

2値エッジ画像に基づくオブジェクト輪郭推定法 — 接ベクトル導出の改善に関する検討 —

Estimating Object Contours from Binary Edge Images

- A Study on Improvement of Tangent Vector Calculation

辻 裕之* 徳増 眞司* 齋藤 豪† 高橋 裕樹† 中嶋 正之†

Hiroyuki Tsuji Shinji Tokumasu Suguru Saito Hiroki Takahashi Masayuki Nakajima

1. まえがき

2値エッジ画像中のオブジェクト輪郭線の抽出は画像認識において重要な過程であり、従来より多くの研究が進められてきたが、近年では画像符号化や2次元CGへの興味深い応用例が報告されている[1, 2]。本稿もまた、[1]と同様、MPEG-4の任意形状符号化に必要なVideo Object Plane (VOP)の自動生成手法への応用を想定している。

自然画像からのVOP自動生成には、対象とするオブジェクトを追跡する技術とオブジェクトの領域を抽出する技術が必要である。Meierら[1]のようなエッジベースのオブジェクト追跡を行う場合には、2値エッジ画像として表現されたオブジェクトモデルからその輪郭を抽出する必要が生じるが、一般にこれらのオブジェクトモデルでは、弱いエッジが欠損して完全な輪郭を得ることができないため、オブジェクト領域の塗りつぶしなどの処理が困難となる。筆者らは、このような状況下においてオブジェクトの閉輪郭線を推定するため、2値エッジ画像から輪郭線の存在可能性を表す場を生成し、これに基づき閉曲線を時間発展させながらオブジェクト輪郭に収束する幾何学的な動的輪郭法を提案している[3]。本稿では[3]の手法を更に進め、場を計算する際に必要となる接ベクトルの導出方法を改善することにより、主観的により良好な場とオブジェクト輪郭が得られることを検証する。

2. オブジェクト輪郭推定法

2値エッジ画像からオブジェクト輪郭を推定する手順は、「輪郭線の存在可能性を表す場の生成」と「場に基づく閉輪郭線の時間発展処理」の2つのステージから成る。ここでは、筆者らが[3]で提示した手法に基づき、それぞれのステージの処理概要を述べる。

2.1 輪郭線の存在可能性を表す場の生成

2値エッジ画像によるオブジェクトモデルから輪郭線の存在可能性を表す場を導出する手順は次の通りである。まず前処理として、各エッジ点における接ベクトルを算出しておく。続いてこれらのデータから、画像上のすべての点 P 上に輪郭線が存在する可能性を確率 $pf(p)$ として計算する。これには以下の2つのステップを踏む。

第1ステップでは、確率を計算したい画素 P を中心とする窓を考え、画素 P と窓に含まれる各エッジ点 Q 、およびその接ベクトル t から図1に示すような接触円によるエッジ補間[4]を行う。接触円とは、エッジ点 Q を接ベクトル t の

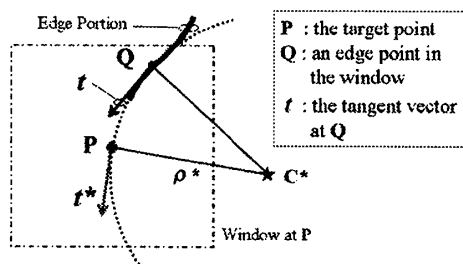


図1: 接触円によるエッジ補間

方向に通過し、かつ窓の中心画素 P を通る円のことであり、図1ではこれが P を通過する際の接線方向のベクトルを t^* と表記している。ここでは、窓内のすべてのエッジ点 Q に対して接触円補間を実施し、 P における接ベクトル t^* の分布を調べる。

次のステップでは、 t^* の分布を基に P 上に輪郭線が存在する確率を計算する。 P が輪郭線上にあれば、近傍の多くのエッジ点に支持され、傾きが本来の輪郭線の接線方向に集中するのに対し、輪郭点以外の点における傾きはかなりばらつく傾向がある。このため、傾きの集中度が高い画素ほど輪郭線の存在する可能性が高くなるよう場を構成すればよい。なお[3]では、画像の標本化に伴う接線方向の誤差を考慮し、接ベクトル t^* の分布の直接調べる代わりに、接触円の中心 C^* の分布を使用している。

2.2 閉輪郭線の時間発展処理

ここでは、オブジェクトを取り囲むように与えた任意の閉曲線を時間発展させて、オブジェクト輪郭に収束させる処理を行う。閉曲線の時間発展には、Caselles-Kimmel-Sapiroによるgeodesic active contoursモデル[5]を利用している。これは、画像平面 $I(x, y)$ 上の曲線 $c(q) = (x(q), y(q))$ の長さを

$$L(c) = \int_a^b g(|\nabla I(c(q))|) |c'(q)| dq \quad (1)$$

で定義したとき、これを最小とする測地線と呼ばれる曲線に向かって $c(q)$ を収束させる幾何学的な動的輪郭法である。 $L(c)$ は通常のユークリッド距離に重み係数 $g(|\nabla I(c(q))|)$ を掛けた一般化距離であって、重み係数を決める関数 g には、例えば $g(s) = 1/(1+s^2)$ などが使用される。この重み付けのおかげで、オブジェクト輪郭に相当する閉曲線を $L(c)$ を最小とする曲線として特徴付けることができるようになる。

一方、閾値処理を行った2値のエッジ画像を対象とする場合、濃淡画像に基づく勾配 $|\nabla I|$ のような情報は既に失われ、

*神奈川工科大学情報学部情報工学科

†東京工業大学大学院情報理工学専攻

利用することができない。そこで提案法では、前段で生成した輪郭線の存在可能性を示す場 $pf(\mathbf{p})$ を用いて、曲線の長さに関する最小化問題を以下のように設定することとした。

$$\min_{\mathbf{c}} L(\mathbf{c}) = \min_{\mathbf{c}} \int_a^b \{1 - pf(\mathbf{c}(q))\} |\mathbf{c}'(q)| dq. \quad (2)$$

ここで、従来法の重み付け係数 $g(|\nabla I(\mathbf{c}(q))|)$ に代わって $1 - pf(\mathbf{c}(q))$ が使用されている点に注意されたい。これにより初期輪郭線は、最終的に $pf(\mathbf{p})$ の値がなるべく1に近い画素を通る最適な閉曲線に収束することが期待できる。式(2)の解を数値的に求めるには、次の勾配降下フローに従って曲線を時間発展させればよい。

$$\frac{\partial \mathbf{c}}{\partial t} = (\kappa(1 - pf) + \langle \nabla pf, \mathbf{N} \rangle) \mathbf{N}. \quad (3)$$

ここで、右辺は式(2)に関する Euler-Lagrange 方程式を計算して得られる。

なお、提案法では Caselles-Kimmel-Sapiro に習い、式(3)をレベルセット法 [5] を用いて解いている。レベルセット法では、曲線 $\mathbf{c}(q)$ は画像平面で定義される曲面 $u(x, y)$ のゼロ交差とみなされ、曲面 u 全体を時間発展させることにより曲線 $\mathbf{c}(q)$ の変化の様子を表現する。式(3)に対応する曲面 u に関する時間発展方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = (1 - pf) \operatorname{div} \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) |\nabla u| - \langle \nabla pf, \nabla u \rangle. \quad (4)$$

レベルセット法を導入することのメリットとして、得られる曲線が常に閉曲線であること、曲線の分離・統合などのトポロジーの変化に対応可能であることなどが挙げられる。

3. 接ベクトル導出手法の改善

前章で述べたオブジェクト抽出法において正確なオブジェクト領域が抽出できるかどうかは、結局のところ、輪郭線の存在可能性を表す場の性質の良し悪しにかかっている。さらに言えば、提案法における場の生成は接触円によるエッジ補間に基づくことから、前処理で求めた各エッジ点における接ベクトルの精度を高めることが、直接、場 pf の精度を高めることにつながる容易に予想される。そこで本章では、従来法における接ベクトルの導出に関する問題点を指摘するとともに、その改善手法を提案する。

3.1 従来法の問題点

各エッジ点における接ベクトルの導出は主成分分析に基づいて計算される。従来法においては、各エッジ点を中心とする小さな窓を考え、これに含まれるすべてのエッジ点の位置に関する主成分分析を行い、その主方向を接ベクトルの方向として採用していた。この方法では、オブジェクト輪郭が滑らかな曲線として与えられる場合には良好な接線方向が得られるが、角形の頂点に代表される接ベクトルが不連続となる点や、線分が交差した点などにおいては、すべての方向を平均化した接線方向がひとつ得られるのみである。このような場合、真のエッジの接線方向は複数存在しており、これらは通常、得られた平均的な接線方向とは一致しない。真のエッジの方向と一致しない平均的なベクトルを用いて接触円補間を行うことは、角形のコーナー付近の確率場を拡散させ、オブジェクトの正確な形状の抽出を困難にする可能性がある。

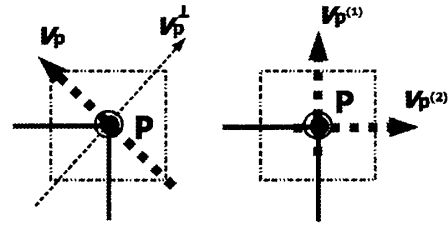


図 2: P における接ベクトルの導出

3.2 改善手法の提案

従来法の問題点は、すべてのエッジ点に対して1つのベクトルしか割り当てなかったことに起因する。例えば、図2に示す角形エッジの頂点 P において主成分分析を行うと、主方向として図左に示すような斜め方向のベクトル \mathbf{v}_p が得られる。しかし、接触円による補間を行う際には、真のエッジの方向を反映した図右に示す2方向のベクトルを使用することが望ましいことは直感的に明らかである。以上の考察を踏まえ、本論文では、接線方向が不連続となるエッジ点に対して真の接線方向を反映した複数の接ベクトルを割り当てられるようアルゴリズムの改善を行った。

改善した接ベクトル導出アルゴリズムは次のような再帰処理により実現される。

- (1) P を中心とするウィンドウに含まれるすべてのエッジ点 Q の集合に対して主成分分析を行い、主方向 \mathbf{v}_p を求める。
- (2) 主方向に対する寄与率が 95%以上であれば、主方向 \mathbf{v}_p を接ベクトルとして採用して処理を終了する。
- (3) そうでない場合、再帰の段数が 3 以上であれば主方向 \mathbf{v}_p を接ベクトルとして採用せずに処理を終了する。
- (4) (2),(3) の条件がいずれも成立しない場合、主方向 \mathbf{v}_p に直交する \mathbf{v}_p^\perp 方向の直線を境としてエッジ点の集合を2つに分割する。
- (5) 分割したそれぞれのエッジ点集合において、同様の接ベクトル導出処理を再帰的に行う。

以上のアルゴリズムの主なアイデアは、十分信頼できる寄与率が得られるまでエッジ点集合を分割していく点にある。なお、この際、主方向に直交する直線を用いてエッジ点集合を分割するのは、主方向 \mathbf{v}_p に関してエッジ点の分散が最も大きくなっているためである。図2の例では、点 P を通り \mathbf{v}_p^\perp 方向に沿った直線に基づくエッジ点の分割が、結果的に図右の2つの接ベクトル $\mathbf{v}_p^{(1)}$, $\mathbf{v}_p^{(2)}$ を導出する適切な選択になっていることが確認できる。

4. シミュレーション実験

エッジ画像から得られる輪郭線の存在可能性を表す場とこれに基づくオブジェクト抽出精度が、前章で提案した接ベクトル導出手法によってどの程度改善されるかを確認するためにシミュレーション実験を行った。

4.1 基本図形による実験

実験に使用した基本図形 (円, 扇形, 角形) に関するテスト画像を図3に示す。いずれも輪郭の一部が欠損したエッジ画像である。また、扇形と角形のエッジには接ベクトルが不

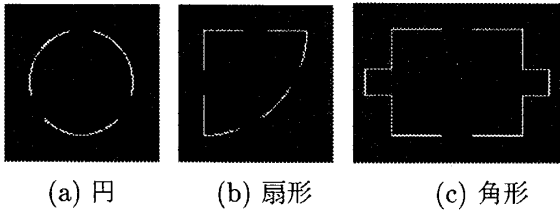


図3: 基本図形のエッジ画像

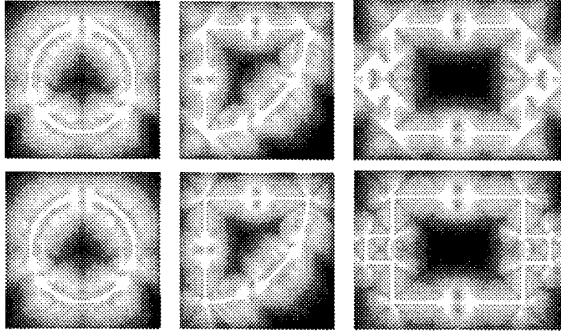


図4: 場の導出結果 (上段: 従来法, 下段: 提案法)

連続となる頂点が含まれている。これらのエッジ画像を入力として場の導出を行った結果を図4に、得られた場に基づいてオブジェクトを取り囲む閉輪郭線を時間発展させ、オブジェクト輪郭の推定を行った結果を図5に示す。

図4上段は従来手法に基づき、各エッジ点で1つの接ベクトルのみを用いて得られた場であり、図4下段は提案手法に基づき、接ベクトルが不連続となる点において複数のベクトルを割り当てて得られた場である。図左の円弧の場合は、基本的にすべてのエッジ点において接ベクトルは連続に変化することから、従来法でも提案法でも処理の内容はほぼ同等であり、得られた場にも顕著な差は見られない。これに対し、図中央の扇形および図右の方形のエッジに対する場においては、コーナー付近の分布の様子が顕著に異なることがわかる。特に従来法で求めた場には各頂点の主方向に対して直線状の強い確率が分布しているが、提案法ではこれがかなり解消されている。

このことはまた、図5の輪郭推定の結果からも確認できる。図5上段は従来手法を、図5下段は提案手法をそれぞれ用いて推定されたオブジェクト輪郭を示している。なお、オブジェクトを取り囲む初期輪郭の時間発展処理については、式(4)に相当する差分方程式に基づく繰り返し演算処理をいずれも1200回実施し、輪郭の時間発展が完全に止まった(解に収束した)ことを目視で確認した上で最終結果として提示している。図5の扇形および方形の輪郭推定結果に着目すると、従来法ではコーナーを正確に抽出できていないのに対して、提案法ではこの点がよく改善されていることが主観的に分かる。

4.2 標準画像による実験

次にMPEG-4の標準画像“Hall Monitor”の第36フレームから抜き出した人物のエッジ画像を入力として、本稿で提案した手法に基づき、場の生成・輪郭の抽出を行った結果を図6に示す。かなり良好な結果が得られたものの、頭部やカバンの上側など正確な輪郭が得られていない箇所もあること

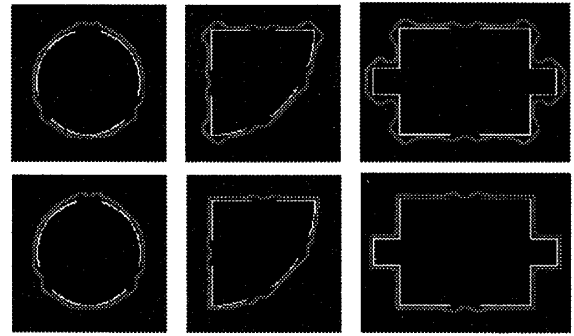


図5: 輪郭の推定結果 (上段: 従来法, 下段: 提案法)

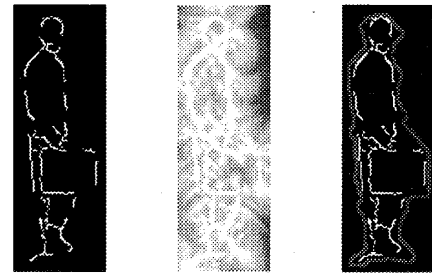


図6: 人物の輪郭推定 (左から、エッジ画像、輪郭線の存在可能性を表す場、輪郭推定結果)

から、自然画像から得られる複雑なエッジ画像に対しては、より性質のよい場を導出するための更なる工夫が必要であると考えられる。

5. まとめ

筆者らが提案した、エッジ画像からのオブジェクト輪郭推定法において、接ベクトル導出の改善手法を新たに提案し、輪郭線の存在可能性を表す場の生成とオブジェクト輪郭抽出への改善効果について検証を行った。自然画像から切り出した複雑なエッジ画像から良好なオブジェクト輪郭抽出を行うには、さらに正確かつ性質のよい場の生成が必要であり、今後は場の生成アルゴリズム自体の注意深い改善策が必要と考えられる。

参考文献

- [1] T. Meier and K. N. Ngan, “Automatic segmentation of moving objects for video object plane generation,” *IEEE Trans. CSVT*, vol. 8, no. 5, 1998.
- [2] 中村, 齋藤, 中嶋, “セルアニメーションのための曖昧輪郭線に対する塗りつぶし領域の推定のための場の検討”, 情報処理学会第65回全国大会, vol.2, pp.265-266, 2003.
- [3] Tsuji, *et al.*, “Estimating Object Contours from Binary Edge Images”, *IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP2005)*, Sept. 2005. (*To appear*)
- [4] G. Farin, *Curves and Surfaces for CAGD*, Morgan Kaufmann, 2002.
- [5] G. Aubert and P. Kornprobst, *Mathematical Problems in Image Processing*, Springer, New York, 2002.