

# 基本立体を外包する自由曲面形状の自動生成手法

小笠原 耕太郎<sup>†</sup> 小堀 研 一<sup>††</sup>

本論文は、意匠設計におけるコンピュータを用いた自由曲面構築の一手法を提案したものである。一般に、意匠設計において自由曲面を入力するのは困難である。この問題を解決するために、筆者らは、三次元空間上に配置された単純な多面体（基本立体）群から、それらを覆う製品の外形形状にあたる初期自由曲面形状を自動生成する手法を開発した。この手法で生成される形状は、造形過程での製品の最終外觀形状の初期形状として利用される。そのため、その生成された形状を容易に修正できることが重要である。そこで、基本立体の重心位置と各頂点に与える曲率半径により定義されるカーブネットワークによりすべての基本立体を包含する形状を構築する。初期自由曲面形状は、このカーブネットワークを内挿することにより生成する。このように、本処理の大半は曲線上で処理されるので、処理の高速化が実現でき、また、最終形状データの修正作業が容易になると考えられる。

## An Automatic Generation Method of Free-form Surfaces which Envelop a Set of Primitives

KOTARO OGASAWARA<sup>†</sup> and KEN-ICHI KOBORI<sup>††</sup>

In this paper, we propose a method of free-form surface construction for conceptual design. In general, it is difficult to construct the free-form surfaces in such design process. In order to solve this problem, we have developed a method to generate initial free-form surfaces which envelopes simple polyhedra (called primitive) group arranged in a three-dimensional space. This generated shape by the method is used as an initial shape of an external shape of a designing product. Therefore, it is important to be able to manipulate the generated shape easily. In our method, the shape which envelopes all primitives is constructed by a curve network that is defined by the center of gravity and assigned radiuses of curvature to vertices of the primitive. The initial curved surface shape is generated by interpolating this curve network. As the greater part of this process manages only curves, we can realize a high-speed execution and an easy modification of the result shape data.

### 1. はじめに

近年の付加価値を重んじる消費者ニーズから、商品においてデザインの質が求められるようになってきている。このようなニーズ動向をふまえ、工業製品の外觀形状で自由曲面が使用される頻度が高くなり、自由曲面を簡易にコンピュータに入力できるようになっている。ところで、工業製品の意匠設計部門での三次元形状設計、すなわち、3次元CADシステムの使われ方は、紙やモデル等で形状の詳細化を行った後、その詳細化された形状を図面化しこのデザイン図面

を基にCAD入力を行っているのが一般的である。製品形状に自由曲面が多く用いられてくると、設計者のイメージである自由曲面を図面化すること自体が難しく、また、情報の欠落が生じてしまう。このような状況の中で、デザイン図面を作る前の形状の詳細化を行う段階からCADシステムを使用する必要性が生じている。この時点での製品形状は製品の機能仕様等から得られる漠然としたイメージであり、形状の細部の詳細化は行われていない。現在のCADシステムが持つ自由曲面の入力手法は、形状が詳細化された後に入力することを前提に作られたものであるため、この段階での形状入力手法としては適さない。また、形状が詳細化されるほど、形状入力の負荷はそれに比例して増大してくる。そこで、形状が詳細化される初期の段階に自由曲面形状を簡易な手段によりコンピュータに入力させ、その後、CADが持つ強力な形状修正、および確認機能を利用し、形状の詳細化を行わせることが

<sup>†</sup> 長崎県工業技術センター基盤技術部  
Basic Technology Division, Industrial Technology Center of Nagasaki

<sup>††</sup> 大阪工業大学情報科学部  
Faculty of Information Science, Osaka Institute of Technology

最適であると考え、形状入力後の容易な形状入力作業が可能で工業製品の初期外形形状のモデリング手法の開発を行った。

## 2. 従来手法と基本立体を用いた入力手法

### 2.1 従来手法の問題点

意匠設計の初期の段階では、設計者の製品に対するイメージは製品の機能仕様から得られる細部の詳細化されていない未確定の漠然としたものである。また、この時点では形状の細部は考察されていないのであるから、そのイメージは製品形状全体を捉えたものである。したがって、この段階の入力手法に要求される機能としては、漠然としたイメージの入力と形状(製品)全体を考慮した入力が望まれる。

ところで、従来、広く一般に用いられてきた自由曲面の入力手法は、何本かの形状の特徴を表す特徴曲線を設計者に入力させ、この曲線を内挿し自由曲面を生成しようとするものである<sup>1),2)</sup>。この手法は形状が詳細化された後、すなわち図面化された段階での局所的な入力には有効であるものの、形状の未確定な段階での形状全体を考慮した入力には適さない。

形状全体を考慮した入力に対応した手法としては、形状全体を表す多面体を設計者に入力させ、この多面体を丸めることにより自由曲面を生成する手法(Subdivision Surface)が知られている<sup>3)~5)</sup>。多面体は自由曲面や自由曲線そのものを修正するよりは容易な修正が行えるため未確定な形状の詳細化には適したものであるが、やはり多面体の入力作業自体は設計者に負担のかかるものである。また、電荷と電界強度の等しい点により表面を定義するメタボールと呼ばれるプリミティブを、空間上に複数配置し融合させ合うことにより自由曲面形状を生成する手法(Implicit Surface)も知られている<sup>6),7)</sup>。メタボールの配置と融合により感覚的なモデリングが行え、自然物のような有機的形狀のモデリングには特に有効ではあるが、工業製品で使用される数学式により制御された形状の生成は困難であり、CADデータとして使用するためにはポリゴン面に変換する必要もあるため、工業製品のモデリング手法としては適さない。

### 2.2 基本立体を用いた入力手法

前記の従来手法の問題点を解決し工業製品の意匠設計に適したモデリング手法として、3次元空間に配置された単純な多面体(以下、基本立体と呼ぶ)を用いる漠然としたイメージを入力する手法が提案されている<sup>8),9)</sup>。設計者のイメージした形状はこの配置された基本立体群を覆った形状として定義され、基本立体群

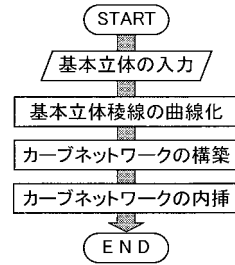


図1 処理フロー図

Fig.1 Overview of the method.

から製品の外形に相当する初期形状を自動生成するものである。実際の製品の外観はその内部の複数の機能部品を覆う形状から成り立っているが、この基本立体群は機能部品を単純化したものと考えられる。この手法は、工業デザインの形状設計の効率化を実現する有効な手法ではあるが、従来手法では多数の平面により構成された多面体が生成されるため、生成後の形状修正が困難になるという問題があった。そこで、本論文ではこの問題点を、カーブネットワークによる初期自由曲面形状の構築により解決することを提案する。また、カーブネットワークを基本立体の重心と各頂点に与えられた曲率半径により定義することにより、設計者の容易な形状制御性を実現する。

## 3. 手法の概要

全体の処理の流れは、図1に示すように以下の3つのステップからなる。まず、3次元空間に単純な多面体である基本立体群を配置し、これら基本立体群の直線稜線の曲線化(基本立体稜線の曲線化)を行う。次に、生成された曲線稜線群を用いてすべての基本立体を包含したカーブネットワークを構築(カーブネットワークの構築)する。最後に、このカーブネットワークを内挿(カーブネットワークの内挿)することにより初期自由曲面形状を生成する。

### 4. 基本立体稜線の曲線化

基本立体を構成する直線稜線の曲線化を行う際、基本立体により表現される曲線稜線、すなわち、曲面体形状は設計者が推測しやすいものとするのが重要である。また、本研究の目的上、基本立体としては複雑な形状は適さない。そこで、本手法では、基本立体より表現する曲面体を、基本立体の各頂点により定義される重心から各頂点を固定して膨張させた形状とするのが自然であると考えた。そこで、基本立体は、すべての頂点が球体の表面上に存在し、かつ、球体の重心

を内部に含む凸多面体とする．このように定義した基本立体を構成する直線稜線を重心位置から膨張させることにより，曲面体を構成する曲線稜線を生成する．

4.1 曲線稜線の生成方法

直線稜線から曲線稜線への変換は，稜線の両端点に曲率半径を与え行う．変換後の曲線式としては，両端点で独立に曲率を与えることが可能な3次の有理ベジェ曲線を用いる．今，図2に示すベジェ多角形  $P_0, P_1, P_2, P_3$  が与えられているとき，両端で曲率  $\kappa_s, \kappa_e$  を持つ有理曲線の重み  $w_1, w_2$  は式(1)により得られることが知られている<sup>10)</sup>．このとき， $w_0 = w_3 = 1$  とし，また， $area(), dist()$  は指定された制御頂点による面積および距離とする．

$$c_s = \frac{area(P_0, P_1, P_2)}{dist^3(P_0, P_1)}, c_e = \frac{area(P_1, P_2, P_3)}{dist^3(P_2, P_3)}$$

$$w_1 = \frac{4}{3} \sqrt[3]{\frac{c_s^2 c_e}{\kappa_s^2 \kappa_e}}, w_2 = \frac{4}{3} \sqrt[3]{\frac{c_s c_e^2}{\kappa_s \kappa_e^2}} \quad (1)$$

本手法においては，両端点のみ既知であるので，以下のようにして，内部の制御頂点を与える．図3に示すように，重心から各両端点へのベクトル  $V_0, V_2$  それぞれに直交し各両端点位置を通過する直線を生成し，この2本の直線の交点  $P_1$  を求める．このようにして作成された  $P_0, P_1, P_2$  を，2次のベジェ曲線の制御頂点とする．ここで， $P_0, P_1, P_2$  が二等辺三角形を

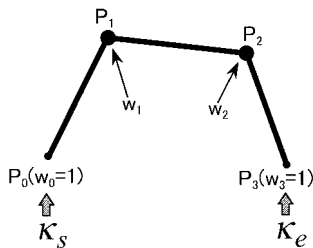


図2 有理ベジェ曲線  
Fig.2 Rational Bézier curve.

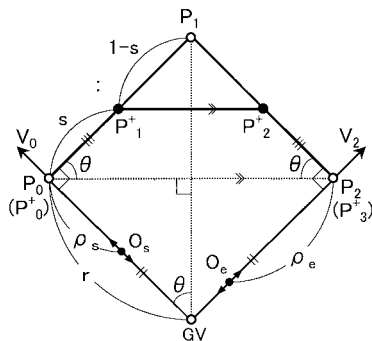


図3 制御頂点の生成  
Fig.3 Generation of the control points.

構成するとすると，各頂点の重みとして  $\{1, \cos \theta, 1\}$  を与えると円弧となることが知られている<sup>10)</sup>．ただし， $\theta = \angle P_2 P_0 P_1$  とする．設計者の把握しやすい形状を生成するため，この重みを  $P_0, P_1, P_2$  に与えて次数増加を行うと， $P_1^+, P_2^+$  は以下ようになる．

$$P_1^+ = (1-s)P_0 + sP_1, P_2^+ = sP_1 + (1-s)P_2$$

$$s = 2 \cos \theta / (1 + 2 \cos \theta) \quad (2)$$

このようにして得られた点  $P_0^+, P_1^+, P_2^+, P_3^+$  を3次の有理ベジェ曲線の制御頂点とし，これら制御頂点に式(1)を適用すれば，求める曲線が得られる．

4.2 生成曲線の評価と制御方法

本処理で用いる基本立体は，図3に示すように，重心から稜線の両端点への距離は等距離  $r$  となる．よって， $\rho$  を両端点に指定する曲率半径とすると，式(1)より  $w_1, w_2$  は以下のように表される．

$$w_1 = w_2 = 4\rho \cos^2 \theta (1-s) / 3rs^2$$

$s$  を式(2)で与え， $\rho = r$  とすると， $w_1 = w_2 = (1 + 2 \cos \theta) / 3$  となり，2次の円弧を表す有理ベジェ曲線を次数増加したときの重みと一致し円弧となる．また，曲率半径を  $\rho = 3r / (1 + 2 \cos \theta)$  と与えたとき，生成される曲線は多項式となる． $\rho = 0$  のときは，直線となる．このように， $\rho$  の値により設計者の推測しやすく自然な変化の形状が生成できることが分かる．実際の生成形状の制御は，設計者が自由に変更可能な  $\rho = tr (t > 0)$  の式で表されるパラメータ  $t$  (以下，曲率パラメータと呼ぶ) を各頂点に与え行う．

5. カーブネットワークの構築

曲線稜線化された基本立体群を内部に包含するカーブネットワークは，2つの凸包を融合することにより新たな凸包を生成する分割統治法<sup>11)</sup>を応用し算出する．その処理プロセスを図4に示す．最初に，すべての組合せの基本立体間で融合した際に内部に含まれる部分を削除した断面(以下，輪郭断面と呼ぶ)の算出を行い，その後，対応する立体の輪郭断面間に融合稜線と呼ぶ曲線を挿入しすべての基本立体を外包したカーブネットワークを得る．

5.1 輪郭断面の生成

5.1.1 輪郭点の算出

曲線稜線化された基本立体は単純な凸形状をしている．そこで，基本立体の輪郭断面の境界稜線(以下，輪郭稜線と呼ぶ)は，基本立体の重心間のベクトル(以下，視線ベクトルと呼ぶ)と重心で定義される平面上に生成する．まず，この平面と基本立体の曲線稜線との交点(以下，輪郭点と呼ぶ)をすべて算出する．このとき，基本立体の曲線稜線も，この輪郭点で重心方

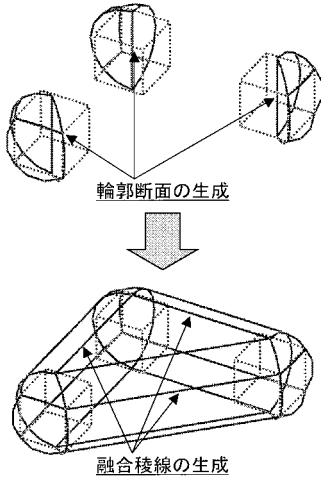


図4 カーブネットワーク構築プロセスの生成例

Fig. 4 Example of shapes generated in the generating a curve network process.

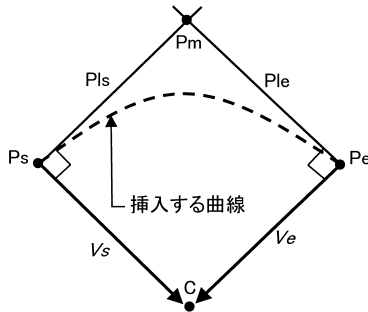


図5 輪郭稜線の生成

Fig. 5 Generation of silhouette edges.

向に曲率中心を持つように再生成する。

5.1.2 輪郭稜線の生成

輪郭稜線は前処理で求めた輪郭点間に曲線を挿入することにより得られる。4.1 節で述べたように、輪郭点すなわち基本立体の頂点位置には重心方向を曲率中心とする主法線ベクトルを持たせるので、未知となるベジェ曲線の内部の制御頂点を与えれば算出できる。図5に示すように、 $P_s, P_e$ を輪郭点、そして、 $C$ を曲率中心(重心)とする。 $P_s, P_e$ 間の未知の内部の制御頂点は、視線ベクトルと $C$ で定義される平面上で $V_s, V_e$ の垂線間の交点 $P_m$ を求め、 $P_s, P_m, P_e$ を二次の制御頂点として次数増加し与える。このようにして得られた制御頂点に式(1)を適用すれば求める曲線が得られる。

5.1.3 輪郭断面の生成

前処理で得られた基本立体間の輪郭稜線のループ(以下、輪郭稜線ループと呼ぶ)で曲線稜線化された基本立体をそれぞれ2分割し、分割された立体のうち

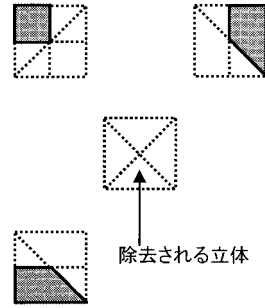


図6 輪郭断面の生成

Fig. 6 Generation of silhouette faces.

輪郭稜線ループ間に含まれる不要な立体を削除する。以上の処理をすべての組合せの基本立体間で行うことにより、融合対象の基本立体と向き合った輪郭断面が得られる。この処理過程で、すでに不要部分が削除された基本立体に対し、別の組合せの輪郭稜線ループによる不要部分の削除を行う場合は、輪郭断面が分割されることになり、その分割部分には直線稜線を挿入する。このように、輪郭断面は、輪郭稜線のみか、あるいは、輪郭稜線と直線稜線により構成されたループ形状となる。図6は、4つの立方体を基本立体として配置した場合の不要部分削除の処理結果を二次元的に示したものであり、破線はその不要部分を表す。このように、基本立体間の融合の前にすべての立体間の輪郭断面が生成されるので、輪郭稜線および輪郭断面の算出はすべて単純な凸形状の処理で実現できている。また、図6中の除去される立体で示すような他の基本立体間の融合領域に含まれてしまう基本立体は、この不要部分の削除によって自動的に除去され融合の対象とならない。

5.2 融合稜線の生成

対応する輪郭断面の輪郭稜線間に融合稜線を挿入するため、融合稜線の端点となる頂点ペアを対応する輪郭稜線上に生成する。生成方法は、輪郭断面の形状特徴から以下の2通りとなる。

(a) 基本立体が2個の場合

輪郭断面は基本立体の重心を重心とする尖点のない対象なループ形状となる。今、対象としている輪郭稜線を図7に破線と一点破線で示す $S_1, S_2$ とする。視線ベクトルを法線ベクトルとして持ち $S_1, S_2$ の重心を原点とする平面座標系を定義し、 $S_1, S_2$ を構成する輪郭点をこの平面座標系に変換する。平面座標系で表現された各輪郭点の $X$ 軸からの角度を求め、同じ角度のものをペアとする。相手側に同じ角度を持つ輪郭点がなければその角度位置に頂点を挿入する。

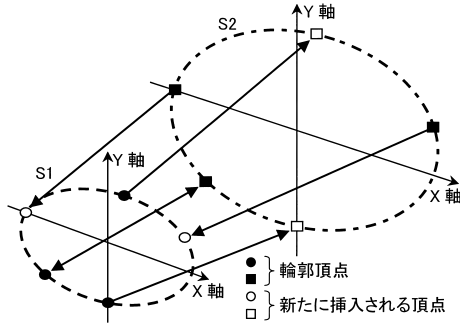


図 7 頂点ペアの算出 (基本立体 2 個の場合)

Fig. 7 Finding vertex pairs between corresponding two silhouette edges (in case of two primitives).

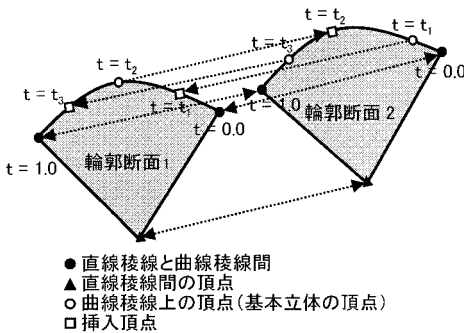


図 8 頂点ペアの算出 (基本立体 3 個以上の場合)

Fig. 8 Finding vertex pairs between corresponding two silhouette edges (in case of three primitives or more).

(b) 基本立体が 3 個以上の場合

図 8 に示すように、融合する基本立体の輪郭断面は複数の基本立体からカットされた形状となるため、(a)の方法では頂点ペアを決められない。ところで、本手法において生成される輪郭断面は、5.1.3 項で述べたように、曲線稜線と直線稜線により構成される。この曲線稜線は、輪郭稜線で、最終的にカーブネットワークを構成する曲線稜線の一部となるが、直線稜線は、不要な立体の削除時に挿入された稜線で最終的にはカーブネットワークの内部に含まれる稜線となる。そこで、カーブネットワークの内部となる直線稜線部分に着目し、まず、直線稜線部分に関し、直線稜線と曲線稜線とからなる頂点と、直線稜線と直線稜線とからなる頂点をそれぞれ頂点ペアとする。次に、曲線稜線部分に関しては、それぞれの曲線稜線上の頂点を曲線稜線上でパラメータ化する。両曲線稜線の頂点のパラメータを比較し、同一パラメータの頂点はそのままペアとし、それ以外は相手の曲線稜線上の同じパラメータ位置に頂点を挿入し頂点ペアとする。

なお、生成される融合稜線は、求まった頂点ペア間

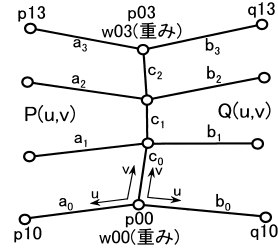


図 9 パッチ間の接続

Fig. 9 The connection between two patches.

に、その地点での主法線ベクトルがそれぞれの基本立体の重心方向を向くように与え算出する。

6. カーブネットワークの内挿

内挿対象となるカーブネットワークは、すべて 3 次の有理ベジェ曲線により定義される。各頂点(曲線の端点)に接続する曲線のその地点での接線ベクトルはすべて同一平面上に存在し、基本立体部分の曲線に関しては曲率ベクトルも一致し、かつ、曲率中心は曲線が属する基本立体の重心方向を向くという特徴を持つ。また、曲線で囲まれる領域は、すべて凸形状ではあるものの、4 辺形パッチだけでなく  $n$  辺形パッチが存在する。以下、Chiyokura らが提案した Gregory Patch を用いた不規則な曲線メッシュの内挿法<sup>12)</sup>を応用し、このような形状特徴を持つカーブネットワークを内挿するために必要な、パッチ間の  $G^1$  連続を満足した境界横断ベクトルの算出法と  $n$  辺形パッチの 4 辺形パッチへの分割法について述べる。

6.1 パッチ間の  $G^1$  接続

隣り合うパッチ間を  $G^1$  連続条件で滑らかに接続するために、図 9 に示すように、有理ベジェ曲面  $P(u,v) = Ph/Wp$  と共有境界曲線上で  $G^1$  連続性を満足した有理ベジェ曲面  $Q(u,v) = Qh/Wq$  の境界横断ベクトルを表す制御辺ベクトル  $b_0, b_1, b_2, b_3$  を求めることを考える。パッチ間の  $G^1$  連続の条件式を単純化するため、共有境界曲線に接続する制御頂点の重みをそれぞれが接続する共有境界曲線の制御頂点の重みと同じになるように以下の修正を行う。共有境界曲線の端点に接続する制御頂点  $p_{10}, q_{10}, p_{13}, q_{13}$  の重みをそれぞれ共有境界曲線の重みと一致させ、また、その端点位置での  $u$  方向の接線ベクトルが重み修正前の接線ベクトルと同じになるように座標値も修正する。このように修正を行うと、 $G^1$  連続性を保証する条件式は以下の式となる。

$$Qhu = k(v)Phu + h(v)(Phv Wp - Ph Wpv)/Wp$$

ただし、添え字  $u, v$  は  $u, v$  方向の 1 階導関数を表す。ここで、 $h(v), k(v)$  を以下の 2 式で与えるとすると、

$$h(v) = (h_0(1-v) + h_1 v) W_p$$

$$k(v) = k_0(1-v) + k_1 v$$

$G^1$  連続性を保証する条件式は次式に単純化できる。

$$Q_h u = (k_0(1-v) + k_1 v) P_h u + (h_0(1-v) + h_1 v) (P_h v W_p - P_h W_{pv}) \quad (3)$$

ただし、 $h_0, h_1, k_0, k_1$  は定数である。この式を基に  $b_1, b_2$  を求めれば、 $G^1$  連続性を満足した境界横断ベクトルが得られる。本手法の場合、式 (3) の右辺は 5 次式となるので  $Q(u, v)$  を 5 次の曲面として解くと、 $Q(u, v)$  の境界横断ベクトルを定義する制御辺ベクトル  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  が求まる。

6.2 パッチの内挿

カーブネットワークの各パッチを内挿する際は、 $P(u, v)$  側の境界横断ベクトルを決める必要がある。そこで、基礎パッチ<sup>12)</sup>を用い、 $P(u, v)$  の境界横断ベクトルを規定する内部の制御辺ベクトル  $a_1, a_2$  を両端の制御辺ベクトル  $a_0, a_3$  の線形補間で与え、6.1 節で述べた方法によりすべての境界曲線上での境界横断ベクトルを算出する。また、用いる曲面式に関しては、境界横断ベクトルの導出過程で重みの修正を行っているため、ツイスト項を可変ツイストに変更したクーンズパッチ<sup>10)</sup>を用い曲面を定義する。

6.3  $n$  辺形パッチの 4 辺形パッチへの分割手法

4 辺形以外の  $n$  辺形パッチは、パッチ内に点を挿入（以下、挿入点と呼ぶ）し、挿入点から  $n$  本の曲線を放射状に境界曲線上に挿入（以下、挿入曲線と呼ぶ）することにより、 $n$  枚の 4 辺形パッチに分割する。それぞれの 4 辺形パッチに対して 6.2 節で述べた方法によりパッチを内挿する。

6.3.1 挿入点の生成

境界曲線それぞれで境界横断ベクトルを求め、各ベクトルをパラメータ 0.5 の位置で 2 分割する（図 10 (a)

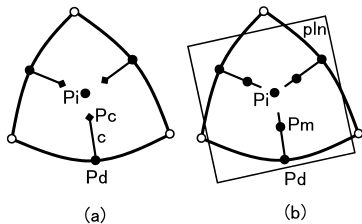


図 10  $n$  辺形パッチの分割

Fig. 10 Division of a  $n$ -sided patch into four-sided patches.

参照)。この分割点  $P_d$  地点での境界横断ベクトルが、2 次のベジェ曲線の制御辺ベクトルとなるよう修正した端点  $P_c$  を求める。次に、すべての境界曲線における点  $P_c$  を平均した点  $P_i$  を求める。ここで、現在の処理対象が融合部分のパッチであれば、この点  $P_i$  をそのまま挿入点として用いる。基本立体部分のパッチであれば、そのパッチが属する基本立体の重心から点  $P_i$  方向でパッチを構成する境界曲線の端点での曲率半径を平均した距離に挿入点  $P_i$  を移動する。

6.3.2 挿入曲線の生成

処理対象が基本立体部分のパッチであれば、基本立体の重心から点  $P_i$  方向へのベクトルと点  $P_i$  で平面  $pln$ （図 10 (b) 参照）を定義する。融合部分のパッチの場合は、各境界曲線の点  $P_d$  地点での境界曲線の接線ベクトルと境界横断ベクトルとの外積ベクトルをそれぞれ求め、求めたベクトルの平均ベクトルと点  $P_i$  で平面  $pln$  を定義する。このようにして定義した平面  $pln$  と各点  $P_d$  地点での境界横断ベクトルとの交点  $P_m$  を求め、 $P_i, P_m, P_d$  により 2 次のベジェ曲線を生成する。この 2 次のベジェ曲線を 3 次に次数増加することにより挿入曲線が得られる。

7. 実験結果および考察

本手法の有効性を検討するために、処理速度、生成形状、そして、生成形状の制御性に関する評価を行った。実験に用いた計算機の CPU は PentiumII 400 MHz である。

まず、処理速度の評価を行うため、三次元空間上に基本立体として同じ大きさの立方体をランダムに配置したときの基本立体稜線の曲線化、カーブネットワークの構築、そして、カーブネットワークの内挿の各処理の処理時間の計測を行った。横軸に生成された曲面数、そして、縦軸に処理時間をとった場合のグラフを図 11 に示す。各処理とも、処理時間は生成曲面数に

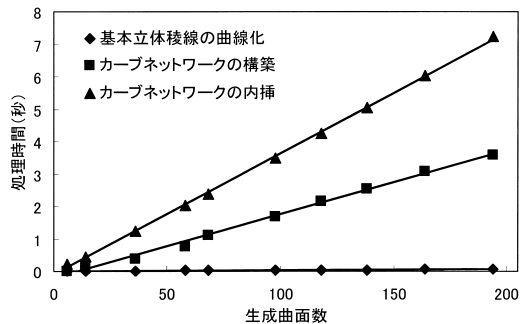


図 11 各処理の処理時間

Fig. 11 CPU (PentiumII 400 MHz) time for each process.

表 1 曲率パラメータによる変形  
Table 1 Effect by modifying the curvature parameters.











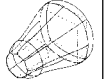

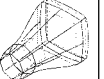

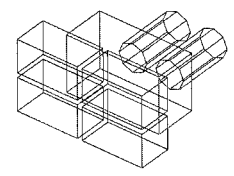
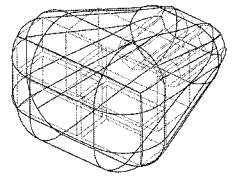
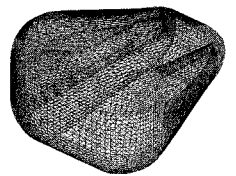
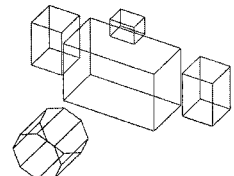
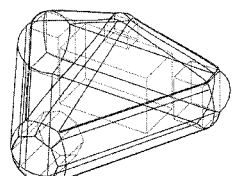
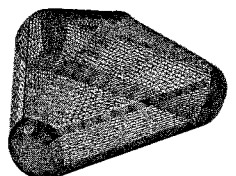
	曲率パラメータ	t = 1.0		t = 0.5		t = 0.1	
		基本立体	カーブネットワーク	内挿曲面	カーブネットワーク	内挿曲面	カーブネットワーク
(a)							
(b)							

表 2 生成形状例  
Table 2 Two Examples of curve networks and free-form surfaces generated by five and seven primitives.

	基本立体	カーブネットワーク	内挿曲面			
(a)						
	基本立体数	7	生成パッチ数	50	総処理時間	4.057 秒
(b)						
	基本立体数	5	生成パッチ数	45	総処理時間	4.155 秒

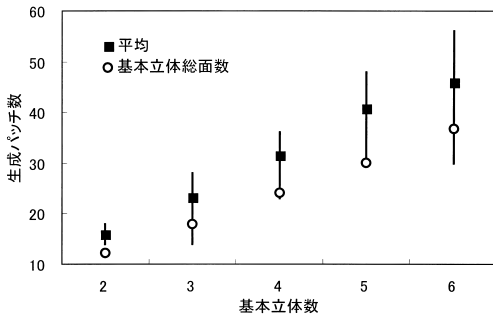


図 12 カーブネットワークの生成パッチ数  
Fig. 12 Number of patches for a generated curve network.

比例しており、また、最も負荷のかかるカーブネットワークの内挿処理においても、生成曲面数が 2 倍になったときに処理時間は約 2.1 倍にしかならず、良好な処理が行われていることが分かる。

次に、生成されるカーブネットワークの有効性を評価するために、基本立体が 2~5 個の場合それぞれについて、ランダムに同じ大きさの立方体を配置したときに生成されるカーブネットワークのパッチ数を調べ

た。その結果を、図 12 に示す。グラフの横軸は基本立体数、そして縦軸は生成されるパッチ数である。図中の縦線は各基本立体数に関し生成されたパッチ数の最小と最大の値の範囲を、そして、図中の白抜き丸点は各基本立体数での基本立体の総面数(基本立体数×6)を表す。総面数を基準に評価すると、いずれの基本立体数の場合も生成されるパッチ数の最大数は総面数の約 1.6 倍以内に収まっており、生成されるカーブネットワークは、基本立体の形状を反映したより少ない定義データにより構築されていることが分かる。

次に、生成形状の制御性の評価として、基本立体の各頂点の曲率半径を変更した場合の生成例を表 1 に示す。表 1 (a) は立方体 1 個の場合、そして、表 1 (b) は基本立体 2 個の場合で変更した例である。いずれも、すべての頂点の曲率パラメータを変更させている。パラメータを 1 に近づけると丸みをおび、0 に近づけると鋭角に形状が変化し、また、その間の形状の変化はうねりのない自然な変形であることが確認できる。このように、頂点位置に与えた曲率パラメータにより、

設計者にとって制御性の良好な局所的な形状修正が可能であることが分かる。

最後に、生成形状の評価を行うために、複数の基本立体を配置したときの生成例を表 2 に示す。表 2(a) は 7 個の基本立体、そして、表 2(b) は 5 個の基本立体から外包形状を生成している。生成例から明らかのように、少ない基本立体で、設計者の意図に近い形状が生成できていることが分かる。また、図中の処理時間から明らかのように、実時間処理が実現できている。

## 8. おわりに

本論文では、工業製品のモデリング作業、特に、自由曲面の入力作業を効率化する目的で、基本立体を用いたモデリング手法を提案した。まず、設計者により配置された各基本立体の直線稜線を基本立体の重心位置と各頂点に指定する曲率パラメータにより曲線稜線に変換し、曲線稜線化された基本立体群の凸包を求めることによりすべての基本立体を外包するカーブネットワークを生成する手法を示した。さらに、このようにして生成された 3 次の有理ベジェ曲線で定義されるカーブネットワークを、境界部分で  $G^1$  連続性を満足して内挿する手法を示した。最後に、実際に本手法をインプリメントし実験を行い、実時間処理で設計者の制御性の良好な外包形状が得られることを確認した。また、本手法では、カーブネットワークが設計プロセスの初期形状として与えられるので、その後の形状の詳細化が容易に行えることも明らかである。

今後は、さらに実用的な初期形状の生成を可能とするため、基本立体を覆う体積が小さなカーブネットワークを構築する技術を開発する。また、基本立体、曲率半径等のエディット機能を付加し、意匠設計業務への実用展開を図っていく所存である。

## 参考文献

- 1) Woodward, C.D.: Skinning techniques for interactive B-spline surface interpolation, *Comput. Aided Des.*, Vol.20, No.8, pp.441–451 (1988).
- 2) Piegl, L.: On Nurbs: A Survey, *IEEE Comput. Graph. Appl.*, Vol.11, pp.55–71 (1991).
- 3) Cutmull, E. and Clark, J.: Recursively generated b-spline surface on arbitrary topological meshes, *Comput. Aided Des.*, Vol.18, No.6, pp.350–355 (1978).
- 4) Beeker, E.: Smoothing of shapes designed with free-form surfaces, *Comput. Aided Des.*, Vol.18,

No.4, pp.224–232 (1986).

- 5) 小笠原耕太郎, 小堀研一: 多面体細分割を用いた自由曲面生成手法, 日本設計工学会誌, Vol.26, No.11, pp.542–547 (1991).
- 6) 西村仁志ほか: 分布関数による物体モデリングと画像生成の一手法, 電気通信学会論文誌, Vol.J68-D, No.4, pp.718–725 (1985).
- 7) Muraki, S.: Volumetric Shape Description of Range Data Using “Blobby Model”, *Computer Graphics*, Vol.25, No.4, pp.227–235 (1991).
- 8) Ogasawara, K., Ueda, K. and Kobori, K.: A Method of Surface Modeling on a Conceptual Design, *Japan/USA Symposium on Flexible Automation*, Vol.2, pp.989–993 (1992).
- 9) 小堀研一ほか: 意匠設計のための初期形状の自動生成, 日本設計工学会誌, Vol.32, No.9, pp.351–359 (1997).
- 10) Farin, G.: CAGD のための曲線・曲面理論, 共立出版 (1991)
- 11) 杉原厚吉: 計算幾何工学, 培風館 (1994).
- 12) Chiyokura, H. and Kimura, F.: Design of solids with free-form surfaces, *Computer Graphics*, Vol.17, No.3, pp.289–298 (1983).

(平成 11 年 5 月 31 日受付)

(平成 12 年 1 月 6 日採録)



小笠原耕太郎 (正会員)

昭和 37 年生。昭和 59 年九州芸術工科大学芸術工学部工業設計学科卒業。同年シャープ (株) 入社。現在長崎県工業技術センター研究員。形状処理技術、意匠設計支援技術に関する研究に従事。日本設計工学会、IEEE Computer Society 各会員。



小堀 研一 (正会員)

昭和 26 年生。昭和 50 年山梨大学大学院修士課程修了。工学博士 (大阪府立大学)。昭和 50 年シャープ (株) 入社。以後、一貫して CAD, CAM, CG に関する研究開発に従事。平成 3 年大阪工業大学に奉職。現在同大学情報科学部情報処理科教授。CAD, CG, バーチャルリアリティの研究に従事。著書「CAD・CG 基本用語集」(工業調査会)、「三次元 CG」(オーム社)等。システム制御情報学会、精密工学会、日本設計工学会、ACM 各会員。