

視覚系に基づいた T 型接合検出モデル

大城 正典・塩 入 論・矢口 博久

千葉大学工学部情報画像工学科 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

A Model of T-Junction Detector Based on Visual Systems

Masanori OHSHIRO, Satoshi SHIOIRI and Hirohisa YAGUCHI

Department of Information and Image Sciences, Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

Human visual system can segregate objects in a complex scene even when the retinal projection of an object is separated into pieces of fragments due to occlusion by another object. However, typical computer algorithms have difficulty to analyze the images with occluded region as human vision does. One of the possible cues for the visual system in the segmentation is T-junction, which possibly plays an important role to find occlusions. We propose a model for detecting T-junctions based on psychophysical and physiological knowledge of the human visual system. We applied the model to natural scenes as well as simple geometrical images and the results showed reasonably good detection of T-junctions. We also applied the model to images with X-junctions that gave transparency perception. The model detected T-junctions at the locations of X-junctions, which suggests that the transparency may be perceived because T-junction detectors respond at X-junctions.

1. はじめに

画像処理やコンピュータビジョンの大きな目的のひとつは、カメラなどで撮影された2次元画像から、実際の3次元の物体を認識することである。そのための処理として、まずそれぞれの物体の像を画像から切り出す、いわゆるセグメンテーションが必要である。その際の重要な問題は、実際には1つの物体像であるが2次元の画像中では不連続となる場合の処理である。たとえば、Fig. 1(a)は、1つの面が遮蔽によって分割された状況を示している。一般的な画像処理アルゴリズムではこのように分断された断片を元のオブジェクトにまとめてセグメント化することは困難である。

一方、人間はFig. 1(a)においても、分割された断片を一つの物体として認識することが可能である。人間はFig. 1(a)からFig. 1(b)のような2つの面を知覚する。視覚系は、遮蔽されたエッジや領域を補完し、分断された領域を統合していることになる。このような視覚系のセグメンテーションの、おそらく初期段階の処理としてT型接合(T-junction)の検出の関与が考えられる。T型接合

は、遮蔽物体のエッジと被遮蔽物体のエッジの交差部に現れるT型の特徴であり(Fig. 1(c))、物体の前後関係を決定する手がかりとなる。T型接合の水平線分は遮蔽物体に属し、T型接合の垂直線分は被遮蔽物体に属するものと考えられるからである。このようなT型接合による部分的な奥行き関係の検出結果から、被遮蔽部分での連続性を推定できるため、T型接合はいわゆるオブジェクトベースのセグメンテーションを行う際の有力な手がかりとなりうる。

実際に、視覚処理においてT型接合が重要な役割を果たすことは、明らかになりつつある。たとえば、明るさの対比効果は刺激の空間構造に依存するが、T型接合が対比効果の大小を決定しているとの報告がある¹⁾。明るさ対比は視覚系の比較的初期レベルでの現象と考えられ、そこにT型接合が大きくかかわることは、その役割は局所的でボトムアップ的であることを予測させる。本研究は、局所的なボトムアップ処理によるT型接合の検出の方法を、視覚系のモデルとして構築することを目的とする。

適切なセグメンテーションを可能にする手法についての研究は、近年の動画圧縮技術や画像データベース技術におけるオブジェクトベースの処理技術への利用を考える上で

E-mail: osilo@vision.tp.chiba-u.ac.jp

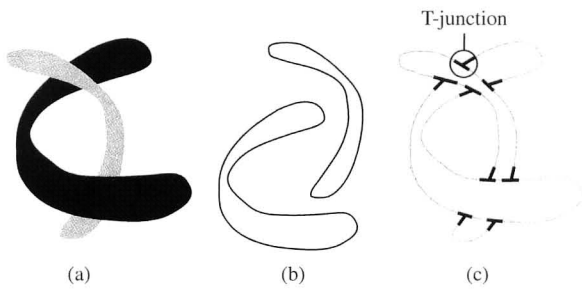


Fig. 1. Perceptual segmentation. (a) shows two objects mutually occluded. The visual system seems to use T-junctions (c) as cues of occlusion and integrates the separated or interpolated edges and regions into each object appropriately (b).

も重要である。また、これは、T型接合の奥行き知覚を考える上での視覚系のモデルとしても重要である。

2. T型接合の検出の問題

視覚系が、入力画像内に存在するT型接合をはじめ端点や曲率の高い屈曲点などの特徴点をどのように検出しているかをモデル化し、それを画像認識に利用する試みは、いくつかの先行研究によってなされている²⁻⁵⁾。これらの研究により提案されているモデルの多くは、大脳第1次視覚野(V1野)の細胞の特性をもとにしている。これは、V1野で確認されている単純型細胞や複雑型細胞と呼ばれる神経細胞は、画像のエッジの検出をする働きがあり、画像から特徴を抽出する処理の初期段階として適当であると考えられるためである。これらのモデルは、まず単純型細胞および複雑型細胞によるエッジ検出処理を経て、その出力が次の段階の各種の特徴検出細胞によって処理されるといふ基本構造をもっている。複雑型細胞は単純型細胞をサブユニットとしてもつ(つまり単純型細胞の出力を入力にもつ)と考えられ、単純型細胞はその受容野特性をよく近似するガボール関数を用いてモデル化できる⁶⁾。

複雑型細胞の次の段階の処理としては、端点停止型細胞をモデル化したものが提案されている。端点停止型細胞はやはりV1野などで確認されている細胞である⁷⁾。端点停止型細胞は、エッジの端点の影響を受ける細胞であり、エッジの端や長さなどを検出していると考えられている。端点停止型細胞の一般的なモデルは、興奮性受容野をもつ複雑型細胞と抑制性受容野をもつ複雑型細胞から入力を受けているものである。たとえばFig. 2に示すように、興奮性受容野をもつ複雑型細胞と、それに隣接する抑制性受容野をもっている複雑型細胞の出力を統合することで、エッジの端点に反応する性質を作ることができる。T型接合には端点が含まれるために、このような端点停止型細胞を

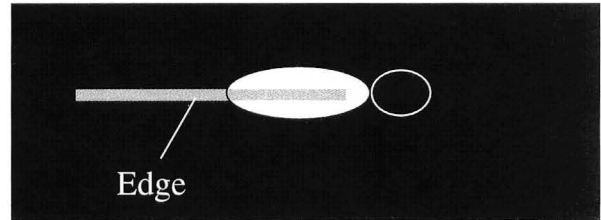
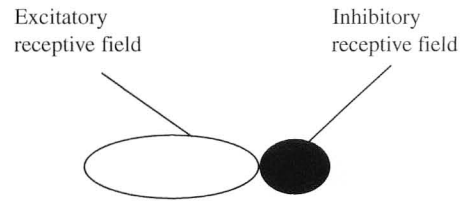


Fig. 2. Receptive fields of end-stopped cell. It responds to end of edge.

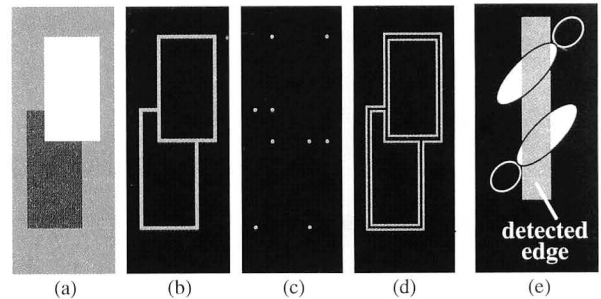


Fig. 3. The problem of "false responses" of end-stopped cell. (a) and (b) are an original image and detected edge respectively. (c) and (d) show correct response and false responses to the detected edge respectively. (e) depicts configuration of "false responses."

用いたモデルをT型接合の検出機構に利用できることが予測される。

端点停止型細胞を用いた特徴点抽出のモデルに対しては、特徴点検出の偽応答(false response)という問題が指摘されている²⁾。これはHeitgerらのモデルによると、実際には端点ではない点に対しても強く反応してしまうというものである。端点検出オペレーターは、原画像(Fig. 3(a))から検出されたエッジ(Fig. 3(b))に対し、Fig. 3(c)のようにエッジの端点のみに反応することが期待されるが、Fig. 3(d)に示すようにエッジの周辺にも反応してしまう。これは、Fig. 3(e)に示すように端点停止型の受容野をもつ端点検出オペレーターがエッジの方位に一致しない方向に対しても強く反応してしまうためである。実際の端点停止型細胞が彼らのモデルと同様に偽反応を生じるかどうかは不明であるが、Ehrenstein図形⁸⁾など端点が特別な役割を果たす図形の存在は、視覚系に特徴点としての端点のみを検出する機構があることを示唆している。こ

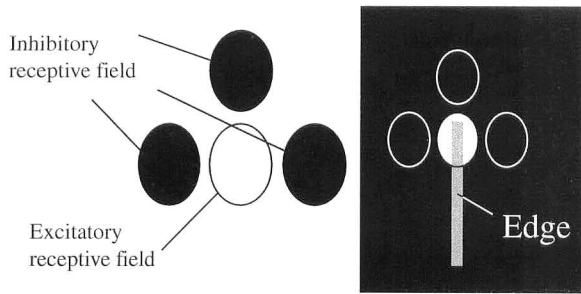


Fig. 4. End-stopped cell consists of complex receptive fields.

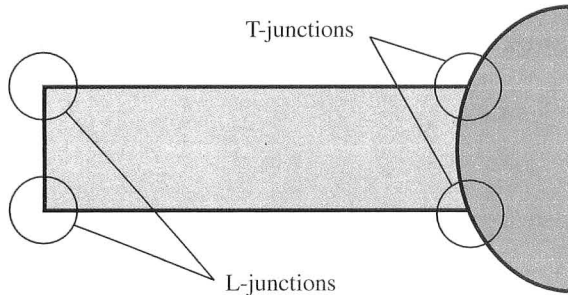


Fig. 5. T-junction and L-junction.

のような端点検出機構を解明することは、視覚系の構造に関する研究の大きな課題のひとつである。Heitger らは、偽応答を防ぐために、複雑型細胞の周囲に反対極性をもつ複雑型細胞を円環状に配置した周辺抑制 (surround inhibition) という機構を提案した²⁾。また、Fig. 4 に示すように興奮性受容野の端点を囲むような抑制性受容野をもつ端点検出オペレーターが用いられることもある³⁾。このような処理は、視覚系のモデルとしては少々複雑であり、その正当性は不明である。本研究で提案するモデルでは、神経系のモデルとしてはそれほど特殊なものとならない、より単純な仮定に基づく問題解決を目的としている。本研究で提案するモデルでは、エッジ検出における方位チューニングの改善と端点検出オペレーターの最適方位と方位チャンネルの方位を一致させることで偽反応問題を解決した。

その他に本研究では、以下の2点を取り扱う。第1点は、L型接合 (L-junction, Fig. 5) とT型接合の分離である。T型接合は図形的にL型接合を含むので、端点停止型の処理では、両者の分離は一般に容易ではない。Heitger らのモデル²⁾は、特徴点の検出が目的であるため、両者の差については特に問題としていない。しかし、L型接合は遮蔽の手がかりを与えないことから、視覚系のモデルとしてはT型接合とL型接合の分離は本質的である。Sajda らのモデル³⁾では、異なる2方向に端点を検出した場合にはL型接合、1方向のみであればT型接合か、

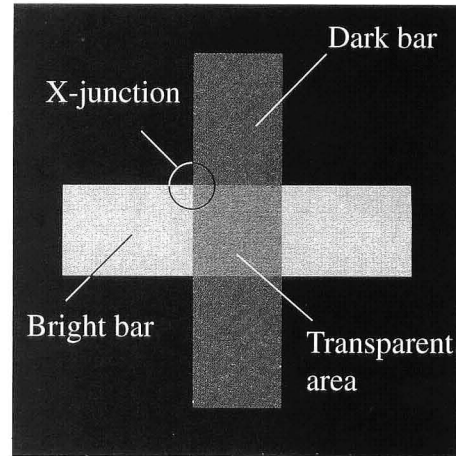


Fig. 6. Typical configuration of transparency perception.

端点として扱っている。これは便宜的な処理であり、視覚系のモデルとはいいがたい。

第2点はエッジがX字に交差する形状、X型接合 (X-junction) に対する応答である。Heitger らおよび Sajda らのモデルでは、これらを端点あるいはT型接合として検出することを想定していない (彼らは、X型接合については検討していない)。しかし、いわゆる透明視知覚が生じている場合、人間はX型接合によってT型接合と類似した前後関係の知覚をする⁹⁾。Fig. 6は、透明視知覚を起こす画像の例である。この例では暗い透明なバーが明るいバーの上ののっているように見える。Fig. 6に示すように、このような典型的な透明視知覚を起こす図形においては、透明面を含む面の交差部にX型接合が形成される。もし、X型接合においてもT型接合検出がなされるとすると、透明視条件での奥行き知覚を説明できる可能性がある。本研究では、X型接合に対しても端点検出器およびT型接合検出器が反応するモデルを提案し、透明視条件でのT型接合の役割についても検討する。

3. モデル

3.1 モデルの概要

Fig. 7にモデルの概要を示す。モデルは5つのステージから構成されている。第1ステージは、入力画像上のエッジを検出する過程であり、最適方位をもつ複雑型細胞をモデル化したオペレーターにより、信号が各方位チャンネルごとに処理される。なお、方位チャンネル数はここでは12 (方位ステップは15°) としている。第2ステージでは、得られた各方位の信号を比較し、各位置におけるエッジの方向を一意に決定する。第3ステージでは、端点停止型オペレーターと複雑細胞型オペレーターを組み合わせたT型接合検出オペレーターによって、各方向チャンネルご

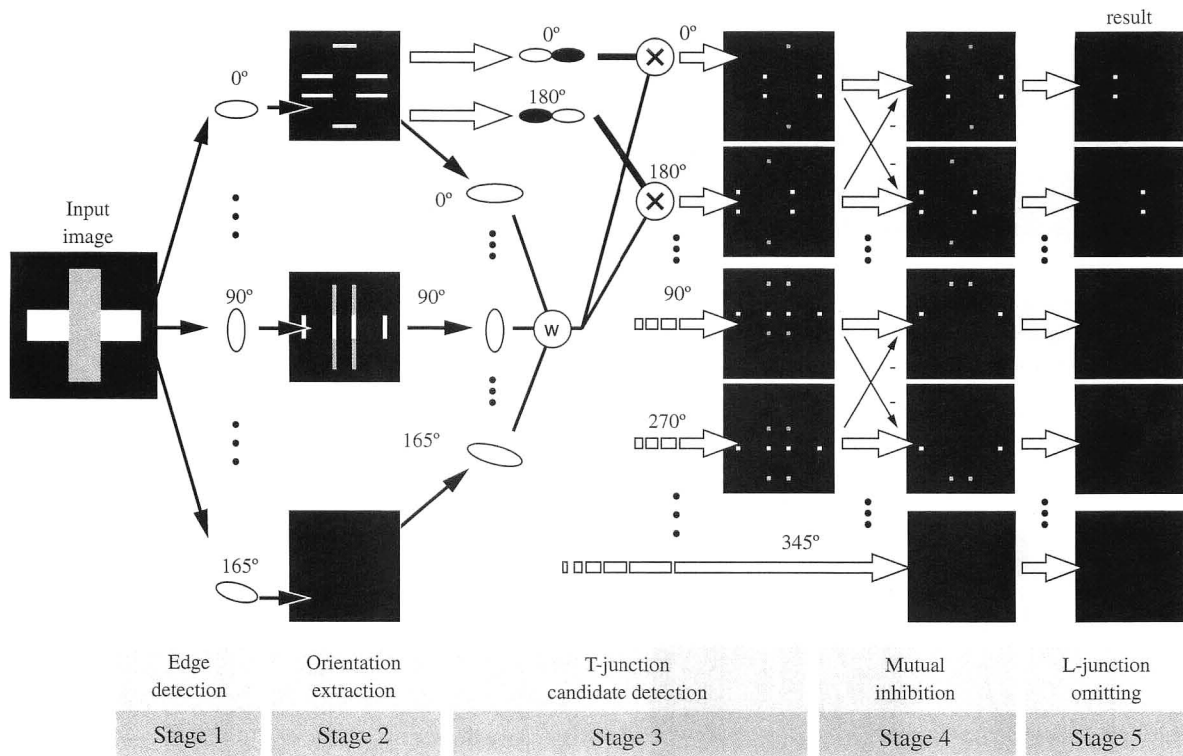


Fig. 7. Diagram of the model.

とに T 型接合候補を検出する。第 4 ステージでは、反対方向の方向チャンネルの間での相互抑制により X 型接合などにおいて生じる奥行きに無関係な向かい合う反応を抑制する。最後の第 5 ステージでは、同一位置における各方向チャンネルの反応の総計に対して、一定の寄与率以下の反応を切り捨てる。この切り捨て処理によって、L 型接合に対する反応が除外され、T 型接合の反応だけが残る。

3.2 第 1 ステージ：エッジ検出

第 1 ステージでは、Heitger らの手法²⁾によってエッジ検出を行う。入力画像 $I(x, y)$ は、式 (1) と式 (2) に示すように、同じ最適方位 θ をもった cos 型ガボール関数 $G_{\cos}(x, y, \theta)$ および sin 型ガボール関数 $G_{\sin}(x, y, \theta)$ を用いて畳み込まれる (* は畳み込み積分を表す)。 $G_{\cos}(x, y, \theta)$ および $G_{\sin}(x, y, \theta)$ は式 (3)~(7) によって定義される。なお、これらのガボール関数は、一樣な入力信号に対する出力が 0 になるように関数 ξ によって修正されている (積分値が 0 になるように λ が決められる)。

$$O_{\cos, \theta} = G_{\cos}(x, y, \theta) * I(x, y) \quad (1)$$

$$O_{\sin, \theta} = G_{\sin}(x, y, \theta) * I(x, y) \quad (2)$$

$$G_{\cos}(x, y, \theta) = \exp\left\{-\frac{R_x(\theta, 0, 0)^2 + R_y(\theta, 0, 0)^2}{2\sigma^2}\right\} \cdot \cos[2\pi f \cdot R_y(\theta, 0, 0) \cdot \xi\{R_y(\theta, 0, 0)\}] \quad (3)$$

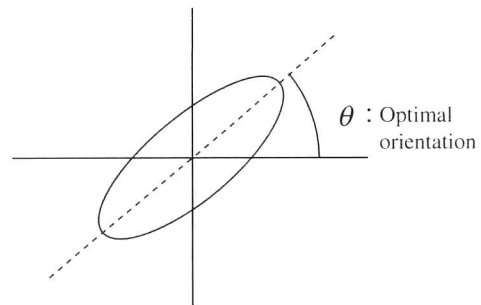


Fig. 8. Complex cell operator. This operator detects edges along the optimal orientation.

$$G_{\sin}(x, y, \theta) = \exp\left\{-\frac{R_x(\theta, 0, 0)^2 + R_y(\theta, 0, 0)^2}{2\sigma^2}\right\} \cdot \sin[-2\pi f \cdot R_y(\theta, 0, 0) \cdot \xi\{R_y(\theta, 0, 0)\}] \quad (4)$$

$$R_x(\theta, x_0, y_0) = (x - x_0) \cdot \cos(\theta) + (y - y_0) \cdot \sin(\theta) \quad (5)$$

$$R_y(\theta, x_0, y_0) = -(x - x_0) \cdot \sin(\theta) + (y - y_0) \cdot \cos(\theta) \quad (6)$$

$$\xi(h) = [\exp\{-\lambda(h/\sigma)^2\} - 1]/2 \quad (7)$$

各畳み込みの結果を $O_{\cos, \theta}$, $O_{\sin, \theta}$ とすると、第 1 ステージの最適方位 θ に関する出力は、式 (8) の局所エネルギー関数¹⁰⁾で表される。

$$C_{\theta}(x, y) = \sqrt{O_{\cos, \theta}^2 + O_{\sin, \theta}^2} \quad (8)$$

このオペレーターの特性は、最適方位 θ をもつ複雑型細胞の入出力特性の近似となっている。Fig. 8 に、この複雑型オペレーターの模式図を示す。

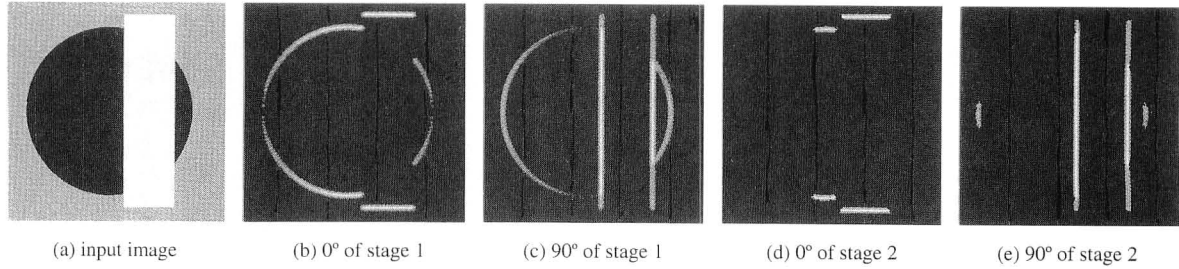


Fig. 9. Input image and results of stage 1 and stage 2. (a) depicts an input image that have T-junctions and L-junctions. (b) and (c) show the results of stage 1 in orientation 0° and 90° respectively. They contain different orientation components. (d) and (e) show the results of stage 2 in orientation 0° and 90° . The different orientation components are omitted.

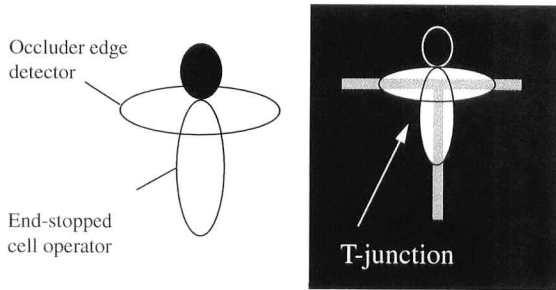


Fig. 10. T-junction candidate detector. It consists of an end-stopped cell and a complex cell.

256×256 pixel のグレイスケール画像 (Fig. 9(a)) に対する第1ステージのシミュレーション結果を Fig. 9(b), (c) に示す。方位ステップは 15° 、画像の大きさを 80.0×80.0 、 $\sigma = 1.0$ 、 $f = 0.83$ として計算を行った (このとき、 λ は約 1.26 となる)。Fig. 9(b) は 0° 方位 (左右方向) の結果を、Fig. 9(c) は 90° 方位 (上下方向) の結果である。

3.3 第2ステージ：方位成分抽出

Fig. 9(b) および (c) より、エッジ検出結果の各方位チャンネルには最適方位以外の方位成分が多く含まれていることがわかる。偽反応問題の一因は最適方位以外の信号成分に端点停止型の受容野をもつオペレーターが反応してしまうことにあると考えられる。そこで第2ステージでは、エッジ検出結果の各位置における優位な方位成分を抽出する。方位 θ に関する第1ステージの出力を $C_\theta(x, y)$ とすると、各位置 (x, y) に対して、集合

$$\{C_i(x, y) | i = 0, 15, 30, \dots, 165\} \quad (9)$$

のうち、最大値をもつ要素 $C_\phi(x, y)$ を定める方位 $D(x, y) = \phi$ を選ぶことができる。 $D(x, y)$ は、入力画像が点 (x, y) において、どの方位に最も強い信号を含んでいるかを表している。各点における有効な方位成分を一意に決定するために、第2ステージの出力 $C'_\theta(x, y)$ を、 $D(x, y)$ を用いて式 (10) のように定義する。

$$C'_\theta(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if } \theta \neq D(x, y) \\ C_\theta(x, y) & \text{if } \theta = D(x, y) \end{cases} \quad (10)$$

この処理は、特定の位置における方位成分のうち、最も強い方位成分のみを有効とすることから、神経系にみられる競合システムに相当する。V1には、各網膜位置に対して最適方位が連続して変化する多くの方位選択性をもつ単純型細胞や複雑型細胞があることが知られており、この処理はそれらの間の局所的な競合と考えることができる。

Fig. 9(d), (e) に Fig. 9(a) の入力画像に対する第2ステージの結果を示した。Fig. 9(d) は 0° 方位チャンネルの結果を、Fig. 9(e) は 90° 方位チャンネルの結果である。Fig. 9(b), (c) にみられた余分な方位成分は、ほとんど除去できていることがわかる。

3.4 第3ステージ：T型接合候補の検出

第3ステージでは、T型接合検出オペレーターによってT型接合の候補を検出する。Fig. 10にT型接合検出オペレーターの概要を示す。T型接合検出オペレーターは遮蔽エッジ検出オペレーターと端点停止型オペレーターの組み合わせからなっており、それぞれ遮蔽物体のエッジ、被遮蔽物体のエッジの端点に反応する。遮蔽物体の方位 θ のエッジに反応するオペレーターの反応 S_θ は、次の式 (11) によって定義される。なお、 F_θ はガウス関数を最適方位 θ にそって伸張したものである。

$$S_\theta(x, y) = K_\theta \{x, y, 0, 0, r_r, s_r, \sigma_r\} \quad (11)$$

$$K_\theta(x, y, x_0, y_0, r, s, \sigma) = F_\theta(x, y, x_0, y_0, r, s, \sigma) * C'_\theta(x, y) \quad (12)$$

$$F_\theta(x, y, x_0, y_0, r, s, \sigma) = \exp \left[-\frac{\{R_x(\theta, x_0, y_0)/r\}^2 + \{R_y(\theta, x_0, y_0)/s\}^2}{2\sigma^2} \right] \quad (13)$$

また、端点停止型オペレーターの反応は次の式 (14) によって定義される。なお、 $\{ \ }^+$ は負の値を0にする操作を意味する。

$$E_{\mu}(x, y) = \{b_e K_{e,\mu}(x, y) - b_i K_{i,\mu}(x, y)\}^+ \quad (14)$$

$K_{e,\mu}$ および $K_{i,\mu}$ は、次の式 (15), (16) のように定義され、それぞれ興奮性および抑制性サブオペレーターの出力結果を表している (各パラメータの添字 e と i は、そのパラメータがそれぞれ興奮性および抑制性サブオペレーターのパラメータであることを示す)。なお、 d は各サブオペレーターの中心から端点停止型オペレーターの中心までの距離である。

$$K_{e,\theta}(x, y) = K_{\theta}\{x, y, -d_e \cos(\theta), -d_e \sin(\theta), r_e, s_e, \sigma_e\} \quad (15)$$

$$K_{i,\theta}(x, y) = K_{\theta}\{x, y, d_i \cos(\theta), d_i \sin(\theta), r_i, s_i, \sigma_i\} \quad (16)$$

ここで注意すべき点は、個々のサブオペレーターの最適方位が、各チャンネルの方位と一致しているということである。つまり方位 θ のチャンネルにおいては、最適方位 θ をもつオペレーターのみが働く。これは、第2ステージで方位チューニングのよいエッジ信号が得られているもの、そのエッジ信号に異なる方位のオペレーターが働くと偽反応が起こってしまうためである。つまり、偽反応を防ぐためには方位チューニングのよいエッジ検出を行い、かつ端点検出におけるサブオペレーターの最適方位が方位チャンネルと一致している必要がある。

最適方向 μ の T 型接合検出オペレーターの反応 J_{μ} は、各方位チャンネルに対する遮蔽エッジ検出オペレーターの反応 S_{θ} と、最適方向 μ の端点停止型オペレーターの反応 E_{μ} を次の式 (17) のように結合した形として定義される。

$$J_{\mu}(x, y) = \sum_{\theta} \{w(\mu - \theta) \cdot E_{\mu}(x, y) \cdot S_{\theta}(x, y)\} \quad (17)$$

すべての方位の遮蔽エッジ検出オペレーターが、端点停止型オペレーターと組み合わせられることにより、直角以外の交差角をもつ T 型接合の検出も可能となる。次の式 (18) で定義される T 型接合検出オペレーターの結合強度 w は、T 型接合検出オペレーターの最適方位と端点停止型オペレーターの最適方向が互いに垂直のときに最も強く、同じ方位をもつ場合には 0 になるように定義している。

$$w(\theta) = \{[1 - \cos(2\theta)]/2\}^2 \quad (18)$$

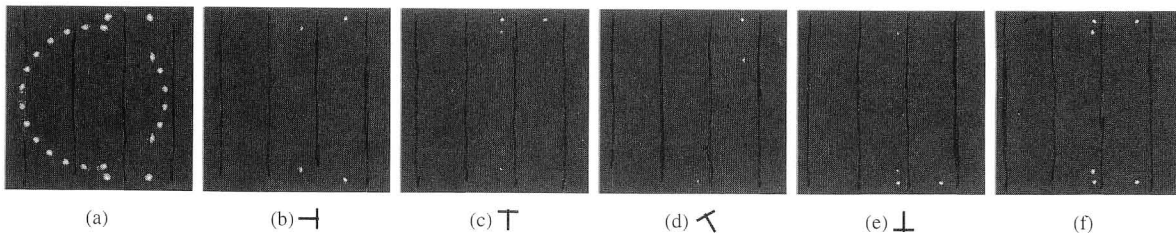


Fig. 11. Results of stage 3. (a) shows sum of results of end-stopped cell operators of all directions. (b), (c), (d) and (e) show results of 0°, 90°, 120° and 270° channel respectively. (f) depicts sum of results of all directions.

Fig. 11 に Fig. 9(a) の入力画像に対する第3ステージの結果を示す。計算は、 $r_r=3.0$, $s_r=0.5$, $\sigma_r=0.25$, $d_e=0.0$, $r_e=1.0$, $s_e=0.75$, $\sigma_e=0.25$, $d_i=-1.0$, $r_i=1.5$, $s_i=1.0$, $\sigma_i=0.5$, $b_e=1.0$, $b_i=0.75$ で実行した。Fig. 11(a) は全方向における端点停止型オペレーターの反応結果の合計である。偽応答は起こっていないことがわかる。また興味深いことに、端点停止型オペレーターの反応は曲率の高いエッジ上に集中している。これは端点停止型オペレーターが、曲率の弁別にも利用されている可能性を示している。Fig. 11(b), (c), (d) および (e) に、それぞれ 0° (右方向), 90° (上方向), 120°, 270° (下方向) の T 型接合検出オペレーターの反応を示す。Fig. 11(f) は全方向に対する T 型接合検出オペレーターの反応の総計である。これらの結果から、T 型接合検出オペレーターによって T 型接合の候補が検出されていることがわかる。

3.5 第4ステージ：T 型接合の相互抑制

Fig. 11(c) および (e) は 90° 方向と 270° 方向の T 型接合検出オペレーターの反応結果だが、0° 方向の T 型接合に対しても反応している。これは、式 (17) で定義されている T 型接合検出オペレーターが Fig. 12 に示すように、T 型接合や X 型接合の交差点に対して各エッジの方向ごとに反応するためである。しかし、反対方向の T 型接合どうしは、それらが示す遮蔽側物体と被遮蔽側物体の間の相対的な奥行きに矛盾を生じる。われわれは、近傍に存在する互いに反対方向の T 型接合の反応は抑制しあう

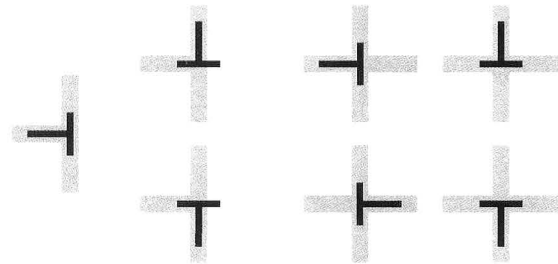


Fig. 12. T-junction candidate detector responds to T-junction and X-junction in the directions along edges.

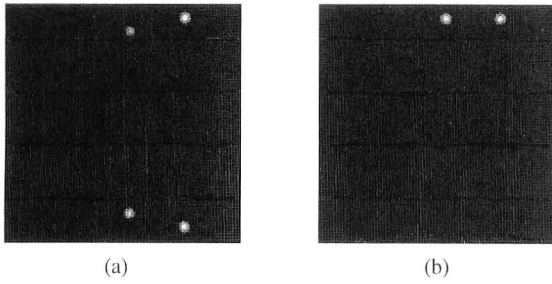


Fig. 13. Results of stage 4. (a) and (b) show results of 0° and 90° respectively.

と仮定した。なお、後述するように、この仮定は X 型接合に対する T 型接合反応の抑制とはならない。この相互抑制は次の式 (19), (20) によって定義される。

$$H_{\mu}(x, y) = \{J'_{\mu}(x, y) - cJ'_{\mu+\pi}(x, y)\}^+ \quad (19)$$

$$J'_{\mu}(x, y) = \exp[-\{x^2 + y^2\}/2\sigma_p^2] * J_{\mu}(x, y) \quad (20)$$

式 (20) は、抑制が働く近傍をガウス関数によって規定していることを表し、式 (19) は 180° 反対向きの T 型接合反応による抑制を定義している。

Fig. 9(a) の入力画像に対する第 4 ステージの結果を Fig. 13 に示す。計算は、 $\sigma_p=0.75$, $c=100$ で実行した。Fig. 13(a) と (b) はそれぞれ、0°, 90° 方向の結果である。Fig. 13(b) では、Fig. 12(c) にみられた異なる方向での T 型接合の反応が、相互抑制によって弱められていることがわかる。

3.6 第 5 ステージ：L 型接合の除外

最後の第 5 ステージでは、第 4 ステージの結果から、各位置における T 型接合の反応の総計を求め、その総計の一定率 t 以下の方向チャネルの反応を 0 とすることで、優位な反応のみを残す。これは、一種の競合システムと考えることができる。この処理は、以下の式 (21)~(23) で定義される。

$$H'_{\mu}(x, y) = \exp[-\{x^2 + y^2\}/2\sigma_p^2] * H_{\mu}(x, y) \quad (21)$$

$$g(u, v, w) = \begin{cases} 0 & \text{if } u < vw \\ u & \text{if } u \geq vw \end{cases} \quad (22)$$

$$T_{\mu}(x, y) = g[H'_{\mu}(x, y), \sum_{\eta} \{H'_{\eta}(x, y)\}, t] \quad (23)$$

式 (21) により再び処理を行う近傍をガウス型フィルターによって規定し、式 (22) によって全方向の出力の総和の一定比率以上の出力を示す方向以外の信号の除外を行う。L 型接合上では、同程度の強度の T 型接合候補の反応が存在すると考えられ、 t を 0.5 以上とすれば、原理的には、L 型接合上の反応の除外が可能となる。

Fig. 9(a) の入力画像に対する第 5 ステージの結果を Fig. 14 に示す。計算は $t=0.95$ で実行した。Fig. 14(a)

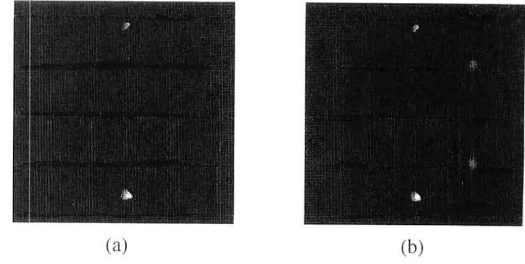


Fig. 14. Results of stage 5. (a) shows results of 0°. (b) depicts sum of results of all directions.

は 0° 方向の結果 T_0 , Fig. 14(b) は、全方向の結果の総計である。これらの結果から、L 型接合に対する反応は除外され、T 型接合への反応のみが得られていることがわかる。

4. 自然画像に対する適用

本モデルの自然画像に対する適用結果を Fig. 15 に示す (使用したパラメーターは $\sigma_p=0.9$, $c=1000$, $t=0.99$ とした以外は前述のものと同じ)。Fig. 15(a) は使用した自然画像で、机に敷かれた白紙の上にコーヒーカップと本が置かれている。Fig. 15(b) は最終結果、Fig. 15(c) は入力画像に最終結果を重ねて表示したものである。最終結果を見ると、本モデルが自然画像に対しても T 型接合をうまく検出できることがわかる。カップの右側の T 型接合が検出されていないが、この位置に対する反応は L 型接合除外の段階でなくなっている。これは T 型接合付近ではカップの光沢によってエッジの一部が不鮮明になっており、L 型接合として解釈されたためと考えられる。この点 は実際にわれわれが原画像を見るとき印象に近い。

5. 透明視画像への適用

本研究の目的のひとつは、透明視知覚に対する T 型接合の役割を検討することである。ここでは、透明視図形に提案モデルを適用した結果を報告する。使用した基本画像の構成は Fig. 6 に示したものと同一である。画像各部の輝度は、0~255 の階調で表現され、暗い垂直のバーは 64, 明るい水平のバーは 192, 中央の正方形部分の輝度は可変とした。背景の輝度は 0, 大きさは 256×256 pixel である。

透明視図形の中央正方形部分の輝度 I_c を 9 段階にし、それぞれに対して本モデルによるシミュレーションを行った (使用したパラメーターは前述のものと同じ)。中央正方形の左上の X 型接合に対する 0° 方向 (右方向) と 270° 方向 (下方向) の T 型接合反応の大きさを、Fig. 16 に示

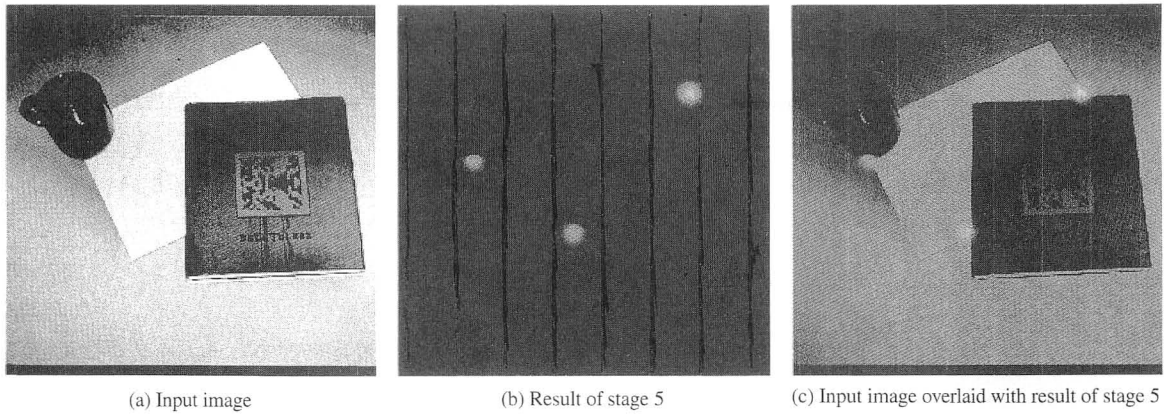


Fig. 15. Simulation results for a natural image. (a) depicts input image. (b) shows result of stage 5. (c) depicts the input image overlaid with result of stage 5.

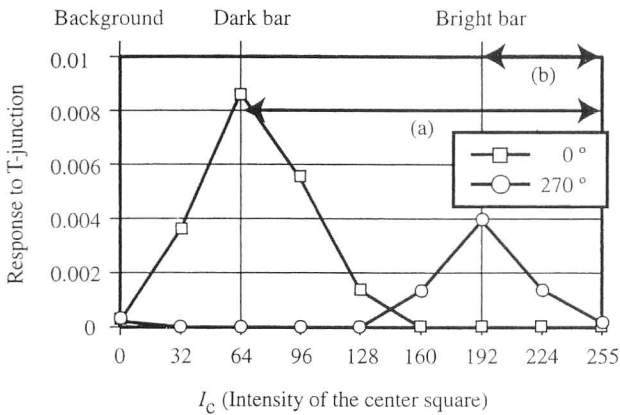


Fig. 16. Response to the left-upper T-junction of the cross transparency image.

す。0°方向の反応は、垂直の暗いバーが手前であることを示し、270°方向の反応は水平の明るいバーが手前であることを示していると解釈できる。Fig. 16から、 I_c が64から192に変化するに従って、0°方向の反応は減少しており、逆に270°方向の反応は増加し、0°方向の反応と270°方向の反応の強弱が逆転している。

透明視の起こる条件については、面の輝度関係に基づくMetelliの透明視条件¹¹⁾が知られている。Fig. 17にMetelliの透明視条件の概要を示す。Fig. 17では、背景AとBの手前にPとQからなる透明の面が存在するように見える。このような透明視が起こるためには、Metelliの透明視条件では、 $(Q-P)/(B-A)$ が0より大きく1より小さくしなければならない。Fig. 16の(a)および(b)は、Metelliの透明視条件において、それぞれ暗いバーが透明に知覚される範囲と明るいバーが透明に知覚される範囲を表している。(a)と(b)の重なる範囲では、Metelliの透明視条件ではどちらのバーが透明に見えるかは規定できない。また、 $I_c=160$ では明るいバーは透明に

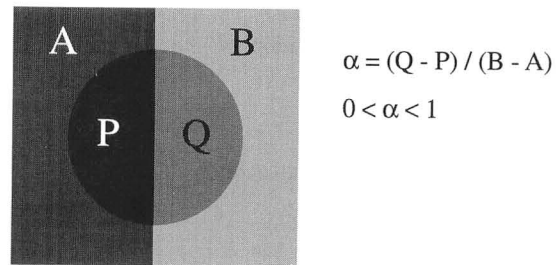


Fig. 17. Metelli's law of transparency perception.

見えないことになる。しかし、Fig. 16に示された結果からは、 I_c が160または224の図は、明るいバーが手前に見えることを示している。

シミュレーションの結果と実際の知覚を比較するために、被験者14名に対して、 $I_c=160$ と $I_c=224$ に対応する図を提示し、暗いバーと明るいバーの前後関係を聞いた(モニター上の輝度53.54 cd/m²が $I_c=255$ に対応)。その結果、前者の場合は4名が、後者の場合は全員が透明な明るいバーが暗いバーの手前に見えること知覚した。これは、 $I_c=224$ の図に関してはFig. 16に示された計算結果と一致する。 $I_c=160$ の図に関しては70%以上の被験者がモデルの予測と逆の応答をしており、Metelliの透明視条件による解釈と一致した。しかし、14名全員が I_c が160付近では、暗いバーと明るいバーの上下関係が判断しにくいと報告した。これは、 $I_c=160$ 付近では0°方向と270°方向の反応がともに弱く、また、その差が小さくなっていることに対応するとも考えられる。

以上の結果から、透明視図形におけるX型接合に対してT型接合検出器が反応し、その結果が透明視知覚に影響を与えている可能性が示された。

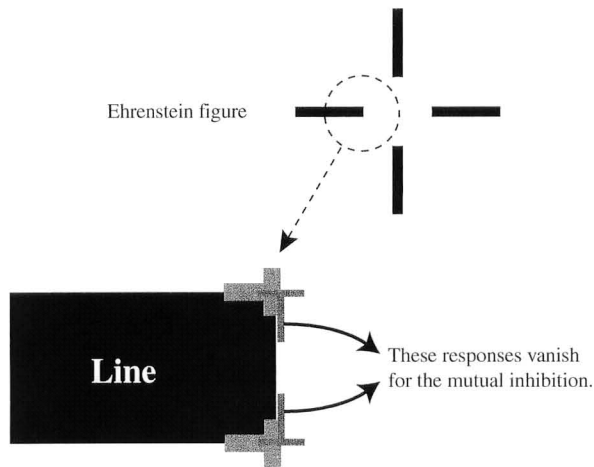


Fig. 18. A possible explanation by the model for occlusion perception of Ehrenstein figure. When a line has a certain width, responses of T-junction detector perpendicular to the orientation of the line vanish. Therefore the remains of responses along the orientation of the line induce the occlusion perception.

6. 視知覚現象と提案モデルの関係

本論文で提案した T 型接合検出のモデルは、透明視の起こる条件に対してひとつの説明を与えることができた。しかし、Fuchs の透明視図形¹²⁾ など X 型接合が存在しなくとも透明視が起こる図形が存在する。また、前述の心理物理学実験において $I_c=160$ の図では計算結果と異なり、Metelli の条件と一致する結果となっている。また、Watanabe と Cavanagh¹³⁾ は X 型接合が存在しなくとも T 型接合のみで透明視知覚が起こることを示した。彼らの仮説は T 型接合が暗黙の X 型接合として働いているというものである。彼らの刺激に対してわれわれのモデルを単純に適用すると、彼らの報告するような前後関係を指示する T 型接合反応は得られない。これらを考えると、T 型接合検出器の反応強度のみで透明視条件を議論することはできない。提案モデルは T 型接合反応が透明視知覚の図形的要因である可能性を示しているが、透明面の知覚そのもののモデルではない。

さらに提案モデルを T 型接合検出器が関与していると思われるモーダル補完知覚をともなう 2 種類の錯視図形、Ehrenstein 図形とカニツアの三角形¹⁴⁾ に適用した。その結果、Ehrenstein 図形における遮蔽感については提案モデルを用いて次のように説明できることがわかった。適当な幅をもつ線図形の端点では、線図形の方向と直交する向かい合った T 型接合反応が相互抑制で消滅することになり、残った端点方向の T 型接合反応が遮蔽感を誘導する (Fig. 18)。線図形が細すぎても太すぎても端点方向の T 型接合反応は弱まり、したがって遮蔽感は弱まること

になるが、これは Leshner と Mingolla の報告¹⁵⁾ と一致する。

一方、提案モデルのカニツア図形に対する適用結果からは、カニツア図形における遮蔽感について説明できる反応は得られなかった。これは、錯視面とパックマン図形の接合点が L 型接合として除去されてしまうためである。カニツア図形や上述の Watanabe と Cavanagh の図形における前後知覚を説明するためには、少なくとも錯視輪郭の生成メカニズムを含めたモデルが必要になると思われる。

7. ま と め

シミュレーションの結果、本論文で提案した T 型接合検出のモデルが、画像中の T 型接合を検出可能であることが確かめられた。また、本モデルの X 型接合に対する反応の強度をみることにより、X 型接合に含まれる T 型接合が透明視を起こす図形的要因となっていることを示唆する結果が得られた。

文 献

- 1) Q. Zaidi, B. Spehar and M. Shy: "Induced effects of backgrounds and foregrounds in three-dimensional configurations: The role of T-junctions," *Perception*, **26** (1997) 395-408.
- 2) F. Heitger, L. Rosenthaler, R. von der Heydt, E. Peterhans and O. Kübler: "Simulation of neural contour mechanisms: From simple to end-stopped cells," *Vision Res.*, **32** (1992) 963-981.
- 3) P. Sajda and L. H. Finkel: "Intermediate-level visual representations and the construction of surface perception," *J. Cognit. Neurosci.*, **7** (1995) 267-291.
- 4) S. Grossberg and E. Mingolla: "Neural dynamics of form perception: Boundary completion, illusory figures, and neon color spreading," *Psychol. Rev.*, **92** (1985) 173-211.
- 5) S. Grossberg and E. Mingolla: "Neural dynamics of perceptual grouping: Textures, boundaries, and emergent segmentations," *Percept. Psychophys.*, **38** (1985) 141-171.
- 6) S. Marčelja: "Mathematical description of the responses of simple cortical cells," *J. Opt. Soc. Am.*, **70** (1980) 1297-1300.
- 7) D. H. Hubel and T. N. Wiesel: "Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex," *J. Physiol. (London)*, **195** (1968) 215-243.
- 8) W. Ehrenstein: "Über abwandlungen der L hermannschen hellkeitserscheinung," *Z. Psychol.*, **150** (1941) 83-91.
- 9) 菊地厚史, 松原和也, 塩入 諭, 矢口博久: "透明視と面の前後関係知覚", 日本視覚学会 2000 年冬季大会, *Vision*, **12** (2000) p. 56.
- 10) E. H. Adelson and J. R. Bergen: "Spatio-temporal energy models for the perception of motion," *J. Opt. Soc. Am. A*, **2** (1985) 284-299.
- 11) F. Metelli: "The perception of transparency," *Sci. Am.*, **230** (1974) 90-98.

- 12) W. Fuchs: "Experimentelle Untersuchungen über das simultane Hintereinandersehen auf derselben Sehrichtung," *Z. Psychol.*, **91** (1923) 145-235.
- 13) T. Watanabe and P. Cavanagh: "Transparent surfaces defined by implicit X junctions," *Vision Res.*, **16** (1993) 2339-2346.
- 14) G. Kanizsa: "Margini quasi-percettivi in campi con stimolazione omogenea," *Riv. Psicol.*, **49** (1955) 7-30.
- 15) G. W. Leshner and E. Mingolla: "The role of edges and line-ends in illusory contour formation," *Vision Res.*, **33** (1993) 2253-2270.