

視覚言語を用いたラフスケッチにおける 曲線の清書化システムの開発と応用

河野正之
和歌山大学大学院

原田利宣
和歌山大学

従来、製品形状設計に使用する曲線を創成する場合、デザイナーは描いたスケッチ上の曲線を構成する点列データをコンピュータに入力し、CAD上で曲線近似したのち、曲率変化を補正し曲線を創成する。しかし、多くの労力を必要とするこの一連の作業を効率化するシステムはほとんど提案されていない。

そこで、本研究ではフェアリングされた曲線と同程度以上の美しい曲線をデザイナーが描いたスケッチから直接創成するシステムの開発を目的とした。具体的には、まずデザイナーが描いた曲線における濃淡の中央線を求める。次に求めた濃淡中央線を曲率単調曲線に分割し、視覚言語に置換する。さらに、その視覚言語同士を美しく接続する。その結果、現状よりも効率よく美しい曲線を創成することが可能となった。

Development and application of a system generating aesthetic curves from sketches using visual languages

Masayuki Kono
Graduate School of Wakayama University

Toshinobu Harada
Wakayama University

Conventionally, when designers generate curves for the plans of products, they input a set of constitutional points of curves in the sketches to a computer, and interpolate them using a spline curve in CAD. Furthermore, they correct the curvature change of the curve for getting an aesthetic curve. However, there are few systems to support this operation.

Then, the aim of our study was development of a system that generate aesthetic curves available for the plans from the sketches. Concretely, we extract "Tone Median Line(TML)" from the sketches first. Second, we divide TML into the curvature monotonic curves and replace the curves by visual languages(VLs). Third, we connect these VLs smoothly. As a result, we could generate aesthetic curves efficiently.

1. はじめに

自動車や家電製品などの工業製品の外形形状設計図に使用する曲線を創成する際、まずデザイナーが描いたスケッチからデジタイザを用いてスケッチの主要な曲線を構成する点列データを抽出する。次に、得られたデータをもとに3次元CADシステム上でNURBSなどのスプライン曲線に近似する。最後にその曲線に対しフェアリング[注1]を行い、図面に利用可能な美しい曲線を創成する。ここで、問題点としてフェアリングの時間効率が挙げられる。現在、フェアリングを行うには膨大な時間が必要とされている。一般に、1台の自動車のフェアリングを行うにはオペレータ4~5人で2週間かかると言

われている。しかし、フェアリングの効率化を図るシステムはほとんど提案されていない。

そこで、本研究では、デザイナーが描いたラフスケッチからオペレータによりフェアリングされた曲線と同程度の美しい曲線を効率的に創成するシステムの開発を目的とした。具体的には、まずデザイナーが描いたラフスケッチをコンピュータ上に取り込み、各画素の色を256階調のグレースケールデータに変換したのち(以降、これを原画像と呼ぶ)、デザイナーが描いた重なった曲線をひとつの図として認識させ、その中心線を抽出する。次に、得られた中心線を多項式で近似したのち、各構成点における法線を算出し、それに基づいて線幅間における濃淡データ

(256階調のグレースケールのどの濃さかを示す値)の中央点である濃淡中央点を求める。さらに、濃淡中央点の点列データを多項式で近似し濃淡中央線を得る。そして、得られた濃淡中央線を曲率単調曲線に分割し曲率対数分布図[注2～3]を用いて性質の分析を行い、求めた性質に基づいて各曲率単調曲線を最適な視覚言語に置き直す。最後に、分割し置き直した視覚言語どうしを、その性質を損なわないように再接続する。

2. 濃淡中央線の抽出

通常のデザイン工程では、まずデザイナーは外形形状を吟味するように線を重ねながらラフスケッチを描き、それをもとに1本の美しい曲線により清書を描く。次にファイナルスケッチ上にある間隔でピックしていき点列データの座標を取得する。得られた点列はCADシステムに入力され曲線へと近似される。それに対し、本研究ではラフスケッチレベルのスケッチをコンピュータに入力し、グレースケールデータに変換したのち既存の画像処理手法ならびに提案手法を用いて前述の工程の代わりを行う。ここで、デザイナーの描いたファイナルスケッチを観察した結果、ラフスケッチを構成する線群の濃く重なった部分を清書線が通る傾向が見られた。そこで、提案手法でラフスケッチから1本の曲線を抽出する際、単に線幅の中心を通る曲線を抽出するのではなく、線群の濃淡データを利用して曲線を抽出する。得られた曲線は濃淡中央線と呼ぶ。以下に濃淡中央線を抽出するフローを示す。

- 1) ラフスケッチを構成する線群からその中心線を抽出する(以後、ラフスケッチを構成する線群を「図」、そのほかの背景部分を「地」、また図の中心線を「図中心線」と呼ぶ)。
- 2) 図中心線を多項式近似する。
- 3) 図中心線の近似多項式を利用して濃淡中央点を算出し、得られた点列を多項式近似する。

2.1. 図中心線の抽出

図における中心線を求めるため、既存手法であるHilditchの細線化法[注4]を用いて中心線を抽出する。しかし、画像に濃淡データが含まれていると細線化を行えないため、始めに画像を2値化する。だが、単に2値化を行った状態では図と地の境界部分にノイズが発生している場合があり、細線化を行ったときに図中心線が枝分かすることがある。そこで、膨張・収縮処理を用いて図と地の境界付近に発生するノイズを取り除いた

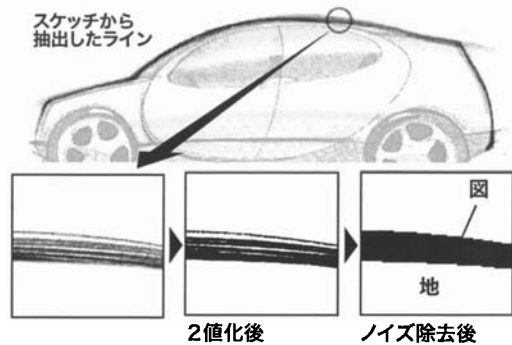


図1 2値化とノイズ除去

のち細線化を行い図中心線を抽出する(図1)。

2.2. 図中心線の多項式近似

2.2.1. 図中心線の分割

図中心線を多項式に近似する。しかし、図中心線に角ができた場合、単に曲線で近似しただけでは角を近似曲線の形状に反映させることは難しい。そこで、近似を行う前にあらかじめ角で図中心線を分割し別々の多項式で近似することで、図中心線を精度よく近似でき、角の形状も正しく反映される。

2.2.2. 多項式近似

図中心線を一本ずつ多項式近似する。ここで、多項式近似を行うには、座標データが1価関数でなければならないことに注意する必要がある。しかし、今回近似を行う図中心線の xy 座標データは1価関数であるとは限らないため、あらかじめ1価関数に変換しなければならない。そこで、曲線長を表す新たなパラメータ t を加え、 x と t ならびに y と t について近似を行う。

ここで、多項式近似とは、最小二乗法を用いて実際の座標データと近似曲線の残差二乗和を最小にする係数を求めることである。ある図中心線について x と t で多項式近似を行う場合、近似関数を式(1)とすると、求める残差 δ の二乗和は式(2)で求まる。さらに、それぞれの係数に対して式(2)を偏微分すると式(3)が成り立ち、求める変数の数と得られる方程式の数が一致するので、この方程式を解けば係数を定めることができる。 y と t においても同様に多項式近似を行う。ただし、近似多項式の次数はベイズ情報量基準BICを利用し、2～10次までで最適な次数を選出している。

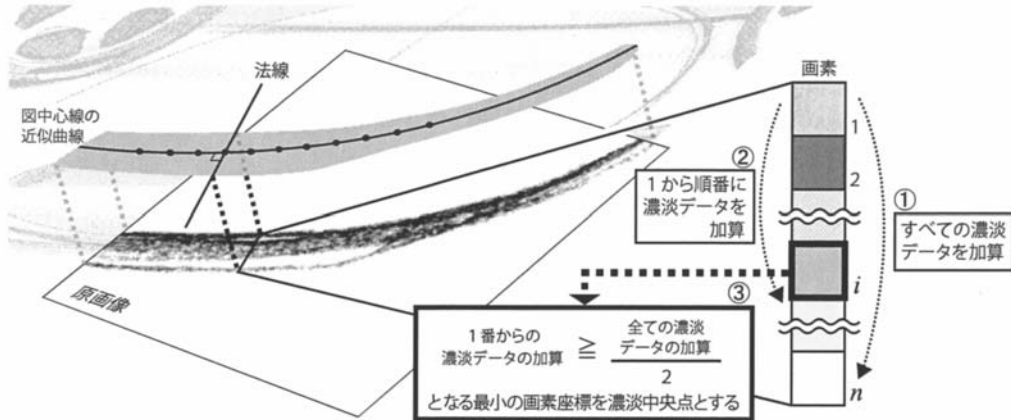


図2 濃淡中央点の抽出

$$x = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_1 t + a_0 \quad \text{式(1)}$$

ただし、 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$: 係数
 n : 近似多項式の次数

$$\sum_{j=0}^m \delta^2 = \sum_{j=0}^m \left(x_j - \sum_{k=0}^n a_k t_j^k \right)^2 \quad \text{式(2)}$$

m : 座標数
 x_j : j 番目の x 座標値
 t_j : j 番目の t 座標値

$$\frac{\partial}{\partial a_p} \sum_{j=0}^m \delta^2 = -2 \sum_{j=0}^m \left(x_j - \sum_{k=0}^n a_k t_j^k \right) \cdot t_j^p = 0 \quad \text{式(3)}$$

$(p = 0, 1, \dots, n)$

2.3. 濃淡中央点の抽出と濃淡中央線

前節で求めた図中心線の近似多項式を利用して図から濃淡データを抽出する。まず、近似曲線上に等間隔に点を取り、それらの点における法線を求める。法線を算出する点の間隔、描画する法線の大きさは任意に決定できる。本研究では数十回の実行結果から経験的に法線描画点の間隔を1画素、表示する法線の長さを120画素としている。その後、作成した法線を使用して原画像から濃淡データを抽出する。ある法線を近似曲線上に作成し、その法線によって切り取られる図の線幅上の画素数を n としたとき、切り取られた図の画素それぞれに対して順番に1~ n 番まで番号をつける。その後、一度全番号の画素が持つ濃淡データを加算し保存する。次に再度1番から順に濃淡データを加算していき、先ほど保存した値の半分を超えた位置での画素を濃淡中央点と名付け、その画素座標を保存する(図2)。この操作を求めた法線すべてに対して行う。こうして求めた濃淡中央点の点列を用いて2.2節と同様に多項式近似する。以上の手順により得られた曲線をこのラフスケッチにおける濃淡中央線とする。

	C curve の'傾き'	印象
単調リズム曲線	発散型 '傾き'が'負'	'切れのある' '勢いのある'
	定速型 '傾き'が'0'	'安定した' '静的な'
	収束型 '傾き'が'正'	'線にたまりのある' '求心的な'
複合リズム曲線	山型 '傾き'が'正'+ '負'	発散していた曲線がある境から収束していく印象
	谷型 '傾き'が'負'+ '正'	収束していた曲線がある境から発散していく印象

図3 体系化された視覚言語

3. 濃淡中央線への視覚言語の適用

現在の作業工程では、デジタイザにより入力された点列はCADシステムで曲線に近似されたのち、フェアリングが行われる。なぜなら、計測点列を一般的なCADシステムが持つ近似コマンドにより近似しただけでは、計測誤差による曲線のノイズが除けず、そのまま形状設計に用いられるレベルの品質を有していないからである。前章で創

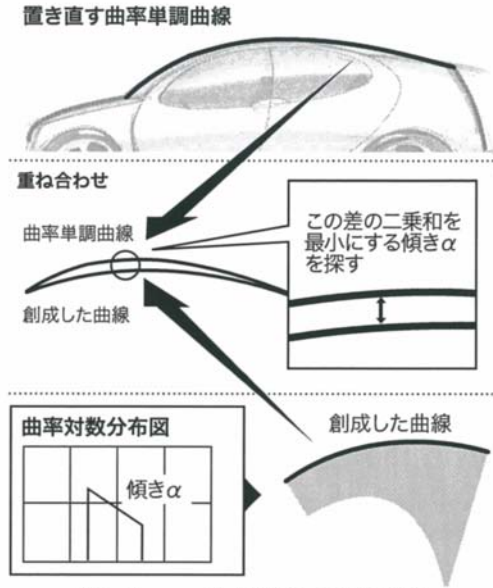


図4 C curveの“傾き”の決定方法

成された濃淡中央線もノイズを含む可能性があるためフェアリングを行わなければいけない。しかし、人の手でフェアリングを行うことは前述のとおり効率が悪い。そこで、濃淡中央線の持つ性質を分析し、その分析結果をもとに同様の性質と曲線長をもつノイズのない美しい曲線を新たに創成し、濃淡中央線の位置に置き直すことでフェアリングの代わりとする。

3.1. 視覚言語の同定

工業製品における美しい曲線の性質は、すでに原田ら(1994)によって解明されている[注2~3]。曲線の性質を分析するにあたって原田らは、曲線の重要な性質である曲率変化の仕方とボリュームを同時に、直感的に理解しやすく定量化する方法を開発している。その手法とは、曲線上の等間隔に設定された各構成点における“曲率半径”とその曲率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ものである。この手法で扱える曲線は曲率単調曲線(曲率が曲線の端点からもう一方の端点に一樣に増加[減少]するもの)である。また、この方法により描かれる図を「曲率対数分布図」と呼ぶ。「曲率対数分布図」は横軸に曲率半径区間を、縦軸に各曲率半径区間に現れる曲線長をとり、そのヒストグラムの頂点を線で結ぶことにより、その軌跡として求められる。この軌跡をC curveと呼ぶ。この「曲率対数分布図」をxy直交座標系に見立てたとき、C curveの“傾き”が曲線の性質(曲率変化)を

		曲線の接続部	該当の接続をもつ数学曲線
曲率半径 長+長	曲率半径が同方向		多項式 カージオイド 楕円 レムニスケート リマソン リサージュ 葉線
	曲率半径が逆方向		多項式 レムニスケート 三角関数 トロコイド リチウス
曲率半径 短+短	曲率半径が同方向		多項式 リチウス 楕円 レムニスケート 三角関数 リサージュ リマソン 双曲線 葉線 トロコイド
	曲率半径が逆方向		なし
曲率半径 長+短	曲率半径が同方向		なし
	曲率半径が逆方向		なし

図5 数学曲線の接続部の分類

表す。加えて、本定量化手法により1000本以上の工業製品、工芸品、ならびにデザイナーの描いた曲線の性質を分析した結果、図3のような5タイプの曲線群にほぼ分類できることが確かめられている。実用上、曲率半径が一定である円弧をそれらの5種の曲線群に加えた、計6種の曲線群を創成する際の視覚言語としている。

そこで、得られた濃淡中央線を曲率単調曲線に分割し、各曲率単調曲線における曲率対数分布図のC curveの“傾き”と図3を照らし合わせ解釈を行い、曲率単調曲線それぞれにおける視覚言語を同定する。

3.2. 視覚言語への置き直し

前節での結果をもとに、各曲率単調曲線を視覚言語に置換し元の位置に再配置する。同定された視覚言語を創成する手法は既に提案されており

[注5], 発生させる曲線の曲線長, 曲率半径の最大値と最小値, *C curve*の“傾き”を設定すれば創成することができる。創成可能な曲線は, 図3に示される *C curve*の“傾き”が一定の単調リズム曲線, *C curve*の“傾き”が山型[谷型]の複合リズム曲線の両方が可能だが, 複合リズム曲線の創成は単調リズム曲線の組み合わせにより創成可能であるため, 今回は単調リズム曲線に限定して創成を行う。分析結果から曲線を創成する場合, 曲線長ならびに曲率半径の最大値・最小値は一意に定まるが, 分析した曲率単調曲線の *C curve*の“傾き”が単調リズム曲線であるとは限らず, 異なる場合は単調リズム曲線になるように *C curve*の“傾き”を一定値に近似する。しかしながら, 近似を行う場合, 傾きを一義的に決めることは難しい。そこで, 同定した視覚言語を有する範囲で *C curve*の“傾き”を変化させ, 置換前の曲率単調曲線の形状に一番“近い”形状となる曲線が創成される *C curve*の“傾き”を採用する。“近さ”の判定には曲率単調曲線と創成した曲線との残差二乗和を用い, もっとも残差二乗和の値が低くなった傾きを使用する(図4)。こうして創成された曲線を置きなおす曲率単調曲線の始点と終点の位置関係にあわせてフィッティングさせる。

3.3. 視覚言語どうしの接続

3.1節で濃淡中央線を曲率単調曲線に分割したのち視覚言語に置き直したため, 置き直した視覚言語どうしを再接続しなければならない。単に曲線を滑らかに接続する手法は既に提案されている。しかし, 現状では曲率変化を考慮した接続方法は提案されておらず, 前述の接続方法を採用すると置き直した視覚言語の曲率変化を損なう繋ぎ方をしてしまう可能性がある。そこで, 美しく連続している数学曲線の接続部を分類し(図5), それらを参考に視覚言語どうしを接続する。

4. まとめ

本研究では以下に示す成果が得られた。

- 1) ラフスケッチから, デザイナの描いた曲線の濃淡データをもとに濃淡中央線を抽出することができた。これによりデザイナの感覚に近い曲線を得ることができた。抽出のプロセスは完全にシステム化されているため, 同条件を与えれば誰でも再現することが可能である。
- 2) 濃淡中央線を曲率単調曲線で分割し, それぞれの部位における曲率対数分布図を作成し

た。また, 曲率対数分布図の傾きから各曲率単調曲線の視覚言語を同定し, その視覚言語を有する美しい曲率変化を持つ曲線に置き直すことができた。さらに, 置き直した視覚言語を, その性質を損なうことなく滑らかに接続することができた。これにより, 現在のフェアリングの作業効率が飛躍する可能性を示すことができた。

次に, 今後の課題として, 以下のようなものが考えられた。

- 1) 現在, 作業者の主観により図中心線を分割しているが, 最適か否かを判断できていない。そこで, 角の形状も反映して近似可能なB-スプライン近似等の方法を採用する必要がある。
- 2) 現システムでは, 濃淡中央線を曲率単調曲線に分割したのち, 作業者の判断で視覚言語の同定を行わなければならない。しかし, 濃淡中央線が多くの曲率単調曲線に分割される場合, 視覚言語の同定やどの曲率単調曲線がノイズであるか判断するのに専門的な能力やノウハウを必要とする。
- 3) 今後, 現在の手作業によるフェアリングと提案システムを用いた場合とで, 創成されたキーラインの違いや作業効率の違いを比較検証する必要がある。

注および参考文献

- 1) フェアリングとは, ある曲線(曲面)を測定しコンピュータ内に取り込んだままのデータでは, その測定誤差からS字状のうねりを持った(曲率半径ベクトルが反対を向いている)箇所が存在するので, その箇所を同一方向に修正していく作業のことをいう。
- 2) 原田利宣, 森典彦, 杉山和雄: 曲線の性質に関する定量化研究, デザイン学研究, Vol.40, No.6, pp.9-16 (1994)
- 3) 原田利宣, 中嶋信幸, 栗原祐介, 吉本富士市: 視覚言語を用いた曲線の自動フェアリングシステム, デザイン学研究, Vol.47, No.5, pp.21-28 (2001)
- 4) C.J.Hilditch: Linear Skeletons from Square Cupboards, Machine Intelligence, Vol.4, 403-420 (1969)
- 5) 原田利宣, 森典彦, 杉山和雄: 性質制御による曲線創成手法, デザイン学研究, Vol.41, No.4, pp.1-8 (1994)