

幾何曲線認識に基づく 図形空間操作インタフェース

割田 怜¹ 佐賀 聡人¹

概要: 我々はフリーハンド 描画のみで実務的な幾何作図を行うことができる手書き CAD インタフェースの実現を目指して、ペンで手書き入力された曲線をその形状と 描画動作をもとに幾何曲線列として同定するアルゴリズム「ファジィスプライン曲線同定法 (FSCI)」を提案した。また、FSCI の曲線同定機能に正方グリッドスナッピング機能等を付加した 2 次元手書き CAD インタフェース「SKIT」を開発し、実際にフリーハンド 描画を繰り返すだけで精密な幾何作図が完了することを示した。しかし SKIT においては幾何図形が存在する図形空間のグリッドに対する相対的位置関係を作図中に変更する図形空間操作をキーボード入力で行うため、このような操作を必要とする実務的な幾何作図作業においてはフリーハンド 描画以外の操作も必要とした。本報告では、FSCI の幾何曲線同定アルゴリズムの考え方をもとにして、ユーザによるフリーハンドの描画ジェスチャからユーザの意図する平行移動または回転移動を同定するアルゴリズムを新たに提案する。また、これを SKIT における図形空間操作インタフェースに実装することで、一貫したフリーハンド 描画のみで実務的な幾何作図を完了できるようになることを示す。

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

1. 緒言

タブレットや液晶ディスプレイの普及によってペン入力デバイスによる入力が普及し、さらにスマートフォンなどの普及により、タッチ入力が一般的に用いられるようになってきた。また、文献 [1],[2] などが提案された当時から、現在の商用のタブレットなどに至るまで、ピンチイン、ピンチアウトのような操作が地図などの回転移動、拡大縮小といった操作に用いられるのが一般的になっている。

一方、我々はペンで手書き入力された曲線をその形状と描画動作をもとに幾何曲線列として同定するアルゴリズムファジィスプライン曲線同定法 (FSCI)[3] を提案した。FSCI は、入力された点列に入力動作のあいまいさを付加したファジィスプライン曲線 (FSC) を生成し、7 種類の基本的な幾何曲線の何れかとして同定する手法である。さらに FSCI の幾何曲線同定機能に正方グリッドスナッピング機能等を付加した 2 次元手書き CAD インタフェース SKIT[4] を開発し、実際にフリーハンド 描画を繰り返すだけで精密な幾何作図が完了することを示した。

ここで、実務的な幾何作図を行おうとすると図形空間とグリッドとの相対的位置関係を移動させる必要が生じる。しかし、この図形空間移動操作では回転移動の中心をグ

リッド上に指定したり回転量や平行移動量を切りの良い値に量子化した値として指定したりする必要があり、一般的なピンチイン、ピンチアウトのような操作では対応できない。このため SKIT ではキーボード操作という手書き入力とは異質の操作で図形空間操作を実現していた。

本報告では、FSCI の幾何曲線同定アルゴリズムの考え方をもとにして、ユーザによるフリーハンドの描画動作からユーザの意図する所望の平行移動または回転移動を同定するアルゴリズムを新たに提案する。また、これを SKIT における図形空間操作インタフェースに実装することで、一貫したフリーハンド 描画のみで実務的な幾何作図を完了できるようになることを示す。

2. 幾何曲線認識に基づく 図形空間操作の必要性

FSCI の幾何曲線同定機能を基盤とする手書き作図の特徴を概説したのち、幾何曲線認識による図形空間操作インタフェースを新たに導入する必要性を明らかにする。

2.1 FSCI の幾何曲線同定機能を基盤とする手書き作図の特徴

FSCI は様々な幾何作図を手書きのみで完了できる手書き CAD インタフェースを実現するための汎用幾何曲線認識エンジンとして開発されており、入力された手書き曲線

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

を幾何作図で必須となる 7 種類の幾何曲線(線分, 円, 円弧, 楕円, 楕円弧, 閉じた自由曲線, 開いた自由曲線)の何れかとして同定する. ここで, FSCI は, 手書き曲線をその形状と描画の素早さ(あいまいさ)に応じてあいまいな曲線モデルである FSC の形で表現したのち, そのあいまいさが許す限りできるだけ自由度の低い(すなわち, できるだけ抽象度の高い)幾何曲線を認識しようとする戦略のファジィ推論を行うことを大きな特徴としている. ユーザはこの性質を利用し, 線分や円といった抽象度の高い幾何曲線を入力したいときは素早く大胆に, 逆に自由曲線のような具象的な曲線を入力したいときは丁寧に注意深く描画することで, これらの幾何曲線を自在に区別して入力できる. 実際, この FSCI と正方グリッドスナッピングを実装した手書き CAD インタフェース SKIT を用いれば, 図 1(a) に示す手書きストロークを描画し続ける^{*1}だけで, 図 1(b) のような幾何作図を完了できる.

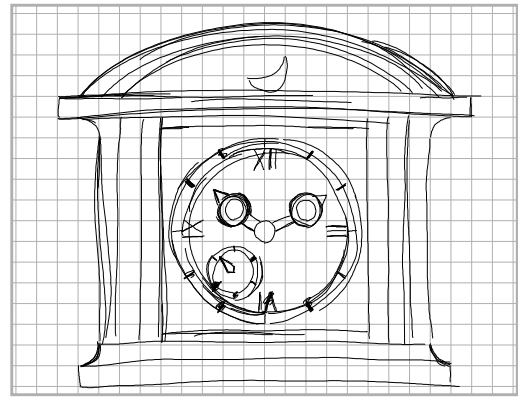
2.2 手書き作図における幾何曲線認識に基づく図形空間操作の必要性

FSCI を活用すれば図 1(b) のような比較的複雑な幾何作図でもフリーハンドの手書き入力だけで完了できる. しかし, この作図結果の細部に着目すると, 「文字盤のメモリ」や「針」の部分が微妙に歪んでいることが確認できる. これは, 正方グリッドへのスナッピングの限界を示す. ここで, より正確な幾何作図を実現するためには, キャンバス(図形空間)とビューポート(グリッド)との間の相対的な回転移動操作を行う必要があるが, 回転中心や回転角を切りの良い値に量子化して与えるためには一般的にメニュー操作やキーボード操作に頼る必要がある. しかしこの手書き入力と異質な操作は手書き CAD インタフェースの操作感を大きく損なうものとなる.

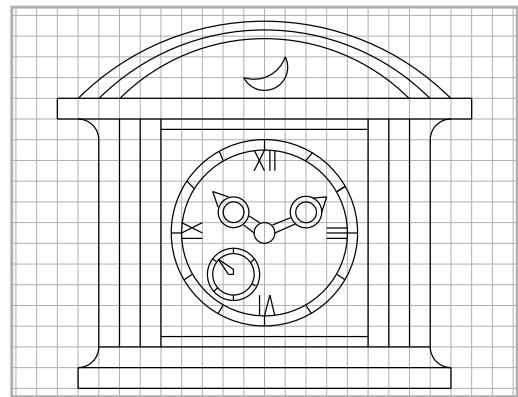
ここで, キャンバスの平行移動操作や回転移動操作をタッチパネル上の指先の動きで入力することができれば, あたかも紙を自在に動かしつつペン描画を続けるかのような自然な手書き CAD インタフェースを実現できる. そのためには, 複数本の指先が描く複数本の手書き入力ストロークのおおのを線分や円弧といった幾何曲線として同定した上で, 平行移動や回転移動といった幾何学的移動を同定する技術が必要となる.

3. 幾何曲線同定に基づく移動モデル同定法の提案

ユーザが入力した一本または複数本の手書きストロークからユーザの意図した移動モデルを同定する手法として「ファジィスプライン移動モデル同定法 (Fuzzy Spline Movement-model Identifier, FSMI)」を提案する. FSMI



(a) 入力された手書きストローク



(b) 幾何作図結果

図 1 FSCI を基盤とした手書き CAD インタフェース SKIT による幾何作図例

は, 六種類の移動モデル, すなわち「平行移動モデル」, 「 $\frac{n\pi}{2}$ 回転移動モデル」, 「 $\frac{n\pi}{3}$ 回転移動モデル」, 「 $\frac{n\pi}{4}$ 回転移動モデル」, 「 $\frac{n\pi}{6}$ 回転移動モデル」, 「 $\frac{n\pi}{180}$ 回転移動モデル」のうちの何れを意図したかを認識し, 認識した移動モデルに対応した具体の移動をグリッドに応じて量子化した形で同定し出力する. FSMI は FSCI の幾何曲線同定の考え方をもとにしており「素早く描画されたあいまいな手書きストロークであるほどより簡単に抽象性の高い移動モデルを同定する」という戦略を実現する.

3.1 FSMI の提案のための準備

FSMI 提案の準備として, 文献 [6] の議論に基づいて, 以下の定義を示す.

円錐型ファジィ点 図 2 に示す円錐型の二次元メンバシップ関数

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

で特徴づけられるファジィ集合を円錐型ファジィ点 $\tilde{\mathbf{p}}$ と定義し, これを

$$\tilde{\mathbf{p}} = \langle \mathbf{p}, r_{\mathbf{p}} \rangle \quad (2)$$

と表記する. ここで, $\mathbf{p}$ は円錐の頂点の位置ベクトル, $r_{\mathbf{p}}$ は円錐底面の半径, $\mathbf{v}$ は任意の変数位置ベクトル

^{*1} SKIT には文献 [5] の重ね書き修正法が実装されている. そのため手書きストロークが重ね書きされていることに注意する.

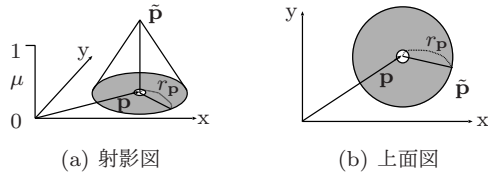


図 2 円錐型ファジィ点のメンバシップ関数

で、 $\vee$ は max 演算を表すものとする。これはあいまいな点のモデルを与える。

円錐型ファジィ点の重心結合 円錐型ファジィ点 $\tilde{\mathbf{p}}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ の重心結合 $\sum_{i=1}^n k_i \tilde{\mathbf{p}}_i (\sum_{i=1}^n k_i = 1)$ は円錐型ファジィ点

$$\sum_{i=1}^n k_i \tilde{\mathbf{p}}_i = \left\langle \sum_{i=1}^n k_i \mathbf{p}_i, \sum_{i=1}^n |k_i| r_{\mathbf{p}_i} \right\rangle \quad (3)$$

として求められる。

円錐型ファジィベクトル 二つの円錐型ファジィ点 $\tilde{\mathbf{a}}$ と $\tilde{\mathbf{b}}$ の差は円錐型ファジィベクトルとなり

$$\tilde{\mathbf{v}} = \langle \mathbf{b} - \mathbf{a}, r_{\mathbf{b}} + r_{\mathbf{a}} \rangle \quad (4)$$

と求められる。これは、 $\tilde{\mathbf{a}}$ から $\tilde{\mathbf{b}}$ に向かうあいまいなベクトルのモデルとなる。

円錐型ファジィベクトルのスカラー倍 円錐型ファジィベクトルのスカラー倍は円錐型ファジィベクトルとなり

$$k\tilde{\mathbf{v}} = \langle k\mathbf{v}, |k| r_{\mathbf{v}} \rangle \quad (5)$$

と求められる。

円錐型ファジィ点と円錐型ファジィベクトルの合成 円錐型ファジィ点 $\tilde{\mathbf{a}}$ と円錐型ファジィベクトル $\tilde{\mathbf{v}}$ の合成は円錐型ファジィ点となり

$$\tilde{\mathbf{a}} + \tilde{\mathbf{v}} = \langle \mathbf{a} + \mathbf{v}, r_{\mathbf{a}} + r_{\mathbf{v}} \rangle \quad (6)$$

と求められる。

三角型ファジィ数 一次元の三角型のメンバシップ関数

$$\mu_{\tilde{m}}(u) = \left(1 - \frac{\|u - m\|}{r_m}\right) \vee 0 \quad (7)$$

で特徴づけられるファジィ集合を三角型ファジィ数 $\tilde{m}$ と定義し、これを

$$\tilde{m} = \langle m, r_m \rangle \quad (8)$$

と表記する。ここで、 m は三角の頂点位置、 r_m は三角の底辺長の 1/2、 u は任意の変数を表すものとする。これはあいまいなスカラー値のモデルを与える。

三角ファジィ数の差 二つの三角型ファジィ数 $\tilde{m}$ と $\tilde{n}$ の差は三角型ファジィ数となり

$$\tilde{m} - \tilde{n} = \langle \tilde{m} - \tilde{n}, r_m + r_n \rangle \quad (9)$$

と求められる。

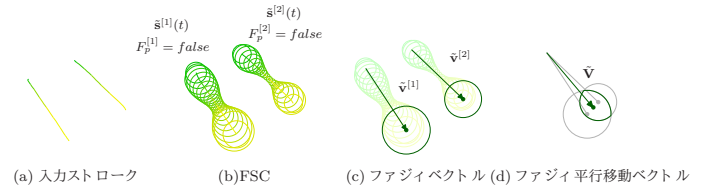


図 3 ファジィ平行移動ベクトルの生成

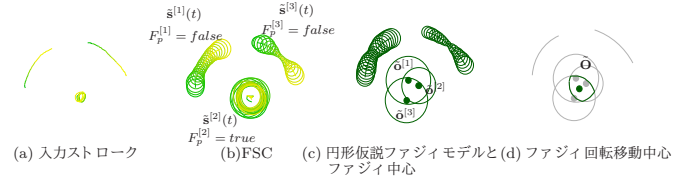


図 4 ファジィ回転移動中心の生成

共通ファジィ集合 複数のファジィ集合 $\tilde{f}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ のそれぞれのメンバシップ関数を $\mu_{\tilde{f}_i}(\mathbf{v}) (i = 1, 2, \dots, n)$ とすれば、これらの共通集合 $\tilde{f}_1 \cap \tilde{f}_2 \cap \dots \cap \tilde{f}_n$ のメンバシップ関数は $\mu_{\tilde{f}_1}(\mathbf{v}) \wedge \mu_{\tilde{f}_2}(\mathbf{v}) \wedge \dots \wedge \mu_{\tilde{f}_n}(\mathbf{v})$ となる。ここで、 $\wedge$ は min 演算を表すものとする。

3.2 FSMI アルゴリズム

提案する FSMI アルゴリズム以下にを示す。

(1)FSC の生成 m 本の描画ストロークから m 本のファジィスプライン曲線 (Fuzzy Spline Curve, FSC)

$$\tilde{\mathbf{s}}^{[i]}(t) = \sum_{k=0}^{n_d^{[i]}} N_k(t) \tilde{\mathbf{d}}_k^{[i]} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

を生成する。ここで、 t は時刻パラメータ、 $N_k(t)$ は 3 次の B-スプライン基底関数、 $\tilde{\mathbf{d}}_k^{[i]}$ はファジィ制御点である。この FSC は、具体的には文献 [6] の手法で生成され、手書きストロークの描画軌跡とともに描画の位置的なあいまいさをファジィ点の移動軌跡として表現したファジィなスプライン曲線モデルとなる (図 3(b) および図 4(b) 参照)。なおここで、位置的なあいまいさ、すなわちファジネスは、描画が素早く行われるほど大きくなるように生成される。

(2)FSC の分類 m 本の FSC のそれぞれ $\tilde{\mathbf{s}}^{[i]}(t)$ についてそれが点であるとみなされるかどうかを示すフラグ $F_p^{[i]} (\in \{true, false\})$ を生成する。具体的には文献 [7] の書描弁別法を用い

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{s}}^{[i]}(t) \text{ が「書」の場合: } & F_p^{[i]} = true \\ \tilde{\mathbf{s}}^{[i]}(t) \text{ が「描」の場合: } & F_p^{[i]} = false \end{aligned}$$

と設定する。これにより、図 4(b) の $\tilde{\mathbf{s}}^{[2]}(t)$ のように描画の軌跡の広がりあいまいさの広がり関係から FSC が塊状となりあいまいな「点」とみなされる場合に $F_p^{[i]} = true$ となる。

(3)移動モデルの生成と評価 ユーザが意図した移動を同定するための仮説として、六種類の移動モデル、すなわち「平行移動モデル」、「 $\frac{n\pi}{2}$ 回転移動モデル」、「 $\frac{n\pi}{3}$

回転移動モデル」,「 $\frac{\pi}{4}$ 回転移動モデル」,「 $\frac{\pi}{6}$ 回転移動モデル」,「 $\frac{\pi}{180}$ 回転移動モデル」を生成する. また, それぞれの移動モデルを可能性値で評価する.

(3-1) 平行移動モデルの生成と評価 m 本の FSC が全体として一つの平行移動を表すと仮定した場合の仮説として一つの「平行移動モデル」を生成する. また生成したモデルを可能性値で評価する.

(3-1-1) ファジィ平行移動ベクトルの生成 まず m 本の FSC のそれぞれ $\tilde{s}^{[i]}(t)$ について, そのファジィ終点 $\tilde{e}^{[i]}$ とファジィ始点 $\tilde{s}^{[i]}$ を求め, これからファジィベクトル $\tilde{v}^{[i]} = \tilde{e}^{[i]} - \tilde{s}^{[i]}$ を生成する (図 3(c) 参照). 次に, m 本の FSC の合議をとりファジィ平行移動ベクトルを

$$\tilde{V} = \tilde{v}^{[1]} \cap \tilde{v}^{[2]} \cap \dots \cap \tilde{v}^{[m]} \quad (11)$$

なる多重ファジィベクトルとして生成する (図 3(d) 参照).

(3-1-2) ファジィ平行移動ベクトルの可能性評価 多重ファジィベクトル $\tilde{V}$ の存在可能性を $P^{\tilde{V}}$ として評価する. 具体的には $\tilde{V}$ のメンバシップ関数の最大値を探索で求め, これを $P^{\tilde{V}}$ とする.

(3-1-3) 線形性の可能性評価 まず, m 本の FSC のそれぞれ $\tilde{s}^{[i]}(t)$ について線形性の可能性値 $P^{L[i]}$ を算出する. これは文献 [8] のファジィ推論における可能性測度に基づいて文献 [6] で計算される値で, FSC $\tilde{s}^{[i]}(t)$ が線形であると仮定して生成する線形仮説ファジィモデル

$$\tilde{r}^{L[i]}(t) = B_0^1(t)\tilde{s}^{[i]} + B_1^1(t)\tilde{e}^{[i]} \quad (12)$$

ともとの FSC $\tilde{s}^{[i]}(t)$ との間の合致度を評価して得られる可能性値である. ただしここで, $B_k^1(t)$ は 1 次の Bernstein 多項式である. 全ての FSC の線形性の可能性値 $P^{L[i]}$ を求めたのち, m 本全ての FSC の線形性の可能性値の論理積

$$P^L = P^{L[1]} \wedge P^{L[2]} \wedge \dots \wedge P^{L[m]} \quad (13)$$

で平行移動モデル全体としての線形性の可能性値を評価する.

(3-2) $\frac{\pi}{2}$ 回転移動モデルの生成と評価 m 本の FSC が全体として一つの $\frac{\pi}{2}$ 回転移動 ($\frac{\pi}{2}$ の整数倍の回転移動角をもつ回転移動) を表すと仮定した場合の仮説として一つの「 $\frac{\pi}{2}$ 回転移動モデル」を生成する. また, 生成したモデルを可能性値で評価する.

(3-2-1) ファジィ中心の生成 まず, m 本の FSC のそれぞれ $\tilde{s}^{[i]}(t)$ について以下のように回転移動のファジィ中心 $\tilde{o}^{[i]}$ を求める.

$F_p^{[i]} = true$ の場合: FSC $\tilde{s}^{[i]}(t)$ 自体が回転

移動のファジィ中心となる. したがって $\tilde{s}^{[i]}(t)$ 上のファジネス最小のファジィ点の頂点位置ベクトルを $\mathbf{o}^{[i]}$, 一方最大のファジィ点のファジネスを $r_o^{[i]}$ とし, これから $\tilde{o}^{[i]} = \langle \mathbf{o}^{[i]}, r_o^{[i]} \rangle$ とファジィ中心を求める. $F_p^{[i]} = false$ の場合: FSC $\tilde{s}^{[i]}(t)$ が円形 (円弧状) であると仮定し, 文献 [3] にしたがって円形仮説ファジィモデル

$$\begin{aligned} \tilde{r}^{C[i]}(t) &= \frac{P_0(t)\tilde{s}^{[i]} + P_1(t)(1 + w^{[i]})\tilde{f}^{[i]} + P_2(t)\tilde{e}^{[i]}}{P_0(t) + P_1(t)(1 + w^{[i]}) + P_2(t)} \\ &= \frac{P_0(t)\tilde{s}^{[i]} + P_1(t)(1 + w^{[i]})\tilde{f}^{[i]} + P_2(t)\tilde{e}^{[i]}}{P_0(t) + P_1(t)(1 + w^{[i]}) + P_2(t)} \end{aligned} \quad (14)$$

を生成する (図 4(c) 参照). ただしここで, $P_0(t) = B_0^2(t) - \frac{1}{2}B_1^2(t)$, $P_1(t) = B_1^2(t)$, $P_2(t) = B_2^2(t) - \frac{1}{2}B_1^2(t)$ であり ($B_k^2(t)$ は 2 次の Bernstein 多項式), $\tilde{f}^{[i]}$ は線分 $\mathbf{s}^{[i]}\mathbf{e}^{[i]}$ の垂直二等分線と FSC $\tilde{s}^{[i]}(t)$ との交点となるファジィ点, $w^{[i]} = \frac{l^2 - h^2}{l^2 + h^2}$, $l = \|\mathbf{s}^{[i]} - \mathbf{e}^{[i]}\|/2$, $h = \|\mathbf{f}^{[i]} - (\mathbf{s}^{[i]} + \mathbf{e}^{[i]})/2\|$ である. この円形仮説ファジィモデルのファジィ中心点を A.1 に示す手法で求め, これを $\tilde{o}^{[i]}$ とする.

全てのファジィ中心 $\tilde{o}^{[i]}$ を求めたのち, m 本の FSC 全体の合議をとりファジィ回転移動中心を

$$\tilde{O} = \tilde{o}^{[1]} \cap \tilde{o}^{[2]} \cap \dots \cap \tilde{o}^{[m]} \quad (15)$$

なる多重ファジィ位置ベクトルとして生成する (図 4(d) 参照).

(3-2-2) ファジィ回転移動中心の可能性評価 多重ファジィ位置ベクトル $\tilde{O}$ の存在可能性を $P^{\tilde{O}}$ として評価する. 具体的には $\tilde{O}$ のメンバシップ関数の最大値を探索で求め, これを $P^{\tilde{O}}$ とする.

(3-2-3) 回転移動角の生成 m 本の FSC それぞれ $\tilde{s}^{[i]}(t)$ についてファジィ回転移動角を三角型ファジィ数 $\tilde{\theta}^{[i]}$ として求める.

$F_p^{[i]} = true$ の場合: 回転移動角は不定となるので, $\tilde{\theta}^{[i]} = \langle 0, \infty \rangle$ となる. 実際には ∞ の代替として十分大きな正定数 R を予め設定し, $\tilde{\theta}^{[i]} = \langle 0, R \rangle$ とする.

$F_p^{[i]} = false$ の場合: ファジィ中心 $\tilde{O}$ のメンバシップ関数の頂点を与える点 $\mathbf{O}$ を探索で求める. A.2 に示す方法で, 点 $\mathbf{O}$ から見たファジィ終点 $\tilde{e}^{[i]}$ の方向角を三角型ファジィ数 $\tilde{\theta}_e^{[i]}$ として求める. 同様にファジィ始点 $\tilde{s}^{[i]}$ の方向角を三角型ファジィ数 $\tilde{\theta}_s^{[i]}$ として求める. これからファジィ回転移動角を $\tilde{\theta}^{[i]} = \tilde{\theta}_e^{[i]} - \tilde{\theta}_s^{[i]}$ と求める.

全てのファジィ回転移動角 $\tilde{\theta}^{[i]}$ を求めたのち, m

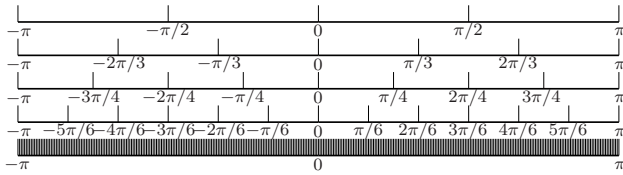


図 5 角度グリッド

本の FSC の合議をとりファジィ回転移動角を

$$\tilde{\Theta} = \tilde{\theta}^{[1]} \cap \tilde{\theta}^{[2]} \cap \dots \cap \tilde{\theta}^{[m]} \quad (16)$$

なる多重三角型ファジィ数として生成し、そのメンバシップ関数の頂点を与える回転移動角 Θ を探索で求める。さらに、 Θ を図 5 に示す $\frac{\pi}{2}$ 刻みの角度グリッドにもとづいて量子化し、 $\frac{n\pi}{2}$ 回転移動モデルの回転移動角 $\Theta^{\frac{n\pi}{2}}$ を生成する。

(3-2-4) $\frac{n\pi}{2}$ 円形性の可能性の評価 まず、 m 本の FSC $\tilde{s}^{[i]}(t)$ のそれぞれについて、式 (14) の円形仮説ファジィモデル $\tilde{r}^{C[i]}(t)$ を A.3 に示す手法で修正し、中心が $\mathbf{O}$ かつ中心角が $\Theta^{\frac{n\pi}{2}}$ となる $\frac{n\pi}{2}$ 円形仮説ファジィモデル

$$\begin{aligned} \tilde{r}_*^{C[i]}(t) &= \frac{P_0(t)\tilde{s}_*^{[i]} + P_1(t)(1 + w_*^{[i]})\tilde{f}^{[i]} + P_2(t)\tilde{e}_*^{[i]}}{P_0(t) + P_1(t)(1 + w_*^{[i]}) + P_2(t)} \end{aligned} \quad (17)$$

を再生成する。次に、文献 [3] にしたがって $\tilde{r}_*^{C[i]}(t)$ と同との FSC $\tilde{s}^{[i]}(t)$ との間の合致度を評価して $\frac{n\pi}{2}$ 円形性の可能性値を算出する。全ての FSC の $\frac{n\pi}{2}$ 円形性の可能性値 $P^{\frac{n\pi}{2}C[i]}$ を求めたのち、 m 本全ての FSC の $\frac{n\pi}{2}$ 円形性の可能性値の論理積

$$P^{\frac{n\pi}{2}C} = P^{\frac{n\pi}{2}C[1]} \wedge P^{\frac{n\pi}{2}C[2]} \wedge \dots \wedge P^{\frac{n\pi}{2}C[m]} \quad (18)$$

で $\frac{n\pi}{2}$ 回転移動モデル全体としての $\frac{n\pi}{2}$ 円形性の可能性値を評価する。

(3-3) $\frac{n\pi}{3}$ 回転移動モデルの生成と評価 $\frac{n\pi}{2}$ 回転移動モデルと同様に、 $\frac{n\pi}{3}$ 回転移動モデルを生成し、 $\frac{n\pi}{3}$ 円形性の可能値 $P^{\frac{n\pi}{3}}$ を算出する。

(3-4) $\frac{n\pi}{4}$ 回転移動モデルの生成と評価 $\frac{n\pi}{2}$ 回転移動モデルと同様に、 $\frac{n\pi}{4}$ 回転移動モデルを生成し、 $\frac{n\pi}{4}$ 円形性の可能値 $P^{\frac{n\pi}{4}}$ を算出する。

(3-5) $\frac{n\pi}{6}$ 回転移動モデルの生成と評価 $\frac{n\pi}{2}$ 回転移動モデルと同様に、 $\frac{n\pi}{6}$ 回転移動モデルを生成し、 $\frac{n\pi}{6}$ 円形性の可能値 $P^{\frac{n\pi}{6}}$ を算出する。

(3-6) $\frac{n\pi}{180}$ 回転移動モデルの生成と評価 $\frac{n\pi}{2}$ 回転移動モデルと同様に、 $\frac{n\pi}{180}$ 回転移動モデルを生成し、 $\frac{n\pi}{180}$ 円形性の可能値 $P^{\frac{n\pi}{180}}$ を算出する。

(4) 移動モデルの選択 六種類の移動モデル、すなわち平

表 1 移動モデル同定推論規則

$\mu(L) = P^L$	$\wedge P^V$
$\mu(\frac{n\pi}{2}C) = P^{\frac{n\pi}{2}C}$	$\wedge P^{\tilde{O}}$
$\mu(\frac{n\pi}{3}C) = (1 - P^{\frac{n\pi}{2}C}) \wedge P^{\frac{n\pi}{3}C}$	$\wedge P^{\tilde{O}}$
$\mu(\frac{n\pi}{4}C) = (1 - P^{\frac{n\pi}{2}C}) \wedge (1 - P^{\frac{n\pi}{3}C}) \wedge P^{\frac{n\pi}{4}C}$	$\wedge P^{\tilde{O}}$
$\mu(\frac{n\pi}{6}C) = (1 - P^{\frac{n\pi}{2}C}) \wedge (1 - P^{\frac{n\pi}{3}C}) \wedge (1 - P^{\frac{n\pi}{4}C}) \wedge P^{\frac{n\pi}{6}C}$	$\wedge P^{\tilde{O}}$
$\mu(\frac{n\pi}{180}C) = (1 - P^{\frac{n\pi}{2}C}) \wedge (1 - P^{\frac{n\pi}{3}C}) \wedge (1 - P^{\frac{n\pi}{4}C}) \wedge (1 - P^{\frac{n\pi}{6}C}) \wedge P^{\frac{n\pi}{180}C}$	$\wedge P^{\tilde{O}}$

行移動モデル、 $\frac{n\pi}{2}$ 回転移動モデル、 $\frac{n\pi}{3}$ 回転移動モデル、 $\frac{n\pi}{4}$ 回転移動モデル、 $\frac{n\pi}{6}$ 回転移動モデル、 $\frac{n\pi}{180}$ 回転移動モデルのそれぞれについて表 1 のファジィ推論規則にしたがってグレード値 μ を求め、最大の μ を与える移動モデルを選択する。ここで、 $1 - P$ は P の否定、 $\wedge$ は論理積を意味することになり、このファジィ推論は全体として「可能性のある中でできるだけ自由度が低い（すなわちできるだけ抽象性が高い）移動モデルを選択する」という戦略を実現する。

(5) 移動の決定 選択された移動モデルに応じてファジィ平行移動ベクトル $\tilde{\mathbf{V}}$ またはファジィ回転移動中心 $\tilde{\mathbf{O}}$ を文献 [9] の手法を用い、正方グリッドにスナッピングすることで平行移動ベクトルまたは回転移動中心を決定し、最終的な平行移動または回転移動を決定する。

4. 幾何曲線認識に基づく図形空間操作インタフェースの動作実験

手書き CAD インタフェース SKIT に FSMI による図形空間操作インタフェースを実装し動作実験を行った。実装に当たっては FSCI に幾何曲線として同定させる描画ストローク（以後「曲線ストローク」と呼ぶ。）と FSMI に移動モデルとして同定させる描画ストローク（以後「移動ストローク」と呼ぶ。）を区別する必要がある。本実験ではペン入力のためのビデオタブレットを用いたため、ペンのサイドスイッチの ON/OFF で曲線ストローク入力モードと移動ストローク入力モードを切り替える実装とした*2。

4.1 図形空間操作の動作例

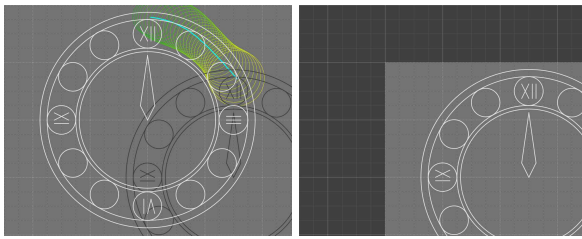
以下に FSMI を用いた図形空間操作インタフェースの動作例を示す。以下の図では移動ストロークを FSC で示し、ストロークの始点側を緑、終点側を黄色で表示した。

4.1.1 一本の移動ストローク入力による図形空間操作例

FSMI は一般に複数本の移動ストロークを入力として一つの移動モデルを同定するが、一本の移動ストローク入力でも動作する。以下に一本の移動ストロークのみで移動モデルを同定させて図形空間操作をした例を示す。

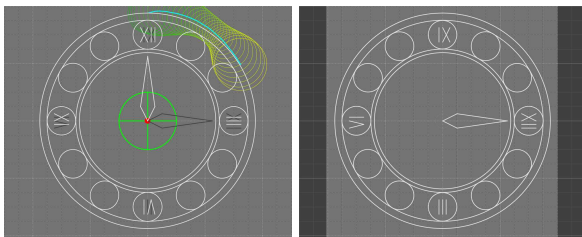
平行移動 図 6 では素早い描画でファジネスの大きな FSC を入力し、最も抽象性の高い平行移動操作を行わせている。

*2 ペン入力とマルチタッチ入力の両方に対応したデバイスを用いる場合は、ペン入力を曲線ストロークに、マルチタッチ入力を移動ストロークに対応させることでモードレスの実装とすることも考えられる。



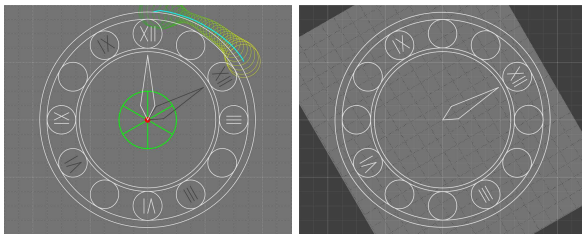
(a) 移動ストローク (b) 図形空間操作結果

図 6 素早い移動ストローク入力による平行移動操作



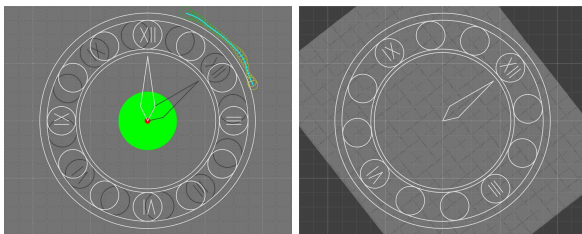
(a) 移動ストローク (b) 図形空間操作結果

図 7 やや素早い移動ストローク入力による $\frac{\pi}{2}$ 回転移動操作



(a) 移動ストローク (b) 図形空間操作結果

図 8 やや丁寧な移動ストローク入力による $\frac{\pi}{3}$ 回転移動操作



(a) 移動ストローク (b) 図形空間操作結果

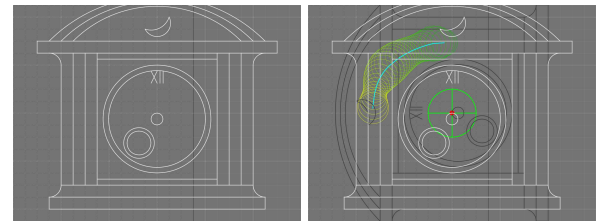
図 9 丁寧な移動ストローク入力による $\frac{50\pi}{180}$ 回転移動操作

$\frac{4\pi}{2}$ 回転移動 図 7 ではやや素早い描画で比較的法ジネスの大きな FSC を入力し、回転移動操作の中では抽象性の高い $\frac{\pi}{2}$ 回転移動操作を行わせている。

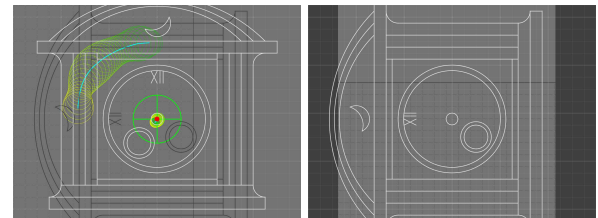
$\frac{7\pi}{3}$ 回転移動 図 8 ではやや丁寧な描画で比較的法ジネスの小さな FSC を入力し、回転移動操作の中では抽象性が中程度の $\frac{\pi}{3}$ 回転移動操作を行わせている。

$\frac{7\pi}{180}$ 回転移動 図 9 では丁寧な描画で法ジネスの小さな FSC を入力し、最も抽象性の低い $\frac{50\pi}{180}$ 回転移動操作を行わせている。

以上の結果から FSMI を用いると移動ストロークの描画形状とともにその描画の素早さ（法ジネス）を調節することで同定される移動モデルをコントロールし、所望の図形空間



(a) 初期状態 (b) 弧状の移動ストローク



(c) 点状の移動ストローク (d) 図形空間操作結果

図 10 回転移動中心の直接指定の例

間操作を達成できることが分かる。

4.1.2 複数本の移動ストローク入力による図形空間操作例

複数本の移動ストロークの合議により移動モデルを同定させて図形空間操作をした例を示す。

回転移動中心の直接指定 図 10(b) では一本目の弧状の移動ストローク入力により $\frac{\pi}{2}$ 回転移動操作の指定には成功したものの回転移動中心が意図どおりとなっていない。そこで図 10(c) の点状の移動ストロークを所望の回転移動中心付近に入力することで二本の移動ストロークによる合議を行わせ図 10(d) のとおり所望の回転移動中心を持つ $\frac{\pi}{2}$ 回転移動操作を達成している。

弧の対による回転移動中心の指定 図 11(b) では一本目の弧状の移動ストローク入力により $\frac{\pi}{3}$ 回転移動操作の指定には成功したものの回転移動中心が意図どおりとなっていない。そこで図 11(c) のように所望の中心を挟んで反対側にも弧状の移動ストロークを入力することで図 11(d) のとおり所望の回転移動中心を持つ $\frac{\pi}{3}$ 回転移動操作を達成している。

回転移動中心の指定による回転移動操作の指定 図 12(b) では一本目の弧状の移動ストローク入力が入力された図形空間操作に誤同定されている。しかし図 12(c) のように所望の回転移動中心付近に点状の移動ストロークを入力することで回転移動操作を同定させると同時に回転移動中心の指定にも成功し図 12(d) のとおり所望の回転移動中心を持つ $\frac{\pi}{6}$ 回転移動操作を達成している。

以上の結果から、単一の移動ストロークでは表現しきれない図形空間操作意図でも、複数本の移動ストロークを用いることで細やかに表現できることが分かる。

4.2 図形空間操作を活用利用した作図例

手書き CAD インタフェース SKIT で図 13 のように FSMI による図形空間操作と FSCI による曲線同定を併用

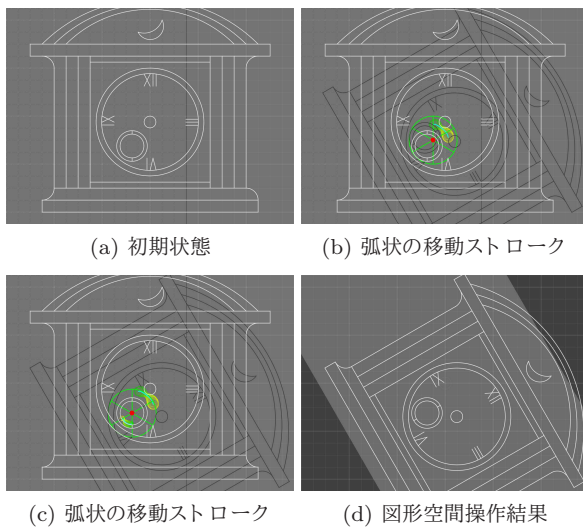


図 11 弧の対による回転中心の指定の例

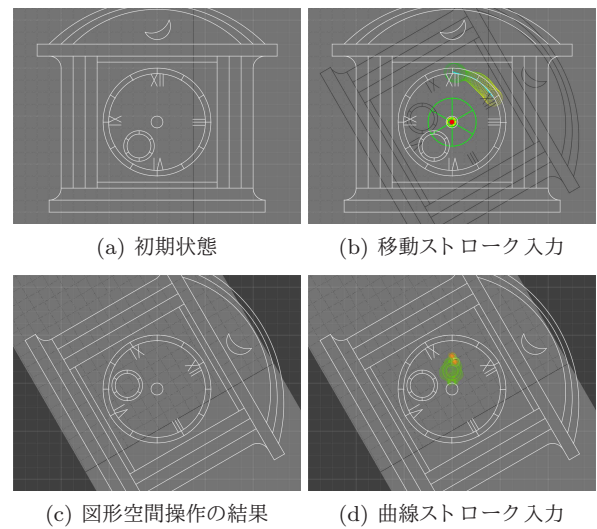


図 13 FSMI を活用した幾何作図の様子

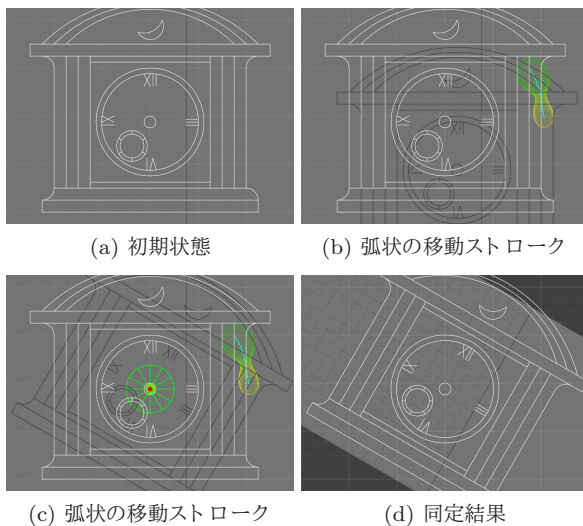


図 12 回転移動中心の指定による回転移動操作選択の例

した幾何作図を行った．その結果図 14(a) に示す曲線ストロークと移動ストロークを描画しつづけるだけで図 14(b) の幾何作図を完了した．これを図 1(b) と比較すると，回転移動操作を駆使することで「文字盤のメモリ」や「針」の正確な作図が可能となったことが分かる．また図 14(a) から $\frac{\pi}{2}$ 回転移動操作を行うことで「文字盤のローマ数字」を文字として自然な向きで作図していることが分かる．

5. 結言

ユーザが入力した一本または複数本の手書きストロークの形状と描画の素早さの程度をもとに，これを六種類の移動モデル（平行移動モデル， $\frac{\pi}{2}$ 回転移動モデル， $\frac{\pi}{3}$ 回転移動モデル， $\frac{\pi}{4}$ 回転移動モデル， $\frac{\pi}{6}$ 回転移動モデル， $\frac{\pi}{180}$ 回転移動モデル）の何れかとして同定する手法 FSMI を提案した．また，従来の FSCI の幾何曲線同定を基盤とした手書き CAD インタフェースに FSMI による移動モデル同定を実装することで手書き描画による図形空間操作が可能

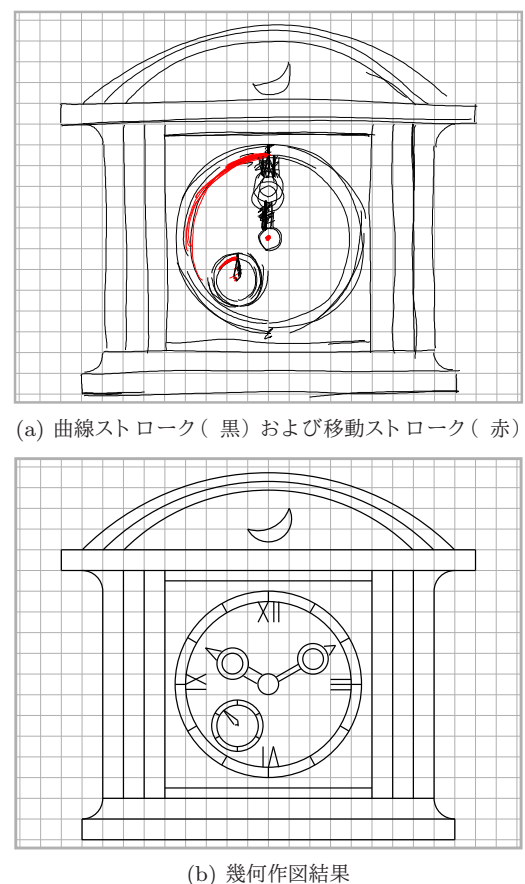


図 14 FSCI および FSMI を実装した手書き CAD インタフェース SKIT による幾何作図例

なインタフェースを試作した．さらに，動作実験を通じて，入力する移動ストロークの形状とともにその描画の素早さを調節することで FSMI に同定させる移動モデルをコントロールできること，また複数の移動ストロークを組み合わせることでさらに細やかなコントロールも可能となることを示した．最後に実際の幾何作図例を通して，図形空間操作を必要とする精密な幾何作図であっても曲線

ストロークと移動ストロークを描画し続けるだけで完了できる手書き CAD インタフェースが実現されたことを確認した。

参考文献

- [1] Nobuyuki, M. and Ju, n. R.: HoloWall: Designing a Finger, Hand, Body, and Object Sensitive Wall., *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 209–210 (1997).
- [2] Jun, R.: SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surface, *CHI2002* (2002).
- [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] 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).
- [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, Vol. J86-D-II, No. 2, pp. 242–251 (2003).
- [6] 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-D-II, No. 8, pp. 1610–1619 (1994).
- [7] 豊原純平, 佐賀聡人: ファジースプライン曲線の分割処理に基づく書描弁別法の提案, 情報処理北海道シンポジウム 2000 講演論文集, pp. 136–138 (2000).
- [8] 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).
- [9] 吉川友人, 佐賀聡人: 多重ファジィ点に対する多重解像度ファジィグリッドスナッピング法の提案, 平成 26 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演論文集 147 (2014).

付 録

A.1 円形仮説ファジィモデルのファジィ中心の算出法

ファジィ線分 $\tilde{s}^{[i]}\tilde{e}^{[i]}$ のファジィ中点を $\tilde{m}$ とし (すなわち, $\tilde{m} = (\tilde{s}^{[i]} + \tilde{e}^{[i]})/2$), $\tilde{f}^{[i]}$ と $\tilde{m}$ をもとにして $\tilde{f}^{[i]}$ からファジィ中心へ向かうファジィ単位ベクトル $\tilde{v}_{fm}$ を

$$\tilde{v}_{fm} = (\tilde{m} - \tilde{f}^{[i]}) / (\|\tilde{m} - \tilde{f}^{[i]}\|) \quad (A.1)$$

と求める. このとき $\tilde{f}^{[i]}$ と $\tilde{v}_{fm}$ からファジィ中心は

$$\tilde{o}_{fm} = \tilde{f}^{[i]} + (\|\tilde{m} - \tilde{f}^{[i]}\|) / (1 - w^{[i]}) \tilde{v}_{fm} \quad (A.2)$$

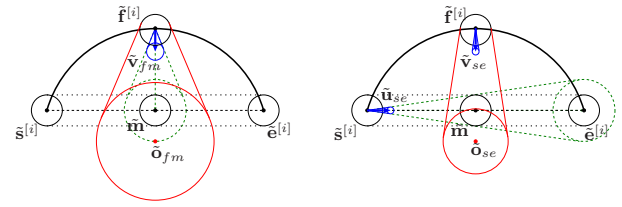
と求められる.

一方, $\tilde{s}^{[i]}$ から $\tilde{e}^{[i]}$ へ向かうファジィ単位ベクトル $\tilde{u}_{se}$ を

$$\tilde{u}_{se} = (\tilde{e}^{[i]} - \tilde{s}^{[i]}) / (\|\tilde{e}^{[i]} - \tilde{s}^{[i]}\|) \quad (A.3)$$

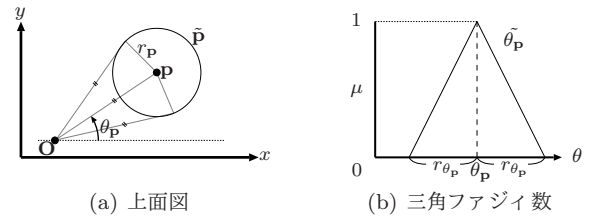
と求め, これを図 A.1(b) に示すように 90 度回転したファジィ単位ベクトルを $\tilde{v}_{se}$ とする. このとき $\tilde{f}^{[i]}$ と $\tilde{v}_{se}$ からはファジィ中心が

$$\tilde{o}_{se} = \tilde{f}^{[i]} + (\|\tilde{m} - \tilde{f}^{[i]}\|) / (1 - w^{[i]}) \tilde{v}_{se} \quad (A.4)$$



(a) $\tilde{v}_{fm}$ から求められるファジィ中心 $\tilde{o}_{fm}$ (b) $\tilde{v}_{se}$ から求められるファジィ中心 $\tilde{o}_{se}$

図 A.1 ファジィ中心



(a) 上面図 (b) 三角ファジィ数

図 A.2 ファジィ方向角

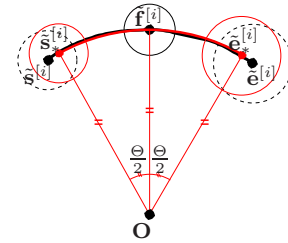


図 A.3 角度円弧モデルの生成

と求められる.

最後に, 式 (A.2) および式 (A.4) の合議をとり

$$\tilde{o}^{[i]} = \tilde{o}_{fm} \cap \tilde{o}_{se} \quad (A.5)$$

とファジィ中心を算出する.

A.2 点 O から見たファジィ点 $\tilde{p}$ のファジィ方向角の算出法

図 A.2 のようにベクトル $\mathbf{p} - \mathbf{O}$ の x 軸からの方向角 θ_p を求める. また r_{θ_p} を $r_{\theta_p} = \frac{r_p}{\|\mathbf{p} - \mathbf{O}\|}$ と求める. これより, ファジィ方向角 $\tilde{\theta}_p$ を $\tilde{\theta}_p = \langle \theta_p, r_{\theta_p} \rangle$ なる三角型ファジィ数として算出する.

A.3 円形仮説ファジィモデルの修正法

式 (14) の円形仮説ファジィモデル $\tilde{r}^{C[i]}(t)$ をもとに, 中心が $\mathbf{O}$ で中心角が Θ となる円形仮説ファジィモデルを式 (17) の $\tilde{r}^{C[i]}(t)$ の形で再生成するためには $w_*^{[i]}$, $\tilde{s}_*^{[i]}$, $\tilde{e}_*^{[i]}$ を以下のとおりに設定すればよい.

まず $w_*^{[i]} = \cos \frac{\Theta}{2}$ とする. 次に, 図 A.3 に示すように $\|\mathbf{s}_*^{[i]} - \mathbf{O}\| = \|\mathbf{e}_*^{[i]} - \mathbf{O}\| = \|\mathbf{f}^{[i]} - \mathbf{O}\|$ かつ $\angle \mathbf{f}^{[i]} \mathbf{O} \mathbf{s}_*^{[i]} = \angle \mathbf{f}^{[i]} \mathbf{O} \mathbf{e}_*^{[i]} = \frac{\Theta}{2}$ となる $\mathbf{s}_*^{[i]}$ および $\mathbf{e}_*^{[i]}$ を求める. このとき $\tilde{s}^{[i]}$ および $\tilde{e}^{[i]}$ の頂点をそれぞれ $\mathbf{s}_*^{[i]}$ および $\mathbf{e}_*^{[i]}$ に移動させたものを $\tilde{s}_*^{[i]}$ および $\tilde{e}_*^{[i]}$ とする.