面図形援助による複合形状設計 (第1報)*

——形状設計向き表示装置——

井 越 昌 紀**

Combined Shape Design Aided by
Surface Pictures (1st Report)
—A Shape Design Oriented Display Unit—

Masanori IGOSHI

When a product is designed in the initial design phase, the designer envisages the whole product from a specified point of view and determines an outline while mentally balancing the function and shape. If a realtime and realistic image of the intended object is obtained during this phase, even if it is not strictly accurate, this image will enhance the quality and productivity of the design. On this assumptions, this paper describes firstly that, for a prompt shape representation, a graphics

loop should be separated from the conventional design loop in which a representation is carried out after obtaining a data structure for design and manufacturing, and secondly describes that adding to line pictures, surface pictures are effective for an intuitive grasp of the intended object. Then it points out that a 3-dimensional plane interpolation is effective for hidden line and surface elimination, and it proposes a representation set operation. Finally, it reports on the development of a new shape design oriented display unit and its representation examples.

Key words: initial product design, hidden line, hidden surface, computer graphics, plane interpolation, set operation, display unit.

1. 緒 言

製品の設計から生産まで計算機援助の下で行っていくための多くの試みがなされている。なかでも、生産する製品形状のデータベースを得る研究は重要であり、このため幾何モデル創成に関しては、形状記述からデータベース構築の手法まで各種の研究が行われている^{1)~4)}。現在までの研究の多くは、設計・生産のためのデータ構造に関心が払われ、人間-機械系における両者の役割をも考慮した対話性に重点を置いた研究は少ない⁴⁾。

工業用製品、家電製品、事務機械などのような製品は、自由曲面を含む多数の部品から成る形状の複合体である。このような製品の形状設計は、人が製品の持つ目的を全体的に把握しつつ、多くの経験の背景の下に感覚的に機能と形状のバランスを取りながら設計を進める初期設計過程と、その後の詳細設計過程とに分けられる。初期設計過程は、設計全体の中でも人の判断、意志決定が大きな役割を果たす部分であり、それ以後の設計・生産過程に大きな影響を及ぼす。この過程においては、幾何モデルを表示する表示装置に対しても一定の機能が要求される。

本報告においては、初期設計過程における表示装置の条件について考察し、それに基づいて立体表示専用のグラフィックスループの存在が必要であることを指摘し、このループの中で用いられる表示の基本となる平面補間機構、設計・生産のためのデータ構造の変更を伴わない形状の集合演算のアルゴリズムについて述べ、これらの機構とアルゴリズムに基づいた形状設計向き表示装置を試作し、その装置での基本的な表示例を示す。

2. 形状設計向き表示装置の条件

製品とは立体的なものを対象とするから、ここでいう形状とは三次元立体形状を指すものとする。形状設計の計算機援用方式において、表示装置の重要な役割は、①設計者が意図して入力した指示に基づいて変更された幾何モデルの立体表示が、設計者の直観的な理解に足る姿で出力されること、②設計者は幾何モデルを思うような位置姿勢で、思うような部分だけ表示装置を通して即座に見ることができること、さらに形状の初期設計にとって表示装置の果たす役割という点から見ると、③対象とする形状全体の中での部分形状の空間的相対位置を設計者に容易に分らせること、④曲面を中心とする意匠形状の表現を写実的に行い、人の美的評価を得やすい条件を作ること、⑤形状設計という作業の中で、形状の集合演算は重要な道具であり、この作業を円滑に行うための手段を提供すること、である。このためには以下のような

* 原稿受付 昭和55年1月14日。昭和54年度精機学会春季大会学術講演会(昭和54年3月28日)にて発表。

** 正会員 (財)機械振興協会技術研究所(東久留米市八幡町1-1-12)

な条件が必要である。

2.1 立体表示

三次元形状を直観的に立体把握させるためには、一定の立体表示のための手法が必要である。この手法としては一般に、隠れ線・隠れ面消去処理、透視変換、奥行き輝度変調、動的な回転表示、中間調面図形表示、立体視法などがある。この中で、形状が複雑になり、曲面をも含むものになると、隠れ線・隠れ面消去処理をしない図形では線が錯綜し、どのような立体形状かの把握が難しくなる。この意味で、隠れ線・隠れ面消去処理は、直観的な形状の把握にとって重要な条件となる。

2.2 動的な表示

人の感覚・経験に基づいて創造的に形状設計が進められる設計の初期過程においては、入力した指令に基づいて変更された幾何モデルの表示が、人の形状設計の創造性を阻害しない程度に早いことが望ましい。早さに関する一つの目安は、動的な形状変化が可能ということである。複雑で曲面も入っている形状の立体表示を、今までのような探索的隠れ線消去法⁵⁾によって行うのでは時間がかかり、対話的な設計の中で使うには難がある。隠れ面消去は、このようにして得られた隠れ線消去された図形に対して施すことにより得られるが、これではさらに時間がかかり動的な表示は望めない。

形状の初期設計においては、対象とする全体形状の中での局部の変更が主体であることを考えると、全体の形状を動的に変化させる必要はなく、変化させる部分のみ動的な変化が可能であれば多くの場合十分である。この全体の中で、部分の変更が立体的に動的に行えることが一つの条件である。

2.3 線図形と面図形表示

形状設計において線図形は特徴的、計量的、分析的であるから他と区別する能力に優れ、面図形は写實的、実在的、総合的であるから形状の実在部の直観的伝達力に優れる。

多面体とか単純幾何形状の組合わせから成る形状設計にあっては、輪郭線や稜線などの特徴線が決めやすいため、特徴線を隠れ線表示を行ったうえで表示することにより十分直観的に立体感覚を得ることができる。

一方、線図形を用いた曲面の表示は、地図の等高線のように、曲面を平行な少しずつ位置の異なる断面で切断し、その断面曲線を複数表示したり、曲面がパラメトリックに与えられているときは、曲面を規定する二つのパラメータの一方を固定し、片方を動かしたときの曲線を複数重ねて表示する手法が用いられる。しかしいずれの表示も、人の美感による判断を得るためには十分ではなく、この場合にはより写實的な中間調による面図形が良

図1 線図形と面図形の干渉

い。

このような二者の異なった表示機能に加え、線図形は本来なら隠れるべき部分をも表示することができ、面図形は実在部を明確に示す機能があるから、面図形で表された実在部に対して、線図形を用いて隠れるべき線をも表示することにより、干渉などの空間的相対位置関係を視覚的に知らせることができる。図1に例を示す。

初期設計に要求される表示の機能を満足させるためには、以上のように線図形に加え面図形を表現できることが有効であると考えられる。しかし、今まで面図形が初期設計段階で用いられず、最終的な形状評価の段階で、形状確認や、グラフィック製品を得るような感覚で用いられてきたのは、これまでの計算機援用の設計ということと詳細設計から始まり、全体を把握して形状設計を行うという初期設計の考え方が明確でなかったからであると考えられる。

2.4 集合演算

この集合演算は基本的に二つの形状間の演算であり、通常、集合演算を記述したプログラムのレベルから始まり、最終的に2形状間の交線などを求めて規定のデータ構造を作り、その一部として表示処理を行い表示する。しかし例えば、多数の穴が明けられた曲面などの場合、データ構造は大きくふくらみ、処理時間もかかる。初期設計の表示のためには、すべての交線を厳密に求めてから表示したのでは遅い。このため、集合演算を表示のうえで補助できることが一つの条件である。

3. グラフィックスループ

これまで述べたように、初期設計における形状の表示は、製品を生産する前に人の目に写って、人が意図している対象形状を、即座に、直観的に立体表示することに意味がある。このためには、必ずしも今までのような設計・生産のための厳密なデータ構造を作り、その結果として表示モデルを作るデータベースループは、特に複雑な形状を扱う場合、処理時間、データ構造の増大の点から見て効果的な方法とはいえない(図2参照)。

図2 グラフィックスループ

この形状の表示処理を、前述の条件の下で独立して持たせることにより、初期形状設計における立体表示の質および応答速度が改善されることが期待できる。この目的のための表示データの流れをグラフィックスループと呼ぶことにする。しかし、このループを通過して作られたデータは、必要に応じ設計・生産のためのデータ構造を構築できるように支援されていなければならない。すなわち、グラフィックスループの機能は、①線・面図形による立体表示、②対象とする全体形状に対する部分形状の動的変更、③形状の表示集合演算(第5章)、であると規定できる。

4. 形状表示のための三次元平面補間

グラフィックスループの中では、形状の種類を問わず、形状表示のための条件を満足するような機能が必要となる。この機能を可能にする基本的な機構が三次元の直線補間、平面補間である。三次元形状は曲面の場合においても分割を十分細かくすれば多くの平面で近似できる。平面補間は、直線補間で作られた閉な部分をぬりつぶす補間を考えれば十分である。二次元の平面補間は容易であるが、三次元の平面補間は、深さと輝度を考えなければならない。三次元面の補間に関しては、コンピュータグラフィックスの分野で、smooth shadingなどの研究の中で扱われている⁶⁾。しかし、これらの方法は滑らかな曲面を表示したり、コヒーレンスを利用した表示方式などのため、線図形と面図形の混合した多量の図形表示には向かない。

形状設計のための平面補間として、深さ Z と輝度 B などの表示属性をも補間し、これをラスタラインの各画素に対応した画像メモリ(ピクセル)に、第5章で述べる表示演算を行ったうえで格納する。画素ごとに深さを考慮したものをデプスバッファと呼び、基本的な考え方は従来からあり、ソフトウェアで補間を行って面図形を得ることが可能である。しかし、本平面補間機構は以下に述べる補間をハードウェア化し、さらに表示演算も同時に行わせ、多角形の点列のみから高速に平面補間を可能にした。

まず、空間的に同一平面内にある多角形が、 X, Y, Z, B の要素を持つ点列として与えられる。次に、隣接する

Z : 深さ, B : 輝度, P_s : X 方向補間開始, P_e : X 方向補間終了

図3 三次元平面補間

図4 平面補間による隠れ線消去

点列間を輝度 B の補間を含む三次元直線で補間する。具体的には、まず Y 方向の最下点を含む2本の直線が与えられると、 X, Y, Z, B の4つの要素を持つ2組の直線補間機構に Y 方向の最下点が設定される。次に、両補間機構が Y 方向に一つだけ増加するまで補間し、そのときの位置 P_s, P_e に Z と B を表示演算したうえで格納する。次に、 P_s, P_e の間をラスタ方向に1組の直線補間機構で補間する。この結果を該当する X, Y の位置に表示演算をしたうえで格納する。この手順を Y 方向に順次データ終了まで行う。以上の補間をここでは多角形の平面補間と呼び、さらに次章で述べる瞬時表示演算のデータとなる。図3に平面補間の関係図を示す。

この平面補間において、はじめの直線補間を高輝度にし、ラスタ方向の補間で得られる中間の面を輝度0にすると輪郭線だけが表示される。しかし、内面はすべて深さ情報を持っているから、隠れ面処理の延長として隠れ線処理をとらえることができ、両消去処理を統一して行うことができる(図4参照)。

写実的な面図形を得るためには一般に、平面補間を行う際、光の反射を考慮した輝度を与えてやればよい。一番簡単な方法は視点の方向から光が来るとした場合である。多面体をこのような方法で表示すると隣接した面の輝度が同じになり立体感が失われる場合がある。このように立体でありながら輝度が同じである図形に対しては、稜線を線図形で緑取りすることにより、実在感のある形状表示が得られる(図5参照)。

図5 線図形による面図形の縁取り

点列が与えられてからの表示演算を含めた補間の速度は、補間する面の面積にほぼ比例し、1ピクセル当たりの補間は800 nsで行われる。255×255ピクセルを持つ画像メモリー全面の補間時間は、本ハード機構で約50 ms, ECLIPSE 130のアセンブラレベルでのソフトで3.2 sであった。

5. 表示演算

平面補間で触れたように、形状設計にとっての表示には表示される形状間どうしの集合演算が必要である。一般に、集合論的の形状演算を行う場合、もとなる形状と、それに働きかける形状の二つを考えればよい。このとき、前者を累積形状 S_a と呼び、後者を参照形状 S_r と呼ぶことにする。すなわち、 S_a と S_r における形状演算とは新たな累積形状 S_a' を得るもので、

$$S_a' = S_a \& S_r \quad (\& \text{は形状演算子})$$

を言う。二つの形状が与えられたとき、どちらが累積形状でどちらが参照形状かは形状演算を考えたときの便宜のためで本質の違いはない。

一方、初期設計過程における表示に関しては、厳密な計算を必要とする形状演算を行わなくても、目に見える部分について必要な精度で演算をすればよい。目に見える部分だけ画像メモリーの画素の粗さで形状演算を行うことをここでは表示(集合)演算と呼ぶことにする。この表示演算は応答速度の違いで二つに分ける。一つは累積形状 S_a に対応する表示形状 φ_a を得る累積表示演算であり、一つは新しい累積形状を得る前に、現在ある累積表示形状 φ_a に参照表示形状 φ_r を動的に位置変化することによって作用させ、両者の集合演算を伴った配置関係の観測をリアルタイムに可能にする瞬時表示演算である。

5.1 瞬時表示演算と累積表示演算

瞬時表示演算のためには、 φ_a と φ_r を格納する二つまたは三つの画像メモリーを必要とする。この演算は、

$$\varphi_a \Phi \varphi_r \rightarrow \varphi_d \quad (\Phi \text{ は表示形状演算子})$$

で表される。ここで φ_d は表示するために表示装置に送られる表示形状である。通常 φ_a には累積形状が面図形

(a) 処理前

(b) 和表示演算

(c) 差表示演算

図6 表示演算

で入り、 φ_r としては動的な変化ができることが望ましいから線図形または比較的複雑でない面図形が望ましい。

累積表示演算とは φ_a を得る演算で、新しく得られた累積表示形状を φ_a' とすれば、

$$\varphi_a' = \Phi'(\varphi_a, \varphi_r, S_a, S_r)$$

で表される。図6の(a)に関係図を示す。これらの表示演算においては、形状 S と表示形状 φ には

$$\varphi_a \subset S_a, \quad \varphi_r \subset S_r$$

なる関係があり、さらに形状 S は可視側 S_+ と不可視側 S_- とが容易に計算できるものとし、これに対応した表示形状の可視側を φ_+ 、不可視側を φ_- とすることにす。

5.2 和表示演算

形状演算では $S_a \cup S_r$ に相当する。表示演算では、和集合が実体のうちで大きな部分をとる集合であることから、同一ピクセルにおいて最も大きな Z の値を持つ画素を採用すればよい。すなわち、

$$\begin{aligned} \varphi_a' &= \{P \mid \text{MAX}\{Z(\varphi_a), Z_1(S_r), \dots, Z_n(S_r)\}\} \\ &= \{P \mid \text{MAX}\{Z(\varphi_a), Z_1(S_{r+}), \dots, Z_n(S_{r+})\}\} \end{aligned} \quad (1)$$

この和表示演算はとりまなおざり隠れ面消去に利用できる。瞬時表示演算は式(1)において参照形状から得られる φ_r を独立して持たせ、表示するときに、

$$\{P \mid \text{MAX}\{Z(\varphi_a), Z(\varphi_r)\}\} \quad (2)$$

を行えばよい。ここで φ_r は三次元線図形でもよい。図6の(b)に和表示演算を示す。

5.3 差表示演算

形状演算では $S_a - S_r = S_a \cap \bar{S}_r$ ($\bar{S}_r$ は S_r の補集合) に相当する。表示演算においては、 S_a, S_r は自分自身で交差しない曲面群でなければならない。この条件は、適宜

厳密なデータベースループを通すことにより、設計・生産用の形状データ構造を得ることによって作ることができる。この演算は、 S_a と S_r がともに凸形状であれば、和表示演算と同じスピードで演算できるが、一般に S_r を除去することにより S_a のうちで隠れていた部分が現れてくる。これを考慮し、差表示演算は二つのフェーズに分けて演算を行う。

a) ウィンドウ検出フェーズ： 除去形状 S_r のうち、累積表示形状 φ_a より Z の小さな画素の中で、各ピクセルごとに Z の最大のものを参照画像メモリーに格納し φ_r とする。すべての S_r について行った後で、 φ_{r+} が残ればそこはウィンドウピクセルであり、次の処理の対象となり、 φ_{r-} が残ればそこは φ_a のままとする。

アルゴリズム： すべての $P \in S_r (= S_{r+} \cup S_{r-})$ において、もし $Z(\varphi_a) > Z(S_r)$ ならば

$$\varphi_r = \{P \mid \text{MAX}\{Z_1(S_r), \dots, Z_n(S_r)\}\} \quad (3)$$

b) 切断面処理・背景表示フェーズ： 除去形状 S_r によって切り取られた部分は φ_a の後に隠れている S_a にも関係し、 S_a の中にも切断されたり、ウィンドウが開かれることによって見える部分が出てくる。このフェーズにおける処理は、すべてのウィンドウ領域 φ_{r+} に対して、すべての S_a を各ピクセルごとに比較し、 S_a のうち φ_{r+} より Z の小さなものの中で最大のものを φ_i を累積画像メモリー（または一時画像メモリー）に格納する。 S_{a+} に対応する φ_{i+} が残れば φ_{i+} が表示される。 S_{a-} に対応する φ_{i-} が残れば φ_{r+} が採用され切断面となる。 S_a が影響を及ぼさなかった φ_{r+} の部分は後まで見通せる空なウィンドウとなる。

アルゴリズム： すべてのウィンドウピクセル $P_r \in \varphi_{r+}$ において、すべての $P_a \in S_a (= S_{a+} \cup S_{a-})$ を P_r 上に作用させ、もし $Z(\varphi_r) > Z(S_a)$ ならば

$$\varphi_i = \{P \mid \text{MAX}\{Z_1(S_a), \dots, Z_n(S_a)\}\} \quad (4)$$

c) 後処理： 二つのフェーズの処理が終了したら、 φ_{r+} と φ_{i+} とを累積画像メモリーに移すことにより新たな累積表示形状 $\varphi_{a'}$ を得ることができる。ここで、 φ_{i+} を一時画像メモリーを設けてそこに格納すれば、瞬時表示演算が可能である。累積表示形状 $\varphi_{a'}$ は

$$\varphi_{a'} = \varphi_a \cup \varphi_{i+} \cup \varphi_{r+} \quad (5)$$

で与えられる。ここで φ_a は φ_a の中で φ_{r+} の影響を受けなかった部分であり、 φ_{r+} は φ_{r+} のうちで切断面と見なされた部分である。 φ_i は S_a のうちで除去により現れた部分である。図6の(c)に差表示演算の説明図を示す。

5.4 積表示演算

形状表示演算では $S_a \cap S_r$ に相当する。これは $\bar{S}_r$ を用いた差表示演算が S_r の補集合を使うのに対し、そのま

図7 形状設計向き表示装置ダイアグラム

ま S_r を用い5.3節のアルゴリズムを適用する。この演算は形状の切断、あるいは形状の純粋な演算を行うときに利用できる。

5.5 組立表示演算

表示演算としては5.2節の和表示演算がそのまま適用できる。形状のデータ構造上では、変わり部分がないから、単に隠れ線・隠れ面消去処理のみで、座標変換だけである。

6. 形状設計向き表示装置と表示例

以上の考察に基づいて、グラフィックスループにおける諸機能を働かせる表示装置を試作した。これは、ランダムスキャンのCRT表示装置をもとし、ラスタスキャンをシミュレートさせ、三次元直線補間、平面補間機構、表示演算機構を組込んだ。ランダムスキャンCRT装置を用いたのは、画質の良い線図形が必要な場合のためである。図7に装置のブロック図を示す。ここでCPUはECLIPSE 130でメモリー容量256 Kバイト、56ビット2 Kワードのマイクロプログラムを有し、三次元座標変換、クリッピング、平面補間初期処理を行わせている。

図8 曲面の平面による切断

図9 差表示演算

この装置の累積画像メモリと参照画像メモリは、表示演算の累積表示形状と参照表示形状の格納に用いられるが、これはそのまま初期形状設計過程における、対象とする全体形状を格納するメモリ、変更する部分形状を格納するメモリに相当する。

この装置により曲面を累積画像メモリ上に創成し、それを参照画像メモリ上に創成した平面で和表示演算を瞬時表示演算のモードで行い切断処理を行っている。処理時間は平面をタブレット上のスタイラスペンに滑らかに連動させて動かせる程度に動的である（図8参照）。

図1、図4、図5も本装置により得たものである。

図9は累積表示形状Bから、参照表示形状Aをスタイラスペンに連動させて動かし、リアルタイムに除去している例である。

7. 結 言

本研究においては、製品の形状設計は初期設計過程と詳細設計過程に分けて考えられるが、特に初期設計過程においては形状表示装置に対し、立体表示性、線図形・面図形の混合した扱い、動的変更、集合演算などの機能を持つことが条件であるとし、以下の結果を得た。

- (1) 製品形状の初期設計過程においては、人の創造力を助長する形状表示が必要で、このためには、従来の設計・生産のデータを扱うデータベースループとは別に、形状表示専用のデータを扱うグラフィックスループを持つ必要がある。
- (2) 初期設計過程における形状の表示は、区別能力に優れる線図形表示に加え、実在的表示力に優れる面図形表示が有効であること、さらに、立体表示のための隠れ線・隠れ面消去処理を、三次元平面補間機構を用いて容易に扱えることを示した。
- (3) グラフィックスループにおいて高速に形状の集合演算の表示を行う表示演算を提案し、和、差、積、組立のアルゴリズムを導いた。
- (4) グラフィックスループの諸機能を実現するための形状設計向き表示装置を試作し、三次元平面補間機構、ならびに累積画像メモリと参照画像メモリを有する本装置が、高速表示に有効であることを、切断面が動的に得ることができることで示した。

謝 辞

この研究は1978年から3か年計画で進めているCOSMOSシステムの成果の一部であり、ハードウェアの製作を行った小西和正氏、マイクロプログラムでのプログラムを行った小沢正照氏、研究の円滑な遂行にお世話いただいた鋤柄重雄技術部長、まとめるに当たり助言をいただいた神戸大岩田一明教授に深く感謝申し上げる。

最後に、この研究は(財)日本自転車振興協会の補助金を受けたものであることを付記する。

文 献

- 1) N. Okino, Y. Kakazu & H. Kubo: TIPS-1: Technical Information Processing System for Computer-aided Design, Proc. 2nd PROLAMAT Conf., (1973) 141.
- 2) I. C. Braid: Designing with Volumes, Cantab Press, Cambridge, (1973).
- 3) H. B. Voelcker & A. A. G. Requicha: Geometric Modeling of Mechanical Parts and Processes, Computer, 10, 12, (1977) 48.
- 4) M. Hosaka & F. Kimura: An Interactive Geometrical Design System with Hand Writing Input, Information Processing 77, IFIP, North Holland, (1977) 167.
- 5) L. E. Sutherland et al.: A Characterization of Ten Hidden-surface Algorithms, Comput. Surv., 1, March (1974) 1.
- 6) B. T. Phong: Illumination for Computer Generated Pictures, CACM, 18, 6, (1975) 311.