

奥行き情報を用いた主観的輪郭生成のための アルゴリズムと視覚機構

山下 洋史 倉田 是
千葉大学 工学部

あらまし 本報告では、遮蔽輪郭からもたらされる奥行き情報をもとに、主観的輪郭を生成するアルゴリズムの提案をおこなう。主観的輪郭生成過程を単眼立体視と関係づけているため、この過程は不良設定問題となる。そのため、主観的輪郭生成のための五つのアプリアリな仮定を設け、画像上のどの特徴点から主観的輪郭がどの方向へ延びていくかを決定する。仮定は、奥行きの不連続を画像上から求めるものであり、そこから得られた奥行きの不連続に関する情報に矛盾が生じたとき、それを解消するために主観的輪郭がひかれる。また、この五つの仮定は、画像上に局所的にはたらくので得られた主観的輪郭も局所的なものとなる。なお、局所的な輪郭を補間する機構が次に行われていると仮定しているが、本稿では論及しない。

An Algorithm and visual system for generating subjective contours from information of an apparent depth

Hirofumi YAMASHITA Tadashi KURATA
Chiba University

abstract We suggest that the algorithm to generate subjective contours from information of an apparent depth which is brought by occluding contours. The process to generate subjective contours is ill-posed since the process relate to monocularistic stereopsys. So we present five assumptions for generating subjective contour, and determine that subjective contours generate from which feature point to which orientation. The assumptions are for detecting discontinue of apparent depth, and when conflict with some assumptions then subjective contours is generated for conflickion. And besides, this five assumption work local, so subjective contours to be generated is local. then,next stage will be the process filling in the gaps.

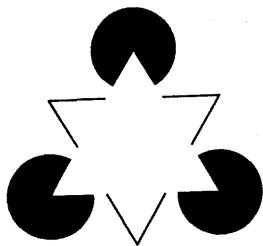


図1: 主観的輪郭の例: Kanizsaの三角形

1 はじめに

主観的輪郭に対する学術的興味は心理学分野から始まる。F.Schumannは[1]は物理的には同じ状態にあるにもかかわらず輪郭が見えることを発見した。

その後、主観的輪郭に関するいくつかの現象が見いだされており[2][3][4][5][6][7]、それらについて説明もいくつかなされている[2][3][4][5][6][7][8]。

神経生理学的には、主観的輪郭に反応する細胞が視覚前野で見つかっており、また、それを実現するための神経回路モデルも提案されている[9][10][11][12]。

しかし、主観的輪郭生成とは何なのか、何を計算するのかといった、計算論的な議論が十分されておらず、そのために、主観的輪郭生成のためのアルゴリズムが理解されない。そのため、神経生理学者から提案された神経回路モデルはロバストではなく、心理学者から提案された仮説は抽象的で定式化できず、従って、情報処理系としての視覚を解明できない。

本報告では、主観的輪郭が生成されるための計算理論を展開する。主観的輪郭が生成されるには何をどのように計算し、どのように表現するのかの明確な定義をおこない、特に主観的輪郭は必ず奥行き知覚を伴い、また、主観的面の遮蔽輪郭となることから、生体の視覚系における奥行き知覚とあわせて理論を展開していく。そして、その計算を可能にするアルゴリズムの提案を行う。生体の脳において実現可能になるように、アルゴリズムとしては局所的並列アルゴリズムを採用する。局所的並列アルゴリズムで主観的輪郭生成機構が表現できればそれは神経回路モデルとしてハードウェア化しやすくなる。設計された神経回路モデルは以前に提案さ

れた神経回路モデルと違い、計算理論が明確であるためさまざまな主観的輪郭を生成する図形に対応し、また、ハード的にもソフト的にも効率の良いシステムとなる。また、モデルの限界についても正確に論じられるだろう。

まず、本報告の主観的輪郭生成のためのおおまかな処理過程について述べる。

Marr[13]によれば、初期視覚の最終段階で $2\frac{1}{2}$ 次元スケッチが完成する。 $2\frac{1}{2}$ 次元スケッチでは、可視表面における奥行きを含めた記述が視野全体において矛盾なくおこなわれなければならない。参照)矛盾を解消するために主観的輪郭の挿入が必要ならおこなわれる。しかし、 $2\frac{1}{2}$ 次元スケッチは観察者中心の局所的な記述であるため、主観的輪郭は局所的なものとなる。次に、この局所的な主観的輪郭をつなぐ機構が働く。これは、局所的に発生した主観的輪郭を最小曲率になるようにつないでいく。最後に、図形認知機構が働き、主観的輪郭の生成が、幾何学的規則性や幾何学的完結化を満たすかどうかをチェックする。

以上をまとめると、主観的輪郭には3つの段階がある。それは、

1. $2\frac{1}{2}$ 次元スケッチの際に発生する局所的な主観的輪郭
2. 局所主観的輪郭を補間することによって生じる主観的輪郭
3. 図形認知の段階をクリアした最終的な主観的輪郭

である。本報告では、この3つの段階のうち、第1段階と第2段階について考察する。その理由

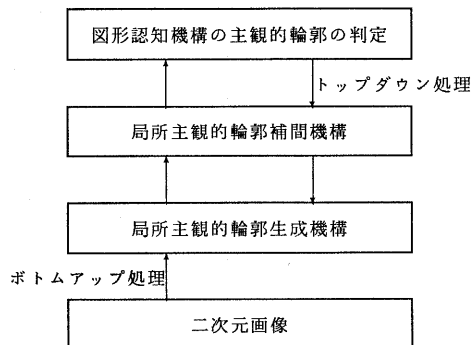


図2: 主観的輪郭生成の視覚機構

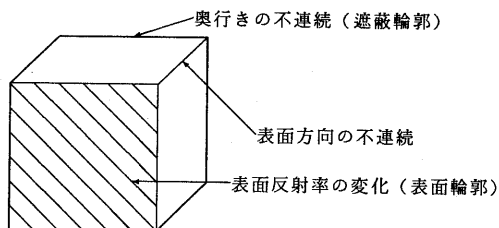


図 3: 物理的輪郭の基本要因

として、第 1 段階と第 2 段階までは、与えられた入力画像のみから主観的輪郭が決定できるからである。過去の経験や図形認知などのトップダウン的情報を用いなくてよい。すなわち、この段階までは、単純に視覚系のみの問題となるからである。

つまり、[9][10][11][12]に発見したV2野上の主観的輪郭に反応する細胞はこの第 1 段階、第 2 段階の主観的輪郭に反応するものであり、第 3 段階ではないと考えられる。

2 物理的輪郭

主観的輪郭について考える前に、物理的輪郭について述べる必要がある。通常、3次元世界では次の 4 つの基本要因により輪郭が発生する[13]。

- 奥行きの不連続
- 表面方向の不連続
- 表面反射率の変化
- 影、光点、輝点などの照明効果

これらの基本要因によって、2次元画像上に物理的の刺激作用の勾配をともなって輪郭は発生する。3次元世界が2次元画像に投影されてできた輪郭は、従って、すべて3次元形状の情報をもたらすことになる。生体の視覚系には、輪郭から3次元形状を復元することができるのである[13]。ただし、念のため申しそえると、これには高度の認知過程も必要である。

輪郭は、表面上で多くの方法によって規定することが可能である。また、それらは初期視覚の段階で検出される。本論文では、輪郭を 3 つのカテゴリーに分類して考える。3 つの分類とは、

1. 観察者から表面までの奥行きの不連続によって生じる輪郭 (遮蔽輪郭)
2. 表面方向の不連続に伴う輪郭
3. 表面上に物理的に存在する輪郭 (表面輪郭)

である。輪郭についての重要な点は、輪郭から生体の視覚系は3次元形状に関する情報を得ることが可能であり、また実際にそのように得ているということである。

本報告で扱う物理的輪郭は、このうち遮蔽輪郭である。主観的輪郭を生成する図形は、遮蔽輪郭しか与えられていないと仮定するのである。一般的に生物は奥行き知覚が生活上重要であり、単眼視を主とする脊椎動物も多いことであるから、遮蔽輪郭が何らかの奥行き情報を提供すると考えることができる。次節以下に遮蔽輪郭によってもたらされる奥行き情報について考察していく。

3 奥行き場と奥行き場の発生要因

遮蔽輪郭によってもたらされる情報は、奥行きの不連続に関する情報である。2 $\frac{1}{2}$ 次元スケッチでは、奥行き、表面方向、表面の不連続の情報を扱っているが、主観的輪郭を発生させる図形は4.1節で後述するように、遮蔽輪郭のみを持っており、表面の不連続の情報の中でも、奥行きの不連続に関する情報のみが図形から得られる情報となる。本節では2次元画像上の奥行きの不連続に関する情報のみを考え、それを奥行き場¹と呼ぶ。

奥行き場は、局所的な奥行きの不連続を表す表現素で構成され、その表現素は奥行きが上の部分から下の部分へ遮蔽輪郭に垂直に向くベクトルで定義する。今、2次元画像上に遮蔽輪郭だけで図形が構成されていると仮定し、その画像上にどのように奥行き場が発生するかを考えてみる。この問題も不良設定であるのでアプリオリな仮定が必要となる。この仮定を奥行き場の発生要因と呼び、三つあると考えられる。

1. 対象となる図形の遮蔽輪郭が他の対象と共通の部分を持たず閉曲線となっているとき、

¹正確には、奥行き不連続場とした方がよいが、ここでは遮蔽輪郭のみしか扱わず、奥行き情報は不連続に関するもののみで連続的に変化する奥行き情報は扱わないので、奥行き場と呼んでもかまわない。

閉曲線の内側近傍から、外側近傍に向かって奥行き場が発生する。

2. 対象となる図形の遮蔽輪郭の内部では、奥行き場は発生しない。
3. 二つの対象が、部分的に共通のエッジを持ちかつその端においてどちらかの対象のエッジの方向成分が不連続であるとき、通常二つの対象は重なっていると考えられ、共通のエッジにおいて奥行き場の不連続が生じる。

一番目の仮定が意味することは、図形が独立に存在しているとき、その遮蔽輪郭で囲まれた領域が図であり、その外側が地である見る傾向があるということである。二番目の仮定は、遮蔽輪郭の情報だけしか与えられていない図形において、その遮蔽輪郭の内部には何も情報を持たないことから、奥行き場が発生しないことを述べている²。三番目の仮定は、最も重要である。自然界においては、二つの物体に共通のエッジが存在するときには、平面的にぴったり2つのエッジが合わさっているのではなく、どちらかがどちらかの上に重なっているのだと見るということである。

今、画像上に二つの物体があり、それが共通のエッジをもちかつその両端において片方の物体のエッジの方向が不連続であるとき、上の仮定より奥行き場が生じるわけであるが、具体的にどのようにその奥行き場が決定されるかを以下に示し、奥行き場決定条件と呼ぶ。

奥行き場決定条件

共通エッジの両端部分においてエッジの方向成分が連続である対象が上に、不連続である対象が下に重なっている。

この条件は Marr[13] の不連続点の連続性の仮定³を拡張したものと考えられる。図4に奥行き場の発生状態を示す。

この奥行き場決定条件により主観的輪郭が発生しないような図形に関しては奥行き場を一意的に求めることができる。例えば、図5(a)の場合

²遮蔽輪郭の内部にさらに他の輪郭(表面方向の不連続を表す輪郭や表面輪郭)があれば、奥行き場が発生する可能性はある。

³D.Marr不連続点の連続性の仮定
The loci of discontinuities in depth or in surface orientation are smooth almost everywhere.

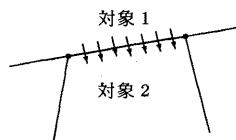


図4: 奥行き場発生例

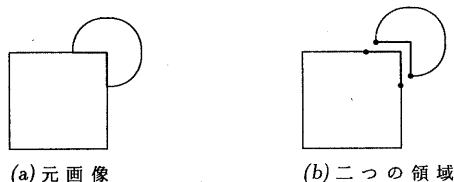


図5: 遮蔽輪郭によって分けられた二つの物体

を考えてみる。遮蔽輪郭により、2つの物体が図5(b)のように分けられる。

太い線の部分が共通輪郭である。また、マークされた点が共通輪郭の両端である。四角形の方はこの点において輪郭の方向成分が連続である。バックマン図形の方は、この点において不連続である。よって、四角形の方がバックマンよりも上にあるような奥行き場が発生する(図6)。

これから、バックマン図形は四角形の下にあり、図が重なっていることを知覚する。ただし、バックマン図形の重なって見えない部分がどのような形であるのかは、この段階では知ることができない。我々は四角形の下に円があると予想するが、この予想する機構は視覚系の上位のレベルにあると考えられ、本論文の取り扱う範囲外である。

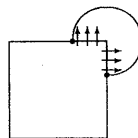


図6: 共通輪郭を持つ二つの物体の奥行き場の発生状態

4 主観的輪郭と奥行き場

4.1 主観的輪郭の発生過程の位置づけ

主観的輪郭が発生する図形においてどの位置に主観的輪郭が発生したのかを調べてみると、ある一つの共通した部分があることがわかる。それは、主観的輪郭が必ず可視表面の遮蔽輪郭となっていることである。前述のように、主観的輪郭は見えない部分の輪郭を決して補間するものではない。図1を見たとき、黒い3つの折れ線が主観的表面の下で三角形をなしているだろうと我々は予測するが、しかし、そこに主観的輪郭が引かれることはない。同様に、図5(a)においても、下に隠れている円の欠けた部分が主観的輪郭となって現れることはない。

このことは、主観的輪郭が生成される過程が、比較的視覚の初期の段階にあるであろうことを指し示すものであると考えられる。それは、可視表面であれば画像データのみからトップダウンの情報を用いること無しにボトムアップ的に処理することができるからである。また、主観的輪郭が見えるとき、その図形は3次元変位をもって見えることから、主観的輪郭が

2次元画像⇒3次元世界の構築

の際に発生、あるいはこれにより上記変換ができることを考えることができる。Marr[13]が提唱した $2\frac{1}{2}$ 次元スケッチは、初期視覚での可視表面についての3次元的なスケッチであるのでこの場合非常に適している。また、逆に主観的輪郭は $2\frac{1}{2}$ 次元スケッチが生体の視覚系に存在することを心理物理学的に指し示していると考えられる。よって、本論文では主観的輪郭が $2\frac{1}{2}$ 次元スケッチを構築する際奥行き不連続であるがそこに物理的輪郭が存在しない場合に補充されてできるものであると位置づける。

4.2 $2\frac{1}{2}$ 次元スケッチと奥行き場の主観的輪郭への適用

3で述べた奥行き場決定条件は、主観的輪郭を発生させるような図形について、我々が実際に主観的に知覚するような奥行き場を発生させることはできない。それは、例えば図1を見たとき、一つ一つの図形は独立に存在しているので、それぞれの図形のまわりは全て背景であるように

奥行き場が発生してしまい、バックマン図形の口の部分が上であるといった主観的輪郭を生成するような奥行き場を形成することができないからである。このことは、3で述べた三つの仮定では不完全であり、我々の視覚系においてまだ他にも制約条件となるアプリアリな仮定が存在することを示すものである。

つけ加えるべき仮定とは次のものであると考えられる。

4. 方向の不連続点(図形の特徴点)において、凸形になる側を上、凹形になる側を下となるように特徴点近傍に奥行き場が形成される。
5. 輪郭の方向が連続である区間では、その輪郭によって分けられる領域の奥行き関係は同じである。

4の仮定は、物体の遮蔽輪郭は閉曲線となるため、方向の不連続点においては凸型になりやすいことを示す。従って、輪郭によって区切られた領域の凸の方が局所的に図であり、凹の方が局所的に地であることをこの仮定で述べている。当然、凹の方が図であることも考えられるが、その確率は低く局所的に最初に発生する奥行き場ではその可能性を無視する。そのあと、凸の方を図にすることによって矛盾が生じるならば $2\frac{1}{2}$ 次元スケッチや図形認知の段階で奥行き場は書き直される。

5の仮定は輪郭の方向が連続である区間では、その輪郭によって区切られた領域の図と地の関係がかわらないことを示す。主観的輪郭を生成する図形に対して我々の視覚系と同じような奥行き場を形成するためのアプリアリな仮定をここにまとめておく。

奥行き場を形成するための仮定

1. 輪郭が途中で枝分かかれず、一本の閉曲線となりその閉曲線が方向の不連続点を持たないとき、閉曲線の内側近傍から外側近傍に向かって奥行き場が発生する。
2. 閉曲線の内部では奥行き場は発生しない。
3. 輪郭 Γ が点 P で輪郭 Γ_1 と輪郭 Γ_2 に枝分かかれ、輪郭 Γ_1 の方向が点 P において不連続であるとき、枝分かれする前の部分で輪郭 Γ_2 から輪郭 Γ_1 の向きに奥行き場が形成される。

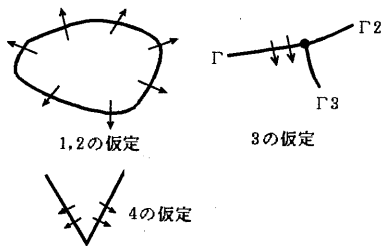


図7: 奥行き場の形成の様子

4. 輪郭の方向不連続点の近傍において、凸から凹の向きに奥行き場が形成される。
5. 輪郭の方向連続区間において、奥行き場の向きは不変である。

4.3 局所主観的輪郭発生機構

4.2節で示した5つの仮定より局所主観的輪郭⁴発生のためのアルゴリズムを述べる。

主観的輪郭が引かれるための規則は奥行き場を形成するための仮定より次のように決められる。

線分の両端の奥行き場の向きが一致しなかった場合、奥行き場に矛盾が生じるとし、奥行き場に矛盾が生じなかった線分を良線分、矛盾が生じた不良線分と名付けると、

- (i) 方向の不連続点 P の両側が良線分である場合、 P に主観的輪郭は引かれない。
- (ii) 方向の不連続点 P の両側が不良線分である場合、 P に主観的輪郭は引かれない。
- (iii) 方向の不連続点 P の片側が良線分でもう一方が不良線分である場合、不良線分を延長する形で P から主観的輪郭が引かれる。

今、閉曲線 Γ によって、画像が二つの領域 D と E に分けられ、また方向の不連続点 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{n-1}, P_n$ が Γ 上に存在すると仮定すると、 $P_i (1 < i < n)$ で、(i) となる場合は、領域 $D(E)$ から見た凹凸関係が P_{i-1}, P_i, P_{i+1} で同じである。(ii) となる場合は、領域 $D(E)$ から見た凹凸関係が P_{i-1}, P_{i+1} が同じで P_i と異なる。(iii) となる場合は、領域 $D(E)$ から見た凹凸関係が P_{i-1}, P_i で同じで P_{i+1} で異なる

⁴通常の主観的輪郭に対して、ここでは方向の不連続点近傍に局所的に発生する主観的輪郭であることを明示するため、局所主観的輪郭と呼ぶことにする。

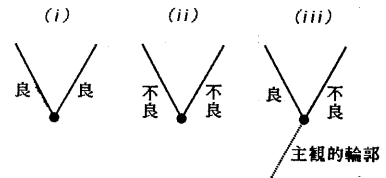


図8: 主観的輪郭を引くための規則

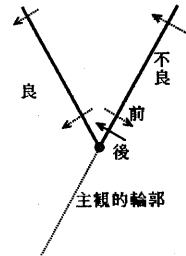


図9: 主観的輪郭によって奥行き場の矛盾が解消される様子

か、 P_i, P_{i+1} で同じで P_{i-1} で異なる場合である。これを、具体的に表すと次のようになる。

- case(i) 凸凸凸(凹凹凹)
- case(ii) 凹凹凹(凸凸凸)
- case(iii) 凸凸凹(凹凹凸), 凹凸凸(凸凹凹)

case(iii) の場合に、なぜ不良線分を延長するような形で主観的輪郭が引かれるのかを考えてみる。 $2\frac{1}{2}$ 次元スケッチの目的は、画像上の局所的な表現が大局的に矛盾がないようにすることであった。case(i) の場合には矛盾が無いので問題ない。しかし、case(ii) と case(iii) の場合には矛盾が生じてくるのでなんらかの形でこれを解消しなければならなくなる。方向の不連続点 P_i が case(iii) である場合、不良線分を延長する形で主観的輪郭を引くことによって、 P_i 近傍の領域を三つ(二つの重なり物体と背景)に分割し奥行き場を形成するための3番目の仮定(4.2参照)が適用できる。この仮定は二つの重なり物体に対する奥行き場形成条件であり、この適用は、 P_i に接続している良線分の奥行き場は変えず、不良線分の P_i 近傍の奥行き場だけを変える。その結果、 P_i に接続している二つの線分がどちらも良線分となり、矛盾が解消される(図9)。case(ii) の時は更に二つの case に分けられる。すなわち、 P_i が case(ii) の時、その隣の点 P_{i-1}, P_{i+1} が共に case(iii) の場合と、 P_{i-1}, P_{i+1} の少なくともどちらかが case(ii) になっている場合である。 P_{i-1}, P_{i+1} が case(iii) の場合には、 P_{i-1} に主



図 10: 局所主観的輪郭発生の例 原図形

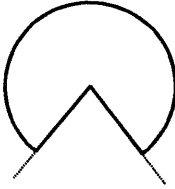


図 11: 局所主観的輪郭が発生する様子

観的輪郭を引くことによって P_i における矛盾も同時に解消される。しかし、それ以外（ジグザグになる）の場合は、矛盾は解消しきれず、その時は局所的に発生した奥行き場は消滅し、平面的に見られるようになる。例えば、図 10 のようなバックマン図形において、バックマンの口の入り口と根元の部分の近傍で奥行き場が形成される（図 11(a)）。次にその奥行き場が方向の連続区間に伝搬していく（図 11(b)）。バックマンの円弧部分では両端から伝搬していった奥行き場は矛盾無くつながる。しかし、バックマンの口の部分では奥行き場に矛盾が生じる。すなわち、このままでは 4.2 節で示した、方向の連続区間において奥行き場はかわらない、という仮定に反する。このような矛盾が生じたとき、矛盾を解消するために局所的に主観的輪郭が引かれる（図 11(c)）。

5 結論

本報告では、局所主観的輪郭に焦点を絞り、議論した。単純図形の場合、このアルゴリズムによって局所主観的輪郭を生成することができる。また、このアルゴリズムはデータ駆動型の局所並列アルゴリズムであるので、生体の神経回路網においても実現可能である。また、主観的輪郭を生成する要因として直線の端点があるが、今回は取り扱わなかった。直線の端点についても統一的に扱えるようなアルゴリズムを考える必要があるだろう。

参考文献

- [1] F.Schumann. Beitrage uber die zusammenfassung von gesichtseindrucken zu einheiten. *Zeitschrift fur Psychologie* 23,pp.1-32, 1904.
- [2] Gaetano Kanizsa 野口薫訳. 視覚の文法. サイエンス社, 1987.
- [3] G.Kanizsa. Subjective contours. *Scientific American* 234(4),pp.48-52, 1976.
- [4] R.L.Gregory. Cognitive contours. *Nature* 238,pp.51-52, 1972.
- [5] Stanley Coren. Subjective contours and apparent depth. *Psychological Review* 79, No.4, pp.359-367, 1972.
- [6] M.Sambin. Angular margins without gradients. *Italian journal of Psychology* 1, pp.355-361, 1974.
- [7] J.M.Kennedy. Depth at an edge, coplanarity, slant depth, change in direction and change in brightness in production of subject contours. In *Conference on Structural Learning: University of Pennsylvania Press*, 1973.
- [8] S.Ullman. Filling-in the gaps: the shape of subjective contours and a model for their generation. *Biological Cybernetics* 25, pp.1-6, 1976.
- [9] G.Baumgartner R.Von Der Heydt, E.Peterhans. Illusory contours and cortical neuron responses. *SCIENCE* 224 pp.1260-1262, 1984.
- [10] E.Peterhans R.Von Der Heydt. Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex.i. *Journal of Neuroscience* 9(5), pp.1731-1748, 1989.
- [11] R.Von Der Heydt E.Peterhans. Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex.ii. *Journal of Neuroscience* 9(5), pp.1749-1763, 1989.
- [12] K.Nakayama M.A.Paradiso, S.Shimojo. Subjective contours, tilt aftereffects, and visual cortical organization. *Vision Research* 29, No.9, pp.1250-1213, 1989.
- [13] DAVID MARR. *VISION*. Freeman, 1982.