

多重解像度解析によるアスペクトグラフの生成

守田 了 松木 敬吾 川嶋 稔夫 青木 由直

北海道大学工学部

曲面形状に対して、輪郭線の曲率要素をアスペクト記述に用いたアスペクトグラフを生成した。さらに、そのアスペクトグラフを多重解像度で解析した。本手法は大局的特徴を利用して、不安定な平衡点のイベントを予測し、有限の視点角度画像でアスペクトグラフを構築することが可能である。アスペクトグラフはある状態からの姿勢推移が有限個のノードであらわされているため、姿勢の動きに対応した効率のよい探索ができる。また内部輪郭線を除いた線画(シルエット)からえられる情報をもとにアスペクトを求めているため、画像からの抽出が容易であり、コンピュータビジョンにおける形状の内部表現として有望である。

Generating Aspect Graph Using Multiresolution Analysis.

Satoru MORITA, Keigo MATSUKI, Toshio KAWASHIMA, and Yoshinao AOKI

Faculty of Engineering, Hokkaido University

Nishi8 Kita13, Kita-ku, Sapporo 060, Japan

Several researchers have recently addressed the problem of computing the aspect graph of an objects by deriving the exact partition of viewing space from the object's geometry. This paper introduces a new approach to computing the exact orthographic aspect graph of curved objects. We define an aspect by the sequence of curvature elements of contour of curved objects. We can decrease the member of elements using multiresolution analysis. The algorithm automatically computes the partition of the viewing sphere.

1 まえがき

物体の形状を記述するアスペクトグラフの概念は Koenderink によって提唱された [1]. アスペクトグラフはある観点から、見えるトポロジーが同じ姿勢を同一のアスペクト (物体の見え方) に分類し、アスペクト間の遷移関係を示すネットワークである. G.Crawford らは、多面体のみで構成された物体に体してアスペクトグラフをしめしている [3]. 曲面に対する解析は多面体より複雑であるため、何をアスペクトとみなし、どこで、どのような方法で視点空間を区切って境界視点を求めるべきであるかが問題になる. Kergosien らは、正射影された表面におこる視覚のイベントをまとめ [7], Callahan らはこれらのイベントが視点空間をどのように分割するかを例をもって明らかにした [2]. 曲面形状に対して R.Jain らは内部輪郭線 (occluding contour) を含む線画をアスペクトとして取り、輪郭線の連続の仕方の違いで視点空間を分割し、グラフを生成できることを示している. 形状が複雑になると、アスペクトの数が膨大になり解析も複雑になるため回転物体のような制限された形状に体して適応例がしめされているにとどまっている. このように、従来の研究の興味の対象はアスペクト間を関係付ける変化として何が考えられるのか、どのような方法でアスペクトの生成が可能になるのかという点であった [4].

本研究では、内部輪郭線を除いた線画 (シルエット) からえられる情報をもとにアスペクトを求めているため、画像からの抽出が容易であり、コンピュータビジョンにおける形状の内部表現として有望である. とくに多重解像度で解析することにより算出した形状を表す要素列が視点変化に伴って特有の変化をおこし、各アスペクト変化の種類 (イベント) を区別することが可能になる.

2 アスペクト変化の解析

2.1 何をアスペクトとみなすか

アスペクトグラフは物体が見える状態のトポロジーが同じ姿勢を同一のアスペクト (物体の見え方) に分類し、アスペクト間の遷移関係をネットワークとして表現したものである.

曲面形状に対してアスペクトグラフを考える場

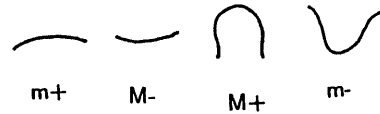


図 1: Curvature elements.

合、多面体のように見える面のトポロジーをアスペクトと考えることができないので、新たにアスペクトを定義する必要がある. そのため、何をアスペクト分類の基準とするか、どのような方法で視点空間の境界を求めるかが問題になる. 従来の曲面形状に対する解析例では、アスペクトとして内部輪郭線を含む輪郭のトポロジーを捉えているが、照合時に比較する情報として安定して内部輪郭線の抽出をすることは一般に困難である. コンピュータビジョンへの適応は困難である. そこで 3 次元物体の画像データから安定した情報を比較的得やすい内部輪郭線を除いた線画 (すなわち、シルエット情報のことで、以下輪郭線と呼ぶ) のみを抽出して解析する. 従来の解析例で、アスペクトを内部輪郭線を含む輪郭のトポロジーと捉えた要因の一つは、多面体での面のトポロジーに対応する状態を、内部輪郭線、接続点、エッジの生成消滅と捉えることにより定性的に分けることが可能になるためである. しかし、内部輪郭を除いた線画は閉曲線となり、接続点や内部輪郭線の生成消滅とは捉えられない. そこで曲率の極大極小、正負といった定性的に分類される要素のならば ($M+$, $M-$, $m+$, $m-$) をもとに輪郭線を表し、この要素のならば同じ形状は、曲率の構成要素が同じであり、多少構成要素の長さが異なっても同じとみなすことにする. 基本的解析に用いる要素は、曲率の極大極小により M, m に分類し、曲率の正負により $+$, $-$ の記号を用いて形状を記述する. [5] これを用いて、輪郭要素のならば同じ見え方を同一のアスペクト、輪郭要素の並びが変化する場合をアスペクト変化ととらえることにする.

さらに輪郭を多重解像度で解析することにより要素列が視点空間で特有の変化をし、各アスペクト変化の種類を明白にすることが可能になる. また複雑な形状のアスペクトグラフを生成すると、アスペクトの数が増え解析が困難になるので、ある程度大局的な特徴から解析できる階層的なアスペクトグラフを構成するために、多重解像度解析と

要素の変化の関係を明らかにすることも意味のあることである。多重解像度解析にはガウシアンフィルタリンクを用いている [8]。

図2のA,A',B,B'の状態は、零交差点の波形空間の移動、あるいは尺度空間の移動、視野空間の移動はあるが零交差点の順序関係に変化がない場合である。この場合定量的変化はあるが、アスペクトの定性的変化はおきない。このような曲率に基づく輪郭要素の並びが変化する場合のアスペクト変化に関して、微分幾何学的連続性を満たす場合と満たさない場合と分けて次節以降に述べていく。

2.2 イベント

視点空間(観測方向を球面にマップしたもの)をアスペクトごとに領域に区切ったとき、その各領域間の境界をイベントと呼ぶ。イベントは変化に応じていくつかの種類に分類できる。

従来の研究では、微分不可能な不連続な occluding contour が輪郭上に突然現われる場合の輪郭変化に対応するアスペクト変化を解析している。輪郭のトポロジーとしてアスペクトを記述する場合、これがイベントを生成する原因となるからである。本解析で用いる輪郭要素は曲率波形、一次微分波形の不連続点(このような点を以下カスプと呼ぶ)は含まないという前提のもとで要素に分解することを考えているので、不連続点で解析できない。したがって、カスプの生成を伴うイベントをどのように扱うかが解析上重要な意味を持つ。我々はイベントを解像度によって解析し、それぞれのイベントを区別して検出する。一方沃素表現を用いた場合、カスプの生成生成とは関係なく連続的変形によってもイベントがおきる場合がある。

2.2.1 カスプの生成を伴うイベント

微分不可能な不連続な occluding contour が輪郭上に突然現われる場合の輪郭変化に対応するアスペクト変化を解析する。この問題は、輪郭のトポロジーとしてアスペクトを記述する場合、鍵となる最も重要な部分である。不連続な occluding contour が表れるプリミティブな変化は3つである。これらの変化を伴う外部輪郭の変化は、カスプ形状が現れる変化に対応する。(図4)このようなアスペクト変化が起きる場合は、フィルタをかける以前の角

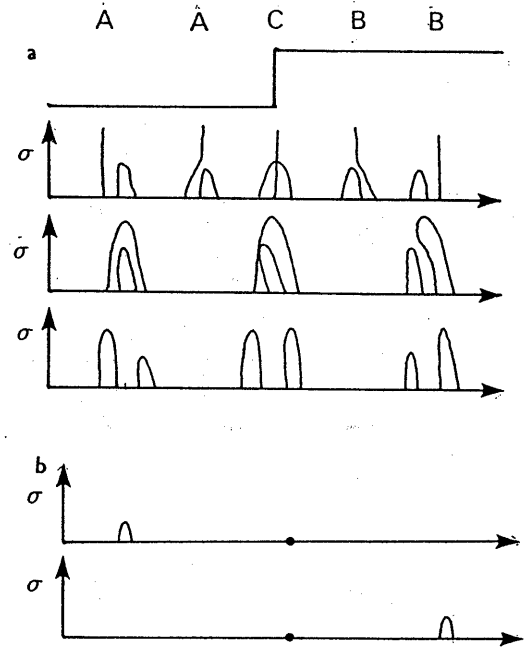


図2: Hierarchical event about zero-crossings.

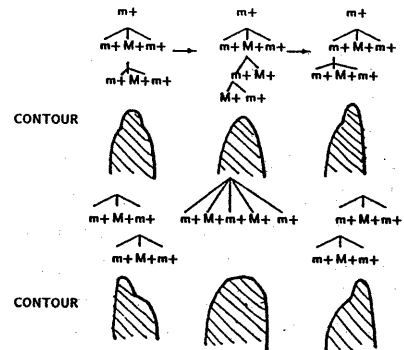


図3: Relation between hierarchical event and contour.

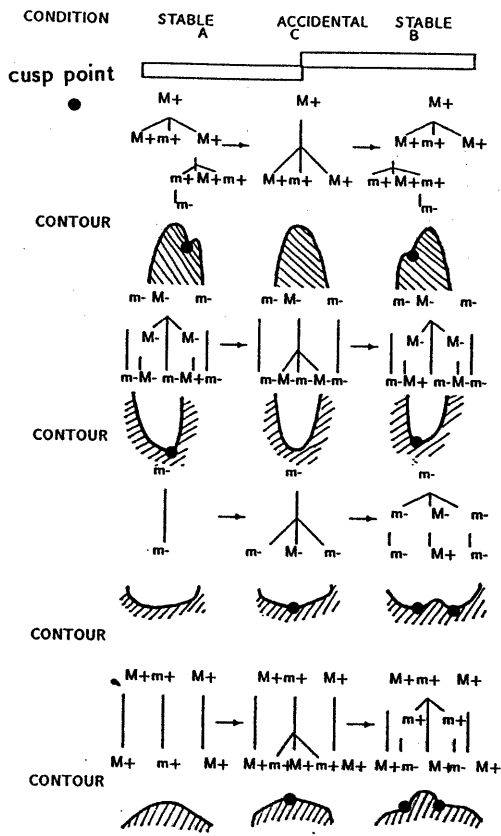


図 4: Multiresolution analysis of events.

度波形, 曲率波形もしくは曲率の一次微分波形に、微分不可能な解析点が存在する。この点において平滑にフィルタをかけることにより微分可能になり、多重解像度解析の結果そのイベントに固有の波形変化がおこる。このようにして解析したイベントの代表例を図 4 に示す。occluding contour が現れる各輪郭変形に対応する多重解像度でとらえたアスペクト変化をしめす。縦方向が尺度、横方向が輪郭に沿った要素のならびをあらわしている。A, B のような部分木が現れた場合、C の状態がその間に瞬間的に現れることが推定出来る。

他の変化はこれらの変形の組合せで構成される。これらの規則を用いて、2 つの安定な状態からその間に存在するイベントを予測し、すべての状態を包括するアスペクトグラフを生成することができる。

2.2.2 カスプの生成を伴わないイベント

[ゼロ交差輪郭の平衡点を含むイベント]

多重解像度でとらえた尺度波形のゼロ交差輪郭が次のような変化を起こす場合にも、アスペクト(曲率に基づく輪郭要素のならび)が変化する。図 2a は、局所的に対称な図形などにみられる変化であり、パラメータ(視点)を変化させていくにつれて A の状態は C の状態を経由し、B の状態に変化する。ここで C の状態は不安定な平衡点でありパラメータを変化することにより A または B の状態に変化する。図 2b は、最も頻ばんにおこるイベントであり、パラメータが分岐値に近づくにつれて平衡点は他の平衡点とあわさって消滅してしまうか、またはなにもないところから誕生する最も一般的な変化である。この基本的現象をふまえて、曲率要素に基づくアスペクト変化を解析する。

[曲率要素の変化]

これらの現象を、曲率要素の変化として記述した例を図 3 に示す。このような状態変化が現れる場合、安定な平衡点 A, B から不安定な C を類推することが可能である。

一方図 2b に対応する尺度変化に伴う曲率要素の変化は、曲率のゼロ交差、曲率の一次微分のゼロ交差の単調性から次のように求まる。矢印は形状がなまされる方向を示している。

要素数が変わらない変化
 $[M + m - M+] \rightarrow [M + m + M+]$
 $[m - M + m-] \rightarrow [m - M - m-]$

要素数が増える変化
 $[m + M + m+] \rightarrow [m+]$
 $[M - m - M-] \rightarrow [M-]$
 $[M + m + M+] \rightarrow [M+]$
 $[m - M - m-] \rightarrow [m-]$

視点の移動に伴う曲率要素の変化を次に示す。

要素数が変わらない変化
 $[M + m + M+] \rightarrow [M + m - M+]$
 $[m - M - m-] \rightarrow [m - M + m-]$
 $[M + m - M+] \rightarrow [M + m + M+]$
 $[m - M + m-] \rightarrow [m - M - m-]$

要素数が増える変化
 $[m + M + m+] \rightarrow [m+]$
 $[M - m - M-] \rightarrow [M-]$
 $[M + m + M+] \rightarrow [M+]$
 $[m - M - m-] \rightarrow [m-]$
 $[m+] \rightarrow [m + M + m+]$
 $[M-] \rightarrow [M - m - M-]$
 $[M+] \rightarrow [M + m + M+]$
 $[m-] \rightarrow [m - M - m-]$

これらの複合の変化によって、微視的にはアスペクトの構造が異なっていたいくつかの視点群が、大局的には同じ構造のアスペクトとみなせる。つま

り微視的なアスペクト変化を除去して、複雑な形状の多数のアスペクトを大局的形状にしたがって少ないアスペクトにまとめることができる。

2.3 アスペクトグラフ

視点空間を領域に区切り、その領域間をリンクで結ぶ。各リンクには領域間の関係を表すイベントを記述する。一般に視点空間は単位球面 (viewing sphere) になるが、アスペクトとしてシルエット形状を扱った場合、表からと裏からみたシルエットは変わらない。そのため、視点空間は単位半球面である。

効率的探索と記憶容量の問題からはアスペクトグラフを保存する記憶容量が小さいのが望ましい。そこで、すべての曲率要素列を記述するのは一つの形状につき一つの視点のみであり、他はノードにすべて各アスペクト間の遷移と変化がおこる要素、イベントのみを記述しておく。これにより、特定の視点をもつノードから効率的に探索ができる。

曲面形状の全表面にわたるデータ (センサーデータ, CAD データなど) をもとに、アスペクトグラフを生成するには、まず、選ばれた有限の視点からの輪郭を求め、各輪郭波形から大局的構造に対するアスペクトを取りだし、波形間の曲率要素列の変化を求め、次に上述した変化規則と対応させ、それぞれのイベントを決定し、それぞれの視点のアスペクトをラベルづける。構造的変形規則から、不安定な平衡点の存在をも推定する。

2.4 アスペクトの自動解析

アスペクトを自動生成するには、尺度空間的にも視野空間的にも特徴点の対応がとりやすい構造でなければならない。スケールが大きいときに現われる特徴点は、比較的広い視野で観測されるので、まずこれらに対応づけてそれからさらに細かい特徴に対応づけていけばよい。

視る方向は無数にあるが、全ての方向から観測することは非現実的である。そこで観測する画像の枚数を低減するために、まずおおざっぱに複数の角度から観測した後それらを解析して、必要に応じて画像を取り入れることにする。

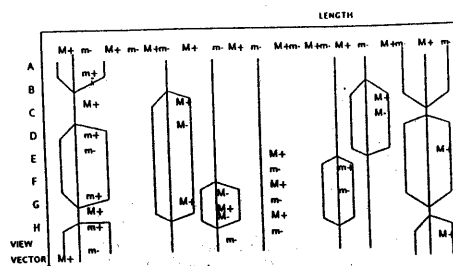


図5: An aspect graph in curvature elements from central viewpoints .

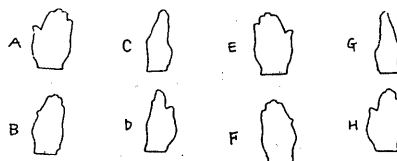


図6: Views of an object from central viewpoints within each aspect.

3 実験結果

図5図6は手の形状に対するセンサーデータをもとに、解析を進めた結果である。制限された方向 (赤道方向) について (30度) おきの12の視点からの画像をもとに、ある一定の解像度 (フィルターの係数 $filt=0.5$) で解析したアスペクト変化の解析例である。図5の横軸は輪郭線に沿った要素のならびを、縦軸は視線方向を表している。図5の縦軸の状態に対応する手の見え方を図6に示した。状態Bから状態Cに変化する場合それまで隠れていた親指が突然親指が現れる。親指付近の解析は図3左端に対応している。この解析例からわかるように、親指の消失生成に対応して図2に示す生成規則の変化が現れていることが分かる。図2に示すBの状態は過渡的にあらわれる状態でありこれを正確にみつけるには十分多くの視線方向をサンプリングしなければならない。それに比べて、C,Aの状態は安定して現れる。

図7図8は水鳥の輪郭線形状を基に解析した結果を示す。図7はラベルづけされたアスペクトの分布を示した視点空間を表す単位半球面である。図8は

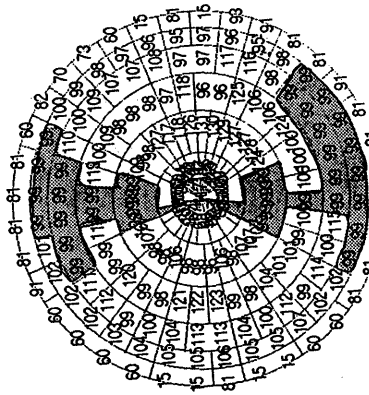


図 7: Viewing sphere derived from duck data.

水鳥の口ばしの生成消失のみに注目したアスペクトグラフについて説明する。この変化は図 4 に示した変化であり、カusp点が発生するアスペクト変化を大局的特徴から安定してとれることが確認できた。

4 むすび

曲面形状に対して、アスペクトを輪郭線の曲率要素列と捉えた場合のアスペクト変化について多重解像度解析を用いて解析した。視線方向の変化に伴う特有のアスペクト変化を解析することで、各アスペクトを分類できることが明らかになった。本手法では不安定な平衡点のイベント変化を予測し、少ない視点角度画像で必要に応じて観測点を増やすことにより複雑な形状であってもアスペクトグラフを構築することが可能である。アスペクトグラフはある状態からの姿勢推移が有限個のノードであらわされているため、姿勢の動きに対応した効率のよい探索ができる。今後、この研究をもとに大局的な特徴から微細構造にいたる階層的なアスペクトグラフの可能性について研究していく。

参考文献

[1] Koenderink, J.J and van Doorn, A.J , " The Internal Representation of Solid Shape with Respect to Vision " : , *Biological Cybernetics* , **32** , pp 211-216 , (1984)

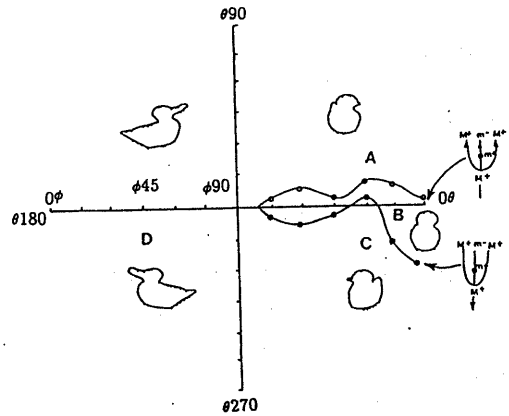


図 8: Analysis of accidental viewpoints generating cusp points.

- [2] Callahan, J. and Weiss, R , " A Model for Describing Surface Shape " : , *CVPR* , , pp 240-245 , (1985)
- [3] C. Crawford , " Aspect graphs and robot vision " : , *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition* , , pp 382-284 , (1985)
- [4] Rieger, J , " On the Classification of Vision of Piecewise Smooth Objects " : , *Image and Vision Computing* , , pp 91-97 , (1987)
- [5] M. Leyton , " A process-grammar for shape " : , *Artificial intelligence* , **34** , pp 213-247 , (1988)
- [6] Ponce, J. and Kriegman, D.J , " Computing exact aspect graphs of curved objects: Parametric patches. " : , *In Proc. Am. Assoc. Art. Intell.* , **Boston** , pp.1074-1079 , (1990)
- [7] Kergosien, Y.L , " La Famille des Projections Orthogonales d'une Surface et Ses Singularities " : , , **292** , pp 929-932 , (1981)
- [8] A.P. Witkin , " Scale-space filtering " : , *Proc. International Joint Conference Artificial Intelligence* , **Karlsruhe, West Germany** , pp 1019-1022 , (1983)