



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ソリッドモデルからの可視面分抽出による高速面画作成
Author(s)	川上, 敬; 沢井, 秀; 嘉数, 侑昇
Citation	北海道大學工学部研究報告, 159, 1-9
Issue Date	1992-05-27
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42312
Type	departmental bulletin paper
File Information	159_1-10.pdf



ソリッドモデルからの可視面分抽出による高速面画作成

川上 敬¹⁾ 沢井 秀²⁾ 嘉数 侑昇³⁾

(平成 3 年 12 月 27 日受理)

A High-speed Generation of Shaded Pictures by Extracting the Visible Boundary Faces from the CSG Model

Takashi KAWAKAMI, Suguru SAWAI and Yukinori KAKAZU

(Received December 27, 1991)

Abstract

This paper proposes a new approach to high-speed generation of shaded pictures from a given 3-dimensional constructive solid geometry (CSG) model. The proposed approach consists of the following procedures ; Namely, (1) generating the 3- dimensional boundary data which includes a set of edges and surfaces information, (2) making a set of data of 2-dimensional perspective edges which includes only visible lines from the given boundary data and calculating a set of countour lines from given CSG data, (3) translating the data of 2-dimensional data into an undirected graph and partitioning the noted whole 2- dimensional domain to a set of visible faces by the identified set of edges of the graph, and then (4) applying a smooth shading technique to each of the extracted visible faces. Some computer experiments are carried out which show the usefulness of the proposed approach.

1. はじめに

周知のごとく、CADの分野では、形状モデリング時における対話特性からみて形状処理の高速性が要求される。特に意匠設計などの場合において、その処理に多量の計算時間を要している面画 (Shaded Picture) の作成に関して、その高速処理への期待は大きいものがある。

この問題に対して最近では、ハードウェアの発達によりかなりの高速性を持った製品が実用化されている。ここでこれら面画作成問題を再考慮してみると、形状情報のうち与えられた視線方向から可視となる部分の面分情報を取り出し、処理を行う事により面画作成等の高速化処理を実現する可能性がある。特に、計算機内部に形状を定義する為の形状モデリングの一方法として広く用いられている CSG (Constructive Solid Geometry) モデルは、3次元形状情報を完備し、加えてデータの入力に関して多くの利点を備えている反面、形状の表面や境界の情報が陽には表現されていない為、前述の可視面に関するアプローチはあまり行われていないように思われる。

1) 北海道女子短期大学 経営情報学科

2) ソニー株式会社

3) 精密工学科 精密機器学第一講座

そこで本研究では、以上のような期待に応えるべく、CSG モデルに対して可視面の認識を行い、コンピュータ・グラフィックに適したデータであり、かつ他のアプリケーションへの適用も期待される、可視面分を抽出、分割するアルゴリズムを提案する。また、本アルゴリズムに基づき高速面画出力を行うシステムの開発を行いその有用性を考察する。

ただし本研究では、3次元形状モデラーとして TIPS-1¹⁾を用い3次元形状を構成するプリミティブは、平面と2次元曲面により表現されるプリミティブ(円柱、円錐、球)に限定する。

2. アルゴリズムの概要

本アルゴリズムの発想としては、ソリッドな形状において、ある視線をあたえた時に可視となる面分を認識、抽出する事を考えると、これは、3次元におけるソリッドの認識問題というよりもある視点から見える2次元図形の領域分割問題として考えたほうがより理解し易い。このような観点から本問題をとらえた場合、処理を行う為にソリッド形状から取り出す必要がある情報には、以下のような情報が必要となる。

- 3次元曲面情報：3次元形状を表現しているすべての曲面の方程式とその面が属しているセグメントに関する情報。
- 3次元稜線・輪郭線情報：3次元の曲面における各曲面間の相貫曲線で与えられる3次元稜線や円柱面などに対してある視線を与えた時に発生する輪郭線の情報。
- トポロジー情報：3次元曲面と3次元稜線との結合関係を表す情報。
- 2次元投影図：ある視線に対する隠線消去された2次元線分情報(線分間の結合情報を含む)。

従って可視面分抽出を行う為には、入力された形状からこれらの情報が自動的に得られなければならない。ここで3次元形状を計算機内部に定義する幾何形状データとしての形状モデルについて考えると、一般に CSG モデルは、(1)データ構造が簡明、(2)データ量が少量、(3)データ

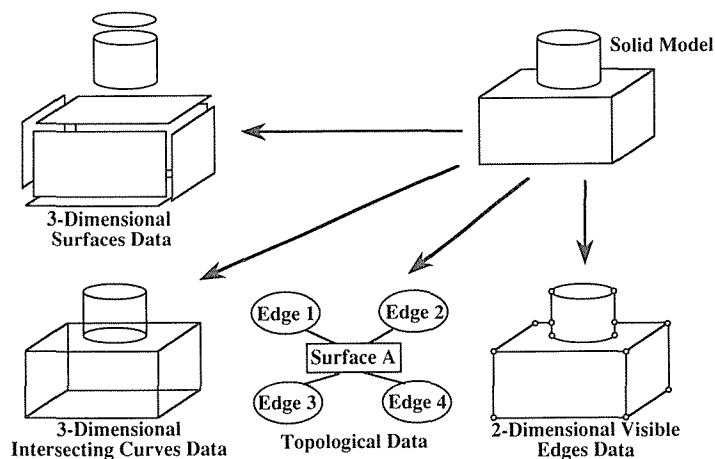


図1 可視面分抽出に必要な情報

の入力・出力が容易、等の利点があるため形状入力を行う為のモデルとしては向いているが、境界・稜線情報などを陽には表現していない。これに対して、B-REPS モデルは形状表面や稜線が陽に表現されている反面データ構造が複雑で入力も困難である事が指摘されている。そこで本論文では、最初に CSG モデルが定義されており、そこから対応づけられた B-REPS データが自動生成されるような形状モデルを採用する事とする。これによって、それぞれのモデルから必要な情報を得ながら、処理プロセスを実行する。

本アルゴリズムにおける各処理によるデータの流れとしては、次の手順による。

- CSG 入力した形状データから B-REPS データを生成、
- 与えられた視線に対して B-REPS データから 2 次元投影図を作成し、隠線消去を行う、
- 隠線消去された 2 次元投影図においてエッジと交点をそれぞれリンク、ノードとみなすことによりこの図を、幾何情報を持った無向グラフと考え、グラフ探索により面分の分割・抽出を行う。
- 最後に抽出された面分ごとについて輝度情報を付加し、スムーズ・シェーディングによって面画の出力を行う。

3. グラフ理論による可視面分抽出

ここで、あるソリッド形状から可視面分を抽出する為に、グラフ理論を利用した問題の定義を行う。

前述のように隠線消去された 2 次元投影図は、エッジをリンク、頂点・交点をノードと考えるとそれ自体が、幾何情報を持った有限無向グラフを表現している。この幾何情報を持ったグラフを探索空間としてグラフ探索を行う。

以後このグラフ全体を G とすると G は以下の式で表せる。

$$G=(V, E) \quad (1)$$

$$V=\{v_i|i \in I_v\} \quad (2)$$

$$E=\{(v_i, v_j)|i, j \in I_v, i \neq j\} \quad (3)$$

$$I_v=\{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (4)$$

ここで、 G は探索空間であるグラフ全体、 V はグラフ G における交点の集合、 E はグラフ G におけるエッジの集合、 I_v はノードの番号の集合をそれぞれ表すものとする。

又、グラフ G はソリッドな形状を 2 次元に投影した図形である事から、必ず閉じたグラフとなり孤立点や孤立辺は存在しない。即ち、あるノード x に接続している全てのリンクの集合を $E_{(x)} \leq E$ とすると、集合 $E_{(x)}$ の要素の数 $|E_{(x)}|$ は、任意のノード $x \in V$ に対して次式が成り立つ。

$$|E_{(x)}| \geq 2 \quad (5)$$

さらに全てのエッジ間の交点を全てノードとして扱っているため、リンク間の交差は起こらない。

しかし、形状に穴が空いているような場合には任意のノード $x, y \in V$ に対して (6) 式は、必ずしも成り立たず、グラフ G は連結グラフとは限らない。

$$d(x, y) < \infty \quad (6)$$

ここで $d(x, y)$ は 2 つのノード x, y を結ぶ通路の長さの最小値である。

上記のような探索空間 G において, $U \subseteq V, F \subseteq E$ で表現される $G'(U, F)$ を $G(V, E)$ の部分グラフとすると, 可視面分の抽出は, グラフ G から以下の条件を満たす部分グラフ G' を抽出する事と定義できる。即ち

(C-1) G' に含まれるリンクは, その結合により閉ループを形成する。

(C-2) G' は 1 つもしくは, 包含関係を持つ複数の閉ループで構成される。

(C-3) この閉ループはその内側にリンクが存在しないか, もしくは内側に存在するリンクを用いても分割不可能な閉ループである。

ある面分が包含関係を持つ複数のループで構成される場合とは, 穴の空いた形状を対象にした場合で, 穴の空いている面に対して外側のループで囲まれる領域から, 内側のループが囲む領域を除いた部分が面分となる。

4. 面画出力システム

上記の定義に基づき, 可視面分を抽出する為のアルゴリズムと, それらを統合して入力形状から面画を出力するシステムについて以下に述べる。又, このシステムにおけるデータと処理の流れを図 2 に示す。以下の各節では図中の各処理の詳細を示す。

4.1 CSG から B-REPS データの生成

B-REPS モデルは形状の表面を構成している面, 稜線, 頂点, の幾何データと, それらの結合関係 (トポロジー・データ) によって形状表面および内部まで定義するものである。従ってこの B-REPS データにより可視面分抽出に必要な情報を得る事が出来る。CSG から B-REPS への変換は図 3 に示すアルゴリズム²⁾を採用するものとする。又, 本論文では形状を表現するプリミティブが平面又は 2 次曲面のみで与えられる為, 全ての処理過程が解析的に行われ, 従って高速な変換処理が実現可能となる。

4.2 隠線消去された 2 次元投影図の作成

自動生成された B-REPS データに対して視線ベクトルを与える事により, 2 次元投影図を作

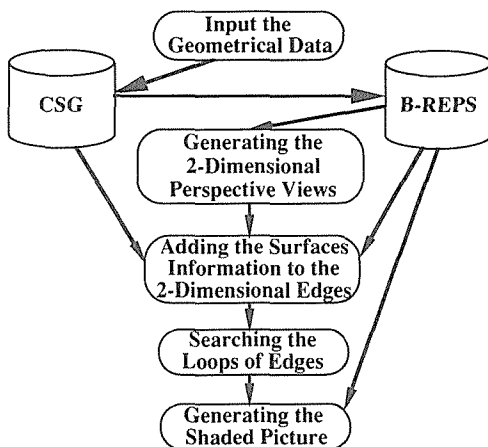


図 2 面画出力システムにおける処理の流れ

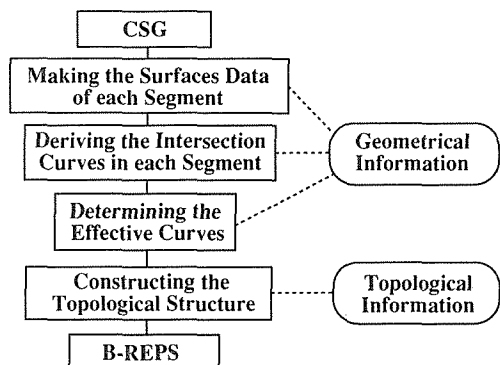


図 3 CSG モデルから B-REPS モデルへの解析的変換アルゴリズム

成することができる。本論では以下のプロセスにより処理を行う。

- (1) B-REPS データ中には含まれないが視線ベクトルを与える事によって生じる情報を求める。即ち、円柱面などの2次元曲面に対して見られる輪郭線がこれに相当する。
- (2) 次に輪郭線も含めた全ての3次元エッジを視線方向に投影し、その投影面上での全てのエッジ間の交点を求め、各々をエッジ上に交点を持たない小エッジ群に分割する。
- (3) それらの小エッジの midpoint から視線方向に直線を発生させ、その直線と形状が midpoint から視線側において交わるかどうかを調べ、交わらない場合にそのエッジを可視とする。
- (4) 以上のようにして作られた投影図は、データとしては両端を持ったエッジが投影面上に別々に存在しているだけなので両端の座標を利用してエッジ間、交点間の結合関係を作成し2次元投影図を幾何情報を持った無向グラフへと変換する。

4.3 2次元可視エッジへの面分情報の付加

次に幾何情報を持った無向グラフからグラフ探索により可視面分を表現する最小単位の閉ループを求めるに際して、単純にリンク間の結合関係によりループ探索を行った場合、計算負荷が大きばかりではなく、探索が正常に終了しない場合も存在する。特に面に穴が空いているような場合には直接結合関係のない2本のリンクが、ある一つの面分を構成している事の判定が困難である。そこでここでは、探索に有効となる情報を付加する事によりループ探索の安定性を増加させる事を考える。

隠線消去された2次元投影図において、形状外領域も一つの面分と考えると任意のエッジは必ず異なる2つの面分領域の境界線の一部となる。何故ならここで対象としている形状において一本のエッジをはさんで両側の面が同一であるという事はない。そこで各々の2次元可視エッジに対して、どの面分間の境界であるかという情報を付加する事とする。この情報を利用してひとつの面分と関連がある2次元可視エッジ群に対してループ探索を行えばよいことになる。これにより、大きな探索空間が急激に縮小されるので計算負荷が非常に小さくなる。この処理は、以下の手順で行われる。

- (1) エッジの両側における面分内代表点の作成
調べるエッジに対してエッジの midpoint から垂直に交わるような直線を発生させる。次にこの直線と他の全てのエッジとの交点を求め、エッジの両側において最も近い位置に存在する交点を探し、エッジの midpoint との中間に位置する点を面分内代表点とする。
- (2) 面分内代表点の3次元形状における従属面の判定

次に面分内代表点が3次元形状においてどの面に属するかを判定する。面分内代表点を3次元空間に逆変換するとこの場合視線と同一ベクトルを持つような直線となる。図4に示すような視線の場合、視線ベクトル V は(7)式で表現されるので、直線の方程式は(8)式のようになる。

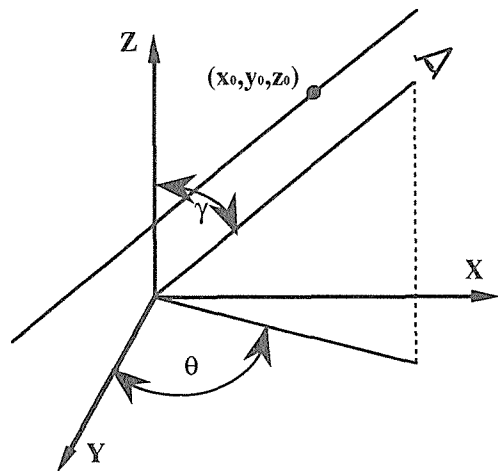


図4 視線ベクトル

$$V = (\cos \theta \sin \gamma, \sin \theta \cos \gamma, \cos \gamma) \quad (7)$$

$$\frac{X - x_0}{\cos \theta \sin \gamma} = \frac{Y - y_0}{\sin \theta \cos \gamma} = \frac{Z - z_0}{\cos \gamma} \quad (8)$$

更に、この直線と形状を構成している全セグメントとの交点を求め、形状の境界で0、内部で正、外部で負となるペナルティー関数を用いて最も視点側に見える形状表面を判定する。

以上の手続きにより求めた3次元面分情報を2次元可視エッジに付加する事により次のループ探索処理を簡便にする。

4.4 ループ探索

先に求めた3次元面分情報を利用して、2次元可視エッジ群から目的のループを抽出する処理は、以下の要領で行われる。

- (1) 2次元可視エッジ群の座標情報に基づき、各々のエッジ間の結合関係を調べ、投影図全体を幾何情報を持った無向グラフに変換する。
- (2) 3次元面分情報により、各々の面分に関わるエッジを全て取り出す。
- (3) 取り出したエッジ群に対して結合関係より、エッジの列（パス）を作成しループを形成させる。

この時作成されるループは、一つ、もしくは包含関係を持つ複数のループになる事は先に述べたとうりである。またソリッドな形状を扱っているため、取り出された全てのエッジは必ずループを構成するメンバーとなる。

4.5 同一面分におけるループの包含関係

一つの面分が複数のループで構成されている場合、その面分を正確に認識する為に、それらのループ間の幾何的な包含関係情報を知る必要がある。この情報をそれぞれのループごとの包含関係として調べ、それらの関係をTree構造で表現する事により面分の構造が明確化される。図5のような場合、この面分は、Loop1からLoop2, Loop3が囲む領域を除いた部分を表現する。

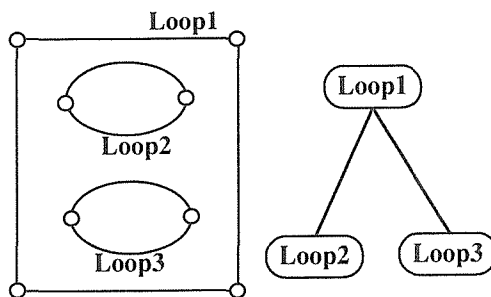


図5 包含関係を持つ面分の例

ここでループの包含関係を定式化すると以下の式で表現する事ができる。

即ち、 $E_i^k (k=1,2,\dots,n)$ をループ LP_i を構成しているエッジとした場合、ループ LP_i とループ LP_j が、それぞれ (9), (10) 式で表現されるときに、条件として (11) 式が成り立つならば (12) 式が成り立つ。

$$LP_i = \{E_i^k | k=1 \sim n\} \quad (9)$$

$$LP_j = \{E_j^k | k=1 \sim m\} \quad (10)$$

$$E_j^k \subset LP_i \quad (11)$$

$$LP_j \subset LP_i \quad (12)$$

ここでこの記号は幾何学的な意味で内側に存在する事を意味する。即ち、(12) 式はループ LP_i の内部にループ LP_j が存在する事を表現している。これにより、2つのループ LP_i, LP_j の包含関係は、一方のループを構成するあるエッジが他方のループに対して内側に存在するか、外側に存在するかを判定する事により決定することが出来る。

4.6 面画作成

抽出された可視面分群に対して、個々の面分ごとにループ内部の面塗りを行い面画を出力する事になるが、それに対して幾つかの処理を行う必要がある。

(1) 面塗り対象ループの決定

先に述べたように本論文では可視面分をひとつもしくは、包含関係を持つ複数のループによって囲まれた領域として表現している為、全てのループの内部を対象となっている面分として塗ってはいけない。即ち図6のように穴があいている面分A（ハッチング部）が包含関係を持つ複数のループで表現される場合、外側のループ（LP1）から内側のループ（LP2）が囲む領域を除くという構造になっている為、LP2の内部には面分Aは存在しない。従ってLP2を面分Aとして塗ってはいけない。この例では面塗りの対象となるループは、LP1, LP4である。そこでこのような面塗り対象外となるループの判定を行う。図6において面分Aを構成するループを取り出すと図中のLP1～LP4の4つのループが得られる。

ここでTree構造で表現されたループ間の包含関係において、ルートが1となるような階層のレベルを設定するとそれぞれのループは、

LP1(階層=1)→ 面が存在する

LP2(階層=2)→ 面が存在しない

LP3(階層=2)→ 面が存在しない

LP4(階層=3)→ 面が存在する

となり、ループの内側に面Aが存在するのは階層のレベルが奇数のループのみである。従って、一般には次式を満足するループが面塗り対象となる。

$$H(LP_i)=2n+1 \quad (n=0,1,2,\dots) \quad (13)$$

ここで、 $H(LP_i)$ はループ LP_i の階層レベルを求める関数である。

(2) 面塗り順序の決定

選択された面塗り対象ループを個々に面塗りしてゆく事になるのだが、一般のグラフィックパッケージでは穴のあいた領域をそのまま塗る様な機能を有していないので、面塗り対象ループが包含関係を持つ場合などは、ループを無作為に塗り重ねても正しい出力が得られない。そこで、決定した面塗り対象ループに対しての面塗り順序を決定する必要がある。これは、各面分を表す

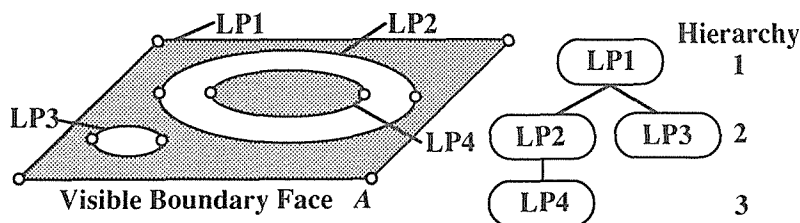


図6 面塗り対象ループの決定

ループ間の包含関係を調べ、面塗り優先順位を表すモデルを作成する事により外側から順に塗り重ねる事が出来る。

(3) スムース・シェーディング

以上のようにして求めたループをスムーズ・シェーディングの技法を用いて塗り重ねていく。スムーズ・シェーディングとは、ポリゴンの各頂点に対応する輝度を与え、それによりポリゴン内部の輝度を線形補間により決定する手法である。従って面塗り対象ループを構成しているエッジが2次曲線分の場合には、ループをポリゴンに近似して各頂点の輝度を求める処理を行った後にシェーディング処理を行う。

5. 計算機実験

以上のアルゴリズムに基づき作成したシステムにより、計算機実験を行った結果を以下に示す。ただし実験に使用した計算機は大型計算機 HITAC M-680 である。写真1にテスト形状による面画出力例を示し、サンプル入力形状データに対する計算時間を各処理ごとに計測した結果を図7に示す。図中横軸は入力形状の可視面分数、縦軸はCPU-TIMEを表している。これにより、本アルゴリズムによる面画出力に要する時間は、2次元可視エッジへの面分情報付加の段階での処理時間に大きく依存する事がわかる。しかしこの処理は、セグメント数には直接左右されず、可視エッジの本数に依存するものなので、他のアルゴリズムと比較してセグメントの増加による処理時間の増加は、比較的緩やかであると考えられる。

次に本アルゴリズムの高速性を示すために他のアルゴリズムとの処理時間を比較する。ここでは比較対象として(1) Ray-tracing algorithm, (2) Scan-line algorithm を用い、同じ入力形状を面画出力した場合の処理時間を図8に示す。また、処理時間と出力画像の解像度との関連を検証するために、解像度を变化させた場合の結果を図9に示す。ここでは比較対象として Ray-tracing algorithm による結果と合わせて示す。こ

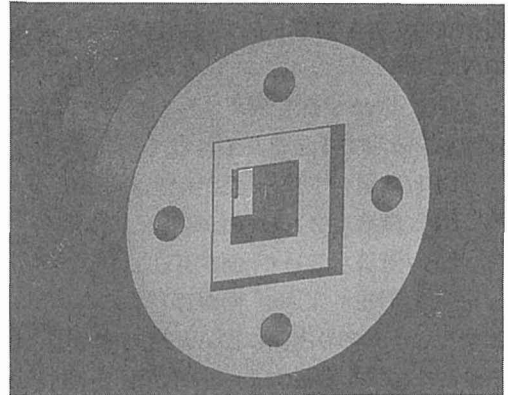
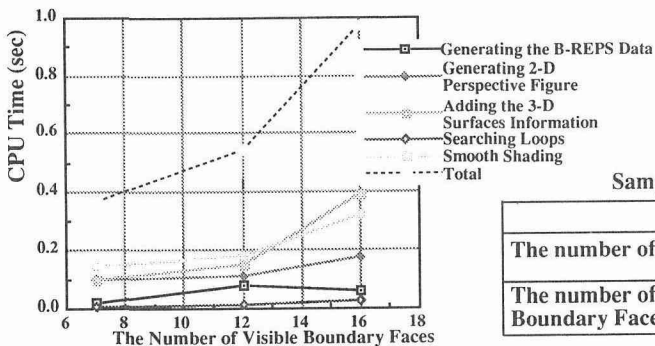


写真1 面画出力例(セグメント数 11, 面分数 16)



Sample Data

	A	B	C
The number of Segments	4	4	11
The number of Visible Boundary Faces	7	12	16

図7 各処理ごとの計算時間

の図から、他のアルゴリズムと比べてかなり高速に、かつ解像度にほぼ依存することなく面画の出力が行える事がわかる。

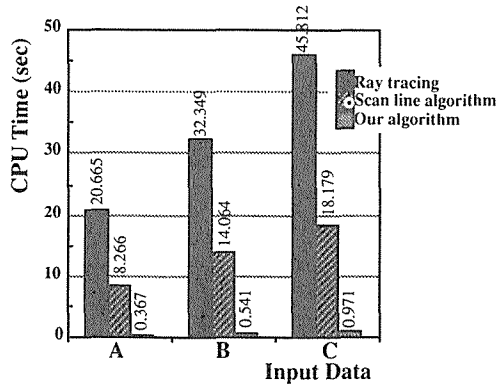


図8 他のアルゴリズムとの処理時間の比較

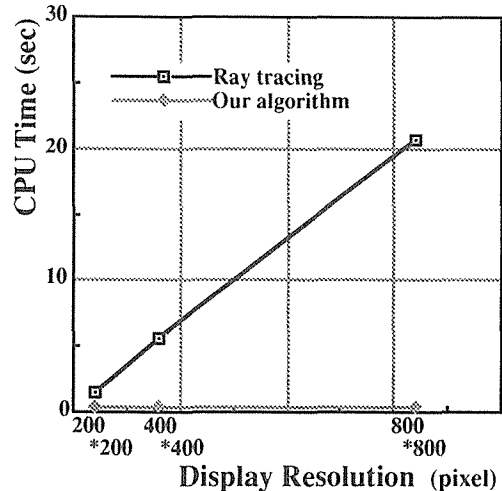


図9 面画出力における解像度との相関

6. おわりに

本論文では高速な面画作成の為の1手法として、ソリッドモデルからの可視面分抽出アルゴリズムを提案し、構築した面画作成システムにおいて計算機実験により本アルゴリズムを検証した。その結果として次の3点をもって本論文のまとめとする。

- グラフ理論の導入により可視面分抽出の定義を行った。
- 穴の空いた形状に対しても扱える可視面分抽出アルゴリズムを示した。
- 抽出された可視面分を利用して面画を作成するシステムを計算機上に構築し、その高速性と有効性を検証した。

参考文献

- 1) 沖野教郎, 嘉数侑昇, 久保洋: 自動設計プロセッサ TIPS-1 の開発, 精密機械, Vol. 43, No. 3, (1978), pp. 371.
- 2) 渡部広一, 嘉数侑昇, 沖野教郎: ソリッド形状モデリングにおける CSG から B-Reps への解析的変換の研究, 精密工学会誌, Vol. 53, No. 2, (1988), pp. 315-321.
- 3) J. D. Foley and A. V. Van Dam: Fundamentals of Interactive Computer Graphics, Addison-Wesley Publishing Company, (1982).
- 4) W. M. Newman and R. F. Sproull: Principles of Interactive Computer Graphics, McGraw-Hill, (1979).
- 5) 榎本彦衛: グラフ学入門, 日本評論社, (1988).
- 6) S. Sechrest and D. P. Greenberg: A Visible Polygon Recognition Algorithm, ACM CIGGRAPH'81, (1981).
- 7) 佐藤政生, 大附辰夫: VLSI パターン設計における多角形領域の分割アルゴリズム, 情報処理, Vol. 27, No. 2, (1986), pp. 269-272.
- 8) 川上敬, 嘉数侑昇, 沖野教郎: CSG モデルにおける可視面分抽出に関する研究, 情処研報, Vol. 87, No. 70, (1987), pp. 47-54.