

CAD 対話インタフェースのためのソリッドモデル 隠面処理法[†]

川島 泰正^{††} 太田 吉美^{††} 徳増 真司^{††}

CSG モデルの入力時に、形状把握の補助、モデル指示の補助手段として機能する、モデル表示法について述べ、実験例を示した。本方法では、拡張デプスバッファ (Extended Depth Buffer: EDB) と呼ぶバッファを用いる。通常の隠面除去で用いられるデプスバッファ (DB) は、プリミティブ間の相貫線の計算が必要なく、しかも和演算によるプリミティブの追加に対しては、画面が逐次変化する、という特徴がある。しかし、差・積演算時に必要な、隠面再生能力はなかった。それに対し、EDB は、従来の DB に、各画素の視線とモデル形状の交差状態を示す情報を付加することにより、(1)あらゆる演算によるモデル変更に対して、表示内容が逐次変化、(2)画面からモデルへのアクセス、(3)切断・透過等の表示効果、を可能としたものである。EDB を用いることにより、設計者は、入力の各段階でモデルの状態を容易に把握でき、また、画面上でモデルを指示して既存のデータを獲得し、それをを用いた非数値的な入力が可能となる。CSG モデル入力時の、対話性を向上させることができる。実験ではテストプログラムを作成し、簡単なモデルの入力を行った。その結果、処理時間の点では問題があったものの、上述の機能が確認された。

1. ま え が き

3次元機械系 CAD の幾何モデルは、ワイヤフレーム、サーフェース¹⁾ が既に実用化され、ソリッドモデルについても実用化の段階に入っている²⁾。ソリッドモデルの2形式 Breps と CSG¹⁾ (図 1) では、現在のところ自由曲面等形状表現能力の豊かさや、NC プログラミングへの接続の容易さ等から、Breps モデルが利用される場合が多い。しかし、複数の部品から成る機械設計³⁾、知識工学の応用⁴⁾ 等、今後の CAD の発展過程においては形状の詳細にこだわらない、大づかみなモデリング法が必要と考えられ、そこでは、形状を概略的に表現し得る、CSG モデルの重要性が増すものと考えられる。

一方どのような CAD システムでも、

- 設計対象を計算機内にモデリングし、
- コンピュータ・グラフィックス (以下 CG と略) によりモデルを表示し、

- 表示画面を介した人間と計算機の対話を行う

ことは CAD の基本である。3次元 CAD の場合、人間が3次元で直接形状を把握することに不得手であるため、人間と計算機のインタフェースとしての CG の利用は特に重要である。

ソリッドモデル入力時の CG 利用は、Breps 形式では非常に良く行われている。しかし、CSG モデル

の入力時は必ずしもそうではなく、形状記述言語によるバッチ入力を行う場合⁵⁾ すらある (逆に Breps では言語入力は困難であるが)。CSG モデルは、プリミティブの組合せ方のみを記述したものであり、実際の形状表面の詳細な情報を持たない。したがってその表示には、プリミティブ間の集合演算を Breps モデルで実行した後表示する、光線追跡法による等の方法ととられるが、これらの方法では、モデルが変更されるごとに、複雑かつ莫大な計算量を必要とする、画面上でモデルを自由に指示できない等の問題があり、モデルの入力時の対話性を確保できない場合が生じる。本研究では、このような問題を解決するために、CSG モデル入力時に必要な基本機能を整理し、対話性のある CSG モデル表示法を開発した。

2. ソリッドモデル表示と対話性

2.1 幾何モデル入力時の CG の役割

3次元 CAD において、CG は、

- モデルを、人間が理解しやすい画像として示す。
- モデルの持つ情報を、画面上でモデルを指示することにより獲得可能とする。

等の目的で用いられる。CG の役割として、前者を設計者によるモデル把握の補助、後者を画面上でのモデル指示の補助と呼ぶ。

これらの役割を要求仕様の形でまとめると、表 1 になると考えられる。表中 (a) は隠面処理・陰影処理等によりモデルの形状が一意に認識できること、(b) はモデルの変更に対して表示内容が逐次的に変更され得

[†] A Method of Visualization of Solid Model for CAD Man-Machine Interface by YASUMASA KAWASHIMA, YOSHIMI OOTA and SHINJI TOKUMASU (Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.).

^{††} (株)日立製作所日立研究所

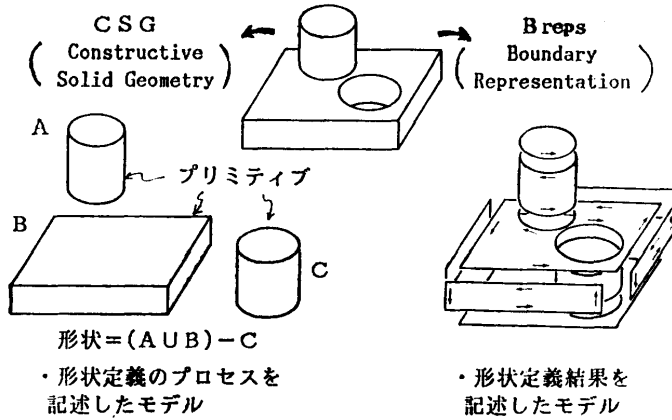


図1 ソリッドモデルの2形式
Fig. 1 Two types of solid-model.

表1 CADにおけるモデル表示の要求仕様
Table 1 Specifications on model visualization in CAD.

機能	内容
モデル把握の補助	(a) 形状認識の一貫性 (b) 逐次表示性
モデル指示の補助	(c) 図形検出

ること、(c)は図形セグメント等の図形ピック機能により、モデルの持つ情報を参照できることを指している。これを CSG モデルに当てはめると、

- プリミティブ間の集合演算の状態が、認識できること
- プリミティブが追加・削除されたとき、画面上でもモデルの変更部分のみが変更される。
- 画面を見て、各プリミティブを識別できる。
- 画面上でプリミティブ、およびプリミティブを構

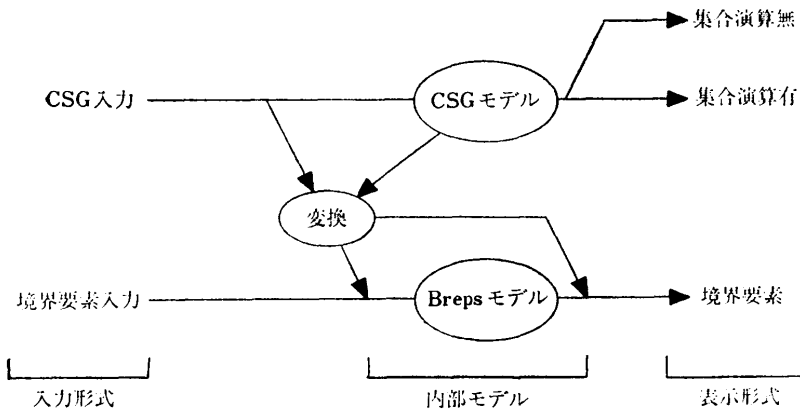


図2 ソリッドモデルの入力・内部・表示形式
Fig. 2 Representations of solid-model in each phases of CAD system.

成する曲面を指示できる。

ことが要求される。

2.2 CSG モデル入力時の対話性の現状

ソリッドモデルについて、入力形式（人間が持つモデル情報）、内部形式（アプリケーションに対応したデータ形式）、表示形式（表示をプリミティブ単位で行うか境界要素で行うか等の処理方式）の関係は図2に示すようになる。本研究は、CSG 入力から表示に至る処理を対象とし、内部形式がいずれであるかは問わない。その場合、入力-表示形式は

(1) CSG 入力 CSG 表示

(a) プリミティブ間の集合演算を施した完全なモデルを表示

(b) 集合演算を施さずプリミティブ単位で表示

(2) CSG 入力 境界要素表示

の3種類が考えられる。ここで(1)(a)は、光線追跡のようにプリミティブのデータから直接表示する方法。(b)は、プリミティブごとにワイヤ表示する、あるいは、後述するデブスバッファ法⁶⁾を用いて全プリミティブの和演算状態を表示する方法。(2)は、Brepsと同様の境界要素群を求め、それらを表示する方法である。

各方法は、表1の要求仕様に対して表2に示す特性を持つ。(1)(a)では比較的単純なアルゴリズムで形状を正確に表示できるが、プリミティブが追加されたとき、表示処理をすべてのプリミティブの情報を用いて再実行する必要があり、逐次表示性はない。(b)では、集合演算を行わないため、プリミティブの追加/削除には逐次対応できるが、集合演算の結果が正確に

は表示されず、モデル形状の認識は困難である。(2)の場合、境界要素の算出自体かなりの計算量を必要とするのに加え、変換後の Breps モデルに対しプリミティブの変更/削除を行うことは困難である。また、表示のためだけに詳細な境界要素を求めることは、形状を概略的に表し得るといふ CSG モデルの利点を損いかねない。そのため、入力形式と表示形式が一致し、かつ形状を完全な形で表示

表 2 CSG モデル表示の現状
Table 2 Current aspect on CSG visualization.

入力形式	CSG		
	CSG		境界要素
表示形式	演算有	演算無	
(a) 形状認識の一意性	良	悪	良
(b) 逐次表示性	悪	良	可
(c) 図形検出性	悪	可	可
処理速度	悪	良	悪

し得る(1)(a)が最も望ましいと考える。この方法の現状の問題は、

- 逐次表示性
- 画面からモデルの持つ情報へのアクセス

の2点にあり、これらの改良が成されれば、対話性の向上が期待できる。

2.3 CSG モデル表示法の必要条件

CSG モデルを境界要素群に変換せず、しかも前記要求仕様を満足するためには以下の条件が満たされなければならない。

- 条件1 詳細な形状境界情報を必要としないアル

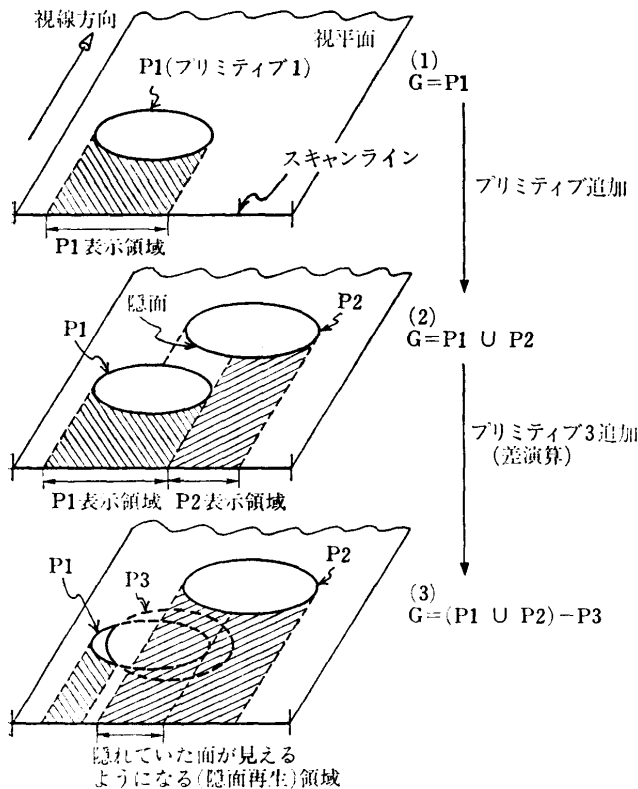


図 3 隠面再生

Fig. 3 Re-generation of removed hidden surface.

ゴリズム

CSG モデルは形状境界情報を直接には持たない。そのため表示アルゴリズム内で適時形状境界を求めることが必要になる。

- 条件2 プリミティブ演算結果を保存する

条件2は以下の式で説明される。CSG モデルを

$$G_j = P_j \text{ op-p } G_{j-1} \quad (1)$$

P_j : j 番目に入力されたプリミティブ

op-p: プリミティブ演算

と表す。CSG モデルはプリミティブ間の演算結果を明示的には持たないため、表示処理が

$$I_j = D(G_j) \quad (2)$$

I_j : G_j の表示画像

D: 表示アルゴリズム

の形式では、過去に入力されたすべてのプリミティブが処理の対象となり、逐次表示は実現できない。逐次表示性のあるアルゴリズムは、例えば次の形をとる。

$$I_j = D(P_j) \text{ op-i } I_{j-1} \quad (3)$$

op-i: 同像同士の演算

この例では画像そのものが、プリミティブ演算結果を保存し、逐次表示を実現している。

- 条件3 隠面再生能力を持つ

プリミティブ入力によりモデルが変更されると、元の形状表面の一部が形状内に没したり、除去されたりするが、特に現在表示中の面が除去された場合には、その裏にあって、これまで表示されていなかった面を改めて表示する(隠面再生)必要が生じる(図3)。

- 条件4 面のピッキング

CSG モデルでは、多くの場合プリミティブ単位、またはプリミティブ構成面単位で色コード、機械的機能等の情報を持つため、面のピッキングが必要である。

2.4 デプスバッファ法⁵⁾

前節で示した条件をある程度満たす陰影表示法(隠面処理法)にデプスバッファ法(Depth Buffer 法: Zバッファとも呼ばれる。以下 DB 法と略)がある。CSG モデル表示についての DB 法の特長は、和演算時のプリミティブの相貫状態が画素の精度で自動的かつ逐次的に表示されることにあり、DB は条件2で述べたプリミティブ演算結果の保存手段の一種と言える。しかし DB 法では、プリミティブ演算として差または積演算を行った場合の隠面再生能力は

なく、演算結果を正しく表示するには、差・積演算によって生成・変更される境界要素を求める必要がある。

DB法の考え方をを用いて、しかも差・積演算にも対応可能なアルゴリズムとしては、3次元画像メモリによる方法⁶⁾と、DBを拡張した方法⁷⁾が発表されている。前者は表示法としては比較的柔軟で切断・透過等の機能も合わせ持つが、3次元画素ごとに輝度情報とモデル指示用情報を保持することはメモリー量から困難である。一方後者は、6面図出力を基本としており、斜視図・透視図については適用困難である。しかし、各画素が表示するプリミティブへのポインタをバッファ内に持つため、画面座標からプリミティブへのアクセスは可能と考えられる(文献中に述べられてはいない)。ただし、各画素がプリミティブを構成する面のいずれを表示するかは得られない。したがって、面ごとに持つ情報は参照できない。

本研究では後者の例と同様に、DBをベースとしたバッファに付加情報を加える方法で(文献⁷⁾にならい拡張デプスバッファ法と呼ぶ)、CSGモデルの表示を試みた。特にここでは上述の例では不十分だった、画面からモデルへのアクセス機能に必要な情報を、効率良く格納し、前節の条件を満たすことを目標とした。

3. 拡張デプスバッファ法

3.1 アルゴリズム概要

3.1.1 構成要素

(1) CSGモデル

本研究は特定のモデルを対象とするものではないが、モデルの変更は入力済のモデルと1プリミティブとの演算によるものに限定する。したがって、複数のプリミティブによって作られたモデル間の演算はここでは考えない。計算機内部の表現は、例えば図4のような表形式となる。

(2) 拡張デプスバッファ

(Extended Depth Buffer: EDB と略)

プリミティブ演算結果を、式(3)で示したように、

プリミティブテーブル

番号	名称	タイプ	演算タイプ	形状パラメータ	面データPTR	属性PTR
1	図形1	直方体	OR	縦, 横, 高さ, 原点, 向き		
2	図形2	円柱	SUB	半径, 高さ, 原点, 向き		
...
n	図形n	円錐	OR			

面データテーブル

番号	タイプ	面パラメータ	属性PTR
1	平面	原点, 法線	
2	"	"	
...
6	"	"	
7	円筒面	半径, 中心線	
8	平面		
...

番号	タグ	値
1	色	HLSコード
2	表面荒さ	▽▽▽
3		
...

図4 CSGモデルの内部表現

Fig. 4 An example of tables for CSG.

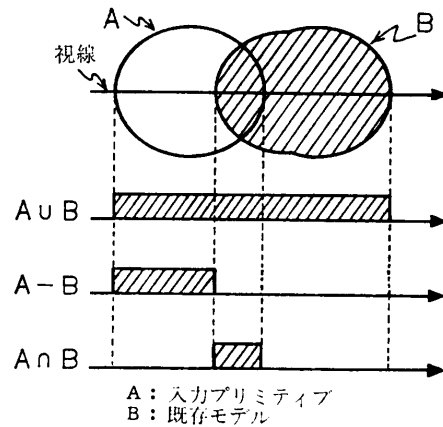


図5 1次元ブール演算

Fig. 5 1-Dimensional Boolean operation.

画像により保存したバッファであり、各画素の表示面、隠面がモデルのどの部分に当たるかを示す情報を格納する。この情報は、モデル変更時のプリミティブ演算、隠面処理、あるいは画面からモデルへのアクセスを行う際に参照される。詳細は後述する。

(3) 1次元ブール演算プロセッサ (図5)

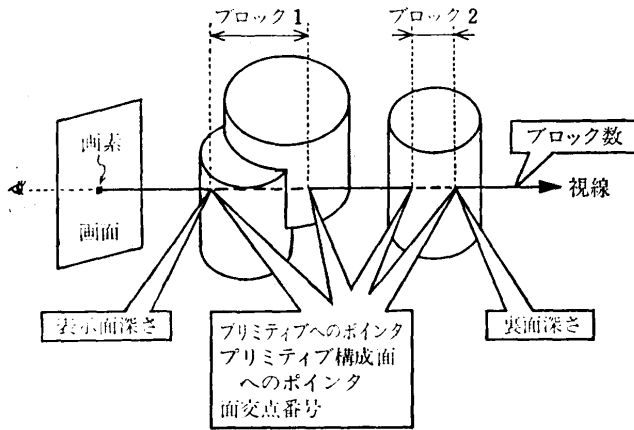


図 6 視線とモデルの交差情報

Fig. 6 Representation of intersection between a view vector and the model.

既入力モデル形状と、追加プリミティブの集合演算は、画素単位に行う。すなわち、視線と各々の交差によってできる、1次元領域間のブール演算として行う。

3.1.2 処理手順

プリミティブが追加されるごとに以下を繰り返す。

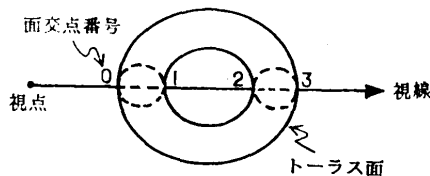
- A プリミティブが投影される画面上の領域を求める。
- B Aの領域内の画素について以下を繰り返す。
 - B 1 追加プリミティブと当該画素の視線との交差領域計算。
 - B 2 EDB に貯えられている当該画素の表示面、各隠面のモデル情報から、既入力モデル形状と視線の交差領域計算。
 - B 3 B 1, B 2で得た領域間の1次元ブール演算。
 - B 4 B 3の結果により EDB を更新。
 - B 5 表示面が変化したならば輝度計算。

3.2 拡張デブスバッファ

EDB の格納データ、データ構造の詳細を示す。

3.2.1 格納データ

EDB は、モデル形状を、画素ごとの視線と形状と



視線と曲面の交点に視線方向に従って番号付けする。

図 7 面交点番号

Fig. 7 Serial Nos. given on the intersection between view vector and surfaces.

の交差情報によって表すものである。1本の視線については、以下のデータを持つ(図6)。

(1) 深さ: 視線上で形状の占める範囲を

- (a) 表示面深さ
- (b) 裏面深さ

で表す。一般の DB は(a)のみを持つものである。

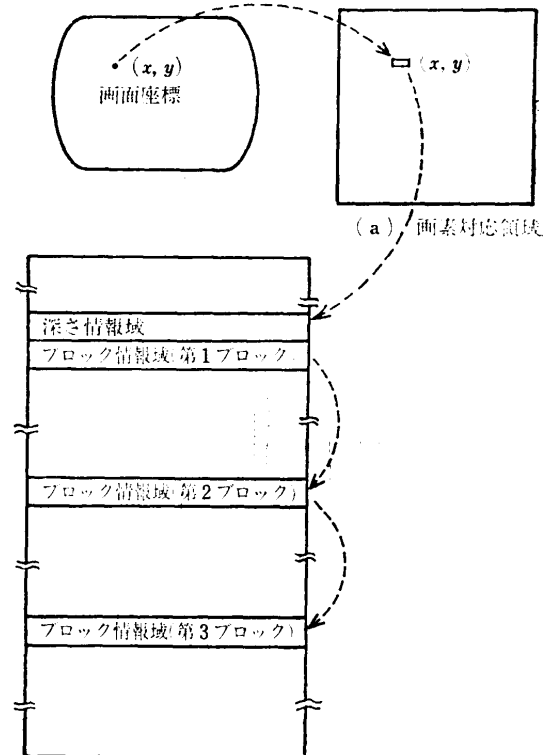
(2) ブロック数: 視線と形状の交差領域で連続な部分をブロックと呼ぶ。ブロック数は、視線とモデルの交差回数である。

(3) モデル情報: 視線とモデル形状表面との交点の属性(プリミティブ、プリミティブ構成面)を示すための情報であり、

- (a) プリミティブへのポイント
- (b) プリミティブ構成面へのポイント

(c) 面交点番号

に分けられる。これらの値と視線式から、必要に応じて、表示面と隠面の深さが計算できる。面交点番号は、2次曲面・トーラス等、視線と曲面が2度以上交わる場合でも交点を特定できるように設けたもので、



(b) 交差情報領域

図 8 拡張デブスバッファデータ構造

Fig. 8 Data structure of EDB.

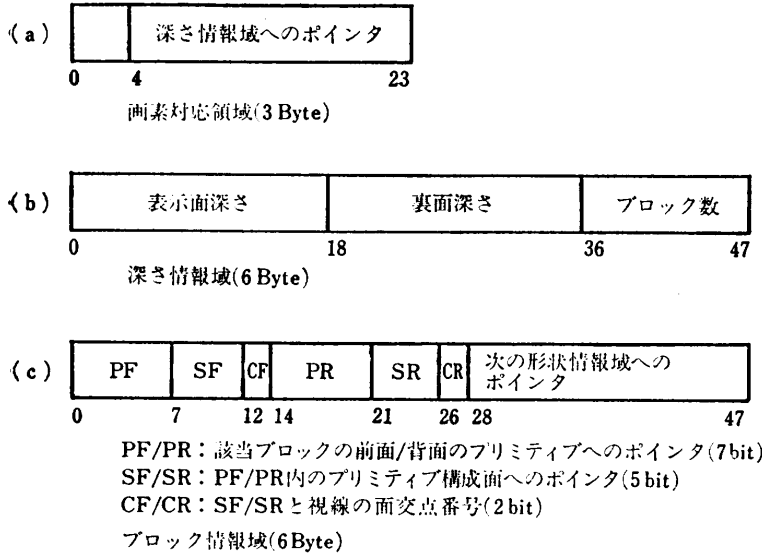


図9 領域割り当て
 Fig. 9 Area assignments.

各交点に視線方向順に付けられた番号である(図7)。

3.2.2 データ構造

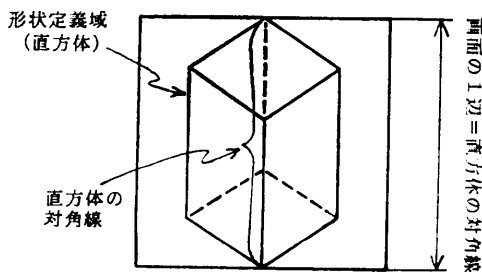
EDBはプリミティブの入力ごとに内容が変更されるため、自由度の高いデータ構造でなければならない。また、画素単位でデータを持つため、コンパクトであることが要求される。ここではリスト構造を採用した。全体は二つの領域から成る。全体図を図8に示す。

(1) 画素対応領域

画素数分の要素を持つ2次元配列。各要素は次に述べる交差情報領域内の深さ情報域を指すポイントである(図9(a))。表示面がない場合は0を入れる。

(2) 交差情報領域

3.1で述べた情報を具体的に格納する1次元領域。



任意の方向から投影した形状定義域(直方体)が画面に収まるためには、画面が正方形で、その1辺が直方体の対角線の投影長と等しければ良い。形状定義域が立方体のとき画面使用率(形状定義域の投影面積/画面面積)は最大値(65%)となる。

図10 形状定義域と画面使用率
 Fig. 10 Shape definition region and used-screen ratio.

この領域の各要素は

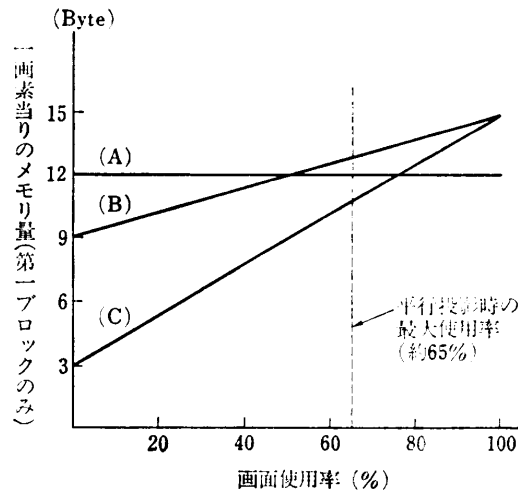
(a) 深さ情報域(図9(b)): 1本の視線に関する表示面・裏面深さ、ブロック数を含む。

(b) ブロック情報域(図9(c)): 一つのブロックに関するモデル情報、および次に連なるブロックの同域へのポイントを格納する。

のいずれかである。したがって表示面を持つ各画素について、(a)は1、(b)はブロック数と同数とられる。

画面の座標値が指定されたとき、深さ情報域は、画素対応領域の対応要素が示すポイントにより、参照可能であり、深さ情報域の次アドレスにある第1ブロックのブロック情報域から、第2ブロック以降のブロック情報域が参照できる。

画素対応領域は、CADのモデル表示で一般的に用いられる、平行投影による表示の場合、図形が画面を占める割合には限度があると考え、設けた。実際、形状があらかじめ設定された直方体(形状定義域と称する)内部に定義されるものとし、正方形の画面に対し



- (A) 全画素に深さ情報域(6 byte)と第1ブロックのモデル情報域(6 byte)を持たせる
- (B) 全画素に深さ情報域(6 byte)とモデル情報域へのポイント(3 byte)を持たせる場合
- (C) 採用方式

図11 画面使用率とメモリー量
 Fig. 11 Relations of used-screen ratio and memory.

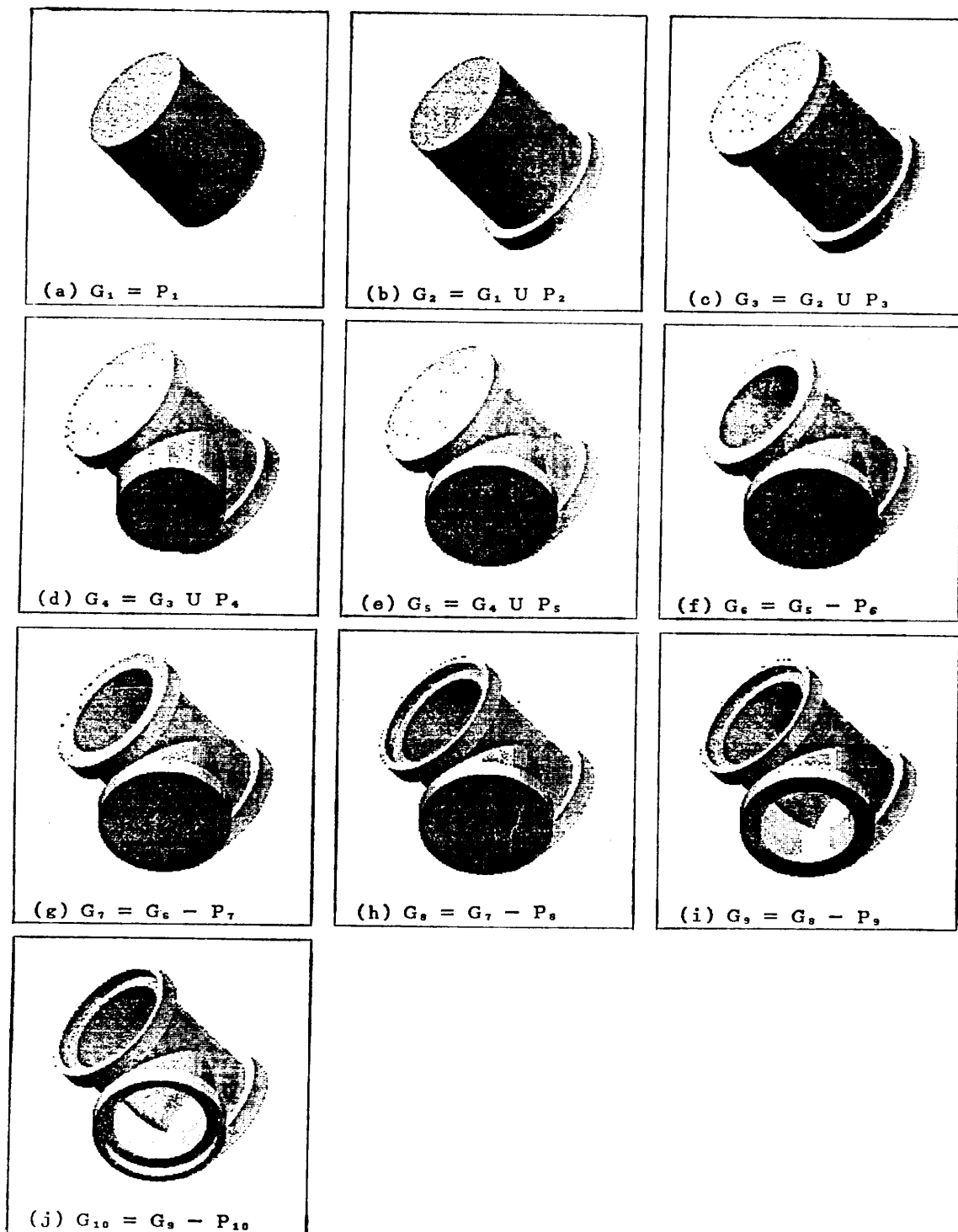


図 12 逐次表示例

Fig. 12 Examples of the successive display.

て、任意の方向から平行投影しても形状定義域の全域が収まるように表示尺度を与えると (図 10), 画面使用率は最大約 65% になる. 一方, (A) 全面素に深さ情

報域と第一ブロックのモデル情報域を持たせる場合, (B) 全面素に深さ情報域と, 第一ブロックのモデル情報域へのポインタを持たせる場合, (C) 採用方式の三

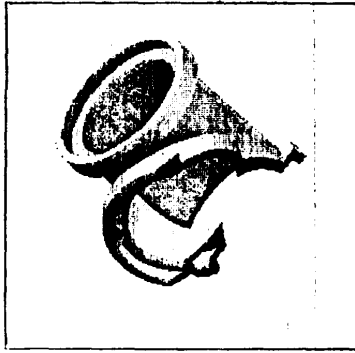


図 13 切断表示例

Fig. 13 An example of the cut-away display.

者、画面使用率に対する、第一ブロックまでのメモリ量を比較すると図 11 のようになり、採用データ構造の妥当性が言える。

3.3 拡張機能

拡張デプスバッファは、3次元画像の一種であるため、これを用いて以下の機能を実現できる。

- (1) 切断表示 (cutaway)
 - (a) 視点からの深さによる切断
 - (b) 任意の曲面による切断
- (2) 透過表示
 - (a) 全透過 (transparency)
 - (b) 半透過 (translucency)
- (3) 影付け (shadowing)

これらは、EDB を変化させることなく実行される。例えば(1)では、面素ごとに、切断面がどのブロック内またはブロック間にあるかを調べ、あらかじめ設定された切断面色、あるいは当該ブロック前面のモデル情報を基に得られる色を表示する。

4. テスト結果

前章で示した表示法を、HITAC M200-H/IAP 上でプログラム化し、テストを行った。図 12 に表示結果を示す。この例では 10 個のプリミティブからなるモデルを 256×256 画素の画面に平行投影している。処理時間は、1 プリミティブあたり 5~25 秒 (平均 10

秒)、画面使用率は 43%、EDB メモリーの使用量は約 615 kbyte であった。同図(h)~(i)で、隠面再生が行われている。また、図 13 は画面上でモデル表面上の 3 点を指示し、それらを通る平面によって切断表示したものである。

図 14 に 3.1.2 で示した EDB 法の各部分処理の処理時間が、全体で占める割合を示す。EDB 法と光線追跡法とを比較すると、部分処理 B2, B4 および B5 の一部 (最終的には隠れる部分の輝度計算) が EDB 法固有であり、逐次表示等の機能実現のためのオーバーヘッドである。しかし逐次表示機能のため、モデル変更時の表示時間は光線追跡法に比べ極めて少ない (形状の複雑さ、追加プリミティブの表示面積によって異なるが、[光線追跡法処理時間/プリミティブ個数]×2 程度)。ただし、対話処理の応答時間としては、約一桁程度大きいものと考えられる。

5. むすび

本研究では、CAD における人間と計算機のインタフェースとなり得る、CSG モデルの表示法を開発した。本論で述べた拡張デプスバッファ法による CSG モデルの表示は、

(1) プリミティブの入力ごとの逐次表示を可能としたため

- モデルの把握が容易である。

- 表示待ち時間が分散されるため、通常の表示法に比べ思考が途絶えない。

(2) CAD で最も良く使われる平行投影を標準とすることにより、メモリー使用量を比較的少なくし得た。

(3) 画面座標を入力することにより、プリミティブ、プリミティブ構成面を指示することができ、モデルの持つ情報を参照できる。

等の特徴を持つ。

今後の課題は、処理の高速化、パッチによる表示法との整合等にある。

謝辞 最後に、本研究について、様々な御教示をい

B1	B5	B2	B4	B3	その他
(49.6%)	(15.2%)	(12.7%)	(8.3%)	(5.2%)	(8.1%)

• B1~B5は3.1.2の処理手順に対応する。

図 14 処理時間分布

Fig. 14 Detail of processing time.

ただいた北海道大学工学部の沖野教郎教授，並びにご
討論いただいた（株）日立製作所日立研究所の各位に
感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 沖野：自動設計の方法論，pp. 72-111，養賢堂，東京（1983）。
- 2) 日立評論 小特集 CAD/CAM 技術，日立製作所，pp. 1-32（Mar. 1983）。
- 3) 鈴木，木村：プロダクトモデルに基づく機械組立品の表現と設計自動化への応用，情報処理学会グラフィックスと CAD シンポジウム資料，pp. 99-108（1984）。
- 4) Ishida, T. et al.: Detection of Unanticipated Functions of Machines, *Proc. of ISDS*, pp. 21-26 (July 1984).
- 5) Foley and Dam: *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*, p. 560, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts (1982).
- 6) Atherton, P.R.: A Method of Interactive Visualization of CAD Surface Model on a Color Video Display, *Comput. Gr.*, Vol. 15, No. 3, pp. 279-287 (1981).
- 7) 森本ほか：拡張デプスバッファを用いたソリッドモデルの隠面消去，再生アルゴリズムの開発，第 26 回情報処理学会全国大会論文集，pp. 1439-1440（1983）。

（昭和 60 年 7 月 24 日受付）

（昭和 61 年 11 月 5 日採録）



川島 泰正（正会員）

昭和 32 年生。昭和 58 年北海道大学工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年（株）日立製作所入社。現在日立研究所において、機械系 CAD システムの図形処理関係の研究に従事。精密工学会会員。



太田 吉美

昭和 24 年生。昭和 49 年電気通信大学修士課程修了。同年（株）日立製作所入社。現在，日立研究所主任研究員。機械系 CAD，コンピュータ・グラフィックスの研究に従事。日本機械学会，SIGGRAPH 各会員。



徳増 真司

昭和 15 年生。昭和 38 年 3 月，横浜国立大学電気工学科を卒業後，同年 4 月日立製作所に入社。以後，CAD/CAM/CAE を含む，技術分野での計算機利用技術の研究に従事。現在，日立製作所日立研究所主管研究員。工学博士。主なる報文：「幾何モデリングシステム HICAD の開発」日立評論（58 年 3 月），「ソリッドモデリングの現状と可能性」防衛技術（60 年 6 月）。電気学会，OR 学会各会員。