

## 幅の変化する曲線の対話的作成のための 最小距離形状特徴点を用いた制約点選択

佐藤 信<sup>†1</sup> 三輪 譲 二<sup>†1</sup>

幅の変化する曲線の対話的な作成のために、形状制約点の選択方式を提案する。この方式では、入力位置に近い曲線形状の特徴点を制約点とする。そして、この制約点での移動制約または曲線補間制約を満足して、基準曲線と類似形状の曲線を作成する。この基準曲線と、その曲線を基にして作成した類似形状の曲線により幅の変化する曲線の輪郭を表現する。この方式は、幅の変化する曲線を直感的に作成するために適した方式である。

### Constraint Position Selection Using Nearest Feature Point for Interactive Generation of Varying Thickness Curves

MAKOTO SATOH<sup>†1</sup> and JOUJI MIWA<sup>†1</sup>

This paper presents a new method to select constraint positions in shape generation for interactive generation of varying thickness curves. In the method, the nearest feature point of a base curve to an input position is selected as its constraint position. Then, it generates the similar curve to the base curve while satisfying constraints for translation, interpolation or the both. The base curve and the similar curve represent the contour of a varying thickness curve. The method is suitable to generate varying thickness curves intuitively.

#### 1. はじめに

本稿では、幅の変化する曲線を対話的に作成することを目的として、その作成する曲線形

状の制約点を自動的に選択するための方式を提案する。ここで用いる幅の変化する曲線の作成方式では、あらかじめ作成してある Bezier 曲線を基準として、その曲線と類似形状の曲線を作成することにより、それらの曲線と幅の変化する曲線の輪郭を表現する。提案の制約点選択方式では、座標値を対話的に入力することにより、その位置からの距離が最小である基準曲線の形状特徴点を自動的に選択する。そして、その選択した形状特徴点を制約点として、最適化計算を用いて基準曲線と類似形状の曲線を作成する。ここで、その制約点での制約条件として、移動制約または曲線補間制約を用いる。これらの制約条件は移動制約を、曲線幅の変化を調整するため、または、曲線の先端形状を先細りな形状とするために用いる。そして、曲線補間制約を、曲線の先端形状に丸みをもたせるために用いる。

ここで、提案する制約点選択方式の特徴を以下に示す。

**近傍位置による形状制約点選択** 曲線形状の制約点として選択したい形状特徴点の近傍で座標値を対話的に入力すると、アルゴリズムによりその座標値との距離が最小である形状特徴点を探索することにより、形状制約点を選択可能である。これにより、座標入力装置の解像度に依存せずに形状特徴点を選択することが可能となる。また、対話的に座標値を入力する場合に、その入力誤差に許容範囲をもたせることが可能となる。

**直感的操作** 曲線幅に変化を与えたい部分の形状特徴点に着目し、その近傍で、座標値を入力すると、その入力点の方向に曲線幅を変化させることが可能である。このとき、連続して曲線幅を変化させることが可能である。これにより、幅の変化した曲線形状を確認しながら、直感的な対話的操作により、幅の変化する曲線を作成可能である。

**曲線先端形状を選択可能** 曲線の先端部分の形状は、先細りの形状と、丸みを帯びた形状を作成可能である。

**簡潔なユーザ・インタフェース** 曲線幅に変化を与えたい曲線形状の特徴点に着目し、その近傍で座標値を入力するという操作のみにより、幅の変化する曲線を作成可能である。特に、曲線の先端部での形状制約として移動制約が与えられた場合には、その移動量に対応して丸みを帯びた形状の曲線を補間するという曲線補間制約を用いて、先端形状の丸みを作成する。一方、曲線の先端部での移動制約が与えられない場合には、先端を移動しないという形状制約を用いて、先細りの先端形状を作成する。

これらの特徴により、本方式は、職業としての線画作成者のもとより一般のコンピュータ・ユーザが、幅の変化する曲線を作成するために適した方式である。特に、ベクトル・グラフィックスで表現したクリップ・アート、説明図または挿絵などを作成する場合に、曲線幅に変化をもたせる方式として有効である。これは、ベクトル・グラフィックスの標準的な表

<sup>†1</sup> 岩手大学  
Iwate University

現形式である SVG では、その XML データでの曲線表現形式は Bezier 曲線であることにより、Bezier 曲線を対象とする本方式を、SVG で表現してあるベクトル・グラフィックスに適用可能であることによる。また、本方式では、幅の変化する曲線の輪郭を SVG の規格範囲内で幅の変化する曲線を取り扱うことが可能である。これは、本方式が幅の変化する曲線の輪郭を表現する Bezier 曲線を作成する方式であり、その作成した幅の変化する曲線は、Bezier 曲線の制御点データだけで表現されるので、曲線データとして曲線幅の変化に関する追加情報をもたないことによる。

## 2. 関連研究

### 2.1 関連研究との比較

ここで、曲線形状を対話的に操作するための手法に関する研究、そして、曲線幅に変化を与えるための手法に関する研究について、本研究との比較をする。

対話的操作により、曲線形状を作成または洗練化するための手法に関する研究としては、Baudel 等<sup>3)</sup> と Fleisch 等<sup>4)</sup> の研究がある。これらの手法では、ストローク入力により曲線形状を与えることにより、直感的な操作が可能である。しかし、曲線幅に変化を与える手法については述べていない。

曲線幅に変化を与える手法に関する研究としては、Strassmann<sup>9)</sup>、Grabli 等<sup>6)</sup>、Goodwin 等<sup>5)</sup>、Saito 等<sup>10)</sup>、佐藤<sup>7)</sup> がある。Strassmann<sup>9)</sup> は、スプライン曲線の各制御点で曲線幅に関するデータを入力することにより、幅の変化する曲線を作成するための手法に関する研究である。Grabli 等<sup>6)</sup> は、三次元モデルを線画としてレンダリングする場合に、その形状の輪郭線または特徴線を表現するストロークの形状に変化を与える手法に関する研究であり、ストローク作成のための手続きを指定することを可能にしたものである。この形状の指定については、あらかじめ定義しておく必要があるが、曲線幅に変化を与えることが可能である。Goodwin 等<sup>5)</sup> は、滑らかな曲面で構成される三次元モデルを幅の変化するストロークによりレンダリングする手法に関する研究である。シェーディングした場合の輝度に基づいたストローク幅の変化を式で表現することにより、手書き風のイラストを作成可能にしている。Saito 等<sup>10)</sup> は、既に作成してある幅に関する情報のない曲線を基準として、幅の変化する曲線をレンダリングする手法に関する研究である。アルゴリズムに対する入力としては、幅の変化のない曲線に関するデータのみが必要であり、その曲線データから求めた曲率を基準として曲線幅を変化させるのが特徴である。佐藤<sup>7)</sup> は、基準とする曲線と類似な形状の曲線を作成することにより、幅の変化する曲線を作成する手法に関する研究である。

幅の変化する曲線の輪郭を表現する曲線を作成可能であり、特に、ベクトル・グラフィックスでの幅の変化する曲線の表現に適する。本稿は、この手法を用いて、対話的操作により幅の変化する曲線を作成する場合の、形状制約点の選択方式について述べる。

Strassmann<sup>9)</sup>、Grabli 等<sup>6)</sup>、Goodwin 等<sup>5)</sup>、Saito 等<sup>10)</sup> と比較した、佐藤<sup>7)</sup> の特徴は、以下のとおりである。

- 幅の変化する曲線の輪郭の形状を表現する曲線の制御点を作成可能
- SVG などのベクトル・グラフィックスで使用可能
- 幅の変化を対話的操作により洗練化可能

### 2.2 形状類似性制約を用いた幅の変化する曲線

#### 2.2.1 形状類似性変数と非均一相似変換

形状類似性変数について、その概要について説明する(詳細については、佐藤等<sup>8)</sup>を参照)。形状類似性変数とは、基準形状を変形した場合に、その局所的な形状について、変形された形状とその基準形状を相似変換した形状との類似度を表現するものであり、移動と回転に関して不変である。例として、Bezier 曲線上のある点で形状類似性変数を定義して、その曲線を変形した場合について説明する。その点での形状類似性変数のノルムが 0 の場合には、変形された形状のその点での局所的な形状は、その基準形状を相似変換した形状であり、その点での局所的な曲率変化は相似変換した形状の曲率変化である。

次に、非均一相似変換について、その概要について説明する(詳細については、佐藤等<sup>8)</sup>を参照)。非均一相似変換は、Bartels 等<sup>1),2)</sup>、Welch 等<sup>11)</sup> により提案された最適化計算を用いた形状変形のための手法を拡張したものである。非均一相似変換では、形状類似性変数を複数点で定義した形状を、変形のための制約条件のもとで、形状類似性変数を最小化するように変形をおこなうことにより、形状の類似性を可能な範囲で維持しながら変形することが可能である。この場合に可能な限り近づく形状は、形状類似性変数を定義した点で相似変換をおこなった形状であり、形状変形のための制約条件により決定されるそれぞれの点での相似変換の倍率と回転は、非均一である。

#### 2.2.2 幅の変化する曲線作成の概要

幅の変化する曲線作成のアルゴリズムについて、その概要を以下に示す(詳細については、佐藤<sup>7)</sup>を参照)。

Step1 Bezier 曲線の表現形式を、形状類似性変数による曲線表現形式に変換する。

Step2 変換した曲線を基準として、その形状を変化させるための曲線通過点を制約条件として、最適化計算を用いて基準曲線と形状類似な曲線を作成する。

Step3 作成した曲線を，形状類似性変数による表現形式から，Bezier 曲線の表現形式に逆変換する．

### 3. 最小距離形状特徴点を用いた制約点選択

#### 3.1 形状特徴点の種類

幅の変化する曲線を作成する場合に，その形状の制約点として選択可能な特徴点は，以下のとおりである．

- 曲線の曲率値が極大または極小である点
- 曲線セグメントの接続点での曲率の差が，あらかじめ定めた値より大きい点
- 曲線の端点

#### 3.2 ユーザ・インタフェース

以下の手順により，幅の変化する曲線を作成する．

Step1 基準となる幅のない曲線形状を表示する．

Step2 幅に変化を与えたい形状特徴点の近傍で，マウスにより座標値を入力することにより，形状特徴点を選択する．このとき，マウスの左ボタンを押下している間は曲線幅が増加し続け，右ボタンを押下している間は曲線幅が減少し続ける．また，曲線端点を選択した場合には，丸みを帯びた形状の端点を作成される．

Step3 形状を調整するために，形状特徴点を追加して選択する場合には，Step2 に戻る．形状が完成したならば，終了する．

#### 3.3 形状特徴点を用いた形状制約点の選択方式

図 1 では，点 C の入力により，曲線 AEB を基準として，曲線 AFB を作成している．この例で説明する．

Step1 入力点 C との距離が最小である曲線 AEB 上の点 D を求める．

Step2 曲線 AEB の形状特徴点のうちで，曲線上で点 D と隣接していて，点 C との距離が最小である点 E を求める．

Step3 曲線 AEB の点 E での接線と直交する方向に点 F を求める．

Step4 曲線 AEB の端点 A と B の移動量が 0，そして点 E を点 F に移動するという制約条件で，曲線 AEB と類似形状の曲線 AFB を作成する．

形状特徴点として曲線端点を選択された場合には，基準曲線の端点と，その端点を移動した類似形状の曲線の端点の間に，丸みを帯びた形状の曲線を補間する．この補間のために追加する曲線の接続条件は， $G^1$  接続する．

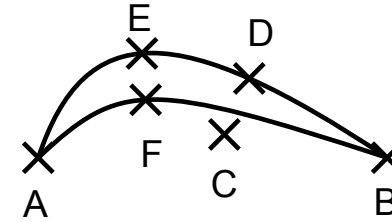


図 1 A selection method for the nearest feature point that is neighbouring to an input position.

#### 3.4 丸みを帯びた曲線端点の作成方式

形状特徴点として曲線端点を選択された場合には，基準曲線の端点と，その端点を移動した類似形状の曲線の端点との間に，丸みを帯びた形状の曲線を補間する．この補間のために追加する曲線の形状は，接続条件を可能な範囲で  $G^1$  接続として，形状類似性制約を用いて最適化計算により作成する．ここでの形状類似性変数は，基準曲線の端点の 1 階導関数と，類似形状曲線の端点の 1 階導関数を用いて作成する．以下で，3 次の Bezier 曲線 1 セグメントを使用して補間する場合について詳しく説明する．

説明のために， $n$  次の Bezier 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，以下のとおりに表現する．

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

ここで， $u$  は曲線パラメータである．また， $V_{i,j}$  と  $B_{i,j}^{(k)}(u)$  は，それぞれ Bezier 制御点と基底関数である．

始めに，Bezier 曲線の表現形式を，曲線端点の通過点と，形状類似性変数を用いた表現に変換する．そのために，(1) 式から，曲線通過点  $P_i(u)$  を，以下のとおり表現する．

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

また，基準曲線の端点の 1 階導関数と，類似形状曲線の 1 階導関数を用いて，形状類似性変数  $S_{(11)_i}(u) = (D_{(11)_i}(u), C_{(11)_i}(u))$  を，以下のとおりに表現する．ここで， $Q_{i_{\text{base}}}^{(1)}(u)$  および  $Q_{i_{\text{similar}}}^{(1)}(u)$  は，それぞれ基準曲線の端点の 1 階導関数ベクトルを反転したベクトル

ルと、類似形状曲線の1階導関数ベクトルである。

$$\frac{\sum_{j=0}^n \mathbf{Q}_{i_{\text{base}}}^{(1)}(u) \cdot \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(1)}(0)}{\left\| \mathbf{Q}_{i_{\text{base}}}^{(1)}(u) \right\|^2} - \frac{\sum_{j=0}^n \mathbf{Q}_{i_{\text{similar}}}^{(1)}(u) \cdot \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(1)}(1)}{\left\| \mathbf{Q}_{i_{\text{similar}}}^{(1)}(u) \right\|^2} = D_{(11)_i}(u) \quad (3)$$

$$\frac{\sum_{j=0}^n \text{sign}(\mathbf{Q}_{i_{\text{base}}}^{(1)}(u) \times \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(1)}(0)) \left\| \mathbf{Q}_{i_{\text{base}}}^{(1)}(u) \times \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(1)}(0) \right\|}{\left\| \mathbf{Q}_{i_{\text{base}}}^{(1)}(u) \right\|^2} - \frac{\sum_{j=0}^n \text{sign}(\mathbf{Q}_{i_{\text{similar}}}^{(1)}(u) \times \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(1)}(1)) \left\| \mathbf{Q}_{i_{\text{similar}}}^{(1)}(u) \times \mathbf{V}_{i,j} B_{i,j}^{(1)}(1) \right\|}{\left\| \mathbf{Q}_{i_{\text{similar}}}^{(1)}(u) \right\|^2} = C_{(11)_i}(u) \quad (4)$$

この形状類似性変数  $S_{(11)_i}(u) = (D_{(11)_i}(u), C_{(11)_i}(u))$  のノルムを最小化することにより、基準曲線と補間曲線の接続点、そして、形状類似曲線と補間曲線の接続点で可能な範囲で  $G^1$  接続しながら、補間曲線の両端点での1階導関数ベクトルを決定する。

ここで、補間曲線の端点と曲線での中点での位置制約、そして、可能な範囲での  $G^1$  接続する形状類似性制約を用いて、曲線を表現するために、 $u = 0, 0.5, 1$  について(2)式、そして、(3,4)式を用意し、それを以下のとおりに行列表現する。

$$\mathbf{U}_{(11)} = \mathbf{M}_{(11)} \mathbf{V} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{V}$  は  $\mathbf{V}_{i,j}$  を要素とするベクトル、 $\mathbf{M}_{(11)}$  は  $B_{i,j}^{(k)}(u)$  または(3,4)式で  $B_{i,j}^{(k)}(u)$  に定数を演算した値を要素とする行列、そして  $\mathbf{U}_{(11)}$  は  $\mathbf{P}_i(u)$  および  $S_{(11)_i}(u)$  を要素とするベクトルである。この(5)式から、以下の曲線表現形式変換行列  $\mathbf{M}_{(11)}^{-1}$  を求める。

$$\mathbf{V} = \mathbf{M}_{(11)}^{-1} \mathbf{U}_{(11)} \quad (6)$$

次に、最適化計算のための制約条件方程式を作成する。そのために、補間曲線の始点を基準曲線の端点の位置座標に制約する((2,6)式)。また、補間曲線の終点を類似形状曲線の端点の位置座標に制約する((2,6)式)。そして、補間曲線の中点を、基準曲線の端点と類似形状曲線の端点を結ぶ線分の中点からその線分に直交する方向に距離  $d_{\text{round}}$  だけ移動した位置座標に制約する((2,6)式)。ここで、 $d_{\text{round}}$  は、基準曲線の端点と類似形状曲線の端点を結ぶ線分の長さを定数倍したものである。この定数の既定値は  $\frac{1}{2}$  であり、この値を変更することにより、端点の丸みの形状を調整可能である。これらの制約条件方程式の変数は、

ベクトル  $\mathbf{U}_{(11)}$  の要素であるが、その要素のうち  $\mathbf{P}_i(u)$  の値については、制約条件により定数に制約しているため、実質的な変数は、 $S_{(11)_i}(u)$  である。

そして、この制約条件方程式を  $\mathbf{U}_{(11)}$  のノルムが最小になるように解く。そして、求めた  $\mathbf{U}_{(11)}$  を(6)式に代入することにより、Bezier曲線の制御点を求める。この制御点が、丸みを帯びた先端形状を表現するBezier曲線を表現している。

## 4. 実装と結果の検討

### 4.1 実装

Java言語を使用して実装した。Bezier曲線のグラフィックス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、作成した幅の変化する曲線の輪郭の形状を確認した。

### 4.2 最小距離形状特徴点を用いた形状制約点選択の例

最小距離形状特徴点を用いた形状制約点選択の例を、図2に示す。ここで、図2(a)は、基準曲線  $AB$  であり、図2(b)は、基準曲線の形状に類似な形状の曲線を作成する過程を示している。ここでは、入力点  $C$  との距離が最小である曲線  $AEB$  上の点  $D$  を求め、曲線  $AEB$  の形状特徴点のうちで、曲線上で点  $D$  と隣接して、点  $C$  との距離が最小である点  $E$  を求めている。この点  $E$  は、曲率の極小点である。なお、平面上のパラメトリック曲線の曲率は曲線パラメータの方向にとの関係により、負の値をとる場合がある。次に、曲線  $AEB$  の点  $E$  での接線と直交する方向に点  $F$  を求めている。この点  $E$  を点  $F$  に移動して、端点  $A$  と  $B$  の移動量が0という制約条件を満たす範囲で、曲線  $AEB$  と類似形状の曲線  $AFB$  を作成している。図2(c)は、図2(a)の基準曲線と、図2(b)で作成した類似形状の曲線により幅の変化する曲線を表現している。これらにより、基準曲線と類似な形状の曲線を作成して、それらの曲線により幅の変化する曲線の輪郭を表現できることが分かる。

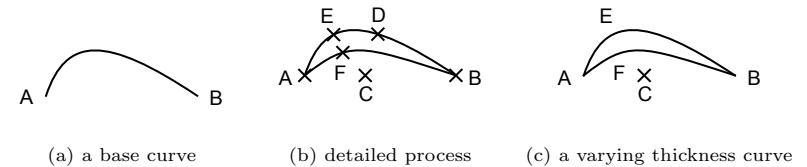


図2 最小距離形状特徴点を用いた形状制約点選択の例  
Fig.2 An example of a constraint position selection using nearest feature point.

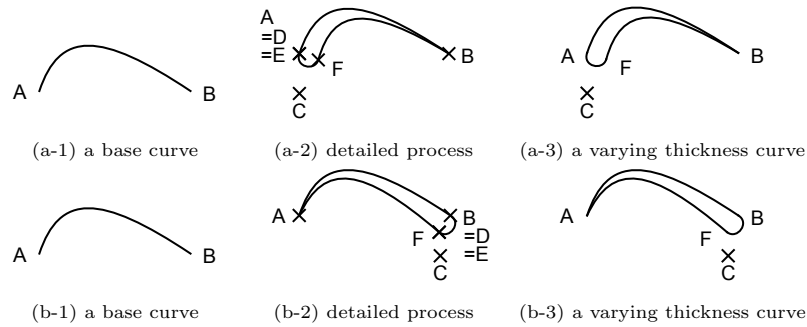


図 3 丸みを帯びた端点の例

Fig. 3 Examples of varying thickness curves with rounding start or rounding end.

#### 4.3 丸みを帯びた端点の例

丸みを帯びた端点の例を、図 3 に示す。ここで、図 3(a-1,b-1) は、基準曲線  $AB$  であり、図 3(a-2,b-2) は、基準曲線の形状に類似な形状の曲線を作成する過程を示している。ここでは、入力点  $C$  との距離が最小である曲線  $AEB$  上の点  $D$  を求め、曲線  $AEB$  の形状特徴点のうちで、曲線上で点  $D$  と隣接しており、点  $C$  との距離が最小である点  $E$  を求めている。この点  $E$  は、曲線の端点である。次に、曲線  $AEB$  の点  $E$  での接線と直交する方向に点  $F$  を求めている。この点  $E$  を点  $F$  に移動して、端点  $A$  と  $B$  の移動量が 0 という制約条件を満たす範囲で、曲線  $AEB$  と類似形状の曲線  $AFB$  を作成している。そして、基準曲線上で形状特徴点として選択された端点と、その端点に対応する類似形状曲線上の端点の間に丸みを帯びた曲線を、可能な限り  $G^1$  連続であるように補間している。図 3(a-3,b-3) は、図 3(a) の基準曲線、図 3(b) で作成した類似形状の曲線、そして、図 3(b) で作成した補間曲線により幅の変化する曲線を表現している。これらにより、基準曲線と類似な形状の曲線を作成して、それらの曲線により端点に丸みを帯びた幅の変化する曲線の輪郭を表現できることが分かる。

#### 4.4 形状制約点の移動量の調節の例

形状制約点の移動量の調節の例を、図 4 に示す。ここで、図 4(a-1,b-1,c-1) は、形状特徴に基づいて選択した形状制約点の移動量 (translation) が 5 の場合である。図 4(a-1) は、形状制約点が曲線開始の端点である場合である。図 4(b-1) は、形状制約点が曲率の極小点である場合である。図 4(c-1) は、形状制約点が曲線終了の端点である場合である。同様に、

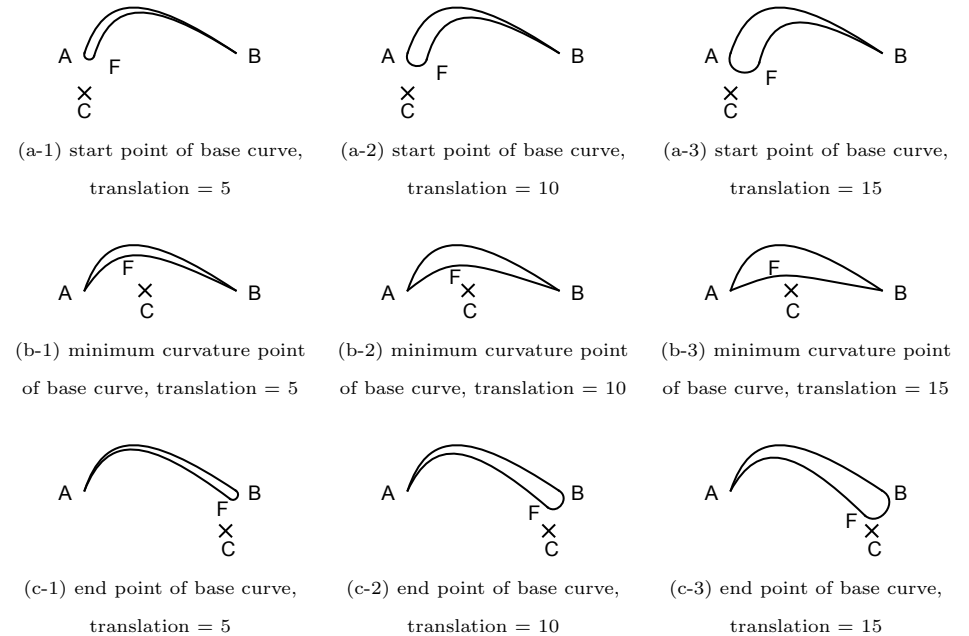


図 4 形状制約点の移動量の調節の例

Fig. 4 Examples of adjustment of a translation value.

図 4(a-2,b-2,c-2) は、形状特徴に基づいて選択した形状制約点の移動量が 10 の場合であり、同様に、図 4(a-3,b-3,c-3) は、形状特徴に基づいて選択した形状制約点の移動量が 15 の場合である。これらにより、形状制約点の移動量に合わせて、幅の変化する曲線の輪郭を表現可能であり、その形状を調節可能であることが分かる。

#### 4.5 入力誤差への頑健性の例

入力値への頑健性の例を、図 5 に示す。ここで、図 5(a) は、入力点  $C$  の座標が  $(x, y) = (70, -20)$  の場合であり、図 5(b) は、入力点  $C$  の座標が  $(x, y) = (80, -20)$  の場合である。そして、図 5(c) は、図 5(a) と図 5(b) を 1 つの図に示したものである。これらにより、同じ形状制約点を選択できる入力点の座標の範囲に余裕があり、入力値に対して頑健であることが分かる。これは、入力点との距離が最小である形状特徴点を、形状制約点として選択し

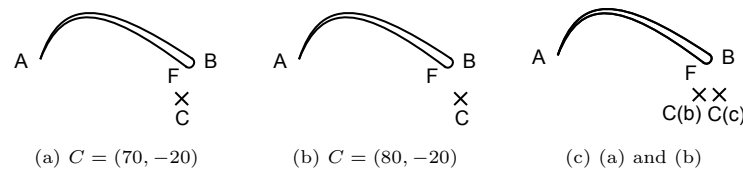


図 5 入力値への頑健性の例

Fig. 5 An example of robustness for input values.

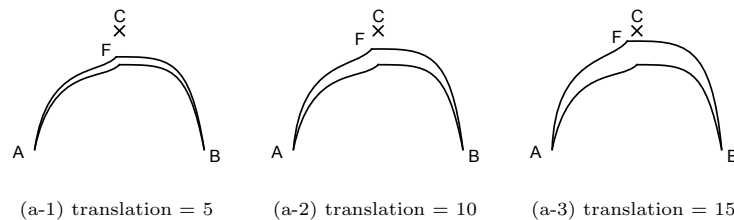


図 6 曲率が不連続な形状特徴点の例

Fig. 6 Examples for a non-smooth feature point.

ている効果であるといえる。

#### 4.6 曲率が不連続な形状特徴点の例

曲率が不連続な形状特徴点の例を、図 6 に示す。ここで、図 6(a,b,c) は、それぞれ、形状特徴に基づいて選択した形状制約点の移動量が 5,10,15 の場合である。これらにより、曲率が不連続な点を形状特徴点として選択することが可能であり、その点を形状制約点として類似形状の曲線を作成することにより、幅の変化する曲線の輪郭を作成可能であることが分かる。

#### 5. おわりに

幅の変化する曲線に対話的に作成することを目的として、その作成する曲線形状の制約点を自動的に選択するための方式を提案した。この提案では、座標値を対話的に入力することにより、その位置からの距離が最小である基準曲線の形状特徴点を自動的に選択することが特徴である。そのために、座標入力装置の解像度に依存せずに、形状特徴点を選択することが可能となった。また、曲線端点の形状に丸みをもたせるために、曲線補間制約を提案した。これらにより、簡潔なユーザ・インタフェースを用いて、直感的な対話的操作により

幅の変化する曲線を作成することが可能となった。提案方式は、職業として線画を作成する場合はもとより、一般のコンピュータ・ユーザが、幅の変化する曲線を作成するのにも適する。今後の課題としては、曲線幅の変化にさらに多様性をもたせるための形状制約点の選択手法と、さらに多様な端点形状を作成す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) 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).
- 5) Goodwin, T., Vollick, I. and Hertzmann, A.: Isophote distance: a shading approach to artistic stroke thickness, *Proceedings of the 5th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*, NPAR '07, New York, NY, USA, ACM, pp. 53-62 (2007).
- 6) Grabli, S., Turquin, E., Durand, F. and Sillion, F.: Programmable Style for NPR Line Drawing, *Rendering Techniques 2004 (Eurographics Symposium on Rendering)*, ACM Press (2004).
- 7) 佐藤 信：形状類似性制約を用いた幅の変化する曲線の対話的作成のための制約点選択法, 情報処理学会第 73 回 (平成 23 年) 全国大会講演論文集分冊 4, pp.1-2 (2011).
- 8) 佐藤 信, 三輪譲二：導関数ベクトルの非均一相似性制約に基づく曲線洗練化法, 情報処理学会研究報告-グラフィクスと CAD, Vol.2011-CG-142, No.12, pp.1-6 (2011).
- 9) Strassmann, S.: Hairy brushes, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol.20, pp.225-232 (1986).
- 10) SuguruSaito, AkaneKani, Y.C. and Nakajima, M.: Curvature-based stroke rendering, *The Visual Computer*, Vol.24, No.1, pp.1-11 (2008).
- 11) Welch, W. and Witkin, A.: Variational surface modeling, *SIGGRAPH '92: Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, USA, ACM, pp.157-166 (1992).