

能動的視覚情報処理：神経回路モデル

福島 邦彦

大阪大学 基礎工学部 生物工学科
〒560 大阪府豊中市待兼山町 1-3

1. はじめに

われわれが物を見る場合、視覚神経系は外界のイメージ情報を受動的にすべて受け入れているのではない。もっと能動的に自分が必要とする情報だけを選び取っている。関心のある箇所に眼球を動かしたり注意を集中したりして、その部分からの情報を選択的に取り込んで処理しているのである。このような能動的視覚情報処理機構の神経回路モデルに関して、筆者らが進めている研究の一端を紹介しよう。

2. 不均一な網膜皮質間投射を持つ眼球運動のモデル

ヒトの網膜は中心窩の部分が高い解像力を

持っているが、少しでも中心窩をはずれると視力は急激に減少する。われわれがものを細かく識別できるのは網膜内でも中心窩付近に限られている。このために眼球を絶えず上下左右に動かして、見ようとする物体の像を中心窩付近にもってくる必要がある。

ヒトの被験者に静止した文字や図形を呈示して、眼球の動きを測定すると、図形の角や、白と黒の境界の部分などに注視点が集中する。不均一な網膜を想定して注視点のこのような分布を説明しようとするモデルは従来からあった。これらのモデルは、オン中心型やオフ中心型の受容野をもつ網膜神経節細胞の受容野の直径が、中心窩から離れるにつれて大きくなるよう

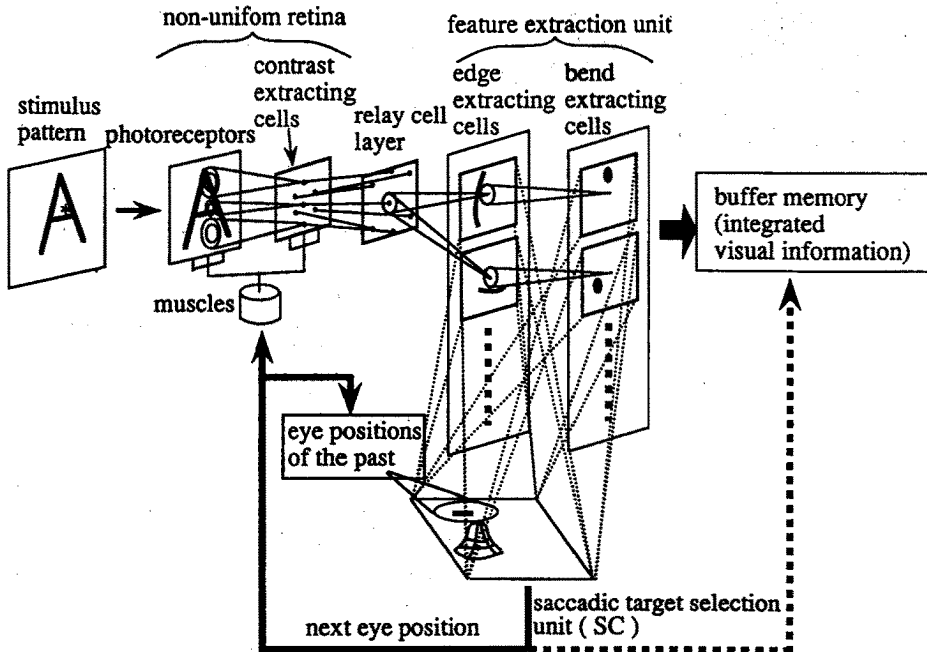


図1 不均一な網膜皮質間投射を持つ眼球運動のモデル

に作られている。このようなモデルに図形パターンを与えたときの反応は図形の角の部分で大きくなり、これが注視点の行きやすい場所と一致していると報告されている。

ところで受容野のサイズの不均一性は、網膜だけでなく大脳の視覚野でも見られる現象である。しかし大脳の視覚野の細胞の受容野の不均一性や網膜皮質間の投射の不均一性までも考慮したモデルは、まだあまり見られない。

そこで筆者らは、図1に示すようなモデルを提唱した¹⁾。図2はコンピュータシミュレーションで求めたモデルの反応例である。

外界の光学像は網膜の視細胞層に投影され、網膜神経節細胞層でコントラスト成分が抽出される。神経節細胞の受容野は、中心窩付近では小さく網膜の周辺部では大きくなるように定められている。次の中継細胞層は外側膝状体（あるいはその軸索終末の皮質視覚野の第4層での分布）を想定している。網膜視細胞層から中継細胞層へは不均一な投射があるので、中継細胞層

では図2に示すように、注視点（刺激パターンの左目付近の*印の場所）の付近が拡大され、網膜の周辺部は圧縮されている。視覚野ではこの情報から、種々の傾きのエッジ情報（単純型細胞）や、その曲がりの情報（超複雑型細胞）を抽出している。

サッケードによる次の注視点の移動位置は、上丘を想定した細胞層（注視点決定機構）で決定する。ここには大脳皮質で抽出したエッジやその曲がりの情報が送られ、その情報密度の最も高い箇所が側抑制による競合によって選ばれ、そこを次の注視点とする。ただし、注視点が毎回同じ場所に繰り返して選ばれるのを防ぐために、過去の眼球位置を記憶する記憶ユニットを考え、注視点決定機構はその記憶ユニットからの抑制信号も受けるようにした。図3は、モデルに文字パターン‘A’を呈示した場合の注視点の移動軌跡の一例であるが、ヒトの被験者に対する実験と同じような反応を示していることが分かる。

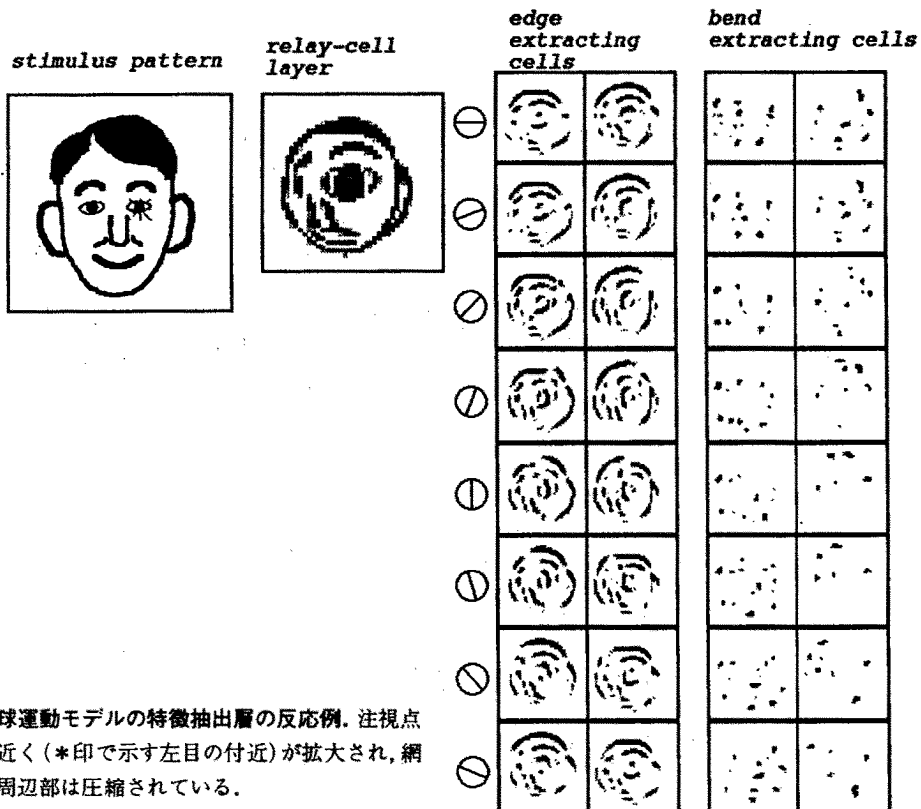


図2 眼球運動モデルの特徴抽出層の反応例。注視点の近く(*印で示す左目の付近)が拡大され、網膜周辺部は圧縮されている。

脳は、このような眼球運動によって取り込んだ断片的な情報をつなぎ合わせて一つのまとまった外界のイメージを作り上げていく。その生理学的なメカニズムはよくわかっていないが、モデルでは以下のような視覚情報統合機構を想定した。最初の注視点で取り込んだパターン（エッジ抽出細胞層などから送られてくる視覚情報）をひとまず一時的な記憶パターンとしてバッファに蓄える。その後注視点を移動さ

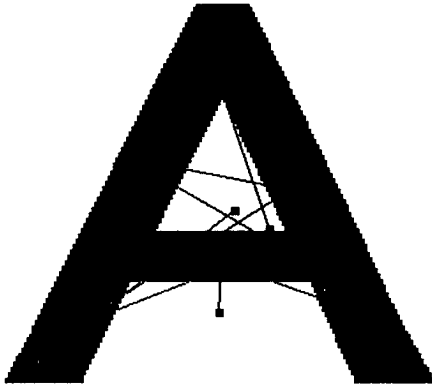


図3 モデルに文字パターンを呈示した場合の注視点の移動軌跡

せ、新しい注視点で取り込んだ情報を用いて、この記憶パターンを部分的に更新しながら解像度を上げていく。このとき、すでに蓄えられている記憶パターンと、新しく取り込まれたパターンとの位置合わせが必要になる。ところが心理学や解剖学の知見によると、視覚系には眼球位置の情報は必ずしも正確には伝えられていない。随伴発射などによって送られてくる眼球移動の情報は、大まかな位置あわせには用い得ても、細かい位置あわせに用い得るほど精度は高くないと考えられる。そこでモデルでは細かい位置合わせのために、新しく取り込んだパターンを、バッファ内の記憶パターンと比較して、類似度が最も大きくなる位置にシフトした後に、バッファを更新する機構を想定した。図4は、文字パターンAを観測したときに、バッファ内に情報が統合されていく過程を時間を追って示している。

3. 動きと形の並列処理：選択的注意による結びつけ問題の解決

哺乳動物の視覚系では、後頭葉から側頭葉に

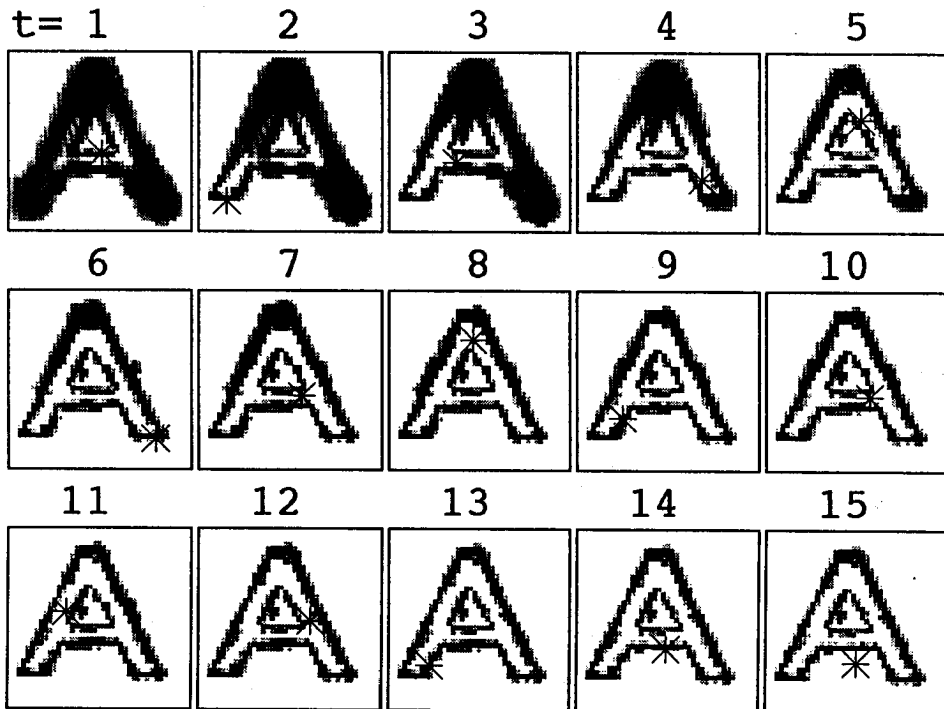


図4 視覚情報の統合の時間経過。*印は注視点。

至る経路で、視野内の物体の形や色など、主に物体視に関する情報を分析し（形のチャンネル）、後頭葉から頭頂葉に至る経路で、物体の動きや空間的位置など、主に空間視に関する情報処理を行なっている（動きのチャンネル）^{3,5)}。両チャンネルとも階層構造を持ち、細胞の受容野は階層が高くなるほど大きくなり、その反応は網膜上の位置には影響を受けなくなっていく。そこで視野の中に複数の物体があったとき、各チャンネルの高次領野に生じる反応のうち、同一物体に起因するものどうしの対応をいかにしてとっているのか、ということが問題となる。このような問題は結びつけ問題（binding problem）と呼ばれ、その機構を説明する仮説がいくつか提唱されている⁶⁻¹⁰⁾。

一方解剖学的知見によると、形のチャンネルにも動きのチャンネルにも、フォワード結合だけでなくバックワード結合があり、各チャンネル内の一種の正帰還ループが形成されている。また、フォワード結合は、形のチャンネルと動きのチャンネルとははっきりと分離されているが、バック

ワード結合は両チャンネルにまたがって広がっており、下位の層にフィードバックされてくる信号は自分のチャンネルだけでなく相手側のチャンネルにも伝えられるようになっているという¹¹⁾。

このような知見をもとに筆者らは、脳は結びつけ問題を選択的注意機構によって解いていると考え、神経回路モデルを提唱した^{12,13)}。モデルは図5のように、形の処理系と動きの処理系の二つのチャンネルからなる神経回路モデルを提唱した。形の処理系の最上位段はIT野を想定した認識層であり、動きの処理系の最上位段はMST野を想定した運動方向の知覚層である。それぞれの処理系はフォワードとバックワードの双方向の結合を持ち、バックワードの信号は自分のチャンネルだけでなく相手側のチャンネルにも送られる。

形のチャンネルは筆者が以前に提唱した選択的注意モデル¹⁴⁾とほぼ同じ構造を持っており、視野内の一つの物体に注意を向けて認識し、その物体を切り出してくる。動きのチャンネルも、フォワード信号とバックワード信号の相互作用

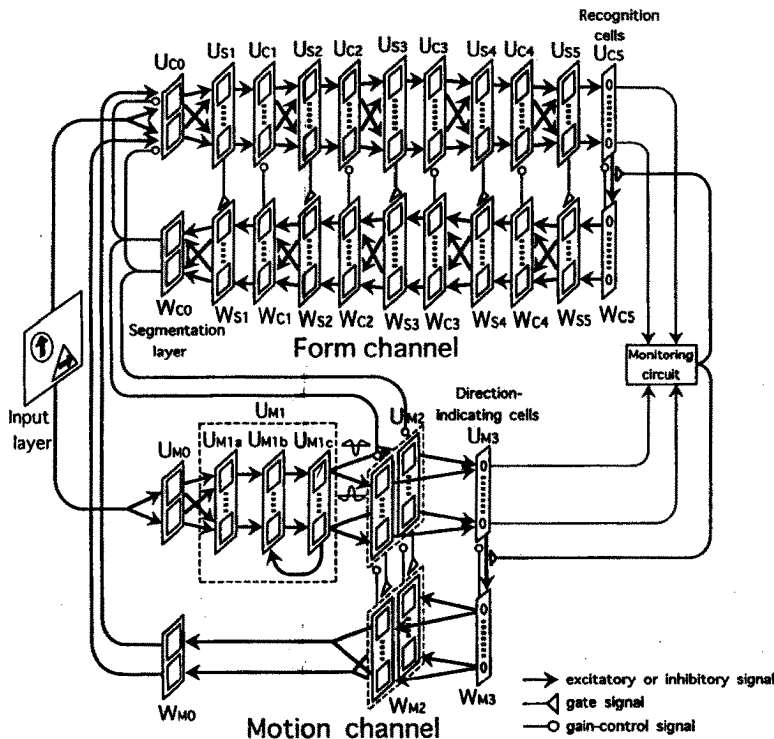


図5 形の処理系と動きの処理系をもつ視覚系の神経回路モデル

によって、特定の一つの物体だけに注意を向け、その物体の動きの方向を検出する。この二つのチャンネルの注意選択機構はそれぞれ独立に働くのではなく、相手側のチャンネルから送られてくるバックワード信号の影響を受けて、常に同じ物体に注意を向けるようになる。その結果ある時刻には、形のチャンネルの最上位段では、

視野内の一つの物体の形を認識し、動きのチャンネルの最上位段ではその物体の動きの方向を抽出する。一つの物体に対する注意の集中がしばらく続いて回路の反応が定常状態に近づくと、このことを図5の右端のモニタ回路が検出し、他の物体に注意を切り替える指令を送り出す。モデルのシミュレーションを行なった。形の

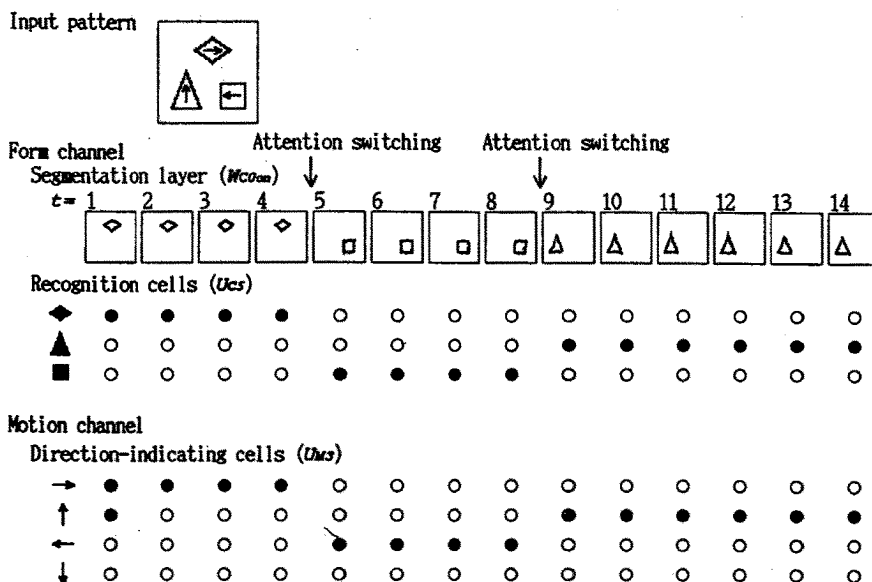


図6 動きと形の両処理系をもつモデルの反応例。ランダムドットで構成された3個の図形がそれぞれ異なる方向に動いている場合の反応の時間経過。

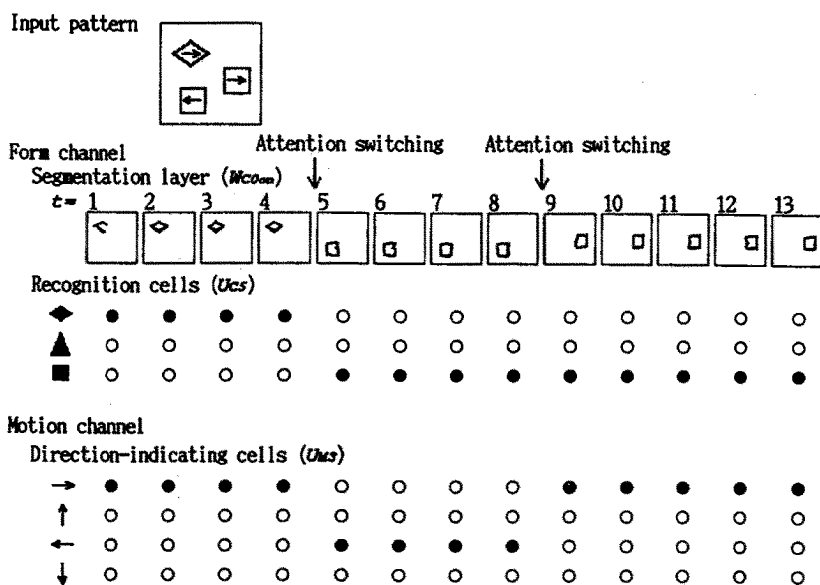


図7 動きと形の両処理系をもつモデルの反応例。視野内に、同じ形の物体や同じ方向に動く物体がある場合の反応。

チャンネルには、あらかじめ三角形、長方形、菱形などを学習パターンとして呈示して教師なし学習によって自己組織化させた。図6は、ランダムドットで形成されたテストパターンを与えたときのモデルの反応の一例である。テストパターンは、物体も背景も一様なランダムドットからなるが、物体の内部は特定方向に動き、背景は静止している。物体の輪郭は静止している。テストパターンの1フレームだけを見ても意味のある形は見えないが、連続したフレームを見れば動きがあるので我々は物体の形を明確に知覚できる。テストパターンは、図の左上部に示すように、右に動く菱形、上に動く三角形、および左に動く正方形を含んでいる。図には上から順に、連想出力層（形のチャンネルの遠心性経路の最下位段）、認識細胞層（形のチャンネルの最上位段）、動き方向指示細胞層（動きのチャンネルの最上位段）の反応の時間経過を示した。モデルは最初に右に動く菱形に注意を向け、その形と動きを検出した。少し時間が経って回路の反応が定常状態に落ち着くと（ $t=5$ ）、注意を自分で切り替えて、左に動く正方形を検出した。さらに $t=9$ には2回目の注意切り替えをして、こんどは上に動く三角形を検出した。モデルはこのように、注意の切り替えによって視野内の複数の物体を順番に認識しその動きの方向を検出していく。

視野内に同じ形の物体や同じ方向に動く物体がある場合にもこのモデルが正しく動くことを示すために、図7の左上に示すような刺激パターンを与えてみた。刺激物体の中の2個の正方形は同じ形をしているが、動きの方向は異なっている。また正方形の一つと菱形は、同じ方向に動いている。図に見られるようにモデルは、注意を切り替えながら、右に動く菱形、左に動く正方形、右に動く正方形を、順番に認識しその動きの方向を検出していった。

文 献

- 1) 青西 亨, 福島邦彦: 網膜と皮質の不均一性を考慮した注視点移動モデル. 電子情報通信学会論文誌 D-II, J78-D-II, 1363-1371, 1994.
- 2) K. Fukushima: Neural networks for selective looking. Myung-Won Kim and Soo-Young Lee (eds): *ICONIP'94-Seoul*, pp. 1367-1372, 1994.
- 3) E. A. DeYoe and D. C. Van Essen: Concurrent processing streams in monkey visual cortex. *Trends in Neurosciences*, 11, 219-226, 1988.
- 4) M. Livingstone and D. Hubel: Segregation of form, color, movement, and depth: anatomy, physiology, and perception. *Science*, 240, 740-749, 1988.
- 5) D. C. Van Essen, C. H. Anderson and D. J. Felleman: Information processing in the primate visual system: an integrated systems perspective. *Science*, 255, 419-423, 1992.
- 6) A. Treisman: Features and Objects: The fourteenth Bartlett memorial lecture. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 40A, 201-237, 1988.
- 7) F. Crick: Function of the thalamic reticular complex: the searchlight hypothesis. *Proceedings of National Academy of Science, USA*, 81, 4586-4590, 1984.
- 8) C. Koch and S. Ullman: Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry. *Human Neurobiology*, 4, 219-227, 1985.
- 9) C. M. Gray, P. König, A. K. Engel and W. Singer: Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties. *Nature*, 338, 334-337, 1989.
- 10) G. Tononi, O. Sporns and G. M. Edelman: Reentry and the problem of integrating multiple cortical areas: simulation of dynamic integration in the visual system. *Cerebral Cortex*, 2, 310-335, 1992.
- 11) S. Zeki and S. Shipp: The functional logic of cortical connections. *Nature*, 335, 311-317, 1988.
- 12) K. Fukushima and M. Kikuchi: Binding of form and motion by selective attention: A neural network model. R. Moreno-Diaz and J. Mira-Mira (eds): *Brain Processes, Theories and Models: An International Conference in Honor of W. S. McCulloch 25 Years after His Death*. MIT Press, Cambridge, pp. 436-445, 1996.
- 13) M. Kikuchi and K. Fukushima: Neural network model of the visual system binding form and motion. *Neural Networks*, in press, 1996.
- 14) K. Fukushima: Neural network model for selective attention in visual pattern recognition and associative recall. *Applied Optics*, 26, 4985-4992, 1987.