

単眼視 2次元図形の奥行き感計算モデル

村越 一支[†] 三上 勝正^{††} 倉田 是^{†††}

A Computational Model of Feeling of Depth from Monocular 2-D Figures

Kazushi MURAKOSHI[†], Katsumasa MIKAMI^{††}, and Tadashi KURATA^{†††}

あらまし カニツツアの三角形を見ると、明るさの変化を伴いながら3次元的な変位すなわち奥行き感を感じることができる。主観的図形を構成する主観的輪郭線に反応する細胞は発見されており、そのモデル化も行われている。明るさの変化についてのモデルは見受けられるが、奥行き感についてのモデル化はほとんど議論されていない。カニツツアの三角形で生じる奥行き感は単眼視でも可能なものであるから、両眼視差検出モデルとは別の議論が必要である。そこで本論文では、単眼視 2次元図形で生じる奥行き感について、主観的図形を特に考慮して、その発生メカニズムを考察する。筆者らは、主観的輪郭線に反応する細胞群のある V2 野縞間隙領域から両眼視差細胞がある V2 野太縞領域への投射が、単眼視の奥行き感発生的重要なルートであると仮説を立ててモデル化している。モデルにより奥行き感が計算でき図形の見えが分るようになった。

キーワード 奥行き感, 主観的図形, 両眼視差細胞, 遮へい情報

1. ま え が き

Marr は、視覚の機能は 2次元の網膜像から外界の 3次元の構造を推定することであるととらえている [1]。我々ヒトは通常、両眼視差、陰影や運動視差などの情報を並列に処理し、それらを統合して奥行き知覚を行う。しかしながら、奥行き知覚にはこれらの情報がすべて必要というわけではなく、情報の少ない 2次元図形でも可能である。しかも、実際に物理的な輝度変化がなくても、図形が知覚でき奥行き感が発生する場合がある。例えば、ランダムドットステレオグラム [2] や、カニツツアの主観的三角形 [3] である。

前者のランダムドットステレオグラムに関しては、大脳皮質 V2 野の太縞領域に両眼視差に反応する細胞が発見され [4]~[6]、その細胞のモデル化による視差検出モデルすなわち奥行き知覚モデルが提案されている [7]。一方、後者のカニツツアの主観的三角形に関しては、主観的輪郭線に反応する細胞が V2 野の縞間隙

領域に発見され [8], [9]、これをもとにした主観的輪郭線生成の神経回路モデルが提案されている [9], [10]。

石寺、栗田ら [10] のモデルは、実際の脳の視覚野の生理学的知見に基づいた主観的輪郭線形成の計算モデルである。しかしながら、入力図形をエッジ情報としたため、図 1 に示した (b) と (c) は同じ入力となり、実際の見えが (b) と (c) で異なることに対応できない。また、主観的輪郭線形成には、明るさの変化や、奥行き感を伴うことが多いが、そこまでモデル化していない。

主観的輪郭形成に伴う明るさの変容については、モデルが提案されている [11], [12]。例えば塚田、佐々木ら [11] は、明るさの充てんをモデル化して、主観的図形の明るさの変化を説明している。一方、主観的図形の奥行き感についてのモデル化は、ほとんど議論されていない。主観的図形の奥行き感は単眼視でも可能な

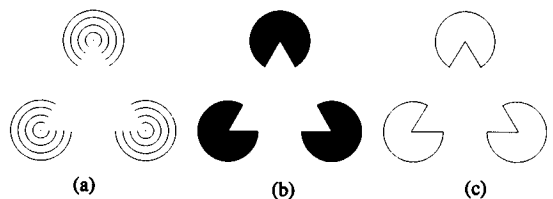


図 1 構成図形要素の異なる三つの図形
Fig. 1 Three figures consisting of different elements.

[†] 千葉大学自然科学研究科, 千葉市 Graduate School of Science and Technology, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263 Japan

^{††} 千葉大学工学部, 千葉市 Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263 Japan

^{†††} 流通経済大学流通情報学部, 竜ヶ崎市 Faculty of Distribution and Logistics Systems, Ryutsu Keizai University, Ryugasaki-shi, 301 Japan

ことから、両眼視差検出モデルでの奥行き知覚とは異なる議論が必要である。

本論文では、カニツアの三角形に見られるような単眼視 2 次元図形での奥行き感が、どのような情報処理過程を経て発生するかを主観的図形を題材に考察し、奥行き感発生の計算モデルを提案する。2. で奥行き感について特に主観的図形における場合を簡単な測定結果から考察し、3. で神経生理学の知見から考察する。4. で奥行き感の計算モデルを提案し、5. で計算機による検証を行い、最後に 6. でまとめと今後の展望を述べる。

2. 奥行き感と主観的図形

本論文で取り扱う奥行き感とは、視覚的にはっきりと奥行きが見えなくとも、手前か奥か判断できるような知覚である。このような奥行き感が 2 次元図形から得られるのはどういう場合であろうか。

紙に描かれた一つの図形の場合、その図形はその他の部分つまり背景より手前であると感じる。二つ以上の重なり図形ならば、どちらの図形が手前かを判断できる。

主観的図形は、実際には物理的な輝度変化がなくても 3 次元的な変異を受け、視野の他の領域より手前にあるように感じられる [3], [13]。この 3 次元的な変異つまり奥行き感とは、主観的図形を作る図形要素が、端点をもつ線分図形かべた図形かによって感覚量が異なってくる [14], [15]。図 1 に示す (a) 同心円状のパックマンと (b) べたのパックマンでは、前者の方が後者の場合よりも主観的輪郭線の見える感覚、主観的図形の明るさおよび奥行き感が高いという評価が得られる [15]。また、図 1 (c) 線画輪郭パックマンでは、明るさも奥行き感も感じられない。

3. 神経生理学からの考察

大脳における視覚処理には、一般に二つの主要な経

路が挙げられる。すなわち、見ているものが何であるかを知る物体視経路と、見ているものの動きや位置を知る空間視経路である。それでは、奥行き感はそのような経路でどのように発生すると考えられるか、以下に考察する。

視覚の第 1 段階である V1 野での主な処理は、ある特定の方向に傾いた線やエッジに選択的に反応することである。これらの細胞には、感度分布が対称のものと非対称のものが存在し、前者は線検出器として、後者はエッジ検出器として働くと考えられる。

次段階の V2 野では、垂直方向つまり柱状方向に三つの領域があることが知られている。すなわち、表 1 に示す太縞 (thick stripe)、細縞 (thin stripe)、縞間隙 (inter stripes) 領域である [16]~[20]。このように領域が分かれているのは、ヒトが形や奥行きなどの情報を分離して処理している [21] ことの証拠である。

V2 野以降からは、次に挙げる例のようにさまざまな領野で分担されて情報処理される。例えば、V4 野を経た IT 野では、三角形などの形に反応する細胞が発見されている [22], [23]。MT 野、MST 野では、動きに反応する細胞が発見されている [24]。また PIP 野では、物体の 3 次元的な傾きに反応する細胞が発見されている [25]。このように見ていくと、IT 野や MT 野などの奥行きの情報処理とは直接関係がない領域、PIP 野などの奥行きに関係する領域に分類できる。この PIP 野の細胞は両眼視差の入力を受けている [25] ことから、両眼視差細胞のある V2 野の太縞領域は、奥行きの情報処理の初期段階と考えることができる。

ここで表 1 の下線の V2 野縞間隙領域から太縞領域への投射に注目する。縞間隙領域で終端や主観的輪郭線に反応する細胞 [8], [9]、また太縞領域では両眼視差に反応する細胞 [4]~[6] が知られている。この前者から後者へ投射があるということは、単眼視での終端や輪郭線の反応が、両眼視差細胞に影響を与えていると考えることができる。

表 1 V2 野の縞領域の機能と結合
Table 1 Functions and connections of striptes in V2.

stripe	direction selectivity	neuron	connection
inter (I)	+	contour cell end-stopped cell	from 2/3 layer of V1 to <u>K/N stripe of V2, V4</u>
thick (K)	+	binocular disparity cell	<u>from 4B layer of V1, I/N stripe of V2</u> to V3 and MT
thin (N)	-		from 2/3 layer of V1, I stripe of V2 to V4

両眼視差細胞については、例えば Poggio ら [4] の電気生理の実験がある。両眼視差細胞は、注視面より近いか遠いかに反応する細胞などに分類され、更にそれぞれ最適視差をもつ細胞ともたない細胞がある。ランダムドットステレオグラムでの奥行き感が比較的大きく定量的な測定が容易であるのに対し、主観的図形での奥行き感は比較的小さく定量的な測定が困難である。このことから前者は最適視差をもつ両眼視差細胞群で、後者は最適視差をもたない両眼視差細胞群に単眼視からの輪郭情報が伝えられて、奥行き感の情報になると推測した。そのような情報をもつ細胞は、物体の境界を表しており遮へいの情報をもっているため遮へい細胞と呼び、そのような細胞があると仮定して以下の計算モデルを展開する。

4. 奥行き感計算モデル

本計算モデルは、石寺、栗田ら [10] のモデルをもとにし改良をしたものである。主な改良点は次のとおりである。まず、線分とエッジの区別をするために奇関数型を導入した。これにより図 1 の (b) と (c) の違いに対応できる。また、輪郭細胞で複雑型細胞の入力を更に畳込み積分すると、輪郭細胞の受容野は非常に大きくなってしまう [10]。V1 野と V2 野の受容野の大きさはそれほど変わらないのだから、本論文では複雑型細胞の入力はそのまま輪郭細胞に入力し、端点入力は主観的輪郭線を形成するために感度フィルタにより集めるものとした。最後に、遮へい情報細胞を仮定し、単眼視からの奥行き感の発生をモデル化している。

4.1 Simple Cell

単純型細胞の受容野モデルでの長軸方向を最適方位 (x 軸) とした場合、感度分布フィルタを次の二つの式で表す。

$$\begin{aligned}
 & DOG_{even}(x, y) \\
 &= A \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_{env}^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{y^2}{\sigma_{ex}^2}\right) - \frac{\sigma_{ex}}{\sigma_{in}} \exp\left(-\frac{y^2}{\sigma_{in}^2}\right) \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & DOG_{odd}(x, y) \\
 &= A \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_{env}^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(y - \sigma_{ex})^2}{\sigma_{ex}^2}\right) - \exp\left(-\frac{(y + \sigma_{in})^2}{\sigma_{in}^2}\right) \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

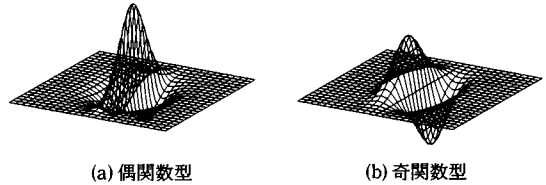


図2 単純型細胞の二つの受容野特性
Fig.2 Profiles of two receptive fields of simple cell.

式 (1) は偶関数型で、図 2(a) に示すような線検出の感度フィルタである。式 (2) は奇関数型で、図 2(b) に示すようなエッジ検出の感度フィルタである。A は感度、 σ_{env} は最適方位の長軸方向の広がり、 σ_{ex} 、 σ_{in} はそれぞれ最適方位に垂直な方向の興奮性、抑制性の広がりを与えるパラメータである。

単純型細胞の出力 $S_{type}(x, y, \theta)$ は、受容野の感度フィルタ $F_{type}^{Sim}(x, y, \theta)$ と受容野への入力値 $I^{Sim}(x, y)$ の畳込み積分に、シグモイド関数 $\phi(x)$ を通したものである。

$$\begin{aligned}
 & F_{type}^{Sim}(x, y, \theta) \\
 &= DOG_{type}(x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta) \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & S_{type}(x, y, \theta) \\
 &= \phi \left[\iint F_{type}^{Sim}(x-u, y-v, \theta) I^{Sim}(u, v) dudv \right] \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\phi(x) = \frac{1}{1 + \exp(b - ax)} \quad (5)$$

ここで下付き添え字の *type* は、偶関数型なら *even*、奇関数型なら *odd* である。 θ は最適方位で、 a 、 b はそれぞれシグモイド関数の傾き、バイアスを与えるパラメータである。

受容野の大きさは 2 種類で小さい *S* と大きい *L* とした。偶関数型の *S* では $\sigma_{env} = 4.0$ 、 $\sigma_{ex} = 1.0$ 、 $\sigma_{in} = 2.5$ 、*L* では $\sigma_{env} = 8.0$ 、 $\sigma_{ex} = 2.0$ 、 $\sigma_{in} = 5.0$ で、奇関数型の *S* では $\sigma_{env} = 4.0$ 、 $\sigma_{ex} = \sigma_{in} = 1.0$ で、*L* では $\sigma_{env} = 8.0$ 、 $\sigma_{ex} = \sigma_{in} = 2.0$ とした。受容野の感度は、偶関数型では $A = 2.0$ 、奇関数型で $A = 1.0$ とした。シグモイド関数は、偶関数型の *S* では $a = 5.0$ 、 $b = 8.5$ 、*L* では $a = 2.5$ 、 $b = 5.0$ 、奇関数型の *S* では $a = 2.5$ 、 $b = 8.0$ 、*L* では $a = 0.6$ 、 $b = 7.0$ とした。 θ は偶関数型では $\theta = 0 \sim 150^\circ$ で、奇関数型では $\theta = 0 \sim 330^\circ$ の範囲で 30° 刻みとした。

4.2 Complex Cell

複雑型細胞は以下のとおりである。

$$C_{type}(x, y, \theta) = \phi [c_1 S_{type}^S(x, y, \theta) + c_2 S_{type}^L(x, y, \theta)] \quad (6)$$

偶・奇関数型とも $c_1 = 2.0$, $c_2 = 1.5$ とした。シグモイド関数は、偶・奇関数型とも $a = 3.0$, $b = 5.0$ とした。

4.3 Endstopped Cell

端点停止型細胞のモデルは Dobbins ら [26] が提案したように、小さい受容野の単純型細胞が大きい単純型細胞より抑制を受けるというモデルである。

$$E_{type}(x, y, \theta) = \phi [S_{type}^S(x, y, \theta) - e_1 S_{type}^L(x, y, \theta) - e_2 \{S_{type}^L(x, y, \theta + d\theta) + S_{type}^L(x, y, \theta - d\theta)\}] \quad (7)$$

偶・奇関数型とも $e_1 = 0.65$, $e_2 = 0.35$ とした。シグモイド関数は、偶関数型では $a = 50.0$, $b = 6.0$, 奇関数型では $a = 60.0$, $b = 5.0$ とした。なお $d\theta = 30^\circ$ である。

4.4 Contour Cell

端点の増加と共に主観的輪郭線に強く反応する [8] ので、端点情報を図 3 に示すような以下の 2次元ガウス関数で集める。

$$GAUSS(x, y) = A \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_{env}^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{\sigma_{per}^2}\right) \quad (8)$$

ここで A は感度, σ_{env} , σ_{per} はそれぞれ最適方向の広がり, 最適方向と垂直な方向の広がりを表すパラメータである。輪郭細胞の出力 $L_{type}(x, y, \theta)$ は、感度フィルタ $F^{Con}(x, y, \theta)$ と入力値 $I_{type}^{Con}(x, y)$ の畳込み積分に複雑型細胞の出力 $C_{type}(x, y, \theta)$ を加算した

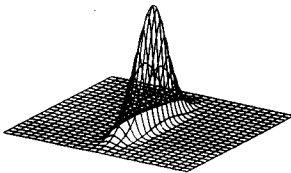


図 3 輪郭細胞への端点情報の感度分布
Fig. 3 Profile of contour cell on information of endmost points.

ものに、シグモイド関数 $\phi(x)$ を通したものである。畳込み積分により端点情報から主観的輪郭線を形成し、複雑型細胞の出力を加えることで通常の輪郭線にも反応する。

$$F^{Con}(x, y, \theta) = GAUSS(x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta) \quad (9)$$

$$I_{type}^{Con}(x, y, \theta) = l_1 E_{type}(x, y, \theta') + l_2 [E_{type}(x, y, \theta' + d\theta) + E_{type}(x, y, \theta' - d\theta)] - l_3 E_{type}(x, y, \theta) \quad (10)$$

$$L_{type}(x, y, \theta) = \phi \left[\iint F^{Con}(x-u, y-v, \theta) I_{type}^{Con}(u, v) dudv + l_4 C_{type}(x, y, \theta) \right] \quad (11)$$

感度分布は、偶・奇関数型ともに $\sigma_{env} = 9.6$, $\sigma_{per} = 1.5$, 感度は $A = 1.0$ とした。偶・奇関数型とも $l_1 = 2.0$, $l_2 = 1.2$, $l_4 = 4.0$ とした。線画図形では主観的輪郭線は見えないことから、偶関数型では $l_3 = 3.0$, 奇関数型では $l_3 = 0.0$ とした。シグモイド関数は、偶・奇関数型とも $a = 2.0$, $b = 5.0$ とした。なお偶関数型では $\theta' = \theta + 90^\circ$ で、奇関数型では $\theta' = \theta \pm 90^\circ$ である。

4.5 Occluding Cell

遮へい情報細胞は、奥行き感の発生する要因である遮へいの度合を表すと仮定した細胞である。以下のような式で表し、端点情報はその方向にさえぎっている（あるいはさえぎられている）情報となり、輪郭情報からは 90 度回転入力してさえぎっている情報としている。この細胞は Marr [1] のいう観察者からの表面までの距離の不連続で生じる遮へい輪郭 (Occluding contour) を表していると考えられることができる。

$$O_{type}(x, y, \theta) = \phi [o_1 E_{type}(x, y, \theta'') + o_2 L_{type}(x, y, \theta') - o_3 E_{type}(x, y, \theta')] \quad (12)$$

偶・奇関数型とも $o_1 = 4.0$, $o_2 = 1.6$ とし、偶関数型では $o_3 = 4.0$, 奇関数型では $o_3 = 0.0$ とした。シグモイド関数は、偶・奇関数型とも $a = 3.0$, $b = 5.0$

とした。なお $\theta' = \theta + 90^\circ$ で、偶関数型では $\theta'' = \theta$ で、奇関数型では $\theta'' = \theta, \theta + 180^\circ$ である。

4.6 局所遮へい情報から奥行き感へ

遮へい情報細胞の出力は局所的な情報であり、全体の奥行き判断までは至っていない。安藤、杉江ら [27] は、主観的輪郭線の通る点の候補を、べた図形のパックマンでは頂点が L 型交点、また線分の端点は I 型交点と分類して、主観的輪郭線を生成している。しかしながら L 型交点や I 型交点は、もともとの画像で T 型結合点ではなくても主観的輪郭線が形成されれば T 型の結合点になるので、特に分類する必要はないと考えられる。従って主観的輪郭線の有無にかかわらず T 型結合点として統一して考える。この T 型結合点は、ある面が他の面や線の一部をおおい隠すときに重なり部分に生じるものであるから、奥行きの判断には重要である。従って、この点の情報を図 4 に示したように伝搬する処理を行えば奥行き情報が完成すると考えた。

例えば図 4 では、T 型の横線（実線）が 90 度方向の遮へい情報で、縦線（点線）が 0 度方向の遮へい情報である。縦線は、T 型結合点があることから上側（網掛け部分）によっておおい隠されていることがわかり、逆に上側はおおっている部分だとわかる。T 型結合点から上側に遮へい情報が広がり、上側が手前という奥行き感が生まれる。

奥行き感 $D_n(x, y)$ の計算のアルゴリズムを示す。まず初期値を

$$D_0(x, y) = \max_{\theta} [O_{type}(x, y, \theta)] \quad (13)$$

とする。次にある点 (x, y) から見て次の条件がそろったら以下の式で更新する。

- (1) 近傍点で $D_n(x + u, y + v)$ が高い点 (T 型結合点) であるか、または $D_0(x + u, y + v)$ から増加

していて $D_n(x + u, y + v) > D_n(x, y)$ である

- (2) 各 θ の遮へい情報細胞を参照して、近傍点 $(x + u, y + v)$ からの方向が伝搬側である

$$D_{n+1}(x, y) = D_n(x, y) + d_1 [D_n(x + u, y + v) - D_n(x, y)] \quad (14)$$

ここで n は伝搬回数、 d_1 は伝搬係数で $d_1 = 0.5$ 、 u, v は近傍の範囲を決めるもので $-1 \leq u \leq 1, -1 \leq v \leq 1$ とした。但しもともと遮へい情報があるところから先は伝搬を止める。なお条件 (2) の伝搬側とは図 4 の網掛け部分側のことで、T 型結合点の方向 (図 4 では 90°) と垂直の遮へい情報細胞出力 (図 4 では 0°) を参照して判断する。

5. 計算機シミュレーション

ここで扱った図形はすべて画素数 256×256 で、256 階調の輝度である。計算モデルでは 0 から 1 の連続値であるが、表現は 256 階調の離散値になっている。入力図形は図 5 に示す同心円状、べたパックマンであり、0 (黒) か 255 (白) の 2 値しかもたない。他の入力図形として線画パックマンを行っているが、主観的輪郭線、T 型結合点は発生せず、入力図形と大差ない結果が出たので割愛する。なお、同心円状パックマンでは偶関数型、べたパックマンでは奇関数型を適用している。

図 6 は、端点停止型細胞の出力で全方向を各画素で最も大きい値をもつものを表示している。図 6(a) では線分の端点が反応し、図 6(b) では頂点が反応している。

図 7 は輪郭細胞の出力である。図 7(a) では主観的

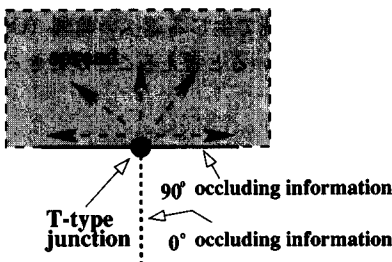
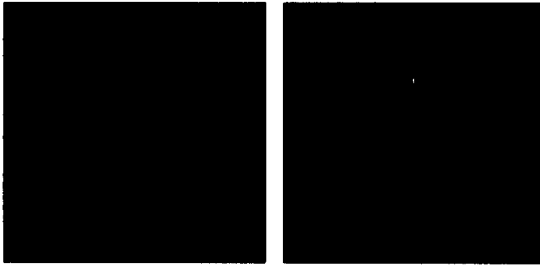


図 4 T 型結合点と遮へい情報の伝搬
Fig. 4 T-type junction and spreading occluding information.



(a) 同心円パックマン (b) べたパックマン

図 5 入力刺激
Fig. 5 Input figures.



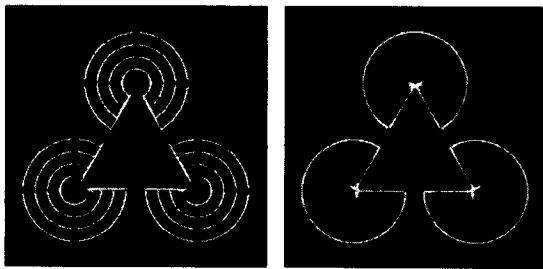
(a) 同心円バックマン (b) ベタバックマン

図 6 端点停止型細胞の出力 (全方向)

Fig.6 Outputs of endstopped cell (All directions).

輪郭線によく反応している。図 7(b)では(a)よりも反応が弱く、電気生理測定 [8],[9] や心理測定 [15] をよく再現している。

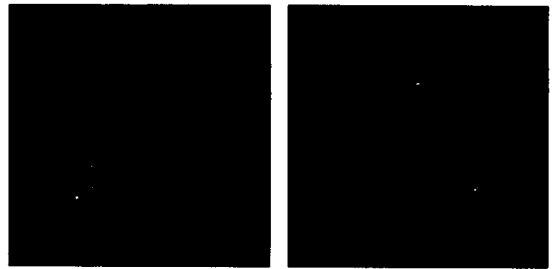
図 8 は遮へい情報細胞の全方向出力である。同心円状バックマンの場合の遮へい情報細胞の各方向の出力を図 9(a)~(f)に示した。遮へい情報細胞は、ある方向にさえぎるものがある場合に反応が出る。例えば図 9(d)の 90 度方向の遮へい情報細胞の出力は、0 度の方向に直線がある箇所が反応している。図 9(g)に 90 度方向の出力の一部を右に拡大表示した。遮へい情報の高くなっている点は、T 型に結合している点を表



(a) 同心円バックマン (b) ベタバックマン

図 7 輪郭細胞の出力 (全方向)

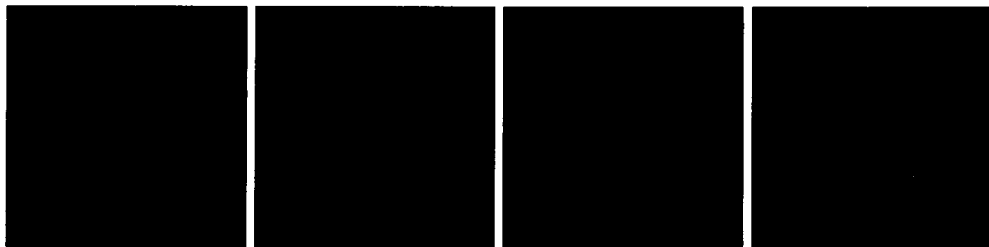
Fig.7 Outputs of contour cell (All directions).



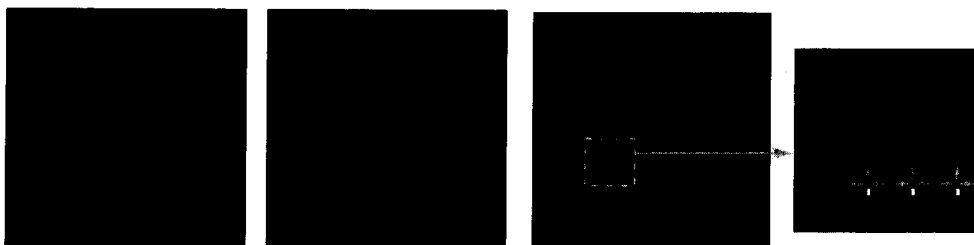
(a) 同心円バックマン (b) ベタバックマン

図 8 遮へい情報細胞の出力 (全方向)

Fig.8 Outputs of occluding cell (All directions).



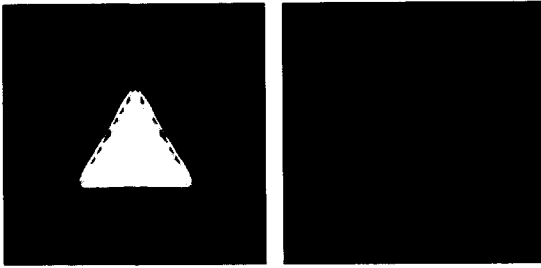
(a) 0 度 (b) 30 度 (c) 60 度 (d) 90 度



(e) 120 度 (f) 150 度 (g) 90 度の遮へい情報伝搬

図 9 遮へい情報細胞の各方向出力と 90 度出力の遮へい情報伝搬

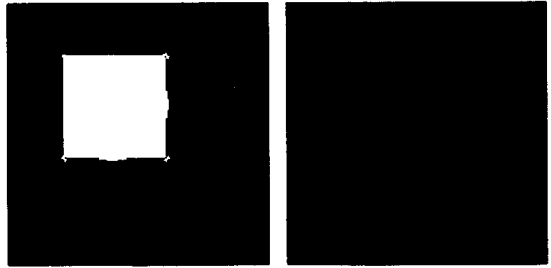
Fig.9 Outputs of occluding cell (each direction) and spreading occluding information of 90 degree occluding cell.



(a) 主観的三角形 (手前) (b) 同心円状パックマン (奥)

図 10 奥行き感による分離

Fig.10 Separation by means of feeling of depth.



(a) 手前 (b) 奥

図 12 重なり図形分離

Fig.12 Separation of overlapped figures.



図 11 主観的輪郭線のない重なり図形

Fig.11 In case of no subjective contour.

している。0度方向出力をみれば、図4の模式図と同じように、下側に遮へい情報があるので遮へいされている線分があることがわかる。一方、上側は遮へい情報がないのでおおっている側だとわかる。遮へい情報の高い点から遮へい情報を図9(g)の90度方向の拡大図に示した矢印方向側に伝搬させると奥行き感が発生する。

最後に同心円状パックマンの場合の局所遮へい情報を伝搬させて奥行き感が発生した結果を、奥行き感の強弱で分離したものを図10に示す。図10(a)は奥行き感の強い、つまり手前にあるという情報が強い主観的三角形である。図10(b)は奥行き感の弱い、つまり背景より手前にありかつ何かがおおいかぶさっている同心円状パックマンである。なお、べたパックマンの場合も同様な結果を得た。

以上のようにして、主観的図形の感じられる2次元画像に対して、奥行き知覚の計算結果を示した。次に、全く同様な計算を図11に示した主観的輪郭線が引かれない、重なり図形に適用してみる。実際の見えは、正方形の背後にもう一つの正方形が感じられ、前者の正方形が手前にあるように感じられる[13]。計算結果

は図12(a),(b)に示したように手前か奥かの分離が同じように可能であった。

6. むすび

本論文では、カニツァの主観的三角形のような単眼視2次元図形を見て生じる奥行き感について、その発生のメカニズムを考察した。筆者らは、主観的輪郭線に反応する細胞群のあるV2野縞間隙から両眼視差細胞が存在するV2野太縞への投射が、奥行き感発生の重要な情報ルートであると仮説を立てて、計算モデルを提案した。その結果、奥行き感が計算でき図形の分離が行えた。すなわちカニツァの図形において、主観的三角形が一番手前、パックマン図形がその向こうにあるとわかる。また、主観的図形を考慮して奥行き感の計算モデルを提案したが、全く同様な計算で重なり図形においても奥行き感の計算が可能な結果を得た。従って、実際に物理的な輝度変化のないところに主観的図形が手前に感じられる一見不思議な現象は、重なり図形を判断するためにヒトに備わった機能の産物であると考えることができる。

本モデルの問題点としては、以下のものが挙げられる。T型結合点の局所遮へい情報では二つの図形のどちらが手前か判断できず、ここで示した奥行き感計算モデルではその手前という情報をただ伝搬しているだけなので、二つの重なり図形は判断できても、三つ以上の重なり図形には、このままでは適用できない。遮へい情報の伝搬アルゴリズムでは、手前という情報だけを伝搬しているため、奥という情報も伝搬させて、両方の情報の整合をとるなどの改良を加えると、三つ以上の重なり図形にも対応できるであろう。

なお今後は、本モデルで計算し分離された図形において、奥の図形は手前の図形に遮へいされているので、

補間処理を行えば、何の図形が隠れているかという非感性的完結化 (amodal completion) [13] の認知機構のモデルにも発展する。

文 献

- [1] D. Marr, "VISION—A computational investigation into the human representation and processing of visual information," W.H. Freeman & Company, 1982. 乾 敏郎, 安藤広志 (訳), "ビジョン—視覚の計算理論と脳内表現," 産業図書, 1987.
- [2] B. Julesz, "Experiments in the visual perception of texture," Scientific American, vol.232, pp.34–43, 1975.
- [3] G. Kanizsa, "Subjective contours," Scientific American, vol.234, pp.48–52, 1976.
- [4] G.F. Poggio, B.C. Motter, and Y. Trotter, "Responses of neurons in visual cortex (V1 and V2) of the alert macaque to dynamic random-dot stereograms," Vision Research, vol.25, pp.397–406, 1985.
- [5] G.F. Poggio and W.H. Talbot, "Mechanisms of static and dynamic stereopsis in foveal cortex of the rhesus monkey," J. Physiol., vol.315, pp.469–492, 1981.
- [6] G.F. Poggio and B. Fischer, "Binocular interaction and depth sensitivity in striate and prestriate cortex of behaving rhesus monkey," J. Neurophysiol., vol.40, pp.1392–1405, 1977.
- [7] 川上 進, 岡本浩明, "網膜から視差検出細胞までの結線モデル," 神経回路学会第 3 回全国大会講演論文集, vol.063, pp.64–65, 1992.
- [8] R. von der Heydt and E. Peterhans, "Mechanisms of contour perception in monkey visual Cortex: I. Lines of pattern discontinuity," J. Neuroscience, vol.9, pp.1731–1748, 1989.
- [9] E. Peterhans and R. von der Heydt, "Mechanisms of contour perception in monkey visual Cortex: II. Contours bridging gaps," J. Neuroscience, vol.9, pp.1749–1763, 1989.
- [10] 石寺永記, 荒井祐之, 土屋雅彦, 宮内裕子, 高橋信一, 栗田正一, "主観的輪郭の形成に関する視覚情報処理モデル," 信学論 (D-II), vol.J76-D-II, no.4, pp.873–880, 1993.
- [11] 塚田 章, 川原田淳, 佐々木和男, "明るさ知覚の特徴抽出モデルによる主観的図形のシミュレーション," 信学論 (D-II), vol.J78-D-II, no.12, pp.1868–1876, 1995.
- [12] 竹内一詔, 鈴木幸司, 川勝正人, "ニューラルネットワークによる主観的輪郭と明るさの知覚," 信学技報, NC94–75, 1995.
- [13] G. Kanizsa, "Organization in Vision: Essays on Gestalt Perception," Praeger Publishers, 1979. 野口 薫 (監訳), "カニツツア 視覚の文法 ゲシュタルト知覚論," サイエンス社, 1985.
- [14] D.F. Halpern, "The determinants of illusory-contour perception," Perception, vol.10, pp.199–213, 1981.
- [15] 三上勝正, 村越一支, 倉田 是, "主観的図形における明るさおよび奥行き知覚," 神経回路学会第 6 回全国大会講演論文集, vol.P316, pp.281–282, Oct. 1995.
- [16] D.H. Hubel and M.S. Livingstone, "Complex-unoriented cells in a subregion of primate area 18," Nature, vol.315, pp.325–327, 1985.
- [17] S. Shipp and S. Zeki, "Segregation of pathways leading from area V2 to areas V4 and V5 of macaque monkey visual cortex," Nature, vol.315, pp.322–325, 1985.
- [18] E.A. DeYoe and D.C. Van Essen, "Segregation of efferent connections and receptive field properties in visual area V2 of the macaque," Nature, vol.317, pp.58–61, 1985.
- [19] S. Zeki and S. Shipp, "The functional logic of cortical connections," Nature, vol.335, pp.311–317, 1988.
- [20] M.S. Livingstone and D.H. Hubel, "Connections between layer 4B of area 17 and the thick cytochrome oxidase stripes of area 18 in the squirrel monkey," J. Neuroscience, vol.7, pp.3371–3377, 1987.
- [21] M. Livingstone and D. Hubel, "Segregation of form, color, movement, and depth; anatomy, physiology, and perception," Science, vol.240, pp.740–749, 1988.
- [22] K. Tanaka, H. Saito, Y. Fukada, and M. Moriya, "Coding visual images of objects in the inferotemporal cortex of the macaque monkey," J. Neurophysiol., vol.66, pp.170–189, 1991.
- [23] I. Fujita, K. Tanaka, M. Ito, and K. Cheng, "Columns for visual features of objects in monkey inferotemporal cortex," Nature, vol.360, pp.343–346, 1992.
- [24] K. Tanaka, K. Hikosaka, H. Saito, M. Yukie, Y. Fukada, and E. Iwai, "Analysis of local and wide-field movements in superior temporal visual areas of the macaque monkey," J. Neuroscience, vol.6, pp.134–144, 1986.
- [25] 酒田英夫, "空間認知と動作指向性知覚," 甘利俊一, 酒田英夫 (編), "脳とニューラルネット," 第 6 章, pp.93–116, 朝倉書店, 1994.
- [26] A. Dobbins, S.W. Zucker, and M.S. Cynader, "End-stopped neurons in the visual cortex as a substrate for calculating curvature," Nature, vol.329, pp.438–441, 1987.
- [27] 安田浩之, 安藤和久, 大西 昇, 杉江 昇, "物理的に存在しない輪郭線の抽出," 信学論 (D-II), vol.J73-D-II, no.6, pp.906–913, 1990.

(平成 8 年 3 月 29 日受付, 8 月 12 日再受付)



村越 一支 (学生員)

平 3 千葉大・工・電気卒, 平 5 同大大学院修士課程了。現在, 同大大学院博士課程在学中。神経回路の情報処理, ヒトの視覚情報処理に興味をもつ。日本神経回路学会会員。



三上 勝正

平6千葉大・工・電気電子卒。平8同大大学院修士課程了。現在、日本電信電話(株)、在学中、ヒトの錯視現象の研究に従事。



倉田 是 (正員)

昭28東北大・工・電気卒。同年日本電信電話公社入社電気通信研究所勤務。昭39千葉大。平8流通経済大・教授。千葉大学名誉教授。工博。神経回路網モデルとシミュレーションおよび主としてヒトの視覚モデルの研究と計算機および情報処理の教育を担当。主な著書に回路網理論(電気学会)、計算機構成論(昭晃堂)。情報処理学会、神経回路学会等各会員。