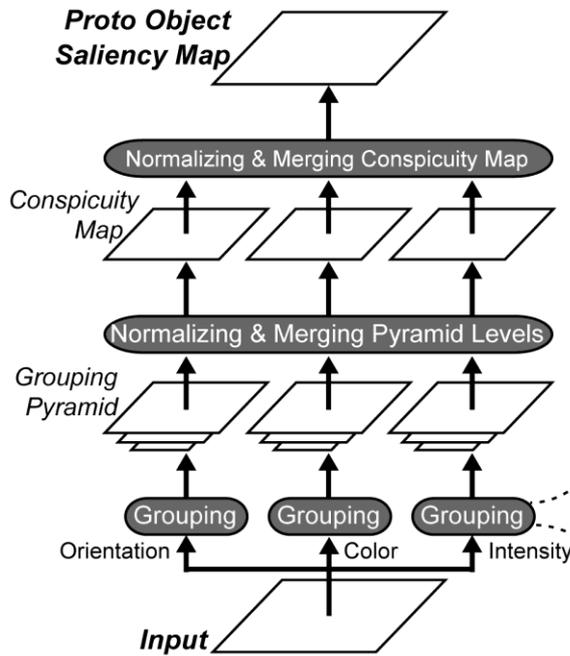


図 2. BO 細胞の図地領域分離に基づく注意選択の saliency map モデル[Russell 14]の概要図。(A) 先行研究モデルの全体処理図。このモデルにおいては、BO モデル細胞の活動に基づく図領域統合(Grouping)により、注意選択領域が決定される。BO モデル細胞は、中低次視覚野 V2 の神経細胞に相当する。Orientation (方位), Color (色), Intensity (輝度) は初期視覚野で検出される視覚特徴に相等する。(B) 図地領域分離(Border Ownership Pyramids)とその統合処理(Grouping Pyramids)。検出された輪郭(Edge Pyramids, Center Surround Pyramids)に基づき、BO モデル細胞の反応(Border Ownership Pyramids)が決定される。Edge と Center Surround Pyramids は初期視覚野のモデルに相当する。中低次視覚野の Border Ownership Pyramids を統合する事により、Grouping Pyramids が生成される。

から注意選択領域を算出する。Russell らが提案するモデルの処理メカニズム概要図を図 2(A)に示す ([Russell 14]より改編)。Itti らが提案した saliency map モデル[Itti 00]が初期視覚野の情報処理に基づき注意選択領域を算出するのにに対し、Russell らの saliency map アルゴリズムは中低次視覚野のモデル BO 選択性細胞の活動により注意選択領域が決定される(図 2(B)、Border Ownership Pyramids)。モデル BO 選択性細胞が検出する図領域を統合することで(図 2(B)、Grouping Pyramids)、各視覚特徴に対する注意選択強度(図 2(A)、Conspicuity Map)が算出される。最後に、各視覚特徴の注意選択強度を統合し、入力画像(Input)に対する注意選択領域が決定される(図 2(A)、Proto Object Saliency Map)。制限のため、具体的なモデルの処理内容はここでは記載しない(詳細は参考文献[Russell 14]を参照)。

2.2 視覚的注意が移動する時間ダイナミクス

実環境に適応するためには、注意が向けられる空間位置を時間の経過にともない移動させることが重要となる。時間経過による注意移動を実現するため、注意選択位置を決定するモデル細胞 $A(t)$ は、以下に示す式に従い、時間 t とともにその活動を変化させる[Deco 04][Wagatsuma 08]。

$$\frac{\partial A_{xy}(t)}{\partial t} = -A_{xy}(t) + I_{xy}^{saliency} - S(A_{xy}(t)) + I_{xy}^{noise}(t) \quad (1)$$

ここで、 $I^{saliency}$ は算出された Proto object saliency map (図 2(A)) の反応強度、 I^{noise} はノイズを表現する乱数を意味する。 S は抑制性細胞の活動を示す。抑制性細胞は、モデル細胞 $A(t)$ から入力を受け、その反応強度が決定される[Deco 04]。添え字 x, y は入力刺激の空間座標を意味する。簡易化のため、本研究では、注意選択位置決定を行うモデル細胞にのみ、時間ダイナミクスを導入した。

2.3 復帰抑制(Inhibition of Return)

復帰抑制(IOR)は、視野内で一度向けられた注意を、その空間位置から解放し、注意の移動を実現する重要な機能である[Itti 01][郷地 09]。ヒトの注意選択特性を再現するため、注意選択を行うモデル細胞に対して IOR を適用した。本研究では、生体時間 10ms ごとに、注意選択のモデル細胞 $A_{xy}(t)$ が示す最も強い反応領域周辺に対する活動を抑制した。ここでは、IOR の対象となる空間領域に対する反応強度を 10%に減衰させるよう簡略化してモデルに実装した。また、簡易化のため、モデルの空間領域を図 3 のように分割し、IOR を適用する空間領域を決定した。

3. シミュレーション実験

図地領域分離を担う中低次視覚野の活動を反映した saliency map モデルが示す注意選択の時間変化特性を検証するため、ヒトにとって容易な視覚探索画像をモデルに与え、シミュレーション実験を行った。シミュレーション実験に用いた刺激画像を図 4 (A)と(B)に示す。方位や色は初期視覚野で検出さ

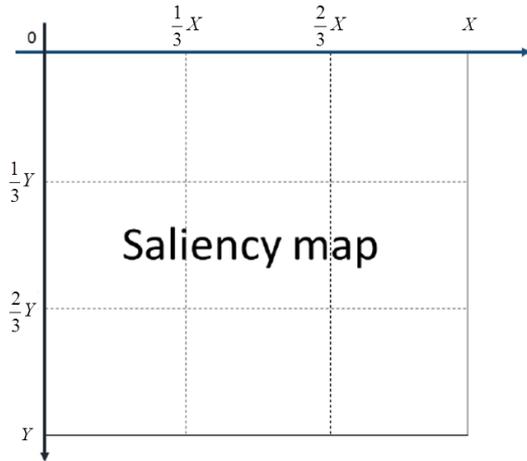


図 3. IOR 作用する空間領域。簡易化のため、入力画像の空間領域を 9 分割し、分割した各領域へ IOR を適用する。

れる視覚特徴に相等する。刺激画像図 4(A)と(B)において、水平方位と赤色(画像左上)の方位棒刺激の特徴が周囲と異なっている。このとき、異なる視覚特徴が存在する空間領域へと注意が向けられることが知られている[Itti 00][Itti 01]。また、このヒトの知覚特性は、視線追跡装置を用いた心理物理実験でも確認された。

モデルに刺激画像図 4(A)を与えたシミュレーション結果を図 4(C)に示す。図 4(C)で示された時間(Time)はシミュレーションにおける生体時間を意味する。シミュレーション開始当初(Time=1ms)、モデルは水平方位の領域(左上)に対して最大反

応を示した。これは、ヒトの注意選択特性と一致する。その後(Time=11ms, 55ms)、モデルが示す反応領域は時間経過とともに変化した。これは、視野内に投影された画像に対する注意選択の変化を示唆する。

同様に、刺激画像図 4(B)をモデルに与えたシミュレーション結果を図 4(D)に示す。前のシミュレーション結果と同様に、Time = 1ms において、異なる視覚特徴である赤色方位刺激の空間領域(左上)が最大反応を示した。また、時間の経過とともに、最大反応を示す空間領域が変化した(Time=11ms, 55ms)。これらのモデル反応は、ヒトの注意選択特性と一致する。シミュレーション結果より、中低次視覚野の活動を反映する saliency map メカニズムに、IOR などの注意特性を適用することで、ヒトの注意特性をより再現できることが示唆された。

4. おわりに

ヒトの注意選択特性を計算論的に検証するため、図地領域分離の中低次視覚領域を考慮した saliency map モデル[Russell 14]の拡張を行った。本研究で提案したモデルには、実際の視覚情報処理メカニズムを簡易化した処理過程が含まれる。実画像など、実環境におけるヒトの注意選択特性とそのメカニズムを理解するためには、より厳密な生体の情報処理過程をモデルに反映することが重要であると考えられる。また、モデルが示す注意選択領域と反応特性をヒトの注意選択特性と比較し、定量的に評価することも今後の課題となる。しかし、注意選択領域を決定するモデル細胞に対する時間ダイナミクスと視野内の選択された領域から注意を解放する IOR を導入した提案モデルは、視野内の異なる視覚特徴へと初めに注意を向けるヒトの知覚特性を再現した。さらに、提案モデルは、一度選択された空間領域から注意を解放し、視野内の異なる領域へと注意を移動

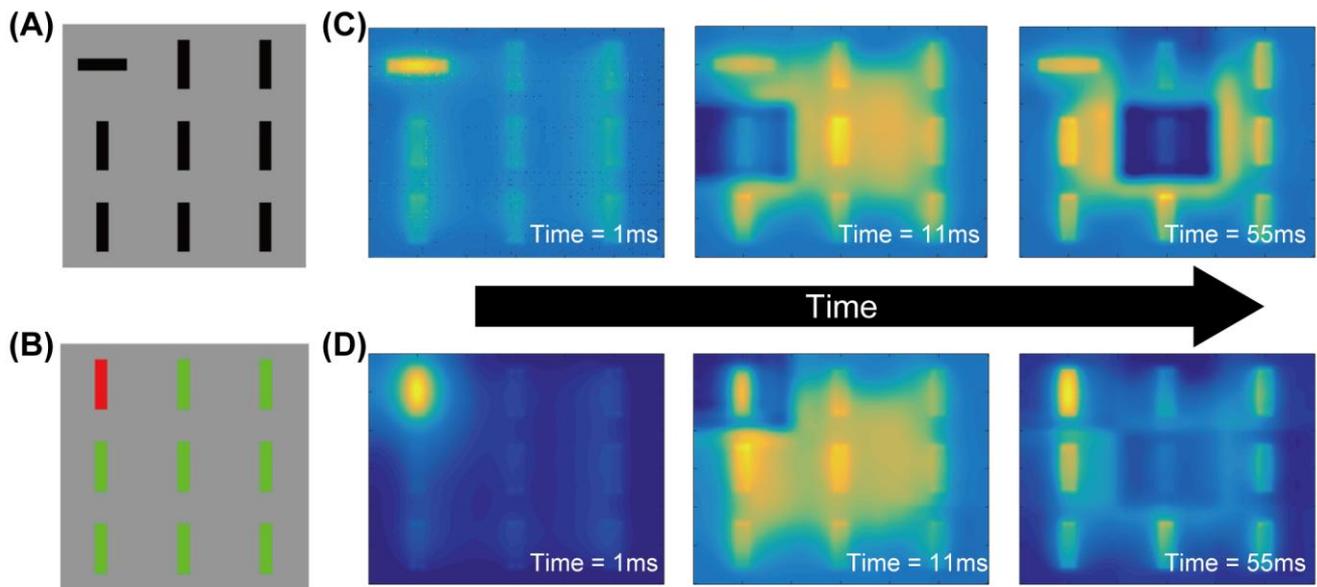


図 4. 呈示刺激とそれに対する提案モデルの反応。(A) 呈示刺激。視野内で視覚特徴が異なる水平方位(左上)が最初に注意選択される。(B) 呈示刺激。視野内で異なる視覚特徴である赤色刺激(左上)へと最初に注意が向けられる。(C) 刺激画像(A)に対するモデル反応。黄色で示された領域のモデル細胞が高い反応を意味しており、より注意を引く領域であることを示す。対照的に、青い領域は、モデル細胞が低レベルの活性であることを示す。シミュレーション開始当初(1ms)は、水平方位刺激(左上)が最大反応を示す。その後、注意が選択される空間領域が時間とともに変化する。(D) 刺激(B)に対するモデル反応。刺激画像(A)に対するシミュレーションと同様に、シミュレーション開始当初(1ms)は、赤色刺激(左上)へと注意が向けられる。その後、注意が選択される空間領域が時間とともに変化する。

させた。これは、ヒトが実環境に適応するための重要な視覚処理過程を反映していると考えられる。これらの結果は、中低次視覚野決定する図地領域分離だけでなく、神経細胞活動の時間ダイナミクスとヒトの視知覚特性である IOR がヒトの注意選択とその移動に重要な役割を果たすことを示唆する点で重要である。我々の提案する計算モデルは、生体の視覚情報処理系における重要な戦略である視覚的注意の特性を説明し、その神経回路構造の一端を示すものと考えられる。

参考文献

- [Carrasco 11] Carrasco, M.: Visual attention: the past 25 years, *Vision Research*, Vol. 51, pp. 1484-1525 (2011).
- [Deco 04] Deco, G. and Lee, T.S.: The role of early visual cortex in visual integration: A neural model of recurrent interaction, *European Journal of Neuroscience*, Vol. 20, 1089-1100 (2004).
- [Itti 00] Itti, L. and Koch, C.: A saliency-based search mechanism for overt and covert shift of visual attention, *Vision Research*, Vol. 40, pp. 1489-1506 (2000).
- [Itti 01] Itti, L. and Koch, C.: Computational modeling of visual attention, *Nature Review Neuroscience*, Vol. 2, pp. 194-203 (2001).
- [Posner 80] Posner, M.I.: Orienting of attention, *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 32, pp. 3-25 (1980).
- [Russell 14] Russell, A.F., Mihalas, S., von der Heydt, R., Niebur, E. and Etienne-Cummings R.: A model of proto-object based saliency, *Vision Research*, Vol. 94, pp. 1-15 (2014).
- [Self 11] Self, M.W., Kooijmans, R.N., Super, H., Lamme V.A., Roelfsema P.R.: Different glutamate receptors convey feedforward and recurrent processing in macaque V1, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 109, pp. 11031-11036 (2012).
- [Wagatsuma 08] Wagatsuma, N., Shimizu, R. and Sakai, K.: Spatial attention in early vision for the perception of border ownership, *Journal of Vision*, Vol. 8, pp. 1-19 (2008).
- [Zhou 00] Zhou, H., Friedman, H. S. and von der Heydt, R.: Coding of border ownership in monkey visual cortex, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 20, pp. 6594-6611 (2000)
- [郷地 09] 郷地大紀, 小濱剛: 復帰抑制の特性を考慮した顕著性マップモデルの拡張による視線予測, *Memoirs of the Faculty of Biology-Oriented Science and Technology of Kinki University*, Vol. 24, pp. 45-55 (2009)
- [我妻 15] 我妻伸彦: 視覚皮質の層構造局所回路モデル—大規模シミュレーションが予測した視覚情報処理メカニズム—, *Vol. 22*, pp. 112-124 (2015).