

接続の類似性制約を用いた曲線洗練化法

佐藤 信^{†1} 三輪 譲 二^{†1}

曲線接続の類似性を維持したままで、制約条件に基づいて曲線形状を洗練化するためのアルゴリズムを提案する。本アルゴリズムでは、曲線変形のための制約条件に加えて、形状の類似性に関する基準を制約条件として使用することにより、Bezier 曲線などのパラメトリック曲線を、変形前の形状の特徴を維持したままで変形可能である。変形する曲線の形状特徴の類似性に関する基準として、形状の相似性、接続の相似性、そして制御点の変化量を使用する。ここで、基準として使用する接続の相似性とは、曲線が相似な形状に変化する際の曲線の接続形状のことである。特に、形状と接続の相似変化のスケールリングが、制約点ごとに変化する点が、提案アルゴリズムの特徴である。このときのスケールリングの倍率は、曲線変形のための制約条件を満たすように決定される。また、大局的に形状に制約を加えるために、弱制約条件を使用する。初期形状から目的形状に対話的に形状変形が可能であるので、適用分野としては、グラフィックス・コンテンツ作成アプリケーションのためのユーザインタフェースがある。また、曲線接続の連続性が無い場合でも、接続の類似性を維持できるので、既存のクリップアート等の修正にも適する。

A Curve Refinement Method Using Joint Similarity

MAKOTO SATOH^{†1} and JOUJI MIWA^{†1}

This paper presents a novel method for refining Bezier curves while keeping the similarity in shape. In the method, the criteria to optimize the shape deformation are the similarities in the shape and the joint, and the difference of the control points of curves. The scaling factors of the similarity at each position of curves result from optimizing the constraints for curve refinement. Also the global refinement of curve is achieved by using soft constraints. The method is suitable for the user interface of interactive applications.

^{†1} 岩手大学
Iwate University

1. はじめに

本稿では、曲線の形状と接続の類似性を用いて、曲線形状を洗練化するためのアルゴリズムを提案する。洗練化 (refinement) の意味については、Bartels 等により文献 6) において説明されている。ここでも、同様の意味で洗練化という用語を使用する。具体的には、曲線の初期形状を変形して、デザイナーの意図する目的形状を得ることが、曲線の洗練化である。

ここで始めに、コンピュータを使用した、グラフィックス・コンテンツとしての線画作成について考える。線画作成では、以下のうちのどちらかの方法が多く用いられる。

方法 1 ドローイング・ツールで線画を作成する。

方法 2 あらかじめ紙とペンにより線画を作成する。その後、スキャナを使用して、その線画を画像データに変換する。そして、その画像データをもとにして線画を作成する。

方法 2 の場合には、スキャナを使用して取り込んだ画像データを、そのまま線画データとして使用する場合と、その画像データを基にして曲線データを作成して、それを線画データとする場合がある。特に、線画の作成者が、紙とペンを使用して線画を作成した経験がある場合には、後者の方法を使用する機会が多い。

このことに関しては、以下の理由を考えることができる。

- (1) デザイナーに限らず、人間にとって、紙とペンは、使い慣れた道具である。
- (2) プロのデザイナーは、紙とペンで線画を作成する場合に、1 回で目的の形状の曲線を描くための訓練を受けていることが多い。この理由としては、紙とペンを使用する場合には、描いた曲線を修正する作業は煩雑であり、また、きれいに修正することが困難であるということを挙げる事ができる。

以下に示すように、上述の線画作成過程では、線画を表現する曲線データの洗練化が必要である。

方法 1 作成した初期形状から、作成者のイメージに合う目的形状を得るまで、曲線形状を修正する洗練化が必要である。

方法 2 紙とペンで作成した線画を変換した画像データから、線画データを作成する場合には、手作業またはソフトウェアツールを使用して、画像をトレースすることで線画データを作成する。この工程で、曲線の洗練化が必要である。ソフトウェアツールでトレースした場合でも、変換した曲線データが作成者の曲線品質の基準を満たすように、曲線形状を修正する洗練化が必要である場合がある。

また、これらの線画作成過程での洗練化だけでなく、既に作成してあるクリップアートを、

目的に合わせて洗練化して使用する機会も増えている．以上により，曲線形状を洗練するためのアルゴリズムが必要である．

既に作成してある曲線の形状を洗練化するための手法に関する研究としては，曲線の形状を変更するための制約条件を与えて形状を洗練化する研究^{1),2)}と，変更後の曲線の形状を与えて形状を洗練化する研究がある^{3),5)}．前者の制約条件を与える手法では，制約条件として曲線上の点の移動量または導関数値を指定して形状を洗練化する．本稿での提案手法は，この手法を拡張した手法⁷⁾を改良したものである．また，後者の変更後の曲線の形状を与える手法では，変更する部分の変更後の形状をストロークにより与えて，その与えた形状の両端と曲線の変更しない部分をアルゴリズムにより接続する．この手法では，変更する形状を自由に与えることが可能である．一方では，曲線の一部分をある条件に基づいて変更し，その周辺の形状の変更は最小限ならば良い場合でも，変更する部分の全体の形状を与えなければならない．

提案する曲線形状を洗練するためのアルゴリズムの特徴は，以下のとおりである．

- (1) 変形前の形状的特徴を維持しながら，形状変形のための制約条件に基づいて曲線形状を変形可能である．
- (2) 変形前の曲線接続の形状的特徴を維持しながら，形状変形のための制約条件に基づいて曲線形状を変形可能である．曲線は接続点において，連続に接続している必要はない．
- (3) Bezier 曲線などのパラメトリック曲線を対象とする．
- (4) 形状的特徴の類似性の基準として，相似性と制御点の変化量を使用する．曲線のパラメータ位置での曲率の変化を使用して，形状の相似性を計算する．
- (5) 曲線制御点の変化量を独立変数とする線形方程式により，曲線変形のための制約条件を表現する．弱制約により解くことにより，大局的な制約を実現する．

曲線接続の形状的特徴を維持する制約条件に関する部分が，既に提案しているアルゴリズム⁷⁾を改良した点である．

本アルゴリズムの適用分野としては，グラフィックス・コンテンツ作成アプリケーションのユーザインタフェースがある．特に，対話的な操作により，初期形状から徐々に修正を加えて，目的形状を得るグラフィックス・コンテンツ作成方法に適する．なお，Bezier 曲線を対象とした理由は，XML グラフィックスのための規格である SVG(Scalable Vector Graphics)⁹⁾で表現したクリップアートの形状の洗練に使用するためである．

2. 形状と接続の類似性を用いた曲線洗練化法

2.1 提案アルゴリズムと既存アルゴリズムとの比較

形状変形のための制約条件に基づいて，制御点の変化量を最小化して曲線を変形するアルゴリズムは，Bartels 等^{1),2)}により提案されている．その研究では，制御点の変化量を独立変数とする線形方程式により，曲線変形のための制約条件を表現している．そして，その独立変数のノルムの最小値を求めて，制御点の変化量とする．

その制約条件について，具体的に説明する．説明のために， n 次のパラメトリック曲線の i 番目のセグメントの k 階導関数 $Q_i^{(k)}(u)$ ($k \geq 0$) を，以下のとおり表現する．

$$\sum_{j=0}^n V_{i,j} B_{i,j}^{(k)}(u) = Q_i^{(k)}(u) \quad (1)$$

ここで， $V_{i,j}$ と $B_{i,j}^{(k)}(u)$ は，それぞれ制御点と基底関数である．(1) 式から，制御点の変化量とパラメータ u の位置での導関数の変化量の関係を表す制約条件を，以下のように導出できる．これが，導関数に関する制約条件である．

$$\sum_{j=0}^n \Delta V_{i,j} B_{i,j}^{(k)}(u) = \Delta Q_i^{(k)}(u) \quad (2)$$

(2) 式から，曲線の第 i_1 セグメントのパラメータ u_1 の位置と，第 i_2 セグメントのパラメータ u_2 の位置の k 階導関数 $Q_i^{(k)}(u)$ ($k \geq 0$) が接続するための制約条件を以下のように表現できる．

$$\sum_{j=0}^n \Delta V_{i_1,j} B_{i_1,j}^{(k)}(u_1) - \sum_{j=0}^n \Delta V_{i_2,j} B_{i_2,j}^{(k)}(u_2) = 0 \quad (3)$$

我々が文献⁷⁾で提案したアルゴリズムでは，形状的特徴の類似性の基準としてスケーリングが変化する相似形状の曲率を使用することを提案した．そして，(2) 式の制約条件に加えて，以下の制約条件を使用することにより，形状的特徴を維持して曲線を変形可能であることを示した．

- (1) スケーリングが変化する相似形状の曲率を維持するための制約条件
- (2) 大局的に形状制約を実現するための弱制約条件

本研究では，曲線接続の類似性の基準として，接続点での導関数ベクトルのスケーリングが

変化する相似性を使用することを提案する．そして，その相似性を維持するための制約条件を示す．文献 7) で提案したアルゴリズムで使用する制約条件に加えて，曲線接続の類似性を維持する制約条件を使用することにより，接続点での導関数の連続性の無い曲線でも，形状的特徴を維持して曲線を変形可能である．

2.2 相似性制約条件

平面上のパラメトリック曲線の曲率 κ を以下に示す．

$$\kappa = \frac{\left\| \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \times \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \right\|}{\left\| \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \cdot \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \right\|^3} \quad (4)$$

以下の説明では，曲線が平面上のパラメトリック曲線であるとする．文献 4) で述べられているように，平面上のパラメトリック曲線の曲率については符号を考慮することができる．そこで，以下の説明では，曲率の符号を含めて考える．

(4) 式より，相似形状の曲率で変形するための制約条件は，以下のとおりである．ここで， $\mathbf{Q}_i^{(1)}(u)$ と $\mathbf{Q}_i^{(2)}(u)$ は変形前のベクトルである．

- (1) $\left\| \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \right\|$ の変形でのスケーリングと， $\left\| \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \right\|$ の変形でのスケーリングが等しい．
- (2) $\mathbf{Q}_i^{(1)}(u)$ と $\mathbf{Q}_i^{(2)}(u)$ のなす角度と，変形後のそれらのなす角度が等しい．

具体的な制約条件を，以下に示す．

$$\left\| \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \right\|^2 \sum_{j=0}^n \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \cdot \Delta \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(1)}(u) - \left\| \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \right\|^2 \sum_{j=0}^n \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \cdot \Delta \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(2)}(u) = 0 \quad (5)$$

$$\left\| \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \right\|^2 \sum_{j=0}^n \text{sign}(\mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \times \Delta \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(1)}(u)) \left\| \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \times \Delta \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(1)}(u) \right\| - \left\| \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \right\|^2 \sum_{j=0}^n \text{sign}(\mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \times \Delta \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(2)}(u)) \left\| \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \times \Delta \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(2)}(u) \right\| = 0 \quad (6)$$

相似形状の曲率で変形するための弱制約条件を以下に示す．弱制約条件とは，制約値との誤

差が最小である解を求めるための制約条件である⁸⁾．ここで， E_l は， l 番目の弱制約条件の誤差を表す変数である．また， α は，相似形状の曲率からの差を調整するための係数である．

$$\left\| \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \right\|^2 \sum_{j=0}^n \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \cdot \Delta \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(1)}(u) - \left\| \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \right\|^2 \sum_{j=0}^n \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \cdot \Delta \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(2)}(u) + \alpha \left\| \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \right\|^2 \left\| \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \right\|^2 E_l = 0 \quad (7)$$

$$\left\| \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \right\|^2 \sum_{j=0}^n \text{sign}(\mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \times \Delta \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(1)}(u)) \left\| \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \times \Delta \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(1)}(u) \right\| - \left\| \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \right\|^2 \sum_{j=0}^n \text{sign}(\mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \times \Delta \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(2)}(u)) \left\| \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \times \Delta \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(2)}(u) \right\| + \alpha \left\| \mathbf{Q}_i^{(1)}(u) \right\|^2 \left\| \mathbf{Q}_i^{(2)}(u) \right\|^2 E_l = 0 \quad (8)$$

2.3 曲線接続の相似性制約条件

曲線の第 i_1 セグメントのパラメータ u_1 の位置と，第 i_2 セグメントのパラメータ u_2 の位置の k 階導関数 $\mathbf{Q}_i^{(k)}(u)$ ($k \geq 0$) が相似性接続するための弱制約条件を以下に示す．強制制約条件の場合は，弱制約項を含めない．

$$\left\| \mathbf{Q}_{i_2}^{(k)}(u_2) \right\|^2 \sum_{j=0}^n \mathbf{Q}_{i_1}^{(k)}(u_1) \cdot \Delta \mathbf{V}_{i_1,j} B_{i_1,j}^{(k)}(u_1) - \left\| \mathbf{Q}_{i_1}^{(k)}(u_1) \right\|^2 \sum_{j=0}^n \mathbf{Q}_{i_2}^{(k)}(u_2) \cdot \Delta \mathbf{V}_{i_2,j} B_{i_2,j}^{(k)}(u_2) + \alpha \left\| \mathbf{Q}_{i_1}^{(k)}(u_1) \right\|^2 \left\| \mathbf{Q}_{i_2}^{(k)}(u_2) \right\|^2 E_l = 0 \quad (9)$$

$$\left\| \mathbf{Q}_{i_2}^{(k)}(u_2) \right\|^2 \sum_{j=0}^n \text{sign}(\mathbf{Q}_{i_1}^{(k)}(u_1) \times \Delta \mathbf{V}_{i_1,j} B_{i_1,j}^{(k)}(u_1)) \left\| \mathbf{Q}_{i_1}^{(k)}(u_1) \times \Delta \mathbf{V}_{i_1,j} B_{i_1,j}^{(k)}(u_1) \right\| - \left\| \mathbf{Q}_{i_1}^{(k)}(u_1) \right\|^2 \sum_{j=0}^n \text{sign}(\mathbf{Q}_{i_2}^{(k)}(u_2) \times \Delta \mathbf{V}_{i_2,j} B_{i_2,j}^{(k)}(u_2)) \left\| \mathbf{Q}_{i_2}^{(k)}(u_2) \times \Delta \mathbf{V}_{i_2,j} B_{i_2,j}^{(k)}(u_2) \right\| + \alpha \left\| \mathbf{Q}_{i_1}^{(k)}(u_1) \right\|^2 \left\| \mathbf{Q}_{i_2}^{(k)}(u_2) \right\|^2 E_l = 0 \quad (10)$$

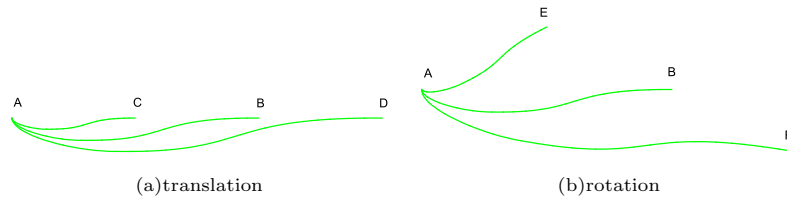


図 1 相似のスケールがほぼ等しい洗練化の例
Fig. 1 Examples of refinement using nearly even scaling factor of similarity.

2.4 曲線の洗練化アルゴリズム

形状と接続の類似性を維持して、曲線を洗練化するためのアルゴリズムを以下に示す。

- (1) (3) 式または (9,10) 式を使用して、曲線のセグメントの接続関係に関する制約条件を作成する。
- (2) (2) 式を使用して、曲線の導関数値に関する制約条件を作成する。
- (3) (5,6) 式, (7,8) 式または (9,10) 式を使用して、曲線の形状の類似性に関する制約条件を作成する。ここで、相似形状からの差を調整するための係数 α を決定する。
- (4) 作成した制約条件の線形連立方程式を、独立変数 $\Delta V_{i,j}$ と E_l のノルムが最小値を持つように解く。
- (5) $\Delta V_{i,j}$ を、曲線の洗練化での制御点の最適変化量とする。

ここで、制約条件の線形連立方程式の独立変数の個数は、パラメトリック曲線の変数の個数と弱制約条件の個数の和である。これにより、パラメトリック曲線の自由度で決まる制約条件の個数に制限されずに、弱制約条件を指定することが可能である。すなわち、曲線の洗練化の品質に合わせて、相似性条件の個数を調整することが可能である。

3. 実装と結果の検討

3.1 実装

Java 言語を使用して実装した。形状の洗練化を確認するための曲線には、Bezier 曲線を使用した。その Bezier 曲線のグラフィックデータとしての表現形式には、SVG を使用した。SVG を取り扱い可能なドローイング・ツールを使用して、洗練化前後の曲線の变形形状を確認した。また、洗練化前後の曲線の曲率を計算により比較した。

3.2 相似のスケールがほぼ等しい洗練化の例

形状洗練化での相似性のスケールがほぼ等しい場合の、变形形状の違いの例を、図 1

表 1 Bezier 曲線 AB
Table 1 Bezier curve AB.

order	curve parameter u	total segments	start point	end point
3	from 0 to 1	20	A	B

表 2 相似のスケールがほぼ等しい洗練化での制約条件 (図 1)

Table 2 The constraints used in the examples of refinement using nearly even scaling factor of similarity (Fig.1).

constraints	Fig.1(a)	Fig.1(b)
joint	hard in similarity (0th., 1st. and 2nd. derivative) Eq.(9,10)	
shape	soft in similarity Eq.(7,8), parameter of position $u = 0$ and 0.5 (each segment), coefficient of similarity $\alpha = -3. \times 10^{-4}$.	
translation ($\Delta x, \Delta y$)	$A = (0, 0), B(C) = (-100, 0)$ $A = (0, 0), B(D) = (100, 0)$	$A = (0, 0), B(E) = (-100, 50)$ $A = (0, 0), B(F) = (100, -50)$

に示す。曲線 AB は、変形前の Bezier 曲線である。その曲線データを、表 1 に示す。また、図 1(a,b) の形状洗練化で使用した制約条件を、表 2 に示す。これらの洗練化前後の形状を比較すると、曲線接続点での導関数の連続条件ではなく、導関数の相似条件を制約条件として使用した場合でも、曲線接続の連続性を維持して洗練化が可能なが分かる。この洗練化では、曲線の片方の端点を固定して、他方の端点を移動させたので、ほぼ相似な形状で変形している。なお、完全な相似形状にならないのは、洗練化の過程で曲線制御点の移動量と相似形状からの誤差からなるベクトルのノルムを、最小化しているためである。

3.3 洗練化でのスケールが変化する形状相似性制約条件の効果

相似性のスケールが変化する形状洗練化での例を、図 2 に示す。曲線 AB は、変形前の Bezier 曲線である。その曲線データを、表 1 に示す。また、図 2 の形状洗練化で使用した制約条件を、表 3 に示す。ここでは、曲線の形状類似性制約の効果を確認するために、曲線の接続制約は、図 2(a,b,c) とともに相似性強制約としている。図 2(a) は、形状の類似性制約により良好に形状洗練化ができた例である。曲線の両側の端点を固定して曲線上の点を移動しているため、相似性のスケールが変化していることが分かる。図 2(b) は、形状制約を使用せずに、曲線上の点を移動している例である。曲線の变形が局所的になっているために、形状の類似性が少ないことが分かる。図 2(c) は、形状の類似性制約が少ないために、変形前後の形状類似性が不十分である例である。

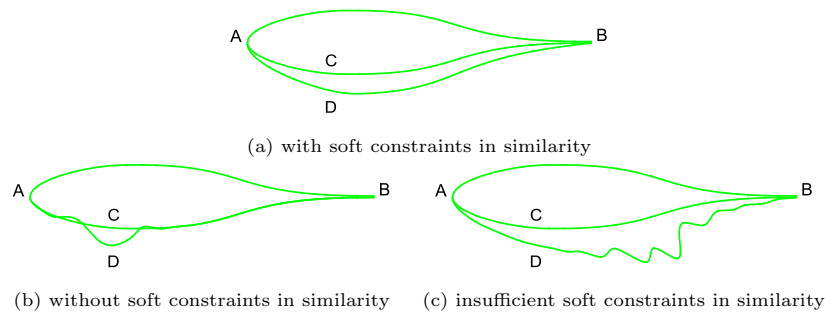


図 2 スケーリングが変化する形状相似性制約条件の効果の例
Fig.2 Examples of varying similarity in shape.

表 3 スケーリングが変化する形状相似性制約条件の効果の例での制約条件 (図 2)
Table 3 The constraints used in the examples of varying similarity in shape (Fig.2).

constraints	Fig.2(a)	Fig.2(b)	Fig.2(c)
joint	hard in similarity (0th., 1st. and 2nd. derivative) Eq.(9,10)		
shape	softly in similarity Eq.(7,8), $u = 0$ and 0.5 (each segment), $\alpha = -3. \times 10^{-4}$.	not used	softly in similarity Eq.(7,8), $u = 0.5$ (each segment), $\alpha = -3. \times 10^{-4}$.
translation ($\Delta x, \Delta y$)	$A = (0, 0), C(D) = (0, -10), B = (0, 0)$		

3.4 相似性係数の効果

相似性係数による洗練化形状の変化の例を、図 3 に示す。曲線 AB は、変形前の Bezier 曲線である。その曲線データを、表 1 に示す。また、形状洗練化で使用した制約条件は、 α の値を除いては、図 2(a) と同じであり、表 3 のとおりである。図 3 から、制御点の変化量と形状の類似性からの誤差のうちの、どちらに重点を置いて洗練化するかを、 α の値を変化することによって、調整可能であることが分かる。なお、図 3(d) では、奇数番号のセグメントを青色で示している。表 4 に、変形前後での曲率の変化を示す。これより、図 3(c,d) では、各位置での曲率の変化が小さく、曲率の符号に変化がないことにより、形状の類似性が保たれていることが分かる。

3.5 接続類似性の効果の例

接続類似性の効果の例を、図 4 に示す。曲線 ACB と曲線 ADB は、変形前の Bezier 曲線である。それらの曲線データは、曲線 AB と同じである (表 1)。また、形状洗練化で使用した制約条件は、表 5 のとおりである。図 4(b,c) は図 4(a) と比較して、点 A と B での接

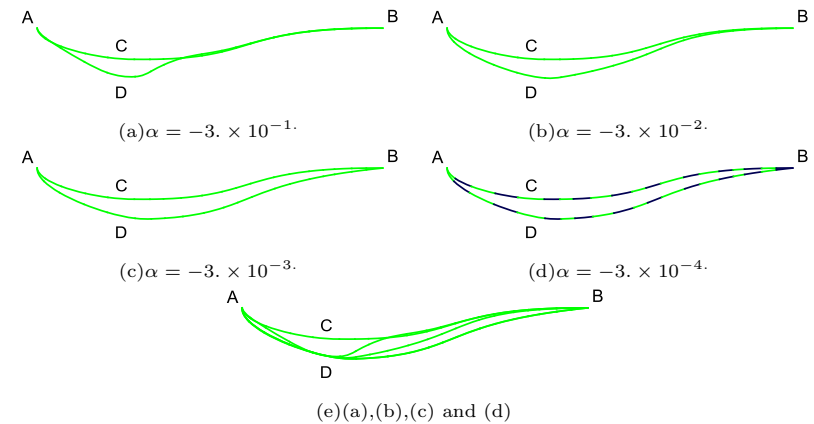


図 3 相似性係数による洗練化形状の変化の例
Fig. 3 Examples of variations of shape with respect to the similarity coefficient.

表 4 相似係数の曲率への影響 (図 3)
Table 4 Variations of curvature with respect to the similarity coefficient.

segment	0	4	8	12	16	19	
parameter of position u	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	
curvature (before refinement) ($\times 10^{-3}$)	221.6	8.663	5.889	-4.723	-3.383	-1.661	
curvature (after refinement) ($\times 10^{-3}$)	$\alpha = -3 \times 10^{-1}$	244.0	24.87	-10.00	-3.426	-3.497	-1.676
	$\alpha = -3 \times 10^{-2}$	189.7	12.17	4.002	-6.315	-3.956	-1.715
	$\alpha = -3 \times 10^{-3}$	195.3	10.44	7.391	-4.157	-3.214	-1.638
	$\alpha = -3 \times 10^{-4}$	195.4	10.40	7.457	-4.101	-3.190	-1.635

続形状の類似性が保たれていることが分かる。

3.6 曲線洗練化を繰り返す例

接続類似性の効果の例を、図 5 に示す。曲線データは、図 4 と同じである。また、形状洗練化で使用した制約条件は、移動制約と相似性係数を除いては表 5 のとおりである。移動制約は、図 5(a) では、点 A, 点 B(E), 点 D(F) でそれぞれ $(\Delta x, \Delta y) = (0, 0), (-30, 20), (0, 2)$ であり、図 5(b) では、点 A, 点 E(G) でそれぞれ $(\Delta x, \Delta y) = (0, 0), (-10, 10)$ であり、相似性係数は、 $\alpha = -3. \times 10^{-5}$ である。図 5(a) でおおまかに洗練化を行い、その洗練化後の形状を基にして、図 5(b) で微調整の洗練化を行っている。

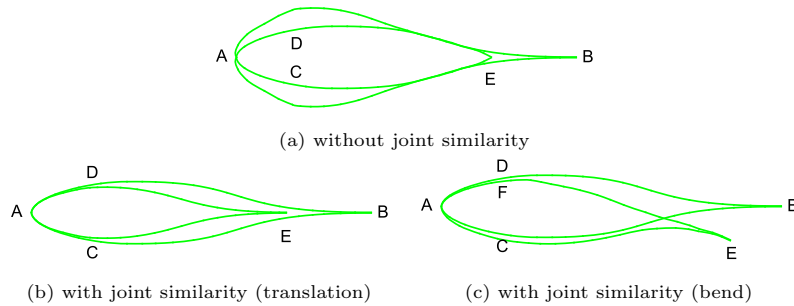


図 4 接続類似性を使用した曲線洗練化の例
Fig. 4 Examples of the shape refinement using joint similarity.

表 5 接続類似性の効果の例での制約条件 (図 4)

Table 5 The constraints used in the examples of the shape refinement using joint similarity (Fig.4).

constraints	conditions
joint	The intersegments of the curve ACB: Hard in the continuity of 0th., 1st. and 2nd derivatives. (Eq.3) The intersegment of the curve ADB: The same with the curve ADB. The joints of the curve ACB with the curve ADB (A and B): Hard in the continuity of 0th. derivatives (Eq.3) and hard in the similarity of 1st. and 2nd. derivatives. (Eq.9,10)
shape	Soft in the shape similarity. (Eq.7,8) ($u = 0$ and 0.5 (each segment), $\alpha = -3. \times 10^{-4}$.)
translation ($\Delta x, \Delta y$)	Fig.4(a): $A = (0, 0), B(E) = (-50, 0)$ Fig.4(b): $A = (0, 0), B(E) = (-50, 0)$ Fig.4(c): $(\Delta x, \Delta y) A = (0, 0), D(F) = (0, -2), B(E) = (-30, -20)$

4. おわりに

曲線の形状と接続の類似性を維持したままで、曲線形状を洗練化するためのアルゴリズムを提案した。そのために、相似形状の曲率と、接続点での導関数の相似性を維持するための制約条件を提案した。提案アルゴリズムでは、制約点ごとに相似性のスケールが変化することが特徴である。そのスケールの値は、曲線洗練化での制約条件の最適解を求めることにより決定される。また、曲線の自由度に制限されずに制約条件を使用するために、

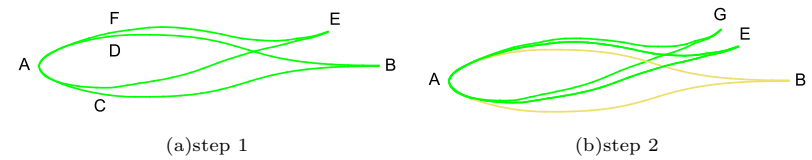


図 5 曲線洗練化を繰り返す例
Fig. 5 Examples of multistep refinement.

弱制約条件と強制約条件を組み合わせ使用した。これにより、大局的な形状の類似性を維持して形状洗練化することが可能となった。今後の課題には、相似性からの差を制御することにより、多様な変形形状を得るための研究を挙げることができる。

参考文献

- 1) Bartels, R. and Forsey, D.: Constraint Based Curve Manipulation, *Tutorial Notes: Splines in Computer Graphics prepared for Eurographics '94*, pp.31-36 (1994).
- 2) Bartels, R.H. and Beatty, J.C.: A Technique for the Direct Manipulation of Spline Curves, *Graphics Interface 89*, pp.33-39 (1989).
- 3) Baudel, T.: A mark-based interaction paradigm for free-hand drawing, *UIST '94: Proceedings of the 7th annual ACM symposium on User interface software and technology*, New York, NY, USA, ACM, pp.185-192 (1994).
- 4) Farin, G. and Sapidis, N.: Curvature and the Fairness of Curves and Surfaces, *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.9, No.2, pp.52-57 (1989).
- 5) Fleisch, T., Rechel, F., Santos, P. and Stork, A.: Constraint Stroke-Based Oversketching for 3D Curves, *Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling*, pp.161-165 (2004).
- 6) Forsey, D.R. and Bartels, R.H.: Hierarchical B-spline refinement, *SIGGRAPH '88: Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, USA, ACM, pp.205-212 (1988).
- 7) 佐藤 信, 三輪譲二: 形状の類似性を用いた曲線洗練法, 第 8 回情報科学技術フォーラム講演論文集第 3 分冊, pp.289-290 (2009).
- 8) Parent, R.: *Computer Animation: Algorithms and Techniques*, The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics, Morgan Kaufmann (2001).
- 9) W3C: *Scalable Vector Graphics (SVG) 1.1 Specification*, <http://www.w3.org/> (2003).