



空間描画動作同定に基づく3次元図形プリミティブ入力CADインタフェースの提案

| | |
|-------|--|
| メタデータ | 言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2007-06-15 キーワード (Ja): キーワード (En): fuzzy system, human interface, pattern recognition, computer aided design, virtual reality 作成者: 佐賀, 聡人, 安福, 尚文 メールアドレス: 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/10258/169 |

空間描画動作同定に基づく3次元図形プリミティブ 入力CADインタフェースの提案

| | |
|--------------------|---|
| その他（別言語等） のタイトル | A Proposal for 3-D Pattern Primitive Input CAD Interface on the Basis of Spatial Gesture Identification |
| 著者 | 佐賀 聡人, 安福 尚文 |
| 雑誌名 | 室蘭工業大学紀要 |
| 巻 | 48 |
| ページ | 9-20 |
| 発行年 | 1998-11-13 |
| URL | http://hdl.handle.net/10258/169 |

空間描画動作同定に基づく 3次元図形プリミティブ入力CADインタフェースの提案

佐賀 聡人^{*1}, 安福 尚文^{*2}

A Proposal for 3-D Pattern Primitive Input CAD Interface on the Basis of Spatial Gesture Identification

Sato SAGA and Naofumi YASUFUKU

(論文受理日 平成10年 8月31日)

Abstract

This paper proposes a conceptual design of a new intuitive CAD interface for three-dimensional pattern primitive input on the basis of a spatial gesture identification. Then, a three-dimensional version of freehand drawing identification technique named FSCI-3D, the core technology of the proposed interface, is derived as an extension of the two-dimensional version of the technique that we have previously proposed. Finally, FSCI-3D is actualized in an immersive virtual reality environment to demonstrate its basic operation.

Key Words : Fuzzy System, Human Interface, Pattern Recognition, Computer Aided Design, Virtual Reality

1. まえがき

近年のコンピュータの処理能力向上に伴い、設計/製造の分野では、3次元CAD(Computer Aided Design)システムによる製品の3次元設計が一般化してきている。しかし、現在の3次元CADシステムでは、詳細設計を支援する機能の豊富さに比較して、デザイナーの思い描く3次元形状を意匠設計段階で自由に生成できるような機能は未だ十分に充実していない。この一因は、CRTやマウスのような2次元出力機器を基本としたヒューマンインタフェースを介して間接的に3次元設計を行っていることにあると考えられる。

コンピュータの進歩は、一方で、多様な入出力機器の利用を可能にし、様々な異なる媒体を統合的に活用して人間とコンピュータシステムとの間の情報伝達をより密に行ういわゆるマルチモーダルヒューマンインタフェースを現実のもの

しつつある。その一つとして、空間中の位置情報を直接的に入出力する機器の利用を可能にするVR(Virtual Reality, 仮想現実)技術がある。このVR環境を3次元CADのヒューマンインタフェースとして活用すれば、3次元構造物を3次元空間中で直接的に設計することが可能になり、意匠設計に適した直感的な3次元CADの実現が期待できる。このようなアプローチとして、既に文献(1)では「仮想物体モデラ」が提案されている。仮想物体モデラでは、3次元仮想空間中の「直方体」や「円柱」といったプリミティブ物体に仮想的に触れてこれらを変形させたり、複数のプリミティブ物体を玩具のブロックのように組み合わせたりすることにより、直感的な3次元構造物設計をある程度可能にしている。しかし、ここでは、元となる3次元プリミティブ物体を発生させる段階においてはVR環境の直接操作性が十分に活用されていない。即ち、(1)プリミティブ物体の種類の決定にメニュー選択操作という間接的な操作を必要とする、(2)プリ

^{*1}情報工学科

^{*2}大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程

ミティブ物体の種類は予め登録されたものに限られ汎用性が低い, (3) 生成された初期段階のプリミティブ物体の形状, 大きさ, 位置, 姿勢を所望のものにするためには大掛かりな修正作業が必要となる, といった問題がある.

ところで, 人の通常の生活においては, 手で描画動作をすることによって図形の種類, 形状, 大きさ, 位置, 姿勢などを一度に相当程度まで表現することができる. ここで, もし, このような自然な図形の表現法を3次元CADの入力インタフェースに利用できれば, あたかも仮想空間中にデザインするような感覚で直感的かつ直接的に幾何学的3次元プリミティブ物体を生成させることが可能になり, 3次元の意匠デザインが格段に容易になることが期待される.

本論文は, このような考え方に基づき, 空間描画動作同様にに基づく3次元図形プリミティブ入力CADインタフェースの基本的なアイデアを提案する. またその実現のための中核技術として必須となる3次元手書き曲線同定法「FSCI-3D」を提案し, これを用いた3次元曲線プリミティブ入力インタフェースを試作してその動作を確認する.

2. 空間描画による3次元図形プリミティブ入力CADインタフェースの提案

3次元CADにおいては, 「直方体」, 「球」, 「円柱」, 「円錐」といった基本的な幾何図形プリミティブを組み合わせることで3次元構造物を構成することが多い. 従って, これら所望の種類図形プリミティブを所望の形状, 大きさ, 位置, 姿勢に瞬時に配置することができれば, 3次元の意匠デザインの作業効率が大幅に改善される. ところで, 人は描画動作によって図形の種類, 形状, 大きさ, 位置, 姿勢などを相当程度まで直接的に表現することができる. 本論文では, この点に着目して, フリーハンドの空間描画動作に基づく3次元図形入力CADインタフェースの基本的なアイデアを提案する.

ここでは, まずCADにおける3次元図形プリミティブの多様性について指摘し, つぎに, その表現法として空間曲線の組み合わせによる表現法が汎用性の点で有効であることを示す. さらに, これらをもとに, 空間描画による3次元図形プリミティブ入力法の基本的な考え方を提案する.

2.1 CADにおける3次元図形プリミティブの多様性とスイープ操作による統一的表现

3次元設計の元となる幾何学的な図形プリミティブの種類として代表的なものだけでも, 「立方体」, 「直方体」, 「球」, 「楕円体」, 「円錐」, 「円柱」, 「角柱」, 「角錐」, 「トーラス (円環面)」などがすぐに挙げられる. また, これらの一部からなる図形プリミティブ, 例えば「半球」や「半円柱」, 「円錐台」

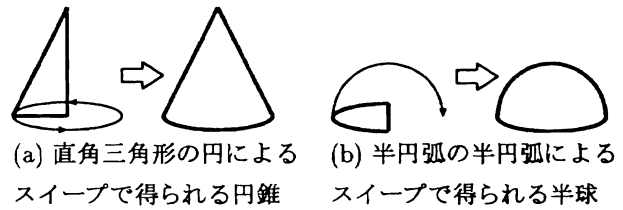


図 1: スイッピングによる円錐と半球の表現例

などを含めてゆくとその種類は爆発的に増える. 従って, 区形プリミティブを列挙して単純にメニューに登録してゆくようなアプローチでは図形プリミティブの種類の多様性に網羅的に対応することが困難になる.

さらに, 3次元図形プリミティブでは, その自由度の大きさゆえ, 形状, 大きさ, 位置, 姿勢を指定するパラメータの数が多くなり, しかも種類ごとに指定するパラメータの性質が異なってくるために統一的操作が難しくなる.

ここで, これらの多様な図形プリミティブを簡素かつ統一的に表現する方法としてスイッピングと呼ばれる手法が有効となる. これは, ある閉じた平面曲線によって形作られた図形を別の曲線に沿って掃引 (スイープ) したときの軌跡として立体を定義するものである. 例えば, 「円錐」や「半球」は図1のようにスイッピングで表現できる.

スイープ操作は, その効果そのものが人間の直感で理解しやすい上に, その表現力は汎用性に優れており, 上述の3次元図形プリミティブの大半は例えば表1のようにスイープ操作で統一的に表現できる. またスイッピングでは, 3次元プリミティブの形状を立体のパラメータによって直接指定する代わりに, スイープ図形の形状とそのスイープ経路の形状との二段階に分けて設定するため, 形状パラメータの設定が簡素で理解しやすいという特徴がある.

表 1: スイッピングによる3次元図形プリミティブの表現例

| 3次元図形プリミティブ | スイープ図形 | スイープ経路 |
|-------------|--------|--------|
| 立方体 | 正方形 | 線分 |
| 直方体 | 長方形 | 線分 |
| 球 | 円 | 半円弧 |
| 楕円体 | 楕円 | 半円弧 |
| 円錐 | 直角三角形 | 円 |
| 円柱 | 円 | 線分 |
| 角柱 | 多角形 | 線分 |
| 角錐 | — | — |
| トーラス | 円 | 円 |
| 半球 | 半円弧 | 半円弧 |
| 半円柱 | 長方形 | 半円弧 |
| 円錐台 | 台形 | 円 |

2.2 空間曲線プリミティブによる3次元図形プリミティブの汎用的な表現

スイープ操作によって3次元図形プリミティブを表現することにすれば、その指定は、空間中におけるスイープ図形の指定とスイープ経路の指定に置き換えられる。ここで、スイープ経路に関しては表1の例にみるように、「線分」、「円」、「円弧」がその主なものとなる。一方、スイープ図形に関しては多様な平面閉図形が想定される。しかし、これらについても幾何学的なスイープ図形として重要な空間平面図形は、「線分」、「円」、「円弧」、「楕円」、「楕円弧」という高々5種類の空間平面曲線の組み合わせで表現されることがわかる。

以上のことから、結局、「線分」、「円」、「円弧」、「楕円」、「楕円弧」という5種類の空間平面曲線を空間中に配置することができれば、これによって主な3次元図形プリミティブがスイープ操作として表現されることになる。即ち、空間曲線プリミティブとしてこれら5種類の空間平面曲線を採用するだけで、多様な3次元図形プリミティブに対する汎用的な表現が得られることになる。

2.3 空間描画による汎用的な3次元図形プリミティブ入力の基本的な考え方

前節までの議論により、汎用的な3次元図形プリミティブ入力の実現は、空間曲線プリミティブ入力の実現に置き換えられる。ここで、曲線プリミティブを直感的かつ瞬間的に表現する人間にとって最も自然な手段の一つとして空間中の描画動作がある。従って、この空間描画表現をVR環境を介して利用できれば直感的かつ汎用的な3次元図形プリミティブ入力インタフェースを実現できることになる。

さてここで、空間描画に基づく図形入力インタフェースを実現するうえで中核的な問題は、空間描画を如何に幾何学図形として同定するかという点である。VR環境の3次元入力デバイスを用いれば描画動作を時系列の位置データとして計測することは可能である。しかし、これは「信号」レベルの情報に過ぎない。描画曲線を図形入力に利用するには、これを上述の空間曲線プリミティブのような幾何図形という「記号」レベルの情報として認識、同定する必要がある。ところで、この種の手書き描画の同定法として、2次元平面上の問題に関しては、既にFSCI (Fuzzy Spline Curve Identifier) と呼ばれる手書き曲線同定法が提案され⁽²⁾⁻⁽⁴⁾、その有効性が示されている⁽⁵⁾。従って、この2次元FSCIのアルゴリズムを3次元に拡張し、空間描画動作を空間曲線プリミティブの集合体として同定するアルゴリズムFSCI-3Dを構築すればこの問題は解決することになる。

もし、この空間描画同定法FSCI-3Dが実現されたらと仮定

すれば、例えば、以下のような手順に基づくヒューマンインタフェースをVR環境中に構築することで、フリーハンドの空間描画動作に基づく直感的な3次元図形プリミティブ入力CADインタフェースを実現することができる。ただし、ここで、下線を付したステップが人間の操作する部分である。

(1) スイープ図形の決定：

- (1.1) 空間描画：スイープ図形を仮想空間中に一筆書きで描画する。
- (1.2) 空間描画の分割 (FSCI-3D)：描画運動中の一時停止動作に基づいて描画の分割を行い分割候補点を描画曲線上に表示する。
- (1.3) 分割の修正：分割候補点を確認し、必要に応じて表示された分割候補点をクリックすることにより分割候補点の取捨選択を行って分割を決定する。
- (1.4) 空間描画の同定 (FSCI-3D)：分割された各々の空間描画を空間曲線プリミティブとして同定し、各々について第一候補となった空間曲線プリミティブの種類と形状を仮想空間中に表示する。
- (1.5) 空間曲線プリミティブの種類修正：仮想空間中に表示された各空間曲線プリミティブの第一候補の種類を確認し、必要に応じて表示候補のクリックにより次候補を選択して、各空間曲線プリミティブの種類を決定する。
- (1.6) 形状パラメータ値の自動丸め処理：各空間曲線プリミティブの長さ、角度、位置などのパラメータ値を予め定めた分解能に従って丸めることによって整形した空間曲線プリミティブを制御点^{*3}とともに仮想空間上に表示する。
- (1.7) 形状パラメータ値の微調整：必要に応じて表示された制御点をドラッグすることによって各空間曲線プリミティブの形状パラメータを微調整してスイープ図形を決定する。
- (1.8) スイープ図形の表示：決定されたスイープ図形を制御点とともに仮想空間上に表示する。

(2) スイープ経路の決定：

- (2.1) スイープ操作点の選択：スイープ図形上に表示された制御点の内の一点をクリックすることによりスイープ操作の対象となる点を選択する。
- (2.2) 空間描画：スイープ経路を仮想空間中に描画する。
- (2.3) 空間描画の同定 (FSCI-3D)：空間描画の一つの空間曲線プリミティブとして同定し、第一候補となった空間曲線プリミティブの種類と形状を仮想空間中に表示する。

*3 中心点、外接四角形の頂点など、5種類の空間曲線プリミティブごとに予め特徴的な点を制御点として定義しておく。

(2.4) **空間曲線プリミティブの種類**の修正: 仮想空間中に表示された曲線プリミティブの第一候補の種類を確認し, 必要に応じて表示候補のクリックにより次候補を選択して, 空間曲線プリミティブの種類を決定する.

(2.5) **形状パラメータ値の自動丸め処理**: 各空間曲線プリミティブの長さ, 角度, 位置などのパラメータ値を予め定めた分解能に従って丸めることによって整形した空間曲線プリミティブを制御点とともに仮想空間上に表示する.

(2.6) **形状パラメータ値の微調整**: 必要に応じて表示された制御点をドラッグすることによって空間曲線プリミティブの形状パラメータを微調整してスイープ経路を決定する.

(3) **3次元図形プリミティブの生成**: 決定されたスイープ図形とスイープ経路に従って3次元図形プリミティブを生成して, 仮想空間中に表示する.

この手順では, 全ての操作が, 仮想空間中での描画動作, あるいは, 仮想空間中に表示されたオブジェクトに対するクリックやドラッグといった直感的な図形操作によって実現されるのがわかる. また情報の殆どは描画動作によって伝えられ, その他の操作による情報伝達は, 次候補選択やパラメータの微調整といった補助的な修正情報の伝達に限られることもわかる. 実際, FSCI-3Dによる空間描画の分割と同定が最初からユーザの意図通りに行われ修正操作の必要がない場合においては, 2回の空間描画動作のみで多様な3次元図形プリミティブの入力が実現されることになる.

ここに提案した, 空間描画による3次元図形プリミティブ入力インタフェースを実際を実現するためにはFSCI-3Dの実現が不可欠である. また, このインタフェースが実際に効率的に機能するかどうかはFSCI-3Dの同定性能によるところが大きいと予想される. 本論文では, 次章以降で, FSCI-3Dの実現法について論じ, これを実際にVR環境に実装することによりその基本的な動作を確認する.

3. 2次元FSCIの処理概要

空間描画動作を空間曲線プリミティブとして同定するアルゴリズムFSCI-3Dを構築するための準備としてその前提となる従来の2次元FSCI⁽²⁾⁻⁽⁴⁾の概要を示す.

FSCIは汎用的な2次元手書き図形認識法の確立のために提案された幾何曲線プリミティブ同定法であり, 手書き描画曲線をもとにして, これをCAD図形の構成要素として重要な7種類の幾何曲線プリミティブ, 即ち, 図2に示す「線分」, 「円」, 「円弧」, 「楕円」, 「楕円弧」, 「閉じた自由曲線」,

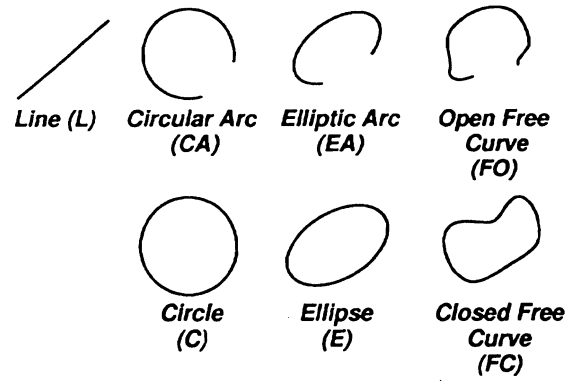


図 2: CAD 図形の構成要素として重要な 7 種類の幾何曲線プリミティブ

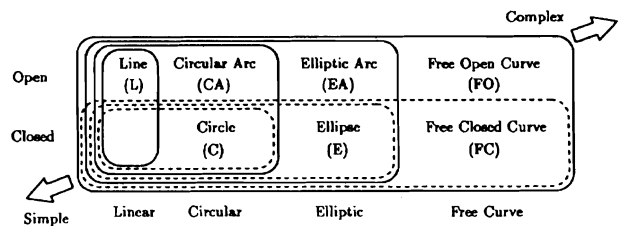


図 3: 幾何曲線プリミティブ間の包含関係

「開いた自由曲線」の何れかとして同定する. この同定問題は, わずか7種類の幾何曲線プリミティブを弁別できればよいわけで, 一見, 簡単そうに思われる. しかし, プリミティブ間に存在する包含関係のために問題はそう簡単には解決されない. 例えば, 「円弧」は「楕円弧」にその特別な場合として含まれ, 「楕円弧」はさらに「開いた自由曲線」に含まれる. また, 「円」は「円弧」がたまたま閉じたものと考えられ, 従って, 「円」は「円弧」に含まれることになる. このように考えると, これら7種類のプリミティブ間には図3に示す2重の包含関係が存在することに気がつく. 同図で, 右上側が自由度の高い複雑なプリミティブ, 一方, 左下側が自由度の低い単純なプリミティブとなっている. ところで, 手書きでは当然正確な幾何曲線を描画することは不可能であり, 例えば図4の最上段に示すような手書き図形が描かれた場合に, これを, 「円弧」とみるか, 「楕円弧」とみるか, あるは「開いた自由曲線」とみるかが問題となる. ここでもし描画された図形の形状だけを厳密にみる限りにおいては全ての手書き描画は最も自由度の高い自由曲線と見なさざるを得なくなってしまう.

この問題を解決するために, FSCIでは, 描画形状とともに描画の適当さ(雑さ)の程度をも情報として活用することを提案している. つまり, FSCIは, 位置情報の曖昧さを許容した, いわゆるファジィな曲線モデルを導入し, 描画をその描き方の適当さ加減に対応した位置的な可能性の広がり

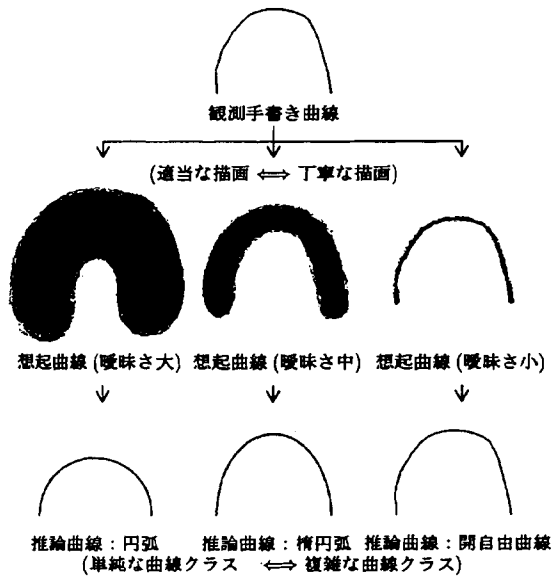


図 4: 手書き描画動作の違いによる解釈の多様性

を持ったものと考え、この可能性の広がりの中からもなるべく単純な曲線を認識することにより、書き手に自由度の低い単純なプリミティブを表現させる手段を与えた。これにより、書き手は、単純なプリミティブを表現したい場合には形状の正確な描画よりも適当で象徴的な描画動作によってその意図を表現し、一方、複雑なプリミティブを表現したい場合には丁寧にその描画形状の具体性を強調しながら描画することによりその意図を表現することができることになる。例えば、図4の歪んだ丸でも、適当に描けば可能性の広がりが大きくなり、その中から比較的単純な円弧が見つかることになり円弧が認識され、逆に丁寧に描けば可能性の広がり小さくなり、その中から円弧も楕円弧も見つからないため最も複雑な自由曲線が認識されることになる。

つまり、FSCIは、描画によって意図する形状を表現するとともに、描画の丁寧さの加減によって描画の具体性を表現して意図する幾何曲線プリミティブの種類をシステムに伝えることのできる図形入力インタフェースとして機能する。

このような FSCI のより具体的な処理概要を図5に示す。書き手によって手書き曲線が描画されると、FSCIはその曲線の形状と描画動作をもとにしてファジィスプライン補間を行い、曖昧な手書き曲線の内部表現法であるファジィスプライン曲線を生成する。ここで、この曖昧さは描画の適当さ加減に応じて設定する。次にこのような内部表現をもとにして、描画をプリミティブ区間に分割する処理を行い、分割されたそれぞれのセグメントについてできる限り単純な幾何曲線プリミティブを選択するファジィ推論を行って書き手の意図した曲線種を同定し、その形状パラメータを求める。つま

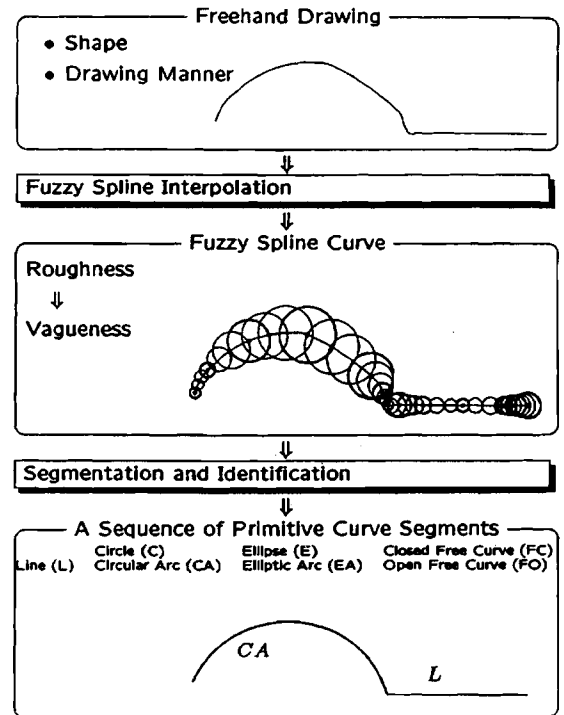


図 5: FSCI の処理概要

り、FSCIは一筆書きされた手書き曲線を7種類の幾何曲線プリミティブから構成される幾何曲線プリミティブ列として同定する。

3.1 同定処理

実際の FSCI では描画をプリミティブ区間に分割する処理が同定処理に先立って行われるが、これについては後に述べることにし、ここではセグメントが一つの場合について考えることにする。

3.1.1 ファジィスプライン補間 2次元の手書き描画曲線は、実際にはペンとタブレットによってサンプリングされ離散的な点の時系列データ $p_i (i = 1, 2, \dots, k)$ としてシステムに入力される。FSCIではまずこれらの点列データのそれぞれ p_i を曖昧な点として図6に示すような円錐型メンバーシップ関数

$$\mu_{\tilde{p}_i}(v) = \left(1 - \frac{\|v - p_i\|}{r_{p_i}}\right) \vee 0 \dots \dots \dots (1)$$

をもつ⁴ファジィ点モデル $\tilde{p}_i (i = 1, 2, \dots, k)$ として表現する。このファジィ点モデル \tilde{p}_i は、点 p_i に位置する可能性が1であり、そこから離れるにしたがって存在の可能性が下がり、円錐底円の外に存在する可能性が0であることを示している。したがってこのファジィ点モデルでは円錐底円の半径 r_{p_i} が点の曖昧さを表すパラメータとなる。この曖昧さ r_{p_i}

⁴ \vee はmax演算を表す。

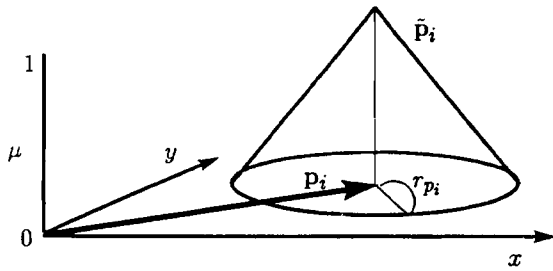


図 6: 円錐型ファジィ点

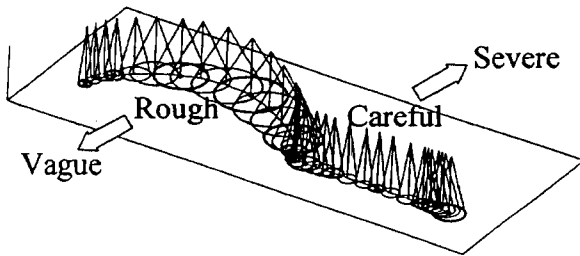


図 7: 円錐型ファジィ点の移動軌跡としてのファジィスプライン曲線

は本来的にはその点における描画の適当さ加減に応じて設定されるが、その簡便な方法の一つとして FSCI では描画の適当さ加減を描画動作の加速度に代表させ、各点での加速度の絶対値に比例した値の曖昧さ r_{p_i} を設定している。つぎにこのようなファジィ点列 $\bar{p}_i (i = 1, 2, \dots, k)$ に対してファジィスプライン補間⁽³⁾を施すことにより曖昧な手書き曲線の内部表現となるファジィスプライン曲線を得る。このファジィスプライン曲線は、例えば図 7 に示すように曖昧さを描画の適当さ加減に応じて変化させながら移動する円錐型ファジィ点モデルの移動軌跡と見なすことができる^{*5}。

我々の提案しているファジィスプライン曲線のより具体的な表現はファジィ理論の根本的な原理である拡張原理まで遡って導くことができる。ここでは省略するが、この原理に基づけば、円錐型ファジィ点の重心結合がやはり円錐型ファジィ点となることを示すことができる⁽³⁾。即ち、ファジィ点 \bar{p}_i を、円錐底円の中心の位置ベクトル p_i と円錐底円の半径 r_{p_i} を用いて

$$\bar{p}_i = \langle p_i, r_{p_i} \rangle \dots \dots \dots (2)$$

と表記することにすれば、これらの線形結合は

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n k_i \bar{p}_i &= \sum_{i=1}^n k_i \langle p_i, r_{p_i} \rangle \\ &= \left\langle \left(\sum_{i=1}^n k_i d_i \right), \left(\sum_{i=1}^n |k_i| r_{p_i} \right) \right\rangle \end{aligned} \quad (3)$$

と求められる。ところで、通常のスプライン曲線は制御多角形の頂点 d_i の重心結合として

$$s^n(u) = \sum_{i=0}^{L+n-1} d_i N_i^n(u) \dots \dots \dots (4)$$

表現される⁽⁷⁾。ただし、ここで $N_i^n(u)$ は正規化 B スプライン関数である。したがって、この制御多角形の頂点を円錐型ファジィ点 \bar{d}_i で置き換えることにより、ファジィ点の重心結合としてのファジィスプライン曲線を

$$\bar{s}^n(u) = \sum_{i=0}^{L+n-1} \bar{d}_i N_i^n(u) \dots \dots \dots (5)$$

という形で定義することが可能となる。

3.1.2 幾何曲線プリミティブの同定 ファジィスプライン曲線によって描画動作が内部表現されると、図 8 のように、ここからなるべく単純な幾何曲線プリミティブを推論しようとするファジィ推論を実行し、幾何曲線プリミティブのクラスとその形状パラメータを同定する⁽⁴⁾。ここではファジィ入力に対するファジィ推論が行われるため、必然的にその結果得られる幾何曲線クラスも離散的なファジィ集合として得られる。これは具体的には 7 種類の幾何曲線プリミティブの各々に 0 から 1 の範囲のグレード値が付与されたものとして得られる。さらに形状パラメータは 7 種類の幾何曲線プリミティブのそれぞれについて全て同定される。この同定結果は、グレード値によって順序づけされた同定結果の候補集合と見なすこともできる。

幾何曲線プリミティブの同定処理の具体的な流れは図 9 に示すようにやや複雑ではあるが、「可能性評価」と「曲線クラス推論」の二つの段階の処理に分けて考えることができる。まず最初の可能性評価の処理では、ファジィスプライン曲線を基にして、三つの仮説ファジィモデル、即ち「線形ファジィモデル」、「円形ファジィモデル」、「楕円形ファジィモデル」を構成する。つぎに、これらの仮説モデルと元のファジィスプライン曲線とのマッチングの度合いをファジィ測度⁽⁶⁾の一種である可能性測度に基づいて評価して、それぞれ「線形性」、「円形性」、「楕円形性」を 0 から 1 の値をもつ可能性値 p_{Linear} , $p_{Circular}$, $p_{Elliptic}$ として算出する。またこれとは別に曲線の閉じている可能性値 p_{Closed} をやはり可能性測度を用いて算出する。つぎに後半の曲線クラス推論処理では、算出された四つの可能性値をもとに最も単純な幾何曲線プリミティブを選択しようとするファジィ推論を行い 7 種類のプリミティブのグレード値をやはり 0 から 1 の範囲の実数値として算出する。

*5 図中ではファジィスプライン曲線を離散的な円錐型ファジィ点列として図示しているが、実際には式 (5) のように連続モデルとして構成される。

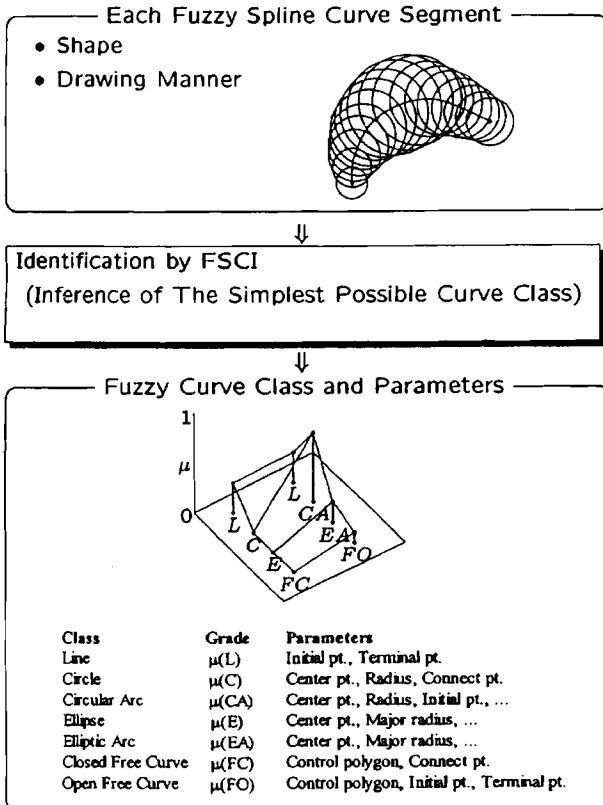


図 8: 幾何曲線プリミティブの同定

以上の処理により、例えば図 10 に示すような、適当な描画では単純な円弧のグレードが高くなり、反対に丁寧な描画では複雑な開自由曲線のグレードが高くなるという同定特性が実現される。

a. 可能性評価 ここで可能性評価処理をもう少し詳しくみると図 11 のようになる。まずファジィスプライン曲線が与えられたら、なるべくこれを近似するように楕円形ファジィモデルを仮説ファジィモデルの一つとして構成する。図中では省略されているが、円形ファジィモデル、線形ファジィモデルについても同様に構成する。次にファジィスプライン曲線とそれぞれの仮説ファジィモデルが曲線全体に渡ってどの程度マッチングしているかを評価するために、ファジィスプライン曲線および各仮説ファジィモデル上から等距離間隔に一定個数 (n_{fmps} 個) のファジィ点を選出しそれをそれぞれのファジィマッチングポイントセット (FMPS) とする*6。このとき、楕円形ファジィモデルの適合可能性値 $p^{Elliptic}$ は、ファジィスプライン曲線の FMPS と楕円形ファジィモデルの FMPS の対応するファジィマッチングポイント間から求められる n_{fmps} 個の適合可能性値の論理積として算出する。

*6 図の例では、 $\{\tilde{s}_1, \tilde{s}_2, \dots, \tilde{s}_{n_{fmps}}\}$ がファジィスプライン曲線の FMPS、 $\{\tilde{r}_1^{Elliptic}, \tilde{r}_2^{Elliptic}, \dots, \tilde{r}_{n_{fmps}}^{Elliptic}\}$ が楕円形ファジィモデルの FMPS を表している。

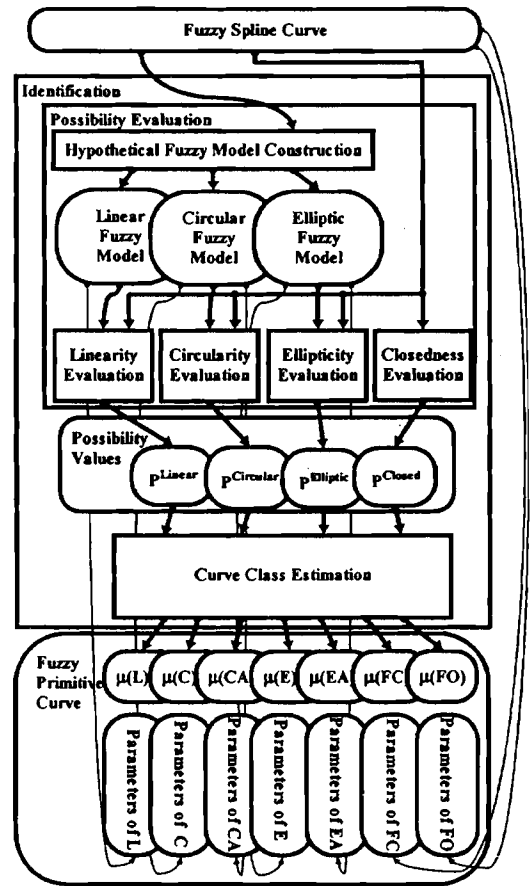


図 9: 幾何曲線プリミティブ同定処理の具体的な流れ

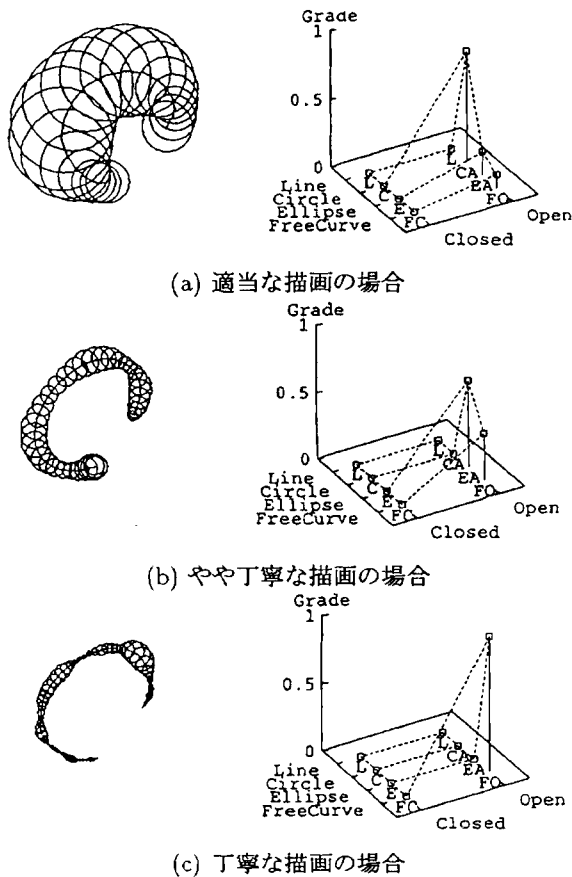
$p^{Circular}$ および p^{Linear} についても同様に算出する。

上述の仮説ファジィモデルの具体的な構成に際して、我々は有理型 Bézier 曲線を拡張した有理型ファジィ Bézier 曲線としてこれらを表現することを提案している(4)。有理型ファジィ Bézier 曲線はファジィスプライン曲線と同様にファジィ点の重心結合表現となっているため円弧、楕円弧といった二次曲線のファジィモデルを容易に表現することができる*7。

例えば楕円形ファジィモデルは以下の手順で構成される。図 12(a) に示すように、まず、ファジィスプライン曲線の始点 \tilde{q} を第一ファジィ代表点 \tilde{a}_0 として選出する。次に、ファジィスプライン曲線上で \tilde{a}_0 から最も直線距離の遠いファジィ点を第二ファジィ代表点 \tilde{a}_1 として選出する。さらに、 \tilde{a}_0 から \tilde{a}_1 に至るファジィスプライン曲線上の点のうち直線 $\tilde{a}_0\tilde{a}_1$ から最遠に位置するファジィ点を第三ファジィ代表点 \tilde{f} として選出する。最後にファジィスプライン曲線の頂点が成す曲線上から三つのファジィ代表点に重ならないように適当な点を選択し、これを補助代表点 p とする*8。ここで、 \tilde{a}_0 と \tilde{a}_1 のファジィ中点 $\tilde{m} = (\tilde{a}_0 + \tilde{a}_1)/2$ を求めて、直線 $\tilde{f}\tilde{m}$ と p を

*7 曲線のファジィモデル化を行う場合には重心座標表現は重要であり、たとえば楕円弧を中心座標、長径、短径といったパラメータで表現するとファジィ化は容易に行えない。

*8 この点はファジィ点ではない通常の点であることに注意する。



(a) 適当な描画の場合

(b) やや丁寧な描画の場合

(c) 丁寧な描画の場合

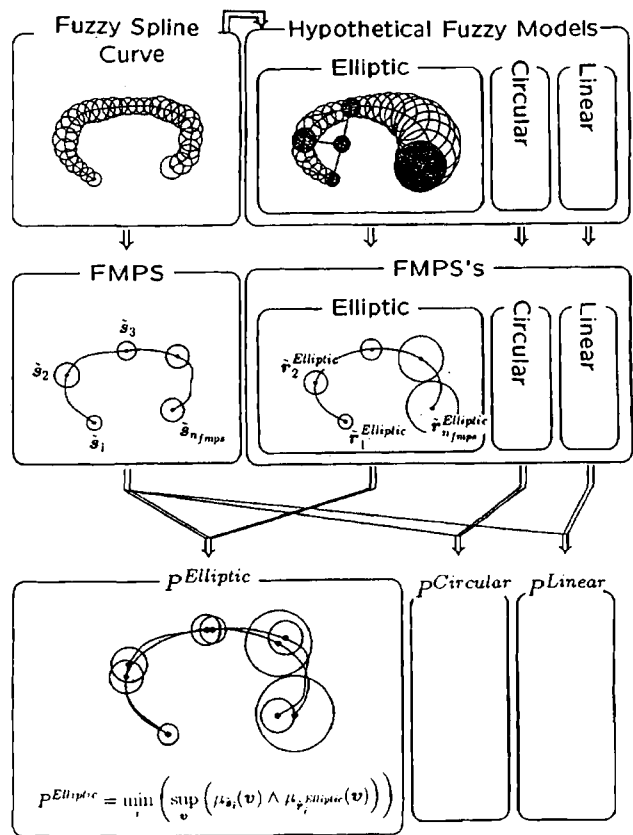


図 11: 可能性評価処理

図 10: 描画動作の違いに起因する生成ファジィスプライン曲線とファジィ曲線クラス同定結果の違い

通り a_0a_1 に平行な直線との交点 t を求めることにより, 重み係数 w を

$$w = \frac{(\alpha + \beta)^2 c^2 - \alpha(\alpha + 2\beta)d^2}{\alpha^2 d^2 - (\alpha + \beta)^2 c^2} \dots\dots\dots (6)$$

と決定する. ただし, α, β は, 点 t が線分 fm を内分する内分比⁹, c は pt 間の距離, d は a_1m 間の距離である. このとき, $\bar{b}_0 = \bar{a}_0, \bar{b}_2 = \bar{a}_1$ とし, また, \bar{b}_1 を

$$\bar{f} = \frac{w\bar{b}_1 + \bar{m}}{1 + w} \dots\dots\dots (7)$$

を満足するファジィ点とすれば, 元のファジィスプライン曲線と三つのファジィ代表点および一つの補助代表点で一致する楕円形ファジィモデルを

$$\bar{b}(t) = \frac{B_0^2(t)\bar{b}_0 + wB_1^2(t)\bar{b}_1 + B_2^2(t)\bar{b}_2}{B_0^2(t) + wB_1^2(t) + B_2^2(t)} \quad (\text{for } t \in [0, 1]) \dots\dots (8)$$

および

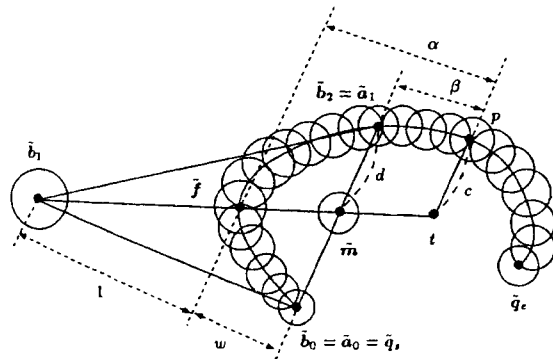
$$\bar{b}^c(t) = \frac{B_0^2(t)\bar{b}_2 + (-w)B_1^2(t)\bar{b}_1 + B_2^2(t)\bar{b}_0}{B_0^2(t) + (-w)B_1^2(t) + B_2^2(t)} \quad (\text{for } t \in [0, t_e]) \dots\dots (9)$$

⁹図 12(a) のように外分点となっている場合は $\beta < 0$ となる.

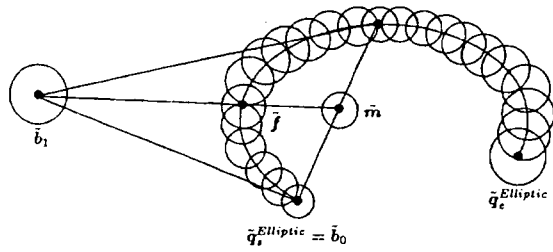
と構成することができる. 但し, $B_i^2(t)$ は 2 次の Bernstein 多項式であり, 式 (8) は b_0 から b_2 に至る部分, 式 (9) は b_2 から $q_e^{Elliptic}$ に至る部分を与える. ここでファジィ終点 $q_e^{Elliptic}$ を与えるパラメータ値 t_e は, ファジィスプライン曲線における a_0 から a_1 に至る経路長と a_1 から q_e に至る経路長の比が, 楕円形ファジィモデルにおける b_0 から b_2 に至る経路長と b_2 から $q_e^{Elliptic}$ に至る経路長の比に一致するように決定する.

なお, 曲線がどの程度閉じているかという閉曲線性 P^{Closed} に関しては, 元のファジィスプライン曲線のファジィ始点 \bar{q} , とファジィ終点 \bar{q}_e の一致度を可能性測度で評価することにより直ちに得られる.

b. 曲線クラス推論 さて一方, 四つ可能性値が得られた後の後半の曲線クラス推論処理をもう少し詳しくみると図 13 のようになる. この処理は七つのファジィ論理式で実現され, 7 種類の幾何曲線プリミティブのグレード値がそれぞれ計算される. ここで $1 - P$ は P の否定, また \min 演算 \wedge は論理積を意味する. 従って, 例えば第 1 行目は, 「線形の可能性があれば即座に線分である」ということを主張し, 例えば 5 行目は, 「線形の可能性がなく, 円形の可能性がなく, 楕円形の可能性があり, 閉じている可能性がなければ楕円弧であ



(a) ファジィスプライン曲線上の代表点



(b) (a) から構成する楕円形ファジィモデル

図 12: 楕円形ファジィモデルの構成例

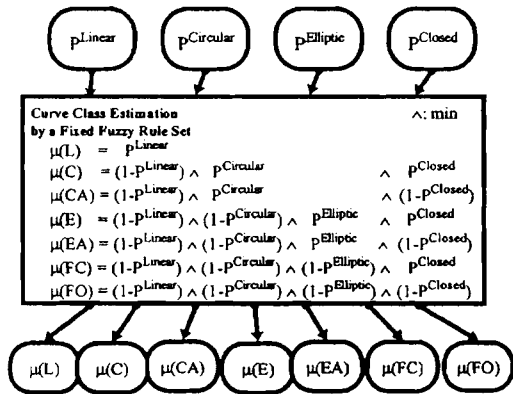
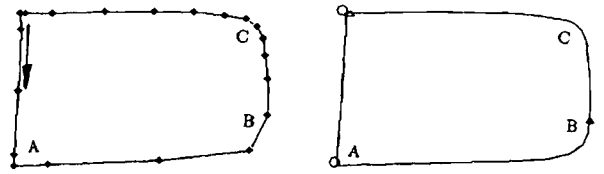


図 13: 曲線クラス推論処理

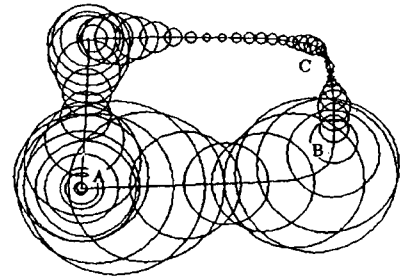
る」ことを主張していることに相当する。これらの論理式は全体として図 14 に示すファジィ推論を実現しており、結果としてなるべく単純なプリミティブを選択しようとするファジィ推論を実現していることになる。

3.2 分割処理

前述の幾何曲線プリミティブ同定に先立って分割処理が行われるが、ここでもファジィスプライン曲線モデルは本質的な役割を果たす。FSCI では、プリミティブの区切りを書き手が描画の停止動作によって明示的に指示するが、実際の描画において完全な停止を常に期待することは現実的ではない。したがって FSCI では、ファジィスプライン曲線をもと



(a) サンプルされた描画曲線 (b) 検出された確定的分割点 (○) と非確定的分割点 (△)



(c) ファジィスプライン曲線による内部表現

図 15: 描画動作の違いによるセグメンテーション結果の違い

に分析することによって停止動作の評価をファジィ的に行う (3)。ここではその処理の詳細は省略するが、以下にその性質を定性的に示す。例えば、図 15 中の点 A は確実な停止動作として評価され確定的分割点として自動的に分割されるが、点 B の近傍では曖昧な点が少しずつ移動しているために不完全な停止動作として評価され、非確定的分割点として書き手に確認を求めることになる。一方点 C の近傍では点の移動が非常にゆっくりとしているにもかかわらず、点自体の曖昧さが小さいために確実に移動しているものと評価され、不要な停止点が検出されたりはしない。これは、単に描画速度の大小からは判断できないことであり、曖昧さを考慮したファジィ点の移動を評価することにより初めて実現される。

4. 3次元手書き曲線同定法「FSCI-3D」の提案

ここでは、2次元 FSCI を3次元に拡張することにより3次元手書き曲線同定法「FSCI-3D」を新たに提案する。FSCI は前章で述べたとおり重心座標表現を基本とするファジィスプライン曲線表現をベースとしているため、この3次元への拡張は自然な形で容易に実現される。基本的には、(1)FSCI における2次元の円錐型ファジィ点モデルを3次元の超円錐型ファジィ点モデルに置き換える、(2)楕円形ファジィモデルの構成法を3次元に対応させる、の2点を考慮するだけで直ちに FSCI-3D のアルゴリズムを構成できる。この FSCI-3D は結果的に3次元の仮想空間中の描画動作を FSCI と同様の7種類の幾何曲線プリミティブとして同定することになるが、これらは2.2で示した5種類の空間曲線プリミティブを全て含む。従って、ここで提案する FSCI-3D は2.3で提案

```

IF Drawing is Linear THEN Curve Class is Line (L)
IF Drawing is not Linear and Circular and Closed THEN Curve Class is Circle (C)
IF Drawing is not Linear and Circular and not Closed THEN Curve Class is Circular Arc (CA)
IF Drawing is not Linear and not Circular and Elliptic and Closed THEN Curve Class is Ellipse (E)
IF Drawing is not Linear and not Circular and Elliptic and not Closed THEN Curve Class is Elliptic Arc (EA)
IF Drawing is not Linear and not Circular and not Elliptic and Closed THEN Curve Class is Closed Free Curve (FC)
IF Drawing is not Linear and not Circular and not Elliptic and not Closed THEN Curve Class is Open Free Curve (FO)
    
```

図 14: 曲線クラス推論のファジールール

した 3次元図形プリミティブ入力インタフェースを実現するための空間描画同定法として十分なものとなる。

4.1 3次元ファジィ点の定義と 3次元ファジィスプライン曲線の構成

図 6 に示した 2次元の円錐型ファジィ点を自然に拡張して、超円錐型メンバシップ関数によって 3次元空間中のファジィ点を定義する。これは具体的には式 (1) の p_i を 3次元位置ベクトルとみなすことにより直ちに得られる。なお、本論文では、以後、超円錐型メンバシップ関数の超底円を 3次元空間中の球として表示することにより、図 16 のように 3次元ファジィ点を図示することにする。

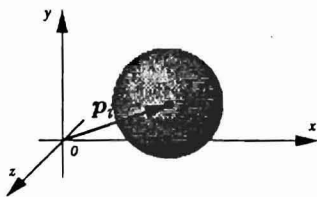


図 16: 3次元ファジィ点モデルの超底円による図示

さてこのように 3次元ファジィ点を超円錐型ファジィ点として定義すれば、これらの線形結合は、メンバシップ関数の頂点座標を表す位置ベクトルの次元が 3次元となることを除き、式 (3) と全く同じ形式で求められ、結局図 17 に示すような 3次元ファジィスプライン曲線も式 (5) と同形式で定義されることになる。このことから、2次元 FSCI のアルゴリズムはほぼそのまま形式的に 3次元に拡張することができ、これにより FSCI-3D が構築されることになる。

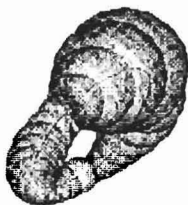


図 17: 3次元ファジィスプライン曲線

4.2 3次元楕円形ファジィモデルの構成に関する注意

4.1 で述べた通り、FSCI を形式的に 3次元空間に拡張するだけでほぼ機械的に FSCI-3D は構築される。ただし、楕円形ファジィモデルの構成に関しては若干の修正が必要となる。これは、空間描画では楕円弧ファジィモデル構成のための三つのファジィ代表点と一つの補助代表点が一般に同一平面上に存在しないことによる。従って、FSCI-3D では、2次元 FSCI と同様に補助代表点を求めた後、さらにこれを三つのファジィ代表点の頂点が構成する空間平面上に垂直射影し、これを新たに 3次元楕円形ファジィモデルの補助代表点として採用することにより問題を解決する。

5. 3次元曲線プリミティブ入力インタフェースの試作

ここでは、4. で提案した FSCI-3D のアルゴリズムを没入型 VR 環境中に実装することにより、その 3次元手書き曲線同定アルゴリズムとしての動作を確認する。また、FSCI-3D に若干の修正作業用ユーザインタフェースを付加することにより、簡易的な 3次元曲線プリミティブ入力インタフェースを試作して、これが直感的なヒューマンインタフェースとして動作することを示す。

5.1 没入型 VR 環境

FSCI-3D では書き手がその意図を空間中の描画動作として表現する。従って、FSCI-3D を実装するためには書き手が意図どおり自由に空間に描画できるような環境が必須となる。そのため、我々は、FSCI-3D を没入型 VR 環境中に構築することにした。没入型 VR 環境は図 18 のようにグラフィックスワークステーションに接続されたヘッドマウントディスプレイ (HMD) と空間入力デバイスから構成されたシステム上に実現される。ユーザの描画動作は、空間入力デバイスによって 3次元空間中の点の時系列データとしてサンプリングされる。一方、ユーザの描画動作、システムの処理結果、およびユーザの頭の位置および姿勢の変化に対応して、グラフィックスワークステーションが仮想空間の状態をリアルタイムに更新しつつ、HMD に奥行き感のある立体画像として表示する。これにより、ユーザはあたかも仮想空間中に入り込んだように知覚することになり、空間入力デバイスに関連付けられた仮想ペンによって空間に描画しながら同時に

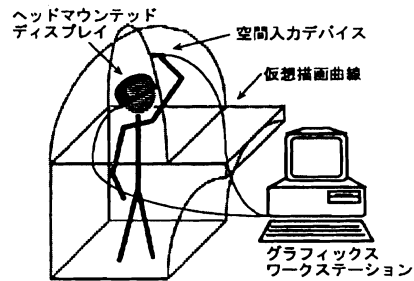


図 18: 没入型 VR 環境のシステム概念図

その描画動作に伴って生成されてゆく描画軌跡を自分の周囲に立体的に視認することが可能になる。さらに仮想空間中に存在している仮想的なオブジェクトに直接的に働きかけたりすることも可能になる。

5.2 FSCI-3D の実装

グラフィックスワークステーション上に C 言語を用いて FSCI-3D のアルゴリズムを実装し、その動作を確認した。図 19 に FSCI-3D による空間描画曲線の同定例を示す。図 19(a) は適当で象徴的な動作によって円を意図した描画を行った場合である。このとき、描画の適当さを反映した曖昧さの大きなファジィスプライン曲線が生成され、これから比較的単純な空間曲線プリミティブである円 (C) が同定されているのがわかる。一方、同じような描画形状でも、図 19(b) は形状の具体性を強調した丁寧な描画を行った場合であり、このときは曖昧さの少ないファジィスプライン曲線が生成されることにより複雑な閉自由曲線 (FC) が同定されるのがわかる。このように、FSCI-3D は、2 次元 FSCI の性質を継承しており空間描画同定法として機能することが基本的に確かめられた。

5.3 3次元曲線プリミティブ入力インタフェースの試作

FSCI-3D をヒューマンインタフェースの中核技術として利用することを考えた場合、誤同定に対する対策ができれば実用的ではない。FSCI-3D は 2 次元 FSCI と同様にファジィ推論に基づいた同定を行っているため誤同定に対しても柔軟に対応できる。第一に、空間描画の分割に関しては、3.2 で述べたように、FSCI-3D は描画における停止動作の厳密さに応じて確定的な分割点とともに非確定的な分割候補点をも検出して提示することができる。一方、空間描画の同定に関しても、同定結果が 3.1.2 で述べた離散的なファジィ集合として得られるため、次候補選択に即座に対応することができる。これを確認するために、実際に FSCI-3D に分割点を修正するユーザインタフェースと同定された空間

曲線プリミティブの次候補選択のためのユーザインタフェースを付加することにより、簡易的な 3 次元曲線プリミティブ入力インタフェースを試作した。図 20 にその動作例を示す。FSCI-3D は (a) のように入力された描画曲線をもとに (c) のように確定的分割点 (図中では球によって表示) と非確定的分割点 (図中では正四面体で表示) を提示する。ユーザが必要に応じて非確定的分割点をペンでクリックすることにより確定的分割点を (d) のように決定すると、FSCI-3D はこの分割に基づいて各セグメントの同定を行い、それぞれの第一候補を (e) のように提示する。ユーザはここでまた、必要に応じて各セグメントの候補をペンでクリックすることにより次候補選択を行って、最終的に (f) のように所望の空間曲線プリミティブ列を得ることができる。

6. むすび

本論文では、空中にデッサンするような直感的な操作によって直接的に 3 次元設計を行うことを目的として、空間描画動作同定に基づく 3 次元図形プリミティブ入力 CAD インタフェースの基本的なアイデアを提案した。また、このインタフェースを実現するための中核技術として必須となる 3 次元手書き曲線同定法「FSCI-3D」を導出し、さらにそれを没入型 VR 環境に実装することによりその基本的動作を確認した。

我々は、本論文の結果が、空間描画動作同定に基づく 3 次元図形プリミティブ入力 CAD インタフェースの実現可能性を十分示唆しているものと考えているが、これを実証するためには、今後、(1) 平面描画と空間描画における人の描画特性の微妙な違いとそれに対する適応、(2) 同定された空間曲線プリミティブの形状パラメータに対する自動丸め処理、(3) 同パラメータに対する微調整のためのユーザインタフェース、(4) スワイプ操作による 3 次元図形プリミティブ生成の実装、等についてさらに検討する必要がある。

謝辞 本研究の一部は平成 9 年度特定研究経費「仮想現実環境を利用した人間の認知・動作特性に関する研究」による。

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 (A), J80-A, 9, (1997), pp.1517-1526.
- (2) S. Saga and H. Makino, Fuzzy Spline Interpolation and Its Application to On-Line Freehand Curve Identification, Proc. of 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems, IEEE, (March, 1993), pp.1183-1190.
- (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 — ファジィスプライン補間法 —, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J77-D-II, 8, (1994), pp.1610-1619.

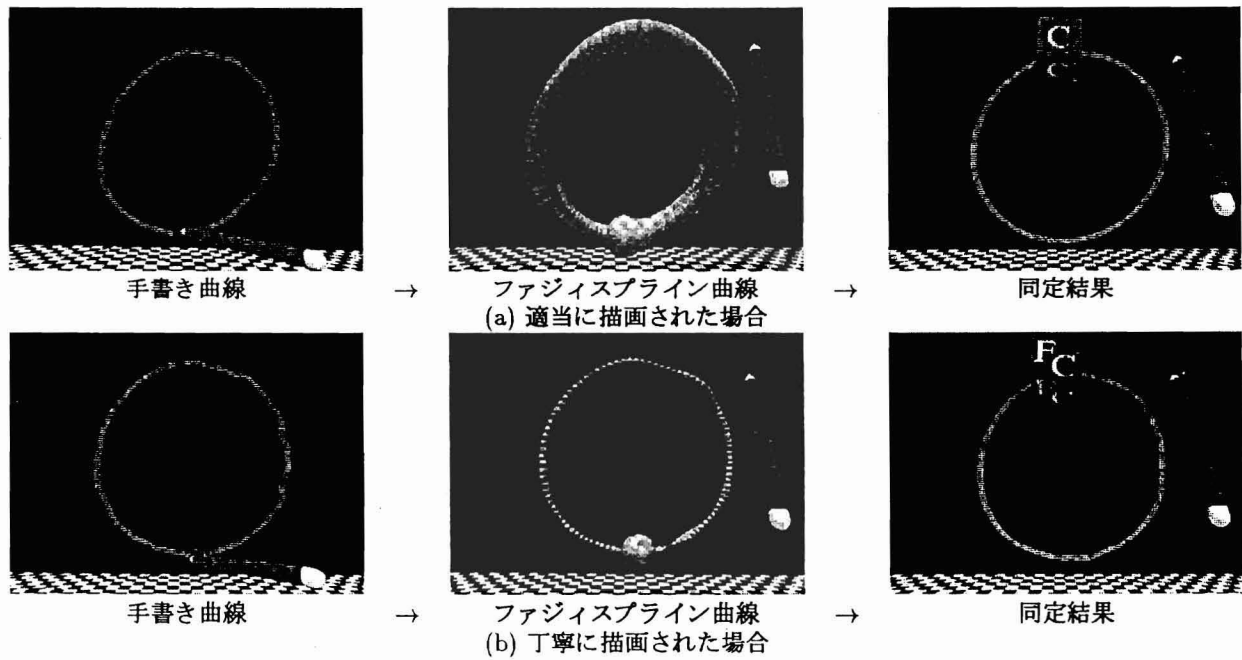


図 19: FSCI-3D の動作例

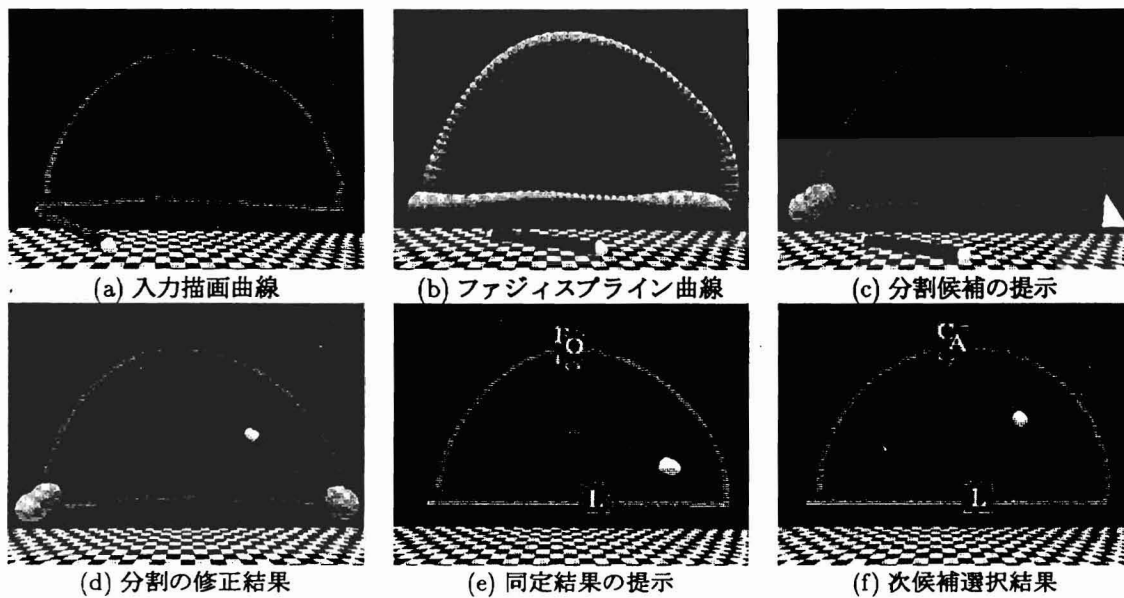


図 20: 簡易的な 3 次元曲線プリミティブ入力インタフェースの動作例

- (4) 佐賀聡人, 牧野宏美, 佐々木淳一, ファジィスプライン曲線同定法, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J77-D-II, 8, (1994), pp.1620-1629.
- (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, 36, 2, (1995), pp.338-350.
- (6) L. A. Zadeh, Fuzzy Sets As a Basis for a Theory of Possibility, Fuzzy Sets and Systems, Vol.1, 1, (1978), pp. 3-28.
- (7) G. Farin, Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design: A Practical Guide, Academic Press, Inc. (1988).
- (8) S. Saga, A Freehand Interface for Computer Aided Drawing Systems Based on the Fuzzy Spline Curve Identifier, Proc. of 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE, (October, 1995), pp.2754-2759.
- (9) 佐々木聡, 佐賀聡人, 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, インタラクション'98 研究会資料, 情報処理学会, (1998-03), pp.81-84.