

スケッチ情報を利用した手描きによる細分割曲面生成手法

松田 浩[†] 近藤 邦雄[†] 木村 文彦^{††}

本論文では、制御点数が少なく曲面を表現できる細分割曲面に注目し、入力されたスケッチからその制御ポリゴンを生成し、立体生成に利用する手法を提案する。細分割曲面を用いると、容易に曲面を生成することが可能となるが、任意の生成立体を得るための制御立体を作ることは難しい。本論文で提案する手法は、描画者の視点で描いたスケッチ情報からスケッチに近いイメージの形状を生成するための細分割曲面の制御ポリゴンを自動生成する手法である。本手法では、入力する情報として、スケッチにおいて面上に描かれる線を利用する。面上に描かれる曲線には、(1) 直交するように描かれる、(2) 可視面における断面形状を表す、(3) 変化のある部分に描かれる、といった特徴があり、稜線だけでは曖昧になる形状を理解しやすくするために描かれる。また、各軸方向からの断面をスイープさせた柱体の相貫体を用いて細分割曲面の制御ポリゴンを求める手法を提案し、制御ポリゴンを容易に生成することが可能になった。提案手法を用いると、制御点操作やパラメータ入力が必要なくなり、直感的に形状生成を行うことができる。

Freehand Modeling Method for Subdivision Surfaces

KOICHI MATSUDA,[†] KUNIO KONDO[†] and FUMIHIKO KIMURA^{††}

This paper introduces a new method to deal with sketches for subdivision surfaces using a computer with a stylus pen and a tablet. Subdivision surfaces in which the control point number can little express is noticed, and the control polygon is formed from sketches. This study treats freehand curves that are drawn on surfaces. These are used when a designer draw sketches that have free form surfaces. Curves on surfaces have three characteristics. (1) These are orthogonalized to each other, (2) These show section lines on visible surfaces, (3) These are drawn at the part in which the change appears. Our method can create control polygon of doo-sabin's subdivision surfaces easily. In addition, we proposed the technique that formed control polygon of the subdivision surfaces by the product cluster of the cylinder that swept the section from each shaft direction. By using our method, a designer can keep his drawing with a stylus on a tablet at the same manner using a pencil on paper.

1. はじめに

デザイナーが形状をイメージするときには頭の中に3次元形状がある。頭の中にあるイメージは直接はつきりとした形として表すことができないため、概形を描き、徐々にスケッチを具体化していくことが一般的に行われている。このスケッチによる描画は発想の段階で多く用いられる。そこでコンピュータにおける形状入力において、このスケッチによる思考過程を取り入れたデザイナー自身がスケッチを描き試行錯誤できる入力インタフェースが望まれている¹⁾。

また、従来手作業で行われていたデザイン工程に設

計業務支援システムとしてCADの導入が進み、形状の作り込み・シミュレーション作業にコンピュータを用いることが多くなった。しかし、既存のCADシステムにおける形状入力は、基本形状の論理演算や制御点操作などの限られた作業を繰り返す手法が主流である。これらのシステムでは平面に対して断面の座標点を入力し、制御点やサイズなどを変化させることにより任意の形状を得ることができる。しかし、コンピュータによる形状の表現能力は向上したが、形状生成時には得意な組合せを利用することが多く、また、曲面生成においては面の張り方にも法則があるため、同じような印象の形状ができてしまうことが指摘されている¹⁾。従来の入力インタフェースは経験に頼った形状修正が必要であり、直感的な修正が可能な入力インタフェースとはいえない。

上記の問題を解決するために、スケッチを用いた3次元形状のコンピュータへの入力手法について研究が

[†] 埼玉大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

^{††} 東京大学大学院工学系研究科
Graduate School of Engineering, University of Tokyo

行われるようになってきた。Zelevnikら²⁾の研究は、基本オブジェクトをスケッチ入力し組み合わせることにより空間内に形状を配置するインタフェース、Igarashiらによる丸みのあるオブジェクトの外形を描くと自動的に3次元形状に復元するTeddyシステム³⁾、自動車の形状に限定し、手描き情報を利用する3次元形状生成手法⁴⁾などが提案されている。しかし、これらの提案手法は形状入力を容易にするものの、決められた位相の形状の入力しか可能でなかったり、断面が楕円であるといった制限があった。

そこで筆者らは、制御点数が少なく曲面を表現できる細分割曲面に注目し、入力されたスケッチからその制御ポリゴンを生成し、立体生成に利用する手法を提案する。本論文で提案する手法は、描画者の視点で描いたスケッチ情報のうち、曲面上に補助的に描かれる線に注目する。そして、その線を曲面の流れを作る線として利用し、スケッチに近いイメージの形状を生成するための細分割曲面の制御ポリゴンを自動生成する。提案手法を用いると、位相の異なる形状や断面に制限のない形状の入力が可能になる。

本論文では、まず2章においてスケッチにおける表現手法について述べ、3章において曲面生成手法として用いる細分割曲面について述べる。次に4章、5章において、スケッチ要素と細分割曲面を組み合わせた形状生成手法の提案を行い、最後に実験結果から得られた特徴についてまとめる。

2. スケッチにおける曲面の表現手法

まず、スケッチにおける曲面の表現手法について整理する。スケッチにおいて曲面を表現する手法は主に以下の4種に分類できる。

(1) 輪郭線による形の表現

輪郭線は立体の一番外側に見える線であり、あるビューからの形状の見え方・形状の特徴を表す線となる(図1(a))。

(2) 面上に描かれた補助線による表現

実際には存在しない線であるが、デザイナー本人が形状を確認するため、また、第三者に説明を行うために描く(図1(b))。

(3) 陰影による形の表現

ペンやマーカーで形状に陰影を与えることにより曲面の立体感を表現する。

(4) ハイライトや映り込みによる表現

反射のある金属やガラスなどを表現する場合に、マーカーなどで背景(空や地面)などを描いて面の流れを表現する。

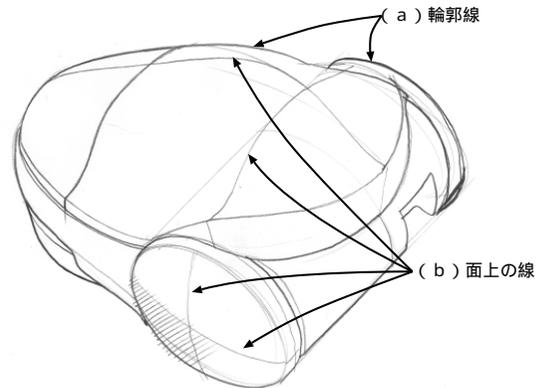
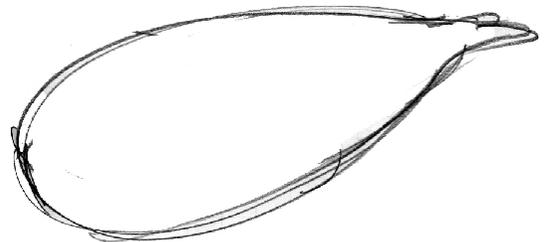
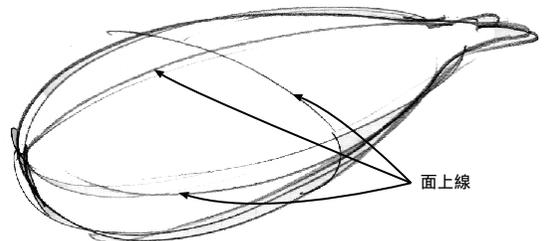


図1 スケッチにおける曲面表現
Fig.1 Surface representation on sketches.



(1) 輪郭線のみ形状



(2) 面上線による形状指示

図2 面上線による形状指示

Fig.2 The shape indication by curves on surfaces.

上記のうち、(1)、(2)は線による曲面表現、(3)、(4)は塗りつぶしによる曲面表現である。本論文では、(2)の面上に描かれた線分を用いて曲面制御を行う。以下、この面上に描かれた線分のことを面上線と呼ぶ。面上線はデザインの一部として存在するのではなく、形状を説明するための補足情報である。輪郭線だけで形状を表現すると曖昧な表現となるが、面上線を描画することにより、形状の曖昧さが解消される。図2(1)に示した絵は面上線がなければ楕円の断面を持つ形状に見えるが、面上線を入れることにより、上部は平たい形状であることが分かる(図2(2))。

この面上線は、デザイナーがスケッチを描く場合には

よく描かれる要素であり、以下のような規則性・意味を持って描かれている。

- 直交するように描かれる。
- 可視面における断面形状を表す。
- 変化のある部分に描かれる。

これらの面上線の特徴を利用することにより、各軸方向からの完全な断面図を入力することなく形状入力が可能となる。

3. 細分割曲面による形状生成

本論文では曲面生成手法として Doo-Sabin の細分割曲面⁵⁾を用いる。Doo-Sabin の細分割曲面は、多角形から再帰的に 2 次 B-Spline を生成する Chaikin⁶⁾ の手法が基になっている。本章では、曲線から Chaikin の分割元多角形を求め、Doo-Sabin の細分割曲面の制御ポリゴンに適用する手法について述べる。

3.1 スケッチからの断面生成

Chaikin の手法は多角形から B-Spline 曲線を求める手法であるが、本節ではその逆となる、曲線から多角形を求める手法について述べる。

Chaikin の手法では、ある頂点から他方へ伸びる稜線を $1/4$ に内分する点どうしを結び、角を落とす。したがって、極限において曲線は多角形の各稜線の中心に接することになる。そこで、閉曲線が与えられたとき、接点から接線方向に同じ長さの接線を伸ばし (図 3(1))、それら結ぶことにより、元の形状に近い細分割多角形を生成する多角形を作ることができる (図 3(2))。図 3(3) が図 3(2) にある多角形を 1 回細分割した結果であり、3 回細分割処理を行った図 3(4) では、元の形状にかなり近い形状が得られている。

なお、これ以降で使われている手描き曲線は筆者らの提案した手描き曲線の清書法⁷⁾を用いて作画している。

図 4 は、凹部を含む閉曲線から得られた多角形を示したものである。凹部を含む場合には、変曲点も接点として追加することにより多角形を作成することができる。

3.2 Doo-Sabin の細分割曲面

細分割曲面は 3 次元空間上に制御ポリゴンを用意し、ポリゴンを再帰的に細かく分割することにより立体を滑らかな形状に変形させる手法である。Doo-Sabin の手法は Chaikin の手法が基になっており、図 5 に示すように制御ポリゴンとして柱体を用意した場合、Doo-Sabin 法では、柱体を等分する断面の形状が Chaikin の手法で分割を行った形状になる。したがって、曲線からの多角形生成手法を用いて柱体を用意することにより、細分割後の形状が任意の断面を持つような制御

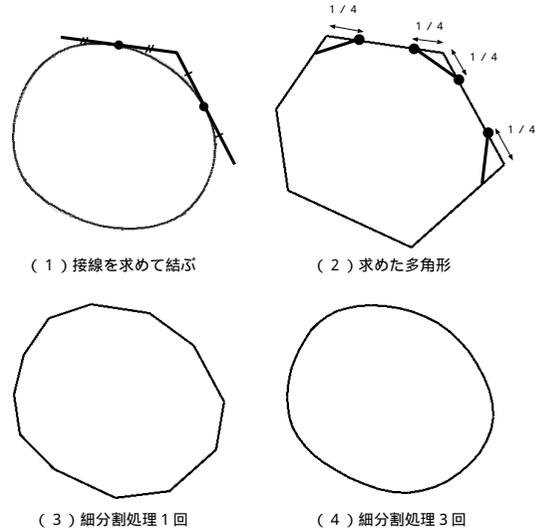


図 3 Chaikin の手法を利用した多角形生成
Fig. 3 Shape decision by the technique of Chaikin.

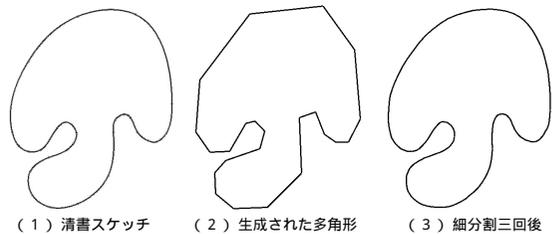


図 4 凹部を含む閉曲線スケッチからの多角形生成例
Fig. 4 Control polygon generation from the closed curve sketch including the concavity.

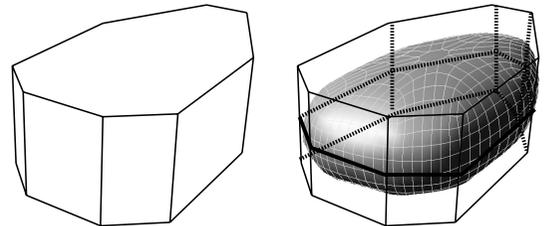


図 5 制御ポリゴンと Doo-Sabin 法による断面
Fig. 5 Control polygon and Doo-Sabin's subdivision surface.

ポリゴンを生成することができる。

4. 面上線を用いた立体生成

本章では、面上線を利用して細分割曲面の制御ポリゴンを作成する手法について述べる。まず、入力対象とする線について述べ、入力された線を用いて細分割曲面の制御ポリゴンを作成する手法を述べる。

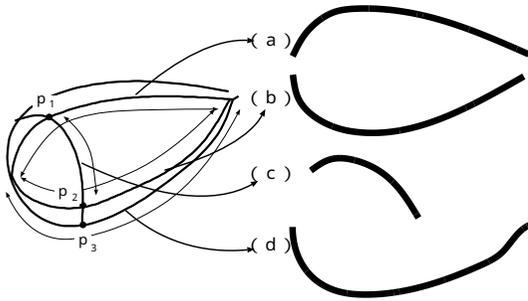


図6 断面情報の抽出

Fig. 6 Definition of cross section from sketch.

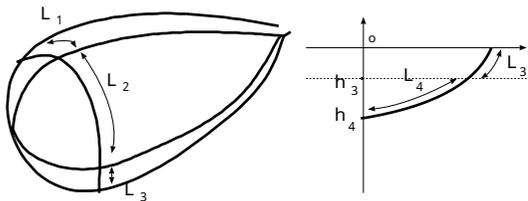


図7 下部の高さの決定

Fig. 7 Decision of bottom part's height.

4.1 入力対象線

入力できる立体は左右対称であるとし、線は以下の条件で描かれるものとする。

- 入力曲線は輪郭線のほかに面上線が3本。
- 3本の面上線は3次元空間上で直交している。

本手法で得られる立体は左右対称であるが、上下は対称の制限はない。これらの条件を基に、ラフに描かれたスケッチから、スケッチに近い形状を生成する。

4.2 標準モデル当てはめによる制御ポリゴンの作成手法

本節では、標準モデルを用いた制御ポリゴン生成手法について述べる。ここでは理論上の頂点構成を定め、断面から得られた情報を基に頂点位置を対応づけることにより制御ポリゴンを作成する。

以下、断面ポリゴンの生成手順について述べる。

1. 描かれたスケッチから断面要素を抽出(図6) 曲線の分割を行う。その際に、交点 $p_1 \sim p_3$ における接線が水平になるように各曲線を回転させる。その結果、(a)~(d)の4つの曲線を抽出する。
2. 立体下部の高さの決定(図7) 不可視部分を含めた立体下部の高さを推定する。不可視部の仮想長 L_4 を $L_4 = L_1/L_2 * L_3$ として求め、この仮想長を利用し、立体下部の仮想高さ h_4 を求める。

$$h_4 = (L_3 + L_4)/L_3 * h_3 \quad (1)$$

3. 3次元空間上での断面を求める(図8)

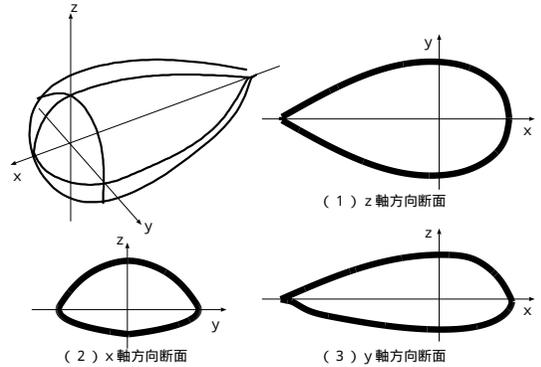


図8 スケッチから求めた断面

Fig. 8 Decision of cross section from sketch.

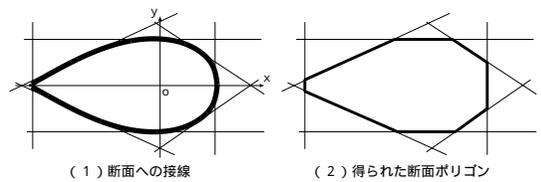


図9 断面ポリゴンの決定

Fig. 9 Decision of control polygon.

1. で求めた図6(a)~(d)の曲線を利用し断面を求める。(a)~(d)の長さとは幅は、(a)、(b)を基準に拡大縮小して合わせる。

- (1) z軸方向断面(図8(1))

図6(b)を用い、線対称図形を上につなげる。

- (2) x軸方向断面(図8(2))

図6(c)を左右対称にし、 $(y, z) = (0, -h_4)$ を通る自然スプライン曲線でつなげる。

- (3) y軸方向断面(図8(3))

図6(a)、(d)をつなげ、最下部のz座標が h_4 になるように図6(d)のz座標を拡大・縮小する。

4. 制御ポリゴンの座標を求める(図9)

3. で得られた断面から制御ポリゴンを求める。断面は図8(1)~(3)における各象限に1つの接線を持ち、座標軸に交わる点では座標軸に直交する接線を持つとした。ここで作成した断面ポリゴンから標準モデルの頂点座標に当てはめる。

図10、11に作画例を示す。標準モデルを利用するため、得られる制御ポリゴンの面構成は同じであるが、断面ポリゴンを基に頂点位置を移動させることにより形状を表現することができる。

また、図12に、スケッチから得られた断面ポリゴンを細分割した形状と、立体の形状比較を行った結果を示す。図12(1)~(3)のいずれの方向においても断

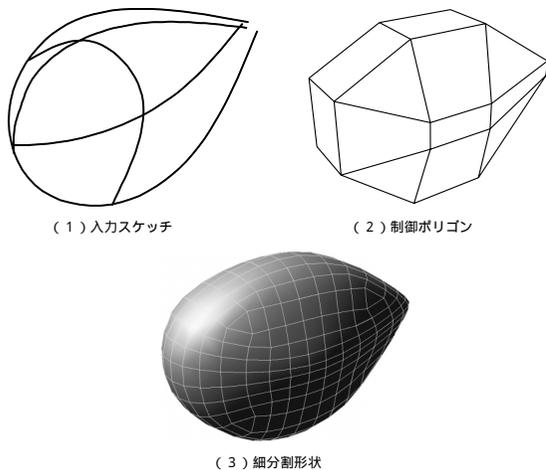


図 10 形状生成例 1
Fig. 10 Example of control polygon 1.

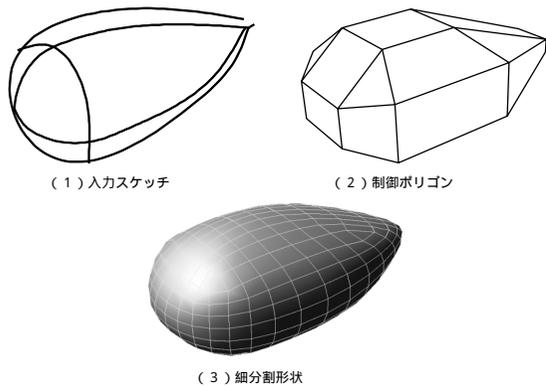


図 11 形状生成例 2
Fig. 11 Example of control polygon 2.

面形状とシルエットが同じ形状になっていることが分かる。

5. 相貫体を用いた制御ポリゴン生成

標準モデルを用いた制御ポリゴン生成手法は同位相の形状は容易に生成できるが、異なる位相の形状を入力する場合には、そのつど標準モデルを用意する必要がある。そこで本論文では、断面の柱体の相貫体を求め、制御ポリゴンとして利用する手法を提案する。相貫体を用いることにより、ポリゴンどうしのつながりや頂点の位置関係などを考慮することなく制御ポリゴンを生成することができる。

5.1 相貫体による制御ポリゴン生成

本手法は、柱体を等分する断面が細分割後の形状に反映されることを利用し、求めた断面を互いに直交させて 3 次元化する。

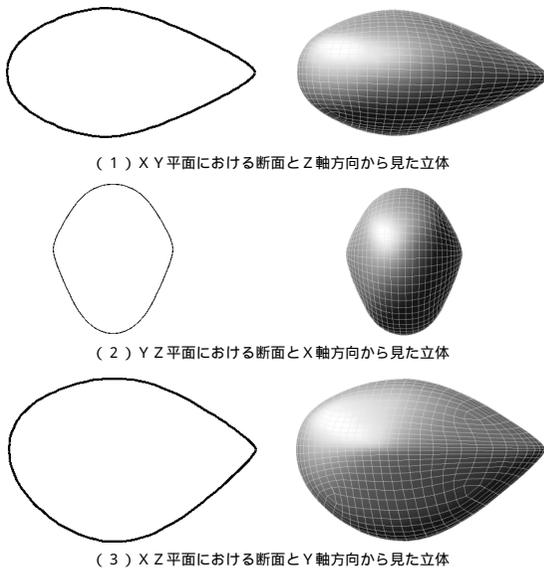


図 12 断面図と細分割形状の形状比較
Fig. 12 The shape comparison of subdivision surfaces and sectional view.

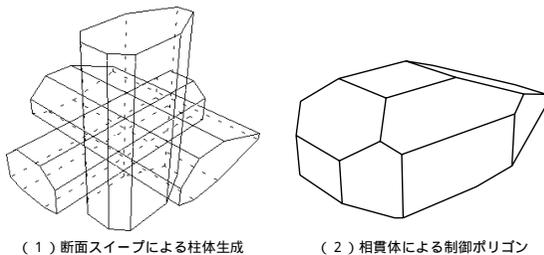


図 13 相貫体による制御ポリゴン
Fig. 13 Control polygon of the product cluster.

断面を求めるところまでは標準モデルを利用する手法と同様である。求めた断面に対し、3 章で述べた曲線からの制御ポリゴン生成手法を用いて柱体を作成する。

図 13 は図 11 にあるスケッチから得られた断面を用いて相貫体を求めた例である。図 13 では、三角ポリゴンだった部分が隣接したポリゴンに吸収されるような形状になっている。

ここで、制御ポリゴン生成に際し、標準モデルと相貫体を利用した場合の細分割曲面の形状比較を行った例を図 14 に示す。両手法の出力を比較すると、ともにほぼ同じ形状ができていことが分かる。微妙な違いは、ポリゴンの数および形状の違いが反映していると考えられる。

5.2 相貫体による制御ポリゴン生成および変形例次に、相貫体による形状生成例および、形状変形へ

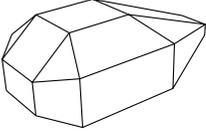
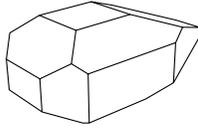
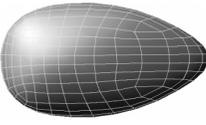
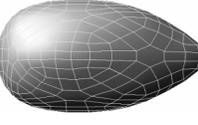
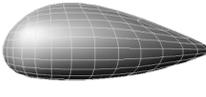
	(1) 座標当てはめによる形状	(2) 相貫体による形状
制御ポリゴン		
Z軸方向視点		
X軸方向視点		
Y軸方向視点		

図 14 制御ポリゴン生成法による形状比較
Fig. 14 The shape comparison of two method.

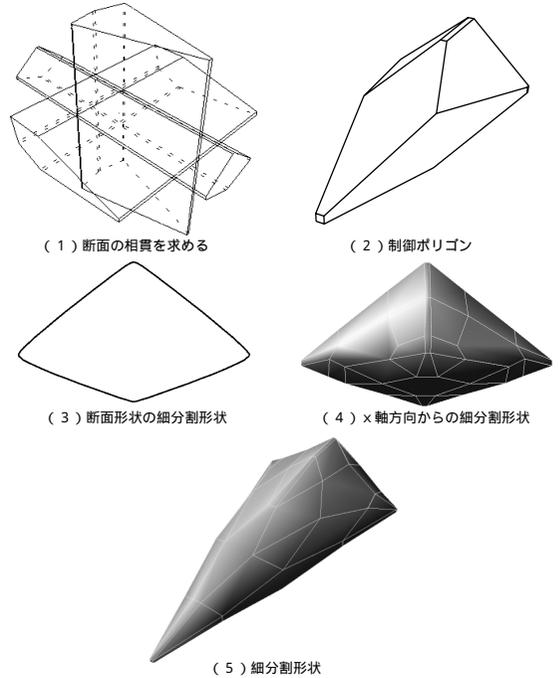


図 16 相貫体による形状生成例
Fig. 16 Example of subdivision surfaces by the product cluster.

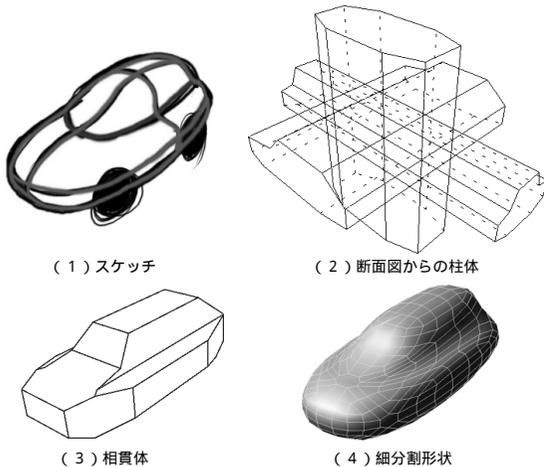


図 15 スケッチからの形状生成例
Fig. 15 Example of generation from sketch.

の適用例について述べる。

図 15 は、スケッチから得られた曲線を基に断面を生成し、制御ポリゴンを求めた例である。下書きしたスケッチの上に輪郭および 3 本の面上線を描き、その曲線を利用して断面を生成することができる。

次に、形状変形への適用例について述べる。図 16 は、あらかじめ用意した断面を利用して作成した形状である。図 16 (3) は x 軸方向からの断面形状の理論上の形状であり、図 16 (4) とほぼ同じ形状をしている。

そして、得られた細分割形状は図 16 (5) に示すとおりである。

そして、図 17 は、面上線スケッチにより断面形状が得られたとして細分割形状を求めた結果である。スケッチから得られた断面形状から制御ポリゴンを求め (図 17 (1)), 図 16 の x 軸方向からの断面として用いた結果、図 17 (2) の制御ポリゴンが得られる。理論上の断面と x 軸方向からのモデルのシルエットは同様な形状になっており、図 17 (5) のような形状が得られた。

6. 実験結果のまとめ

以上の実験結果から、以下のような特徴が確認できた。

1. 面上線を利用するため、可視部分の形状だけを指示すればよい
スケッチでは形状指示のために不可視部分を描くことは少ないため、可視部分の形状指示のみで形状ができる方が望ましい。
2. おおまかな形状を描くことにより曲面形状が得られる
必ずしも正確な形状情報である必要がない。また、形状の視点や角度は描画者の思った角度でよい。それによってスケッチを描くような感覚で立体生

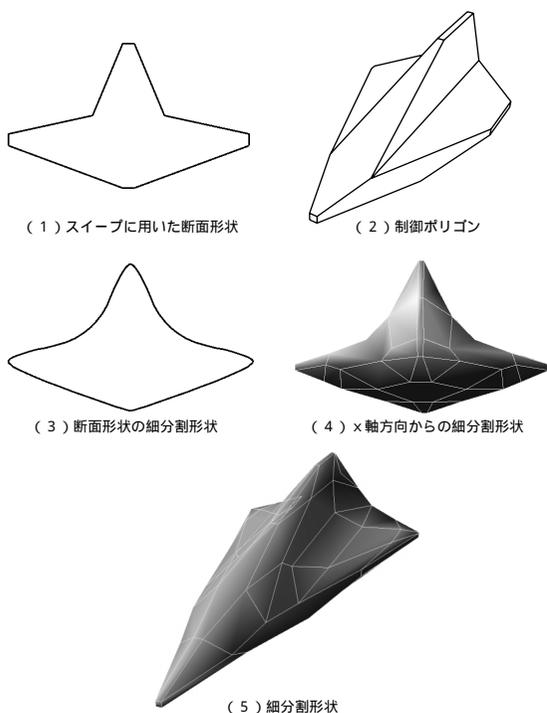


図 17 断面変形による形状変形

Fig. 17 The deformation by the section deformation.

成が可能になる。

3. スケッチから求めた断面を再現できる

スケッチから求めた断面と各軸方向からのシルエットが同じ形状になる。また、断面とシルエットが同じ形状になる場所は面上線の作る面であり、本論文では xy 平面, yz 平面, xz 平面が該当する。

4. 相貫体により制御ポリゴンが容易に生成可能

断面が求めれば、細分割曲面の制御ポリゴンを容易に求めることができる。したがって、断面を制御する面上線を修正することによる曲面変形操作が可能になる。また、制御ポリゴンの集合演算により局所的な凹凸の付与も可能になると考えている。さらに、入力された断面の数が少ない場合でも形状を作ることができるため、何も無い状態から情報を書き足しながら徐々に形状を作りあげていくようなインタフェースが期待できる。

7. おわりに

本論文では、スケッチに描かれる曲面情報を細分割曲面の制御ポリゴン生成に利用する手法を提案した。

作画実験を行った結果、(1) 面上線を利用するため、可視部分の形状だけを指示すればよい、(2) おおまかな形状を描くことにより曲面形状が得られる、(3) ス

ケッチから求めた断面を再現した立体を作ることができる、(4) 相貫体により制御ポリゴンが容易に生成可能、といった特徴が確認できた。

今後の課題は、曲面操作のスケッチによる直接的な変形操作を可能にすることによって、形状の試行錯誤を実現することである。

参考文献

- 1) マルチメディアコンテンツ振興協会：高付加価値意匠デザインのための3次元形状モデリングに関する調査研究報告書 (1998).
- 2) Zeleznik, P.C., Herndon, K.P. and Hughes, J.F.: SKETCH: An Interface for Sketching 3D Scenes, *SIGGRAPH 96, Computer Graphics Proceedings*, pp.163-170 (1996).
- 3) Igarashi, T., Matsuoka, S. and Tanaka, H.: Teddy: A Sketching Interface for 3D Freedom Design, *SIGGRAPH 99*, pp.409-416 (1999).
- 4) 五十嵐健夫, 中嶋孝行, 小寺敏正, 田中英彦: 手書きスケッチによる自動車のボディ形状デザイン, *Visual Computing グラフィックスと CAD 合同シンポジウム '99 予稿集*, pp.75-80 (1999).
- 5) Doo, D. and Sabin, M.: A behaviour of recursive subdivision surfaces near extraordinary points, *CAD 10*, pp.356-360 (1978).
- 6) Chaikin, G.M.: An Algorithm for High-Speed Curve Generation, *Computer Graphics and Image Processing*, Vol.3, pp.346-349 (1974).
- 7) 松田浩一, 近藤邦雄: 手書き図形入力のための時系列情報を用いた逐次清書法, *情報処理学会論文誌*, Vol.40, No.2, pp.594-601 (1999).

(平成 11 年 9 月 13 日受付)

(平成 12 年 2 月 4 日採録)



松田 浩一 (学生会員)

1971 年生。1997 年埼玉大学大学院理工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。現在、同大学院情報数理科学専攻博士後期課程在学中。ペンをういた形状入力インタフェース

の研究に従事。



近藤 邦雄(正会員)

1954年生。1979年名古屋工業大学第2部機械工学科卒業，工学博士。名古屋大学教養部図学教室，1988年東京工芸大学電子工学科講師を経て1989年埼玉大学工学部情報工学科助教授。コンピュータグラフィクス，ユーザインタフェース，形状モデリング，感性と知識をもとにした画像処理の研究に従事。日本図学会会員。



木村 文彦(正会員)

昭和20年生。昭和49年東京大学大学院工学系研究科航空学専攻博士課程修了。同年通産省電子技術総合研究所パターン情報部研究員。昭和54年東京大学工学部精密機械工学科助教授，昭和62年同教授。形状モデリング，CAD/CAM，生産システム，等の研究に従事。工学博士。精密工学会，日本機械学会，ACM，IEEE等の会員。