

## 手描き平面曲線からの 対数美的曲面創成システムの開発

伊丹裕美<sup>†</sup> 原田利宣<sup>††</sup> 萩原徹<sup>†</sup>

一般的に、製品デザインを図面化する際、デザイナーが描いたスケッチ上の構成点を CAD 上に点列として入力し、それらを用いて平面曲線に近似する。次に投影面の異なる 2 本の平面曲線から空間曲線を合成し、その空間曲線をキーラインとして曲面設計を行っている。しかし、デザイナーがスケッチ段階で意図した平面曲線を描けたとしても、創成された空間曲線や曲面は必ずしもデザイナーの意図した性質を持っていない場合がある。そこで本研究では、デザイナーが CAD 上に直接手描き入力した 2 つの投影面における平面曲線から、図面として使える美しい空間曲線を効率的に創成するシステムを開発した。また、創成した空間曲線を用いて美しい曲面を創成するシステムを開発した。本システムによる曲面創成シミュレーションを通して、不明確であった基準線である対数美的空間曲線の振率変化を同定することが可能となった。

### A generation of log-aesthetic curved surface from hand-drawing plane curves

Hiroimi Itami<sup>†</sup> Toshinobu Harada<sup>††</sup> Toru Hagihara<sup>†</sup>

Generally, when designers draw an industrial product, they first input every sets of constitutional points of curves on the sketches drawn by designers into CAD. Next, they approximate a plane spline curve using the set of points on a computer and compound a space curve from two plane curves on various projections. Finally, they make a curved surface by the space curves as a key line. However, even if designers can draw a plane curve in their mind on the sketches, the compound space curve is not always a log-aesthetic space curve. Then, the aim of this study is to develop a system to efficiently make a log-aesthetic space curve from two hand-drawing plane curves drawn into a pen-display device directly and to make a log-aesthetic curved surface using the log-aesthetic space curves. We could identify obscure torsion change of a log-aesthetic space curve through simulating this system.

### 1. はじめに

一般的に、車などの工業製品のデザイン工程では、デザイナーが描いたスケッチ上の構成点をコンピュータに点列として入力し、その空間曲線をキーラインとして曲面設計を行っている。しかし、ここでの問題点として、デザイナーはスケッチでは意図した平面曲線を描けていても、これらの工程を踏んで創成された空間曲線や曲面は必ずしもデザイナーの意図した性質を持っていない場合がある。何故なら、デザイナーといえども完全な空間曲線や曲面をイメージしながらスケッチ（平面曲線）を描くことは困難だからである。このため、デザイナーは最終的に NC マシンで削り出したクレイモデル上で手作業により空間曲線や曲面の微調整を行っており、この作業に膨大な工数を要している。そのためデザイナーの意図する高品質な曲線、曲面を創成するための研究がなされている。

これまでに、原田らによりシステム上でデザイナーの感覚にあった美しい平面曲線を創成する手法が研究された<sup>1)</sup>。この研究では曲率変化の仕方とボリュームから曲線の性質を定量的に表す「曲率対数分布図」(図1)を提案し、ヒストグラムの頂点を結んだ線である *C curve* が直線であるとき、その曲率対数分布図で表される曲線はデザイナーが美しいと感じる自己アフィン性を持つ曲線であることを示した。また、この *C curve* の傾きにより曲線を分類することで、デザイナーの求める曲線の性質を明らかにした。また、井上らは曲率対数分布図と同様に、振率半径とその半径が曲線上に現れる長さの関係を両対数座標系上に表現する「振率対数分布図」を考案した<sup>2)</sup>。振率対数分布図のヒストグラムの頂点を結んだ線を *T curve* とし、*T curve* が直線となると、空間曲線は振率について自己アフィン性を持つことを示した。

手描きスケッチから対数美的空間曲線を創成する手法は筆者らにより提案されている<sup>3)</sup>。また、1本のガイド線と2本の基準線の性質パラメタ、さらに両基準線間における曲率、振率の変化を制御するパラメタを数値入力し、それらを元に対数美的曲面を創成する手法もすでに提案されている<sup>4), 5)</sup>。

そこで本研究では、手描きスケッチから対数美的空間曲線を創成し、さらに手描きスケッチから創成した対数美的空間曲線を用い対数美的曲面を創成する手法を提案し、システムを開発した。第一に、手描きスケッチから空間曲線を創成する。具体的には、まず液晶ペンタブレットに表示された2つの投影面（上面図・側面図）にスタイラスペンで平面曲線を直接手描き入力する。次に、入力した2つの投影面上の平面曲線を空間曲線に合成する。さらに、求めた空間曲線を曲率単調曲線・振率単調曲線に分

<sup>†</sup> 和歌山大学大学院  
Graduate School of Wakayama University

<sup>††</sup> 和歌山大学  
Wakayama University

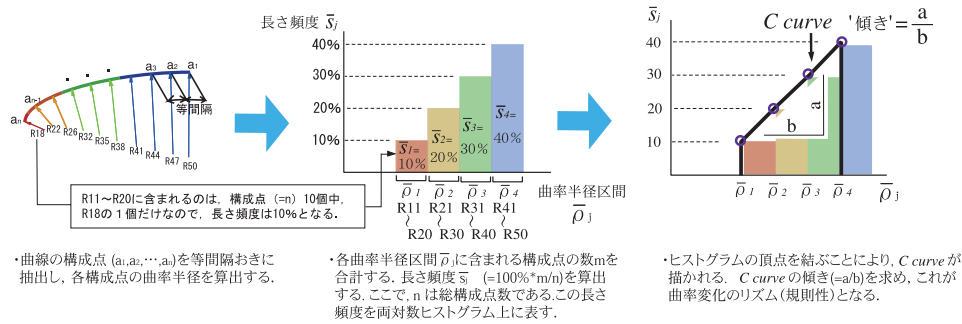


図1 曲率対数分布図の説明

割し、曲率対数分布図・振率対数分布図を作成し、対数美的空間曲線の $\alpha$ と $\beta$ を同定する。最後に、対数美的空間曲線を創成し、元の曲線と置換することで美しい空間曲線をキーラインとして得ることができる。また、その空間曲線を2つの投影面に投影することにより、元の手描き平面曲線とのズレを知ることができ、その置換された曲線の良否も判断することが可能となる。場合により、再度空間曲線の創成に戻り、新たな対数美的空間曲線に創成しなおすことも直ちに行える。第二に、ここで創成された対数美的空間曲線を用いて、対数美的曲面を創成する。具体的には、曲面を特徴づける線である1本のガイド線と2本の基準線を手描きスケッチから創成された対数美的空間曲線とし、両基準線間における曲率、振率の変化を制御するパラメタ(詳細は後述)を元に一方の基準線の形を他方に徐変させながら曲面を創成する。以上のアルゴリズムを実装したシステムを開発し、様々な性質の手描き平面曲線を入力しシミュレーションを行った。

## 2. 対数美的空間曲線の創成

ラフスケッチ上の平面曲線から、CADデータとして使える美しい空間曲線を創成する。平面曲線入力から対数美的空間曲線創成までの行程の詳細を以下に述べる。また、本システムのフローを図2に示す。

### 2.1 平面曲線の入力

ペンタブレットを用いてコンピュータに直接スケッチを入力する。ペンタブレットには通常のペンタブレットと液晶ペンタブレットがあるが、本研究ではペンで紙に絵を描くことに近い入力方法であるスタイラスペンで、直接液晶ディスプレイに曲線を描き込める液晶ペンタブレット[Wacom Cintiq 21UX]を使用する。なお、通常のペン

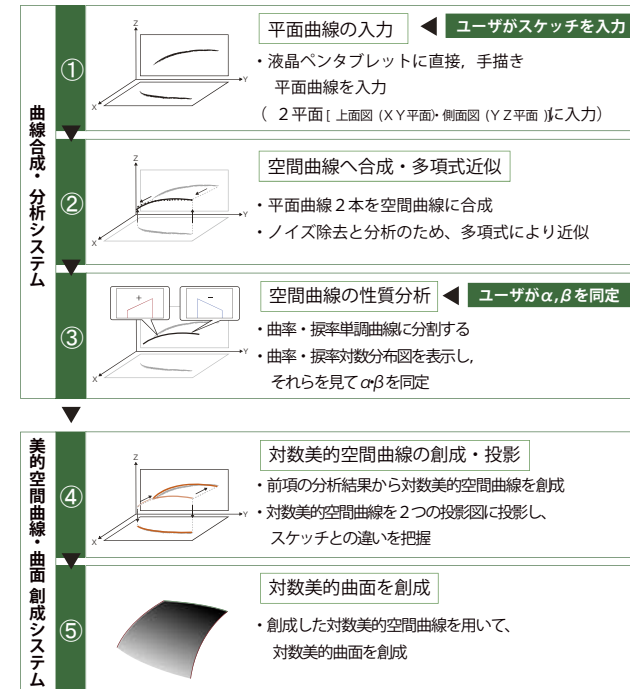


図2 本システムのフロー

タブレットやマウスを使用して曲線を入力することも可能である。液晶ペンタブレットに表示された上面図(X-Y平面)と側面図(Y-Z平面)にそれぞれ手描きで直接平面曲線を入力する。スタイラスペンにより描かれた曲線の軌跡上の点を、一定時間おきに通過点として上面図・側面図からそれぞれ取得する。上面図に入力された点列を $I_u(p)=[X_u(p), Y_u(p)](p=0,1,2,\dots,m)$ 、側面図に入力された点列を $I_s(q)=[Y_s(q), Z_s(q)](q=0,1,2,\dots,m)$ とする。

### 2.2 空間曲線へ合成・多項式近似

$Y_u(p)=Y_s(q)$ となる $p, q$ が存在する範囲で合成を行う。前節で取得した点列 $I_u, I_s$ をそれぞれX-Y座標、Y-Z座標上の点にとらえ、求める空間曲線の通過点を $G=[X_u, Y_u, Z_s]$ として求める。合成された曲線は手描き入力した曲線を合成しているため、分析に用

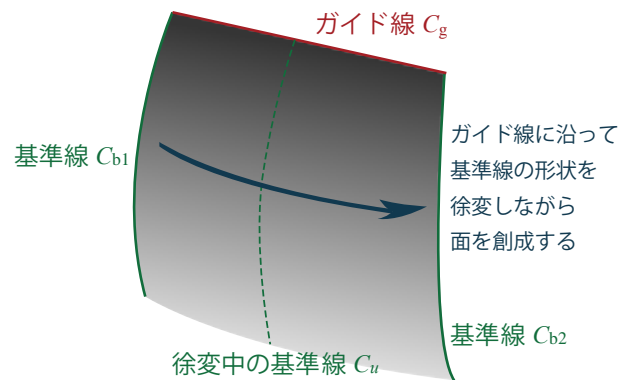


図3 一般的な曲面創成方法

いることができる程度に必ずしも滑らかな曲線となっていない。そこで、性質の分析が可能な程度に曲線が滑らかになるように、空間曲線の通過点列 $G$ から近似曲線を求める。本研究では、最小二乗法による多項式近似を行い、近似曲線を求める。井上らによる研究では、BIC(ベイズ情報量基準)で選択された近似曲線は残差和がAIC(赤池情報量基準)に比べると大きい、近似次数が低く、曲率単調曲線数・振率単調曲線数が少ないものとなっていることが示されている<sup>2)</sup>。本研究では工業製品のキーラインを創成することを目的としているため、曲率単調曲線数・振率単調曲線数が少なくなるBICを評価基準として用い多項式近似を行う。

### 2.3 空間曲線の分析

前節で近似して得られた空間曲線を曲率単調曲線・振率単調曲線に分割し、表示された各曲率単調曲線における曲率対数分布図の傾き $\alpha$ および各振率単調曲線における振率対数分布図の傾き $\beta$ から、創成する対数美的空間曲線の $\alpha$ と $\beta$ を同定する。

### 2.4 対数美的空間曲線の創成・置換

多項式近似された空間曲線を、対数美的空間曲線に置換する。対数美的空間曲線の始点の座標値と始点からの創成方向を、多項式近似された曲線に合わせ、吉田らによる曲線創成アルゴリズム<sup>6)</sup>、萩原らによる始点と終点を指定した曲線創成アルゴリズム<sup>4)</sup>を用いて対数美的空間曲線を創成する。このときユーザは同定した曲率対数分布図の傾き $\alpha$ 、振率対数分布図の傾き $\beta$ の値を入力する。

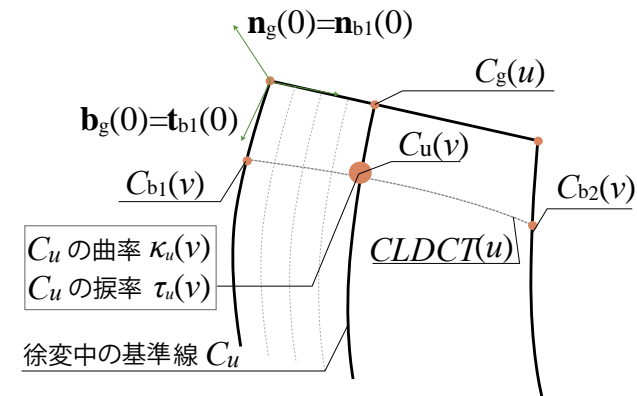


図4 曲面の創成に用いられる変数

### 2.5 平面への空間曲線の投影

前節で創成した対数美的空間曲線を、平面[上面(X-Y平面)・側面(Y-Z平面)]に投影して描画する。元の手描き入力平面曲線も同一平面上に描画しているため、二曲線間のズレを確認でき、曲線の良否も判断することが可能となる。再度空間曲線の創成に戻り、新たな対数美的空間曲線を創成しなおすことも可能である。

## 3. 対数美的曲面の創成

本章では、創成した対数美的空間曲線から、対数美的曲面を創成する手法を示す。一般的に、クレイモデリングなどで用いられている曲面の造形手法は、1本のガイド線と2本の基準線と呼ばれる面を特徴づける線を用いて曲面を創成する(図3)。このとき2本の基準線はガイド線の両端から創成する曲線とし、一方の基準線の形(各点における曲率と振率)を他方の基準線の形に徐変させながら曲面を作る。萩原らは、この徐変していく基準線上のある点における、曲率・振率の変化の‘リズム’が一定であるとき、この曲面を対数美的曲面と定義し、対数美的曲面の創成アルゴリズムを提案した<sup>4)</sup>。ここで‘リズム’とは、曲率・振率対数分布図におけるC curveとT curveの傾きを指す<sup>1)</sup>。対数美的曲面の定義を以下に述べる(図4)。

ガイド線を $C_g(u)[0 \leq u \leq 1]$ とし、 $u$ における接線ベクトル、主法線ベクトル、従法線ベクトルを $t_g(u)$ 、 $n_g(u)$ 、 $b_g(u)$ とする。同様に二本の基準線を $C_{b1}(v)$ 、 $C_{b2}(v)[0 \leq v \leq 1]$ とし、それぞれ $t_{b1}(v)$ 、 $n_{b1}(v)$ 、 $b_{b1}(v)$ 、および $t_{b2}(v)$ 、 $n_{b2}(v)$ 、 $b_{b2}(v)$ を定義する。 $C_{b1}$ は $C_g(0)$

を始点とし、 $C_{b1}(0)$ において主法線ベクトルの方向が同じであり( $\mathbf{n}_{b1}(0) = \mathbf{n}_g(0)$ ),  $C_{b1}(0)$ の接線ベクトルと同じ方向に従法線ベクトルをもつ $C_g(0)$ を設定する( $\mathbf{t}_{b1}(0) = \mathbf{b}_g(0)$ ).  $C_{b2}$ は $C_g(1)$ を始点とし、 $C_{b1}$ と同様に $\mathbf{n}_{b2}(0) = \mathbf{n}_g(1)$ かつ $\mathbf{t}_{b2}(0) = \mathbf{b}_g(1)$ であるとする。このとき、 $C_{b1}$ から $C_{b2}$ へ徐変させながら面を張るとすると、面の形状を求めるには点 $C_g(u)$ から始まる、基準線を補完する曲線 $C_u(v)$ を求めればよいことになる。

次に曲線 $C_u$ 上の各点における曲率・振率について考える。 $C_{b1}$ ,  $C_{b2}$ ,  $C_u$ の曲線長を同じとしたとき、 $C_{b1}(v)$ ,  $C_{b1}(v)$ ,  $C_u(v)$ における曲率を $\kappa_{b1}(v)$ ,  $\kappa_{b1}(v)$ ,  $\kappa_u(v)$ とする。振率についても同様に $\tau_u(v)$ を定義する(図4)。 $\kappa_u(v)$ ,  $\tau_u(v)$ を求めることで $C_u$ の形状を一意に定めることができる。

$\kappa_u(v)$ の変化のリズムを表すため、曲率対数分布図を応用した「 $\gamma$ 曲率対数分布図」が定義されている(図5)。 $\kappa_u(v)$ の変化のリズムは、ガイド線と平行な任意の仮想線上における $\kappa_u(v)$ の分布を表している。この仮想線は「曲率振率分布制御線(CLDCT(u))」と呼ばれ、このCLDCT(u)上の一方の端点における最大曲率(もしくは最小曲率) $\kappa_{b1}(v)$ , と他方の端点における $\kappa_{b2}(v)$ から先述の曲率対数分布図を求める方法と同様にしてCLDCT(u)上の任意の点における $\kappa_u(v)$ を求めることができる。ここで $\kappa_u(v)$ を求めたヒストグラムを $\gamma$ 曲率対数分布図とし、ヒストグラムの頂点を結んでできる線を「 $\gamma_c$  curve」と呼ぶ。

$\kappa_u(v)$ の $u$ ,  $v$ を必要な精度に応じて0から1までの範囲で変化させ、その値を求める。そして $C_u$ 上の $\kappa_u(v)[0 \leq v \leq 1]$ から曲線を創成する。このときCLDCT(u)の曲線長 $S(v)$ が必要となるが、 $v=0$ の時の $S(0)$ , すなわち $C_g$ の曲線長を $C_{b1}(v)$ ,  $C_{b2}(v)$ の距離に比例させ求める。

同様に、振率についても「 $\gamma$ 振率対数分布図」, 「 $\gamma_t$  curve」を定義する。最後に各 $u$ ,  $v$ における $\kappa_u(v)$ ,  $\tau_u(v)$ を求め曲面を創成する。この $\gamma_c$  curve,  $\gamma_t$  curveが直線となるとき、すなわちCLDCT(u)の曲率, 振率の変化が自己アフィン性を持つとき、創成される曲面を「対数美的曲面」と呼び、 $\gamma_c$  curve,  $\gamma_t$  curveの傾きをそれぞれ $\gamma_c$ ,  $\gamma_t$ とすると、このパラメータ $\gamma_c$ ,  $\gamma_t$ の値を変化させることで対数美的曲面の性質を制御することが可能となる。

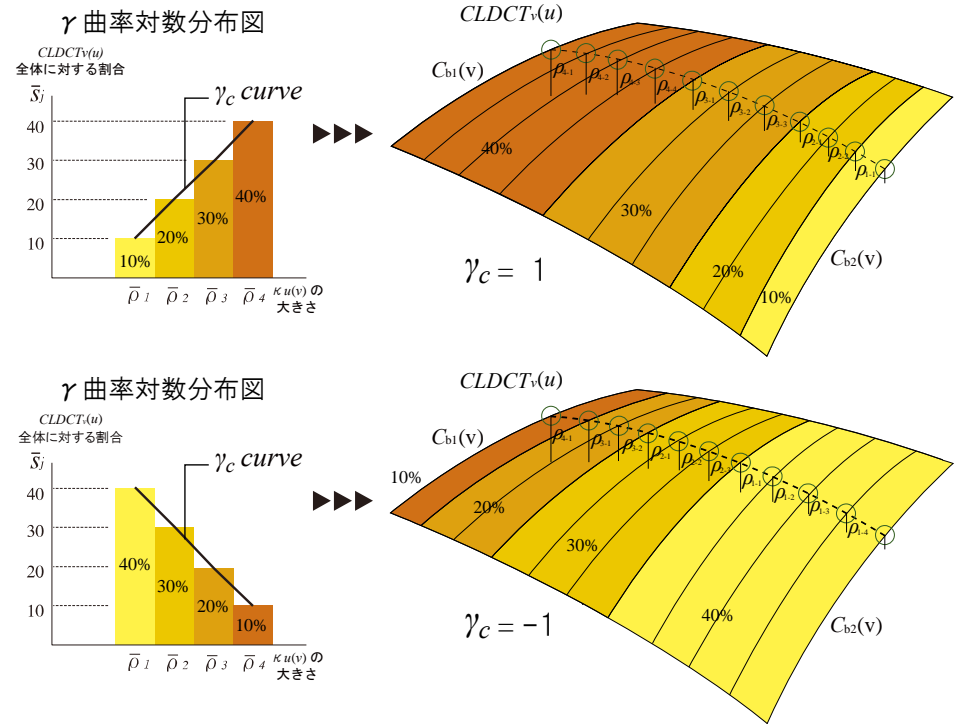


図5  $\gamma$ 対数分布図の説明

#### 4. 対数美的曲面の創成システムの開発とシミュレーション

2章, 3章で述べたアルゴリズムを用いて、対数美的曲面創成システムを開発した。まず、対数美的空間曲線の創成シミュレーションを行い、さらにその空間曲線を用いて対数美的曲面の創成シミュレーションを行った。

##### 4.1 対数美的空間曲線の創成シミュレーション

本節では、平面スケッチを入力し、対数美的空間曲線を創成するシミュレーションを行った(図6)。本シミュレーションの目的は、手描き入力した平面曲線の性質が、合成した空間曲線にどのように反映されるかを検証するためである。4種類の性質が既知の平面曲線(カーブ定規)を用いて実際に曲率半径が異なる曲線を描き、対数美

的空間曲線を4種類創成した。ここで性質が既知のカーブ定規を用いることにより、入力平面曲線の曲率変化の仕方である $\alpha$ 値を同定できるからである。

シミュレーションを行った結果、手描き入力した際に用いた平面曲線(カーブ定規)の $\alpha$ と分析された空間曲線の $\alpha$ がすべてのタイプでほぼ一致したが、 $\beta$ に関しては入力曲線形状から出力曲線形状を予測することは不可能であった。なぜなら、入力する2本の平面曲線の $\alpha$ の値が同じ場合、それら2本が合成された空間曲線の $\alpha$ はほぼ同じ値になるが、空間曲線の $\beta$ は投影図上の2本の平面曲線では制御することが困難なためである。また、対数美的空間曲線創成システムを用いて、同定した $\alpha$ と $\beta$ により対数美的空間曲線の創成を行ったところ、手描き入力した平面曲線の投影図とほぼ一致した。しかし、自分のイメージした振れかどうかを、空間曲線の形状のみから判断することは困難であった。

#### 4.2 対数美的曲面の創成シミュレーション

本節では、対数美的空間曲線から対数美的曲面を創成するシミュレーションを行った(図7)。用いる対数美的空間曲線は、手描きスケッチから前節のシステムにより創成した。曲面が創成されている状態で、曲面を構成する基準線 $C_{b2}$ の性質パラメータを変化させ、曲面形状の変化から空間曲線の形状を決めるシミュレーションを行った。 $\alpha, \beta, \gamma_c$ のパラメータを様々に変化させ曲面を創成することにより、どのような曲面にすべきかを明確にすることができると考えた。なおガイド線は直線に近い空間曲線とした。

対数美的曲面創成のシミュレーションを通して、不明確であった空間曲線の $\beta$ をはじめ同定でき、基準線となった対数美的空間曲線に戻ってその空間曲線を創成しなおすことも可能となった。

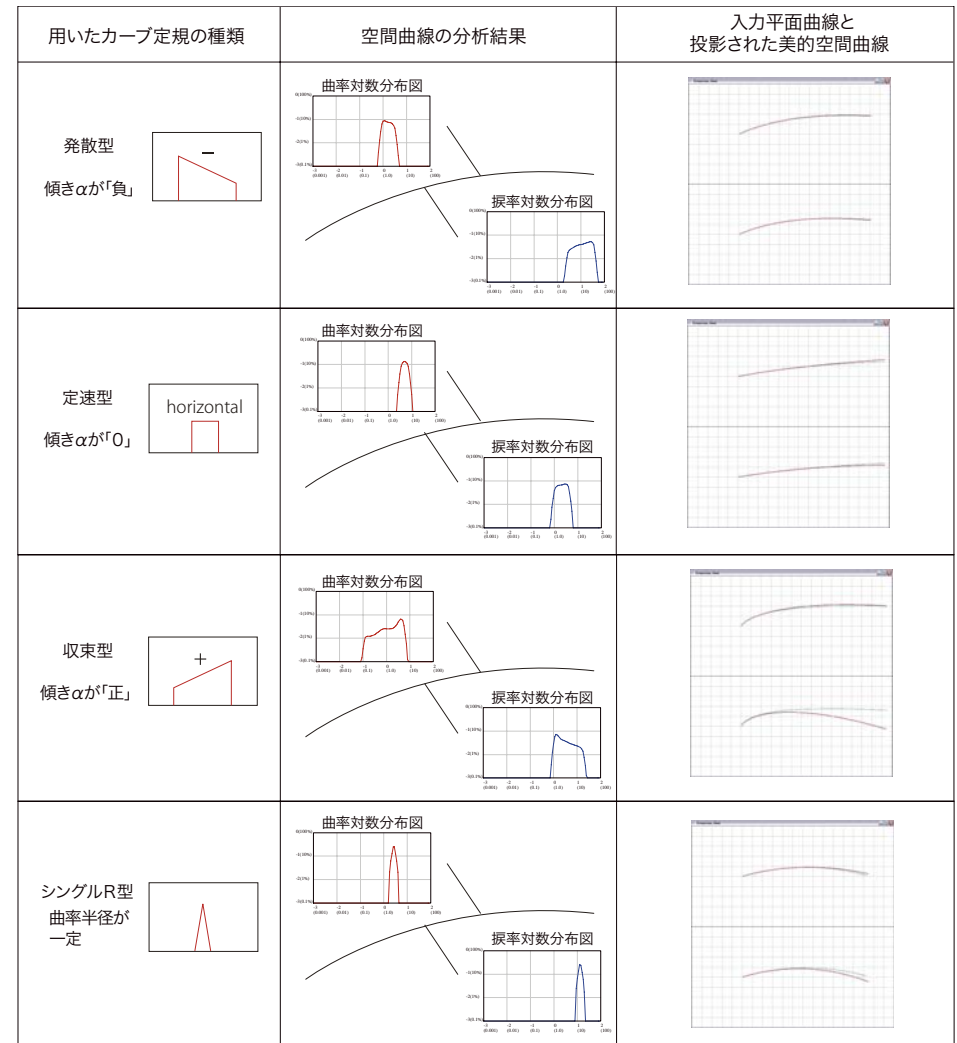


図6 対数美的空間曲線創成シミュレーション結果



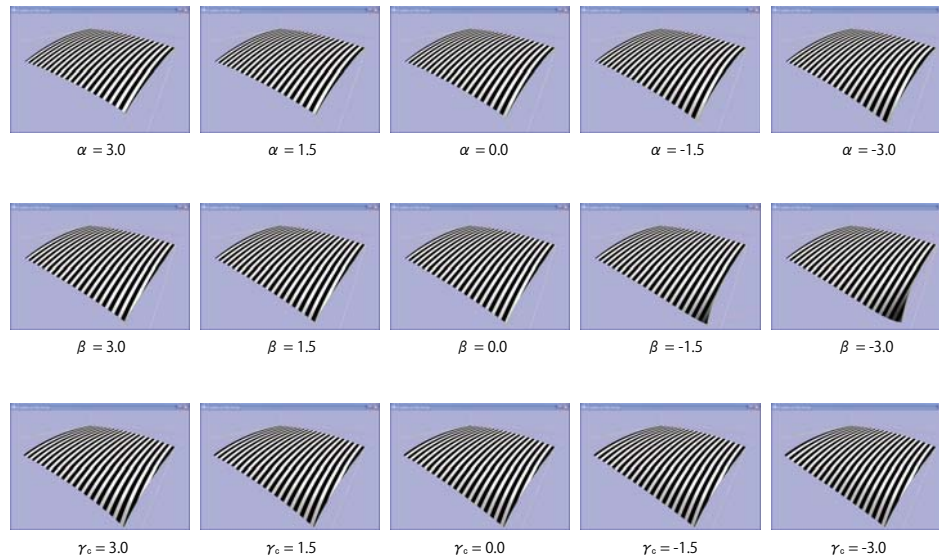


図7 対数美的曲面創成シミュレーション結果

## 5. まとめ

本研究では、手描き平面曲線から対数美的空間曲線を創成し、その空間曲線を用いて対数美的曲面を創成するシステムの開発を行った。

今後の課題として以下のようなものが挙げられる。

- 1) 本システムで創成できる空間曲線は曲率・振率単調曲線に限られているので、今後これら以外の曲線も創成できるようシステムを改良する必要がある。
- 2) 現在ディスプレイ上で曲線の数値パラメタ入力を行い空間曲線や曲面形状を変化させているが、この操作方法は、デザイナーにとって直感的な操作方法であるとは言えない。よって、VRでの空間曲線や曲面制御に適した入力デバイスを現在検討中である。
- 3) 曲面が創成可能である空間曲線の制約条件は非常に複雑であり、どのような曲線を入力した場合に曲面が張れるかは明らかになっていないため、今後明らかにする必要がある。

## 参考文献

- 1) 原田利宣, 吉本富士市, 森山真光: 魅力的な曲線とその創成アルゴリズム, 形の科学学会誌, Vol13, No.3, pp.149-158(1998)
- 2) 井上治郎, 原田利宣: 多項式による空間曲線の近似手法とそれを用いた性質分析, 情報処理学会グラフィクスとCAD研究会, Vol2007, No.129, pp.49-54(2007)
- 3) 伊丹裕美, 原田利宣: 手描き平面曲線からの対数美的空間曲線創成システムの開発, 情報処理学会グラフィクスとCAD研究会, Vol2009, No.134, pp.17-18 (2009)
- 4) 萩原徹, 原田利宣: 対数美的曲面の創成アルゴリズムとVRを用いた曲面創成システムの開発, 情報処理学会グラフィクスとCAD研究会, Vol2009, No.134, pp.13-16 (2009)
- 5) Jiro Inoue, Toshinobu Harada, Toru Hagihara: An Algorithm for Generating Log-Aesthetic Curved Surfaces and the Development of a Curved Surfaces Generation System using VR, Proc. of IASDR 2009 (2009) (accepted)
- 6) 吉田典正, 斎藤隆文: 美しい曲線の全体像解明と対話的制御, Visual Computing /グラフィクスとCAD合同シンポジウム, pp.77-82(2006)