Vol.2017-HCI-171 No.17
2017/1/24

インタラクティブな手書き幾何作図のための自由曲線整形法

神谷 葉月[1]　伊藤 友彦[1]　佐賀 聡人[1]

概要：タブレットデバイスなどで手書き入力された自由曲線の整形技術が求められている．実際，局所的特徴点における曲線分割によるもの，美的曲線セグメント列への曲線分割によるもの，デザインの原理を用いた大局的な曲線修正によるもの，などの研究が進められている．しかし，これらは楕円弧幾何曲線を主な構成要素とする幾何作図に必ずしも適したものとなっていない．一方，我々はインタラクティブな手書き幾何作図インタフェースを実現するために手書きストロークを 7 種類の幾何曲線（線分，円，円弧，楕円，楕円弧，閉自由曲線，開自由曲線）のいずれかにリアルタイムで認識する手法としてファジィスプライン曲線同定法（FSCI）を提案した．しかし，ここでは自由曲線と認識されたものに関する整形法は提案されていなかった．本報告では，FSCI の曲線同定機能を利用する新たな自由曲線分割アルゴリズムを構築し，これに基づいた手書き自由曲線整形法を提案する．また，提案手法が，手書きストロークの入力に即応してこれを「部分的に楕円弧幾何曲線の性質を持ちながら全体として G^1 連続である曲線」として整形する，といったインタラクティブな手書き幾何作図に適した性質を持つことを実験により示す．

キーワード：自由曲線整形，幾何作図，CAD, 手書き入力，ヒューマンインタフェース，図形認識，ファジィ理論

1. 緒言

ペンタブレットやタッチディスプレイを用いた手書き入力インタフェースが普及するのに伴い手書き自由曲線の整形技術が求められている．実際，手書き自由曲線の整形に関して，角や変曲点などの局所的特徴点における曲線分割によるもの [1], 曲率と弧長から定義される美的曲線セグメント列への曲線分割によるもの [2], 複数の曲線間の平行性・滑らかさ・形状類似性・共曲線性などのデザインの原理を用いた大局的な曲線修正によるもの [3], などの研究が進められている． しかし，これらは線分，円，円弧，楕円，楕円弧といった楕円弧幾何曲線を主な構成要素とする幾何作図に必ずしも適したものとなっていない．

一方，我々はインタラクティブな手書き幾何作図インタフェースを実現するために手書き自由曲線を描画軌跡と描画の丁寧さの程度をもとに 7 種類の幾何曲線（線分 (L), 円 (C)，円弧 (CA)，楕円 (E)，楕円弧 (EA)，閉自由曲線 (FC)，開自由曲線 (FO)）のいずれかに同定する手法としてファジィスプライン曲線同定法（FSCI）[4] を提案した．また，複数の描画ストロークの重ね書きに応じてファジィスプライン曲線を逐次修正しつつ生成する手法として逐次型ファジィスプライン曲線生成法（S-FSCG）[5] を提案した．さらにこれらを併用することによって，手書き描画を繰り返すだけで多様な幾何作図を完了できる手書き幾何作図インタフェースを実現した [6]．しかし FSCI では自由曲線と同定されたものに関する整形法は提案されていなかった．

本稿では，FSCI の幾何曲線同定機能を利用する新たな自由曲線分割アルゴリズムを構築し，これに基づいた手書き自由曲線整形法を提案する．また，提案手法が

（1） 部分的に楕円弧幾何曲線の性質を持ちながら全体として G^1 連続な曲線として整形される．

（2） 手書き描画の丁寧さの程度によって曲線整形の詳細さの程度をコントロールすることが可能である．

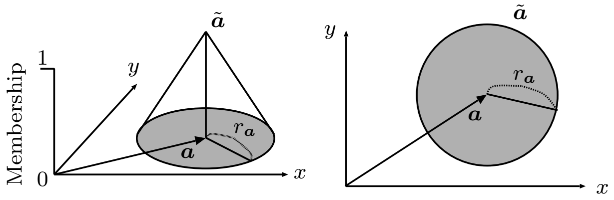
（3） 重ね書きによって曲線整形結果の逐次的修正が可能である．

といったインタラクティブな手書き幾何作図に適した性質を持つことを実験により示す．

2. インタラクティブな手書き幾何作図の概要

3 で提案する自由曲線整形法は，FSCI による手書き幾何曲線入力機能と S-FSCG による重ね書き幾何曲線修正機能を基盤としたインタラクティブな手書き幾何作図システム

[1] 室蘭工業大学，室蘭市
Muroran Institute of Technology, Muroran-shi, Hokkaido 050–8585, Japan



(a) 射影図 (b) 上面図

図 1 円錐型ファジィ点のメンバシップ関数

内で利用することを前提とする．一方で，提案する自由曲線整形法ではその内部で FSCI の幾何曲線同定機能を利用する．以下では，インタラクティブな手書き幾何作図システムについて FSCI と S-FSCG に焦点を置いて概説する．

2.1 FSCI による幾何曲線の手書き入力

FSCI は手書きストロークが入力されるたびに，その形状と描画動作をもとにファジィスプライン曲線 (FSC) を生成し，それを 7 種類の幾何曲線（L, C, CA, E, EA, FC, FO ）のいずれかとして同定する．これによりリアルタイムな幾何曲線の手書き入力が実現される．

2.1.1 FSC 生成

時系列点列として入力された手書き曲線をファジィスプライン補間 [7] することで FSC を生成する．FSC は手書きストロークの描画軌跡とともにその位置のあいまいさを表現するファジィな曲線であり，時刻 t, 円錐型ファジィ制御点 $\tilde{\boldsymbol{d}}_i$ を用いて，3 次 B-スプライン曲線

$$\tilde{\boldsymbol{s}}(t) = \sum_{i=0}^{m} N_i(t)\tilde{\boldsymbol{d}}_i \qquad (1)$$

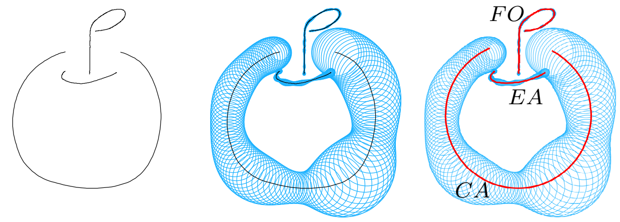
として表される [*1]．ここで一般に $\tilde{\boldsymbol{a}}$ は位置のあいまいな点のモデルである円錐型ファジィ点を表すものとする．具体的にはファジィ点はファジィ点の頂点の位置ベクトル $\boldsymbol{a}$ と位置のあいまいさの程度（ファジネス）$r_{\boldsymbol{a}}$ を用いて $\tilde{\boldsymbol{a}} =< \boldsymbol{a}, r_{\boldsymbol{a}} >$ と記述され，図 1 のような，変数位置ベクトル $\boldsymbol{v}$ に対する円錐型メンバシップ関数

$$\mu_{\tilde{\boldsymbol{a}}}(\boldsymbol{v}) = \left(1 - \frac{\| \boldsymbol{v} - \boldsymbol{a} \|}{r_{\boldsymbol{a}}}\right) \vee 0 \qquad (2)$$

で特徴づけられるファジィ集合で定義される．ただし，$\vee$ は論理和を表し max 演算で計算する．

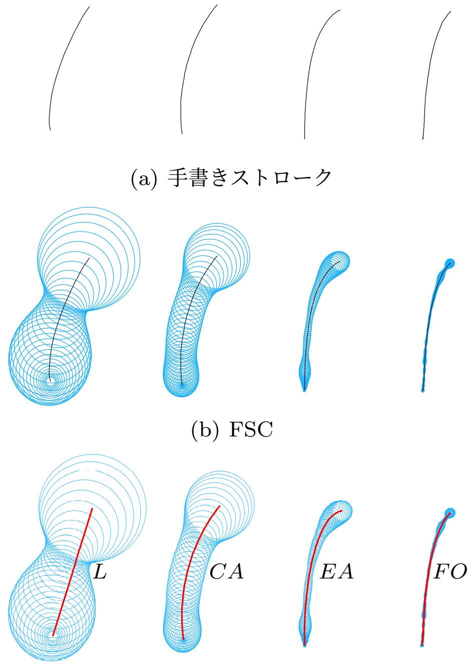
FSC $\tilde{\boldsymbol{s}}(t)$ は t の変化とともに円錐型ファジィ点の移動軌跡を描くことになり，例えば図 2(a) の 3 つの手書きストロークに対して図 2(b) の 3 つの FSC が生成される．ここで文献 [8] の手法で $\tilde{\boldsymbol{d}}_i$ を求めることにすれば，図 3(a) に示す形状の似たストローク入力であっても，図 3(b) に示すように，描画動作の違いに応じて，素早く雑な描画部分ではファジネスの大きな FSC が生成され，逆にゆっくりとした丁寧な描画部分ではファジネスの小さな FSC が生成されるという効果が得られる．

*1 $N_i(t)$ は 3 次の B-スプライン基底関数を表す．



(a) 手書きストローク (b) FSC (c) 同定幾何曲線

図 2 FSCI による幾何曲線入力



(a) 手書きストローク

(b) FSC

(c) 同定幾何曲線

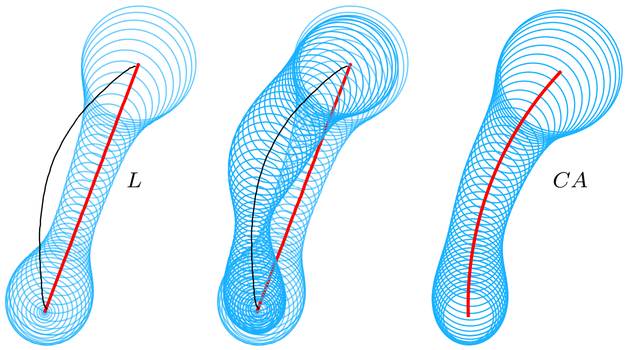
図 3 FSC のファジネスの違いによる幾何曲線同定結果の変化

2.1.2 幾何曲線同定

FSC を 7 種類の幾何曲線のいずれかとして同定する．まず，FSC $\tilde{\boldsymbol{s}}(t)$ をもとに，これを線形，円形，あるいは楕円形と仮定し，それぞれ線形リファレンスモデル，円形リファレンスモデル，および楕円形リファレンスモデルを構成する．そしてこれらがもとの FSC と合致する度合いを P^{Line}, P^{Circle}, $P^{Ellipse}$ として算出する．また FSC が閉曲線である度合いを P^{Closed} として算出する．P^{Line}, P^{Circle}, $P^{Ellipse}$, P^{Closed} はいずれもファジィ理論における可能性値 [9] であり，$[0, 1]$ 上の実数値となる．次に，ファジネスによる可能性の広がりが許す限り最も単純な曲線を推論しようとする表 1 のファジィ推論規則にしたがって 7 種類の曲線クラスのグレード値 $\mu(L)$, $\mu(C)$, $\mu(CA)$, $\mu(E)$, $\mu(EA)$, $\mu(FC)$, $\mu(FO)$ を算出する．ここで $\neg$ は論理否定で $\neg P = 1 - P$ と計算する．また，$\wedge$ は論理積で min 演算で計算する．最後に，最も高いグレード値を得た曲線クラスを選出し，その曲線クラスに対応した幾何曲線を同定結果として出力する．ここで同定結果は，L, C, CA, E, EA

表 1 7 種類の幾何曲線同定のためのファジィ推論規則

$\mu(L)$	$=$	P^{Line}						
$\mu(C)$	$=$	$\neg P^{Line}$	$\wedge$	P^{Circle}			$\wedge$	P^{Closed}
$\mu(CA)$	$=$	$\neg P^{Line}$	$\wedge$	P^{Circle}			$\wedge$	$\neg P^{Closed}$
$\mu(E)$	$=$	$\neg P^{Line}$	$\wedge$	$\neg P^{Circle}$	$\wedge$	$P^{Ellipse}$	$\wedge$	P^{Closed}
$\mu(EA)$	$=$	$\neg P^{Line}$	$\wedge$	$\neg P^{Circle}$	$\wedge$	$P^{Ellipse}$	$\wedge$	$\neg P^{Closed}$
$\mu(FC)$	$=$	$\neg P^{Line}$	$\wedge$	$\neg P^{Circle}$	$\wedge$	$\neg P^{Ellipse}$	$\wedge$	P^{Closed}
$\mu(FO)$	$=$	$\neg P^{Line}$	$\wedge$	$\neg P^{Circle}$	$\wedge$	$\neg P^{Ellipse}$	$\wedge$	$\neg P^{Closed}$



(a) 同定結果に対する重ね書きストロークの入力 (b) 重ね書きストロークの FSC 生成 (c) 重ね書き後の幾何曲線同定

図 4 S-FSCG による幾何曲線の重ね書き修正

の場合は 2 次有理 Bézier 曲線形式，FC，FO の場合はスプライン曲線形式で出力される．

以上の処理により，例えば図 2(b) のような 3 つの FSC に対して図 2(c) のように 3 つの幾何曲線 CA, EA, FO が同定される．ここで，表 1 のファジィ推論規則はファジネスによる可能性の広がりが許す限り最も単純な曲線を推論しようとするため，図 3(b) および図 3(c) に示すように，FSC のファジネスが小さくなるにしたがい同定結果の曲線クラスが L, CA, EA, FO と単純なクラスから複雑なクラスに変化するという効果が得られる．ユーザがこの効果を利用すれば，描画の丁寧さの程度を変化させることで同定結果の単純さや詳細さの程度を自在にコントロールできることになる．

2.2 S-FSCG による幾何曲線の重ね書き修正

S-FSCG は，既存の FSC に対する重ね書きストロークが入力されるたびに，既存の FSC と重ね書きストロークの FSC を融合した FSC を新たに生成し，これで既存の FSC を更新する．S-FSCG を FSCI と併用すれば，例えば図 4 に示すように，既存の FSC に対して重ね書きストロークを入力することで幾何曲線の同定結果を修正することが可能となる．

3. FSCI を利用した自由曲線整形法の提案

インタラクティブな手書き幾何作図に適した自由曲線の整形法として 1 で述べた 3 つの性質を満たす自由曲線整形法を提案する．提案手法は，FSCI を利用して自由曲線を

表 2 楕円弧幾何曲線同定のためのファジィ推論規則

$\mu(L)$	$=$	P^{Line}				
$\mu(CA)$	$=$	$\neg P^{Line}$	$\wedge$	P^{Circle}		
$\mu(EA)$	$=$	$\neg P^{Line}$	$\wedge$	$\neg P^{Circle}$	$\wedge$	$P^{Ellipse}$
$\mu(FO)$	$=$	$\neg P^{Line}$	$\wedge$	$\neg P^{Circle}$	$\wedge$	$\neg P^{Ellipse}$

楕円弧幾何曲線列に分割した上でそれを平滑化するという流れで，部分的に楕円弧幾何曲線の性質を持ちながら全体として G^1 連続である曲線を生成する．ここで，FSCI を用いているため描画の丁寧さの程度によって曲線整形の詳細さの程度をコントロールすることが可能となる．また，S-FSCG を併用することで重ね書きによる曲線整形結果の修正が可能となる．

以下では，まず FSCI を利用して楕円弧幾何曲線を同定する方法を 3.1 で示した上で，楕円弧幾何曲線列化と平滑化のアルゴリズムを 3.2 および 3.3 で示す．

3.1 FSCI による楕円弧幾何曲線の同定

提案手法では，入力された手書き曲線を楕円弧幾何曲線の列に分割する必要がある．ただしここで，L, CA, EA の 3 種類の開いた幾何曲線をまとめて楕円弧幾何曲線と呼びこれを EO と表記することとする．

楕円弧幾何曲線列への分割を実現するために，まず FSCI のファジィ推論規則を表 1 に示したオリジナルのものから表 2 に示すものに置き換える．これにより，FSCI は FSC を L, CA, EA, FO の 4 種類の開いた幾何曲線のいずれかとして同定することになり [*2]，FSC の同定結果の曲線クラスを EO または FO に分類することが可能となる．

また，同定結果の曲線クラスが EO である度合いを楕円弧幾何曲線性 $\mu(EO) \in [0, 1]$ と呼ぶ事にすると，$\mu(EO)$ は FSCI の同定結果の曲線クラスが FO ではない度合いとして，$\mu(EO) = \neg\mu(FO)$ と計算されることになる．

以下の楕円弧幾何曲線列化のアルゴリズムでは，FSCI を，FSC $\tilde{s}(t)$ が入力されると，楕円弧幾何曲線性 $\mu(EO)$，曲線クラスの分類結果 $r \in \{EO, FO\}$，および同定幾何曲線を出力するシステムとして扱う．

3.2 FSC の楕円弧幾何曲線列化

楕円弧幾何曲線列化では，FSC を最適な部分 FSC 列に分割した上で，部分 FSC のそれぞれを FSCI で同定することで，一筆書きの手書きストロークを楕円弧幾何曲線列に変換する．ただしここで，最適な分割とは以下の条件を満たす分割である．

(1) すべての部分 FSC が FSCI によって楕円弧幾何曲線として同定される．

(2) 1 を満たした上で，分割数が最小となる．

[*2] 幾何曲線列の構成要素として C, E, FC といった閉曲線は用いないことに注意する．

(3) 2 を満たした上で，楕円弧幾何曲線列性（以下で定義する.）が最大となる.

このような FSC の分割を実現する具体的な手法を提案する準備として以下の定義を行う.

部分 FSC $\tilde{\boldsymbol{s}}_{a',b'}(t)$
FSC $\tilde{\boldsymbol{s}}(t)$ の定義域 $[a,b]$ の一部 $[a',b'] \subset [a,b]$ を定義域とする部分 FSC を $\tilde{\boldsymbol{s}}_{a',b'}(t)$ と定義する.

探索点列 T
区間 $[a,b]$ を等間隔に分割したパラメータ値の列を $T = \{t_i \mid a = t_0 < t_1 < \cdots < t_{n-1} = b\}_{i=0}^{n-1}$ と定義する.

部分 FSC の曲線クラスの分類結果 $r_{a',b'}$
部分 FSC $\tilde{\boldsymbol{s}}_{a',b'}(t)$ を FSCI に入力したときに出力される曲線クラスの分類結果 $r \in \{EO, FO\}$ を $r_{a',b'}$ と定義する.

部分 FSC の楕円弧幾何曲線性 $\mu_{a',b'}(EO)$
部分 FSC $\tilde{\boldsymbol{s}}_{a',b'}(t)$ を FSCI に入力したときに出力される楕円弧幾何曲線性 $\mu(EO) \in [0,1]$ を $\mu_{a',b'}(EO)$ と定義する.

部分 FSC の同定幾何曲線 $\boldsymbol{q}_{a',b'}(t)$
部分 FSC $\tilde{\boldsymbol{s}}_{a',b'}(t)$ を FSCI に入力したときに出力される同定幾何曲線を $\boldsymbol{q}_{a',b'}(t)$ と定義する.

分割点列 P
$r_{p_i,p_{i+1}} = EO\ (0 \le i < m)$ を満たすパラメータ値の列 $P = \{p_i \mid p_i \in T, t_0 = p_0 < p_1 < \cdots < p_m = t_{n-1}\}_{i=0}^{m}$ を分割点列と定義する.

楕円弧幾何曲線列 Q
$Q = \{\boldsymbol{q}_i(t) \mid \boldsymbol{q}_i(t) = \boldsymbol{q}_{p_i,p_{i+1}}(t)\}_{i=0}^{m-1}$ と定義する．これは $\tilde{\boldsymbol{s}}(t)$ を分割点列 P で部分 FSC に分割した上で，それぞれを FSCI で同定した結果から得られる楕円弧幾何曲線の列である.

楕円弧幾何曲線列性 μ
$\mu = \bigwedge_{i=0}^{m-1} \mu_{p_i,p_{i+1}}(EO) \in [0,1]$ と定義する．これは楕円弧幾何曲線列 Q の要素すべての楕円弧幾何曲線性の論理積であり，Q 全体が楕円弧幾何曲線の性質を満たす度合いを表す.

FSC の楕円弧幾何曲線列への分割は，以下に示すとおり，探索点列から分割点の存在範囲を絞り込んだ上で，2 分探索を繰り返して分割点を決定することにより実現する．なお，この探索アルゴリズムでは FSCI の同定における以下の 2 つの性質を利用する.

(1) ある部分 FSC の定義域が拡大すると，その楕円弧幾何曲線性は減少する.

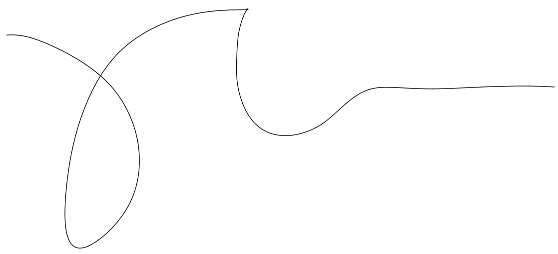


図 5 手書きストローク

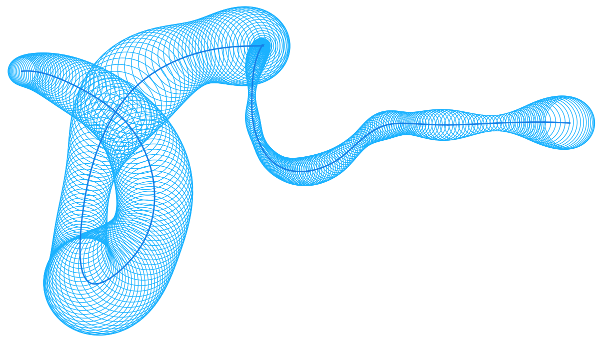


図 6 FSC

(2) 同定結果の曲線クラスが FO となる部分 FSC の定義域が拡大した場合，その同定結果の曲線クラスは FO となる.

また，この探索アルゴリズムは最悪計算時間 $O(n \log n)$ で探索を完了する.

3.2.1 FSC の生成

一筆書きの手書きストロークから 2.1.1 と同様に FSC $\tilde{\boldsymbol{s}}(t)$ を生成する．例えば図 5 の手書きストロークから図 6 のような FSC が生成される.

3.2.2 探索点列の生成

FSC $\tilde{\boldsymbol{s}}(t)$ の定義域上に，探索点列 $T = \{t_i \mid a = t_0 < t_1 < \cdots < t_{n-1} = b\}_{i=0}^{n-1}$ を生成する．この探索点列は分割点の候補となる時刻パラメータ値が等時間間隔に n 個並んだ列であり，始点時刻と終点時刻を含むものとする．ここで $\forall i \in \{0, n-2\}, r_{t_i,t_{i+1}} = EO$ が満たされるように探索点間の時間間隔を十分短く設定する [*3]．図 7 に探索点列に対応した FSC 上の点列の例を示す.

3.2.3 分割点の存在範囲の絞り込み

まず，分割数が最小となる分割点列の中で各分割点が終点側へ最も偏った分割点列 $P^L = \{p_i^L\}_{i=0}^{m}$ を求める．具体的には 初期値を

$$p_0^L = t_0 \tag{3}$$

とし，終点 t_{n-1} 自身が分割点となるまで，順次

$$p_i^L = \max\{p \mid p \in T, p > p_{i-1}^L, r_{p_{i-1}^L,p} = EO\} \tag{4}$$

[*3] 予備実験の結果，探索点の時間間隔を 0.1[s] 以下となるように設定した.

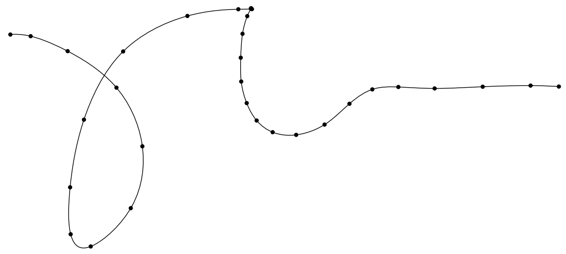


図 7 探索点列

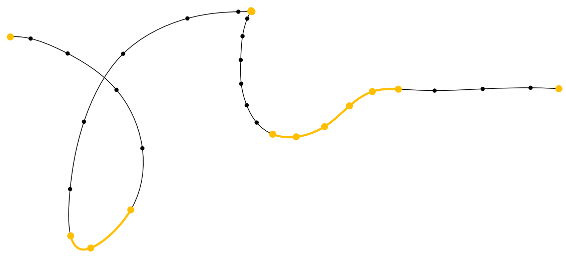


図 8 分割点の存在範囲

と，$\tilde{\boldsymbol{s}}_{p^L_{i-1},p}(t)$ が FSCI によって EO と同定される範囲で最も終点 t_{n-1} に近い探索点 p を分割点 p^L_i としてゆく．

同様に，分割数が最小となる分割点列の中で各分割点が始点側へ最も偏った分割点列 $P^R = \{p^R_i\}^m_{i=0}$ を式 (5), (6) で生成する．

$$p^R_m = t_{n-1} \tag{5}$$

$$p^R_i = \min\{p \mid p \in T, p < p^R_{i+1}, r_{p,p^R_{i+1}} = EO\} \tag{6}$$

さらに求めた P^L と P^R から図 8 のように分割数が最小となる分割点の存在範囲 $[p^R_i, p^L_i]$ $(0 \leq i \leq m)$ を得る．

3.2.4 2 分探索を使用した分割点列の探索

すべての $t_j \in \bigcup^m_{i=1}[p^R_i, p^L_i]$ に対して j の小さい方から順に，部分 FSC $\tilde{\boldsymbol{s}}_{t_0,t_j}(t)$ の最適な分割点列 P_j，および $\tilde{\boldsymbol{s}}_{t_0,t_j}(t)$ を P_j で分割した時の楕円弧幾何曲線列性 μ_j を以下のように求めてゆく．$p^R_1 \leq t_j \leq p^L_1$ の場合は P_j と μ_j を式 (7), (8) で計算する．

$$P_j = \{p_{j_i} \mid p_{j_0} = t_0, p_{j_1} = t_j\}^1_{i=0} \tag{7}$$

$$\mu_j = \mu_{t_0,t_j}(EO) \tag{8}$$

$p^R_i \leq t_j \leq p^L_i$ $(i > 1)$ の場合は P_j と μ_j を式 (9), (10) で計算する．

$$P_j = P_k : t_j \tag{9}$$

$$\mu_j = \mu_k \wedge \mu_{t_k,t_j}(EO) \tag{10}$$

ただし，$X : x$ は列 X の末尾に値 x を追加した列を返す．ここで，k として分割点 t_k が μ_j を最大にする整数を探索する．具体的には，$f_j(k)$ を式 (11) と定義し，$p^R_{i-1} \leq t_k \leq p^L_{i-1}$ の区間内に存在する $f_j(k-1) < f_j(k)$ かつ $f_j(k) \geq f_j(k+1)$ となる t_k を式 (12) の 2 分探索で，$t_k = search(p^R_{i-1}, p^L_{i-1})$ と求める．

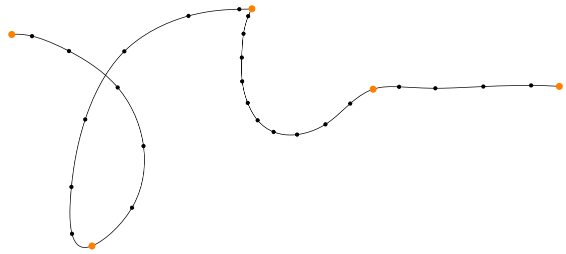


図 9 分割点列

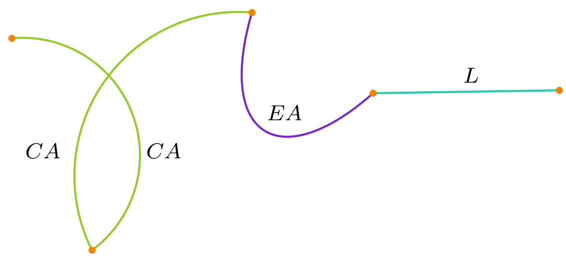


図 10 楕円弧幾何曲線列

$$\begin{aligned} &f_j(k) \\ &= \begin{cases} 0 & (t_k < p^R_{i-1} \text{ or } p^L_{i-1} < t_k) \\ \mu_k \wedge \mu_{t_k,t_j}(EO) & (\text{otherwise}) \end{cases} \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} &search(t_l, t_r) \\ &= \begin{cases} search(t_{c+1}, t_r) & (r_{t_c,t_j} \neq EO \\ & \quad \text{or } f_j(c) < f_j(c+1)) \\ search(t_l, t_{c-1}) & (f_j(c) \leq f_j(c-1)) \\ t_c & (\text{otherwise}) \end{cases} \end{aligned} \tag{12}$$

ただし，$c = \lceil l + \frac{r-l}{2} \rceil$ である．FSCI の性質 (1) より，この 2 分探索の収束は保証される．また，$k < j$ なので式 (9) と (10) の P_k と μ_k の値は前のステップで計算済みであり，その値を利用することで動的計画法と同様に再計算を避けることができる．

最終的に $t_j = t_{n-1}$ となった時点で最適な分割点列が $P = P_{n-1}$ と得られる．この時，楕円弧幾何曲線列性は $\mu = \mu_j$，分割数は m となる．分割点列の例を図 9 に示す．

3.2.5 楕円弧幾何曲線列の生成

得られた分割点列 P で FSC $\tilde{\boldsymbol{s}}(t)$ を分割し，分割後のすべての部分 FSC $\tilde{\boldsymbol{s}}_{p_i,p_{i+1}}(t)$ $(0 \leq i \leq m)$ を FSCI によって同定された 2 次有理 Bézier 曲線形式の楕円弧幾何曲線 $\boldsymbol{q}_i(t)$ $(t \in [0,1])$ で置き換える．こうして，楕円弧幾何曲線列 $Q = \{\boldsymbol{q}_i(t)\}^m_{i=0}$ を生成する．楕円弧幾何曲線列の例を図 10 に示す．

3.3 楕円弧幾何曲線列の平滑化

楕円弧幾何曲線列は接続点において角ができており滑らかではない．そこで，図 11 に示すようにファジィ接続点のファジネスに応じた刈り込みによって角とその周囲の楕円弧幾何曲線の一部を取り除いた上で，不連続となった部分を 3 次 Bézier 曲線で再接続することによって，全体として G^1

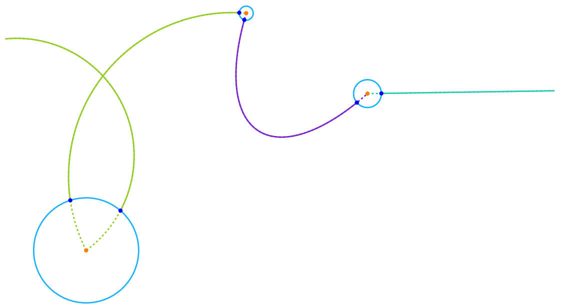


図 11　ファジィ接続点列

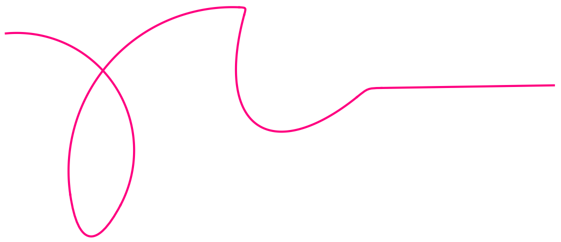


図 12　整形結果

連続に整形された 1 本の曲線を図 12 のように生成する．ここで，ファジィ接続点の列は $P' = \{\tilde{\boldsymbol{p}}'_i \mid \tilde{\boldsymbol{p}}'_i = \tilde{s}(p_{i+1})\}_{i=0}^{m-1}$ と求められる．各ファジィ接続点における刈り込みと再接続の具体的な処理を以下に示す．

3.3.1　ファジィ接続点における刈り込み

ファジィ接続点 $\tilde{\boldsymbol{p}}'_i$ における刈り込み範囲を図 13(a) のような半径 $\alpha r_{\boldsymbol{p}'_i}$，中心 $\boldsymbol{p}'_i$ の円の内側として刈り込む．ここで $\alpha \in \mathbb{R}$ は任意に設定する刈り込みパラメータである [*4]．具体的には，式 (13) を満たすパラメータ $u_i \in [0,1]$ を求め，$\boldsymbol{q}_i(t)$ $(t \in [u_i, 1])$ の部分を削除して刈り込む．

$$||\boldsymbol{q}_i(u_i) - \boldsymbol{p}'_i|| = \alpha r_{\boldsymbol{p}'_i} \tag{13}$$

同様に，式 (14) を満たすパラメータ $v_i \in [0,1]$ を求め，$\boldsymbol{q}_{i+1}(t)$ $(t \in [0, v_i])$ の部分を削除して刈り込む．

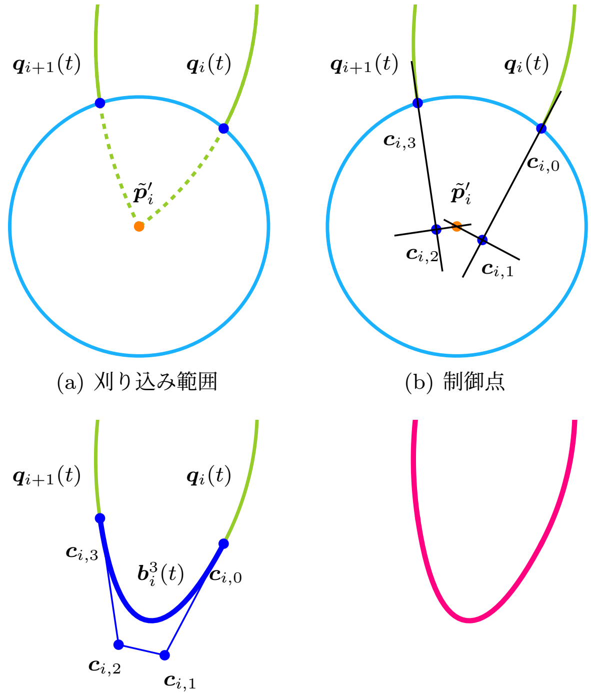
$$||\boldsymbol{q}_{i+1}(v_i) - \boldsymbol{p}'_i|| = \alpha r_{\boldsymbol{p}'_i} \tag{14}$$

3.3.2　3 次 Bézier 曲線による再接続

まず，$\boldsymbol{c}_{i,0} = \boldsymbol{q}_i(u_i)$, $\boldsymbol{c}_{i,3} = \boldsymbol{q}_{i+1}(v_i)$ と求める．次に，点 $\boldsymbol{c}_{i,0}$ を通り u_i での楕円弧幾何曲線の接ベクトル $\boldsymbol{q}'_i(u_i)$ に平行な直線と，$\boldsymbol{p}'_i$ からその直線へ下ろした垂線との交点を求め，これを $\boldsymbol{c}_{i,1}$ とする．同様に，点 $\boldsymbol{c}_{i,3}$ を通り v_i での楕円弧幾何曲線の接ベクトル $\boldsymbol{q}'_{i+1}(v_i)$ に平行な直線と，$\boldsymbol{p}'_i$ からその直線へ下ろした垂線との交点を求め，これを $\boldsymbol{c}_{i,2}$ とする．こうして得られた図 13(b) のような $\boldsymbol{c}_{i,0}$，$\boldsymbol{c}_{i,1}$，$\boldsymbol{c}_{i,2}$，$\boldsymbol{c}_{i,3}$ を制御点とする 3 次 Bézier 曲線

$$\boldsymbol{b}_i^3(t) = \sum_{j=0}^{3} B_j^3(t)\boldsymbol{c}_{i,j} \tag{15}$$

[*4] このパラメータで平滑化の効果の及ぶ範囲を調整することができる．本稿では $\alpha = 1$ と設定した．



(a) 刈り込み範囲　(b) 制御点
(c) 3 次 Bézier 曲線　(d) 平滑化後の曲線

図 13　ファジィ接続点における刈り込みと再接続

を図 13(c) のように生成し [*5]，さらに刈り込みで削除された曲線部分を $\boldsymbol{b}_i^3(t)$ で置換することにより図 13(d) のように幾何曲線列を再接続する．ここで式 (15) の $\boldsymbol{b}_i^3(t)$ は，$\boldsymbol{q}_i(t)$ および $\boldsymbol{q}_{i+1}(t)$ と G^1 連続で接続される曲線となるため，結果として再接続された曲線は全体として G^1 連続な曲線となる．

4.　動作実験

提案手法が 1 で述べた 3 つの性質を満たした自由曲線整形法となっていることを確認するための動作実験を行った．動作実験は Intel Core i3 (3.06 GHz) 搭載のパーソナルコンピュータに接続したペンタブレットを用いて実施した．

4.1　作図例と処理時間

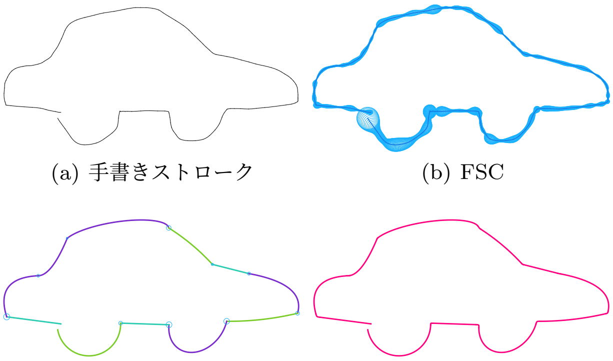
図 14，図 15 および図 16 に提案手法による自由曲線整形の例を 3 つ示す．どの作図例でも，整形結果が部分的に楕円弧幾何曲線の性質を持ちながら全体として G^1 連続である曲線となっていることが分かる．これらの例を含め，ストロークの描画時間が 10 秒程度以下の場合，自由曲線の整形処理時間は高々 1 秒程度であり，提案手法はインタラクティブな手書き幾何作図に十分利用可能であると考えられる．

4.2　描画の丁寧さの程度と曲線整形の詳細さの程度

描画の丁寧さの程度が曲線整形の詳細さの程度にどのように影響するかを示すための模擬実験を行った．ここでは

[*5] $B_j^3(t)$ は 3 次の Bernstein 基底関数を表す．

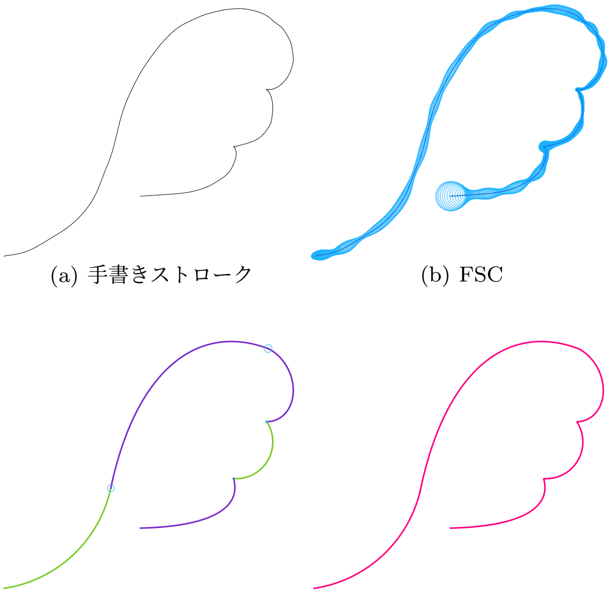
Vol.2017-HCI-171 No.17
2017/1/24



(a) 手書きストローク　(b) FSC

(c) 楕円弧幾何曲線列　(d) 整形結果

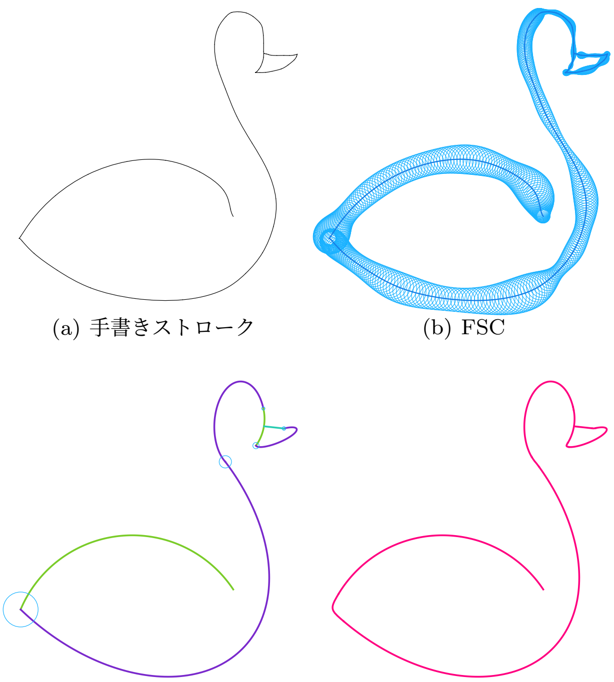
図 14　作図例 1（描画時間：13.7[s]，処理時間：0.81[s]）



(a) 手書きストローク　(b) FSC

(c) 楕円弧幾何曲線列　(d) 整形結果

図 15　作図例 2（描画時間：7.1[s]，処理時間：0.66[s]）



(a) 手書きストローク　(b) FSC

(c) 楕円弧幾何曲線列　(d) 整形結果

図 16　作図例 3（描画時間：6.3[s]，処理時間：1.02[s]）

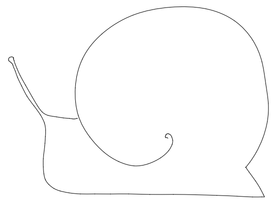
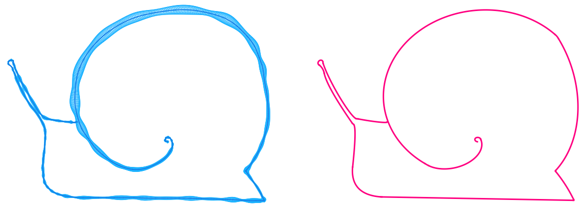
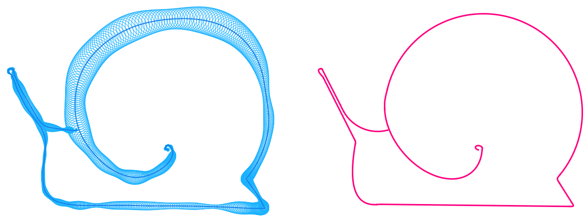


図 17　手書きストローク「かたつむり」



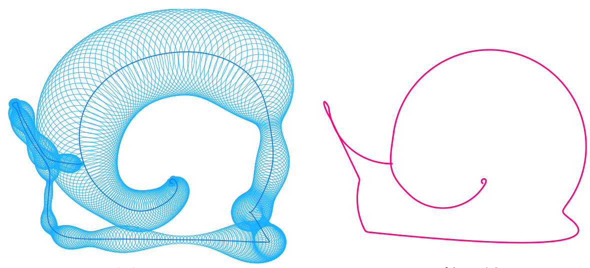
(a) FSC　(b) 整形結果

図 18　「かたつむり」の整形例（描画速度 0.5 倍）



(a) FSC　(b) 整形結果

図 19　「かたつむり」の整形例（描画速度 1.0 倍）



(a) FSC　(b) 整形結果

図 20　「かたつむり」の整形例（描画速度 2.0 倍）

図 17 の手書きストロークから，その時系列点列の時間をそれぞれ 0.5 倍，1.0 倍，2.0 倍にした模擬手書きストロークを生成し，それぞれを提案手法で整形した．その結果を，図 18，図 19 および図 20 に示す．これらの結果から，同一形状の手書きストロークであっても，描画速度が遅く丁寧な描画ほど手書きストロークの詳細な形状を反映した整形結果となり，一方，描画速度が速く雑な描画ほど手書きストロークの詳細な形状が省略されより単純な形状へ大胆に変形した整形結果となることが分かる．したがって，提案手法を用いることで，ユーザは描画動作の丁寧さの程度を変化させて整形結果の詳細さの程度をコントロールできると考えられる．

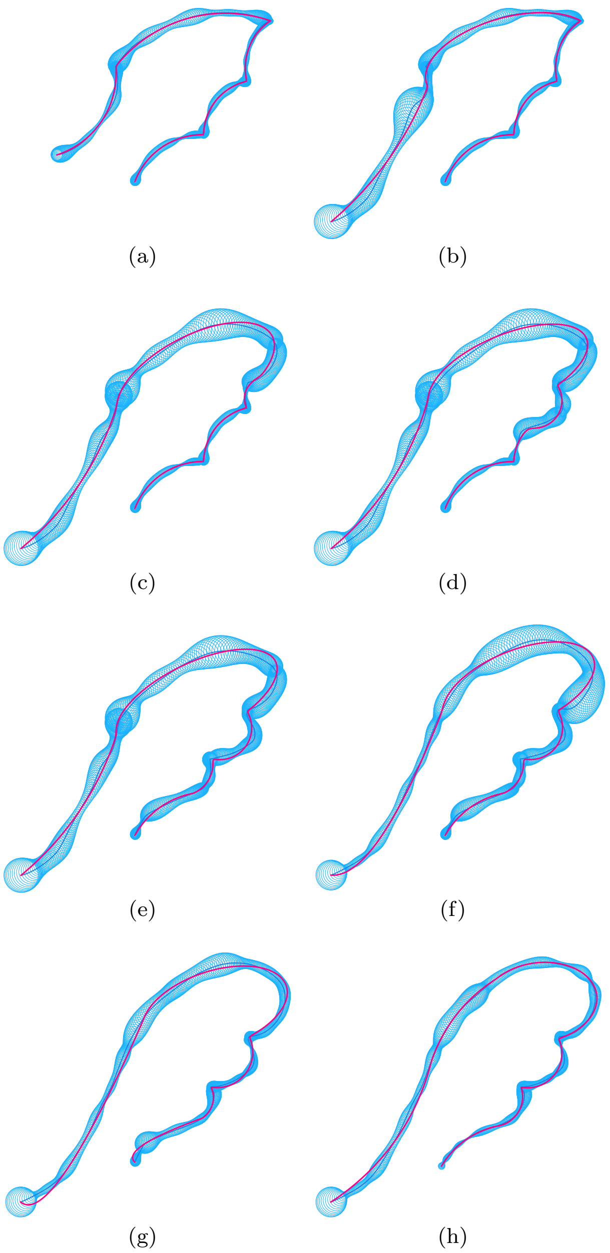


図 21　重ね書きによる自由曲線整形の修正過程

4.3　重ね書きによる曲線整形の修正

S-FSCG を併用することで，描画ストロークを重ね書きしながら曲線整形結果を逐次的に修正する実験を行った．図 21 にその過程の一部を抜粋して示す．この結果から，提案手法を用いることで，ユーザは重ね書きを繰り返しながら整形結果を更新しつつデザインを追い込んでゆくといったインタラクティブな作図作業を行えると考えられる．

5.　結言

本報告では，FSCI の幾何曲線同定機能を利用した自由曲線の楕円弧幾何曲線列化アルゴリズムとその平滑化アルゴリズムを構築し，これに基づいた手書き自由曲線整形法を提案した．また，提案手法が 1 で挙げた 3 つの性質を満たすこと，および，曲線整形に要する処理時間が高々 1 秒程度であることを実験的に確かめ，提案手法がインタラクティブな手書き幾何作図に適した性質をもつ自由曲線整形法であることを示した．

今後，自由曲線整形結果に対するファジィグリッドスナッピング [10] の適用法を検討した上で，提案手法を手書き作図インタフェース [6] の自由曲線整形機能として実装する予定である．また提案手法を 3 次元に拡張した上で，3 次元手書きモデリングインタフェース [11] に実装する予定である．

参考文献

[1] Sheng-Feng Qin, David K. Wright and Ivan N. Jordanov: On-line segmentation of freehand sketches by knowledge-based nonlinear thresholding operations, *Pattern Recognition*, Vol. 34, No. 10, pp. 1885–1893 (2001).

[2] 八木麻理子，川田洋平，藤澤　誠，三浦憲二郎：ペンタブレット入力による G^1 連続を持つ美的曲線セグメント列の生成，芸術科学会論文誌，Vol. 7, No. 3, pp. 97–101 (2008).

[3] 森本有紀，高橋時市郎：デザインの原理を用いた自由形状のイラスト美化手法，情報処理学会論文誌，Vol. 56, No. 5, pp. 1329 – 1338 (2015).

[4] 佐賀聡人，牧野宏美，佐々木淳一：ファジースプライン曲線同定法，電子情報通信学会論文誌 D， Vol. J77-D2, No. 8, pp. 1620–1629 (1994).

[5] 佐藤洋一，安福尚文，佐賀聡人：スケッチによる作図インタフェースのための逐次型ファジースプライン曲線生成法，電子情報通信学会論文誌 D， Vol. J86-D2, No. 2, pp. 242–251 (2003).

[6] 河合良太，西川　玲，佐賀聡人：手書きスケッチ入力フロントエンドプロセッサ：SKIT，電子情報通信学会論文誌 D， Vol. J88-D2, No. 5, pp. 897–905 (2005).

[7] 佐賀聡人，牧野宏美，佐々木淳一：手書き曲線モデルの一構成法―ファジースプライン補間法―，電子情報通信学会論文誌 D， Vol. J77-D2, No. 8, pp. 1610–1619 (1994).

[8] 大川哲也，佐賀聡人：手書き曲線同定法 FSCI における ファジネス生成モデルの精密化，電子情報通信学会論文誌 D， Vol. J82-D1, No. 5, pp. 634–643 (1999).

[9] L. A. Zadeh: Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 1, pp. 3–28 (1978).

[10] Sumudu Dematapitiya, Masatoshi Kawazoe, Akira Nishikawa, Masaki Sakurai and Sato Saga: Snapping of Fuzzy Objects Using the Multi-Resolution Fuzzy Grid Snapping Technique, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 2, pp. 904–915 (2009).

[11] 井上智之，西住直樹，鈴木伸明，安福尚文，佐賀聡人：仮想空間中での手書きジェスチャ認識に基づいた 3 次元モデリングインタフェース BlueGrotto の提案，電子情報通信学会論文誌 D， Vol. J87-D2, No. 6, pp. 1309–1318 (2004).