空間描画動作同定に基づく 3次元曲線プリミティブ入力インタフェース

佐々木 聡　　佐賀 聡人
室蘭工業大学 情報工学科

2次元オンライン手書き曲線同定法の一つとして，ファジィスプライン曲線同定法 (FSCI) が提案されている．FSCI は，手書き曲線の形状に加えて動特性を考慮して7種類の基本曲線プリミティブへ同定する．この FSCI を用いた汎用的手書き曲線入力インタフェースは，自由度の高い3次元ではさらに有効と考えられる．そこで本論文では，FSCI を3次元に拡張し，3次元仮想空間に描画された手書き曲線を基本プリミティブに同定する 3D-FSCI を提案する．

3D Primitive Curve Input Interface Based on Drawing Manner Identification

Akira SASAKI and Sato SAGA
Dept.of Computer Science and Systems Engineering,
Muroran Institute of Technology

Fuzzy Spline Curve Identifier (FSCI) has been proposed as an online freehand curve identifier in two-dimensional space. FSCI is able to identify seven kinds of primitive curves from freehand drawings considering user's drawing manner as well as the curve shape. It is expected that general-purpose freehand curve input interface based on FSCI is very effective in three-dimensional space. This paper illustrates a method to extend the original FSCI into three-dimensional space and proposes 3D-FSCI which identifies primitive curves from freehand curves drawn in three-dimensional virtual space.

1　はじめに

近年のコンピュータ処理能力の進歩で，3 次元モデリングに基づいた画像を目にする機会が増えている．最近は VRML 対応を謳う一般ユーザ向けの安価な 3 次元モデラも登場している．これら家庭用を含め，多くのモデラは平面上の操作で 3 次元の作業を行うため，自分の操作と仮想空間中の動作の直感的な理解が難しく，作業効率を落とす原因となる．また，通常は直方体や円柱などの基本プリミティブをメニューより選択・配置するが，プリミティブ選択のために対象図形から視線をそらす必要があり，モデリング作業の中断が起こる．さらに基本プリミティブ形状の加工を前提としてモデリングを行うので，予めシステムに用意されているプリミティブ形状の種類によって作成する立体形状も制限を受ける．

ところで，モデリング作業の環境改善を目的として，仮想現実感技術を利用して効率向上を図る「仮想物体モデラ」が研究されている [1]．仮想物体モデラは，コンピュータが提供する仮想空間内で現実に近い感覚で作業を行うことができるため，モデリング操作と作業内容の直感的な把握が容易になることが期待できる．しかしプリミティブ選択によるモデリング作業の中断や基本プリミティブ形状の種類による制限の問題は解消されない．

さて 2 次元図形の作成に目をむけてみると，やはりメニューからのプリミティブ選択・配置を必要とするツールが多く，3 次元モデラと同様，作業の中断や形状の制限が存在する．ここで，例えばオンラインで手書き図形同定が可能ならば，メニュー選択することなしに図形作成が行え，タブレットなどと組み合わせることで紙面に描くようにして図形入力が可能と思われる．大抵の CAD システムやドローイングソフトは，線分や方形，自由曲線など種々のプリミティブ図形を備えている．しかし方形は線分の組合わせで表せることなどを考慮すると，プリミティブとして最低限「線分」「円」「円弧」「楕円」「楕円弧」「開自由曲線」「閉自由曲線」の 7 種類を備えることで，一般的な形状は作成できることがわかる．従って，汎用的な手書き曲線入力インタフェースを実現するには，これら 7 曲線すべてを同定可能であることが必要条件と考えられる．しかし 7 曲線の間には，円は円弧に含まれ円弧は楕円弧に含まれるといった図 1 のような包含関係が存在するため，形状のみを手がかりに同定を行うと，図右上の複雑な曲線に同定されやすくなる．よって，単に形状に着目するだけでなく，他の情報，例えば描画運動の動的特性にも着目する必要がある．

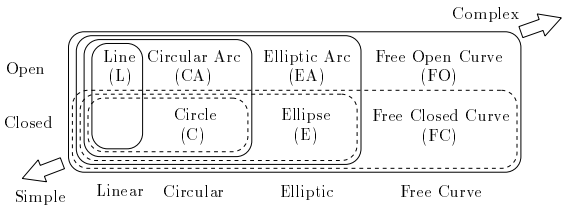


図 1: 同定曲線の包含関係

以上のような汎用的手書き曲線入力インタフェースに必要な条件を満たす曲線同定手法として，ファジィスプライン曲線同定法 (Fuzzy Spline Curve Identifier, FSCI)が提案されている [2–5] . FSCI では，ファジィ化したスプライン曲線 − ファジィスプライン曲線を利用することで，手書き曲線の形状と描画動作の動特性を同時に表現することを可能にしている．また，同定結果は瞬時に得られ，オンライン曲線同定に充分な処理速度を実現している．文献 [5] では，メニュー操作を必要としないので対象図形から注意をそらすことなく入力・修正を行えること，利用者の同定傾向の理解が早く習熟が容易であることが報告されている．

仮想物体モデラの場合も，メニュー選択による作業の中断やプリミティブの利用からくる制限を解消するには，直接的な手書き図形入力を行うのが効果的と考えられる．特に 3 次元は 2 次元よりも自由度が高いため，空間中にデッサンするかのように立体形状を作成できる手書き図形入力は，より効果を発揮すると想像される．例えば，手書き図形入力の実現は，利用者のイメージした通りの大きさ・形状の図形を，回転や移動などの補助的な手順を踏むことなく，望みの位置に配置することを可能にする．そこで我々は，従来の FSCI を 3 次元に拡張し，仮想空間中の汎用的な手書き図形入力の基礎となる 3 次元 FSCI (3D-FSCI) を提案する．そして，この 3D-FSCI による 3 次元曲線プリミティブの手書き入力インタフェースを用い，直接的な空間描画動作によるワイヤフレームモデル作成を目指す．本論文では，空間中に描画した手書き曲線が，3D-FSCI を利用して曲線プリミティブに同定可能であることを確認する．将来はこのワイヤフレームモデラの発展として，複数の曲線を組み合わせたサーフェイスモデルや立体プリミティブの手書き入力を想定しており，例えば仮想物体モデラと組み合わせることで，互いの特徴を活かしたより簡便な 3 次元立体入力インタフェースの実現が期待できる [5] .

2　FSCI による曲線同定の概要

FSCI では，入力された手書き曲線を，描画動作の曖昧さと入力曲線の形状を同時に表すことが可能なファジィスプライン曲線 (図 2) として表現する．ファジィスプライン曲線とは，通常のスプライン曲

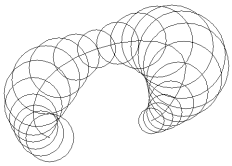


図 2:　2 次元ファジィスプライン曲線

線の制御多角形をファジィ点で構成することで得られる，ファジィ化したスプライン曲線である．ここで 2 次元ファジィ点は，図 3 のように終点に円錐型メンバシップ関数を持つ位置ベクトルと定義する．ファジィ点 $\tilde{a}$ は，$\boldsymbol{a}$ を円錐底円の中心の位置ベク

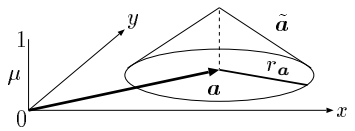


図 3:　2 次元ファジィ点モデル

トル，$r_{\boldsymbol{a}}$ を円錐底円の半径として式 (1) のように表記する．

$$\tilde{\boldsymbol{a}} = \langle \boldsymbol{a}, r_{\boldsymbol{a}} \rangle \tag{1}$$

ファジィスプライン曲線は，区間数 L ，次数 n ，ファジィ制御多角形を $\tilde{\boldsymbol{d}}_i = \langle \boldsymbol{d}_i, r_{\boldsymbol{d}_i} \rangle \ (i = 0, 1, \ldots, L+n-1)$ としたとき，式 (2) のように計算できる．

$$\tilde{\boldsymbol{s}}^n(u) = \sum_{i=0}^{L+n-1} \tilde{\boldsymbol{d}}_i N_i^n(u) = \left\langle \left(\sum_{i=0}^{L+n-1} \boldsymbol{d}_i N_i^n(u) \right), \left(\sum_{i=0}^{L+n-1} r_{\boldsymbol{d}_i} N_i^n(u) \right) \right\rangle \tag{2}$$

すなわち，位置ベクトル要素と半径要素を独立にスプライン補間することと等価になる．図 2 では，円錐型メンバシップ関数の底円を円で，円錐頂点を結んだものを曲線で表現してあり，ファジィスプライン曲線は時間の経過と共に移動するファジィ点の軌跡と見ることができる．ファジィスプライン曲線の形状の広がりの幅は，書き手の意図した曲線がとりうる可能性のある範囲を示しており，あいまいな描画が行われたところは可能性が大きくなるので範囲は広がり，丁寧な描画では範囲は狭くなる．

FSCI の同定処理は以下の通りである．まず，適当な時間間隔で手書き曲線をサンプリングする．次に，得られた点列をファジィスプライン曲線で補間し，書き手が「線分」「円弧」「楕円弧」を描いたと想定した仮説ファジィ曲線を，補間した曲線からいくつかの代表点を選択して作成する．仮説として立てた 3 曲線の確かさを，ファジィ測度の一種である可能性値で評価する．また，描画開始点と終了点が一致している程度を，同じく可能性値を用いて「閉曲線性」として評価する．最後に，仮説曲線の確かさと閉曲線性を考慮し，図 1 の包含関係にある 7 種の曲線のうち，できるだけ単純な曲線を選択しようとするファジィ推論を実行して認識を行う．

このような FSCI の認識処理により，曖昧な描画を行うと線分や円などの単純な曲線に，一方丁寧な描画を行うと自由曲線など 複雑な曲線に同定する特性を有するため，利用者は描画動作を変化させることで希望の同定曲線を入力することが可能となる．

3　3 次元 FSCI の提案

仮想空間中の手書き曲線プリミティブ同定実現のための要素技術として，汎用的な空間手書き入力法 3D-FSCI を提案する．

2 次元の FSCI はファジィスプライン補間法を基に構成されているため，その 3 次元化にあたっては，基本的に以下の 2 点の 3 次元化を考えればよいことになる．

1. 3 次元ファジィ点の定義
2. 仮説曲線の作成法

3.1　3 次元ファジィ点の定義

3 次元ファジィ点は，2 次元ファジィ点の自然な拡張として，終点に超円錐型メンバシップ関数を持つ位置ベクトルと定義する (図 4) . 超円錐型メンバ

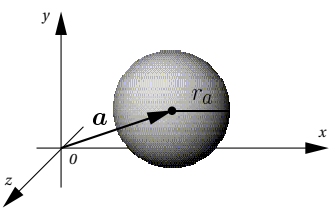


図 4:　3 次元ファジィ点モデル

シップ関数とは，図 5 に示すように中心のグレード値が 1 で，中心からの距離に反比例してグレード値が低くなる球状のメンバシップ関数である．本稿では，超円錐型メンバシップ関数の底面を球で表している．このように定義することで，3 次元ファジィ

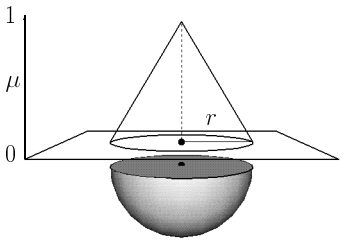


図 5: 超円錐型メンバシップ関数

点も 2 次元ファジィ点と同様，$\boldsymbol{a}$ を超円錐型メンバシップ関数頂点の 3 次元位置ベクトル，超円錐底円の半径を $r_{\boldsymbol{a}}$ として式 (1) と記述できる．

従って，3 次元ファジィスプライン曲線もベクトルの次元が高くなるのみで 2 次元と同様の式 (2) となることが容易に理解できる．3 次元ファジィスプライン曲線は，例えば図 6 のようになる．

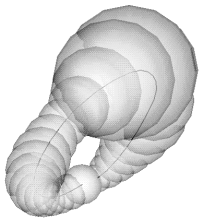
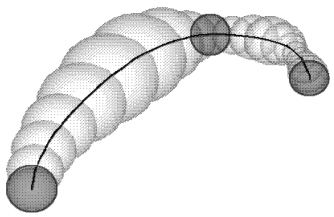


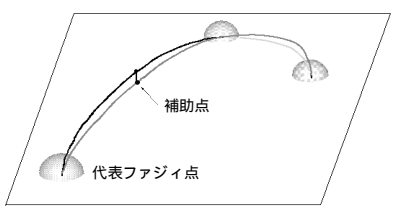
図 6: 3 次元ファジィスプライン曲線

3.2 仮説曲線の作成法

FSCI の曲線同定の過程で作成する仮説曲線は 3 種とも平面曲線であるが，一般に空間中に描かれた手書き曲線が任意の平面上にあるとは考えにくく，何らかの手段で仮説曲線を構成する平面を決定する必要がある．



(a) 3 代表ファジィ点を選出



(b) 平面上に射影した曲線から補助点を選出

図 7: 楕円弧仮説曲線の構成

例えば楕円弧仮説曲線では，3 点のファジィ代表点と 1 点の補助点が必要となる．そこで，まず 3 代表ファジィ点を求め，それらのメンバシップ関数の頂点で定まる平面上に手書き曲線を垂直射影し，射影した曲線上から残りの補助点を選出することとする (図 7 (a) , (b)) .

4 実験

3D-FSCI を利用し，空間中に描かれた手書き曲線が曲線プリミティブに同定可能かを確認するための実験を行った．描画曲線を入力するデバイスとして 3 次元超音波マウスを用い，描画空間の表示は液晶シャッター眼鏡による立体視を利用した (図 8) .

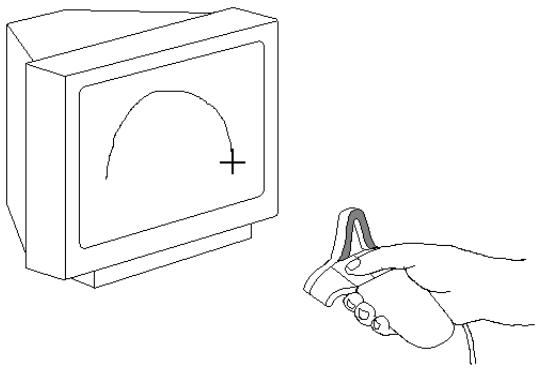


図 8: 実験装置概略

3D-FSCI を初めて利用する者を被験者とし，7 種の曲線を 1 セットとして 40 セット描いたときの，第 3 候補までの各曲線クラス毎と全曲線を総合した平均認識率をそれぞれ図 9 に示す．図中で，L は線分，C は円，CA は円弧，E は楕円，EA は楕円弧，FC は閉自由曲線，FO は開自由曲線，ALL は全曲線総合を表している．図 9 から，認識率は未だ不十分ではあるが，空間の曲線描画においても 7 曲線それぞれを描きわけて同定させることが，基本的に可能であると確かめられた．

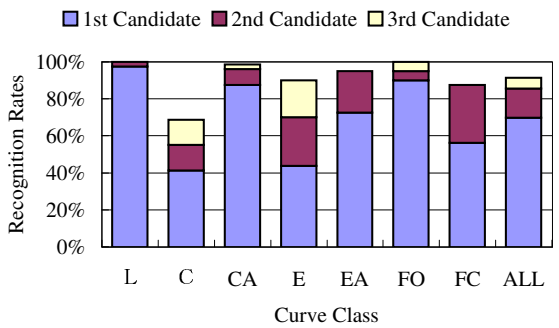


図 9: 初心者の平均認識率

3D-FSCI に熟練した人に同様の実験を行った結果，第 1 候補で 90%，第 3 候補までででほぼ 100% の認識率が得られた．従って，慣れることによって充分な認識率が得られることが確認できる．

5　今後の課題

3D-FSCI を用い，空間中に描かれた手書き曲線の同定実験を行った結果，空間描画においても７曲線をそれぞれ描きわけて同定させることが基本的に可能であることを確かめた．さらに，熟練することで認識率が向上することも確認した．

今回の液晶シャッター眼鏡による立体視では，ディスプレイと眼鏡の間の空間で描画を行うために，表示されている曲線やポインタが手で隠される状況が生じる．今後は，ヘッド・マウンテッド・ディスプレイによる没入型環境のもと，明確にポインタや描画図形が把握できる状態で同定実験を行う予定である．

参考文献

[1] 清川清, 竹村治男, 片山喜章, 岩佐英彦, 横矢直和: 両手操作を用いた仮想物体モデラ VLEGO, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J80-A, No. 9, pp. 1517–1526 (1997).

[2] Saga, S. and Makino, H.: Fuzzy Spline Interporation and Its Application to On-Line Free-hand Curve Identification, *Proc.2nd IEEE Int.Conf.on Fuzzy Systems*, pp. 1183–1190 (1993).

[3] 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, Vol. J77-D-II, No. 8, pp. 1610–1619 (1994).

[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, Vol. J77-D-II, No. 8, pp. 1620–1629 (1994).

[5] 佐賀聡人, 佐々木淳一: 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, 情報処理学会論文誌, Vol. 36, No. 2, pp. 338–350 (1995).