

曲率尺度空間を用いた物体形状における重要な特徴点の選択

日大生産工(院)
日大生産工

○寺内 健
目黒光彦

1 はじめに

コンピュータにデジタル画像の効率的な蓄積、検索処理を行わせるにあたって、デジタル画像におけるオブジェクトの輪郭形状の認識の実現は重要である。その前処理として、デジタル画像内の物体オブジェクトの形状認識は特に必要である。オブジェクトの形状認識に用いられる特徴の中でもオブジェクトの輪郭形状の特徴は、オブジェクト自身の特徴になり得るものと考えられる。

輪郭情報の記述には、フーリエ記述子によるデータ特徴の記述¹⁾やモーメント不変量等²⁾の手法が用いられてきている。本研究においても、局所的な情報と大局的な情報が両方扱うことができ、雑音に強いという点から、オブジェクト輪郭の曲がり具合である曲率を階層的に表した Curvature Scale Space(CSS: 曲率尺度空間) という特徴量を用いる。これはマルチメディアデータの特徴を記述する為のメタデータの記述方法の規格として知られる、MPEG-7³⁾でも用いられている特徴である。しかしながら、似通った輪郭の画像においても、特徴の出方が変わり、単純に CSS を比較するだけでは、適切にオブジェクト輪郭を認識することは困難である。

そこで、本稿では画像から取得した CSS から、オブジェクト輪郭を形作る重要な特徴点を選別する手法を提案する。重要な特徴のみを選別のうえ、比較することにより、オブジェクト輪郭の認識が適切に行うことができることを、適用例を通じて明らかにする。

2 デジタル画像からの曲率尺度空間の取得

2.1 デジタル画像の輪郭表現

デジタル画像におけるオブジェクト輪郭の形状を本稿ではどのように表現するかを説明する。画像中のオブジェクト輪郭から CSS を抽出する場合は、輪郭を画像の縦横を示す座標系ではなく、輪郭線上の座標系列として扱う必要がある。輪郭線の座標系列により輪郭を表現するには、画像の縦横を示す座標 x, y を、オブジェクト輪郭線 C 上の

弧長のパラメータである、座標 u の従属変数として扱う。以下に座標系列を示す。

$$C(u) = (x(u), y(u)), u \in [0, 1]. \quad (1)$$

本稿では、一枚の画像中にオブジェクトは1つだけ存在するとし、ラスタ走査によりオブジェクトの検出を行う。そのため u の始点はオブジェクトの上端とし、時計回りに輪郭線の検出を行い、得られた輪郭線を N 個のサンプル点で表現する。さらに曲率を求めるため、本稿では輪郭線の全長 $[0, u_{max}]$ を $[0, 1]$ に正規化するものとする。

2.2 オブジェクト輪郭の多重解像度表現

多重解像度表現とは、デジタル画像の表現方法のひとつであり、その汎用的な性質から画像処理において多岐にわたり使用されている。例えば、ある画像を単一の解像度で表現するとする。このとき、解像度が低い場合はデータ量が少なく済み、かつ画像は大局的な情報を保持する。しかし、画像の詳細を表現できないために、様々な画像処理において解像度の低い画像の情報は不十分なことが多い。逆に高い解像度では画像の詳細な情報を表現できる反面、処理がノイズに影響され易く、かつ処理時間が増大するという欠点を持つてしまう。

そこで、1つの画像に対して複数の解像度の画像を作ることにより、処理に応じて解像度を変化させることが考えられた。複数の解像度の画像を用意することにより、単一解像度による画像表現の欠点を補い合うことができる。これが多重解像度表現である。輪郭形状に対して多重解像度の表現を行う場合、オブジェクト輪郭線 C に、ガウス関数

$$g(u, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-u^2/2\sigma^2) \quad (2)$$

の畳み込みを行うことで表現する。ガウス関数を畳み込んだ輪郭の座標系列は、

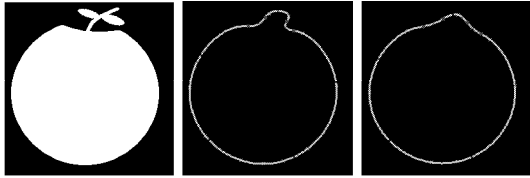
$$C_\sigma(u) = (X(u, \sigma), Y(u, \sigma)) \quad u \in [0, 1], \quad (3)$$

$$X(u, \sigma) = x(u) * g(u, \sigma), \quad (4)$$

$$Y(u, \sigma) = y(u) * g(u, \sigma), \quad (5)$$

Selection of Important Characteristics of Shapes by Curvature Scale Space

Takeru TERAUCHI and Mitsuhiro MEGURO



(a) 原画像 (b) $\sigma = 50$ (c) $\sigma = 100$

図 1: 多重解像度表現

と表すことができる。*は畳み込み演算子とする。解像度を变化させるには、ガウス関数の標準偏差 σ を操作することで制御する。例えば、解像度を低くするには σ を大きくすればよい。図 1(a) に基となる二値画像を図 1(b), (c) に σ の値を変化させた多重解像度表現の輪郭画像の例を示す。

2.3 オブジェクト輪郭の曲率

曲率 (Curvature) とは曲線や曲面の曲がり具合を表す量である。例えば平面上の半径 r の円周の曲率は $1/r$ であり、曲がり具合がきついでほど曲率は大きくなる。そのため曲線の曲率を考える場合、曲率 κ は、その曲線に内接する半径 r の円を考えることで

$$\kappa = \frac{1}{r} \quad (6)$$

と定義する。ただし、曲率は観察する位置により変わることに注意する必要がある。例えば平面にある半径 r の円の外側から見た場合の曲率は $1/r$ であるが、内側から見た場合に曲率は $-1/r$ となる。そこで本稿では曲率を求める場合、オブジェクトの外側から観察し、求めるとする。CSS では、曲線の弧に沿った二次微分に関する量を曲率とし、

$$\kappa(u, \sigma) = \frac{X_u(u, \sigma)Y_{uu}(u, \sigma) - X_{uu}(u, \sigma)Y_u(u, \sigma)}{(X_u(u, \sigma)^2 + Y_u(u, \sigma)^2)^{3/2}} \quad (7)$$

として求める。(7)において、 X_u は x を u で一次微分する事を示し、 Y_u は y を u で一次微分、 X_{uu} は x を u で二次微分、 Y_{uu} は y を u で二次微分する事を示す。曲率をオブジェクトの輪郭線に対して求めると、正の極大値は輪郭の凸の先端部分に、負の極小値は凹の底の部分に出現することが確認できる。そのため、凸の先端や凹の底を輪郭を表現する特徴量として利用することが可能である。図 2 に基となる輪郭の二値画像と曲率を表したグラフを例として示す。曲率のグラフは縦軸が標準偏差 σ 、横軸が輪郭線上の座標 u を表している。

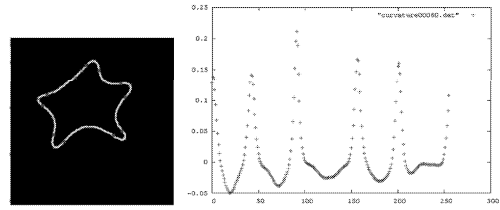


図 2: 輪郭と曲率グラフ

2.4 曲率を用いた輪郭特徴量の多重解像度表現

CSS は曲率と多重解像度表現を用いたオブジェクト特徴の表記法である。CSS を用いて輪郭の特徴を求める場合、多重解像度表現の一種である尺度空間 (Scale Space) を用いる。

尺度空間は多重解像度解析の手法の一つで、ガウス関数が畳み込まれた信号のゼロ交差や極値を求め特徴量とする手法である。尺度空間を表現するには縦軸をガウス関数の σ とし、横軸を信号のゼロ交差や極値の位置とする。このとき、ガウス関数の σ を操作することで信号の解像度を变化させ、各解像度における信号の極値やゼロ交差をプロットする。図 3 に尺度空間の例を示す。

尺度空間の重要な性質として、一次元信号にガウス関数を用いて平滑化を行う場合、ゼロ交差や極値が描く軌跡が単調性を示すという性質がある。すなわち、 σ を大きくしていくと新しくゼロ交差や極値が生じないということである。この性質のために尺度空間中で軌跡を σ 軸の下方へたどって行けば、元信号におけるゼロ交差や極値の位置を検出することが可能になる。

オブジェクト輪郭特徴を尺度空間で表現する場合、輪郭線の曲率を求め、曲率のゼロ交差や極値を特徴量として尺度空間にプロットすることで特徴を表現する。尺度空間の縦軸に σ をとり、横軸に輪郭線座標 u をとる。これで、 u を変数とした 1 次元信号で尺度空間を表現することが可能である。このように曲率を尺度空間で表現した物を CSS(曲率尺度空間) と呼ぶ。

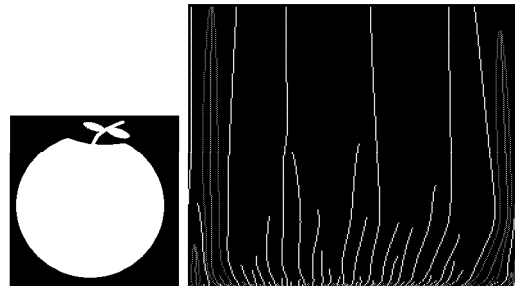


図 3: 輪郭を特徴とした尺度空間

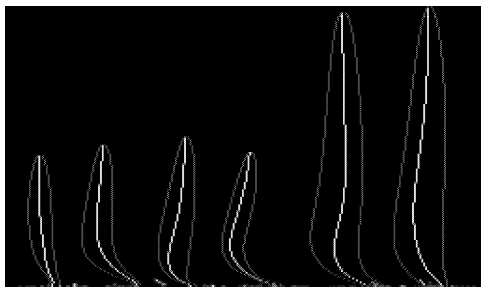


図 4: 特徴点として用いるゼロ交差

オブジェクト輪郭線の曲率を CSS に適用した場合、曲率により得られたゼロ交差や極値を特徴として採用することで、輪郭の凹凸を特徴とした多重解像度表現が可能となり、その汎用性の高さから、画像処理における様々な場面に用いられている^{4),5)}。

3 CSS を用いた特徴点選択

3.1 特徴として用いるゼロ交差

二値画像のオブジェクトから CSS を抽出したら、そこから特徴量を持った点、特徴点を調べることができる。ガウス平滑化における標準偏差 σ の値を大きくしても検出されるゼロ交差は、オブジェクトを形作る上で重要な特徴である。

ゼロ交差は σ を大きくすると最終的には極値に収束する性質があり、外側は凹形状に収束し、ゼロ交差により入れ子状になっている内側は正の極大値に収束する。さらに入れ子状になっている内側では負の極小値に収束し、以降、正の極大値、負の極小値と繰り返す。今回はゼロ交差が極値に収束する性質を用いてゼロ交差が収束した点を特徴量として用いる。

図 4 に極値に収束するゼロ交差の例を示す。図 4 の山のようにになっているゼロ交差の上端が特徴点である。

3.2 特徴点を用いた形状の比較

重要な特徴点は、オブジェクトの形状を端的に表しているか否かを確認するため、選択した特徴点から算出される、オブジェクト形状の類似度を評価する。

まず、処理対象となる原画像の特徴点と比較画像の特徴点との距離の誤差を算出する。その後、算出した誤差を基に、原画像と比較画像のオブジェクト形状の違いについて考察する。抽出した特徴点のみを用いることによって、重要な特徴点が画像の輪郭特徴を端的に表しているかを確認する。以下に類似度算出の手順を示す。

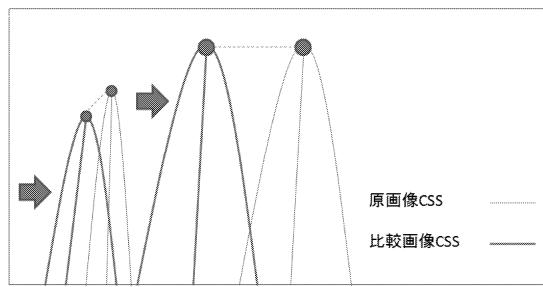


図 5: CSS の循環

- STEP1:** 画像をラスタ走査し、オブジェクトの上端を見つけ、輪郭を座標系列に格納する。
- STEP2:** 得られた座標系列に対して、標準偏差 σ を適宜変更しながらガウス関数の畳み込みを行い、CSS を取得する。
- STEP3:** CSS の u 軸に合わせて CSS を重ね合わせる。
- STEP4:** 原画像側のそれぞれの特徴点から見てユークリッド距離が一番小さくなる比較画像側の特徴点を見つけ出し、その距離の誤差を取る。距離の誤差は以下の式で算出する。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i^2 \quad (8)$$

このとき、 n は原画像側と比較画像側の特徴点の組み合わせの数、つまり原画像側の特徴点の数であり、 D_i は i 番目の特徴点間の距離である。

- STEP5:** オブジェクトの回転やスケールの違いは CSS の u 軸方向のずれとして表れる。そこで、図 5 のように CSS を u 軸方向に 1 ピクセル循環させ、STEP3 に戻る。このとき、CSS の右端 ($u=256$) は左端 ($u=1$) に回す。
- STEP6:** 比較画像の CSS を u 軸方向に一周させたら、 u 軸のデータ点数の個数の分だけ誤差が算出される。その中から一番小さいものを最終的な誤差として決定する。

4 適用例

今回、用意した比較画像は原画像 (jet1:図 6(a)) に対して、オブジェクトの形状的な劣化を含む画像 (jet2:図 6(b))、オブジェクトに回転とスケールの変化を加えた画像 (jet3:図 6(c))、オブジェクトの形状が異なる関連性の低い画像 (tonbo:図 6(d)) の 3 種である。

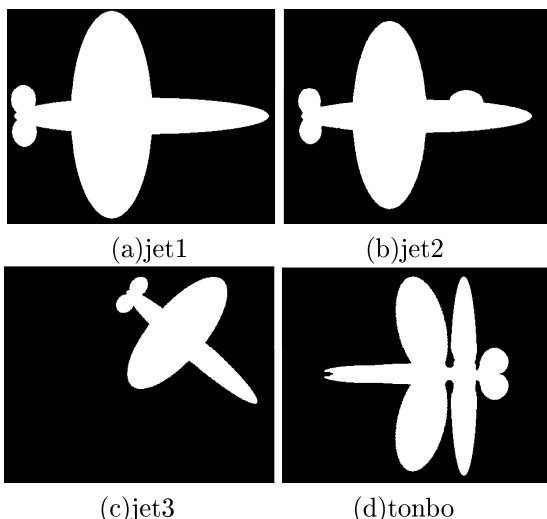


図 6: 検証に用いた画像

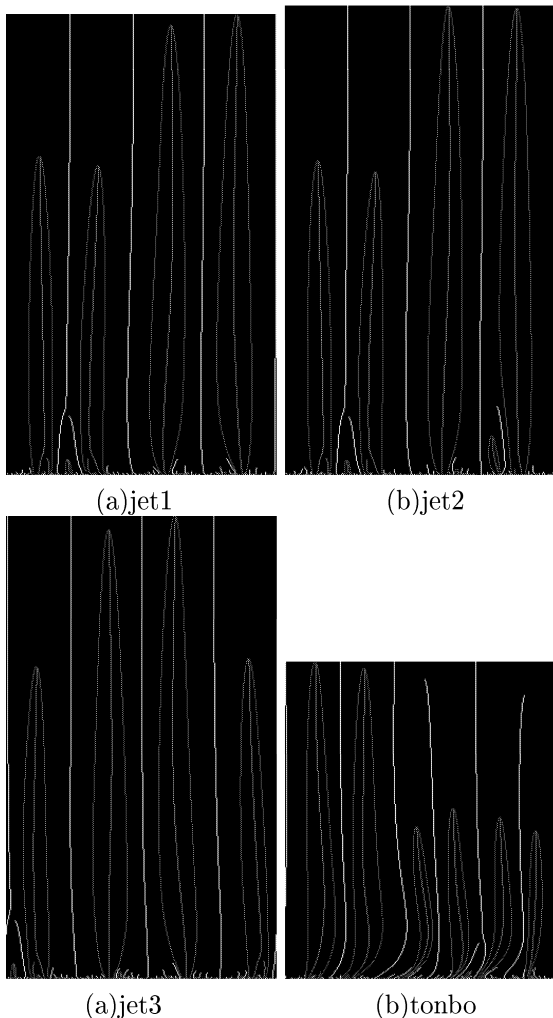


図 7: 各画像から作成した CSS

これらの画像と原画像の両方の CSS を作成し、各比較画像と原画像間の最小となる誤差 E を算出し、それがオブジェクトの特性を示しているかを調べた。原画像と比較画像から作成した CSS を図 7 に示す。CSS 自体の形状は tonbo を除く三枚は非常

表 1: 特徴点間の距離の誤差

| 画像名 | スコア |
|-------|----------|
| jet2 | 434.25 |
| jet3 | 13.46 |
| tonbo | 48093.36 |

に似通ったものとなっている。また jet2 のような多少の形状の変化は重要な特徴と捉えられずにオブジェクトに平滑化をかける早い段階で消失しているが、輪郭全体の平滑化に影響を与え、直近のゼロ交差点の σ 軸の高さが若干変化している事が CSS から読み取ることができる。jet3 のようにオブジェクトに回転やスケールの変化を加えた画像では CSS はほぼ完全に一致している事から、CSS はこのような変化に対して頑健性がある事がわかる。

表 1 は原画像と比較画像間の特徴点列から取得した誤差を表している。オブジェクト形状が異なる tonbo の誤差は大きくなるが、対して原画像とオブジェクト形状の関連がある他の二つの誤差は小さい。このことから、計算に用いた極値に収束するゼロ交差点は特徴点として、有用である事がわかる。

5 おわりに

本稿では、画像からオブジェクトの特徴を階層的に取得する CSS を用いて特徴を記した上で、オブジェクトに対して強い平滑化をかけても残るゼロ交差を特徴点として定め、その特徴点を選択の上、オブジェクト形状の評価に利用し、特徴点の有用性を示した。

参考文献

1. 河村洋子, 横田康成 “開曲線に適した新たなフーリエ記述子 「I 型フーリエ記述子」” 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理 Vol.J88-D-II, No.10, 2005, pp.2021-2028
2. C.-H.Teh and R.T.Chin: “On image analysis by the methods of moments”, IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intell., vol.10, no.4, 1980, pp.496-513
3. INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC 15938-5, Information technology-Multimedia content description interface- Part 5: Multimedia description schemes
4. 越川浩行, 目黒光彦, 古閑敏夫 “多重解像度解析に基づく劣化した輪郭形状からのロバスト特徴量の抽出” 電子情報通信学会技術研究報告, SIS2006-77, 2007, pp.33-38
5. J. V. D. Poel, C. W. D. Almeida, and L.V.Batista “A New Multiscale, Curvature-Based Shape Representation Technique for Image Retrieval Based on DSP Techniques” Proceedings of the Fifth International Conference on Hybrid Intelligent Systems table of contents, pp.373-378, 2005