

デザインの原理を用いた自由形状のイラスト美化手法

森本 有紀^{1,a)} 高橋 時市郎^{1,2,b)}

受付日 2014年8月1日, 採録日 2015年1月7日

概要: 本稿では, 自由形状のイラストをデザインの原理に基づき美化する手法を提案する. 直線や楕円による単純な描画を美化制約に基づき美化する手法はこれまでにさかんに研究されてきた. しかし, それらの美化制約の自由形状への適応は挑戦的な課題である. 本手法では, 制約付きドロネー三角形分割を用いて, 自由形状における局所的に関連の強い部分を効率的に探索する. また, 本手法では, 平行・滑らかさ・形状類似性・共曲線性, のデザインの原理を美化制約として用い, 自由形状を評価する. 本手法は, 形状評価, 特徴保存平滑化, 形状あてはめの3つのステップによって成り立つ. まず制約付きドロネー分割を行った入力に対して, デザインの原理に基づき形状を評価する. 次に, 形状評価値に, 特徴保存の平滑化処理を行う. 最後に, 形状あてはめでは, 複数の異なるデザインの原理に対して形状エネルギーを最小化し, 最適な形状を生成する. 既存手法との比較アンケートからは, 本手法はより適切な美化ができることが分かった.

キーワード: 非写実的表現, 美化, 曲線, 自由形状

Freeform Illustration Beautification Using Design Principles

YUKI MORIMOTO^{1,a)} TOKIICHIRO TAKAHASHI^{1,2,b)}

Received: August 1, 2014, Accepted: January 7, 2015

Abstract: We present a method based on the design principles for beautifying freeform illustrations. Experiments showed that input illustrations are improved by our method. Although computational models that apply beautification rules to simple primitives have been extensively studied, defining models that apply these rules to freeform shapes remains a challenge. In this study, we use constrained Delaunay triangulation to detect spatially and geometrically related local parts. Then, we combine a novel set of design principles of organic geometries —parallelism, smoothness, shape similarity, and co-circularity—as beautification rules with feature-preserving smoothing, which were independently applied in previous studies. Our method involves three steps: geometry evaluation, diffusion filtering, and fitting. The first step involves the evaluation of geometric properties based on the design principles for constrained Delaunay edges. The evaluation results are then smoothed while preserving their features. Finally, the fitting step finalizes those shapes that are best balanced by minimizing geometric energies among the different design principles. Results from viewer surveys indicate that our method beautifies images adequately compared to the previous method.

Keywords: stylized rendering, beautification, curve, freeform shape

1. はじめに

シンプルなイラストは医療や生物, 教育など, 様々な分

野でよく使われている. たとえば患者は外科的な施術について, 簡略化した図によって簡単に理解することができる. しかしながら, 質の良い図を描画することは, 簡単ではない.

近年, PCではマウス, 携帯電話や小型PCではタブレット型のデバイスがよく使われているが, これらによって思いどおりに描画を行うのは難しい. これまでにCGやCHIの分野で描画された内容を整形する, または美化するたく

¹ 東京電機大学
Tokyo Denki University, Adachi, Tokyo 120-8551, Japan

² UEI リサーチ
UEI Research, Bunkyo, Tokyo 113-0034, Japan

a) yuki@vcl.jp

b) toki@vcl.jp

さんの研究が行われている [1], [2]. これらの研究は主に 2 種類に分けられる. 1つは主に 1D の平滑化処理による方法, もう1つは 2D での線の関係に対して美化制約を適用する方法である. ここで, 1D 平滑化処理による美化手法は, 入力内容をできるだけ損なわないことを 1つの基準としているが, それでは入力内容の信頼性が低い, ノイズがある場合などの美化が難しい. 一方, 2D の美化制約を考慮した既存の美化研究は, 直線や楕円でできたシンプルな図を対話的なスケッチシステムの中で美化するにとどまっている [3], [4], [5]. そこで本研究では, より積極的な美化を目指し, 平滑化処理と美化制約の両方を考慮した, 自由形状の線画を美化する手法を提案する. 美化の対象は, マウスやペンタブレットによって入力された連続した線分で表されるポリラインである. また, 写真から抽出した同じ形式で表される輪郭線も対象とする.

多くのイラストを観察すると, 簡略化され, 誇張されていることが分かる. イラストの美化での課題として, 入力したベクター画像の中で, 強調すべき特徴を探ることがあげられる. そこで本研究では, デザインの原理に基づき, 入力画像の特徴を定義する. デザインの原理 (デザイン原理) とは, デザインを行ううえでの法則, ガイドライン, 人間の志向, および一般的なデザイン論からなる概念である [6]. 特に本手法では, 以下のようなデザインの原理を考慮する. (a) より簡略化された画像は理解しやすい, (b) 平行や形状の類似などの画像内の規則性を見る人に心地良さを与える, (c) 連結していないが 1つの曲線として認知できる線はデザインの複雑さを軽減する. (c) の 1つの曲線として認知できる非連結の曲線を, 共線に対し, 共曲線と呼ぶ. これらの原理に従い, 本手法では描画線の形状の特徴を強調しながら, 簡略化する. 図 1 にデザインの原理の要素を強調する本美化手法の結果を示す. いくつかのデザインの原理はゲシュタルトの法則としても知られている. これは部分的な形状情報から人間がそれらの全体の形や模様, 意味を認知する際の心理的ルールをまとめたものである [7].

本手法では 2次元制約付きドロネー三角形分割 (以下, CDT: constrained Delaunay triangulation) を入力画像に対して行い, その 2D 空間での連結関係を, 形状の評価および平滑化のために使用する. 2次元ドロネー三角形分割は, 平面に点群が与えられたとき, 最も近い頂点間で領域を分割してできるボロノイ領域に対し, 隣接するボロノイ領域の頂点どうしを連結して得られる [8]. CDT は, さらに頂点どうしの連結を部分的に行わない制約を付加するものである. CDT は連結された 3点の外接円が他の点を含まないという性質上, 共曲線性や平行性のある頂点を連結しやすい. このことは実際に線画に対して, ドロネー三角形分割が行われた図などを見ると分かりやすい. 例として, 図 2 の左端のニューロンの図では, ほぼ平行と見なせ

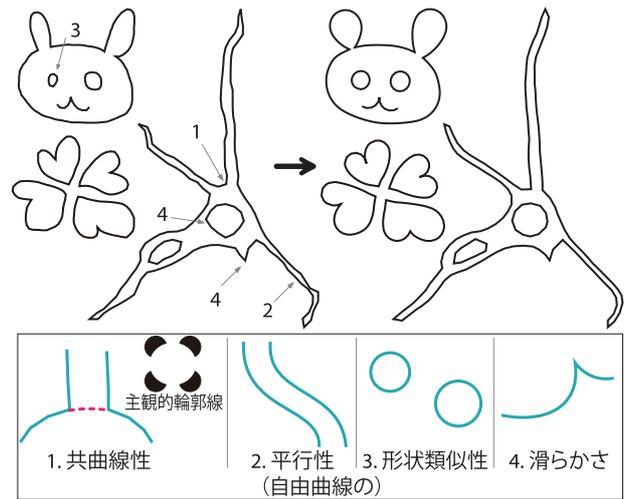


図 1 入力したポリライン (左上), 本手法によって美化されたポリライン (右上), 考慮するデザインの原理 (下). 図は別々に美化を行った 3つの結果を集めたものである

Fig. 1 Original polylines (top-left), the polylines beautified using our framework (top-right), and design principles (bottom).

表 1 美化の対象および基本アルゴリズムの先行研究との比較
Table 1 Comparison of the target and basic algorithms for proposed and previous methods.

アルゴリズムと対象	既存の 2D 美化手法 ¹ [2], [4], [5], [9] ²	既存の平滑化手法 [1], [2], [10], [11]	本手法
1D 特徴保存平滑化	/	○	○
2D 美化制約の適用	○	/	○
自由形状の扱い	/	○	○

¹ 文字を美化する場合もあり, 文字はプリミティブではないが, あらかじめ用意した形状を用いている.

² 例外として, 文献 [9] では自由形状の連結の制約を扱う.

る細長い領域で両側の頂点がドロネー辺によって連結されているのが分かる. 手描きのイラストや写真は多くの類似した特徴を持つ線分によって成り立ち, 全探索による特徴検出では, エラーが発生しやすい. そこで CDT による連結情報をデザインの原理に基づく形状の特徴を評価するために採用する.

本研究の主な新規性を以下にあげる.

- (1) 2D の美化制約と 1D の特徴保存平滑化手法を組み合わせたアルゴリズム
- (2) 形状評価のための CDT による効率的な探索方法
- (3) 事前計算やデータベースなどが不要

表 1 は本研究の新規性に関連して, 先行研究との比較を示すものである. また, 先行研究はスケッチを用いた対話的システムが多いが, 本研究ではできあがった静止画に対する自動的な美化を目的とする.

2. 関連研究

Scientific Visualization は多くの研究分野で重要である.

これまでに NPR 分野では、医療や産業のために 3D 情報を分かりやすくイラスト風に可視化するレンダリング方法が提案されている [12]. 画像処理分野では、画像認識の改善のためにコントラストを上げる手法が提案されている [13].

いくつかの対話的な描画整形手法ではクロソイド曲線によるあてはめが行われている [10], [11], [14]. クロソイド曲線 (またはオイラー曲線) は美的曲線として知られる, 曲率が線の長さに対して線形に変化する曲線である. これらの研究では, 手描きの描画線を部分的なクロソイド曲線と弧, 直線の 3 つで近似する. 弧と直線の曲率は一定, または 0 である. また, Thiel らは *Elasticurves* という描画速度によって描画線の平滑化の度合いを決める手法 [1] を提案した. これらの手法では, ポリラインの 1D 上の連結での鋭角などの特徴を保持した, 線の平滑化が基本となっている. 他に, Zitnick は 2013 年に自由形状の美化に関する手法を提案した [2]. この手法では, 類似の手描きの形状は平均することによってより良い形状になると仮定しており, 広義では特徴保存平滑化を基礎とした手法に分類できる. しかし, この手法では, 曲線近似ではなく, 手描き形状どうしの平均化を行っているため, 円のような完璧な形状は生成されにくい.

本手法もクロソイドによる先行研究と似たコンセプトに基づいているといえる. 本手法では, 魅力的なイラストは曲率だけでなく, 複数の滑らかな形状評価値の変化を持つ線によって構成されているという仮定に基づいている. 複数の形状評価値を考慮することにより, 平滑化の際の効果的な特徴保存を実現する.

2D の美化手法はスケッチインタフェースとともに研究されてきた [3], [4], [9], [15]. Igarashi らの対話的美化手法 [5] では, 描画の過程で, すでに描画した線と新しく描画する線を比較することで, 対称・平行・端点の接続などの幾何学的制約を考慮した再配置の手法を提案した. また, 文献 [9] の美化手法では共線性を考慮した. しかしながら, これらの研究は直線と楕円の組合せなどのとてもシンプルな図形のみを扱っている.

Eigensatz らは 3D 形状を, 曲率の操作によって直接編集できる方法を提案した. 彼らのアルゴリズムは曲面の主曲率を評価することで曲率領域へ曲面をマップし, フィルタリング処理や編集を行い, 最適化を行うことで曲面の再構成を行った. 部分的な近似 [10], [11], [14] による手法とは違い, 本手法では Eigensatz らの曲率領域での処理と Ohtake らの手法を組み合わせる. Ohtake らの手法は非線形の拡散で [16], 形状の値を強調し, 分割する. 線の分割は 1 つのタスクであるが [15], 本手法では, 弧・直線・鋭角・滑らかな線, を特別な分割処理を用いずに生成する. さらに, 本手法では曲率以外の形状値も直接処理する.

共曲線性は錯視として知られる主観的輪郭線に似ている. これは独立した線や輪郭線が連結しているように見え

る現象である. Williams らは線の存在する確率場として主観的輪郭線を表現したが, ぼんやりとしたものであった [17]. 曲線性は平行性や近接性などとともにラスター画像をベクトル化するために使われる特徴である [18]. Nan らは形状類似性, 近接性, 規則性, 連続性, 閉鎖性, などのゲシュタルトの法則を考慮した, 建築物の描画を抽象化を行った [19]. 連続性と閉鎖性は共線性に含まれる. 提案手法のコンセプトは本手法と似ているが, 建築物の抽象化に着目している部分が異なる. Fu らは線画の静止画からその適切な描画順を自動で生成する手法を示した [20]. 本手法では, 認知的に連結している線を見つけるために, Fu らの連結スコアの計算をベースとしている.

美化に関する興味深い研究として, Leyvand らが提案した人間の顔写真をより魅力的に変形するものがある [21]. 顔の形状データと主観評価によってその美しさを評価した値に基づいた最適化手法により, 画像変形を行った. このように美化手法にはデータベースとその学習に基づくものもあり, 効果的であるが, 対象が絞られるなどの課題がある.

3. 自由形状のイラスト美化手法

美化の処理は以下の流れで行う.

- (1) 入力 — 本手法では, ユーザのマウスによる描画, または, 画像からの輪郭線抽出によって得られる 2D の連続した点 (ポリラインとする) を入力とする. ここでの入力は, 線分の集まりで自由形状を表すものであり, 閉じたもの/開いたもの, 交差, 複数のポリラインの集合, を含む. 写真から輪郭線を抽出する場合, OpenCV の `cv::findContours` により, 写真から輪郭線を抽出する. この際, 輪郭近似のアルゴリズムは文献 [22] を採用した.
- (2) 再サンプリング — 入力したポリラインは鋭角な特徴点間で等間隔になるように再サンプリングを行う. 鋭角な点は閾値を下回る角度を持つ点とする.
- (3) CDT — ポリラインの頂点を入力として, CDT を行う. このとき, 入力線の外側も処理の領域に含めるかどうか, ユーザが選択することで CDT の制約を付加する.
- (4) 形状評価 — すでに述べた複数のデザインの原理によって, 各頂点で形状値を評価する.
- (5) 特徴保存平滑化 — 評価された形状評価値に重み付き平滑化を行う.
- (6) 形状あてはめの最適化 — 入力形状を拡散した形状値にあてはまるように最適化する.

(2)~(6) はユーザが満足するまで繰り返す. このとき, 鋭角の抽出は再サンプリングのためだけに行われ, 拡散や最適化の処理には必要ない.

本研究では, 良いイラストには, 以下のような特徴を持つ

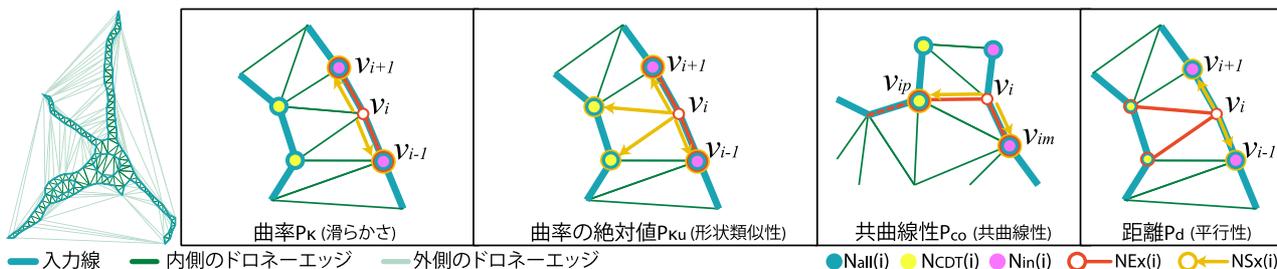


図 2 CDT を用いた形状特徴の評価と平滑化のための頂点 v_i におけるパス。括弧内は対応するデザイン原理を示す。赤い点線は同じ共曲線部分の残りの頂点を示す

Fig. 2 Examples of paths for evaluating and filtering geometric properties on vertex v_i . The parentheses indicate the corresponding design principles, and the red dashed line denotes another vertex on the indicated co-circular part.

線が局所的によく見られると想定する。また、それらの評価の値と平滑化の近傍の定義を以下のように行う (図 2)。

- 滑らかさ (鋭さ)：曲率として計算され、入力線上で評価および平滑化を行う。
- 形状の類似性：曲率の絶対値として計算され、入力線上で評価し、入力線と CDT 上で平滑化を行う。
- 共曲線性：曲率として計算され、CDT 上で評価され、さらに抽出された共線部分で平滑化を行う。
- 平行性：距離として計算され、CDT 上で評価され、入力線上で平滑化を行う。

形状の評価は、入力線の各頂点ごとに行う。入力頂点の集合 $\mathcal{V} = \{v_i : i = 1, \dots, m\}$ 。このとき頂点は $v_i \in \mathbb{R}^2$ 、 m は頂点の総数である。 $N_{all}(i)$ 、 $N_{in}(i)$ 、 $N_{CDT}(i)$ は v_i に連結する頂点の集合であり、それぞれ、連結するすべての頂点、入力線で連結するすべての頂点、CDT で連結するすべての頂点とする。 NEx_x と NSx_x はそれぞれ各デザイン要素を評価および平滑化するための v_i に連結する頂点の集合である。ここで $x \in \{\kappa, \kappa_u, co, d\}$ であり、 κ 、 κ_u 、 co 、 d は曲率、曲率の絶対値、共曲線性、距離を示す。

本手法では、各美化制約に基づく形状の評価計算や平滑化処理において、隣接点を用いる。しかし端点など、連結頂点の集合に評価のための隣接点が存在しない場合は、評価の計算は行うことができない。このとき、平滑化の処理ではノイマン境界条件に従うように、端点の値は入力線上で隣接する頂点の平滑した値と同じとする。また、最適化計算では評価値が必要であるため、平滑化処理と同様に、端点では隣接点と同じ評価値とする。

3.1 形状の評価方法

離散曲率 各頂点の曲率は入力線上で連続する 3 頂点 v_{i-1} 、 v_i 、 v_{i+1} から計算される。正弦定理より、離散曲率 $P_\kappa(i)$ は以下のようにスカラー値として計算する。

$$P_\kappa(i) = \frac{2|\vec{v}_i v_{i+1} \times \vec{v}_i v_{i-1}|}{|\vec{v}_i v_{i+1}| |\vec{v}_i v_{i-1}| |\vec{v}_{i+1} v_{i-1}|} \quad (1)$$

ここで \times は外積を表す。曲率の絶対値は $P_{\kappa_u}(i) = |P_\kappa(i)|$

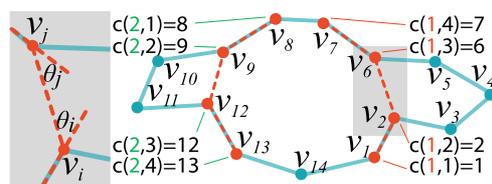


図 3 左の灰色の図は連結スコアの計算を示す。右図は共曲線部分の頂点番号の集合 $c(k, l)$ を示す。ここでは $r = 2$ である

Fig. 3 Gray panel shows how the score of connectivity $connect(i, j)$ is evaluated. Other parts illustrate index sets of co-circular vertices $c(k, l)$. Here the index of co-circular region r is 2.

とする。形状の見かけは頂点の順番 (昇順/降順) によらず、曲率の大きさによるので、曲率の絶対値は形状の類似性を計算に用いる。向きの異なる形状でも曲率の大きさによって類似形状と判断することができる。このように、曲率評価の連結頂点の集合 NEx_κ は v_{i-1} 、 v_{i+1} であり、曲率の絶対値の評価の連結頂点の集合 NSx_{κ_u} と一致する。

この曲率の求め方は、曲率の定義 (曲率半径の逆数) に従ったものであるが、離散系においてはスケールに対して不変ではない。しかしサンプリング間隔の違いを考慮することができる。サンプリング間隔のわずかなばらつきによって、曲率は大きく変わる。スケール不変な方法としては、CSS (Curvature Scale Space) [23] と呼ばれる曲率の多重解像度解析を用いた方法が代表としてあげられるが、本手法では計算負荷の軽減のため、このような計算方法を用いる。他に、角度の差分から曲率を求める方法によっても、計算負荷も軽く比較的正確な曲率が求められるが、サンプリング間隔のばらつきなどを考慮することができない [24]。

離散共曲線性 共曲線の連結頂点の集合 NEx_{co} をまず連結スコアによって N_{CDT} から見つけ、次にその共曲線性の値を求める。連結スコアは、Fu [20] の手法と同様に、 $connect(i, j) = (\theta_i + \theta_j)^2 / |v_i - v_j|$ 、 $j \in N_{CDT}(i)$ で計算される。 θ_i と θ_j は v_i と v_j の線と、それらと連結する線との角度を表す (図 3)。このとき、以下に該当する頂点 v_i

は共曲線から除外する.

- (1) $|v_i - v_j| > thr_{close}$
- (2) $\angle v_i > thr_{sharp}$
- (3) $connect(i, j) > thr_{detect}$
- (4) v_i に複数の共曲線がある場合, 連結スコアが最小でないもの

$\angle v_i$ は入力線上で連続する v_{i-1}, v_i, v_{i+1} の角度である. また, 他の入力した線との間の CDT エッジをここでの計算対象にするかどうかをユーザが選ぶ. 残った共曲線部分は処理に必要な近傍を含めた頂点番号の集合 $c(k, l) \in k = 1, 2, \dots, r$, このとき $l = 1, 2, \dots, 4$ として格納する. 1つの集合は平滑化のため2点の曲率が必要なため, 4点が必要である. r は抽出する共曲線の数である (図 3). $\mathcal{N}_{\mathcal{E}_{co}}(i)$ は $c(k, l)$ から i の両隣を抽出したものである. 本稿に示す結果の生成では, $thr_{close} = 10$ (pixel), $thr_{sharp} = 0.8\pi$ (radian), $thr_{detect} = 35$ としている.

共曲線性 $P_{co}(i)$ は曲率として計算する. 曲率の式 (1) と同様に次式で計算する.

$$P_{co}(i) = \frac{2|\vec{v}_i \vec{v}_{ip} \times \vec{v}_i \vec{v}_{im}|}{|\vec{v}_i \vec{v}_{ip}| |\vec{v}_i \vec{v}_{im}| |\vec{v}_{ip} \vec{v}_{im}|}. \quad (2)$$

このとき, im, i, ip は c 上で連結する頂点番号で, $im = c(k, l - 1)$, $i = c(k, l)$, $ip = c(k, l + 1)$, である (図 3 右).

離散距離 距離は平行性を高めるために評価する. まず, $\mathcal{N}_{CDT}(i)$ から, 以下の条件を満たす平行な近傍頂点の集合 $\mathcal{N}_{\mathcal{E}_d}(i)$ を抜き出す.

$$\angle I = \begin{cases} |\angle \vec{v}_i \vec{o}_i \vec{v}_i \vec{v}_j| & (|\angle \vec{v}_i \vec{o}_i \vec{v}_i \vec{v}_j| < \pi/2), \\ \pi - |\angle \vec{v}_i \vec{o}_i \vec{v}_i \vec{v}_j| & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

$$\angle J = \begin{cases} |\angle \vec{v}_j \vec{o}_j \vec{v}_i \vec{v}_j| & (|\angle \vec{v}_j \vec{o}_j \vec{v}_i \vec{v}_j| < \pi/2), \\ \pi - |\angle \vec{v}_j \vec{o}_j \vec{v}_i \vec{v}_j| & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

$$\angle O = \begin{cases} |\angle \vec{o}_i \vec{v}_i \vec{o}_j \vec{v}_j| & (|\angle \vec{o}_i \vec{v}_i \vec{o}_j \vec{v}_j| < \pi/2), \\ \pi - |\angle \vec{o}_i \vec{v}_i \vec{o}_j \vec{v}_j| & (\text{otherwise}). \end{cases}$$

のとき

$$\angle I < thr_{dist}, \quad \angle J < thr_{dist}, \quad \angle O < thr_{dist}.$$

ここで, o_i は v_{i-1}, v_i, v_{i+1} の外接円の中心である (図 4). 本稿で示す結果生成では, $thr_{dist} = \pi/3$ (radian) とした. 距離 $P_d(i)$ は頂点 v_i と $\mathcal{N}_{\mathcal{E}_d}(i)$ に含まれる頂点 v_j のユークリッド距離の平均である. $|\mathcal{N}_{\mathcal{E}_d}(i)|$ は近傍頂点の数であり, 距離 $P_d(i)$ は次式で評価される.

$$P_d(i) = \sum_{j \in \mathcal{N}_{\mathcal{E}_d}(i)} \frac{|v_i - v_j|}{|\mathcal{N}_{\mathcal{E}_d}(i)|}.$$

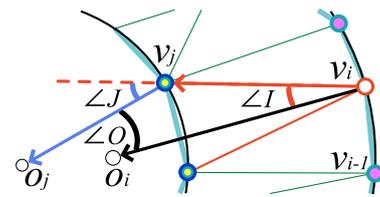


図 4 平行な頂点の抽出

Fig. 4 An illustration for detecting parallel vertices.

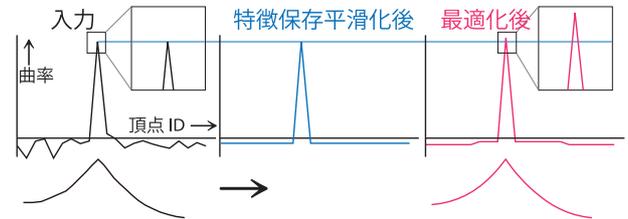


図 5 特徴保存平滑化と最適化によって強調される形状値の例. 黒線は入力線とそれに一致する曲率を示す. 青線は特徴保存平滑化された曲率, ピンクの線は平滑化された値に最適化した形状とその曲率である. 例では, 入力時の最大曲率が最適化後に強調されている

Fig. 5 Enhanced geometry value by repetition of the filtering and optimization processes. The black lines show an input and its corresponding curvature. The blue and pink lines denote the diffused input and the fitted (optimized) output, respectively. Notice that the maximal value is enhanced at the output.

3.2 特徴保存平滑化

ここでは, 評価された各形状評価値を重み付き平滑化することによって, 最適化の際の目指す値を生成する. 本ステップは Ohtake らの手法 [16] と似ているが, 3D メッシュでなく 2D を対象としている点と, その評価が法線ではなくデザインの原理に基づいた形状評価値である点で異なる. よって, 形状評価値が近い場合はこの処理によって平滑化され, 逆に形状評価値に差がある場合は, 平滑化されずそのまま残される. つまり自然と形状を分割して処理する操作になっている. また, 値が鋭角な頂点は最適化の処理と合わせると強調されて, 元より鋭角になる傾向にある (図 5). 処理は以下の式に従って行われる.

$$P'_x(i) = \frac{1}{\sum \omega(i, j)} \sum_{j \in \mathcal{N}_x(i)} \omega(i, j) P_x(j),$$

$$\omega(i, j) = \exp(-\alpha K^2),$$

$$K = \frac{|P_x(i) - P_x(j)|}{|v_i - v_j|}.$$

このとき $x \in \{\kappa, co, d, \kappa_u\}$, $P'_x(j)$, $P_x(j)$, α は平滑化された値, 形状値, 任意の正の定数である. α は平滑化の度合いの調整パラメータである.

このとき, 曲率平滑化の連結頂点の集合 \mathcal{N}_{S_κ} は \mathcal{N}_{in} と, 曲率の絶対値の平滑化の連結頂点の集合 $\mathcal{N}_{S_{\kappa_u}}$ は \mathcal{N}_{all} と, 共線性の平滑化の連結頂点の集合 $\mathcal{N}_{S_{co}}$ は $\mathcal{N}_{\mathcal{E}_{co}}$ と, 平行性の平滑化の連結頂点の集合 \mathcal{N}_{S_d} は \mathcal{N}_{in} それぞれ一致する.

3.3 形状あてはめのための最適化処理

最適化処理では、曲率エネルギー E_κ 、距離エネルギー E_d 、共曲線エネルギー E_{co} 、類似エネルギー E_{κ_u} は以下のよう

$$E_\kappa = \sum_{v_i \in \mathcal{V}} (P_\kappa(i) - P'_\kappa(i))^2,$$

$$E_d = \sum_{v_i \in \mathcal{V}} (P_d(i) - P'_d(i))^2,$$

$$E_{co} = \sum_{v_i \in \mathcal{V}_{co}} (P_{co}(i) - P'_{co}(i))^2,$$

$$E_{\kappa_u} = \sum_{v_i \in \mathcal{V}} (P_{\kappa_u}(i) - P'_{\kappa_u}(i))^2.$$

また、入力したポリラインの頂点位置と頂点間隔のエネルギーを変形前と変形後の差分の自乗として定義する (E_p , E_{in})。ここで $\mathcal{V} = \{v_i\}$ は頂点の集合、 $\mathcal{V}_{co} = \{v_{c(i,j)}\}$ は各共曲線部分である。最適化するエネルギーは以下のように各エネルギーの総和として定義される。

$$E = [k_\kappa k_d k_{co} k_{\kappa_u} k_p k_{in}] [E_\kappa E_d E_{co} E_{\kappa_u} E_p E_{in}]^T. \quad (3)$$

このとき、最適化の係数 k_κ , k_d , k_{co} , k_{κ_u} , k_p , k_{in} はユーザによる任意の値であり、各美化制約に重み付けができる。美化後の頂点集合 $\mathcal{V}' = \{v'_i : i = 1, \dots, m\}$ は式 (3) で定義されたエネルギーを最小化することによって求める：

$$\mathcal{V}' = \underset{\mathcal{V}}{\operatorname{argmin}} E. \quad (4)$$

この最適化計算は、各形状評価値からなる目的関数が非線形なので、非線形最小自乗問題となる。ここでは Levenberg-Marquardt 法 [25] によって、最小化問題を解く。繰返し計算によって逐次更新される頂点位置を用い形状評価値 P_x も更新される。エネルギー関数 E の更新の差分が十分小さくなったとき、解が収束する。

4. 結果

提案アルゴリズムは Windows Vista デスクトップ PC, Intel Core i7 3.2 GHz processor, 3.0 GB メモリで実装されている。表 2 に実験に用いた設定および計算時間を示す。実験での 1 回の美化処理は 0.2 秒以内であった。計算時間は入力頂点数以外に、適用する美化制約の数に依存することが観察された。

開曲線の平行性 (設定 A, B, C) ほとんど平行な 2 本の曲線に対して表 2 の設定 A, B, C を用いて美化を行い、比較を行った (図 6)。曲率の最適化を行う設定 A では、入力線が十分滑らかであることから、ほとんど変形しなかった。距離の最適化を行う設定 B では、美化後の距離がほぼ等しくなったが、滑らかでないため、見かけの平行性は改善されていない。曲率と距離の最適化を行う設定 C では、距離と曲率の両方が滑らかになり、平行な見かけが得られ

表 2 実験に用いた設定. (/) は 0 を表す

Table 2 Experimental configurations and computational time. (/) denotes zero entries.

図	k_d	k_κ	k_{co}	k_{κ_u}	k_p	k_{in}	総頂点数 平均 頂点間距離 重 み α	1 ステップ あたりの時 間 総ス テップ数
A	/	10^3	/	/	/	/	24 20.13	0.09sec 1
B	10^{10}	/	/	/	/	/	900	0.04sec 5
C	10^{-3}	10^3	/	/	/	/		0.06sec 5
D	/	10^8	/	/	/	/	57 24.93	0.18sec 14
E	10^{10}	/	/	/	.01	/	900	0.2 sec 5
F	/	10^8	/	/	/	500	60 23.5	0.16sec 40
G	/	/	10^{10}	/	/	500	10^4 (共曲線性 の場合 $*10^{-4}$)	0.19sec 4
H	/	10^8	10^{10}	/	/	500		0.19sec 8
I	設定 D と同じ						39 19.52	0.08sec 8
J	/	/	/	10^{10}	/	/	9000	0.08sec 27

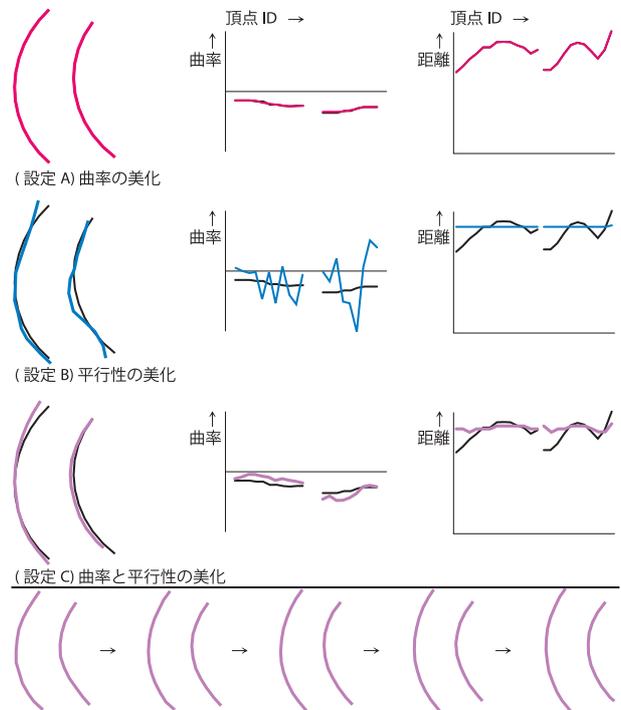


図 6 平行性美化の実験結果と比較. 黒線は入力線, 中と右の列のグラフはそれぞれ頂点の順 (描画順) の曲率と距離を示す

Fig. 6 Example of parallel optimization. Black lines indicate inputs. The central and right graphs show curvature and distance, respectively, along the sequential vertex indices. The bottom row shows examples of conf C during a course of optimization steps.

た。図 6 下段は設定 C による実験の経過を示す。

閉曲線の平行性 (設定 D, E) 表 2 の曲率の最適化と距離の最適化の設定 D と E を交互に用いた実験を行った。実験はほぼ平行な 2 本の閉曲線に対して行った (図 7)。この結果、両方を美化し、平行な見かけとなった。また、複数の最適化を一度に適用するより、このように単一の最適化を交

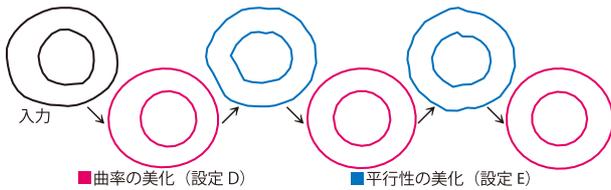


図 7 平行な閉曲線の実験の経過. 設定 D と E を交互に適用した
Fig. 7 Experimental results of parallel closed curves. The conf D and E processes are applied in alternate iterations.

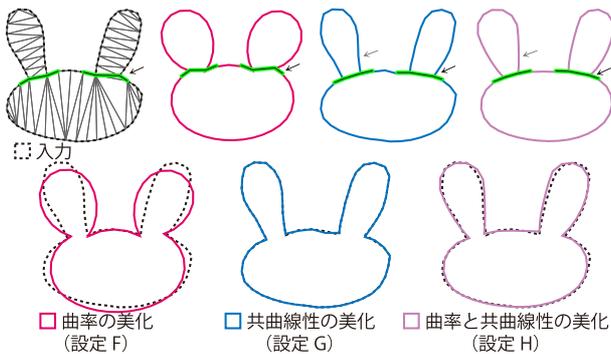


図 8 共曲線性美化の実験結果と比較. 設定 F, G, H を用い, 滑らかさ, 共曲線性, 滑らかさと共曲線性の両方, を最適化した結果の比較である. 黒い実線は CDT のエッジ, 緑の線は共曲線として抽出された部分である
Fig. 8 Experimental results of co-circularity, obtained by three configurations. The black lines are the inputs, gray lines are Delaunay edges, and the green lines are detected co-circular parts.

互に用いる方が, 設定が容易であるという知見が得られた.

共曲線性 (設定 F, G, H) うさぎの顔のシルエットのような入力線に対し, 表 2 の設定 F, G, H を用いて, 共曲線性を美化する実験を行った (図 8). 曲率の最適化を行う設定 F では, 曲率が滑らかになり, 角が鋭角になっているが, 耳の根本部分の共曲線の滑らかさは失われた. 共曲線性の最適化を行う設定 G では共曲線部分のみが滑らかになったが, 共曲線性と曲率の両方の美化を行う設定 H では, 共曲線部分とその他の部分が滑らかに連結された結果となった.

形状類似性 (設定 I, J) 半径の異なる手描きの 2 つの丸を入力線として実験を行った (図 9). 曲率の最適化を行う設定 I は単に滑らかな結果を生成するのにに対し, 曲率の絶対値の最適化を行う設定 J では, 滑らかになると同時に, 2 つの丸がほぼ同じサイズとなった. 曲率の絶対値の最適化は離れた領域の形状の類似性を高めることが分かった. この処理では数値的には円の半径を揃えるものであるが, 図 12 上段に示すような, 角の角度や, 楕円形の両側の形状を揃える効果がある.

ベクター画像への応用 本手法を写真に応用した. 閉曲線

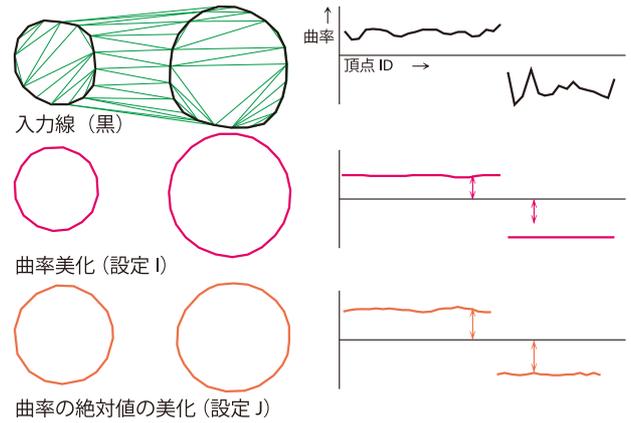


図 9 類似性美化の実験結果と比較. 緑の線は CDT エッジを示す
Fig. 9 Experimental results of two different similarity optimization algorithms. Green lines indicate Delaunay edges.

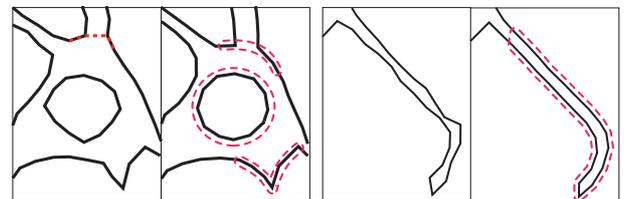


図 10 入力画像と本手法による美化結果の一部を拡大して比較したもの. 一番左の画像の赤の点線は共曲線として抽出された部分を表す. 左の 2 つは共曲線性と滑らかさ, 鋭さ, 右の 2 つは平行性の比較である
Fig. 10 Enlarged original polylines and the results of our image enhancement. The red dashed lines in the left-most panel indicates a detected co-circular part. The left pair compares co-circularity, roundness, and sharpness between the original and resulting images, while the right compares parallelism.

の平行性の実験と同様に, 表 2 に示された複数の係数の設定を, ユーザが適宜選択して適用した. 図 1, 図 10 のニューロンはその例である. 結果画像はデザインの原理に基づき美化されていることが分かる.

ユーザにより逐次パラメータ調整を行う方法は, 一括した事前のパラメータ調整と置き換えることも可能である. ただし, 対話性を除外した処理の場合, 適したパラメータを得るための試行回数は増えると考えられる.

先行研究との比較 クロソイド曲線によるフィッティングを用いた先行手法 [10] と本研究による結果を比較したものを図 11 に示す. 本手法が形状の平滑化と強調を適切に行っていることを確かめるため, 先行研究による結果を 2 種類用意した. 1 つはより平滑化されたもの, 1 つはより詳細を残したものである. 図 11 の Baran らによる結果では曲線補間によって解像度が変化しているが, 本手法では元の解像度を保ったため, Baran らの結果は本手法の 3 倍以上の解像度である. しかしながら結果からは, 本アルゴリズム

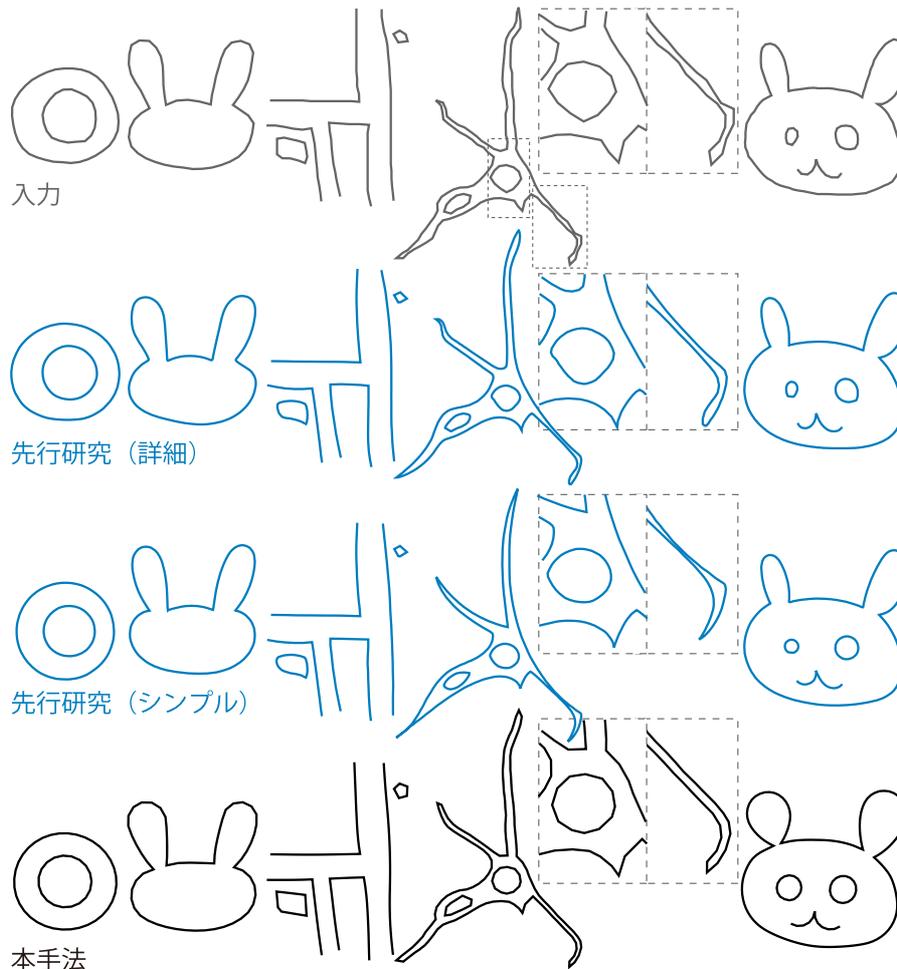


図 11 先行研究との結果の比較. 入力画像 (灰色), Baran らの手法による詳細を残した結果 (青色上段), 同滑らかな結果 (青色下段), 本手法による結果 (黒色)

Fig. 11 Original image (gray line), the result obtained from the method of Baran et al. (blue line), and result of the proposed method (black line). The lengths between vertices in our image are three times those in the blue image. Regardless of number of vertices, the parallelism, co-circularity, and shape similarity are enhanced in our results.

ムはイラストの美化において有効であることが分かる. そのほかに, 手描きスケッチを美化した結果を図 12 に示す.

先行研究との比較にあたり, 表 1 に示したように, 自由形状を対象とした美化制約を課す既存研究は存在しないため, 入力の条件を揃えるために, 美化制約は扱わないが自由形状を対象としている Baran らの手法との比較を行った. 美化制約を行っている分, 本手法の結果が良いのは明白であるが, 比較によってより効果を明確にすることができる.

比較のための結果生成に使用した本手法の処理の順番と, その際の最適化の係数の組合せのいくつかの例を, 表 2 の記号を用いて, 以下に示す. 図 11 一番右の動物の顔のイラスト: HFJF, 同図真ん中の地図のイラスト: HFBFBF, 図 12 の上段右上および右下: AAAJJJ.

アンケート評価 5 種類の入力画像に対し, 本手法および Baran らの手法で美化した画像をそれぞれ用意し, 質問を

行った. 質問は (1) きれい・美しい, (2) 単純になっている, (3) 図として整っている, (4) 構成が分かりやすい, (5) 個人的に好み, の項目に対し, よりあてはまる方を選ぶものであった. また, 図 11 と同様に, 比較対象がより平滑化されたものと, より詳細が残ったものの 2 種類を用意し, それらを用いた 2 種類の比較対象の異なるアンケート調査を実施した. 前者は 35 名, 後者は 43 名の回答を得られた. 回答者の年齢は 19~43 歳, 11%が女性であった.

比較結果に対し主観評価アンケートを行った結果では, 「きれい・美しい」や「個人的に好み」などのほか, 特に「図として整っている」や「構成が分かりやすい」というイラストとして重要な項目において, 本手法は良い評価を得た.

5. 考察と今後の課題

本研究の実験を通して, CDT は効果的な共曲線部分の検

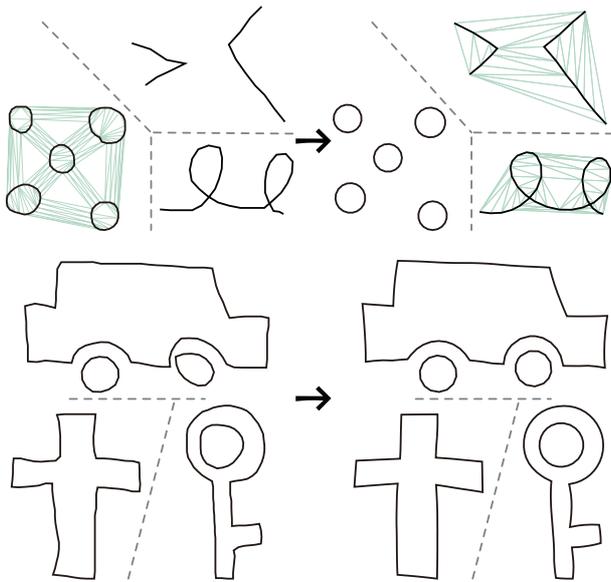


図 12 マウスで描画した線とその美化結果. 上段は曲率と曲率の絶対値を用いた処理によるもの. 下段は曲率と共曲線性を用いた処理によるもの

Fig. 12 Experimental results of two different similarity optimization algorithms. Green lines indicate Delaunay edges.

出に役立つことが分かった. また, 平行線においても, 他点を含まない外接円上の 3 点を連結する性質上, 平行線を連結する場合をよく観察できた. 本研究の実験において, 線の振動が非常に大きいなど以外では, あまり問題は観察されなかった.

しかしながら, 特徴抽出の計算がノイズのせいでうまくいわずに, 期待していない共曲線が抽出されたり, CDT の潜在的な問題として, 期待している連結がされなかったりするなどの問題がある (図 13). 図 13 左上の例では, 赤い破線の部分が自動的に共曲線として抽出される. ユーザが青い破線の部分を共曲線として指定した場合, ユーザの期待する美化の結果が得られる. 上段右から 2 番目の例は自動的な共曲線の抽出がうまくいかなかった場合を示す. 上段一番右の例は, 形状類似性による美化が失敗し, 類似していない箇所を類似させる結果となってしまったものである. このような失敗は, 類似しているかどうかを判断する特徴保存平滑化の係数の調整不足によるものと考えられる. 同様のことが他の美化制約でも起こりうる. 下段では, 緑線が期待する共曲線だが, 実際には, 赤い破線で示される入力線や他のドロネー辺の連結により, 期待する共曲線が得られない場合を示す. 今後, このような問題にも対応したい.

サンプリング間隔に関しては, 大きくしすぎると形状の特徴をとらえることができないが, 小さすぎると平滑化の影響範囲が小さくなり変形が小さくなる. サンプリング間隔により平滑化の影響範囲を変更するなどの対処が考えられる. 他に微妙な間隔の違いが変形の結果に大きく影響す

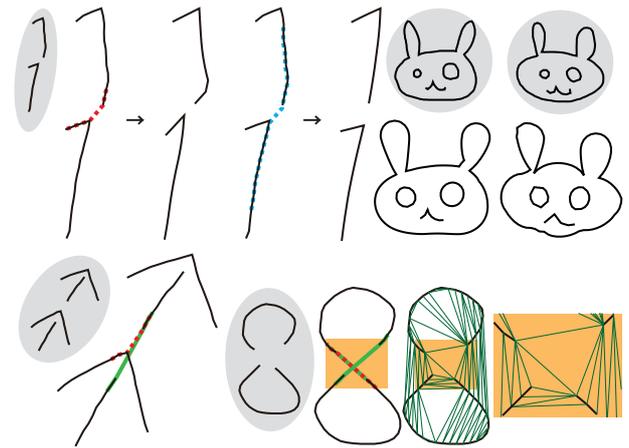


図 13 本研究の課題. 期待していない共曲線部分の抽出 (上段) と CDT エッジが連結されない場合 (下段). 灰色の領域が各入力線を示す

Fig. 13 Limitation. Unexpected co-circular lines.

るなども課題である. 曲線を近似できる最低限の解像度で近似を行い, また, 最終的には曲線補間をすることでより良い結果を得ることができただろう.

その他の課題として, 共曲線や平行の抽出の精度を上げることと, 最適化の要素どうしの衝突を回避するアルゴリズムの開発があげられる. 曲率の計算方法についてもさらに精度の良い方法を検討したい. また, 最適化のパラメータの無次元化, 部分的に異なるパラメータを設定する, などもパラメータ調整を行いやすくするうえでの課題である.

本手法では, 形状類似性を判断するために曲率の絶対値を用いた. しかしながら, ノイズの多い線に対して曲率の絶対値で平滑化を行うと, 曲率の総和が元より大きくなり, より湾曲した結果になる場合がある. 形状類似性の判断には曲率に -1 を乗算した値を用いる方法などを今後検討する.

特徴保存平滑化に基づく関連研究の基準の 1 つとして, 処理結果が入力頂点から離れすぎないことを 1 つの重要な制約としている. 本手法でも, パラメータでそのような制約を課することができる. しかし, 大きな変形を許さない実験では, 美化の度合いが制限され大幅な美化を行うことができない. 今後の研究で, 美化の度合いと処理の制限の調和を実現したい.

6. まとめ

本稿では, 自由形状のイラストを美化する手法を提案した. また, 美化に必要な形状特徴の抽出に, CDT を用いた効果的な方法を提案した. 今後, さらに複雑なイラストを美化する手法へ発展したい.

謝辞 本研究の初期段階において有効な助言をくださった大竹豊准教授, 森口昌樹助教, また, 研究のまとめの段階でご助力いただいた安東遼一博士, 杉田純一助教に感謝する. 本研究の一部は東京電機大学総合研究所から支援

(Q13J-03) を受けて行われた。

参考文献

[1] Thiel, Y., Singh, K. and Balakrishnan, R.: Elasticurves: exploiting stroke dynamics and inertia for the real-time neatening of sketched 2D curves, *Proc. 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11*, pp.383–392, ACM (2011).

[2] Zitnick, C.L.: Handwriting Beautification Using Tokens Means, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.32, No.4 (2013).

[3] Zeleznik, R., Bragdon, A., chi Liu, C. and Forsberg, A.: Lineogrammer: creating diagrams by drawing, *UIST'08: Proc. 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.161–170 (2008).

[4] Cheema, S., Gulwani, S. and LaViola, J.: QuickDraw: improving drawing experience for geometric diagrams, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12*, pp.1037–1064, ACM (2012).

[5] Igarashi, T., Matsuoka, S., Kawachiya, S. and Tanaka, H.: Interactive beautification: A technique for rapid geometric design, *Proc. 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '97*, pp.105–114, ACM (1997).

[6] Lidwell, W., Holden, K. and Butler, J.: *Universal Principles of Design*, Rockport Publishers (2003).

[7] Wertheimer, M.: Untersuchungen zur Lehre von der Gestalt. II, *Psychological Research*, Vol.4, No.1, pp.301–350 (1923).

[8] Sloan, S., U. and Surveying: A Fast Algorithm for Generating Constrained Delaunay Triangulations, Research Report (University of Newcastle (N.S.W.), Dept. of Civil Engineering and Surveying), University of Newcastle (1991).

[9] Pavlidis, T. and Van Wyk, C.J.: An Automatic Beautifier for Drawings and Illustrations, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol.19, No.3, pp.225–234 (online), DOI: 10.1145/325165.325240 (1985).

[10] Baran, I., Lehtinen, J. and Popovic, J.: Sketching Clothoid Splines Using Shortest Paths, *Eurographics 2010* (2010).

[11] McCrae, J. and Singh, K.: Neatening sketched strokes using piecewise French curves, *Proc. 8th Eurographics Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling, SBIM '11*, pp.141–148, ACM (2011).

[12] Sousa, M.C.: Overview of NPR for computerized illustration, *ACM SIGGRAPH 2006 Courses, SIGGRAPH '06*, ACM (2006).

[13] Trifas, M.A., Tyler, J.M. and Pianykh, O.S.: Applying multiresolution methods to medical image enhancement, *Proc. 44th annual Southeast Regional Conference, ACM-SE 44*, pp.254–259, ACM (2006).

[14] McCrae, J. and Singh, K.: Sketch-Based Interfaces and Modeling (SBIM): Sketching piecewise clothoid curves, *Comput. Graph.*, Vol.33, No.4, pp.452–461 (2009).

[15] Xiong, Y. and LaViola Jr., J.J.: Technical Section: A ShortStraw-based algorithm for corner finding in sketch-based interfaces, *Comput. Graph.*, Vol.34, No.5, pp.513–527 (2010).

[16] Ohtake, Y. and Belyaev, A.G.: Nonlinear Diffusion of Normals for Stable Detection of Ridges and Ravines on Range Images and Polygonal Models, *MVA*, pp.497–500 (2000).

[17] Williams, L.R. and Jacobs, D.W.: Stochastic Comple-

tion Fields: A Neural Model of Illusory Contour Shape and Saliency, *Neural Computation*, pp.837–858 (1995).

[18] Hilaire, X. and Tombre, K.: Robust and Accurate Vectorization of Line Drawings, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.28, No.6, pp.890–904 (2006).

[19] Nan, L., Sharf, A., Xie, K., Wong, T.-T., Deussen, O., Cohen-Or, D. and Chen, B.: Conjoining Gestalt Rules for Abstraction of Architectural Drawings, *ACM Trans. Graphics (Proc. SIGGRAPH Asia 2011)*, Vol.30, No.6 (2011).

[20] Fu, H., Zhou, S., Liu, L. and Mitra, N.J.: Animated construction of line drawings, *ACM Trans. Graph.*, Vol.30, No.6, pp.133:1–133:10 (2011).

[21] Leyvand, T., Cohen-Or, D., Dror, G. and Lischinski, D.: Data-driven enhancement of facial attractiveness, *ACM Trans. Graph.*, Vol.27, No.3 (2008).

[22] Teh, C.H. and Chin, R.T.: On the Detection of Dominant Points on Digital Curves, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol.11, No.8, pp.859–872 (1989).

[23] Abbasi, S., Mokhtarian, F. and Kittler, J.: Curvature Scale Space Image in Shape Similarity Retrieval, *Multi-media Syst.*, Vol.7, No.6, pp.467–476 (1999).

[24] 直樹小野, 龍三瀧山: 離散点で表された曲線の曲率の計算について, 電子情報通信学会技術研究報告, IE, 画像工学, Vol.93, No.353, pp.7–14 (1993).

[25] Madsen, K., Nielsen, H.B. and Tingleff, O.: Methods for Non-Linear Least Squares Problems (2nd ed.), Technical Report (2004).



森本 有紀 (正会員)

2008年九州大学芸術工学府修了, 同年東京大学にて日本学術振興会特別研究員, 2009年独立行政法人理化学研究所にて研究員, 2011年財団法人九州先端科学技術研究所にて研究員, 2012年東京電機大学未来科学科講師。

コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。ACM SIGGRAPH 会員。



高橋 時市郎 (正会員)

1977年新潟大学工学部卒業。同年電電公社入社。NTT基礎研究所, ヒューマンインタフェース研究所, サイバーソリユーション研究所において, パターン認識, コンピュータグラフィックス, 学習科学の研究開発に従事。2003

年より東京電機大学工学部教授。2007年同大学未来科学部教授。ビジュアルコンピューティングの研究に従事, 現在に至る。2010年より同大学産官学交流センター長。2013年よりUEIリサーチ客員研究員。博士(工学)。