

図形素片解析に基づく曲線の検出

森 克己

Curve Detection based on Segments Analysis

Katsumi MORI

Abstract

Many kinds of methods for pattern recognition, such as the Hough T., have been developed. These methods can judge of the given figures with high reliability, but need a deal of processing cost, i.e. time and tools. The cost prevents the methods from being widely used. Characters, symbols and so on that may be written on the actual drawings but are not the objects to be detected cause the intolerable increase in the cost. A handy manner to select the objects out of others is desired. This paper deals with the detection of quadratic curves by the segments analysis manner named "Segment Pair Matching method (SPM)" which is proposed as an answer to the above mentioned problem. The principle of SPM is finding a pair of segments which lie on the curve by using matching conditions. Formulation of the conditions for the general quadratic curves is mainly discussed and some useful formulas are newly obtained.

Key words : pattern recognition, curve detection, segment, pair matching

1. まえがき

近年、製造業におけるCAD/CAM用の図面データベース、地図をベースとした水道、電気、ガス、電話回線等の各種の設備管理システム、特許明細書・商標等の知的所有権管理システムなどが広く普及あるいは新たに開発されつつある。これらのシステムの開発ではいずれも文字情報にも増して図形情報の取扱が主要な技術的な課題となる。図形処理技術は広汎にわたるが図形の計算機への入力技術が基本となる。現在、実用的な図面入力手段としてはタブレットを用いた人手による方法が大きな割合を占めているが、多大の労力と時間を要するため図面処理システムの普及上の大きなネックとなっている。この問題を解決するため図面の自動入力技術の開発が精力的に進められている。図面の自動入力技術の中心をな

すものは図形認識技術である。図形認識は人間が図面を処理するときの処理単位に近い形で個々の図形を計算機に認識させ、人間の思考に馴染み易いレベルでの図面処理を可能にすることを目的としている。その研究の歴史は長い⁽¹⁾が、特定の分野を除いては実用化されるまでには至っていない。

本研究は図形認識、とりわけ、各種の文字・記号が混在する大型図面から基本的な図面の構成要素である直線、円、一般2次曲線を高速に検出する処理に関するものである。図形認識の古典的な手法としてはテンプレートマッチング(あるいはパタンマッチング)がある。これは図形の向き、大きさの正規化あるいは細線化という厄介な問題を含むため多数の文字、記号が混在する実用図面の認識における主要な手法として使用されることは極めて

少ないが、特定された1個の図形の最終確認手法としては最も信頼性が高い手法である。これ以外、上記の直線、円、楕円などの解析図形の認識手法としては、現在、Hough変換が最も広く研究されている。⁽²⁾ Hough変換は図形を表現する関数（以下、図形記述関数とよぶ）の係数空間上での累積度数分布処理を行うため、よごれやカスレなどの雑音に強いという特長を持っている。しかし、反面、認識対象図形が直線、円、楕円と図形記述関数の係数の個数が増えるにつれて、高次元空間での処理となり、処理時間および所要メモリ量が急激に増加するという大きな欠点がある。⁽³⁾ この結果、テンプレートマッチングと同じく文字、記号、自由曲線が混在する大形図面の認識手法として利用されるに至っていない。その他、円、楕円といった個々の図形の認識に関する固有の手法の報告^{(4),(5)}があるが同様の問題を含んでいる。

以上述べたように、特定された個々の図形の認識手法としては極めて優れた手法がありながら実用的な図面認識システムができないことが本分野での最大の問題点である。その理由は、上でも述べたように、個々の手法を適用する図形の選択・絞り込みができないためであると考えられる。すなわち、実用図面においては各種文字、記号、図形、自由曲線が混在することは避けられないが、従来の個々の図形認識手法を適用する際には前もって対象図形と非対象図形を区別することができないため、本来認識対象でないものまで含めて、図面上に描かれた全ての黒画素を処理対象とせざるを得ない。その結果、図面全体の処理時間は大幅に増加し、実用的でなくなってしまう。したがって、上記の問題を解決するためには効率の良い図形選択手法の開発が極めて重要な課題となる。

著者らは上記課題の解決手法の1つとして図形素片の⁽⁶⁾解析に基づく図形検出処理（素片対照合法）を提案した。本論文では直線、2次曲線を対象として素片対照合法の考え方、照合条件の導出、適用法について述べる。

2. 素片対照合法

2.1 基本的な考え方と問題点

多数の構成要素を含む集合の中身を少ない処理で推測する最も一般的な手段としてはサンプリング（標本化）が広く用いられている。本素片対照合法も図面という空間上に分布する多数の黒画素の集合、あるいは、1つの図形を表す多数の黒画素の集合の構造を少数の黒画素を用いて推測する標本化の考え方に従うものである。このとき、標本点の情報を用いて図形の形状の推定・選別ができるか否かが問題となる。

これに対して、「関数で記述された図形上に選んだ任意の標本点の座標値はその図形記述関数を満足していなければならない」ことを数学的な根拠として答えを出す

ことができる。具体的な検討課題は

- (1) 何個の標本点が必要か、
 - (2) 標本点に基づく図形の判別式は何か、
 - (3) 上記判別式の系統的な導出法は存在するか、
- である。これらについて以下で考察する。

また、実現上の問題として、標本化の方法が挙げられるが以下の理由から平行な等間隔走査線群により標本化を行う場合について考察する。

- ①既存の図面入力装置との整合性が良い。
- ②逐次処理により、小型装置での大型図面の処理が可能となる。
- ③数学的解析が容易である。

2.2 処理概要と用語

図1に4本の走査線 $L_1 \sim L_4$ による2次曲線の標本化の状況を示す。走査線に平行にx軸を持つ第1象限の座標系を設定する。なお、無心2次曲線である放物線の場合は必要に応じて走査線の方向を変えて、各走査線上に2個の交点が得られるように設定するものとする。このとき各走査線と図形との交点を標本点と呼ぶ。ここで、図形処理の2次元性あるいは図面上の近接図形の存在に対処するために標本点間の連結性の確認が不可欠となる。すなわち、当然のことであるが、図形の判別処理に用いる複数個の標本点は全て同一曲線上に存在するものでなければならない。そのため、図形素片の概念を省くことができない。曲線追跡処理等で互いに同一図形上で連結していることが保証された標本点、すなわち、走査線群

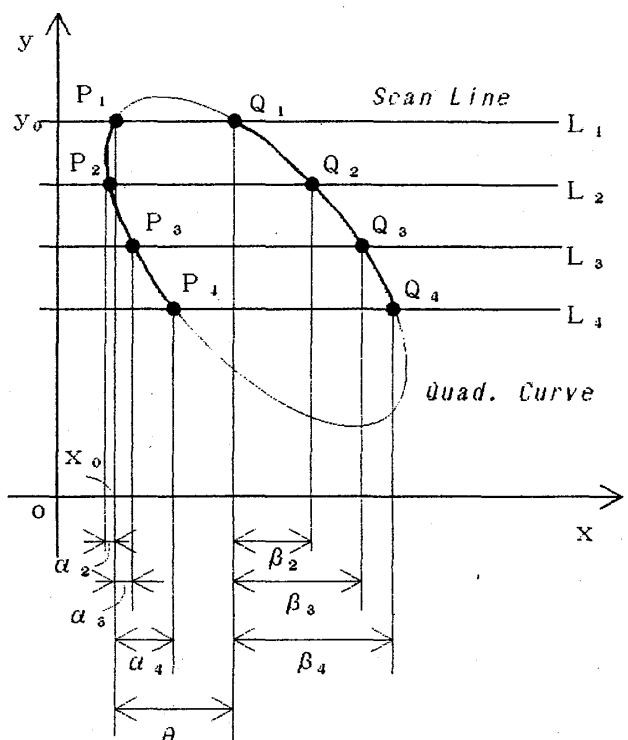


Fig.1 Symbols used in the Segment Pair Matching method

で切り取られる図形の一部を図形素片（あるいは、単に素片）とよぶ。また、 n 個の標本点を含む素片を n 点素片とよぶ。図1の例では P_i 、 Q_i ($i=1\sim 4$)が標本点であり、 P_i を含む P 素片、 Q_i を含む Q 素片はそれぞれ4点素片である。また、走査線間隔を l とするとき n 本の走査線群に対して $(n-1)l$ を走査線群幅と呼び物理的なフィルタの目の粗さとして機能する。なお、以下で行う2点素片、3点素片の議論においては図1に示すサフィックス i について1~2、1~3の範囲をそれぞれ考えるものとする。

また、対を成す相手の素片を探す探索方向に関して、探索範囲が同一走査線群内の場合を主走査方向、隣接する走査線群内の場合を副走査線方向と呼ぶものとする。

2.3 標本点数

点と曲線の問題については古くから多く研究されている。空間的に疎にばらまかれた離散点列の間を滑らかな曲線で結ぶ問題は“曲線の創成”問題であり、密な連結点列を与えられた許容誤差内で曲線表現する問題は“曲線近似”問題として扱われてきた。これらの研究の立場は与えられた点列を基準として、与えられた条件を満足する曲線を求める“曲線の表現”に関するものである。これに対して、本研究は全く逆の観点に立つものであり、検出対象として与えられる曲線を構成し得る標本点の組、すなわち素片を、図面上の多数の素片の中から選び出すものである。したがって、多数の素片の中から目的の曲線上にある素片を選び出す基準となる素片の抽出条件を定式化することが最も基本的な問題となる。

さて、2次曲線は一般に次のように表現される。

$$F(x, y) = ax^2 + 2hxy + by^2 + 2gx + 2fy + c = 0 \quad (1)$$

(1)式は6個の係数を含んでいるが曲線の性質は係数の比のみで決まるので独立した5個（係数の個数-1）の条件を指定すれば一般2次曲線は決定されることになる。特に、円に対しては、 $a=b$ 、 $h=0$ であり3個の条件、さらに、直線については $a=b=h=0$ であるから2個の条件で決定されることになる。このことから、標本点の個数が図形記述関数の係数の個数より2個以上少ない場合は係数比は未定であり曲線を定めることはできない。係数の個数より丁度1個少ない場合には任意に与えた標本点に対して、一般に1個の曲線が定まる。すなわち、標本点の分布に対する制約条件はない。しかし、標本点の個数が係数の個数以上であれば、標本点の分布が“特定の条件”を満足しないかぎり、一般にはそれらの標本点の全てを通る曲線は存在し得ないことになる。

しかるに、検出対象曲線が図面上に存在すればその曲線上の点は全て上記の“特定の条件”を満足するが、他の図形は一般には満足しないはずである。したがって、“特定の条件”を満足する標本点の組（素片）を抽出すれば、必ず、検出対象曲線上の素片はその中に含まれていることになる。これが本方式の数学的な根拠である。

したがって、上記の“特定の条件”が必要となるための条件から所要の標本点数は図形記述関数の係数の個数以上でなければならないことが分かる。一方、図1で述べたように標本化するものとするれば、標本点を P 素片と Q 素片の2個の素片で分担することになる。その結果、一般2次曲線の検出には3点素片、円の検出には2点素片、直線の検出には1.5点素片（現実には2点素片）が最低必要となることが分かる。

2.4 素片対照合条件

2.3節で述べたように2個の素片上に分散した標本点为满足すべき拘束条件の定式化が必要となるが、実際の処理の手順を考えると、各素片上に含まれる標本点毎に、2つの標本点群の間の関係として捉える方が都合が良い。

すなわち、1つの素片に着目したとき、その中に含まれる標本点の分布から残りの標本点の分布に対する必要条件、つまり、相手素片が満足すべき条件が導出できることが望ましい。この意味で2つの素片が対をなす条件を素片対照合条件とよぶ。

素片対照合条件は標本点が検出対象曲線上に存在するための条件、すなわち、標本点を通る曲線が存在し得るために満足すべき標本点の分布に関する拘束条件として以下のようにして求められる。

図1で、標本点 P_i 、 Q_i の座標をそれぞれ (x_{pi}, y_{pi}) 、 (x_{qi}, y_{qi}) とし、標本点の設定条件を考慮して次式の関係式を置く。

$$\begin{aligned} x_0 &= x_{pl}, \quad y_0 = y_{pl} \\ y_{pi} &= y_{qi} = y_0 - (i-1)l, \end{aligned} \quad (2)$$

$$x_{pi} = x_0 + \alpha_i,$$

$$x_{qi} = x_0 + \theta + \beta_i,$$

つまり、

$$\alpha_i = x_{pi} - x_{pl}, \quad \alpha_1 = 0,$$

$$\beta_i = x_{qi} - x_{ql}, \quad \beta_1 = 0,$$

$$\theta = x_{ql} - x_{pl},$$

ここで、 ℓ は走査線間隔である。

なお、標本点は互いに完全に分離している場合を考察の対象にすることとし、

$$\begin{aligned} \theta &\neq 0 \\ \alpha_i &\neq \theta + \beta_i \end{aligned} \quad (3)$$

とする。

[1] 2点素片 ($i=1\sim 2$) の場合

素片対として4個の標本点を用いる場合であるが、(1)式の一般の2次曲線に対しては係数は不定であり、標本点に関する照合条件も求まらない。2次曲線が特に円である場合には、(2)式 ($i=1, 2$) を(1)式に代入し、 $a=b, h=0$ とおくことにより、

$$(\alpha_2 + \beta_2)\{\theta - (\alpha_2 - \beta_2)\} = 0 \quad (4)$$

が得られ、(3)式を考慮して結局、

$$\beta_2 = -\alpha_2 \quad (5)$$

を、照合条件として得る。(5)式は円の中心対称性からも明らかな結果である。

[2] 3点素片 ($i=1\sim 3$) の場合

(2)式 ($i=1, 2, 3$) を(1)式に代入すると a, b に関する次の連立1次方程式を得る。

$$\begin{aligned} a\{(\theta - \alpha_3)(2\alpha_2 - \alpha_3) \\ + 2\beta_2(\alpha_2 - \alpha_3)\} + 2l^2b = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} a\{(\theta + \beta_3)(\beta_3 - 2\beta_2) \\ + 2\alpha_2(\beta_2 - \beta_3)\} + 2l^2b = 0 \end{aligned}$$

(6)式が a, b が共に0でない解を持つための条件、すなわち、6個の標本点を通る2次曲線が存在するための条件を求めると、

$$\begin{aligned} \{2(\alpha_2 + \beta_2) - (\alpha_3 \\ + \beta_3)\}\{\theta - (\alpha_3 - \beta_3)\} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

が得られる。 $\theta \neq \alpha_3 - \beta_3$ だから

$$\alpha_3 + \beta_3 = 2(\alpha_2 + \beta_2)$$

となり、次式の照合条件を得る。

$$\beta_3 - 2\beta_2 = -(\alpha_3 - 2\alpha_2) \quad (8)$$

また、このとき、

$$h = a(\alpha_2 + \beta_2)/2\ell \quad (9)$$

が成立する。

2次曲線が円の場合は、 $h=0$ であるから(9)式より、

$$\beta_2 = -\alpha_2, \quad (10)$$

かつ、(8)より、

$$\beta_3 = -\alpha_3, \quad (11)$$

が照合条件として得られる。

[3] 4点素片 ($i=1\sim 4$) の場合^(m)

3点素片の場合と同様にして一般2次曲線に対する照合条件として次式を得る。

$$\beta_3 - 2\beta_2 = -(\alpha_3 - 2\alpha_2) \quad (12)$$

$$\beta_4 - 3\beta_2 = -(\alpha_4 - 3\alpha_2) \quad (13)$$

2次曲線が円の場合は(10)、(11)式に加え、

$$\beta_4 = -\alpha_4 \quad (14)$$

を得る。

[4] 複合2点素片による直線検出

直線検出用の照合条件が副走査線方向への素片対の照合条件として求められる。図2を複合2点素片と考えると(1)式で $a=b=h=0$ として、(2)式の標本点 $P_1\sim P_4$ を代入すると、 g, f に関する連立方程式

$$\alpha_2 g - \ell f = 0$$

$$\alpha_3 g - 2\ell f = 0 \quad (15)$$

$$\alpha_4 g - 3\ell f = 0$$

が得られ、共に0でない解を持つための条件から、

$$\alpha_3 = 2\alpha_2$$

$$\alpha_4 = 3\alpha_2$$

(16)

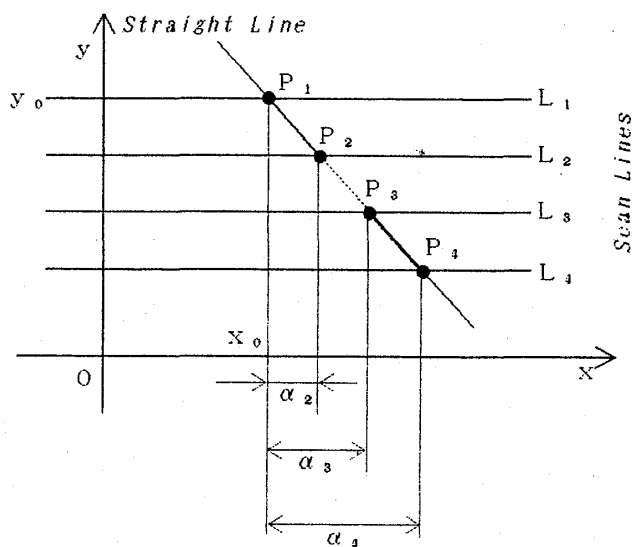


Fig.2 Straight line detection

が直線の照合条件として得られる。この結果は直感的に理解できる条件と一致する。

以上で求めた照合条件を表1にまとめて示す。なお、本節では定量的な素片属性値で表現される照合条件を導出したが、素片の凹凸といった定性的な照合条件を設定することも、また、図形記述関数の係数を照合条件とすることも可能である。

2.5 シミュレーション結果

楕円、双曲線を対象に照合条件(12)、(13)式の成否の確認を目的に行ったシミュレーション結果を表2に示す。すなわち、図1に示す座標系上に2次曲線を関数として

発生させ、走査線群との交点を計算により求め照合条件の成立精度 ϵ を評価した。

$$\begin{aligned} \epsilon_3 &= (\beta_3 - 2\beta_2) + (\alpha_3 - 2\alpha_2) \\ \epsilon_4 &= (\beta_4 - 3\beta_2) + (\alpha_4 - 3\alpha_2) \end{aligned} \tag{17}$$

なお、同表で位置 y_0 は走査線群の位置を表す。また、実数値処理、整数値処理とは標本点の座標値を実数として扱った場合と、四捨五入により整数化した場合を表している。実数値処理の結果より上記の照合条件が数学的に成立することが分かる。また、デジタル画像処理では一般的である標本点座標値の整数値処理に対しても十分な精度で成立することがわかり、照合条件として有効であることが確認できる。

Table 2. Feasibility estimation of pair matching conditions for segments

Ellipse ($x^2/100^2 + y^2/50^2 = 1$) is rotated at 30 degrees					Hyperbola ($x^2/100^2 - y^2/50^2 = 1$) is rotated at 45 degrees				
y_0	ϵ_3		ϵ_4		y_0	ϵ_3		ϵ_4	
	real	int.	real	int.		real	int.	real	int.
55	0.0	-1	0.0	-1	175	0.0	-1	0.0	-1
45	0.0	2	0.0	3	165	0.0	-1	0.0	-1
35	0.0	1	0.0	3	155	0.0	1	0.0	2
25	0.0	-1	0.0	-3	145	0.0	1	0.0	2
15	0.0	1	0.0	0	135	0.0	0	0.0	-1
5	0.0	-1	0.0	-1	125	0.0	0	0.0	0

- y_0 : position of the first scan line
- $l = 20$: interval between scan lines
- $\epsilon_3 = (\beta_3 - 2\beta_2) + (\alpha_3 - 2\alpha_2)$
- $\epsilon_4 = (\beta_4 - 3\beta_2) + (\alpha_4 - 3\alpha_2)$

Table 1. Pair matching conditions for segments

Figure	search direction	pair matching conditions for segments			note	
		2-points seg.	3-points seg.	4-points seg.		
straight line	sub-direc.	• $\alpha_4 = \alpha_2$ *	• $\alpha_3 = 2\alpha_2$	• $\alpha_3 = 2\alpha_2$ • $\alpha_4 = 3\alpha_2$	In Fig.2, P_2 is not connected with P_3 .	
quad. curve	circle	main-direc.	• $\beta_2 = -\alpha_2$	• $\beta_2 = -\alpha_2$ • $\beta_3 = -\alpha_3$	• $\beta_2 = -\alpha_2$ • $\beta_3 = -\alpha_3$ • $\beta_4 = -\alpha_4$	
	ellipse			- *	• $(\beta_3 - 2\beta_2) = -(\alpha_3 - 2\alpha_2)$ • $(\beta_4 - 3\beta_2) = -(\alpha_4 - 3\alpha_2)$	2-points segment is not available.
	hyperbola					
	parabola					

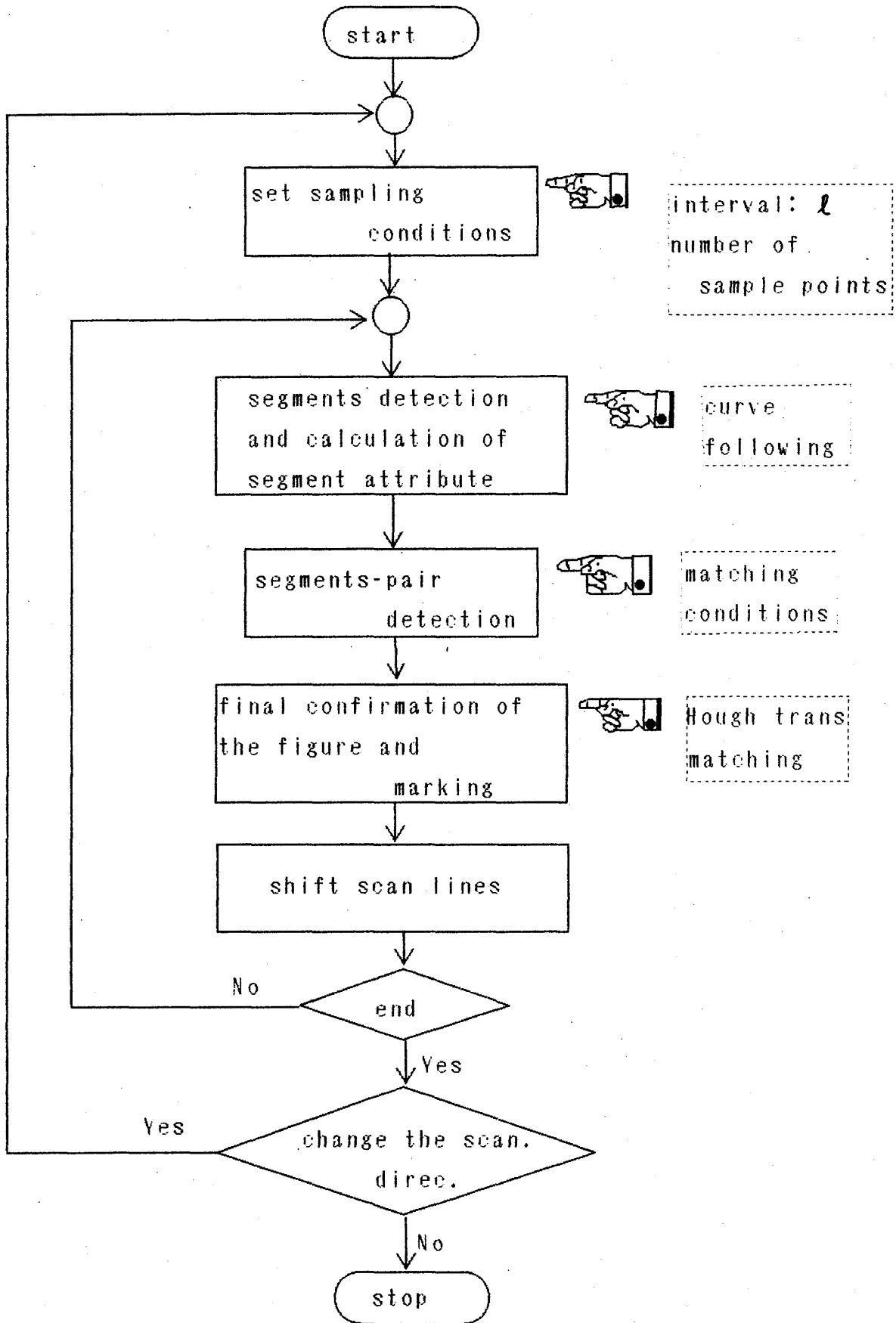


Fig.3 Flow chart of the SPM method

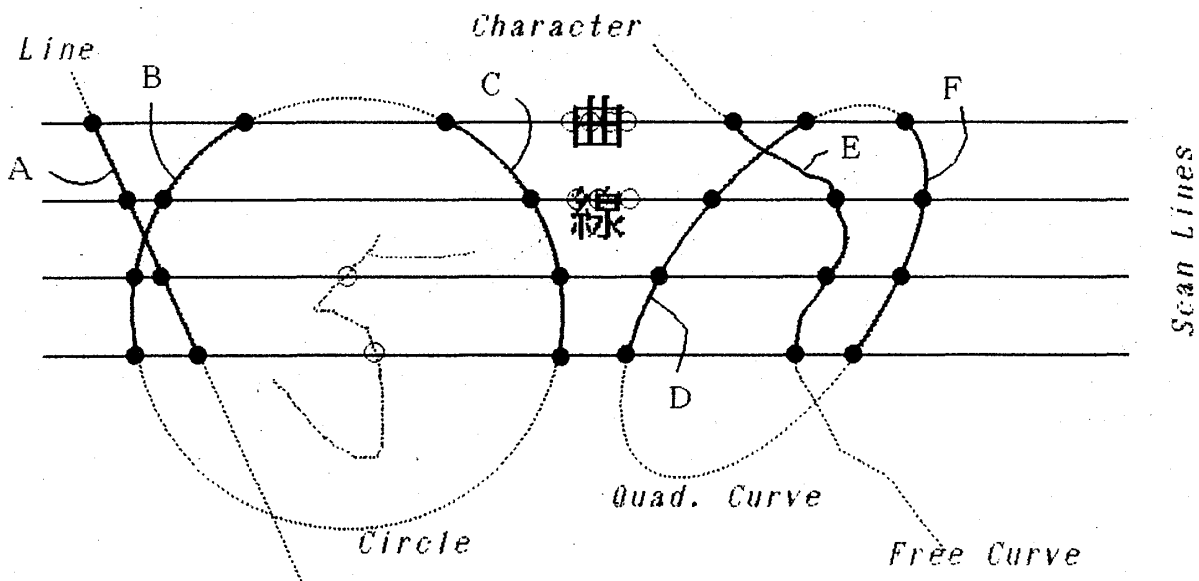


Fig.4 Sample drawing

3. 処理の流れ

前章までに述べてきたように、本曲線検出手法は図面上の図形群を図形素片の集合に変換し、図形素片に含まれる標本点の座標値から素片の属性値 $\{\alpha_i \mid i=1 \sim n\}$ を各素片毎に求める。その後、素片の属性値に対する照合条件を論理的なフィルタとして検出対象図形を構成する素片を抽出してゆくものである。照合条件はあくまで標本点が満足すべき必要条件であるので抽出された標本点を通る図形が真の目的図形であるか否かの確認はテンプレートマッチングやHough変換等の方法で行うことが必要である。ただし、照合条件により絞り込まれた後の図形であるから処理時間の大幅な短縮が期待される。

図3に処理の流れ図を示す。図4を例に処理の流れを述べる。

[Step 1] サンプリング条件の設定

検出すべき曲線に応じて必要な最大の走査線数を求め、走査線間隔 l とともに走査線群を設定する。このとき、走査線群幅を文字、記号等より大きく設定することにより物理的に文字・記号が分離される。なお、走査線群幅内の図形線の追跡処理を行うので大きすぎると処理時間が増大する。

以下、4点素片の場合について説明する。

[Step 2] 図形素片の確認と属性値の算出

走査線群と図形線との交点について交点間の連結性を検証し図形素片を得る。各素片について属性値 $\{\alpha_i \mid i=1 \sim 4\}$ を求め、素片に対応付けて記憶する。図4で、走査線群幅より短い曲線や文字については処理対象の素片としては抽出されない。

[Step 3] 素片対の検出

図形素片毎に求めた属性値に対して、表1に示した素片対照合条件の成否を調べ、図形種別毎に素片対を検出する。このとき、照合条件の成立の判定には、図面の汚れ、カスレ、線幅のゆらぎ等に基づく誤差を考慮して適切な許容誤差を持たせることが必要である。図4では素片BとC、DとFがそれぞれ円と一般2次曲線に対する照合条件を満足する素片対として検出される。

[Step 4] 図形の確認とマーキング

対を成す2つの素片を通る曲線を曲線追跡し、その2つの素片が同一曲線上にあることを確認する。確認を終えた曲線についてテンプレートマッチングやHough変換等を適用して検出対象曲線であることの最終的な確認を行なう。なお、検出された曲線にはマークを付けることにより再度検出処理の対象にされないように区別する。図4で、素片BとC、DとFが同一曲線上にあることが検証される。その後、各曲線上の8個の標本点を基に図形記述関数の係数を決定し、目的曲線であることを確認する。

[Step 5] 走査線群の移動

1つの走査線群に対する検出処理が終ると所定のきざみで走査線群を移動して上記の処理を図面の終わりまで繰り返す。このとき、1つの図形に複数回、走査線群がかかるように移動の刻みを設定すれば、処理時間の増大の見返りとして検出漏れの割合を減らすことができる。

[Step 6] 走査方向の変更

本方法では走査線方向に平行な直線は原理的に検出不可である。また、無心2次曲線である放物線も傾きに

よっては不可能となる。これらの図形の検出と他の曲線の検出精度の向上の目的で、必要に応じて、走査線方向を90度変えて上記のStep 1～Step 5を繰り返す。

4. むすび

本論文では図形素片解析に基づく曲線の検出法について考察した。その結果、関数記述可能な図形では、その上にある図形素片の位置・形状は一定の制約条件を満足しなければならないことを基本的な立脚点として、直線、2次曲線を対象に以下の点を明らかにした。

- (1) 本方法は図形記述関数に標本点座標値を代入して得られる、係数を未知数とする連立1次方程式の解の存在判定問題に帰着すること、
- (2) 上記の連立1次方程式の解の存在条件として照合条件が系統的に導出できること、
- (3) 平行で等間隔な直線群と2次曲線の交点の座標値の間には簡潔な関係式が存在し、素片対照合条件として利用できること。具体的には一般2次曲線に対する(12)、(13)式は、著者が知る限り、本研究の中で初めて導かれた解析幾何学における関係式である。
- (4) 本検出処理に要する走査線群内の走査線の本数は図形記述関数の係数の個数の $1/2$ 以上あれば充分であること。

以上、標本点座標値の簡単な演算で図面の基本的な構成要素である直線や各種2次曲線が検出可能であることを示した。また、この方法は、より高次の曲線や半円等の組合せ図形についても応用が可能である⁽⁹⁾。

本論文では理論的な解析を中心に曲線の検出条件を明らかにした。今後は実際の図面を対象にした実験により各種パラメータの最適値を求めてゆく予定である。

謝辞

本研究のきっかけとなった直線、円の検出法の検討に際して御協力頂いたNTT情報通信処理研究所の河田悦生主任研究員に深謝する。また、御助言、御指導を頂いた本学情報処理工学科の池上淳一教授に感謝する。

文献

- (1) 中嶋, 安居院, 吉井, 今井: “地図・図面入力技術動向”, 信学技報, IE88-37 (1988)
- (2) E.R.DAVIES: “Finding ellipses using the generalised Hough transform”, Pattern Recognition Letters, 9, pp.87-96 (1989)
- (3) 松山, 興水: “Hough変換とパターンマッチング”, 情報処理, Vol.30, No.9, pp.1035-1046 (1989)
- (4) 大和, 大橋, 石井, 牧野: “中点図形を用いる円検出アルゴリズム”, 信学技報, PRU88-49 (1988)
- (5) 大和, 入澤, 石井, 牧野: “重み付け中点図形を用いた楕円抽出アルゴリズム”, 信学論(D-II), J72-D-II, 7, pp.1009-1016 (1989)
- (6) 森, 河田: 順次処理による図形要素の抽出, 信学技法, IE82-63 (1982)
- (7) 森, 池上: “素片対照合法による2次曲線の検出”, 平成元年度電気関係学会中国連大, 102312 (1989)
- (8) 森, 河田, 池上: 標本化処理による円の決定に関する検討, 情報処理論文, Vol.30, No.2 (1989)
- (9) M.OKUDAIRA, E.KAWADA, K.MORI, Y.SUENAGA: “IMAGE RECOGNITION AND DISPLAY-BASED INTERACTIVE PROCESSING FOR PLANT-RECORD DRAWING DATA BASE”, GLOBECOM '85 (1985)