

曲率尺度空間によるベクタ変換の評価手法に関する検討

河村 圭[†] 石井 大祐[†] 渡辺 裕[†]

[†] 早稲田大学大学院 国際情報通信研究科
〒 367-0035 埼玉県本庄市西富田 1011 A310
E-mail: †kawamura@suou.waseda.jp

あらまし ベクタグラフィクスの再生環境が普及しつつあり、ベクタ表現のコンテンツ需要が増加している。そのため、自動的にベクタ表現を取得するベクタ変換技術が重要となっている。また、得られたベクタ表現を再利用や微修正できるように、編集性（曲線操作のしやすさ）が求められる。本稿では、曲率尺度空間（Curvature Scape Scale, CSS）を用いて、曲率が極値となる点を曲線の頂点とする定義を用いる。得られたベクタ表現の編集性を、通過点の位置によって評価することを目的とする。曲線の頂点付近にベジエ曲線の通過点がどの程度存在するかによって変換性能を評価する手法を提案する。実験により、曲線の頂点と曲率の極値が一致することを確認した。さらに我々が提案しているベクタ変換手法は従来からあるベクタ変換手法に比べて、多くの部分で通過点が曲線の頂点付近に存在することを明らかにした。キーワード 曲率尺度空間、ベクタ変換、画像符号化。

A Study on Evaluation Method of Vectorization by Curvature Scale Space

Kei KAWAMURA[†], Daisuke ISHII[†], and Hiroshi WATANABE[†]

[†] Graduate School of Global Information and Telecommunication Studies, Waseda University,
A310, 1011 Nishi-Tomida, Honjo-shi, Saitama 367-0035, Japan.
E-mail: †kawamura@suou.waseda.jp

Abstract A demand for vector representation contents are increasing since viewer environments for vector graphics are disseminated. Then vectorization method to obtain a vector representation form raster representation is a significant technique. In addition, edit-ability, which is facility of curve manipulation, is required. In this paper, we adopt the definition that a summit of the curve is located extremum of curvature using Curvature Scale Space (CSS). Our object is to evaluate the edit-ability of the obtained vector representation by the location of pass point of Bézier curve. We proposed the evaluation method of edit-ability whether a pass point is near the summit. Some experiments clarify that the summit is corresponding to the extrema of curvature. Moreover, our proposed vectorization technique has much part of high facility than the conventional method.

Key words Curvature scale space, vectorization, image coding.

1. はじめに

表示デバイスの多様化により、解像度の異なる様々な端末に画像を表示する機会が増大している。そこで、解像度に依存しない画像表現方式であるベクタ表現の需要が高まっている。これまでに蓄積されている多くの画像コンテンツはラスタ形式であるため、これを自動的にベクタ表現へと変換するベクタ変換技術が必須である。変換後のベクタ表現は多くの場合、人手による微調整が必要となるので、再編集が容易であることが重要である。

これまでのベクタ変換では、与えられたデジタル曲線の特徴点を抽出してベクタ変換を実現する方針や、誤差の最大値が $1/2$ 画素以下であることを保証する高精度なベクタ変換を実現する方針がある。安本らはデジタル曲線から支配点 (Dominant Point) と曲率の大きな点を検出して、B スプライン曲線を得る手法を提案している [1]。これらの特徴点は編集性に大きな影響を与えるため十分考慮されなければならない。しかし、変換精度や効率が不十分であるという課題がある。一方、Selingerらはグラフ理論を用いて高精度な多角形近似を取得し、これを3次ベジエ曲線を用いて滑らかなベクタ表現に変換する手法を提案している [2]。しかし、ベジエ曲線の編集性を十分考慮した変換ではないという課題がある。

そこで、我々は Selinger らの多角形近似に基づいて、再編集が容易なベクタ変換手法を提案している [3]。3次ベジエ曲線における再編集のしやすさは、曲線の形状と通過点の位置関係による影響が大きい。すなわち、曲線の「頂点」付近に通過点が存在すると、曲線の膨らみ具合を容易に調整可能になる。このとき3次ベジエ曲線の特性より、着目部分以外に影響は生じない。また、曲線の連続性が失われることもない。この他に、曲線の頂点を滑らかなカーブからコーナーに変更するのも容易である。図1に示すように、これまでは多角形の頂点を曲線の頂点と見なしてきたが、定量的な評価が行われていなかった。

本稿では、曲率尺度空間 (Curvature Scale Space, CSS) を用いて、曲率が極値となる点を曲線の頂点とする定義を用いる。得られたベクタ表現の編集性を、通過点の位置によって評価することを目的

Facility of Editing Vector Representation



Pass Point on the Summit of the Curve



Vertex of Polygonal Approximation (assumption)



Extremum of Curvature Scale Space (definition)

図1 編集性と曲率の関係

Fig.1 Relation between facility of editing and curvature

とする。曲線の頂点付近にベジエ曲線の通過点がどの程度存在するかによって変換性能を評価する手法を提案する。

2. 曲率と関連するベクタ変換手法

2.1 曲率

曲率とは曲線の局所的な曲がり具合を定量的に表す指標である。ある曲線の微小区間を円で近似したとき、その円の半径を曲率半径、曲率半径の逆数を曲率と定義する。したがって、円弧の長さ Δs 、中心角を $\Delta \alpha$ とすれば曲率半径 R は

$$R = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta \alpha} = \frac{ds}{d\alpha} \quad (1)$$

と表せる。また、曲率 κ は

$$\kappa = \frac{1}{R} \quad (2)$$

となる。なお直線の曲率は0となる。さらに、右回りと左回りで正負が逆転する。

曲線が連続系の媒介変数表現で与えられるとき、曲率 κ は

$$x = x(t), \quad y = y(t) \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{x'y'' - x''y'}{(x'^2 + y'^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

となる。なお、微分は媒介変数 t について行う。ここで、曲線が離散値として与えられるとき (デジタル曲線)、微分の計算方法に自由度がある。

ところで、曲線の構造を表す手法として尺度 σ を導入した尺度空間フィルタリングがある。尺度空間の概念は Witkin ら研究によって一般的になった [4]。また佐藤らは一般化波形の構造を定義した [5]。信号 $f(x)$ の尺度空間解析は一般的に、尺度としてガウス関数のパラメータである σ を用い

て、ガウスカネルとの畳込みによって作られる。畳込まれた信号の一次微分の極値や二次微分のゼロ交差が様々な尺度で見出される。これらの極値やゼロ交差を表した (x, σ) 平面の画像は尺度空間画像と呼ばれる。

Mokhtarian らは、様々な尺度における曲線の曲率ゼロ交差を見つけるために、曲率尺度空間 (CSS) 手法を開発した [6]。パス長を変数 u と考えるとき、曲線は 2 つの関数 $x(u), y(u)$ として表現される。そして、 $x(u)$ と $y(u)$ はそれぞれガウシアンと畳み込まれる。曲率ゼロ交差を用いた曲線の符号化によって、多重解像度形状表現が定式化された。

2.2 曲率を用いたベクタ変換

安本らは、B スプライン関数を用いたコーナー検出とベクタ変換を提案している。まず、デジタル曲線は傾きや曲率が量子化されているので、より連続的な値を得るためには平滑化の操作が必要となる。そこで、B スプライン関数を与えられたデジタル曲線に当てはめ、当てはめた B スプライン関数に近づくように各点を元の位置からずらし、その移動量を計算する。この移動量が大きく、かつ B スプライン関数の曲率が大きい点をコーナーと判断する。さらに、コーナーを固定点として、コーナー間で次に曲率が大きい点を SCP (Significant Curvature Point) として選択する。なお、各点における必要な計算は全て近傍の 5 点のみの位置から求められる。

この手法は曲線の再編集を考慮した手法ではないが、曲率の大きな点を特徴点 (SCP) として検出する。コーナー間の曲線は SCP と B スプライン関数を用いて近似される。しかしながら、視覚的には SCP が冗長に検出されており、またコーナー検出が主たる目的であるため、ベクタ変換性能については十分な検討がなされていない。また、平滑化の精度は利用する点の個数が増えるほど向上すると考えられるが、本手法を 6 点以上に拡張するのは困難である。すなわち、平滑化の度合いが計算上の都合により決定されている。

2.3 多角形近似によるベクタ変換

Selinger らは、グラフ理論に基づいて辺の数が最小となる多角形近似とベクタ変換を提案している [2]。まずデジタル曲線と辺の誤差が $1/2$ 画素以下とする制約条件を満たし、全ての点近傍を通

過して辺の本数が最小となる多角形を得るという最短経路問題に帰着させる。さらに辺の数が同じ場合には、累積誤差が最小となる多角形を採用する。次に、頂点のカーブ判定を行い、カーブの場合は辺の中点を固定点としてその頂点を 3 次ベジエ曲線で置換する。ベジエ曲線もデジタル曲線との誤差が $1/2$ 画素以下になるように置換する。

この手法では各フェイズにおいて最大誤差が $1/2$ 画素以下になるようにしている。その結果、変換精度は十分に高いため、定量的な評価が省略されている。また、ベジエ曲線の通過点は、辺の中点という曲率の小さな場所に置かれる。したがって、編集性が低下している部分が多いという問題点がある。

3. 提案手法

3.1 曲率尺度空間の離散化

我々は多角形近似によるベクタ変換を改良し、ベジエ曲線の通過点を頂点付近に置くアルゴリズムを提案している。ここで、曲線の頂点を近似した多角形の頂点と見なしている。したがって、この仮定の妥当性を検討する必要がある。

曲線の頂点は図形を見る尺度によって位置が変わるため、これまで定量的な評価が出来なかった。そこで、曲率尺度空間の概念を用いて、ある尺度において曲率が極値となる位置を曲線の頂点とする定義を用いる。改めて、デジタル曲線と曲率尺度空間における微分項を

$$x'[n] = G'[\sigma, n] * x[n], \quad (5)$$

$$y'[n] = G'[\sigma, n] * y[n], \quad (6)$$

$$x''[n] = G''[\sigma, n] * x'[n], \quad (7)$$

$$y''[n] = G''[\sigma, n] * y'[n] \quad (8)$$

と定義する。ここで、 G はガウス関数、 σ は分散、 $*$ は畳込み演算子である。また、デジタル曲線の媒介変数表現として

$$|x[n+1] - x[n]| + |y[n+1] - y[n]| = 1 \quad (9)$$

を仮定する。

3.2 通過点配置の評価手法

尺度空間を用いた解析はガウスフィルタを適用しているにもかかわらず、変曲点を用いているためノイズの影響を受けやすい。そこで、曲率の極値

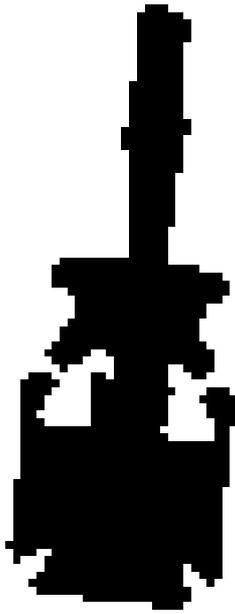


図 2 入力画像
Fig. 2 Input Image

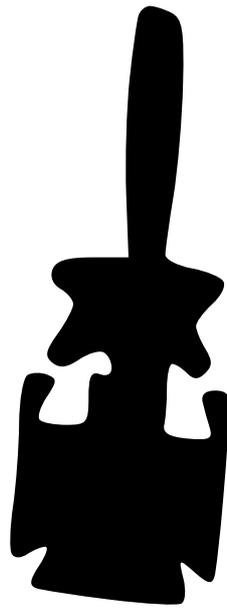


図 3 出力画像
Fig. 3 Output Image

だけでなく大きさも考慮しなければならない．曲率の絶対値がしきい値 th 以上でかつ極値を取る位置を曲線の頂点であるとする．

次に，この曲線の頂点付近にベジエ曲線の通過点が存在する場合に，曲線の頂点と通過点が一致しているとする．そして，全ての曲線の頂点に占める，対応する通過点が存在する頂点の割合を，編集性を考慮したベクタ変換の評価値であると提案する．なお，ベジエ曲線の通過点は，曲線の頂点以外にも存在しうるが，これは評価には影響を与えない．従って，変換性能自体については，あらかじめ評価しておくこととする．

4. 実験と考察

4.1 曲率と曲線の頂点

デジタル曲線の曲率と，提案手法による曲線の頂点の位置を示す．ここで，パラメータ σ は，1未満にすると微分が成立せず，大きすぎると大局的な頂点しか抽出できない．本稿では予備実験により $\sigma = 1$ ， $th = 1/\pi$ を採用する．

入力画像として，図 2 に示す 344 点の頂点から構成されるデジタル曲線（ドライバー）を用いる．また，得られるベクタ表現を図 3 に示す．

図 4 に入力画像の多角形近似と，輪郭を構成する点番号（代表値）を示す．ここで，小黑点は入力

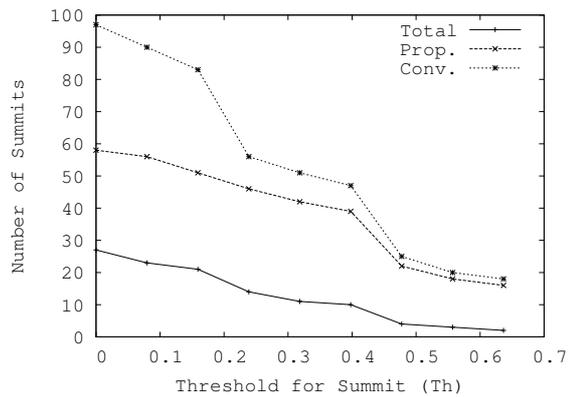


図 7 しきい値と頂点数の関係

Fig. 7 Relation between Threshold and Number of Summits

画像の格子点を表している．したがって，図中の四角は画素ではない．さらに，図 5 に入力画像の点番号と曲率の関係，及び提案手法により定義した頂点の位置を示す．

これらの図より，提案手法により得られた頂点は，入力画像を高精度に近似する尺度における曲線の頂点と一致することが主観的に見て取れる．さらに，曲線の頂点付近には概ね多角形の頂点が位置していることも確認できる．これについては，しきい値を変化させて，かつ従来のベクタ変換手法とも比較して，定量的に検討する．

ただし，曲率が大きくても頂点が連続して検出されている部分が散見される．これは，曲線の向きが変化しているために生じると考えられる．これらの頂点については集約するなどの改善が必要である．

4.2 編集性の評価

提案したデジタル曲線の頂点と，ベクタ変換によって得られるベジエ曲線の通過点について，比較を行う．ベクタ変換の従来手法として Selinger らの手法を用いる．提案した曲線の頂点（Summits），提案手法による通過点（Prop.），従来手法による通過点（Conv.）を図 6 に示す．なお，尺度としきい値は前の実験と同じである．この図より，提案手法は多くの場合曲線の頂点に近い位置に通過点が存在していることが確認できる．一方，従来手法ではほとんどの通過点は曲線の頂点の間に存在していることも確認できる．

次に，しきい値 th を様々な値に変更したときの，

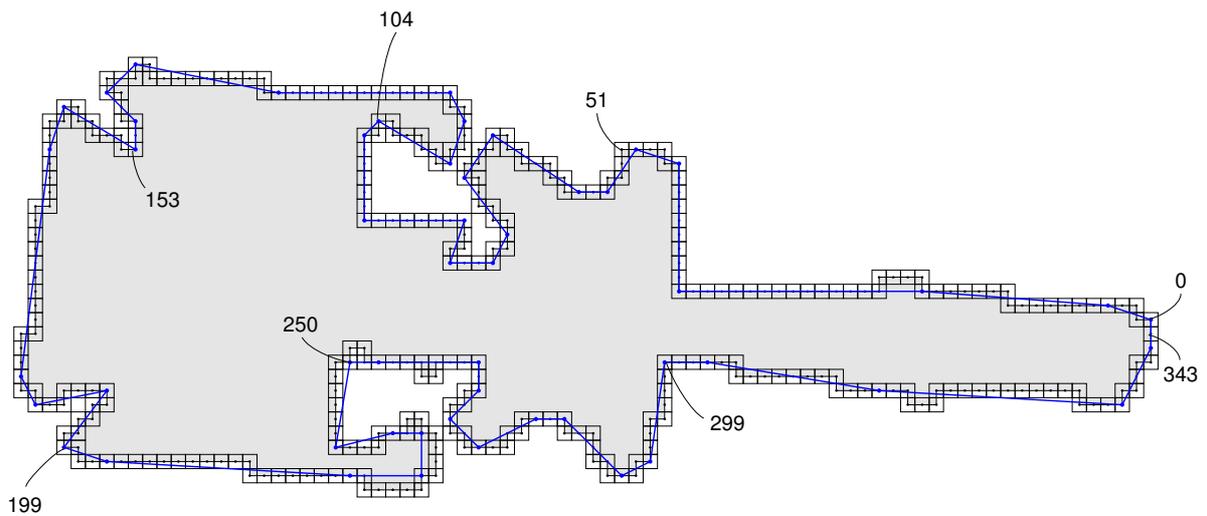


図 4 多角形近似と点番号の関係

Fig. 4 Polygonal Approximation and Indices of Points

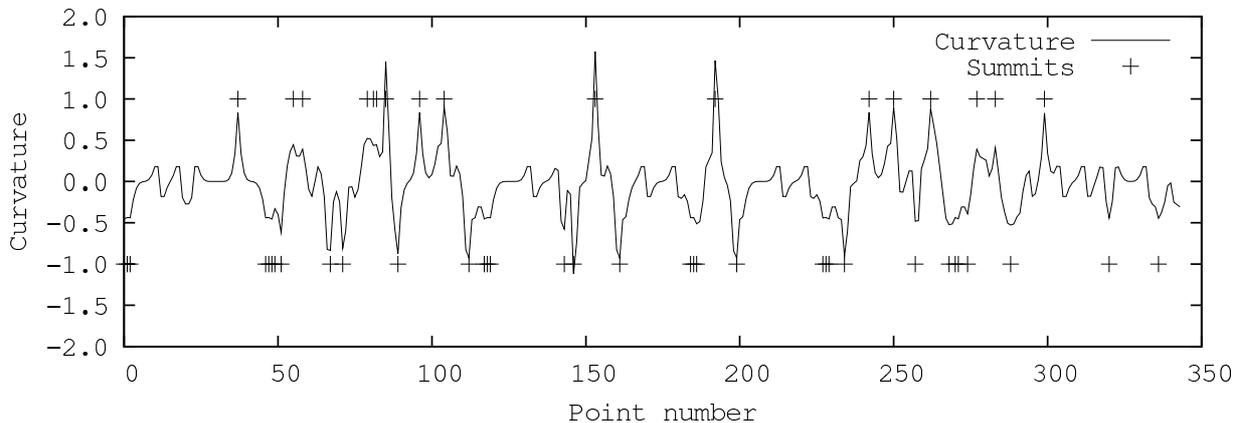


図 5 ドライバーの曲率

Fig. 5 Curvature of "Driver"

検出された頂点の個数，提案手法と従来手法において頂点に対応する通過点の個数の関係を図 7 に示す．この図より，しきい値が小さいと頂点が過剰に検出されることが確認でき，しきい値が大きくと大局的な頂点のみが検出されることが推定される．また，利用可能なしきい値には余裕があり， $\frac{3}{4\pi} \sim \frac{5}{4\pi}$ 程度である．

適切なしきい値を利用した場合，提案手法において曲線の頂点に通過点が存在する割合は 8 割程度である．なお，従来手法でも 2 割程度は曲線の頂点と通過点が一致している．これは，頂点がカーブではなくコーナーと判定された場合と，先に述べたように連続して頂点が検出された場合であると考えられる．提案手法は従来手法に比べて割合

が向上していることから，編集が容易な部分が大幅に増えているといえる．

5. ま と め

3 次ベジエ曲線における再編集のしやすさは，曲線の頂点付近に通過点が存在することに起因する．そこで，我々は曲率が極値となる位置を曲線の頂点とする定義を用いた．なお，離散系における曲率計算は，微分の定義に自由度があるため，曲率尺度空間を用いて尺度を適切に定めた．そして，曲線の頂点座標付近に通過点が存在する割合を，再編集のしやすさを考慮したベクタ変換の評価値をすることを提案した．実験により，適切な尺度を設定することで曲線の頂点と曲率の極値が一致す

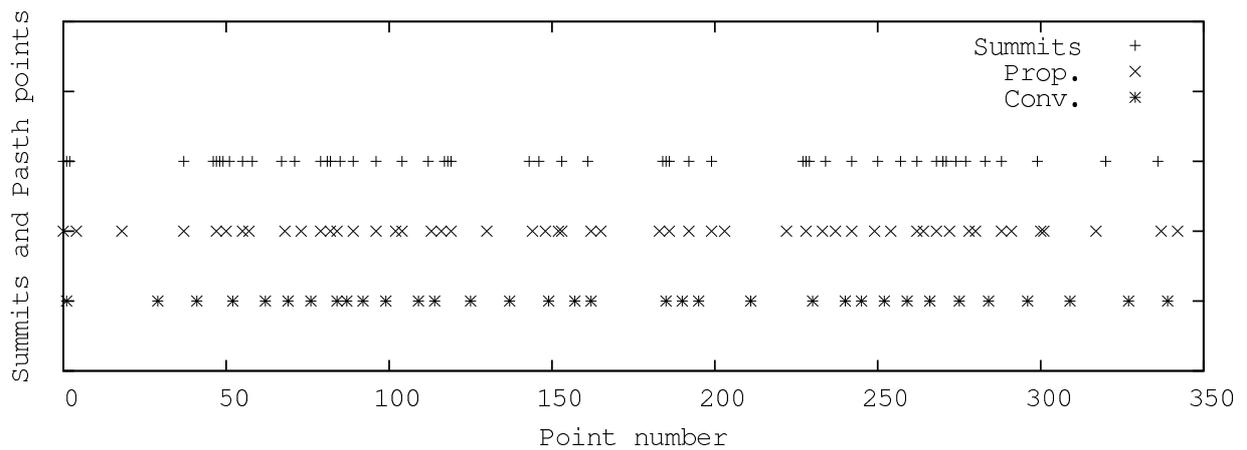


図 6 頂点と通過点の位置関係

Fig. 6 Positional relation between summits and path points

ることを主観的に確認した．さらに我々が提案しているベクタ変換手法は従来からあるベクタ変換手法に比べて多くの部分で通過点が曲線の頂点付近に存在することを明らかにした．

文 献

- [1] 安本 吉雄, Gerard MEDIONI, “B スプライン関数を用いたコーナー検出と曲線表現法,” 信学論 D, Vol. J70-D, No.12, pp.2517–2524, 1987.
- [2] Peter Selinger, “Potrace: a polygon-based tracing algorithm,” <http://potrace.sourceforge.net/potrace.pdf>, 2003.
- [3] 河村圭, 山本勇樹, 石井大祐, 渡辺裕, “ベクター表現による文字や網点を含む画像符号化システム,” 第 68 回情報処全大, 3B-1, Mar. 2007.
- [4] A. P. Witkin, “Scale space filtering,” Proceeding of 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.1019–1022, 1983.
- [5] 佐藤 誠, 和田 俊和, “構造線による一般化波形の階層的表現,” 信学論 D, Vol. J70-D, No. 11, pp.2154–2159, 1987.
- [6] Mokhtarian and Mackworth, “Scale-Based Description and Recognition of Planar Curves and Two-Dimensional Shapes,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 8, no. 1, pp. 34–43, 1986.