

複雑背景中の主観的輪郭を含む物体輪郭の抽出

小瀬木 正勝 大西 昇 杉江 昇
名古屋大学 工学部
名古屋市千種区不老町

あらまし：人間が輪郭を知覚するのは一般に、物理的的刺激に勾配がある場合である。しかし、このような勾配が存在しない場合でも、ある輪郭を知覚することができる。これを主観的輪郭という。本研究では、主観的輪郭の抽出を試みる。比較的簡単な画像に対する主観的輪郭の生成アルゴリズムはすでに存在するが、より複雑な画像を扱えるように、このアルゴリズムの考え方にに基づき、アルゴリズムを拡張する。複雑な画像としてはシマ模様中のシマウマを対象とし、この拡張したアルゴリズムを適応することによって、われわれが知覚することができる主観的輪郭に近い結果を得た。

キーワード：輪郭抽出、主観的輪郭、物体と背景の分離

Extracting Contours of Object with Subjective Contours on a Complex Background

Masakatsu OZEKI Noboru OHNISHI Noboru SUGIE
School of Engineering, Nagoya University
Huro-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Japan

Abstract: Human being generally perceives contours in the case that physical contrasts exist in the visual field. But in a case without this contrast, human being can perceive some contours, called subjective contours. In this paper, we try extracting the subjective contours. We have already presented an algorithm that generates subjective contours in simple figures. Now, we extend this algorithm so as to apply to more complex figures. Our goal is to extract a zebra on a striped background. By using this extended algorithm, we successfully extract subjective contours, which are similar to those that human being perceives.

key words: contour extraction, subjective contour, separation of figure and ground

1 はじめに

人間をはじめとする生物の視覚系において、数多くの錯視現象が知られている。錯視現象とは、ある視覚刺激が与えられたとき、そこに実際には存在しない形状や色素が知覚されたり、実際とは異なった形状が知覚されたりといった、ある種の視覚における錯覚である。このような錯視現象は实在の視覚イメージとは異なった情報を与えるが、生物にとっての有益な情報処理の結果の現われであると考えられる。

通常、人間が物体の輪郭を知覚するのは、その視野中に明るさ色などの物理的的刺激作用に勾配が存在するためである。しかし、そうした勾配が存在しない場合でも輪郭が知覚されることがある。複数の図形がある規則に従って存在するとき、人間や生物は、そこに実際には輪郭が存在しなくても、ある輪郭を知覚することができる。これを主観的輪郭という。また、これに対して物理的的刺激の勾配が存在する輪郭を物理的輪郭という。本研究では、錯視現象の中でも主観的輪郭に関するものを取り扱うことにする。

主観的輪郭は、輪郭を知覚するのに必要な物理的刺激的勾配などの条件が存在しなくても、視覚系によって補われて生じるので、通常の視覚系の知覚モデルでは、なぜ主観的輪郭が生じるのか説明することはできず、そのため、画像処理の分野で、頻繁に用いられる微分オペレータなどの数学的な手法によっても、抽出することはできない。従って、視覚情報処理のメカニズムを解明するにあたって、主観的輪郭の生成過程のモデルの研究は重要である。

主観的輪郭については、心理学の分野で研究が行なわれており、主観的輪郭を知覚できる図形や、主観的輪郭の性質などの報告がある [1]。主観的輪郭の最もよい例としては、図 1 に示す Kanizsa's Triangle が知られている。この図全体を眺めたとき、3つの黒い円と黒い輪郭線を持つ下向きの三角形の上に、不透明な白い三角形が重なっているように、我々にははっきりと区別して知覚できる。しかし、この白い不透明な三角形と背景の白とは全く同質のものであり、物理的刺激的勾配は存在しない。このように、我々人間は物理的刺激的勾配の存在しない領域に実際には存在しない輪郭をも知覚している。

Kanizsa's Triangle のような比較的簡単な図形を対象として、主観的輪郭の通る点を抽出し、それらの点を組み合わせて、主観的輪郭を自動的に生成するアルゴリズムはすでに提案されている [2]。本研究では、このアルゴリズムの考え方に基づいて、より複雑な画像を扱えるように、そのアルゴリズムを拡張する。具体的には、図 2 のようなシマ模様中のシマウマの絵 [3] を用いて、主観的輪郭の抽出及び物体の抽出を試みる。

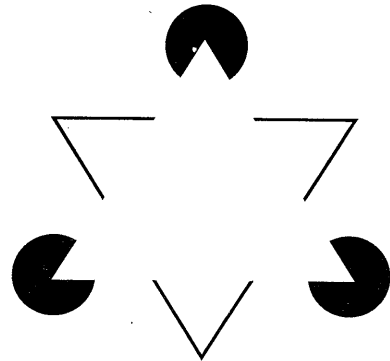


図 1 : Kanizsa's Triangle

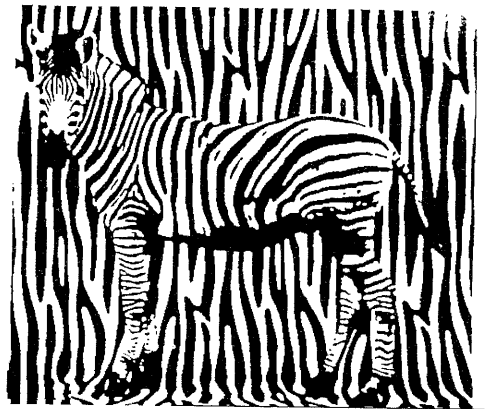


図 2 : シマ模様中のシマウマ

2 主観的輪郭の知覚

存在しない輪郭が何故知覚できるのかということについて、様々な説明がなされているが、その中でも、Kanizsa が述べている、図形的要素の完結化による層構造 (重なり) の知覚という考え方は興味深い。

Kanizsa は主観的輪郭の形成には、ある一部分が欠損した図形の存在があり、それが完結すれば、より単純な

図形となるべきものであると説明している。図1において黒い扇形と線分は欠損図形であり、その欠損部分が視覚系の作用により完結化され、白い不透明な三角形が知覚されるといえる。

同様に、図3のようなシマ模様の面と面が重なり合う場合には、数多くのシマの一部がその面の境界部分を作っており、それらが視覚系の作用により完結化されることによって、一つの主観的な輪郭線をもつ面を知覚できると考えられる。

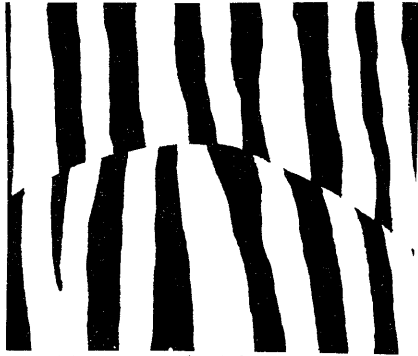


図3：シマの重なり部分

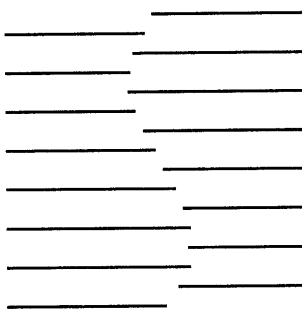


図4：線分による主観的輪郭の例

2.1 主観的輪郭の通る点と伸びる方向

物理的の異なる2つの面が重なり合うとき、その境界には必ず刺激の勾配が存在する。そのため、人間はその部分に輪郭線を知覚する。しかし、図3のように本研究で扱うようなシマ模様の面と面が重なり合う場合には、その境界において、物理的の刺激の勾配が存在しない部分があるのである。このとき、シマの頂点は主観的輪郭の通る可能性が非常に高い。このことから、頂点を主観的輪郭が通る点の候補とする。

また、このような点において、主観的輪郭の伸びる方向はどのように決定されるべきであろうか。シマの頂点の近傍は主観的輪郭をもつ物体の一部分を形成している。従って、頂点において主観的輪郭は、その接線方向に伸びると考えることができる。

更に、図4のように線分が重なり合うことによって生じる主観的輪郭は、線分に対して垂直に端点から伸びると考えられる。これと同様に、頂点の角度が非常に小さい時には、主観的輪郭は頂点に対して垂直に伸びると言える。

以上のことから、頂点において、主観的輪郭が伸びると思われる方向を表す矢印を設定することができる。頂点の角度が小さい時にはその垂直方向に、それ以外では、その接線方向に矢印を設定する。

2.2 局所的に物体と背景の区別はできるのか？

図3に示すように局所的にシマ模様を見た場合、2つのシマが重なり合う部分では上下どちらのシマ模様が物体でどちらが背景であるのかという解釈はできない。つまり、上のシマ模様が物体であるという解釈から得られる主観的輪郭が1つと、下のシマ模様が物体であるという解釈から得られる主観的輪郭が1つとの2通りが考えられる。よって、シマが重なり合う部分では、双方の解釈を表す主観的輪郭が2本存在すると考えられる。

2.3 物体と背景の分離

図2の全体を眺めたとき、人間にはシマ模様の背景の手前に、シマウマが立っていると知覚できる。つまり、人間は物体(図)と背景(地)の分離を行なっている。

人間はボトムアップ的な方法とトップダウン的な方法との双方を用いて、物体の認識を行なっていると考えられる。ボトムアップとは、data driven と呼ばれ、局所的な情報による部分処理から、一連の処理段階を全体へとたどり認識に到達する。逆に、トップダウンは、model driven と呼ばれ、モデルについての知識を用いてシーン中の物体を特定する。

人間は、まず最初にボトムアップによって、大まかな輪郭線を抽出し、その後、トップダウンによってシマウマという知識を用いて、物体を認識し、背景との分離を行なっていると考えられる。

本研究では、主にボトムアップ的な手法により、主観的輪郭の抽出を試みる。

3 生成アルゴリズム

本研究での主観的輪郭の生成アルゴリズムの概要を図に示す。

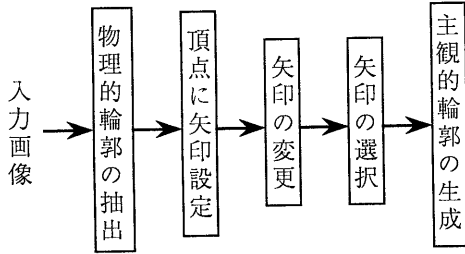


図5：アルゴリズムの概要

3.1 物理的輪郭の抽出

濃淡値を持つ入力画像に大津のしきい値 [4] により二値化処理を施した後に、境界線追跡により物理的輪郭を抽出する。そして、黒い部分が右側にあるように抽出された物理的輪郭線に方向のラベルを付ける。

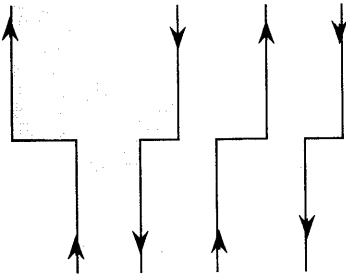


図6：物理的輪郭線のラベル

3.2 主観的輪郭の通る点の抽出

2.1 で述べた物理的輪郭線上の頂点を抽出する。抽出した物理的輪郭線上の点列を $P_i (i = 0, 1, \dots, n)$ とし、すべての点 P_i に対して $P_i P_{i-5}$ と $P_i P_{i+5}$ とのなす角 θ_i を次式により求める。

$$\theta_i = \arccos \left(\frac{\overrightarrow{P_i P_{i-5}} \cdot \overrightarrow{P_i P_{i+5}}}{|\overrightarrow{P_i P_{i-5}}| \cdot |\overrightarrow{P_i P_{i+5}}|} \right)$$

得られた θ_i の値をしきい値 θ_{th} と比較して、しきい値 θ_{th} よりも角度が小さくなったら、その θ_i の近傍において角度が最小になる点、すなわち曲率が急変する点を頂点とする。ここで、物理的輪郭線上の i 番目の点に対して、 $i+5, i-5$ 番目の点を用いて頂点を求めているが、これは経験的に定めた仮の値である。

3.3 矢印の設定

前節で抽出された頂点において主観的輪郭が伸びると思われる方向を表す矢印を図7 (a) のように設定する。矢印はその向きが頂点において、物理的輪郭線にラベル付けされた方向に一致するよう、接線方向に2本設定される。矢印は頂点から伸びる主観的輪郭の方向と、その右側に物体が存在する可能性を表している。

3.4 矢印の変更

前節の矢印の設定では、シマが重なり合う部分と角度の小さい頂点において、矢印の意味に合わない場合があることから矢印の向きを変更する。

3.4.1 シマが重なり合う部分での変更

2.2 で述べたように、シマが重なり合う部分では、どちらのシマが物体でどちらのシマが背景であるか決定することはできないので、2本の主観的輪郭が考えられる。しかし、図7 (a) のような前節の矢印の設定では、主観的輪郭の伸びる方向とその右側に物体の存在を意味する矢印の性質に合わない。

ここで、図7 (b) のように境界部分でシマ模様を分けて考える。このとき分割されたシマ模様の物理的輪郭線には、図中のようにラベル付けされる。更に、上のシマ模様が物体であるという解釈により生じる主観的輪郭は、頂点 V_n, V_l, V_j, V_g を順に結んだものであり、下のシマ模様が物体であるという解釈により生じる主観的輪郭は、頂点 V_h, V_i, V_k, V_m を順に結んだものであることを考えれば、矢印は図中のように設定されるべきである。

よって、図7 (b) の矢印の向きを基に、図7 (a) の前節で設定された矢印の向きをを図7 (c) のように変更する。

変更の手順は以下のように行なう。

Step.1 変更の候補となる凹頂点を見つける。

Step.2 見つけた凹頂点から物理的輪郭線に付けられたラベルの進行方向にある隣の頂点がある距離 D 以内にあるならば、その凹頂点で輪郭線に沿って設定された矢印を反転させる。

距離 D 以内でなければ、ラベルの逆方向にある隣の頂点がある距離 D 以内にあるならば、頂点から飛び出すように設定された矢印を反転させる。

また、いずれの場合でもなければ、変更はしない。

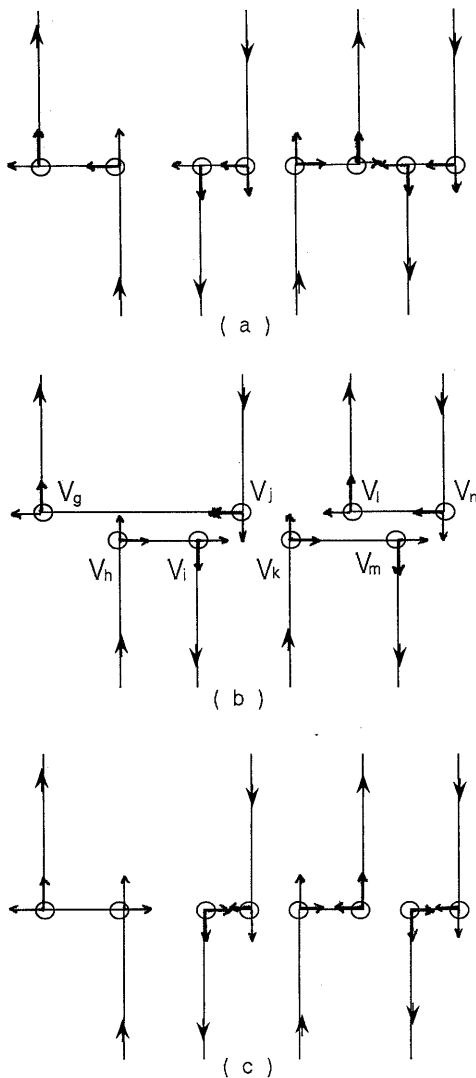


図7：シマの重なり合う部分での矢印変更

この矢印の変更の手順を、図8で簡単に例をあげて説明する。

図8 (a)において、 V_q, V_r が凹頂点である。頂点 V_q は、物理的輪郭線に付けられたラベルの進行方向に V_q に最も近い頂点 V_p が、距離 D 以内にある。よって、頂点 V_q において、物理的輪郭線に沿って設定された矢印 S_m を反転させ、図8 (b)の矢印 S'_m のように改めて設定する。

また、頂点 V_r ではラベルの進行方向に、距離 D 以内に最も近い頂点はない。しかし、ラベルの逆方向には、 V_r

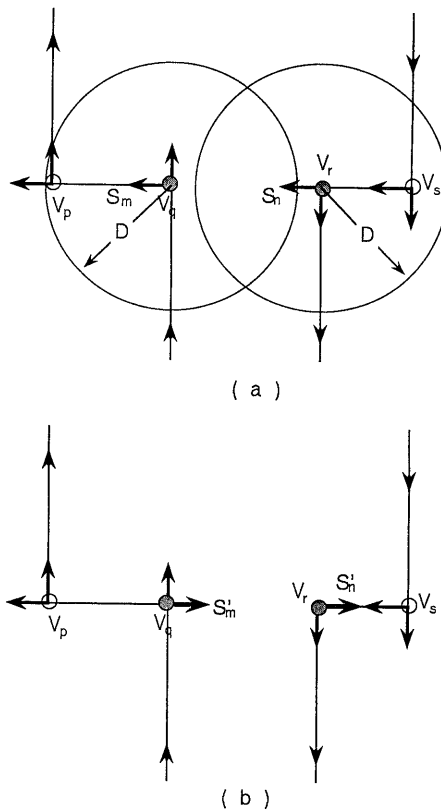


図8：矢印変更の例

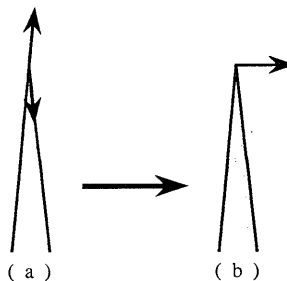


図9：角度が小さい頂点での矢印変更

に最も近い頂点 V_r が、距離 D 以内にあるので、頂点 V_r から飛び出すように設定されている矢印 S_n を反転させ、図 8 (b) の矢印 S'_n のように改めて設定する。

3.4.2 角度が小さい頂点での変更

2.1 節で述べたように、角度の小さな頂点では、主観的輪郭はその頂点の接線方向よりもむしろ頂点に対して垂直に伸びることが多い。よって頂点の角度がある角度よりも小さい時、図 9 (a) から図 9 (b) のように矢印を頂点に対して垂直に設定し直す。

3.5 矢印の選択

設定した矢印を利用して、同一の主観的輪郭が通ると思われる点の組合せを決定する。

体制化のゲシュタルト法則における近接性と類同性を考慮に入れ、次のような評価関数を定義する。

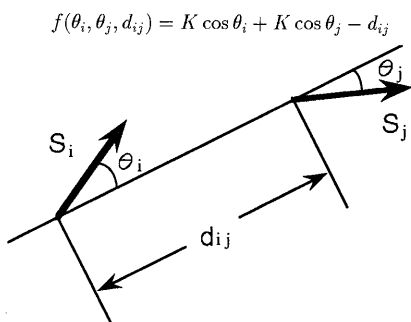


図 10：評価関数の計算

ここで、 d_{ij} は矢印 S_i と矢印 S_j との間の距離、 θ_i, θ_j はそれぞれ矢印 S_i, S_j が距離方向 (i から j の向き) とのなす角、 K は定数である。

この関数はある矢印 S_i に対して他の矢印 $S_j (i \neq j)$ との間で、距離がより近く、かつ、矢印の方向 (主観的輪郭が伸びると考えられる方向) がより似たものを見つけるためのものである。また、定数 K の値を大きくすると、より矢印の方向の似たものを選択し、小さくするとより距離の近い矢印を選択することができる。

ある矢印 S_i についてこの関数値が最大となる矢印 S_j を求め、矢印の組とする。ただし、関数値が小さくなり過ぎる場合は組となる矢印が存在しないものとしている。

3.6 主観的輪郭の生成

得られた矢印のリストが、主観的輪郭が通る点のリストとなる。各矢印間は滑らかな曲線であると考えられるので、矢印の起点をサンプル点として 3 次スプライン補間を行なうことによって、主観的輪郭を生成する。

4 実験結果

主観的輪郭が知覚される画像に対して、3 章で述べた主観的輪郭の生成アルゴリズムを用いて実行した。入力画像は 640×480 画素、256 階調のものを、CCD カメラより取り込んだ。使用した言語は C 言語である。

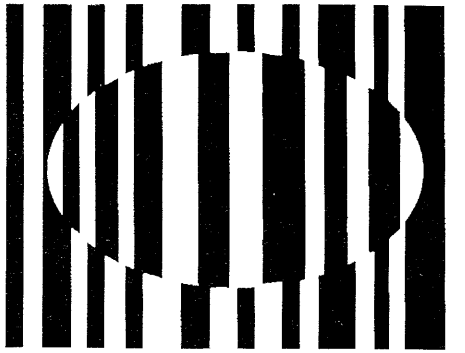
シマ模様をもつ比較的簡単な画像と、シマウマの画像に対する結果をそれぞれ図 11、図 12 に示す。ここで、頂点の抽出に用いた角度のしきい値 θ_{th} は、130 度とした。矢印の選択に用いた関数の定数 K は $K = 100$ とし、関数値が 80 以下の場合には、矢印の組合せはないものとしている。

5 考察

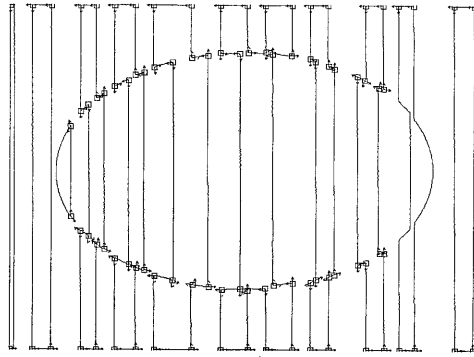
図 11 のスプライン補間の結果は、われわれが知覚できる主観的輪郭とほぼ同じである。この図において、楕円形が物体であることを表す輪郭線 (図 11 (c)) と、背景が物体であることを表す輪郭線 (図 11 (d)) とが出力されている。人間は閉じた領域を物体とみる傾向があることから、どちらが物体であるかという判断においては、物理的輪郭と生成された主観的輪郭とによって、閉領域をなす方を物体とすべきであろう。

図 12 のような複雑な画像では、矢印の変更において、すべてのシマ模様を持つ画像の矢印に対して、常に正しく変更されるわけではない。より複雑なシマ模様を持つために、変更されない、または、間違っ変更されてしまう矢印もある。

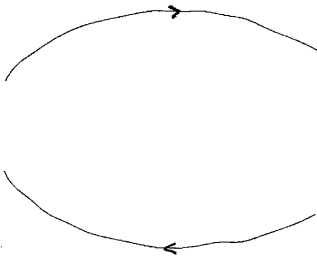
更に、スプライン補間の結果では、われわれが知覚するものと同じような輪郭線と、そうでない不適当な輪郭線が抽出された。また、抽出されるべき輪郭線すべてが抽出されていない。この理由としては、ある矢印に対して他の矢印を選ぶ時、その 2 つの矢印の間には何も物体がないとして組合せを選んでいるが、実際には、その間に物体やシマ模様が存在する場合がある。物体輪郭の



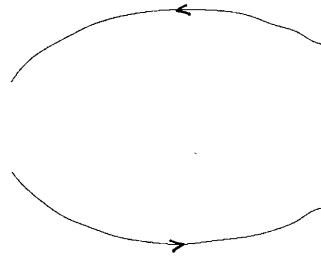
(a)



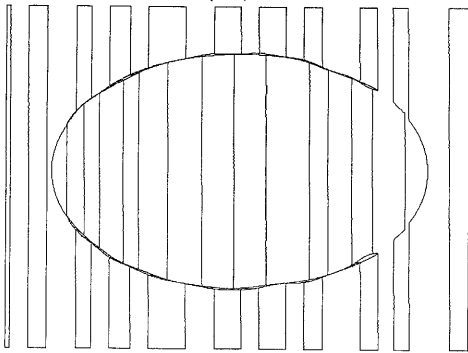
(b)



(c)

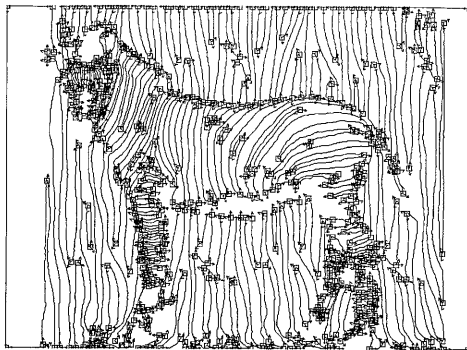


(d)

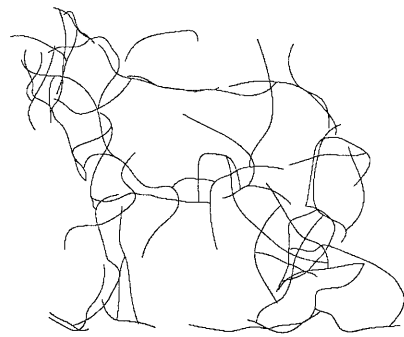


(e)

図11 : (a)二値画像 (b)頂点に設定された矢印(変更後)
(c)楕円形のシマ模様の部分が物体であることを表す輪郭線 (d)背景のシマ模様が物体であることを表す輪郭線 (e)物理的輪郭と抽出された輪郭線(c),(d)



(a)



(b)

図12 : (a) 頂点に設定された矢印 (変更後) . (b) スプライン補間の結果.

抽出には、このような情報を利用し、矢印の組合せを選択するような手法が必要であると考え。

6 おわりに

本研究では、すでに発表されている主観的輪郭の生成機構のモデル化による生成アルゴリズムを、矢印の変更を行なうことによって拡張し、より複雑な背景と物体をもつ画像に対して実験を行なった。このアルゴリズムをC言語で作成し、実行した結果、比較的規則正しいシマ模様をもつ画像については、良い出力を得た。更に、図12のシマウマの画像においては、不適当な輪郭線が抽出されてはいるが、シマウマのおおまかな輪郭線を抽出することができた。

矢印の選択において、2つの矢印の組合せのみを考慮し、簡単な関数を定義することによって、主観的輪郭の通る点を決定したが、このような手法は、あまりにも局所的であるといえる。図的要素が完結化される時に、主観的輪郭が知覚できることを考えれば、2つの矢印の組合せよりも、より多くの矢印を一度に考えて、処理していく方がより良いと思われる。

更に、主観的輪郭の性質を考えたとき、主観的輪郭は1つの閉領域を作り、2本の主観的輪郭どうしが交わることはない。このような性質を利用し、抽出されてしまった不適当な輪郭線を削除するといった方法も良いのではないかと考える。

また、2.3節で述べたように、人間は物体の抽出において、ボトムアップとトップダウンとの双方の手法を用いている。人間は知識として多くのモデルを持っており、その中の1つをマッチングさせることによって、物体を認識し物体と背景との分離を行なっていると考えられる。図2の全体を眺めるとき、われわれは知識として、シマウマというモデルを持っており、そのモデルとボトムアップによって抽出されたおおまかな輪郭線とを、マッチングさせることによって、より明確にシマウマを知覚している。従って、図2のような複雑な画像における物体と背景の分離には、トップダウン的な手法が不可欠であると思われる。

最後に、本研究について有益な御助言を頂いた研究室の皆様に謝意を表する。

参考文献

- [1] G. Kanizsa: "Subjective contours", Scientific American, pp.48-52 (April 1976)
- [2] 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", 電子情報通信学会論文誌 D-II Vol.J73-D-II No.6 pp.906-913 (June 1990)
- [3] Andrew Blake and Tom Troscianko: "AI and the eye", p.61, John Wiley and Sons, Chichester (1990)
- [4] N. Otsu: "A Threshold Selection Method from Grey-Level Histograms", IEEE Transaction on System, and Cybernetics, SMC-9(1979), pp.62-66