側抑制をもつ視覚情報処理系†

土井 康 弘*・永 田 浩**

* 東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

** 日本光学工業(株)研究所 東京都品川区西大井 1-6-3

(昭和47年12月27日 受付)

A System for Visual Information Processing with Lateral Inhibition

Yasuhiro Doi* and Hiroshi NAGATA**

(* Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo)
(** Research Laboratory, Nippon Kogaku K. K., Shinagawa-ku, Tokyo)

(Received December 27, 1972)

Two models for simulating lateral inhibition in the visual process are described. One model, a nonrecurrent type, is composed of a flying spot scanner and dual phototubes with a dully focused wide spot. The area of the spot is divided into two parts, each of which is picked up by each of the two phototubes. The difference of the outputs is displayed on a CRT screen as an intensity modulated pattern. The Mach effect is seen and, by further thresholding the output, edges and terminals of pictures are extracted.

In the second model, a recurrent type, two pairs of CRT and vidicon tubes are interconnected one after another and alternately scanned so as to realize a lateral inhibition having a certain time delay. On a CRT display is seen the Broca-Sulzer effect, and it is shown that an object moving within a certain velocity range can be detected by this model. The second model is considered as an extended one that includes the first model.

1. ま え が き

視覚系がもついくつかの特性、機能を、電気系その他の手法で実現するシミュレーションは、それ自体としても新しい視覚現象を見出す可能性があり、またパターン認識への手がかりとしても興味深いものである。たとえばカエルの眼の応答をもとにシミュレーションを行なった例として、Herscher¹⁾より Sutro²⁾によるものがある。前者は2次元の入力処理層がつぎつぎと重なって平行処理を行なうものであり、後者は計算機を利用し、特長抽出回路として一般に使用することまで考慮したものとなっている。しかしこの2例とも、生体における輪郭検出や特長抽出がどのようにして行

なわれるかという点はあまり考慮せず、入出力関係のみを重視したモデルとなっている。これに対し、安田・樋渡の網膜モデル³⁾や福島の特長抽出回路⁴⁾では、視覚系における側抑制現象を伴う受容野が基本要素として用いられ、システムの入出力関係や特長抽出が考察されている。

ここで報告する筆者らのシミュレーションは、Ratliff⁵⁾らがカプトガニの個眼から見出した側抑制現象が視覚系の基本であるとして、側抑制回路を実現してその入出力関係を検討したものである。安田らおよび福島モデルが電子計算機によるシミュレーションであるのに対して、これは光学系と電気系からなるハードシステムで2次元の写真フィルム上のパターンを1層の側抑制回路で処理した。実験は、まず時間特性を含まないシステムについて静止パターンの入出力関係と特長抽出能力を調べ、つぎに時間特性をもつシステ

† 第9回(昭45・8)および第11回(昭47・8)計測自動制御学会学術講演会で一部発表

ムについて、過渡応答と運動パターンに対する応答を調べた。本論文では、Ratliff らの基本式および受容野について説明し、製作した2つのシステムとその実験結果、考察を順に述べる。

2. 側抑制と受容野

Békésy は、人間の痛覚についていくつかの実験を試み、この感覚は Fig. 1(a) のような刺激に対して同図(b)のように周辺に抑制領域をもつことを示し、これを *neural unit* と呼んだ⁵⁾。そして、このような入力関係は皮膚感覚に限られず、聴覚・味覚・視覚にも存在し、人間の感覚処理の基本要素であることを明らかにした。

その後、この *neural unit* は網膜段階における簡単な側抑制回路や受容野として確認された。すなわち Ratliff ら⁶⁾ は、カブトガニの個眼で得られた入力光と神経細胞の電気スパイクの関係から、つぎのような定常状態における側抑制の基本式を導いた。

$$r_p = e_p - \sum_{j=1}^n K_{p,j} [r_j - r_p^0] \quad (1)$$

ここで r_p は各受容器の出力スパイク頻度、 e_p は1つの個眼のみ照射したときの出力スパイク頻度、右辺第2項は他の個眼からの抑制を与え、 $K_{p,j}$ は個眼 j の p に対する抑制の大きさを定める係数で $K_{j,j} = 0$ である。 r^0 は抑制を生ずるレベルを定める閾値で、抑制項の $[\]$ は、

$$[r - r^0] = \begin{cases} r - r^0 & (r \geq r^0) \\ 0 & (r < r^0) \end{cases} \quad (2)$$

を意味している。

式(1)は、他の個眼の出力が注目している個眼の抑制項に現われ、回帰型の抑制を表わしている。これに対し他の個眼の入力が抑制項に現われるものを非回帰型の抑制という。Ratliff らはさらに個眼の出力の時間的変化にも注目し、抑制に時間遅延を伴うより一般化した式も導いている。

$$r_p(t) = e_p(t) - \sum_{j=1}^n K_{p,j} [r_p(t - \Delta t_{p,i}) - r_{p,i}^0] \quad (3)$$

脊椎動物の網膜で見出された受容野にも側抑制と同じ効果をもつものが存在する。スポット状入力に対して受容野中心部で興奮、周辺で抑制を示す ON 中心型受容野や、その逆の OFF 中心型受容野がそれである。また、ネコの大脳視覚領には輪郭検出、方向性検出、端点検出などに有効な受容野があるが、これらは単純な受容野が組合わさったものと考えられる⁷⁾。カエルでは、特定の速度で運動する物体に対してのみ応答を示す受容野の存在も知られている。受容野に関す

Fig. 1

Neural unit, (a) input and (b) output

Fig. 2 An optical system for convolution

る基本式は、網膜上の受容器密度が十分大であるとして連続系で表わすことができ、そのほうが解析にも適している。藤井らはこうした観点から積分方程式を作り、計算機によって興味ある結果を得た⁸⁾。

3. 定常状態のシステム

3.1 基本式

実験では、定常状態の式(1)につぎの仮定を加えた。(a) 系を連続系として扱う；(b) システム全体を非回帰型とする；(c) 閾値素子 $r^0 = 0$ とする；(d) $K_{p,j}$ は位置座標 p および j によらず、両者の間の距離 $(x$ とおく)に対してガウスの密度関数形であるとする。以上の仮定によって、式(1)を変形すると、まず(a)~(c)より

$$r(x) = e(x) - \int K(x, x') e(x') dx' \quad (4)$$

である。さらに(d)より

$$K(x, x') = K(x - x') \quad (5)$$

と書けるから、新しい結合関数 K を導入して

$$K(x - x') = \delta(x - x') - k(x - x') \quad (6)$$

とすれば、式(4)の右辺は1つの積分項だけとなり、最終的に

$$r(x) = \int K(x - x') e(x') dx' \quad (7)$$

なる関係式を得ることができる。すなわち非回帰型抑制においては、適当な結合関数 K によって、出力は入力と K とのたたみ込み積分として表わされる。

3.2 システムの設定

式(7)を満たすシステムを Fig. 2 の光学系で実現した。レンズ L の前方飛点走査光源 S からの光が面 I で結像するとして、レンズと像面の距離を f としたとき、像面から $f\lambda$ だけずれた面 P 上にパターンを置く。いま、光源 S 上および P 上にそれぞれ xy および $\xi\eta$ 座標系をとり、 (x, y) に点光源があるとする、面 P 上では $\xi = x(1 - \lambda)$ 、 $\eta = y(1 - \lambda)$ を中心として、ある範囲に光点が拡がる。この強度分布を

Fig. 3 A schematic diagram of the system with spatial lateral inhibition

Fig. 4 Polarized filters, (a) isotropic and (b)-(e) anisotropic

Fig. 5 Potential charts of square, (a) experimentally obtained and (b) computed by Fujii et al

$$k(-\xi+x(1-\lambda), -\eta+y(1-\lambda)) \quad (8)$$

とすると、パターンが関数 $e(\xi, \eta)$ で表わされるときシステムの出力は、 λ を 1 に比べて小さいとすれば

$$\int k(x-\xi, y-\eta)e(\xi, \eta)d\xi d\eta \quad (9)$$

となる。これは関数 k と e とのたたみ込み積分であるが、関数 k は光学系の性質上、ずれを大きくすれば λ に比例して拡がり、またその関数形はレンズの瞳面につけたマスクによっても変わるものである。これにより、出力は式 (7) と同じ特性を示すものとする事ができる。

Fig. 2 の光学系を含む全体の系が Fig. 3 に示してある。CRT1 は飛点走査器でパターン P がその像面からややずれたところに置かれている。たたみ込み積分が Fig. 1 で示したような側抑制を生じるには、関数 k の形が中心部で正、周辺部で負とならねばならない。このためにレンズ L1 面上に互いに偏光方向が直交する 2 部分からなる偏光フィルタ PL を置き、受光器としてフォト・マルチプライヤ PM を 2 つ用意して、おのおのが PL による偏光の一方のみを受けるように

PM の前に偏光フィルタ A1, A2 を置く。この 2 つの PM の出力の差信号を作れば求める結合関数が得られ、式 (9) によって出力 $r(x, y)$ が得られる。出力は CRT1 と同じ走査信号を加えた CRT2 上に輝度変調として表示するが、PM の差信号をそのまま入力とするほか、シュミットトリガ回路で閾値論理を加えてから入力表示するように

もした。これにより、出力パターンの感覚ポテンシャル図の作成や、強調されている部分の抽出を行なうことができる。

3.3 実験とその結果

実験に用いたパターンは、直線部分からなる数種の図形と英文字で 36 mm スライドに作った。結合関数を与える偏光フィルタは Fig. 4 の 5 種のものを用いた。おのおの $\oplus$ 部と $\ominus$ 部からなり、 $\oplus$ 部が正の応答を、 $\ominus$ 部が負の応答を与えるように偏光方向をとっている。(a) が等方性の抑制を与え、他が異方性である。フィルタの大きさは径が 40 mm、 $\oplus$ 部は (a) で 8 mm ϕ 、他は幅 5 mm 程度である。出力は“ずれ” λ とフィルタの組合せで変化する。実験では、各偏光フィルタに対して λ を 0.1~0.2 の間にとった。

閾値論理の閾値を変えてゆくことによって、正方形の入力パターンに対する感覚の等ポテンシャル図が Fig. 5 (a) のように得られた。これは等方性フィルタによる出力で、各等ポテンシャル線の間隔は一樣でないが、定性的には同図 (b) の藤井らの結果と似た出力を得ている。

特長抽出の検討はパターンの端点、交点、線分について行なった。Fig. 6, 7, 8 がおのおの“+”、“T”、“N”の入力パターンに対する結果で、いずれも (1) が入力パターン、(2) が等方性フィルタによる出力像である。ここでは、黒い部分が正の応答、白い部分が負の応答を示している。(3) は (2) の出力像に正の閾値を加えたもので、パターンの端点が抽出され、(4) はフィルタ (b) により縦方向線分を抽出したものである。さらに Fig. 6 (5) はフィルタ (e) と正の閾値、(6) はフィルタ (c) と負の閾値による出力で、+ 型交点の存在と右一下の折点の存在を示している。同図 (7) は (3) の逆で等方性出力像に負の閾値を加えたもので、+ 型交点の存在が確認できる。ついでパターン“T”についてフィルタ (d), (e) を用いたところ、(d) では Fig. 7 (5) のような出力を得たが、(e) では得られず、一方“+”にフィルタ (d) を用いても出力はなかった。したがって + 型、および T 型交点の分離が可能といえる。Fig. 7 (6) は、

Fig. 6

Fig. 7

Fig. 8

Experimental results for patterns “+” (Fig. 6), “T” (Fig. 7) and “N” (Fig. 8)

Fig. 6 (6) と同じく右一下折点を示したものである。Fig. 8 (3) では端点と鋭い屈折点が抽出され、これらが交点と分離可能であることを示している。パターンが回転すると、線分抽出は困難となる。Fig. 8 (4) は“N”の2線分を抽出しているが、これは30度の回転ずれでまったく異なる方向の線分とみなせることを示している。曲線を含む図形でも抑制像が得られるが、抽出される特長は直線図形と同じである。

以上の実験から、つぎの諸点が明らかとなった。

- (1) 1層の非回帰型抑制で側抑制と似た現象を生ずる。
- (2) 等方性抑制のほかに異方性抑制を用いると、直線からなるパターンの識別に適した出力が得られる。
- (3) さらに閾値論理を加えると、特長抽出という点で興味ある応答が得られる。
- (4) 計算機を用いずにパターンの感覚ポテンシャル図を描ける。

しかし、このシステムでは、入力パターンは静止したものという制限がある。以下に述べるシステムは、このシステムの特性を含み、さらに運動パターンについても側抑制の式を満たすものである。

4. 時間遅延を含むシステム

4.1 基本式

側抑制が時間遅延を含むときの式は、(3)式で表現されるが、システム製作にあたりいくつかの仮定を導入する。(a) 側抑制は回帰型抑制とする；(b) 入出力の時間関係は同時刻 t だけにやらず1次遅れ要素を加え、その遅延係数を α とする；(c) 抑制項の時間遅れ Δt は

一定、閾値 r^0 も一定とする；(d) 抑制の結合関数 $K_{p,j}$ は距離に対してガウスの密度関数形であるとする。以上により、式(3)は抑制項を w として

$$r_p(t) = \alpha \{e_p(t) - w_p(t)\} + (1 - \alpha)r_p(t - \Delta t) \quad (10.1)$$

$$w_p(t) = \alpha \sum_{j=1}^n K_{p,j} [r_j(t - \Delta t) - r^0] + (1 - \alpha)w_p(t - \Delta t) \quad (10.2)$$

となる。 α は $0 < \alpha \leq 1$ で、 $\alpha = 1$ のとき上式は式(3)と一致する。また閾値は $r^0 \neq 0$ で非線形性を残してあり、簡単のために式は離散系の表示としたが、空間的な抑制は連続系で表示しても同じである。

4.2 システム

回帰型抑制系を CRT とビジコンによる信号の変換装置を2組用い、一方を主信号路、他方を抑制項のフィード・バック回路として実現した。

そのシステム図が Fig. 9 で、入力パターンは CRT1 の出力とともにビジコン1上に結像され、この2つの光信号の和が電気信号となって、CRT3に輝度変調の形で出力表示される。また、この出力は CRT2 の螢光面上にも画像を作り、レンズ L2 でビジコン2に投影した光信号が CRT1 の入力となって画像信号の閉回路が形成される。1周した信号を空間的な抑制項とするために、ビジコン2をレンズの結像面からややずらして置き、AMP.2で符号反転を含む増幅を行なっている。側抑制入力に時間遅延を与えるには、各信号路の CRT とビジコンに $\Delta t/2$ だけ時間のずれた2つの X 軸走査信号 X1, X2 を送る方式を用いた。これにより系全体では、 Δt の時間遅延をもつ抑制項を得ること

Fig. 9. A schematic diagram of the system with spatial and temporal lateral inhibition

Fig. 10 Response for static patterns, (a) "A"
(b) "X" and (c)-(f) square

ができる。ビジコンの出力は $\Delta t/2$ 間の受光量の和になり、この間の変化が小さいとすれば離散系として扱え、式 (10) の表示を得る。

4.3 実験とその結果

式 (10) の変数のうち Δt は 180 ms とし、 α はシステム固有のもので 0.6 である。 $K_{p,j}$ の関数形はビジコン受光面の結像面からのずれと異方性抑制を与えるフィルタの有無で変わる。 r^0 も可変としたが、これは CRT1 の輝度変調入力の直流レベルを変化させればよい。入力パターンとしては、36 mm の写真スライドを移動装置に乗せて用い、レンズ系の倍率を 1/3 としてビジコン面上に 8×12 mm の像を結ぶように設定した。

入力パターンが静止しているときの出力は、前のシステムと同じものとなるが、実験の結果が Fig. 10 に示されている。(a)~(d) が等方性抑制時の応答図形、(e)、(f) は波形であり、(c) 以降は正方形入力に対する出力である。一般に側抑制現象は矩形波状の入力に対して輪郭部が強調され、さらに矩形波周辺に抑制が生じる

が、このシステムでは同時にはその両方を実現できず、(e)、(f) のように閾値 r^0 を調節して別々に得ることとなった。これは用いた CRT の輝度とダイナミックレンジが不十分であったからで、原理的な欠陥ではない。出力の性質としては、空間的な Mach 効果に相当する現象が生じていることがわかる。

入力パターンが時間的に変化するものでは、抑制の時間遅延による影響が出力に生じる。これをパターンの出現・消失、および等速運動について検討した。パターンの出現・消失時の応答は、時間的な過渡応答として知られている Broca-Sulzer 効果と空間的な Mach 効果の重なったものと考えられるが、16 mm 映画撮影による実験の結果を Fig. 11 (出現時) Fig. 12 (消失時) に示した。図の (a)~(h) はおのおの時間的な変化を等時間間隔で示したものである。これは 2 次元パターン出力の断面図に相当し、変化の主要点を知るために出現時には輪郭部が強調されるように、また消失時には周辺の抑制がみられるように閾値を調節して撮影を行った。この結果から、応答はパターン出現後に一度最大値をとってから減少して定常状態となり、消失後には最小値を経てもとのレベルに戻るという過程をとることがわかる。時間・空間的な効果は、出現時は Mach 効果が遅れて生じ、消失時は Broca-Sulzer 効果の影響が残るという関係になっている。

入力パターンが運動しているときの出力をとると、結果として運動パターンの輪郭検出を行なう可能性が示された。Fig. 13~15 に出力を示す。(a) が静止時、(b)~(h) は運動時で等時間間隔であり、パターンは右から左へと運動している。Fig. 13 が出力波形で運動方向前方の輪郭は強調され、後方では抑制されて中央部と同じレベルとなることがわかる。これは、運動パターンでは、時間遅延を含む抑制が空間的な遅れとして生じることによるものである。Fig. 14 は正方形の出力パターンを閾値論理でもって 2 次元表示したものである。運動方向後方の抑制の様子がわかるが、運動パターン検出という点からは静止時との区別がまだ不十分で改善の余地がある。Fig. 15 は周辺の抑制部に注目したときの出力で、運動時は運動方向後方の抑制領域が前方のそれよりも広く、抑制の大きさも大きくなっている。実験から、この運動時の輪郭部と周辺部の検出には最適の速度が存在することがわかり、それはビジコン面上で輪郭部のものについて 0.1 mm/sec、周辺部のもので 0.4 mm/sec であった。このとき、定常状態になるまでの過渡時間は約 3 秒である。

このほかに、抑制光学系の瞳面に異方性のフィルタを置いて、特定方向へ運動するパターンの検出能力を

Fig. 11 (左) Fig. 12 (右)
“On” (Fig. 11) and “Off”
(Fig. 12) transient responses
Input is on or off between (a)
and (b)

Fig. 13

Fig. 14

Fig. 15

Responses for the moving pattern, showing inhibition at the center (Fig. 13), two dimensional expression of Fig. 13 (Fig. 14) and showing inhibition at the both sides (Fig. 15)

上げることができる。これはフィルタとして縦長のスリットを用い、その方向を検出したい運動方向に合わせるようにして、運動方向とパターン輪郭線とのなす角度によって抑制出力が異なる値をとるようにしたものである。

以上の実験と平行して、計算機を用いて簡単な計算を行なった。基本式(10)を用い、 $\alpha=0.6$ とし、空間的な矩形波入力、Fig. 16 (a), 抑制の結合関数を同図 (b) のようにとり、初期条件として $e_p(0)=0$, $w_p(0)=0$, $r_p(0)=21$ とした。 r^0 を 21 から 1 ずつ変えて計算した結果のいくつかを Fig. 17 に示してある。(a),(b)は、静止パターンの出力で閾値によって出力の形が変化することが示されている。(c)は出力の時間的变化で、

Broca-Sulzer 効果に相当する応答がわかる。(d)~(f)は運動時の応答でパターンは右から左へ運動中である。(d)~(f)の波形の上部および下部にある線は同じ r^0 での静止出力の最大値と最小値を示している。したがってこの値を閾値とすれば、(d)では後方抑制部を、(f)では前方輪郭部を、(e)ではその両方を運動時だけ検出することができる。実験で用いた装置ではこの閾値からの差が小さく検出しきれなかったが、改善によって抽出可能であることが示されている。

以上の実験から、ビジコンを用いた時間遅延のあるシステムによって定常状態の側抑制現象のほかに Broca-Sulzer 効果に相当する現象を実現でき、さらに特定速度の運動パターンに対して、輪郭部や周辺抑

Fig. 16 Two conditions for computer calculations, (a) input and (b) the spatial inhibitory weighting function

Fig. 17 Results of computer calculation, (a) and (b) response for still pattern, (c) temporal response for the input on and off, (d)-(f) spatial response for the pattern moving from right to left

制部が強調される様子をみることができた。しかし、空間的な分解能や運動パターン検出機能など、改良すべき点もいくつか見出されている。またこの方式では、入力パターンとしては透過形の写真スライドに限られず、任意の大きさの反射形パターンを入力することも可能である。

5. 結 言

側抑制を示すシステムを、まず静止パターンを対象として飛点走査系を用いて作り、ついで時間的な変化にも応答するより一般的なシステムを2組のビデオカメラ系を用いて作った。前のシステムでは、側抑制は非回帰型であり、後のシステムでは回帰型である点で両者は異なるが、機能としては前者は後者の部分と考え

られる。いま、後者のシステムについていくつかの特長点を列記すると、つぎようになる。

(i) システムは Ratliff らの基本式に基づいて作られ、Mach 効果、Broca-Sulzer 効果など予想される現象を示す。

(ii) 時間遅延のある抑制項を用いて、静止パターンだけではなく、変化するパターンも扱うことができる。

(iii) パターンとしては、透過型のものとは限らず反射型のものも扱える。

(iv) 特長抽出、輪郭検出には、出力の前に閾値論理を加えればよい。

(v) 出力を変える変数として、抑制結合関数は等方性のもののほか、異方性のものも用いられる。さらに、抑制項の閾値を変えることができる。

一方、このシステムには、下記の欠点があった。

(i) ある入力に対して Mach 効果を示す出力は、輪郭を強調する形と周辺抑制の形を同時に実現できない。

(ii) SN 比が悪く、抑制項の信号が雑音レベルに埋もれてしまうことがあった。

これは、高輝度のしかも時定数の短い CRT を用いてシステムを作ることによって改善され、より正確に時間・空間的な側抑制現象を CRT 上に実現することができると思われる。それにより、さらに多くのパターンについて、認識の第1段階としての特長抽出、運動検出が可能となり、視覚系のモデルとして興味ある結果を得ることができよう。

参 考 文 献

- 1) M.B. Herscher & T.P. Kelley: Functional Electric Model of the Frog Retina, IEEE Trans. on Military Electronics, MIL-7-2, 98/103, (1963)
- 2) L.L. Sutro: Proposed Electronics to Represent the Properties of a Frog's Eye, Cybernetic Problems in Bionics-Bionics Symp. 1966, ed H.L. Oestreicher, et al. Gordon and Breach, 811/819, (1968)
- 3) 安田, 樋渡: 網膜神経回路のモデルと時空間特性, 医用電子と生体工学, 6-1, 53/62, (1968)
- 4) 福島: 図形パターンの特長抽出回路, NHK 技術研究, 23-5, 351/367, (1971)
- 5) G. von Békésy: Neural Inhibitory Units of the Eye and Skin, J. Opt. Soc. Am., 50-11, 1060/1070, (1960)
- 6) F. Ratliff, H.K. Hartline & W.H. Miller: Spatial and Temporal Aspects of Retinal Inhibition Interaction, J. Opt. Soc. Am., 53-1, 110/120, (1963)
- 7) D.H. Hubel, T.N. Wiesel: Receptive Fields, Binocular Interaction and Functional Architecture in the Cat's Visual Cortex, J. Physiol., 160, 106/154, (1962)
ditto: Receptive Fields and Functional Architecture in Two Nonstriate Visual Area (18 and 19) of the Cat, J. Neurophysiol., 28-2, 229/289, (1965)
- 8) 藤井, 松岡, 森田: Lateral Inhibition による錯視現象の解析, 医用電子と生体工学, 5-2, 117/126, (1967)