

手書き曲線同定法 FSCI による $n/4$ 円弧および $n/4$ 楕円弧の同定

中島 幸佑¹ 佐賀 聡人¹

概要: 我々は描画軌跡と描画動作のあいまいさをもとにして手書き曲線を 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)のいずれかに同定する手法として「ファジィスプライン曲線同定法(FSCI)」を提案した。また, FSCI で同定された幾何曲線のファジィ特徴点を正方グリッドにスナッピングして整形する手法として「多重解像度ファジィスナッピング法(MFGS)」を提案し, 正方グリッドを利用した様々な幾何作図を描画動作のみで完了できる手書き CAD インタフェースを試作した。ここで, FSCI で円弧および楕円弧が同定された場合, これらを正方グリッドに合わせて整形するためには, MFGS による整形とは別に, 中心角や長径短径比といったパラメータを量子化して整形する必要があった。しかし, 特に円弧および楕円弧が浅い場合には, これらのパラメータの量子化による整形が原理的に機能しがたくなる問題が生じた。本報告では, 従来の FSCI の曲線同定法を発展させた「サブ曲線同定法」を新たに組み込むことにより, 従来の 7 種類の幾何曲線に加えて, 正方グリッドを用いた幾何作図で特に重要となる $n/4$ 円弧および $n/4$ 楕円弧をも適切に同定し整形することのできる手書き CAD インタフェースを実現する。また, 評価実験によりその有効性を示す。

キーワード: 円弧, 楕円弧, 手書き入力, ファジィ理論, 図形認識, CAD, ヒューマンインタフェース

1. はじめに

近年のペンタブレットやタッチディスプレイの発展と普及により, ユーザが手書き動作でデバイスを操作することが一般的となった。それに伴い手書きストロークを入力することによりインタラクティブに作図を進めるシステムが文献 [1], [2] などでも提案され, 幾何曲線の形状パラメータを直接指定することなく直感的に作図することが可能になった。我々は特定の用途によらず汎用的に利用できる手書き幾何作図インタフェースの実現を目指し, 描画軌跡とともに描画動作のあいまいさをも情報として活用し手書き曲線を 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))のいずれかとして同定する手法「ファジィスプライン曲線同定法(FSCI)」[3]を提案した。さらに FSCI で同定された幾何曲線の特徴点をそのあいまいさに応じて適切な解像度の正方グリッドにスナッピングして整形する手法「多重解像度ファジィスナッピング法(MFGS)」[4], [5]を提案し, 正方グリッドを利用した様々な幾何作図を描画動

作のみで完了できる手書き CAD インタフェース「SKIT」[6]を実現した。

ところで FSCI で円弧または楕円弧が同定された場合, これらを正方グリッドに合わせて整形しようとするとき, MFGS による整形とは別に中心角や長径短径比といったパラメータを量子化して整形する必要がある。このため我々は文献 [7] で FSCI の同定結果にする後処理としての形状パラメータ量子化手法を提案した。しかし特に弧が浅い場合にはパラメータの量子化による整形が原理的に適切に機能しがたくなる問題が生じた。

本稿では, 従来の FSCI の曲線同定法を発展させた「サブ曲線同定法」を FSCI 自身に新たに組み込むことにより, 従来の 7 種類の幾何曲線に加えて, 正方グリッドを用いた幾何作図で特に重要となる $n/4$ 円弧および $n/4$ 楕円弧をも適切に同定し整形することのできる手書き CAD インタフェースを実現する。また, 評価実験によってサブ曲線同定法が実際の幾何作図において実用的に機能することを示す。

2. 手書き CAD インタフェースにおける $n/4$ 円弧同定および $n/4$ 楕円弧同定の必要性

FSCI を基盤とする手書き CAD インタフェースについて

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

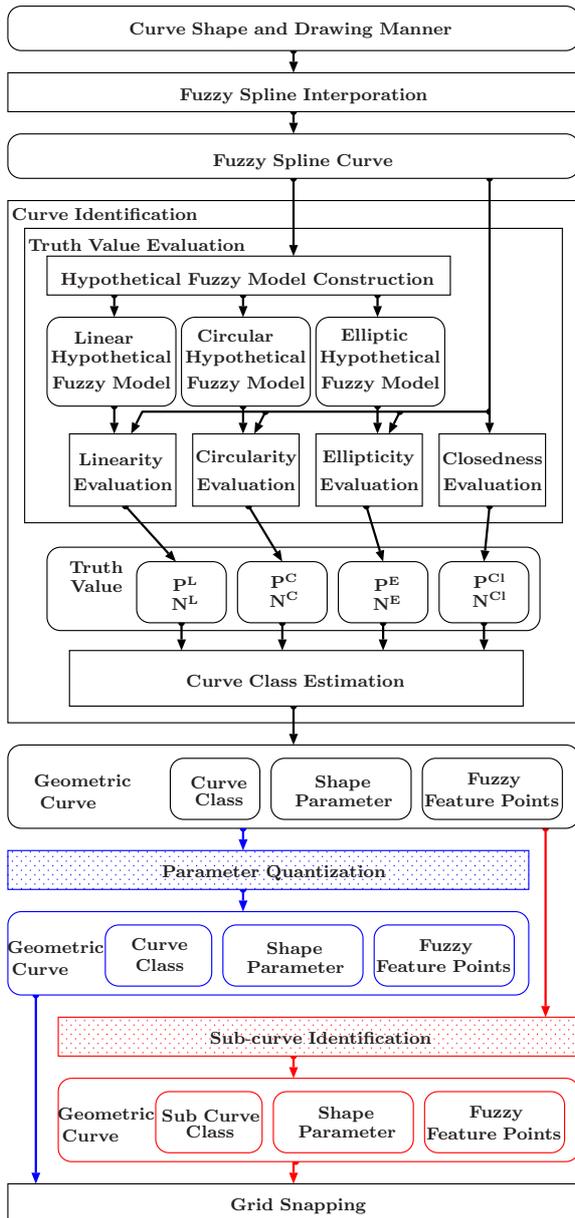


図 1 手書き CAD インタフェースにおける曲線同定の流れ

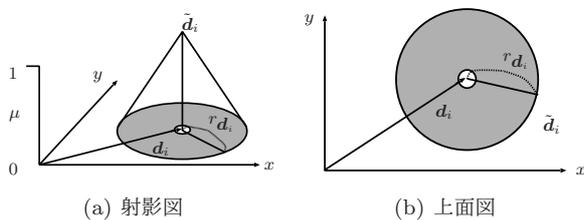


図 2 円錐型ファジィ点

て概説し, $n/4$ 円弧同定および $n/4$ 楕円弧同定を導入する必要性を明らかにする.

2.1 FSCI による手書き CAD インタフェースの概要

我々は既に, 手書きストロークを繰り返し描画し続けるだけで複雑な幾何作図を完了できるインタラクティブな手書き CAD インタフェースとして SKIT を実現した. SKIT

は一本ごとのストローク入力に逐次反応し, 図 1 の黒および青で示す流れで, FSCI による幾何曲線同定, 形状パラメータ量子化, MFGS によるグリッドスナッピングをリアルタイムに実行する. 以下にこの処理を概説する.

- (1) ファジィスプライン補間 時系列点列として入力された手書きストロークをファジィスプライン補間しファジィスプライン曲線 (Fuzzy Spline Curve, 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

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

と表現される. ここで, t は時刻, $N_i(t)$ は 3 次の B-スプライン基底関数, \tilde{d}_i はファジィ制御点である *1. \tilde{d}_i は位置のあいまいな点のモデルである図 2 の円錐型ファジィ点で表され, 具体的には円錐型メンバシップ関数

$$\mu_{\tilde{d}_i}(v) = \left(1 - \frac{\|v - d_i\|}{r_{d_i}}\right) \vee 0 \quad (2)$$

で特徴づけられるファジィ集合で定義される. ここで v は変数位置ベクトル, d_i はファジィ点の頂点の位置ベクトル, r_{d_i} は位置のあいまいさの程度 (ファジネス), \vee は max 演算を表わす. 式 (1) の $\tilde{s}(t)$ は t の変化とともに図 3 に見るように円錐型ファジィ点の移動軌跡を描く *2. \tilde{d}_i を文献 [8] の手法で求めることで, 素早い描画部分ではファジネスが大きくなり, 丁寧な注意深い描画部分ではファジネスが小さくなる FSC が生成される.

- (2) 曲線同定 FSC を 7 種類の幾何曲線のいずれかとして同定し, 曲線クラス, 形状パラメータおよびファジィ特徴点を出力する.

(2-1) 仮説ファジィモデルの構成 FSC をもとに, これを線形, 円形, あるいは楕円形と仮定し, それぞれ線形仮説ファジィモデル $\tilde{r}^L(t)$, 円形仮説モデル $\tilde{r}^C(t)$, および楕円形仮説ファジィモデル $\tilde{r}^E(t)$ を以下のように構成する.

$$\tilde{r}^L(t) = B_0^1(t) \tilde{b}_0^L + B_1^1(t) \tilde{b}_1^L \quad (3)$$

$$\tilde{r}^C(t) = \frac{P_0(t) \tilde{b}_0^C + P_1(t)(1+w^C) \tilde{f}^C + P_2(t) \tilde{b}_2^C}{P_0(t) + P_1(t)(1+w^C) + P_2(t)} \quad (4)$$

$$\tilde{r}^E(t) = \frac{P_0(t) \tilde{b}_0^E + P_1(t)(1+w^E) \tilde{f}^E + P_2(t) \tilde{b}_2^E}{P_0(t) + P_1(t)(1+w^E) + P_2(t)} \quad (5)$$

ただし, $P_0(t) = B_0^2(t) - \frac{1}{2} B_1^2(t)$, $P_1(t) = B_1^2(t)$,

*1 $\sum_{i=0}^m N_i(t) = 1$ であり, $\tilde{s}(t)$ は \tilde{d}_i ($i = 1, 2, \dots, m$) の重心結合となっている.

*2 一般に, 円錐型ファジィ点 \tilde{d}_i をその頂点位置ベクトル d_i とファジネス r_{d_i} を用いて $\langle d_i, r_{d_i} \rangle$ と表記することにすれば, その重心結合 $\sum_{i=0}^m k_i \tilde{d}_i$ ($\sum_{i=0}^m k_i = 1$) は円錐型ファジィ点となり $\sum_{i=0}^m k_i \tilde{d}_i = \left\langle \sum_{i=0}^m k_i d_i, \sum_{i=0}^m |k_i| r_{d_i} \right\rangle$ と求められる.

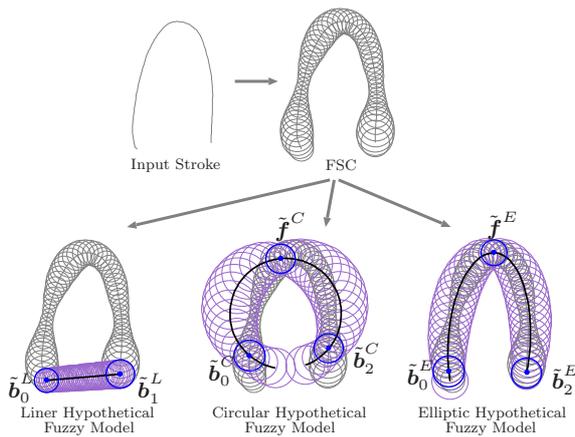


図 3 仮説モデル生成の流れ

表 1 幾何曲線同定の推論規則

$\mu(L) = (P^L \text{ is } T)$	
$\mu(C) = (N^L \text{ is } F) \wedge (P^C \text{ is } T)$	$\wedge (P^{Cl} \text{ is } T)$
$\mu(CA) = (N^L \text{ is } F) \wedge (P^C \text{ is } T)$	$\wedge (N^{Cl} \text{ is } F)$
$\mu(E) = (N^L \text{ is } F) \wedge (N^C \text{ is } F) \wedge (P^E \text{ is } T) \wedge (P^{Cl} \text{ is } T)$	
$\mu(EA) = (N^L \text{ is } F) \wedge (N^C \text{ is } F) \wedge (P^E \text{ is } T) \wedge (N^{Cl} \text{ is } F)$	
$\mu(FC) = (N^L \text{ is } F) \wedge (N^C \text{ is } F) \wedge (N^E \text{ is } F) \wedge (P^{Cl} \text{ is } T)$	
$\mu(FO) = (N^L \text{ is } F) \wedge (N^C \text{ is } F) \wedge (N^E \text{ is } F) \wedge (N^{Cl} \text{ is } F)$	

$P_2(t) = B_2^2(t) - \frac{1}{2}B_1^2(t)$ であり、 $B_i^n(t)$ は n 次 Bernstein 多項式を表す。ここで、 $\tilde{b}_0^L, \tilde{b}_1^L, \tilde{b}_0^C, \tilde{f}^C, \tilde{b}_2^C, \tilde{b}_0^E, \tilde{f}^E, \tilde{b}_2^E$ は FSC 上から選択されるファジィ代表点である^{*3}。文献 [3] および文献 [9] の手法で、これらの代表点を FSC の概形を代表するように適切に選択し、さらにパラメータ w^C および w^E を適切に設定することで、それぞれの仮説ファジィモデルは図 3 に見るようにそれぞれのモデルの制約条件のもとでできるだけ FSC に近い仮説を構成する。

(2-2) 仮説ファジィモデルの評価 三つの仮説ファジィモデル $\tilde{r}^L(t)$, $\tilde{r}^C(t)$, および $\tilde{r}^E(t)$ がもとの FSC $\tilde{s}(t)$ と合致する度合いをそれぞれ区間真理値 $[N^L, P^L]$, $[N^C, P^C]$, $[N^E, P^E]$ で評価する。さらに FSC $\tilde{s}(t)$ の閉曲線性を FSC のファジィ始点とファジィ終点の合致の度合いとして区間真理値 $[N^{Cl}, P^{Cl}]$ で評価する。これらの N および P はそれぞれファジィ理論における必然性値および可能性値 [10] であり、具体的には文献 [9] の手法で求められる。

(2-3) 曲線クラスの推論 ファジィネスによる可能性の広がり許すかぎり最も単純な曲線クラスを推論しよとする表 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 T_s と F_s はそれぞれ「真」と「偽」を表す言語的真理値^{*4}, \wedge

^{*3} 式 (3), 式 (4) および式 (5) はいずれもファジィ代表点の重心結合となっていることに注意する。

^{*4} T として最も基本的な Unitary-True を用いる場合、ファジィ命題 $(P \text{ is } T)$ は単に $(P \text{ is } T) = P$ と求められる。同様に F として Unitary-false を用いる場合、ファジィ命題 $(N \text{ is } F)$ は $(N \text{ is } F) = 1 - N$ と求められる。

は論理積を表しており、それぞれのグレード値は文献 [9], [11] の手法により区間 $[0, 1]$ 内の実数値として求められる。ここで最も高いグレード値を得た曲線クラスを曲線クラスの同定結果として出力する。また、同定された曲線クラスに対応した仮説ファジィモデルから同定曲線の形状パラメータを算出し出力する。さらに、以後のグリッドスナップングのために、同定された曲線クラスに応じて、文献 [12] に基づいて仮説ファジィモデルから、2 点ないしは 3 点のファジィ特徴点を抽出し出力する。

(3) 形状パラメータの量子化 同定曲線クラスが CA の場合、開始角および終了角を切りよのよい値に量子化する。また、同定曲線クラスが EA の場合には、開始角、終了角に加え、長径短径比の量子化も行う。具体的には文献 [7] の手法により、ファジィネスによる可能性の広がり大きいほど大胆に粗い量子化を行うファジィ推論にしたがった量子化を行う。また、量子化結果に応じて (2-3) で得られたファジィ特徴点を再算出する。

(4) グリッドスナップング ファジィ特徴点のそれぞれを文献 [5] の MFGS でグリッドにスナップングしたのち、その結果に応じて曲線全体を相似変換 (ファジィ特徴点が 2 点の場合) またはアフィン変換 (ファジィ特徴点が 3 点の場合) して整形された幾何曲線を得る。

2.2 $n/4$ 円弧同定および $n/4$ 楕円弧同定の必要性

FSCI を基盤とする処理を実装した SKIT を用いれば 7 種類の幾何曲線で構成される様々な幾何作図を手書きだけで完了できる。実際、図 4(a) の題材を作図しようとするとき、図 4(b) に示す手書きストロークを描画するだけで図 4(c) の作図結果が得られる。しかし、ここで青および赤の二つの楕円弧の同定結果をそれらを含む楕円全体とともに表示すると図 4(d) となり、青は $3/4$ 楕円弧となっているものの、赤は $1/4$ 楕円弧とはなっていないことが分かる。

楕円弧が同定されたとき形状パラメータの量子化によって開始角および終了角が $\frac{1}{2}\pi$ の整数倍に量子化されると $n/4$ 楕円弧となる。しかし図 5(a) のほぼ $1/4$ 楕円弧と思われる四つの楕円弧を考えたとき、それらを楕円全体とともに表示すると図 5(b) となり、それらの開始角と終了角は大きくばらつく。このことは FSCI に楕円弧を同定させた後にその形状パラメータを量子化してもユーザが意図する所望の整形結果が得られにくいことを示唆する。実際 SKIT では、楕円弧が浅い場合に、所望の整形結果を得ることが極端に困難となるという問題があった。

汎用的な幾何作図を目的とする手書き CAD インタフェースでは、多様な形状の円弧や楕円弧を自由に同定させることができると同時に、正方グリッドに適合する $n/4$ 円弧および $n/4$ 楕円弧といった制約された形状の円弧や楕円弧を所望するときにはこれらを意図的に同定させることもでき

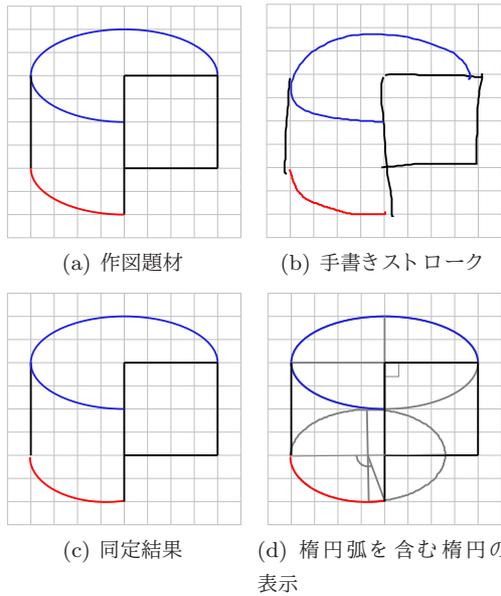


図 4 形状パラメータの量子化による楕円弧同定の困難性

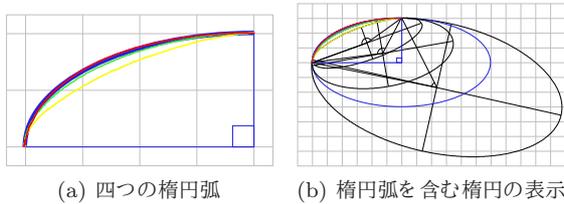


図 5 1/4 楕円弧に近い浅い楕円弧の形状パラメータのばらつき

必要がある。このような同定結果の自在な選択を手書き描画だけでコントロールするには、従来の円弧同定および楕円弧同定の後処理としての形状パラメータ量子化というアプローチではなく、従来の円弧同定および楕円弧同定に加えて $n/4$ 円弧同定および $n/4$ 楕円弧同定を新たに実現するというアプローチが必要となる。

3. $n/4$ 円弧同定および $n/4$ 楕円弧同定のためのサブ曲線同定法の提案

ユーザが $n/4$ 円弧または $n/4$ 楕円弧の入力を意図して描画をしたときに FSCI がその意図をより適切に同定するよう改善するため、従来の曲線同定に加えて新たに「サブ曲線同定」を FSCI に組み込むことを提案する。

3.1 $n/4$ 円弧サブ曲線クラスおよび $n/4$ 楕円弧サブ曲線クラスの定義

FSCI が同定する曲線クラスの一つである「円弧 (CA)」について、その特殊な場合として三つのサブ曲線クラス、すなわち「 $1/4$ 円弧 ($\frac{1}{4}CA$)」、「 $2/4$ 円弧 ($\frac{2}{4}CA$)」、「 $3/4$ 円弧 ($\frac{3}{4}CA$)」を定義し、これらを総称して「 $n/4$ 円弧 ($\frac{n}{4}CA$)」と呼ぶこととする。同様に「楕円弧 (EA)」についても、三つのサブ曲線クラス、すなわち、「 $1/4$ 楕円弧 ($\frac{1}{4}EA$)」、「 $2/4$ 楕円弧 ($\frac{2}{4}EA$)」、「 $3/4$ 楕円弧 ($\frac{3}{4}EA$)」

を定義し、これらを総称して「 $n/4$ 楕円弧 ($\frac{n}{4}EA$)」と呼ぶこととする。具体的には以下のとおり定義する。

$n/4$ 円弧 ($\frac{n}{4}CA$): 中心角が $\frac{n}{2}\pi$ の円弧

$n/4$ 楕円弧 ($\frac{n}{4}EA$): 始点および終点が楕円の長径上または短径上に位置しかつ中心角が $\frac{n}{2}\pi$ の楕円弧、およびこれをせん断変形して得られる楕円弧

3.2 FSCI におけるサブ曲線同定の位置づけと機能

ここで提案するサブ曲線同定は従来の FSCI による曲線同定の後処理として図 1 の赤で示す部分として実装するもので、従来の形状パラメータの量子化(図 1 の青で示した部分)を置換する。サブ曲線同定は、図 6 のように前段の曲線同定における曲線クラスの同定結果に応じて、それをさらに以下のとおりサブ曲線クラスに細分化して同定する。
 L, C, E, FC, FO の場合: 実質的にはサブ曲線同定による細分化を行わず、もとの同定結果をそのままサブ曲線同定結果として出力する。

CA の場合: 円弧サブ曲線同定を行い、 $\frac{1}{4}CA, \frac{2}{4}CA, \frac{3}{4}CA, CA$ のいずれかのサブ曲線クラスの幾何曲線として再同定し出力する。

EA の場合: 楕円弧サブ曲線同定を行い、 $\frac{1}{4}EA, \frac{2}{4}EA, \frac{3}{4}EA, EA$ のいずれかのサブ曲線クラスの幾何曲線として再同定し出力する。

ここで、円弧サブ曲線同定が出力するサブ曲線クラスが $\frac{n}{4}CA$ のみならず CA ともなりうる点に注意する。サブ曲線クラスとしての CA は(特別な円弧である $\frac{n}{4}CA$ ではない)一般の円弧を意味する。楕円弧サブ曲線同定も同様である。円弧サブ曲線同定法および楕円弧サブ曲線同定法の具体的な処理を 3.3 および 3.4 で提案する。

3.3 円弧サブ曲線同定法

CA が同定された場合に、その特殊な場合である $\frac{n}{4}CA$ であるかどうかを評価し、 $\frac{1}{4}CA, \frac{2}{4}CA, \frac{3}{4}CA, CA$ のいずれかに細分化して再同定する。円弧サブ曲線同定の流れは図 6 に示すように従来の FSCI の曲線同定の流れを踏襲したものである。以下に図 7 とともに具体的な処理を示す。

(1) 仮説ファジィモデルの構築 以下の三つの $n/4$ 円形仮説ファジィモデルを構成する。

$$\tilde{r}^{\frac{n}{4}C}(t) = \frac{P_0(t)\tilde{b}_0^{\frac{n}{4}C} + P_1(t)(1+w^{\frac{n}{4}C})\tilde{f}^{\frac{n}{4}C} + P_2(t)\tilde{b}_2^{\frac{n}{4}C}}{P_0(t) + P_1(t)(1+w^{\frac{n}{4}C}) + P_2(t)} \quad (n=1,2,3) \quad (6)$$

(1-1) ファジィ代表点 $\tilde{b}_0^{\frac{n}{4}C}$ および $\tilde{b}_2^{\frac{n}{4}C}$ の選択 FSC $\tilde{s}(t)$ のファジィ始点 \tilde{s} およびファジィ終点 \tilde{e} をファジィ代表点として選択する。すなわち、 $\tilde{b}_0^{\frac{n}{4}C} = \tilde{s}$ ($n=1,2,3$) および $\tilde{b}_2^{\frac{n}{4}C} = \tilde{e}$ ($n=1,2,3$) とする。

(1-2) $w^{\frac{n}{4}C}$ の設定 中心角が $\frac{n}{2}\pi$ となるように $w^{\frac{n}{4}C} = \cos \frac{n}{4}\pi$ ($n=1,2,3$) と設定する。

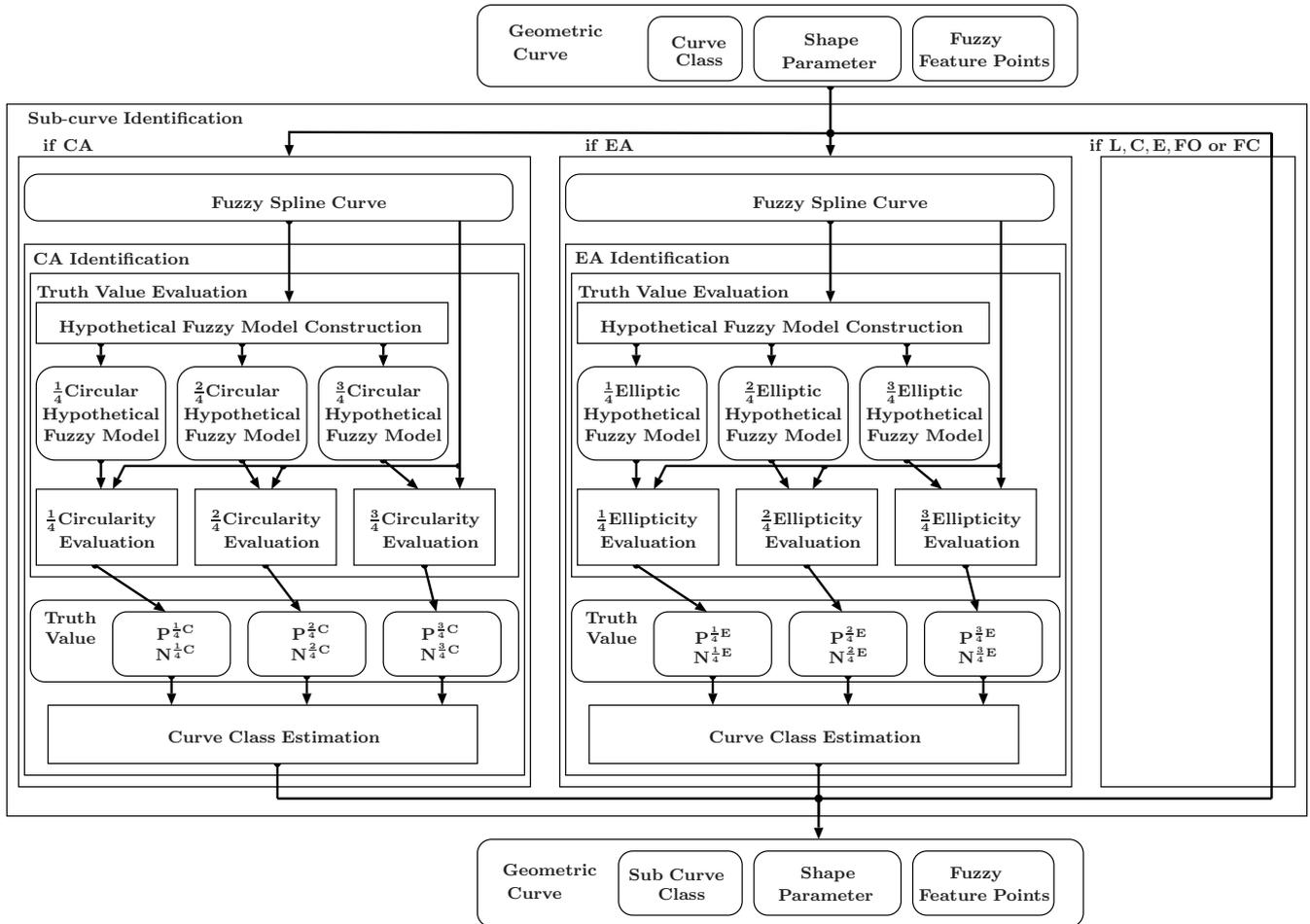


図 6 サブ曲線同定の流れ

(1-3) ファジィ代表点 $\tilde{f}^{\frac{n}{4}C}$ の設定 以下の手順で $\tilde{f}^{\frac{n}{4}C}$ ($n = 1, 2, 3$) を定める. まず線分 $b_0^{\frac{n}{4}C}, b_2^{\frac{n}{4}C}$ の垂直二等分線と FSC $\tilde{s}(t)$ の稜線との交点 f を求め, f を頂点とする $\tilde{s}(t)$ 上のファジィ点を抽出しこれをファジィ点 \tilde{f} とする. 次に \tilde{f} の頂点位置を

$$f^{\frac{n}{4}C} = \sqrt{(1-w^{\frac{n}{4}C})/(1+w^{\frac{n}{4}C})} (f-m) + m \quad (7)$$

(ただし, $m = (b_0^{\frac{n}{4}C} + b_2^{\frac{n}{4}C})/2$) に移動させたものをファジィ代表点 $\tilde{f}^{\frac{n}{4}C}$ とする.

- (2) 仮説ファジィモデルの評価 曲線同定の仮説ファジィモデル評価と同様の方法で円形仮説ファジィモデル $\tilde{r}^{\frac{n}{4}C}(t)$ ($n=1, 2, 3$) がもとの FSC $\tilde{s}(t)$ と合致する度合いを区間真理値 $[N^{\frac{n}{4}C}, P^{\frac{n}{4}C}]$ ($n=1, 2, 3$) で評価する.
- (3) 曲線クラスの推論 ファジィネスによる可能性の広がり許すかぎり一般円弧 CA より単純な曲線クラスである $\frac{n}{4}CA$ を推論しようとする表 2 のファジィ推論規則にしたがって 4 種類のサブ曲線クラスのグレード値 $\mu(\frac{1}{4}CA), \mu(\frac{2}{4}CA), \mu(\frac{3}{4}CA), \mu(CA)$ を算出する. ここで最も高いグレード値を得たサブ曲線クラスをサブ曲線クラスの同定結果として出力する. さらにここで $\frac{n}{4}CA$ が同定された場合には, $\tilde{r}^{\frac{n}{4}C}(t)$ から形状パラ

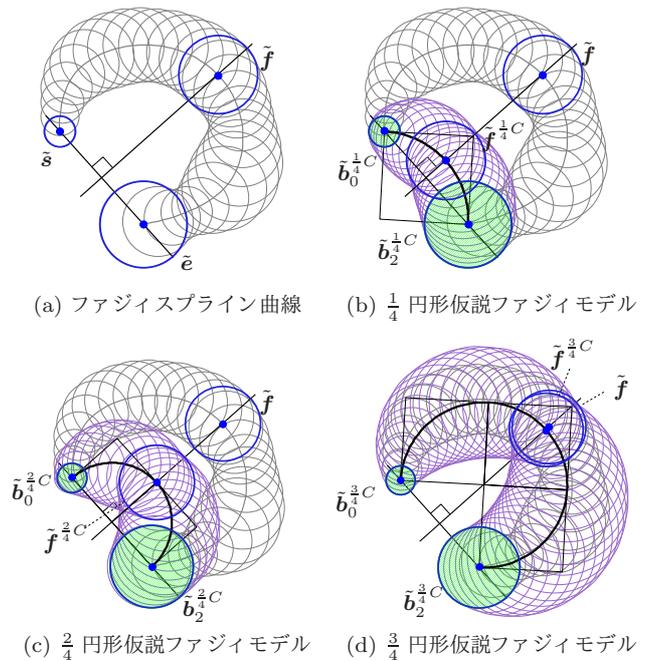


図 7 FSC をもとに生成される 3 種類の円形仮説ファジィモデル

メータを再計算して出力するとともに, ファジィ特徴点を $\tilde{b}_0^{\frac{n}{4}C}$ および $\tilde{b}_2^{\frac{n}{4}C}$ の 2 点に置換して出力する.

表 2 $n/4$ 円弧同定の推論規則

$\mu(\frac{1}{4}CA) = (P^{\frac{1}{4}C} \text{ is } T)$
$\mu(\frac{2}{4}CA) = (P^{\frac{2}{4}C} \text{ is } T)$
$\mu(\frac{3}{4}CA) = (P^{\frac{3}{4}C} \text{ is } T)$
$\mu(CA) = (N^{\frac{1}{4}C} \text{ is } F) \wedge (N^{\frac{2}{4}C} \text{ is } F) \wedge (N^{\frac{3}{4}C} \text{ is } F)$

表 3 $n/4$ 楕円弧同定の推論規則

$\mu(\frac{1}{4}EA) = (P^{\frac{1}{4}E} \text{ is } T)$
$\mu(\frac{2}{4}EA) = (P^{\frac{2}{4}E} \text{ is } T)$
$\mu(\frac{3}{4}EA) = (P^{\frac{3}{4}E} \text{ is } T)$
$\mu(EA) = (N^{\frac{1}{4}E} \text{ is } F) \wedge (N^{\frac{2}{4}E} \text{ is } F) \wedge (N^{\frac{3}{4}E} \text{ is } F)$

3.4 楕円弧サブ曲線同定法

EA が同定された場合に, その特殊な場合である $\frac{n}{4}EA$ であるかどうかを評価し, $\frac{1}{4}EA, \frac{2}{4}EA, \frac{3}{4}EA, EA$ のいずれかに細分化して再同定する. 楕円弧サブ曲線同定の流れも図 6 に示すように従来の FSCI の曲線同定の流れを踏襲したものとなる. 以下に図 8 とともに具体的な処理を示す.

(1) 仮説ファジィモデルの構築 以下の三つの $n/4$ 楕円形仮説ファジィモデルを構成する.

$$\tilde{r}^{\frac{n}{4}E}(t) = \frac{P_0(t)\tilde{b}_0^{\frac{n}{4}E} + P_1(t)(1 + w^{\frac{n}{4}E})\tilde{f}^{\frac{n}{4}E} + P_2(t)\tilde{b}_2^{\frac{n}{4}E}}{P_0(t) + P_1(t)(1 + w^{\frac{n}{4}E}) + P_2(t)} \quad (n = 1, 2, 3) \quad (8)$$

ここで, $\tilde{b}_0^{\frac{n}{4}E}, \tilde{b}_2^{\frac{n}{4}E}, w^{\frac{n}{4}E}, \tilde{f}^{\frac{n}{4}E}$ を以下の通り定めて, $\tilde{r}^{\frac{n}{4}E}(t)$ の稜線が $n/4$ 楕円弧となるよう制約する.

(1-1) ファジィ代表点 $\tilde{b}_0^{\frac{n}{4}E}$ および $\tilde{b}_2^{\frac{n}{4}E}$ の選択

$\tilde{b}_0^{\frac{n}{4}E} = \tilde{s} \quad (n=1, 2, 3), \tilde{b}_2^{\frac{n}{4}E} = \tilde{e} \quad (n=1, 2, 3)$ とする.

(1-2) $w^{\frac{n}{4}E}$ の設定 $\frac{n}{4}EA$ となるように $w^{\frac{n}{4}E} = \cos \frac{n}{4}\pi \quad (n=1, 2, 3)$ と設定する.

(1-3) ファジィ代表点 $\tilde{f}^{\frac{n}{4}E}$ の設定 以下の手順で $\tilde{f}^{\frac{n}{4}E} \quad (n = 1, 2, 3)$ を定める. まず, FSC $\tilde{s}(t)$ の稜線上の点のうち直線 $\tilde{b}_0^{\frac{n}{4}E}\tilde{b}_2^{\frac{n}{4}E}$ から最遠となる点 \tilde{f} を求める. 次に, \tilde{f} を頂点とする $\tilde{s}(t)$ 上のファジィ点 \tilde{f} を抽出し, これをファジィ代表点 $\tilde{f}^{\frac{n}{4}E}$ とする.

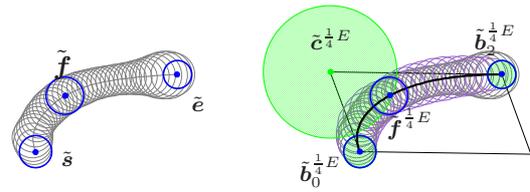
(2) 仮説ファジィモデルの評価 楕円形仮説ファジィモデル $\tilde{r}^{\frac{n}{4}E}(t) \quad (n=1, 2, 3)$ がもとの FSC $\tilde{s}(t)$ と合致する度合いを区間真理値 $[N^{\frac{n}{4}E}, P^{\frac{n}{4}E}] \quad (n = 1, 2, 3)$ で評価する.

(3) 曲線クラスの推論 表 3 のファジィ推論規則にしたがって, 円弧サブ曲線同定法と同様の方法で, サブ曲線クラスを同定し出力する. ここで $\frac{n}{4}EA$ が同定された場合には, $\tilde{r}^{\frac{n}{4}E}(t)$ から形状パラメータを再計算して出力するとともに, ファジィ特徴点を $\tilde{b}_0^{\frac{n}{4}E}, \tilde{b}_2^{\frac{n}{4}E}, \tilde{c}^{\frac{n}{4}E}$ の 3 点に置換して出力する. ただし $\tilde{c}^{\frac{n}{4}E}$ については n に応じて以下のとおり設定する.

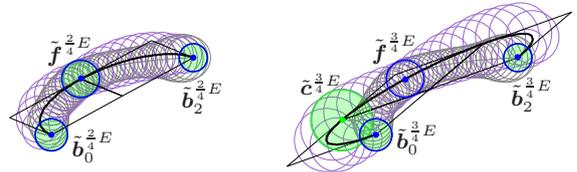
$$\tilde{c}_1^{\frac{1}{4}E} = (\sqrt{2}+1)\tilde{f}^{\frac{1}{4}E} - (\sqrt{2}/2)(\tilde{b}_0^{\frac{1}{4}E} + \tilde{b}_2^{\frac{1}{4}E}) \quad (9)$$

$$\tilde{c}_1^{\frac{2}{4}E} = \tilde{f}^{\frac{2}{4}E} \quad (10)$$

$$\tilde{c}_1^{\frac{3}{4}E} = (2-\sqrt{2})\tilde{b}_0^{\frac{3}{4}E} + 2(\sqrt{2}-1)\tilde{f}^{\frac{3}{4}E} + (1-\sqrt{2})\tilde{b}_2^{\frac{3}{4}E} \quad (11)$$

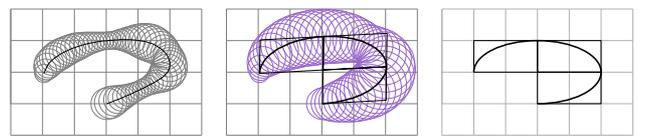


(a) ファジィスプライン曲線 (b) $\frac{1}{4}$ 楕円形仮説ファジィモデル



(c) $\frac{2}{4}$ 楕円形仮説ファジィモデル (d) $\frac{3}{4}$ 楕円形仮説ファジィモデル

図 8 FSC をもとに生成される 3 種類の楕円形仮説ファジィモデル



(a) FSC (b) 同定結果 (c) スナッピング結果

図 9 素早い描画による $3/4EA$ の同定例

3.5 サブ曲線同定法の動作例

楕円弧を例にして提案したサブ曲線同定法の典型的な動作の様子を以下に示す. 深い楕円弧状の素早い描画から生成された図 9(a) のファジネスの大きな FSC は単純な (自由度の低い) サブ曲線クラスである $\frac{3}{4}EA$ として図 9(b) のように同定される. この段階ではせん断変形しているがファジネスの大きなファジィ特徴点をもつため大胆なスナッピングが行われ*5 最終的に図 9(c) のように正方グリッド沿った $\frac{3}{4}EA$ が出力される. これに対して, 図 10(a) の丁寧な描画から生成されたファジネスの小さな FSC は複雑な (自由度の高い) サブ曲線クラスである一般 EA として図 10(b) のように同定される. またこの同定結果はファジネスの小さなファジィ特徴点をもつため大胆なスナッピングは行われず最終的に図 10(c) のようなもとの描画形状に忠実な深い一般 EA が出力される. 浅い楕円弧状の描画についても同様に図 11 と図 12 に示す同定結果が出力される. このようなサブ曲線同定の性質を利用することでユーザは $n/4$ 楕円弧と一般楕円弧を区別して入力することができる.

4. サブ曲線同定法の有効性評価実験

提案したサブ曲線同定法の有効性を確認するため評価実験を行った. 実験を行うにあたって, FSCI による曲線同定を基盤とした文献 [6] の手書き CAD インタフェースに提案したサブ曲線同定法を追加実装したインタフェースを

*5 MFGS はファジネスの大きい特徴点を解像度の粗いグリッド, ファジネスの小さい特徴点を解像度の細かいグリッドにスナッピングする.

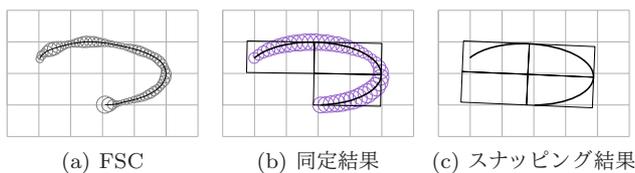


図 10 丁寧な描画による深い一般 EA の同定例

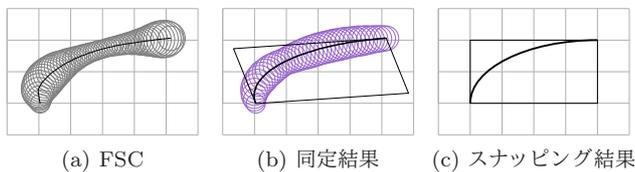


図 11 素早い描画による 1/4EA の同定例

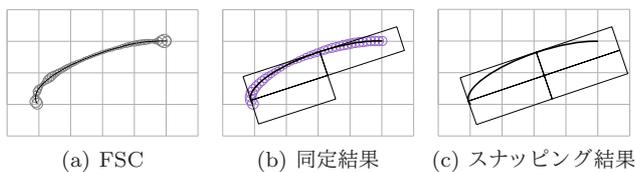


図 12 丁寧な描画による深い一般 EA の同定例

新たに試作した。このインターフェースには文献 [13] の重ね書き修正機能も実装されており、たとえ最初のストローク描画で所望の同定結果が得られなかった場合でもさらに追加のストロークを繰り返し重ね描くことで同定結果を逐次更新し徐々に所望の同定結果に近づけることが可能となっている。

4.1 弧の深さと扁平率の違いによる同定性能の比較

弧の深さと扁平率の異なる様々な $n/4$ 円弧および $n/4$ 楕円弧を目標として、これらをユーザがどの程度意図通りに同定させることができるかという観点で同定性能を評価した。ここで目標楕円弧を図 13 に示す縦横比 $a:b$ の $1/4$ 楕円弧, $2/4$ 楕円弧および $3/4$ 楕円弧とすることにし, 図 14 に示す 44 種類の目標楕円弧を用意した。ここで表記 $a:b [n/4]$ は縦横比 $a:b$ の $n/4$ 楕円弧を意味するものとし, $1:1 [n/4]$ は $n/4$ 円弧を意味するものとする。同定性能を示す具体的な指標としては, 目標楕円弧がペンタブレット上に提示された瞬間からユーザが重ね書き修正機能を必要に応じて駆使しつつ目標楕円弧と全く同じ楕円弧を同定させることに成功する瞬間までの所要時間を「目標達成時間」として測定した。^{*6}

手書き CAD システムに精通した一名のユーザにそれぞれの目標楕円弧を 10 回ずつ計 440 回ランダムに提示して測定した目標達成時間を平均した結果を図 14 に示す。ここで, 縦横比 $1:1, 1:2, 2:1, 1:4, 4:1, 2:3, 3:2$ といった簡単な縦横比の目標楕円弧については, 2 秒程度と

^{*6} 一本のストロークから幾何曲線が同定されるまでの対応時間は 0.2 秒以下あり, リアルタイムシステムとして動作することに注意する。

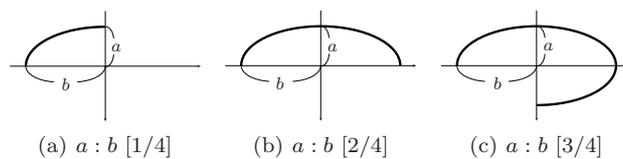


図 13 実験に用いた目標楕円弧

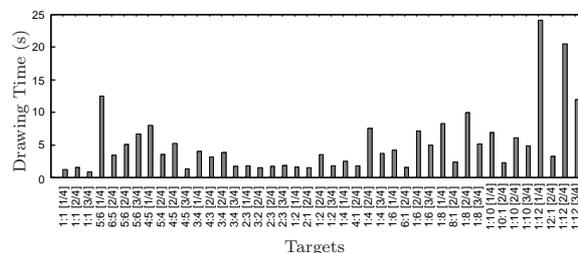


図 14 弧の深さと扁平率の違いによる目標達成時間の比較

比較的短い目標達成時間となっていることが分かる。一方, 縦横比が $1:1$ (すなわち, $n/4$ 円弧) に近づく, もしくは縦横比が極端に大きくなるにつれて, 目標達成時間が長くなっていることが分かる。特に $5:6 [1/4], 1:12 [1/4], 1:12 [2/4]$ および $1:12 [3/4]$ では 10 秒以上の目標達成時間を要した^{*7}。これらの結果から, 極端な場合には同定性能が下がるものの, 幾何作図で重要となる比較的簡単な縦横比の $n/4$ 楕円弧や $n/4$ 円弧の場合については実用的な同定性能が得られたと考えられる。

4.2 ユーザの違いによる同定性能の比較

比較的簡単な縦横比の $n/4$ 楕円弧および $n/4$ 円弧 14 種類に絞って手書き CAD システムの扱いにある程度慣れた UserA から UserF までの 6 名のユーザの目標達成時間を 4.1 と同様の方法で計測し, 図 15 の結果を得た。ユーザによって得意不得意はあるもののほとんどの場合で目標達成時間は数秒程度となっており, 何れのユーザの場合でもほぼ実用的な同定性能が得られているものと考えられる。

4.3 幾何作図例による効果の確認

幾何作図を実際に行うことで提案したサブ曲線同定法の効果を確認した。ユーザは手書き CAD インターフェースを使ってストローク描画を繰り返しながらインタラクティブに作図を進めた。その結果, 最終的に図 16 に示す 242 本のストロークを描画することで約 15 分で図 17 に示す幾何作図を完成した。比較のために, 同じ描画ストロークを従来のパラメータ量子化を用いた CAD インターフェースに入力して得た結果を図 18 に示す。

従来手法の図 18 では, 「橋」のアーチ部分や「街灯」の部分がかきれいに $n/4$ 楕円弧に整形されていなかったり, 浅

^{*7} $5:6 [1/4]$ は $\frac{1}{4}CA$ と, $1:12 [1/4]$ および $1:12 [2/4]$ は CA, FO と誤同定されやすくなる。また $1:12 [3/4]$ は描画の折り返し点で分割されて 2 本の幾何曲線として誤同定されやすくなる。

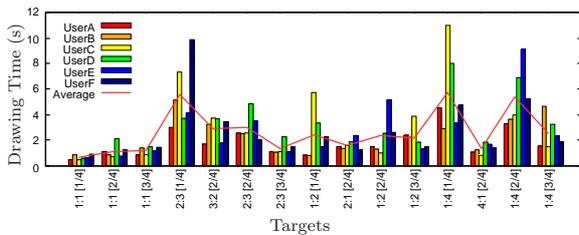


図 15 ユーザの違いによる目標達成時間の比較

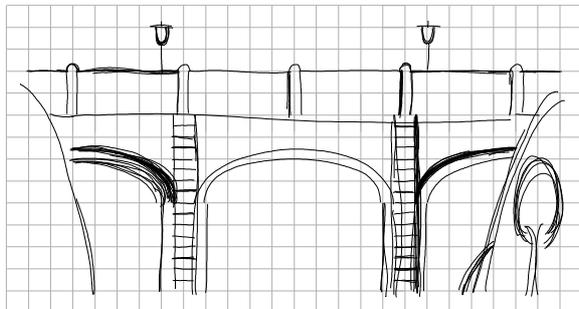


図 16 ユーザが入力した全ての描画ストローク

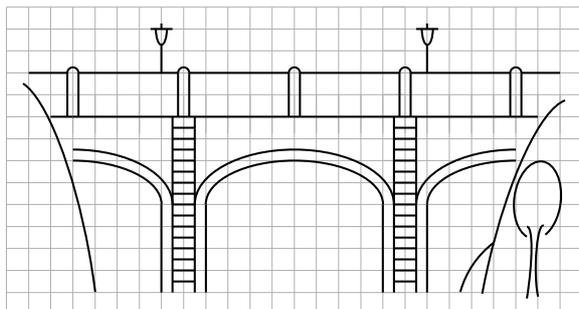


図 17 提案したサブ曲線同定法を用いた場合の作図結果

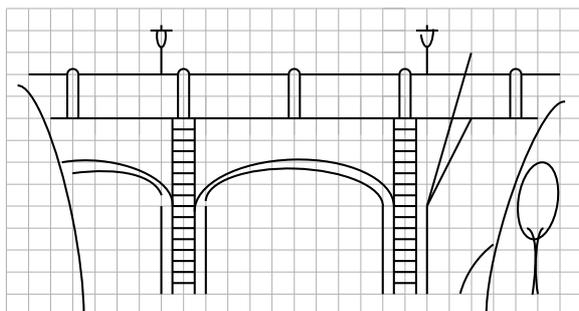


図 18 従来のパラメータ量子化を用いた場合の作図結果

い楕円弧の形状が破綻^{*8}したりしているのがわかる。これに対して、図 17 の結果では、 $n/4$ 楕円弧を適切に配置できているとともに、「木」や「崖」の部分などを意図的に一般楕円弧で作図できておりサブ曲線同定法が効果的に動作したことがわかる。

5. おわりに

本報告では、従来の FSCI の幾何曲線同定法を発展させ

^{*8} 2.2 で述べたとおり特に浅い楕円弧ではパラメータ量子化による整形が原理的に困難なことによる破綻である。

たサブ曲線同定法を提案し、FSCI 自身に組み込むことで、従来の 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)の同定に加えて、正方グリッドを用いた幾何作図で特に重要となる $n/4$ 円弧および $n/4$ 楕円弧も同定できる手書き CAD インタフェースを実現した。また、6 名のユーザによる評価実験を行い、比較的単純な扁平率の $n/4$ 楕円弧および $n/4$ 円弧については数秒以内で所望の幾何曲線の入力を完了できることを明らかにし、サブ曲線同定法が実用的な同定性能を有することを示した。さらに幾何作図実験を通して、 $n/4$ 楕円弧を正方グリッドに沿った形に配置できる一方で一般楕円弧を自在に配置することも可能であることを示し、実際の幾何作図作業においてサブ曲線同定法が有効に機能することを示した。

参考文献

- [1] Igarashi, S., Matsuoka, S., Kawachiya, S. and Tanaka, H.: Interactive Beautification: A Technique for Rapid Geometric Design, *In UIST '97: Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 105–114 (1997).
- [2] 正嶋博, 横山考典, 葛貫壮四郎, 福永泰: 画数, 筆順, 回転, 区切りに依存しないオンライン手書図形認識方式, *情報処理学会論文誌*, Vol. 27, No. 5, pp. 492–498 (1986).
- [3] 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-D-II, No. 8, pp. 1620–1629 (1994).
- [4] Khand, Q. U., Dematapitiya, S., Saga, S. and Maeda, J.: A Multi-Resolution Grid Snapping Technique Based on Fuzzy Theory, *IPSJ Digital Courier*, Vol. 3, pp. 198–206 (2007).
- [5] Dematapitiya, S., Kawazoe, M., Nishikawa, A., Sakurai, M. and Saga, S.: Snapping of Fuzzy Objects Using the Multi-Resolution Fuzzy Grid Snapping Technique, *IPSJ Journal*, Vol. 50, No. 2, pp. 904–915 (2009).
- [6] 河合良太, 西川玲, 佐賀聡人: 手書き入力スケッチフロントエンドプロセッサ: SKIT, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J88-D-II, No. 5, pp. 897–905 (2005).
- [7] 櫻井将樹, 佐賀聡人: 多重解像度ファジィグリッドスナッピングを用いた幾何曲線スナッピング-楕円, 楕円弧への適用-, *情報処理学会研究報告*, Vol. 2006-HI-119, No. 72, pp. 119–126 (2006).
- [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*, Vol. J82-D-I, No. 5, pp. 634–643 (1999).
- [9] 滝川裕康, 安福尚文, 佐賀聡人: 手書き曲線同定法 FSCI における同定アルゴリズムの改善, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J85-D-II, No. 11, pp. 1683–1691 (2002).
- [10] L.A, Z.: Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 3–28 (1978).
- [11] 森さおり, 佐賀聡人: ファジィニューラルネットワークを用いた学習型手書き曲線同定法, *信学論 (D-I)*, Vol. J83-D-I, No. 3, pp. 375–383 (2000).
- [12] 七條直樹, 佐賀聡人: ファジィ円弧およびファジィ楕円弧のスナッピング法の改善, 平成 24 年度電気情報関連学会北海道支部連合大会講演論文集 87 (2012).
- [13] 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*, Vol. J86-D-II, No. 2, pp. 242–251 (2003).