

3次元位置センサを用いた直観的制御による 対数美的曲面創成システムの開発

伊丹裕美[†] 原田利宣^{††}

本研究では、デザイナーがディスプレイ上手描き入力した曲線から曲面を創成できるシステムを開発した。また、3次元位置センサとVR技術を用いて、創成した曲面のキーラインにおける曲率・捩率変化を直観的に制御可能とした。評価実験を行った結果、従来の数値制御やジョイスティックなどを用いる曲面創成システムに比べ、より短時間での曲面創成が可能となった。

A generation system of a log-aesthetic curved surface by intuitive control using the location sensor

Hiromi Itami[†] Toshinobu Harada^{††}

We aimed to develop a system to efficiently make a log-aesthetic space curve (key line) 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 intuitively control a curvature and torsion changes of key lines on the curved surface using the location sensor and VR (Virtual Reality). We simulated this system and confirmed that we could control the curved surface more speedily using the location sensor than using a control stick or entering numerical values on a control panel.

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ている¹⁾。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」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、捩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「捩率対数分布図」を考案した²⁾。捩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、空間曲線は捩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³⁾。また、キーラインとなる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、捩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^{4), 5)}。

そこで本研究では、手描き平面曲線から対数美的空間曲線を創成し、さらに手描き平面曲線から創成された対数美的空間曲線を基準線、ガイド線として用い対数美的曲面を創成する手法を提案し、そのシステムを開発する。第一に、手描き平面曲線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スケッチを描くことを模して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。

[†] 和歌山大学大学院
Graduate School of Wakayama University

^{††} 和歌山大学
Wakayama University

さらに、合成された空間曲線を曲率単調曲線・振率単調曲線に分割し、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曲率対数分布図の *C curve* の傾き α と振率対数分布図の *T curve* の傾き β を同定する。最後に、その α と β を用いて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、前述のようにして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平面曲線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、シミュレーションを行う。さらに、3次元位置センサとVR技術を用いて、創成した曲面のキーラインにおける曲率・振率変化を直観的に制御可能なシステムを開発し、従来のデバイスとの比較評価実験を行う。

2. 対数美的空間曲線創成アルゴリズム

ラフスケッチ上の平面曲線から、CADデータとして使える対数美的空間曲線を創成するアルゴリズムを述べる。また、本システムのフローを図1に示す。なお、アルゴリズムの詳細は、著者らによる既往研究を参考にされたい³⁾。

2.1 平面曲線の入力

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(図1中①)。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 $I_s(q)=[Y_s(q), Z_s(q)](q=0,1,2,\dots,n)$ 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(図1中②)。前節で取得した点列 I_u, I_s をそれぞれ X-Y 座標, Y-Z 座標上の点ととらえ、曲線の通過点を $G=[X_u, Y_u, Z_s]$ として空間曲線を求める。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

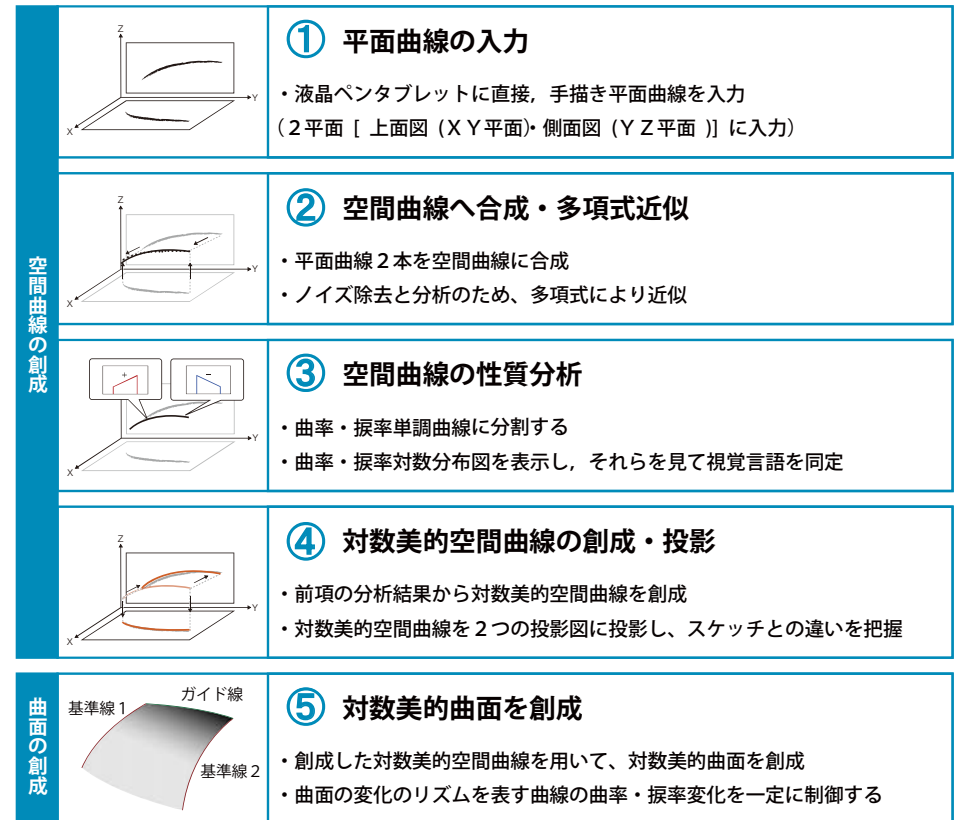


図1 本システムのフロー

(赤池情報量基準)に比べると大きいことが示されている²⁾。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、分析された各曲率単調曲線における α と β から、創成する対数美的空間曲線の α と β を同定する(図1中③)。

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(図1中④)。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⁶⁾、萩原らによる対数美的空間曲線の始点と終点を指定した曲線創成アルゴリズム⁵⁾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 α と β の値を入力する。

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、2つの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

前章で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。具体的には、曲面を特徴づける曲線である1本のガイド線と2本の基準線(基準線1, 2)を対数美的空間曲線とし、両基準線間における曲率、捩率の変化を制御するパラメータ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(図1中⑤)。

4. 対数美的曲面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。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($\alpha=2/3, 0, -1$, シングルR)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のは、入力平面曲線の曲率変化の仕方である(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 α と分析された空間曲線の α がすべてのタイプでほぼ一致した。一方 β に関しては2本の入力曲線で制御することが難しく、入力曲線の α からは予測できなかった。これは、入力する2本の平面曲線の α の値が同じ場合、それら2本が合成された空間曲線の α は入力曲線の α とほぼ同じ値になるが、空間曲線の β 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と考えられる。また、対数美的空間曲線創成システムを用いて、同定した α と β 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捩れかどうかを、立体視された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。用いる対数美的空間曲線は、スケッチを模したペンタブレットへの手描き曲線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2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。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対数美的空間曲線とした。

その結果、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 β 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。

4.3 曲面制御に適した入力デバイスの考察

現在、一般的なCADシステムでは、入力デバイスとしてマウスやペンタブレット、ダイヤルを用いている。筆者らの開発した従来の曲面創成システムでは、マウスを用いて画面上の数値パラメータを調整、又はキーボードから直接数値パラメータを入力する方法で曲面制御を行ってきた⁷⁾。しかし、VR技術を用いるためには暗い部屋でスクリーンに映像を投影する必要があり、これらの入力デバイスはシステム操作に適さない。また先行研究ではJOYSTICKを用いた曲面制御も行われている⁵⁾。しかし、これらの入力デバイスは、「曲がり」や「捩れ」を持つ空間曲線、曲面の制御に適してるとは言い難い。なぜなら、JOYSTICKの可動範囲と、曲率・捩率半径等の可動範囲が一致せず、直観的に制御できないと考えられるからである。また、力学的反力のある入力デバイスも存在するが、可動範囲が狭く、ユーザの動きを制限してしまうため、曲面制御には適さない。そこで本研究では、リアルタイムに位置情報を取得可能な3次元位置センサ(米国Polhemus製PATRIOT、以下PATRIOTと呼ぶ)を使用することで曲面制御がより直観的になると仮説を立て、インタフェースを開発した。この入力デバイスの特徴として、3次元空間上での位置座標(x,y,z)とその位置での回転角の検出が可能であることが挙げられる。この装置を使用した理由は、デザイナーが曲線を制御する場合、曲線を捩じる、または曲げる動作を直観的な操作で行うことができれば、曲線形状の容易な制御が可能になると考えたためである。

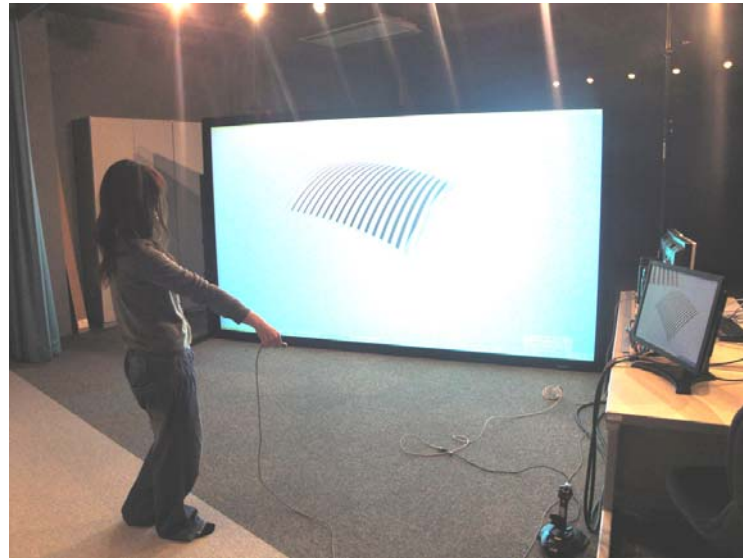


図2 実験風景

具体的には、3次元空間上での位置情報を取得し、対数美的曲面を構成する基準線2(図1⑤中)上の端点での曲率半径・振率半径の長さを変更できる実装を行った。

4.4 比較評価実験

本システムの制御に要する時間と精度が実用可能か検証するため、従来のシステムとの比較評価実験を以下の手順で行った。実験の様子を図2に示す。

- ・まず、実験用サンプル曲面(基準線、ガイド線を創成するための数値パラメタは提示せず)を22インチの別ディスプレイに提示し、被験者に見てもらう。
- ・次に、150インチスクリーンに提示された曲面(以下、制御用曲面)を、実験用サンプル曲面と同じ曲面になるよう曲率・振率半径を各デバイスを用いてVR上で制御してもらう。

用いたデバイスは、本研究で開発している「PATRIOT」(以下、方式1)、画面上のコントロールパネルをワイヤレスマウスでポインティングしキーボードで数値を入力する「数値制御」(以下、方式2)、既存研究で用いられた「JOYSTICK」(以下、方式3)である。操作方法を図3に示す。なお、被験者はCADソフト使用経験者9人(21~24歳の男性)を対象とした。実験結果を表1に示す。

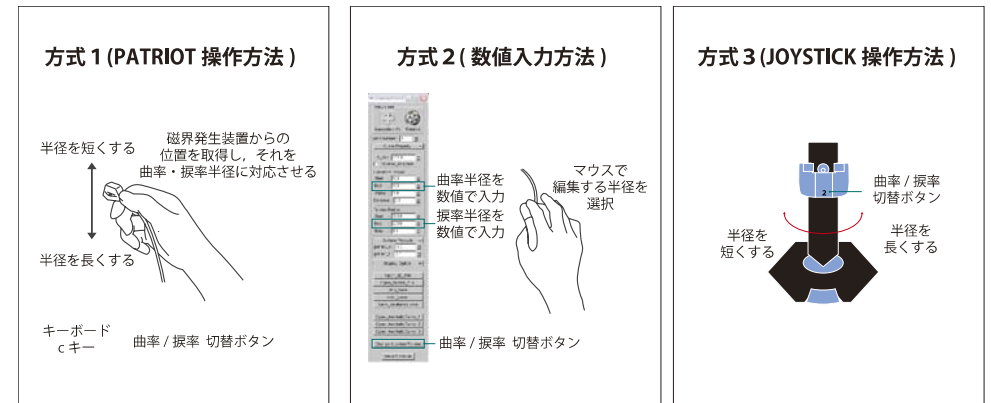


図3 操作方法

表1 比較評価実験の結果

制御時間と検定結果 (単位: 秒)			
	方式1	方式2	方式3
制御時間	60.778	257.56	116.33
** (1%有意) ** (1%有意)			
サンプルとの差 (曲率半径)と検定結果 (単位: pixel)			
	方式1	方式2	方式3
サンプルとの差	-60.667	16.222	92.556
サンプルとの差 (振率半径)と検定結果 (単位: pixel)			
	方式1	方式2	方式3
サンプルとの差	61.222	-1357.8	-45.000
** (1%有意) ** (1%有意)			

まず、3種のデバイス間の制御時間の差を分析するために、一元配置分散分析を行った。その結果、3種のデバイス間の制御時間に有意差が見られた ($F(2,8)=28.034, p<0.01$)。そこで、多重比較を行った結果、方式1と方式2の間、方式2と方式3の間にそれぞれ有意差(1%有意)が見られた。すなわち、Patriotによる制御時間は、Joystickの制御時間との有意差は出なかったが、時間は約2分の1に短縮されている。一方、Patriotによる制御時間と数値制御による制御時間との有意差は出ており、制御時間は約4分の1に短縮されている。

また精度の検証として、実験サンプル曲面と制御用曲面における曲率・振率半径の一致度を分析し、それぞれ一元配置分散分析を行った。その結果、曲率半径に対しては3種のデバイス間に有意差が見られなかったが、振率半径に対しては有意差が見られた ($F(2,8)=104.11, p<0.01$)。そこで、多重比較を行った結果、方式1と方式2の間、方式2と方式3の間にそれぞれ有意差(1%有意)が見られた。すなわち、「曲がり」に関しては、どの方式を用いても曲面形状から曲率半径を予測できており、「振じれ」に関しては、方式1と方式3において振率半径を予測できていた。しかし、方式2の振率半径においては、有意に実験用サンプル曲面の数値から大きくかけ離れていた。この原因は、被験者が制御用曲面の初期値から大きく値を変更することに消極的であることが原因と考えられる。

検証実験から、曲率半径を制御する際のPatriotによる操作は、数値制御による操作よりやや精度は落ちる。しかし制御にかかる時間は、Joystickの約2分の1、数値制御の約4分の1に短縮されており、短時間で妥当な形状を決めることができたと言える。

5. まとめ

本研究では、以下に表す成果が得られた。

- 1) 手描き平面曲線から対数美的空間曲線を創成し、その対数美的空間曲線を用いて対数美的曲面を創成するアルゴリズムを提案した。
- 2) そのアルゴリズムを用いた対数美的曲面創成システムを開発し、システムの有効性を明らかにした。
- 3) 3次元位置センサとVR技術を用いて直観的に対数美的曲面を制御できるシステムを開発し、従来のシステムとの比較評価実験を行った。その結果、数値制御に比べ精度はやや落ちるが、他デバイスに比べ短時間で妥当な形状を決めることができた。

今後の課題として以下が挙げられる。

- 1) 精度に関して、現在の3次元位置センサを用いた曲面制御では、スクリーン画面上の曲面形状を見て判断できる程度の調整しかできない。曲率・振率半径がより精密に制御できるようシステムを改良する必要がある。
- 2) 入力デバイスとして画像認識技術を用いるなど、より身体的負担の少ない曲面制御方法を考察する必要がある。
- 3) 本システムで創成される対数美的曲面同士を接続する手法を考案する。

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) 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, Proceeding(CD-ROM) of IASDR 2009 (2009)
- 5) 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)
- 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)
- 7) 伊丹裕美, 原田利宣: 位置センサを用いた対数美的曲面創成と制御に関する考察, 日本デザイン学会, Vol. 57, pp.E01(2010)