

ファジィスプライン曲線同定法を用いた手書き CAD 図形 入力インタフェースの試作

佐 賀 聡 人[†] 佐々木 淳 一[†]

本論文では、手書き描画による曲線プリミティブ同定手法として提案されている「ファジィスプライン曲線同定法 (Fuzzy Spline Curve Identifier, FSCI)」を核とした、手書き CAD 図形入力インタフェースを提案している。FSCI は CAD で通常取り扱う図形の構成要素として最少限必要となる 7 種類の曲線プリミティブ (線分, 円, 円弧, 楕円, 楕円弧, 閉自由曲線, 開自由曲線) のすべてを手書き描画動作から同定する。本インタフェースは、この FSCI による曲線プリミティブ同定を基にしたボトムアップアプローチによって CAD 図形入力インタフェースを実現する。このため、本インタフェースは、通常の図形入力用途に必要な曲線をすべて入力できるとともに、CAD アプリケーション本体に対して高い独立性を保つことができる。従って、本インタフェースのアプローチは既存の種々の CAD システムに柔軟に適用でき、一般性の高い手書き CAD インタフェースの構築法を与える。本論文では、FSCI に「幾何曲線図形編集機能」と「スナッピング処理」を組み合わせ、さらに、ペンによる直接的なユーザインタフェースを構築することにより本インタフェースのプロトタイプを実現した。このプロトタイプを用いた実験の結果、本インタフェースによって、通常の CAD で用いる 7 種類の曲線プリミティブすべての人力を手書き描画表現を有効に利用して行えることが確認された。

A Freehand CAD Drawing Interface Based on the Fuzzy Spline Curve Identifier

SATO SAGA[†] and JUN-ICHI SASAKI[†]

This paper proposes a freehand CAD drawing interface, based on a primitive curve identification technique called the Fuzzy Spline Curve Identifier (FSCI). FSCI identifies a freehand curve as a sequence of curve segments, each of which is categorized into one of seven kinds of curve primitives: line, circle, circular arc, ellipse, elliptic arc, closed free curve or open free curve. The proposed interface is built by a bottom-up approach based on the curve primitive identification. Therefore, the interface handles sufficient varieties of curves for common CAD use and remains highly independent from the main part of CAD applications. These features of the approach allow the interface to adapt to various CAD systems. The prototype of the interface in this paper is composed of FSCI, a “geometric curve editing function”, a “snapping function” and a pen-based user interface. The experimental results from the prototype show the effectiveness of the approach to a freehand CAD interface, which allows a user to input any of the seven kinds of primitive curves quickly.

1. ま え が き

現在、様々な分野で利用されている CAD システムであるが、これらにおける図形入力インタフェースはメニュー選択を中心に実現されている。このような CAD システムを用い、試行錯誤の中でデザインを行ってゆく過程においては、本来の図形描画と直接関係のないメニュー選択操作によって思考の中断が生じる。

ところで、近年、手書き描画動作を入力するデバイスとして、ペンコンピュータ等の利用が可能となっている。このような状況で、CAD システムにおいても、手書きによる描画表現を有効に利用した図形入力ヒューマンインタフェースが考えられる。

用途別に様々な高機能化、多機能化された CAD システムが存在するが、しかし、これらに一般的に共通する基本的な図形入力機能は、線分、円、円弧、楕円、楕円弧、閉自由曲線、開自由曲線 (自由曲線はスプライン曲線などとして表現される) の 7 種類の曲線プリミティブを自在に組み合わせて線図形を構成するところにあると考えられる。オンライン手書き図形認識の

[†] 株式会社テクノバ研究開発室
Research and Development Division, Tecnova
Corporation

研究としては既に文献1)があり、またペンコンピューティング環境における製品レベルの手書き図形入力システムも幾つか開発されている^{2),3)}。しかし、これらでは手書き描画表現によって直接入力できる曲線プリミティブの種類は上記の7種類を網羅しておらず、また図形入力アプリケーションの用途に強く依存した形となっており、上述の基本機能を満足するには十分ではないと思われる。

本論文では、ペン描画による直接的図形入力のための基本技術として提案されているファジィスプライン曲線同定法 (Fuzzy Spline Curve Identifier, FSCI)^{4)~6)} を核とした、ボトムアップアプローチによる手書き CAD 図形入力インタフェースの構築法を提案し、試作システムの評価によってその有効性を確認する。FSCI の手書き曲線同定は CAD で通常扱う図形の構成要素として必要最少限の7種類の曲線プリミティブのすべてに対応している。従って、本インタフェースは、通常の図形入力用途に必要な曲線プリミティブのすべてを、一貫して描画動作表現をもとに入力できる網羅性を有する。また本インタフェースでは、手書き曲線を幾何曲線プリミティブに変換する下位の曲線同定処理を個々の CAD アプリケーション固有の性質に依存した部分とは独立させ、アプリケーション依存の機能は上位の図形処理レベルで実現するというアプローチをとっている。このような従来にみられない網羅性と独立性を指向した本手法のアプローチは、種々の CAD アプリケーション用途に対しても柔軟に対応し得る一般性の高い手書き図形入力インタフェースの構築法を示唆している。

2. 手書き CAD 図形入力インタフェースの概要

本章では、試作した手書き CAD 図形入力インタフェースシステムのハードウェア構成と、基本的な設計方針を示し、具体的な例を用いて本インタフェースの全体的な動作を概観する。

2.1 試作システムのハードウェア構成

本試作システムでは、ソフトウェアをパーソナルコンピュータ (DELL 製 i486 DX 33 MHz) の DOS/V 環境上に構築し、液晶表示一体型タブレット (MUTOH 製 MVT-7) を接続してペンコンピューティング環境を実現した (図1参照)。ここで、コンピュータ本体のディスプレイおよびキーボードはシステムの開発、管理、実験用のもので、手書きインタ

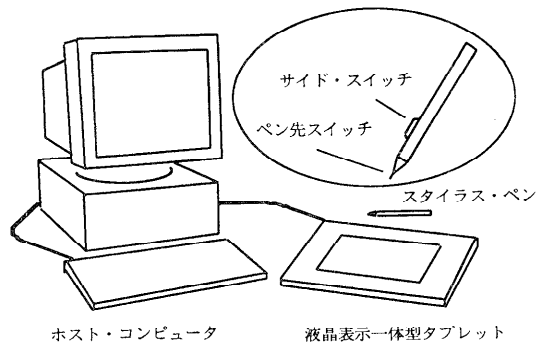


図1 試作システムのハードウェア構成

Fig. 1 Hardware configuration of the prototype system.

フェースとしては表示一体型タブレット装置 (以下、単にタブレットと略す。)のみを用いる。

タブレット部の分解能は 40 points/mm で、表示部は 191.97 mm × 143.97 mm, 640 × 480 ドットの STN 白黒液晶表示装置で構成されている。ペンには二つのスイッチが付属しておりそれぞれのオン、オフのステータス変化が検出される。これらのうち、ペン先のスイッチは、ペンがタブレットに押しつけられているかどうかを検出する。一方のサイドスイッチは、ペン軸上にあり、ペンを握っている手の指で随時操作することにより補助的な入力手段として利用できる。なおタブレットは電磁誘導方式でタブレット面上 7 mm 以内であればスイッチのステータス変化およびペン位置が検出される。

2.2 試作インタフェースの基本設計方針

本インタフェースは、汎用性を重視し、CAD システム本体とはできるだけ独立した、手書き曲線入力のためのフロントエンドプロセッサ (FEP) 的な機能を果たすものを目指す。従って、本インタフェースの目標は、一般的な CAD においてはほぼ共通して用いられる線図形の基本構成要素、すなわち7種類の基本曲線プリミティブ (線分、円、円弧、楕円、楕円弧、閉自由曲線、開自由曲線) すべての入力を網羅することとし、CAD アプリケーション本体に依存する冗長な処理をできるだけ排除する。例えばここで、CAD を日本語ワードプロセッサに見立てた場合、本システムはかな漢字変換 FEP に相当する。かな漢字変換

* ただし、本論文の範囲では、本システムを既存の CAD システムと協調して動作する FEP として実装する方法についてまでは論じていない。ペンによる文字入力 FEP⁷⁾ のように、図形についてもなるべく既存の CAD に変更を加えない形で本機能を実装できる方法について今後検討する必要がある。

FEP における, かな入力, 漢字変換, 文節長の変更, 次候補単語選択, 小規模の編集に当たる部分が, 本インタフェースの曲線描画, 曲線同定, 分割点修正, 曲線クラス変更, 幾何曲線図形編集に相当する. 一方, ワードプロセッサ本体が提供する大がかりな文章編集機能などに対応する CAD の図形編集機能などは, CAD アプリケーション本体が提供すべき機能として本インタフェースでは扱わない.

本インタフェースの理想的な目標は, 手書き図形描画動作のみで所望の線図形を CAD データとしてシステムに入力できる環境を実現することである. しかし不確実性を伴う手書き動作だけから, 目標とする CAD 図形データを常に正確に入力することは不可能であり, 誤認識に伴う次候補選択や図形の位置, 形状の微調整といったユーザによる修正作業を完全に無くすることは困難である. 従って, より現実的な目標は, 修正作業も含め, 手書き描画動作から所望の CAD 図形データ入力までを効率よく行える環境を実現することである.

そこで, 本インタフェースは

- (1) 手書き描画動作以外の修正作業を極力減らす,
- (2) 修正作業は, 表示図形対象に対する直接的なペン操作 (ピッキング, ドラッグ) や図形対象近傍でのサイドスイッチの操作によって実現する, の 2 点を基本方針として設計する.

(1) は理想に近づける試みである. 本インタフェースでは, FSCI を有効に活用することにより, 描画動作に含まれる情報を極力有効に利用し, ユーザの描画意図の的確な把握を図る. また, スナッピング処理によって入力図形の自由度に制限を加え, 修正作業の抑制を図る.

(2) は, 修正作業が必要になった場合においても, 描画曲線対象から注意を外らさずに済むインタフェースを実現しようとする現実的な試みである. ここで修正の対象となる表示図形は入力された手書き曲線の位置や形状をよく反映したものであり, これが描画直後に手書き曲線と置き換えられるかたちで表示される. 従って (2) のような修正作業を実現すれば, ユーザは, あたかも自分が描画によって生成した対象に一貫して注意を注ぎつづけながら, これに直接ペンで触れる感覚で操作を加えることができる.

2.3 試作インタフェースの概要

本試作インタフェースの表示画面は図 2 に示す簡素なものである. 「メッセージエリア」はシステム側か

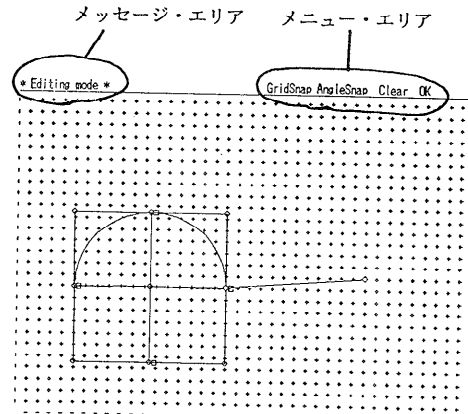


図 2 手書き CAD 図形入力インタフェースの表示画面
Fig. 2 Display of the freehand CAD drawing interface.

らのメッセージを表示する部分で, 「メニューエリア」には若干のメニューコマンドが配置されている. ただし, メニューコマンドは, グリッド間隔の設定や描画の取消などの例外的な処理を行う補助的なもので, 曲線入力過程においては通常これらを用いない.

本試作インタフェースによる線図形入力過程を図 3 に示す. 図中の矩形で囲まれた部分は処理を示し, その中で網掛けを施した部分はユーザの入力作業を伴う処理を示す. また各処理間で受け渡されるデータの典型的な具体例を同図中の (a)-(g) に合わせて示す. この具体例では, 一筆書きによって円弧と線分の二つの図形要素を一度に CAD へ入力しようとしている.

以下, 図 3 に沿って概要を説明する.

(1) 曲線描画

まずユーザが曲線を描画し, ペンを浮かせた時点で, 描画曲線が FSCI に渡される. ここで, ユーザは複数の曲線を一筆書きで一度に描画することも許される. 曲線の区切りは描画動作中の一時停止によって表現する.

図 3 (a) はユーザが円弧と線分, 2 曲線の入力を意図して書いた手書き曲線データの例である.

(2) セグメンテーション

FSCI が曲線描画動作の停止性を評価して, 一筆書きの曲線を複数のセグメントに分割する. ここで, FSCI は確定的な分割点と非確定的な分割点を区別して検出し, 分割情報付きの手書き曲線データを出力する. 非確定的な分割点を検出した場合は, ユーザの判断を仰ぐために「分割点修正」処理に進む. 一方確定的な分割情報のみが検

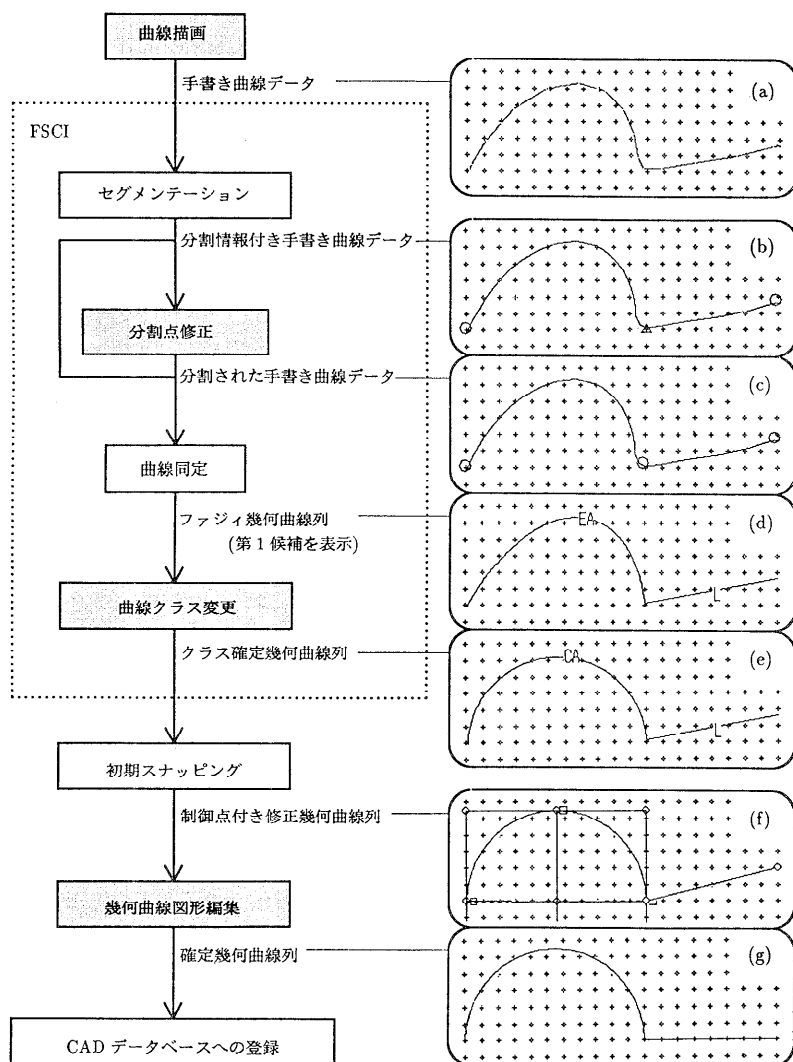


図 3 手書き CAD 図形入力インタフェースの処理とデータの流れ
Fig. 3 Process and data flow of the freehand CAD drawing interface.

出された場合は、即座に「曲線同定」処理に進み、冗長な入力作業が省略される。

図 3 (b) の例では始終端点に確定的分割点 (○) が検出され、円弧状部と線分状部の間に非確定的分割点 (△) が検出されている。

(3) 分割点修正

分割意図があいまいと判断された非確定的分割点を手書き曲線データ上に表示して、ユーザに分割意図の確認を促す。ユーザはこの時点で、分割意図のある非確定的分割点のマークをペンでピック (その位置でペンをタブレットに押しつけてその

まま離す) して確定的分割点に反転する。ユーザは所望の反転処理をすべて終了した時点でサイドスイッチを押して確定の意図を伝える。システムは、確定的分割点において曲線を分割して「曲線同定」処理に渡す。

図 3 (b) の例ではユーザが非確定的分割点 (△) をピックして確定的分割点 (○) に反転した後、確定している。これにより入力曲線は図 3 (c) のように 2 セグメントに分割される。

(4) 曲線同定

FSCI が、分割された各々のセグメントをファ

ジ幾何曲線として同定し、「ファジ幾何曲線列」を出力する。ファジ幾何曲線とは、後に述べるようにグレードによって順序付けられた同定幾何曲線の候補群である。

(5) 曲線クラス変更

すべてのセグメントのファジ幾何曲線の各々から第1候補の幾何曲線を選出して構成した幾何曲線列を表示し、ユーザの確認を促す。ユーザはこの時点で、意図に沿わない幾何曲線を順次ペンでピックし候補を表示させる。ユーザは所望の候補選択をすべて終了した時点でサイドスイッチを押して確定の意図を伝える。システムは、この段階で表示されている幾何曲線列を次の処理に出力する。

図3の例では、第1候補として、楕円弧(EA)と線分(L)が表示されている(同図(d))。ここでユーザは左の楕円弧をピックすることにより次候補の円弧(CA)を表示させた後、曲線クラスを確定している。これにより円弧、線分という所望の曲線クラスの幾何曲線列(同図(e))を得る。

(6) 初期スナッピング

予めユーザが設定した値に従って、幾何曲線列を整形する。これにより、それぞれの幾何曲線の角度や座標の値が切りの良い値に丸め込まれる。

図3の例では、円弧、線分の両端点がグリッド上に位置し、円弧の中心角が180度になるように整形されている(同図(f))。

(7) 幾何曲線図形編集

整形された幾何曲線列を制御点とともに表示して、ユーザの確認を促す。ユーザはこの時点で、制御点をペンでドラッグ(対象点においてペンをタブレットに押しつけ、そのまま移動させて離す)またはピックすることによって図形編集作業を行う。システムはスナッピングを行いながらユーザのペンの動きに合わせてリアルタイムに幾何曲線列と制御点の表示を更新し、ユーザの編集作業を助ける。ユーザは所望の形状が得られた時点でサイドスイッチを押して確定の意図を伝える。システムはこの段階で表示されている幾何曲線列を次の処理に渡す。

図3の例では、線分の終端点の位置が意図に反しているため、ユーザがこの点の制御点(◇)をドラッグによって移動させ、最終的に同図(g)のように所望の曲線列を得ている。

(8) CAD データベースへの登録

確定された幾何曲線列のそれぞれの幾何曲線のパラメータをCADのデータベースに登録する。

上の処理による曲線入力過程をユーザの操作の視点から整理すると、以下のように曲線描画と簡単な修正作業によって所望の円弧と線分が同時にCADに入力されることが分かる。

1. 図3(a)の曲線を描画する。
2. 図3(b)の△をピックした後、サイドスイッチを押す。
3. 図3(d)の楕円弧をピックした後、サイドスイッチを押す。
4. 図3(f)の線分の終点をドラッグした後、サイドスイッチを押す。

図3は、描画曲線(同図(a))と最終的に意図している幾何曲線列(同図(g))とのずれが比較的大きい例を示しており、このため、ある程度の修正作業が必要となるが、ここで、最初の曲線描画がもっと的確であれば、さらに入力作業は簡単になることに注意する。最善の場合、「分割点修正」は自動的に省略され、また「曲線クラス変更」および「幾何曲線図形編集」では確定のためのサイドスイッチ操作だけを行えばよい。すなわちこのときは、曲線描画の後、その場でサイドスイッチを2回押すだけで瞬時に複数の幾何曲線をCADに入力することができる。

3. FSCI を用いた幾何曲線列の入力

本章では、まず、本インタフェースの核を成す手書き曲線プリミティブ同定法 FSCI が提供する二つの処理「セグメンテーション」^{4),5)} および「曲線同定」^{4),6)} について、特に本インタフェースを設計する上で重要となる特徴的な機能および性質を整理する。

次に、2.3 節で既に概観したユーザインタフェースのうち、FSCI に密接に関係する手書き入力から幾何曲線列決定に至るまでの下位部分、すなわち「曲線描画」、「分割点修正」および「曲線クラス変更」について説明を加える。この部分は、本インタフェースの中でも、特にCADアプリケーションに依存しない独立性の高い部分で汎用的な利用が可能である。

3.1 FSCI の特徴

FSCI は、オンラインで一筆書きされた曲線を(1)描画の停止点に基づいて小区間に分割し(「セグメンテーション」)、(2)分割された各々の区間を基本的な7種類の幾何曲線プリミティブの何れかとして同定す

表 1 ファジィ幾何曲線
Table 1 Fuzzy geometric curve.

曲線クラス	グレード	形状パラメータ
線分 (L)	$\mu(L)$	始点座標, 終点座標
円 (C)	$\mu(C)$	中心座標, 半径長, 接点座標
円弧 (CA)	$\mu(CA)$	中心座標, 半径長, 始点座標, 終点座標, 右回り/左回りフラグ
楕円 (E)	$\mu(E)$	中心座標, 長径長, 短径長, 回転角, 接点座標
楕円弧 (EA)	$\mu(EA)$	中心座標, 長径長, 短径長, 回転角, 始点座標, 終点座標, 右回り/左回りフラグ
閉自由曲線 (FC)	$\mu(FC)$	スプライン曲線制御多角形の頂点座標, 接点座標
開自由曲線 (FO)	$\mu(FO)$	スプライン曲線制御多角形の頂点座標, 始点座標, 終点座標

る(「曲線同定」). このとき, FSCI は曲線の形状とともに, その描画動作の丁寧さ加減をもファジィ情報として活用することを特徴としており, これにより観測された描画がどの程度意図的なものであったかを把握し, 書き手の描画意図を推論する.

3.1.1 セグメンテーション

基本的には描画曲線の停止点の検出によって手書き曲線を分割する*. しかし, 実際の人間の描画では, たとえ書き手に停止させる意図があっても, 必ずしも厳密に停止するとは限らない. FSCI は, 描画動作の丁寧さ加減を勘案した上で描画動作の停止性を評価する. これにより丁寧な停止動作に対しては確定的分割点を検出する一方, いい加減な停止動作に対しても柔軟に対応して非確定的な分割点を検出する.

3.1.2 曲線同定

分割された手書き曲線の各々が7種類のクラスの幾何曲線プリミティブ(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))の何れを意図したものかファジィ推論し, さらにその幾何曲線の形状パラメータを同定する.

幾何曲線の同定は, 基本的には描画曲線の形状的な特徴の分析に基づく. しかし一般に, 手書き曲線の形状は書き手の意図している幾何曲線プリミティブの形状を正確には反映しない. 描画形状の正確性は描画の丁寧さ加減に応じて変わる. FSCI は, 丁寧な描画については描画された曲線形状の細部の具体性を重んじ, 逆に適当でラフな描画については細部の形状よりも描画運動の大ざっぱな形の象徴性を重んじるという

戦略によって書き手の描画意図を推論する. これにより, 丁寧な描画では比較的自由度の高い複雑な曲線クラス(開自由曲線, 閉自由曲線など)が推論されやすくなり, 逆にラフな描画では自由度の低い単純な曲線クラス(線分, 円など)が推論されやすくなるという特性が得られる.

推論の結果は, ファジィ幾何曲線として同定される. ここでファジィ幾何曲線とは, 7種類の曲線クラス名を台集合とする離散的なファジィ集合によって表されるファジィ曲線クラスと, さらに7種類の曲線クラスのそれぞれに対応した形状パラメータのセットによって表現される幾何曲線のファジィモデルである. これを具体的に示すと表1のような一群のデータと等価である. これはまた, グレード(各曲線クラスのグレード値 $\mu(*)$ は区間 $[0, 1]$ 内の任意の実数値)によって順序付けられる七つの幾何曲線候補群とみなすこともできる.

3.2 幾何曲線入力ユーザインタフェース

FSCI の「セグメンテーション」, 「曲線同定」機能に対して, 図4のように以下のユーザインタフェースを組み合わせる. これにより FSCI の特徴を生して, 対話的に幾何曲線列を決定するシステムが構成される.

3.2.1 曲線描画

まずユーザが自分の意図する幾何曲線(列)を手書き描画動作によって表現する. その結果は「セグメンテーション」処理に渡される.

幾つかの曲線プリミティブを一筆書きで入力したい場合, ユーザは曲線プリミティブ間の区切れを曲線描画中の一時停止動作によって明示的に表現する. ここで, 図4の Case I のようにセグメントの区切れを丁寧な停止動作で示す努力を払えば, 確定的分割点(○)のみが検出され冗長な「分割点修正」処理を回避することができる. 一方, 同図 Case II のように丁寧な停

* 本セグメンテーションでは曲線形状における特徴点(角など)の情報を利用しない. ヒューマンインタフェースとしては, 書き手による明示的な分割意図表現を尊重するためである. これにより, 例えば, 一直線上に連結配置された複数の線分を一筆書きで表現することなども可能にする.

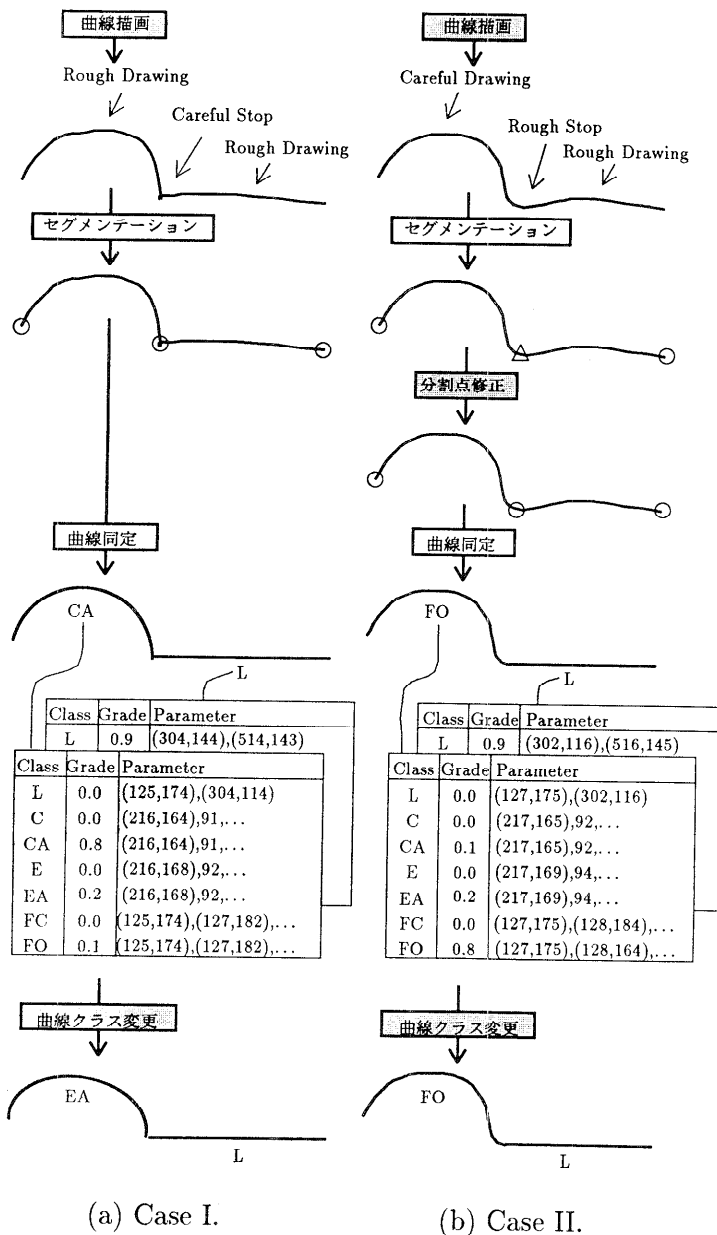


図 4 FSCI を用いた幾何曲線入力
Fig. 4 Input of geometric curve sequences using FSCI.

止動作ができなかった場合でも非確定的分割点(△)が検出され、後の「分割点修正」処理で分割意図を表明する機会が与えられる。

曲線クラスに関しては、ユーザが曲線同定における FSCI の推論傾向を利用した描画動作表現を行うことにより自分の意図を表現する。すなわち、自由曲線の

ような複雑な曲線クラスを意図する場合は、比較的ゆっくりと丁寧な描画動作を示すことにより描画形状の具体性を強調する。逆に線分や円といった比較的単純な曲線クラスを意図する場合(そして特にそれを正確に描画できる自信がない場合)は、素早くラフな描画によってその描画動作の象徴性を強調する。図 4 の Case II の弧状の部分は前者であり、これが「曲線同定」の結果における開いた自由曲線(FO)の高グレードに結びつく。一方、同図 Case I の弧状の部分は後者であり、円弧(CA)の高グレードに結びつく。

3.2.2 分割点修正

FSCI による「セグメンテーション」の結果、非確定的な分割点(△)が検出された場合のみ 2.3 節の(3)で述べた対話処理によって分割点を確定し、その結果を「曲線同定」処理に渡す。

図 3 の Case II の例では、非確定的分割点(△)を確定的分割点(○)に反転して分割意図を表明しているが、この時点で反転指示をしなければ以後の「曲線同定」において描画曲線全体を一つの曲線セグメントとして同定させることもできる。

3.2.3 曲線クラス変更

「曲線同定」の結果、取りあえずは第 1 候補として同定された幾何曲線列を画面に表示することになるが、実際には既にこの時点で、それぞれの曲線セグメントについて表 1 の形式の幾何曲線候補

群がシステム内部で求められている(図 4 参照)。従って、2.3 節の(5)で述べた対話的な次候補選択処理による「曲線クラス変更」のユーザインタフェースは容易に実現される。例えば図 4 Case I の第 1 セグメントでは、第 1 候補としてグレード 0.8 の円弧を画面に表示するが、次候補が要求されれば、グレード

0.2 の楕門弧の形状パラメータを表から取得して直ちに画面表示を更新できる。

4. 幾何曲線図形編集

前章までの処理で、手書き曲線描画は CAD データとして登録し得る幾何曲線列となる。しかし一般にこの段階で、形状パラメータに関する微調整が必要となる。本インタフェースでは、タブレット上に表示される幾何曲線の制御点に対するペンを用いた直接的な操作による図形編集機能を実現し、微調整を可能にする。

FSCI が同定出力する幾何曲線列の性質をふまえて、本編集手法は以下の 3 点に留意して構築する。

- (1) 手書き入力における誤差の微調整
- (2) 各セグメントの曲線クラスの保存
- (3) 各セグメント間の接続条件の保存

本編集手法の機能は (1) を実現するための必要最少のものに限定し、かつそれらを網羅する。FSCI は手書き曲線を基に幾何曲線列を出力しており、その概形は既に所望の幾何曲線列に近くなっている。従って、ここでの図形編集には大がかりな編集操作は必要ない。本編集機能は日本語入力 FEP に例えると、かな漢字変換時における変換バッファ内での編集操作に対応する小規模なものである。このように個別の CAD アプリケーションに依存するような冗長な図形編集機能を排除することにより、アプリケーションに対する独立性、汎用性を高める。

FSCI から出力された時点で既に各曲線の曲線クラスは確定しており、編集操作によって曲線クラスが変化してはならない。そこで本編集手法は (2) の制約条件を満足するように、以下の変換と変形の組み合わせで実現する。

- 相似変換
- パラメトリック変形

FSCI から出力された幾何曲線列は一筆書きから生成されたものであるから、それらの接続関係が図形編集によって変形しない方が望ましい。そこで本編集手法では (3) の制約条件を満足するように相似変換によって曲線列全体を調整する。

4.1 着目セグメントの相似変換

相似変換は、着目するセグメントに対して一つの固定点と一つの移動点が決まると一意に決定する。

本インタフェースでは、図 5 に示すような制御点 p_i を各曲線クラスごとに定め、これらの制御点 (◇) から固定点と移動点を選択して相似変換を行う。ここで、同図 (b), (d) の制御点 p_9 および (f) の制御点 p_{14} は隣接セグメントとの接続点である。また、同図 (f), (g) の制御点は ((f) の p_{14} を除いて) スプライン曲線の制御多角形の頂点である。

ユーザは、タブレット上に◇で表示された制御点の中の一つをペンでピックすることによりこれを固定点として選択し (システムは固定点と選択された点の表示を◆に反転する。), 次いで別の◇を移動点としてペンでドラッグして相似変換を行う。このときシステムが移動点のドラッグに従ってリアルタイムに図形表示を更新することによりユーザの判断を助ける。

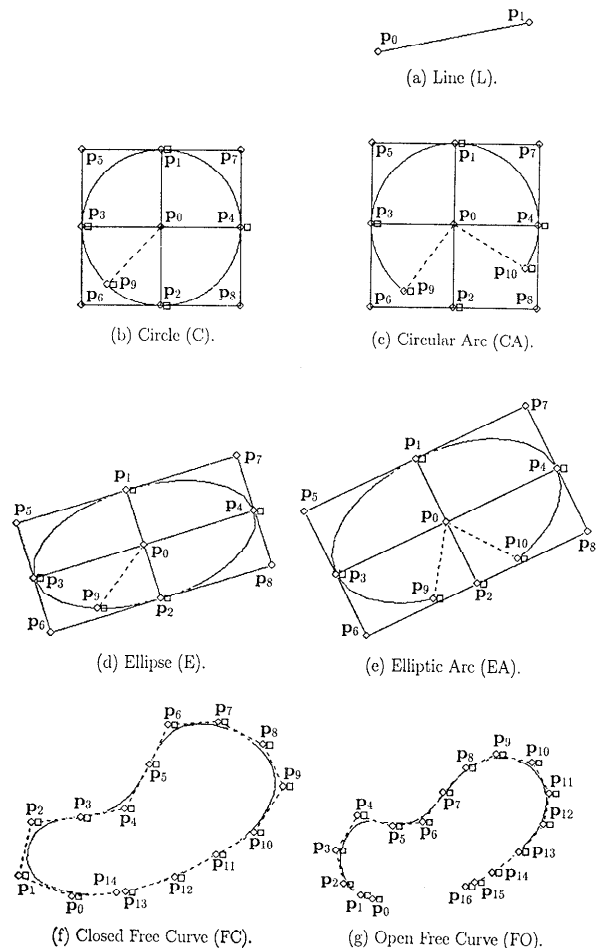


図 5 図形編集制御点
Fig. 5 Control points for editing.

また、使用頻度の高い相似変換に関しては、デフォルトの固定点を設定すると明示的な固定点の指示を省略でき使用感がよくなる。本インタフェースでは、明示的に固定点を選択しないで移動点のドラッグが行われた場合、以下のように固定点を選択することにした。開曲線の場合は、始点が移動点となったとき終点、逆に終点が移動点となったとき始点をデフォルトの固定点とする。閉曲線の場合は、中心点（閉自由曲線のときは接統点から最も遠い制御点）をデフォルトの固定点とし、中心点が移動点となったときは接統点をデフォルトの固定点とする。

4.2 着目セグメントのパラメトリック変形

ここでいうパラメトリック変形とは、各曲線クラス固有のパラメータに対する直接的な編集である。例えば、楕円の短径長のみの変更がこれに当たる。パラメトリック変形は、着目するセグメントの制御点の移動のみで決定する。ユーザはこれをパラメトリック変形用の制御点（図5の制御点のうち、□が付随している制御点）の□をペンでドラッグすることにより行う。

図5の(b), (c), (d), (e)における制御点 p_9 および p_{10} は、始点、終点、接統点の中心角を変更するために用いる。また、 p_1 , p_2 , p_3 および p_4 は半径長、長径長、短径長の変更用である。図5の(f), (g)における制御点は、スプライン曲線の制御多角形の一つの頂点位置を単独に変更するために用いる。

4.3 接統条件保存のための相似変換

着目セグメントに対して相似変換あるいはパラメトリック変形を施した場合、始点、終点あるいは接統点の移動を伴うことがある。これらの点は、隣接セグメントとの共有点であり、隣接セグメントとの接統関係を保存するためには、隣接セグメントも同時に変形する必要がある。

本インタフェースでは着目セグメントと隣接セグメントとの共有点を隣接セグメントの移動点として隣接セグメントの相似変換を行うことにより接統関係を保持。ここで接統関係を保存するためには更に先の隣接セグメントの相似変換が必要となる場合がある。従ってシステムは共有点が固定点となっているセグメントに至るまで着目セグメントの両側の各セグメントに相似変換を連鎖的に伝搬させる。ただし、明示的な固定点を指定しない場合は、開曲線のデフォルト固定点が共有点（始点あるいは終点）に選ばれるので、一般に伝搬はすぐに止まり全体としてユーザの直感的な理解を越えるような大きな変形が生じることは少ない。

4.4 近接制御点の選択

ピックやドラッグを行うとき選択される制御点はペン先から最短距離にあるものが選ばれるが、場合によっては複数の制御点が同一の座標上に重なる場合（例えば、図5(c)の p_9 が p_8 に重なる場合）も生じる。本インタフェースではこのような場合に備え、ユーザがペンを制御点近くに押しつけた段階で選択された制御点の名前がメッセージエリアに表示されるようにし、その状態でサイドスイッチを一回押すごとに次に近い制御点を選択されるようにした。

5. スナッピング処理

CAD に図形を入力する場合、図形の形状パラメータ値を切りのよい値に拘束したり、特定の図形対象との位置関係を拘束したりする、いわゆるスナッピング機能を利用する場合が多い。従って、「スナッピング処理」を本インタフェース内に組み込むことができれば、ユーザは効率的に所望の形状を得られるようになる。

しかし、「スナッピング処理」の機能、すなわち図形に対する拘束条件は CAD アプリケーションそのものの用途に深く依存するため、独立性と網羅性を保ち、汎用性を高めることは難しい。ここでは比較的頻繁に用いられる、グリッドに対する制御点のスナッピングと角度の値に関するスナッピングに絞って実現する^{*}。

本インタフェースでは、ユーザは、インタフェース使用中の任意の時点でメニュー選択によってスナッピング設定モードに入り、距離に関する量子化の単位量 d と角度に関する量子化の単位量 θ を設定することができるものとする。

システムは、各セグメントの幾何曲線の距離および角度に関する形状パラメータをユーザの設定した d および θ の整数倍となるように整形することによりスナッピング処理を行う。システムの行うスナッピング処理は、「初期スナッピング」と「編集時スナッピング」とに分かれる。

5.1 初期スナッピング

「初期スナッピング」は FSCI が出力した「クラス

^{*} これ以外の機能に関しては、本インタフェースによる図形入力後に CAD アプリケーション本体の図形編集機能を用いて調整する、あるいは、個々の CAD アプリケーションに対応して本インタフェースの「スナッピング機能」を拡張することにより対応する必要がある。

確定幾何曲線列」に対してシステムが自動的に行う。

初期スナッピングはパラメトリック変形と相似変換を組み合わせて以下の手順で行う。

角度スナッピング 円弧および楕円弧の始終点の角度(始終点と中心を結ぶ線の長径軸に対する角度)を θ の整数倍になるように丸め込む。また円および楕円の接続点の角度も同様に丸め込む。

長短径スナッピング 楕円および楕円弧の長径長と短径長を d の整数倍になるように丸め込む。

グリッドスナッピング 開曲線の始終点および閉曲線の接続点と中心点が最寄りのグリッド(グリッド間隔 d)上に丸め込まれるように各曲線セグメントを相似変換する。

5.2 編集時スナッピング

ユーザによる「幾何曲線図形編集」においても、ペンによってドラッグされる移動点の種類に応じて角度および距離に関するスナッピングをリアルタイムに行う。

6. 実験例と考察

本インタフェースは、対象を7クラスの曲線プリミティブに限っているものの、その形状パラメータの値には制限を設けない一般性の高いものとなっている。従ってすべての状況を想定した評価は難しい。本章では、幾つかの代表的な場合をもとにして評価を試みる。

6.1 曲線クラスの認識率評価

本インタフェースの有効性を考える上では、まず第一に、ユーザが描画動作表現によってどの程度の確に描画意図をシステムに伝えられるか、すなわち曲線クラスの認識率が重要なポイントとなる。ただし、ユーザが認識させようとする幾何図形の形状によって認識の困難さが本質的に大きく変化することは一般論として自明であろう^{*}。

そこでまず、7種類の曲線クラスのそれぞれについて、ある程度形状を指定することにより、形状のばらつきを少なくして認識率を調べた。実験では11人の被験者に対して、図6の7曲線を1セットとして、30セットの曲線を繰り返し液晶画面上に提示し、提示されたものに近い形状の曲線を、曲線クラスを意識して描画してもらった。被験者は何れもFSCIを初めて使用する者で、実験前に、習熟者がデモンストレーショ

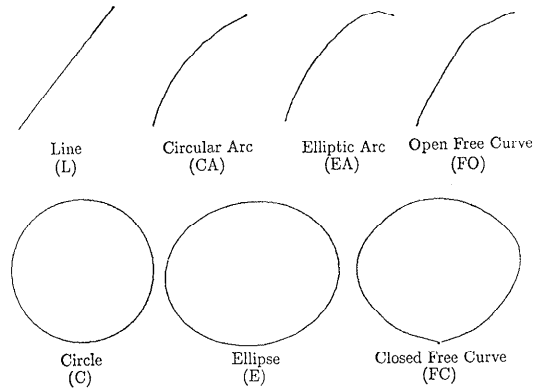


図6 7種類の目標プリミティブ曲線
Fig. 6 Seven kinds of target primitive curves.

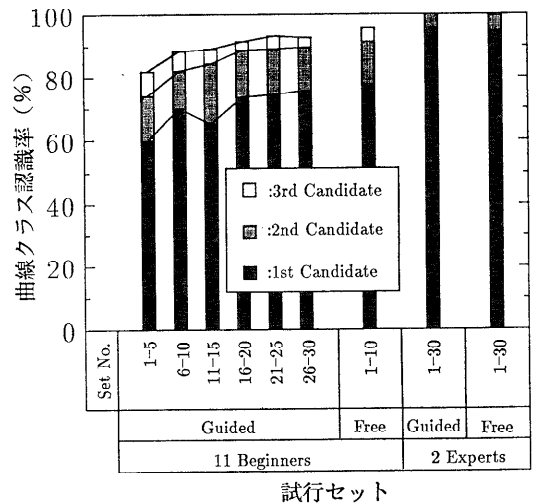


図7 曲線クラスの認識率
Fig. 7 Curve class recognition rate.

ンを見せることにより描画の丁寧さ加減でFSCIの推論傾向がどう変化するか理解してもらった。

実験の結果得られた第1候補、第2候補以上、第3候補以上の認識率を、5回の試行セットごとに平均した結果を図7に示す(図中の11 Beginners, Guidedの項)。提示した曲線形状は開曲線相互、閉曲線相互に形状が類似しているにもかかわらず、ユーザは比較的速くFSCIの取扱いに馴れて、自分の意図をFSCIに伝達できるようになることが分かる。なお習熟者2名を対象に、各々30セットの試行を繰り返して同様の実験を行ったところ、第1候補の認識率が95.5%となり、さらに第2候補までで100.0%の認識率が得られた(図7の2 Experts, Guidedの項参照)。

次に、本インタフェースを実際に使用する場面を想

^{*} 例えば、円にほぼ等しい楕円や、極端に扁平な楕円の認識は、いわゆる典型的な楕円に比べて困難になる。

定し、形状を指定しないで曲線認識率を調べた。この実験では、被験者に対して、曲線クラス名のみを指定し、被験者の自由な発想で様々な大きさおよび形状の曲線を描画してもらった。前出の初心者 11 名を被験者として、7 種類の曲線クラス名を順次指定してゆき、これを 1 セットとして 10 セット繰り返した結果、図 7 に示す認識率 (11 Beginners, Free の項) が得られた。また同様の実験を習熟者 2 名を対象に 30 セット繰り返したときの認識率も図 7 に示す (2 Experts, Free の項)。この実験では、被験者によっては極端な形状の描画に挑戦して失敗する例なども観察されたが、平均的にはある程度常識的な範囲の形状を描画しており、図 6 の形状を提示した場合と同程度以上の認識率が得られた。

6.2 初期スナッピング機能の評価

FSCI の曲線同定と初期スナッピングが的確に働けば、ユーザの図形編集操作が軽減されることになる。そこで、被験者 (習熟者) 2 名に対して図 8 (a)-(c) の幾何曲線をそれぞれ 100 回液晶画面上に提示し、本インタフェース ($d=5\text{ mm}$, $\theta=\pi/6$ に設定) を用いて提示されたものと同一の幾何曲線を入力する試行を行った。

実験の結果、初期スナッピング後、目的とする幾何曲線を得るまでに必要となった図形編集操作 (相似変換操作とパラメトリック変形操作) の回数を図 9 に示す。Target I の 1/4 円弧については図形編集操作がほぼ必要なく、Target III の 3/4 楕円弧についても

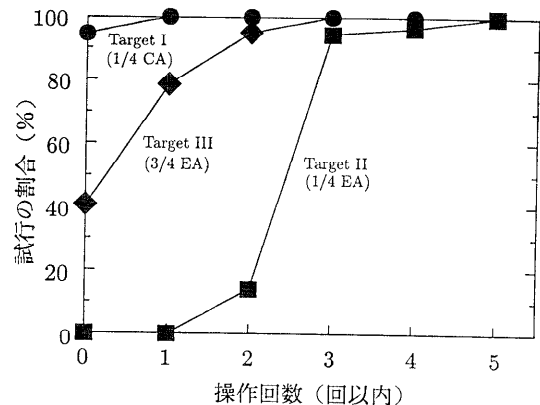


図 9 図 8 の目標幾何曲線を得るために必要となった編集操作回数

Fig. 9 Number of required editing operations to get the target geometric curves in Fig. 8.

ほぼ 2 回以内の操作で所望の曲線が得られており、これらの場合、曲線描画だけで相当程度的に意図を伝達できることがわかる。Target II の 1/4 楕円弧の場合は楕円弧の自由度の大きさと楕円全体に対する描画部分の少なさの兼ねあいから、図形編集操作が避けられないが、それでも例えば 6.3 節の例のような 2, 3 回程度の簡単な操作で所望の幾何曲線が得られる。なお曲線描画から幾何曲線決定までに要した時間の平均値は、Target I (1/4 円弧) が 3.4 秒、Target II (1/4 楕円弧) が 12.0 秒、Target III (3/4 楕円弧) が 7.2 秒であった。参考のため、標準的なメニュー選択方式の CAD を用いて、習熟オペレータに、同等の幾何曲線を入力してもらった。事前に作画手順を確認した後に、なるべく素早く 10 回ずつ入力してもらった結果、平均所要時間が、Target I で 6.0 秒、Target II で 15.2 秒、Target III で 15.1 秒となった。何れの場合も本インタフェースの方が短い所要時間を示しているが、特に初期スナッピング処理のうまくゆく例 (Target I, Target III) において大幅に入力効率が改善されることが分かる。

6.3 曲線入力の実例

図 10 に本インタフェースによる曲線入力の実例を示す。この例では、比較的同定が困難な 1/4 楕円弧を含んでいるが、2 回の簡単な図形編集操作で所望の幾何曲線列が得られている。同様の例で、2 線分を 1/4 円弧で接続するような場合は、6.2 節の結果から予想されるとおり、ほとんどの場合に図形修正作業は

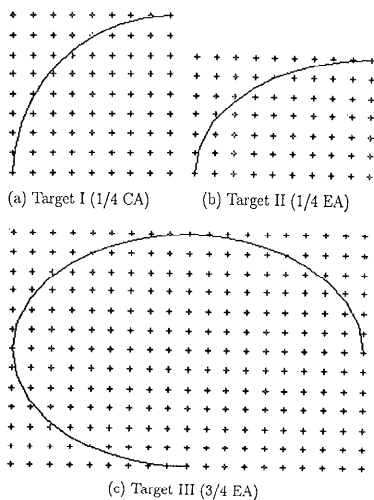


図 8 目標幾何曲線

Fig. 8 Target geometric curves.

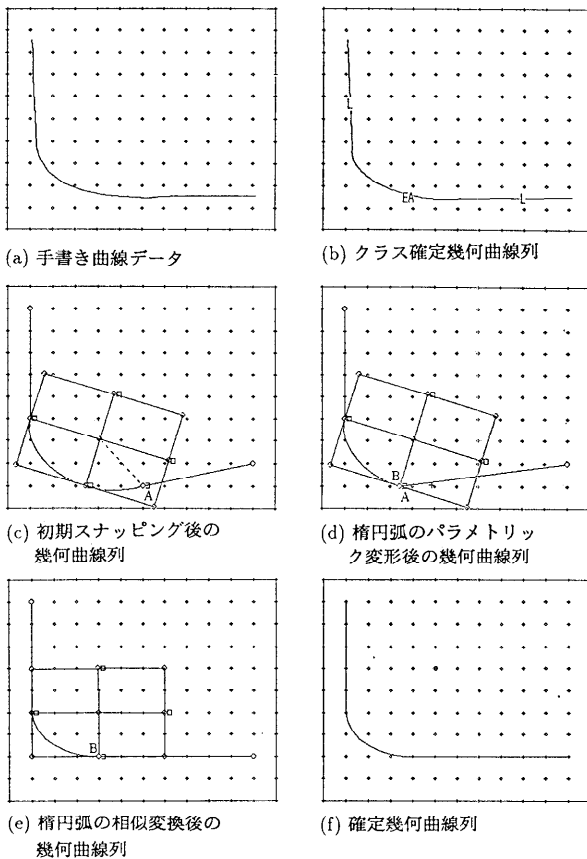


図 10 手書き CAD 図形入力インタフェースによる曲線入力過程の一例

Fig. 10 An example of curve input process with the freehand CAD drawing interface.

不必要となった。この場合は、曲線描画の後、二度サイドスイッチを押して、曲線クラスの認識結果と初期スナッピングの結果に対する承認の意志を伝えるだけで、三つの幾何曲線が直ちに確定され、CAD データベースに登録される。

6.4 実際の使用に關しての考察

実験を通して十数人の被験者に本インタフェースを実際に使用してもらった過程で以下のような点が観察された。

本システムは書き手の描画意図を効率的にシステムに伝えるためのヒューマンインタフェースであり、手書き図面やデッサンを自動的に消書するためのシステムではない。ゆえにユーザは事前に分割意図や曲線クラスを意識してから一筆の描画に臨む必要がある。このため一筆書きで余り多くの曲線を一気に描画するこ

とは一般に困難で、実用上は一度に一つか二つ程度の少数の曲線を入力し、これを繰り返すことにより作図を完成させてゆく方法をとる場合が多かった。ただし、長方形や一筆書きの星型のように全体の描画動作を定型として体得している場合などには、さらに多くの曲線を一筆で描画する場合も多く観察された。

本システムでは、サイドスイッチを曲線クラスおよび編集図形の確定に用いることにより、曲線描画後、視線やペン先を移動することなく、その場で即座に曲線を確定することを可能にした。実際の作画を観察すると、図形編集の必要性があまりない線分や円弧などの入力が多く、特に習熟者の場合は、描画とサイドスイッチによる確定操作を淀みなく繰り返しながら次々に作図してゆく場面が多く観察された。

ペンでのピックやドラッグによる分割点の変更、曲線クラスの次候補選択、図形編集作業に關して、操作そのものに対する違和感を訴える者はいなかった。ただし、近接制御点の選択においてペンを押しつけながらサイドスイッチを押す操作は難しいという感想が多かった。

全体的な一連の操作手順に關しては、手順を体得している習熟者の場合は特に違和感を訴えなかった。しかし、初心者の方は、各段階で行うべき操作手順が分からずに戸惑う場面がときどき見られた。これは、本試作インタフェースでは、サイドスイッチとペン先スイッチによる描画のみで操作することを前提としたことから、場面によって一つのペン操作に異なった機能が割当てられていると思われる。これに關しては、各場面の画面表示を説明的なデザインへ改善する、メニュー操作を併用する、ペン以外のデバイス（例えば、ペンを持っていない手による複数のキー操作）を利用する、さらに文字認識やジェスチャ認識を利用するなど多角的な角度から検討し改善する余地があるものと思われる。

7. む す び

本論文では、手書き描画による曲線プリミティブ同定手法である FSCI を核とした、手書き CAD 図形入力インタフェースを試作した。本試作インタフェースは、FSCI に「幾何曲線図形編集機能」と「スナッピング処理」を組み合わせ、さらにペンによる直接的なユーザインタフェースを構築することで実現した。実

験の結果、本インタフェースを用いることにより、通常の CAD で用いる 7 種類の曲線プリミティブすべての入力、手書き描画表現を有効に利用して行えることが確認された。また、曲線入力過程で修正作業が必要となった場合でも対象図形から注意をそらすことなくわずかな図形操作で所望の曲線が得られることを示した。

本論文で試作した手書き CAD 図形入力インタフェースは最少限の基本機能を実現したものであり、実際の CAD システムにおいて実用的に用いるためには、対象となる個々の CAD システムの特徴に応じた特化した機能拡張（例えばオブジェクトスナッピング処理など）が必要になる。しかしながら、本インタフェースの曲線プリミティブ同定を基にしたボトムアップアプローチはこのような機能拡張に対しても柔軟に対応することが可能であると考えられる。この意味で、本システムは手書き CAD インタフェース構築のための一般的なアプローチを示すものとする。

今後は、本インタフェースを既存の実用 CAD システムに組み込む、あるいはそれらと協調して動作させることにより、実際の作図作業全体の中における本図形入力インタフェースの実用性を評価する予定である。

参 考 文 献

- 1) 正嶋 博, 横山孝典, 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).
- 2) 遠藤泰夫: 手書き図面入力システム「T-Board」の開発と製品化, 建築設備と配管工事, Vol. 27, No. 7, pp. 100-106 (1989).
- 3) Linderholm, O., Apiki, S., Ndeau, M., Perratore, E. and Redfern, A.: Newton 登場の背景を探る第 1 部革新性を前面に出す Newton の狙い, 日経バイト, No. 103, pp. 254-263 (1992).

- 4) Saga, S. and Makino, H.: Fuzzy Spline Interpolation and Its Application to On-Line Free-hand Curve Identification, *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, pp. 1183-1190 (1993).
- 5) 佐賀聡人, 牧野宏美, 佐々木淳一: 手書き曲線モデルの構成法—ファジースプライン補間法—, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J77-D-II, No. 8, pp. 1610-1619 (1994).
- 6) 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, Vol. J77-D-II, No. 8, pp. 1620-1629 (1994).
- 7) 成島正敏, 鶴田晋央, 木村龍英, 熊田 豊, 守屋慎次: ペン入力の日本語 FEP, 計測自動制御学会第 8 回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp. 161-166 (1992).

(平成 6 年 3 月 14 日受付)

(平成 6 年 11 月 17 日採録)



佐賀 聡人 (正会員)

昭和 35 年生。昭和 57 年北海道大学工学部電子工学科卒業。昭和 62 年同大学院博士課程（電子工学）修了。昭和 62 年～平成元年青年海外協力隊員としてフィリピン、ナガダ大学にてコンピュータサイエンスを指導。平成元年(株)テクノバ入社。図形処理システムのヒューマンインタフェースに関する研究に従事。平成 6 年同社退職。同年室蘭工業大学情報工学科講師。IEEE, 電子情報通信学会, ファジィ学会, 音響学会各会員。工学博士(北海道大学)。



佐々木 淳一 (正会員)

平成 3 年北海学園大学工学部電子情報学科卒業。平成 5 年同大学院修士課程修了。同年(株)テクノバに入社し、図形処理システムのヒューマンインタフェースに関する研究に従事。平成 6 年同社退社。同年(株)クマシロシステム設計に入社。電子情報通信学会会員。