

Comparison of the Influences of Calculation Error and the Preventive Measures on Two Methods to Discern Intersection

TADAMITSU KANEKO*, TOSHINORI TSUJI*, TOSHIHIRO KAWANO**,
MASAHARU TOSU***, and YASUO NAKAYAMA****

* Faculty of Humanities, Miyazaki Municipal University, 1-1-2
Miyazaki-shi, 880 Japan

** Department of Electrical Engineering, Kitakyusyu College of Technology,
Kitakyusyu-shi, 803 Japan

*** Fujitsu Kyushu System Engineering Ltd., Fukuoka-shi, 812 Japan

**** Faculty of Commercial Sciences, Kumamoto Gakuen University,
Kumamoto-shi, 862 Japan

Abstract

Two important kinds of calculation methods to discern intersection of two-dimensional line segments are theoretically and experimentally compared each other concerning the influence of calculation error: one is that using the position of the intersection of straight lines, and the other is that using the mutual relation of position between one line segment and endpoints of another. The result shows that it is possible in the former that topological inconsistency is caused by calculation error when line segments approach each other, but little in the latter. Hence the latter seems to be superior in the measures against calculation error.

二つの交差判定方式における計算誤差の影響と対策の比較

金子 正光 辻 利則 河野 俊弘 鳥巢 正治 中山 泰雄

1. まえがき

図形処理を行う際、計算誤差（以下、誤差と呼ぶ）が原因となって処理が破綻してしまうことがあるため、従来から様々な対策が提案されてきた。最近では、誤差のためにトポロジーに矛盾が発生することに注目して、ポイントを駆使しトポロジーに矛盾のないデータ構造を生成する方式⁽¹⁾や数値計算よりトポロジーの無矛盾性を優先させたボロノイ図の構成法^{(2), (3)}などが報告されている。その他にも、基礎的な計量データを厳選し桁数を必要精度まで増やすことによって矛盾を発生させない方式⁽⁴⁾などが提案されている。これらの報告では、矛盾を発生させないための新方式の提案、あるいは矛盾を含んだデータを使わないための工夫に重点がおかれている。

これとは別に、図形相互間の交差判定において、従来の計算方式の中から誤差の影響を受けにくいものを選び、必要ならこれを改良することも誤差対策において重要であると思われる。その理由は以下のとおりである。いくつかの報告^{(5), (6)}が指摘するように、トポロジーにおける矛盾の発生は適正な交点数が得られないことが原因であるが、それは誤差による交差判定の誤りから生ずる。ところがこれらの報告では、この誤差判定の問題が従来の交差判定処理一般の問題として扱われており、個々の方式の問題については触れられてない。また、交差判定方式の改善については若干の報告⁽⁷⁾が見られるが、特定の計算方式に限定されている。以上のことから、著者らは、交差判定における一般的な計算方式のそれぞれに対して誤差の影響を詳しく検討し、比較することが必要であると考え⁽⁸⁾。

本論文では、2次元の線分同士の交差判定で主に使われる二種類の計算方式を、トポロジーにおける矛盾の発生の可能性と予防策に関して比較するとともに、両者の相違点を実験によって確認する。それらの方式の一つは、線分を直線とみなして交点を求め、その位置を吟味して交差の有無を判定する方式であり、もう一つは、一方の線分の二つの端点と他方の線分との相互位置関係から交差の有無を判定する方式である⁽⁹⁾。これらをそれぞれ、交点位置を利用する方式、および相互位置関係を利用する方式と呼ぶことにする。

以下、2.では両方式の概要を述べ、3.では誤差の影響が顕著な配置に対して検討を行い両者を比較する。更に4.で両者の主な相違点を実験によって確認する。

2. 交差判定処理の概要

本章の記述は主に文献(7)に従う。まず点と線分との位置関係を表す関数を導入し、その後それぞれの方式を概説する。なお、線分の長さが0のときは、交差判定の必要がないので処理の対象外とする。

2.1 点と線分との位置関係

図1に示すように、点 $P(x, y)$ と線分 $\overline{A_1A_2}$ が与えられているとする。ここでベクトル $\overline{A_1A_2}$ を e_A と表し、点 P と e_A との位置関係を表す関数

$$f(e_A, P) = a_A x + b_A y + c_A \quad (1)$$

を導入する。ここに

$$\begin{aligned} a_A &= y_{A1} - y_{A2} \\ b_A &= x_{A2} - x_{A1} \\ c_A &= x_{A1}y_{A2} - x_{A2}y_{A1} \end{aligned} \quad (2)$$

である。関数 $f(e_A, P)$ は、ベクトル $\overline{A_1A_2}$ と $\overline{A_1P}$ の外積の大きさに等しく、その符号は $\overline{A_1A_2}$ と $\overline{A_1P}$ と同

じ向きになるまで反時計回りに回転するときの角度 θ の正弦の符号と等しい。

$\overrightarrow{A_1A_2}$ の進行方向に向かって左側の半平面を正領域、右側の半平面を負領域と呼ぶと、

$$f(e_A, P) \begin{cases} > 0: \text{点} P \text{は正領域にある} \\ = 0: \text{点} P \text{は} e_A \text{を含む直線上} \\ < 0: \text{点} P \text{は負領域にある} \end{cases} \quad (3)$$

である。

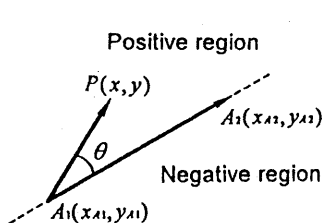


図1 点と線分との位置関係

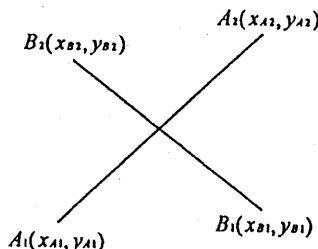


図2 二本の線分

2.2 交点位置を利用する方式

図2に示すように、二つの線分 $\overline{A_1A_2}$ および $\overline{B_1B_2}$ が端点の座標によって与えられているものとする。 A_1, A_2 を通る直線と B_1, B_2 を通る直線の交点の位置は、それぞれの直線の媒介変数 t_A および t_B を用いて次のように表すことができる。

$$t_A = \frac{f(e_B, A_1)}{f(e_B, A_1) - f(e_B, A_2)} \quad (4)$$

$$t_B = \frac{f(e_A, B_1)}{f(e_A, B_1) - f(e_A, B_2)} \quad (5)$$

但し e_A はベクトル $\overrightarrow{A_1A_2}$ を、 e_B はベクトル $\overrightarrow{B_1B_2}$ を意味する。また、 t_A は A_1 から交点までの距離と線分 $\overline{A_1A_2}$ の長さの比を示し、 t_B についても同様である。二つの線分が交差するのは、

$$0 < t_A < 1 \quad (6)$$

$$0 < t_B < 1 \quad (7)$$

が同時に満たされるときである。ここで式(4)と(5)の分母の絶対値は常に等しく、その値が0のときは、二つの線分は平行である。更にこの時、両者が重なるなら交差判定は不可能である(図3(a)参照)。 t_A, t_B が0または1のときは図3(b)の配置となり、 t_A, t_B の一方が0または1で他方が0から1の間の値をとるときは同図(c)の配置となるが、それらのときも交差判定は不可能である。図3に示す重なり配置は退化と呼ばれる⁽²⁾。上記のいずれにも該当しない場合は、二つの線分は交差しない。

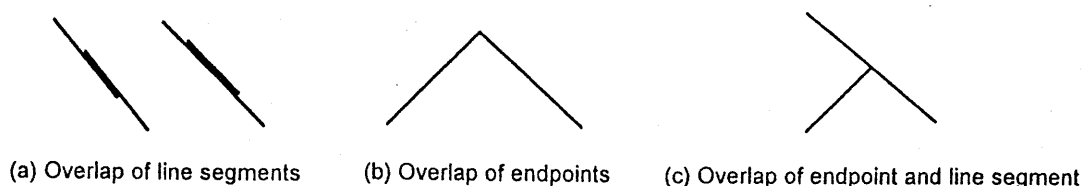


図3 退化の例

2.3 相互位置関係を利用する方式

図2で与えられた二つの線分が交差するのは、次の二つの式が同時に満足されるときに限られる。

$$f(e_B, A_1) \cdot f(e_B, A_2) < 0 \quad (8)$$

$$f(e_A, B_1) \cdot f(e_A, B_2) < 0 \quad (9)$$

但し、一方の線分の端点他方の線分上にある場合は退化が生じており、交差判定は不可能である。上記のいずれにも該当しない場合は、二線分は交差しない。

2.4 退化が生じた場合の対応

退化が生じた場合は交差判定が不可能であり、このような例外的な場合の対応策として、例えば、当該の線分につながる他の線分を考慮することによって交差の有無を判定することも考えられる(図4参照)。しかしこの例外処理は、線分の様々な配置の可能性を考慮すると非常に複雑なアルゴリズムになるので、普通は次のような退化回避策がとられる。それは、一方の図形を相対的に微量移動し退化を生じない配置に変えて交差判定をやり直す、というものである。この移動の際、以下のことに注意する必要がある。一般に、図形は複数の連結された線分から構成されているので、退化の生じた線分だけを移動すると図形全体の交点数が適正に計上されない。例えば図5に示すように、はじめ(a)の配置にあった二つの図形 A, B に対して、図形 B に接する A の二つの線分 a_1 と a_2 だけを移動するとすれば、(b)のようになる可能性があり、その時全体の交点数が1という誤った結果が得られる。従って(c)のように、図形 A に含まれるすべての線分を移動しなければならない。

但しこの対策には次のような欠点がある。すなわち、接近に関するしきい値が大きすぎると、本来退化していないものまで退化しているとみなされる恐れがある。また、判定のやり直しにより計算時間が増大する。

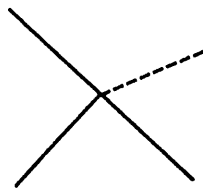


図4 退化回避策の一例

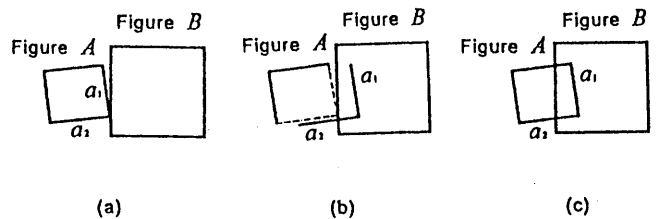


図5 通常の退化回避策

3. 誤差の影響に関する検討

交差の有無の分かれ目付近では、式(4),(5),(8),(9)のそれぞれにおいて、関数 f の少なくとも一つが0に非常に近い値を持つ。これは一方の線分の端点他方の線分に非常に接近している場合である。このとき f の符号が誤差に左右され、交差判定の結果は誤差の影響を強く受ける。また、式(4),(5)の分母の値が0に非常に近いときも、平行か否かの判定が誤差の影響を強く受け交差判定の結果もこれに依存する。これらのことから誤差の影響が顕著になるのは、図3の退化の例に非常に近い配置のときと考えられる。すなわち、平行またはほとんど平行な線分同士の接近、二線分の端点同士の接近(以後、端点-端点接近と呼ぶ)および一方の線分の端点他方の線分への接近(以後、端点-線分接近と呼ぶ)の各配置である。更に、線分が極端に短い場合にも誤差の影響が顕著になると考えられる。本章ではこれらの配置について、各方式の矛盾発生の可能性と予防策を示し、両者の比較を行う。

なお、退化が生じた場合は前述の退化回避策をとることとし、今後の検討では退化の生じる場合についてはあえて取り上げない。

3.1 端点-線分接近, 端点-端点接近

3.1.1 交点位置を利用する方式

まず端点-線分接近の場合を考える。図6に示すように、折れ線 PQR の中間の点 Q が他方の線分 \overline{AB} に非常に接近していると仮定する。ただし P と R は \overline{AB} に関して同じ領域にあり、 A, B, P および R は誤差の影響を受けない程度に Q から十分離れているものとする。交差判定処理はまず \overline{AB} と \overline{PQ} について、次に \overline{AB} と \overline{QR} について実行される。しかしそれぞれの処理は独立に行われるので、各々の処理結果を総合したときに矛盾が生じていることがある。例えば、 \overline{AB} と \overline{PQ} が交差すると判定されたとしても、 \overline{AB} と \overline{QR} とは交差しないと判定されることもあり得る。そのときは全体として交点数が1となり、トポロジーに矛盾が生じる。すなわち、“一方の図形の境界に沿って進むとき、他方の図形の境界を横切って内部へ入れば、どこかで必ず他方の図形の境界をもう一度横切って外部へ出る”というトポロジーの基本的な性質⁴⁾が満たされなくなる。端点-端点接近の場合も同様の問題が生じる。

この問題には普通次の対策が行われてきた。それは、線分同士が非常に接近する場合は退化が生じたときのみ前述の退化回避策を行う、というものである。しかしこの対策には、既に述べたような欠点がある。

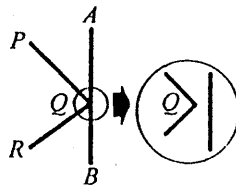


図6 端点-線分接近の例

3.1.2 相互位置関係を利用する方式

(1) 端点-線分接近の場合

再び図6の配置を考える。注目すべき場合は、 Q と \overline{AB} との位置関係を求めるときである。このとき Q が \overline{AB} の正領域、負領域のいずれに存在するかは、誤差に依存するであろう。ところが、 \overline{AB} と \overline{PQ} 、 \overline{AB} と \overline{QR} のそれぞれの交差判定処理においては、共通のルーチンとデータ（端点の座標値）が使われるのが普通である。その場合は、どちらの処理でも Q と \overline{AB} との位置関係について同じ結果が得られる。従って \overline{AB} に対して Q が P, R と同じ側にあると判定されるなら、 \overline{AB} は \overline{PQ} 、 \overline{QR} のいずれとも交差しないと判定され、全体の交点数は0となる。一方、 \overline{AB} に対して Q が P, R と反対側にあると判定されるなら、 \overline{AB} は \overline{PQ} 、 \overline{QR} のいずれとも交差すると判定され、全体の交点数は2となる。これらの交点数のいずれをとってもトポロジーに矛盾は生じない。

(2) 端点-端点接近の場合

図7に折れ線 ABC の中間の点 B と折れ線 PQR の中間の点 Q とが非常に接近している配置を示す。

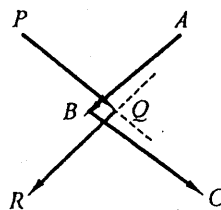


図7 端点-端点接近の例

A, C, P , および R は, B および Q から遠方にあり, 誤差の影響はないものとする. さて, 点 B の位置に注目する. そうすると B が, P と Q を通る直線および Q と R を通る直線で区切られる四つの領域のいずれに存在するかは, 誤差に依存するであろう.

ここで, 仮に B が図 8 (a) に示される位置にあると判定されたとする. そこでまず, \overline{AB} と折れ線 PQR との交差判定について考える. \overline{AB} が \overline{PQ} , \overline{QR} のいずれと交わるかは Q と \overline{AB} との位置関係に依存する. すなわち, Q が \overline{AB} の正領域にあるならば (図において \overline{AB} の場合), \overline{AB} は \overline{PQ} と交差し \overline{QR} とは交差しない. また, Q が \overline{AB} の負領域にあるならば (図において $\overline{A'B}$ の場合), 逆に, $\overline{A'B}$ は \overline{PQ} とは交差せず \overline{QR} と交差する. 従って, \overline{AB} と折れ線 PQR との交点数は Q と \overline{AB} との位置関係に依存することなく, 1 である. その位置関係は誤差に依存するが, \overline{AB} と折れ線 PQR との交点数は誤差に依存しないのである. 次に, \overline{BC} と折れ線 PQR との交点数についても, いまの議論と同じ理由で誤差に影響されず, 1 であることがわかる. 以上により, 二つの折れ線 ABC と PQR との交点数は, 誤差の影響を受けることなく, 全体で 2 となる. このときトポロジーに矛盾は生じない.

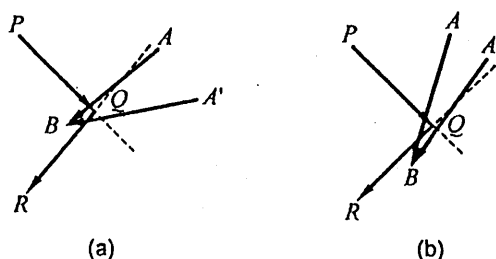


図 8 端点 B の位置に関する交差の可能性

さて, 点 B が図 8 (b) に示される位置にあると仮定しよう. このとき, \overline{AB} と折れ線 PQR との交点数は Q と \overline{AB} との位置関係に依存する. すなわち, Q が \overline{AB} の正領域にあるならば (図において \overline{AB} の場合), \overline{AB} は \overline{PQ} および \overline{QR} と交差し交点数は 2 となり, Q が \overline{AB} の負領域にあるならば (図において $\overline{A'B}$ の場合) 交点数は 0 となる. 一方, \overline{BC} と折れ線 PQR との交点数は, いまの B, C の位置では明らかに 0 である. 従って, 折れ線 ABC と折れ線 PQR との交点数は, 誤差に応じて, 全体で 0, 2 のいずれかの値をとる. いずれの交点数をとってもトポロジーに矛盾は生じない.

点 B が残りの二つの領域のいずれかにある場合も上記と同様の推論により, 誤差に依存することなく, トポロジーに矛盾を生じないような結果が得られる.

3.2 平行またはほとんど平行な線分同士の接近

3.2.1 交点位置を利用する方式

本来平行な二線分が, 平行でなくかつ交わると判定されるときは, 交点数の超過によりトポロジーに矛盾が生じる. また, 二つの線分が本来交わっている場合に, 二線分が平行と判定されたり, 交点の位置が線分の定義区間外にあるように判定されるときには交点数の不足によりトポロジーに矛盾が生じる. これらの誤判定を防ぐために, 普通は, 線分同士の接近を関数 f によって調べ, 退化とみなせるほどに接近している場合は退化回避策と同様の処理を行うことにしている.

3.2.2 相互位置関係を利用する方式

考慮中の配置では, 双方の線分の各端点が互いの相手線分を延長した直線に非常に接近している. このようなとき, 交差条件式(8), (9)が満たされたとしても, これらの式中の関数 f は, いずれも 0 に非常に近い値をとるため, 誤差によって本来とは逆の符号を持つ可能性がある. 例えば交差条件を満たす組み合わせとして,

$$f(e_B, A_1) < 0 \text{ かつ } f(e_B, A_2) > 0 \tag{10}$$

$$f(e_A, B_1) < 0 \text{ かつ } f(e_A, B_2) > 0 \quad (11)$$

を考えることができる。しかし(10)と(11)が同時に成り立つ配置を実際に描くことは不可能であり、この組み合わせではトポロジーに矛盾が生じている。このような組み合わせの発生を防ぐためには、交差の条件として(8)、(9)だけでなく更に

$$f(e_B, A_1) \cdot f(e_A, B_1) < 0 \quad (12)$$

$$f(e_B, A_2) \cdot f(e_A, B_2) < 0 \quad (13)$$

を追加する必要がある。(8)と(9)が満たされ(12)または(13)が満たされない場合はトポロジーに矛盾が生じるとして退化回避策と同様の処理を行う。

ただし、上記の対策のかわりに3.2.1項と同様の対策を行ってもよい。

3.3 線分が極端に短い場合

3.3.1 交点位置を利用する方式

線分が極端に短い場合は、式(4)および(5)の分子、分母が0に近くなるため、3.2.1項と同様の問題が生じる。これを避けるためには、図9に示すように図形全体の接続関係を保持しながら極端に短い線分を取り除くなどの対策をとる必要がある。

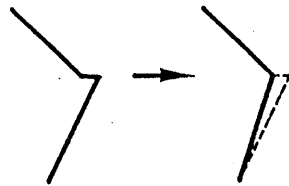


図9 極端に短い線分の対処

3.3.2 相互位置関係を利用する方式

この方式では、極端に短い線分が他方の線分に非常に接近している場合にのみ、3.2.2項と同様の誤った判定が行われる恐れがある。従って、3.2.2項または3.3.1項と同様の対策を行う必要がある。

3.4 二つの方式の比較

この章で明らかにしたことを表1にまとめた。両方式が大きく異なるのは、端点-線分接近および端点-端点接近の場合である。

表1 二つの方式の比較

図形配置	交点位置を利用する方式	相互位置関係を利用する方式
端点-線分接近 端点-端点接近	・誤差による矛盾発生の恐れあり ・対策：図形の移動後に再度判定を行う	・矛盾は発生しない ・対策：不要
平行またはほとんど平行な線分同士の接近	・誤差による矛盾発生の恐れあり ・対策：図形の移動後に再度判定を行う	・誤差による矛盾発生の恐れあり ・対策：同左または交差条件を追加する
極端に短い線分	・誤差による矛盾発生の恐れあり ・対策：極端に短い線分を削除する	・線分同士が接近したときに誤差による矛盾発生の恐れあり ・対策：同左または同上

4. 実験による比較

二つの交差判定方式が大きく異なる，端点—線分接近および端点—端点接近の場合に対して実験を行った．退化が発生したときは，退化回避策を行わずに交差判定処理を打ち切り，交点数を0とした．使用した計算機は NEC PC-9821Bs, OSはMS-DOS Ver.5.0, 言語はC (Turbo C) であり，数値計算は全て倍精度浮動小数点方式で行った．なお，交差判定処理部のプログラムサイズは，交点位置を利用する方式で約120行，相互位置関係を利用する方式で約180行である．

4.1 実験対象の図形

4.1.1 端点—線分接近の図形

図10に示すように，図形 A は，調整可能な半径を持つ円に内接する正 n 角形であり，始点 S_A と終点 E_A は x 軸上の同一位置を占める．図形 A は反時計回りの方向性を持ち， $n+1$ 個の頂点と n 本の辺からなる．

図形 B は以下のように作る．座標原点を中心とする単位円の周を，点(1,0)を基準にして $2n$ 等分に分割する．基準の点からそれぞれ反時計回りおよび時計回りで一つめの各点 (図10に示す点 P および Q) からそれぞれ x 座標が1だけ大きい位置に始点 S_B および終点 E_B を設ける．次に折れ線の中間の頂点として，円周上の点を P から反時計回りで一つおきに Q まで拾う．図形 B は $n+2$ 個の頂点と $n+1$ 本の辺からなる．

図形 A の外接円の半径は次の5段階とした．すなわち，図形 A が B に接する理論上の半径，およびそれからのずれが $\pm 10^{-16}$, $\pm 10^{-15}$ であるような半径である．このような値を用いたのは，実数の精度が16桁であることによる．図形 A の外接円の半径のそれぞれの段階に対して， n を4, 5, ..., 18とする15通りの実験対象図形を作成した．

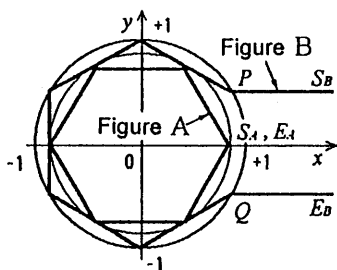


図10 端点—線分接近の実験対象図形

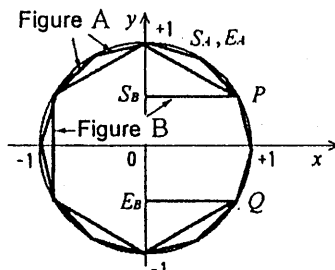


図11 端点—端点接近の実験対象図形

4.1.2 端点—端点接近の図形

図11に示すように，図形 A は，調整可能な半径を持つ円に内接する正 $2n$ 角形であるが，原点に対して反時計回りに2頂点分だけ回転させてある．回転させた理由は，その計算誤差を利用して図形 A と B の端点同士をわずかに離すためである．始点 S_A と終点 E_A は同一位置を占める．図形 A は反時計回りの方向性を持ち， $2n+1$ 個の頂点および $2n$ 本の辺からなる．

図形 B としては，前項の場合と同様の手順で用意した分割点 P および Q と同じ y 座標をもつ y 軸上の点をそれぞれ始点 S_B および終点 E_B とする．次に折れ線の中間の頂点として，単位円周上の分割点を P から反時計回りで一つおきに Q まで拾う．図形 B は $n+2$ 個の頂点と $n+1$ 本の辺からなる． S_B と E_B を図形 A の内側に配置した理由は，図形 A と B が点 P または Q を貫通して相互に交わることがないようにするためである．本章の初めに述べたように，退化が起きたときには交差判定処理を打ち切り，交点数を強制的に0とするようにしたので，上記の必要が生じた．

図形 A の外接円の半径は前項と同様の5段階とし，各段階に対して n を前と同様の4, 5, ..., 18とする15通りの実験対象図形を作成した．

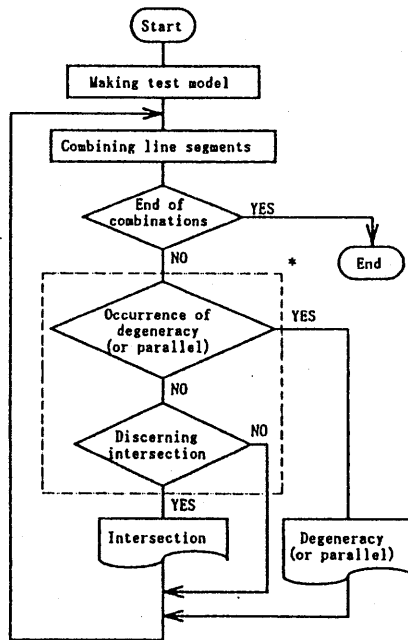


図12 交差判定の試行の流れ図

4.2 流れ図

上記の実験対象図形のそれぞれに対して交差判定を試行した。試行の流れ図を図12に示す。

4.3 実験結果による比較

図形 A と B との全ての接近箇所において、トポロジーに矛盾が生じるような判定結果が得られていないかどうかを調べた。但し、退化が生じている箇所は無視した。その結果、交点位置を利用する方式では、いくつかの接近箇所図13に示すような矛盾が生じていた。これらの箇所における交点数は、トポロジーに矛盾を生じない交点数（0または2）と1だけ異なっている。

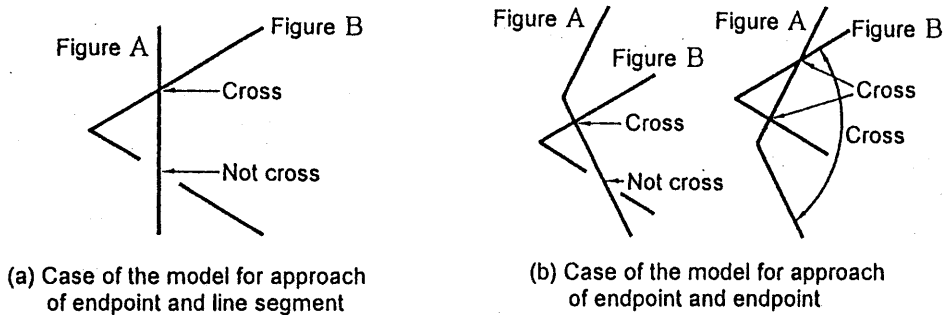


図13 トポロジーに矛盾が生じる箇所の判定状況

図形 A の外接円の半径の各段階に対して、このような矛盾が生じる箇所の出現頻度を図14に示す。縦軸は図形 A の外接円の半径を、図形 A と B が接する理論上の半径値からのずれの長さで表す。横軸は出現頻度を、矛盾が生じる箇所の総数の、接近箇所の総数（(a)の場合150, (b)の場合165）に対する比で表す。

図から明らかなように、交点位置を利用する方式では、図形 A が図形 B に理論上接するとき、若しくはその付近において矛盾が発生している。これに対し、相互位置関係を利用する方式では矛盾が全く発生していない。

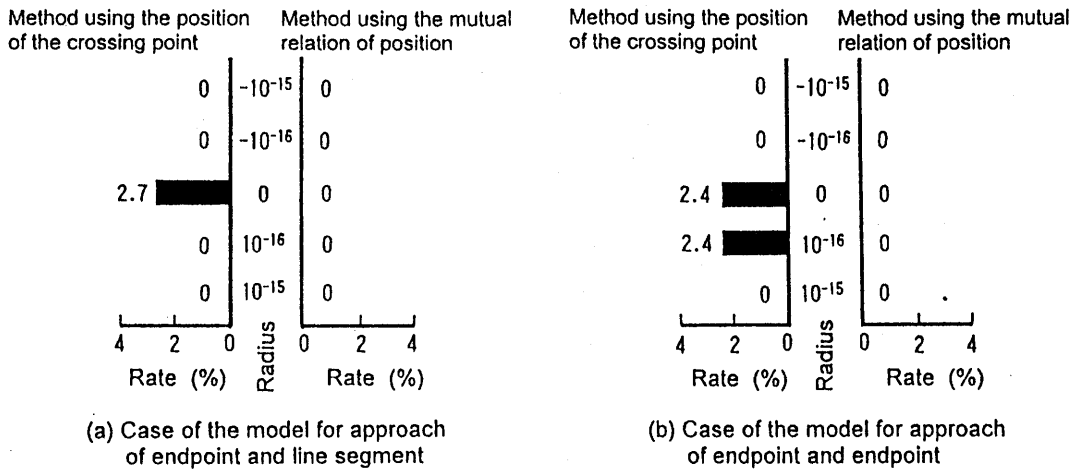


図14 トポロジーに矛盾が生じる箇所の出現頻度

4.4 異機種による実験

計算機の機種をNEC PC-9801UVに変え、ソフトウェア環境は変えずに同じ実験を行ったところ、前記と全く同じ結果が得られた。この機種での実数の精度は前と同じく16桁である。また、機種を富士通FMR-50LX、OSをMS-DOS Ver.5.10、言語をC (Microsoft C)に変えて同じ実験を行った。この機種での実数の精度は15桁であり、矛盾の発生する場所や発生箇所の個数などは4.3節に示した結果とは異なるものの、相互位置関係を利用する方式では矛盾がまったく発生しないなど同様の傾向を確認することができた。

5. むすび

2次元の線分同士の交差判定に使われる主要な二つの方式をとりあげ、誤差の影響が顕著になる配置について、トポロジーにおける矛盾の発生の可能性と対策を示し、両方式を比較した。更に両者の主な相違点を実験によって確認した。その結果、相互位置関係を利用する方式は、交点位置を利用する方式に比べてトポロジーに矛盾を生じる可能性が低く、対策を必要とする場合が少ないことが明らかになった。以上のことから、相互位置関係を利用する方式の方が計算誤差の対策上有利であると思われる。

本研究で得られた結果の有効範囲は、与えられた図形に対して交差の有無を調べる処理に限られている。従って、図形相互の交わりの有無を検査する処理などに対して相互位置関係を利用する方式を直ちに適用することができる。しかし、隠線消去、図形の集合演算、ボロノイ図の構成などの、交点が生成される処理への応用については今後検討していく必要がある。また、この方式を2次元の曲線および3次元図形に対して拡張することも今後の課題である。

謝 辞

本研究を進めるに当たり御援助頂いた(株)富士通九州システムエンジニアリング井上和取締役部長, 同社東京事業所川田敏郎所長, 同社鏡山英二社員, および本稿の取りまとめに御尽力頂いた熊本工業大学賛田寛教授に深謝する。なお, 本研究費の一部は宮崎学術振興財団助成金により行われたものである。ここに記して, 謝意を示す。

参考文献

- (1)大沢 晃: 計算誤差による暴走のない図形演算アルゴリズム: スペースモデルによる実現, 情処学論, 31,1, pp.42-55(1990-01).
- (2)伊理正夫, 杉原厚吉: 計算誤差を考慮した幾何学的アルゴリズム, 情報処理学会アルゴリズム研究会報告, 1-1 (1988).
- (3)稲垣宏, 杉原厚吉, 杉江 昇: 3次元ボロノイ図構成のための数値的に安定な逐次添加法, 情処学論, 35,1, pp.1-10(1994-01).
- (4)杉原厚吉, 伊理正夫: 計算誤差による暴走の心配のないソリッドモデラの提案, 情処学論, 28,9, pp.962-974 (1987-09).
- (5)金沢裕治, 杉原厚吉: 計算誤差があっても破綻しない線分交点列挙アルゴリズム, 情報処理学会第39回全国大会, 3L-3(1989).
- (6)河野俊弘, 金子正光, 辻 利則, 鳥巢正治, 中山泰雄: 計算誤差対策の立場からの交差判定方式の比較, 信学技報, IE94-40(1994-07).
- (7)中前栄八郎, 西田友是: 3次元コンピュータグラフィックス, pp.64-67, 昭晃堂 (1986).

所属・氏名

金子 正光	辻 利則	(宮崎公立大学)
河野 俊弘		(北九州高専・非常勤講師)
鳥巢 正治		(株富士通九州システムエンジニアリング)
中山 泰雄		(熊本学園大学)

