

## 自然造形物・工芸品における曲面の曲率線抽出とその性質分析

Extraction of line of curvature and analysis of curves in the natural objects and craftworks

井上治郎<sup>\*1</sup>

Jiro Inoue

原田利宣<sup>\*2</sup>

Toshinobu Harada

<sup>\*1</sup> 和歌山大学大学院

Graduate School of Wakayama University

<sup>\*2</sup> 和歌山大システム工

Wakayama University

The natural objects of picture contents such as a cartoon film or a movie are made by CG. We need a great deal of labor for this production. Because those objects are made by *kansei* of a creator or measuring the real objects simply by a digitizer. We propose an analysis system of visual language constituting a curved surface. The system is constructed by the following five steps. 1) Lines of curvature are extracted from curved surface of the natural products measured by a 3D-digitizer. 2) The extracted lines of curvature data are approximated by polynomial. 3) The polynomial curve (line of curvature) is divided into curves of monotone curvature. 4) "Characteristic" of the curve is analyzed for each curve of monotone curvature. 5) Each curve of monotone curvature is substituted by a visual language based on the result of the analysis mentioned above, and each line of curvature is reconstructed by the visual language. By this system, we clarified the "characteristic" of each curved surface and got a possibility of the construction of digital archive.

## 1. はじめに

日本の重要な輸出産業であるアニメーションや映画などの映像コンテンツ制作には、コンピュータグラフィックスが必要不可欠なものとなっている。その作品中に登場する造形物もコンピュータによって3次元モデリングされたCGが用いられるようになってきた。しかし、それらの曲面の造形は作家の感性に委ねられることが多く、その制作に多大な労力を必要としている。

そこで、本研究では、すでになされている曲線(面)における視覚言語の抽出と体系化に関する研究[注1]をベースとして、自然造形物の曲面がどのような視覚言語とその組み合わせでできているかを解明する技術を開発し、実際に自然造形物の分析を行うことによってその曲面を構成する視覚言語を明らかにすることを目的とする。また、それらをデジタルコンテンツ制作に再利用するため、デジタルアーカイブ化することを目的とした。つまり、自然造形物・工芸品の“図面集”の制作と換言できる。まず、自然造形物の曲面の曲率線をキーライン[注2]として取得し、それを投影面に投影する。その投影された曲線の曲率対数分布図[注1]より曲線の性質を特定する。これにより、自然造形物・工芸品の醸し出す特有の美しさの本質的要因を解明でき、コンテンツ制作のみならず、家電や自動車といった工業製品の形状デザインに自然造形物の美しさを応用することもできる。

## 2. 曲率線抽出システム作成

計測した曲面の曲率線を抽出するシステムを作成した。

## 2.1 曲率線抽出アルゴリズム

1) 計測された曲面を構成する点群において、ある点を原点としたとき、原点の法線をその近傍8点から近似的に求める。

連絡先：井上治郎，和歌山大学大学院 システム工学研究科，  
〒640-8510 和歌山市栄谷930，Tel, Fax: 073-457-8483，  
s075005@sys.wakayama-u.ac.jp

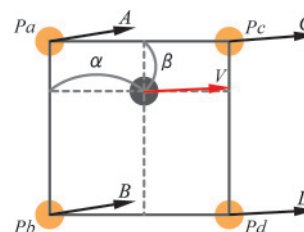


図1 線形補間法

2) 求めた法線から各点に接する接空間(正規直交座標系)を求め、その接空間における原点と近傍8点の計9点で2次曲面に2次近似する。その近似する2次曲面式 $z$ は未知定数を $a, b, c$ 、近似誤差を $e$ とすると、

$$z = ax^2 + 2bxy + cy^2 + e \quad (\text{式1})$$

となる。この近似誤差 $e$ を最小にするように最小二乗法で近似し、未知定数 $a, b, c$ をそれぞれ求める。

3) 求めた近似曲面式の係数で対称行列をつくり、固有値を $\lambda$ 、固有ベクトルを $U$ とすると、

$$\begin{Bmatrix} a & b \\ b & c \end{Bmatrix} U = \lambda U \quad (\text{式2})$$

となる。

4) これより求めた固有値が主曲率で、それに対する固有ベクトルが主方向となる。1)から3)の処理を点群全てにおいて実行することで、入力点における主方向が求まる。

5) 入力点間の点における主方向を、すでに求まっている入力点の主方向から線形補間法により近似的に求める。その求めたい点の主方向を $V$ 、その近傍4点の主方向の値を $A, B, C, D$ 、求めたい点から最も近い近傍1点までの $X$ 軸方向の距離を $x$ 、 $Y$ 軸方向の距離を $y$ とすると、線形補間の式は、

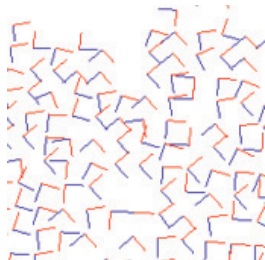


図2 ノイズ軽減処理前

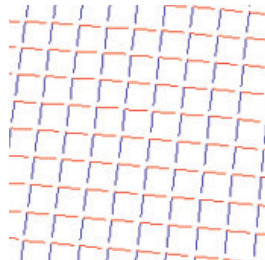


図3 ノイズ軽減処理後

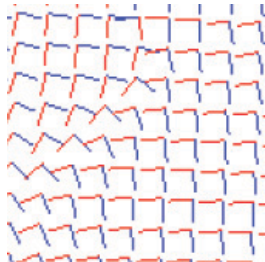


図4 ノイズ軽減処理

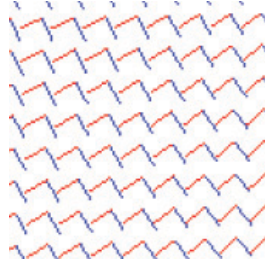


図5 多項式近似した曲面

$$V=A(1-\alpha)(1-\beta)+B(1-\alpha)(\beta)+C(\alpha)(1-\beta)+D(\alpha)(\beta) \quad (式3)$$

となる(図1)。これにより、任意の点における主方向を求めることが可能となり、主方向を接続することができ、曲率線を抽出できる。

## 2.2 ノイズ軽減処理

実際に前節の曲率線抽出システムを用いて曲面の分析を行った場合、曲面の凹凸や計測時の誤差などから、曲率線を滑らかに求めることができない。そこで、分析曲面におけるノイズを軽減する処理を追加した。

- 2.1節の2)における2次曲面に近似する点群を増やすことによって主方向が受けるノイズの影響を軽減することが可能となる。2.1節の2)は接空間における原点からx軸方向,y軸方向共に±1の点で主方向を求める方法である。それを,x軸方向,y軸方向共に±2, ±3, ±4, ±5, ±6の点でそれぞれ主方向を求める。
- このノイズ軽減処理アルゴリズムを追加し、処理追加前と追加後の主方向を図2, 3に示す。明らかにノイズを軽減でき、主方向の流れが見える。

## 2.3 多項式近似による分析曲面データの創成

前節の処理を行ってもノイズを軽減できない曲面では、曲率線抽出システムを使用することができない。そこで、そのようなノイズの多い曲面を分析するために、その曲面を最小二乗法による多項式近似によって近似し、曲率線抽出システムで分析可能な曲面データを創成するシステムを作成した。

- 1) 曲面の多項式近似は二元多項式近似なので、zがxとyの関数で表され、さらにp次であるとする、

$$z = \sum_{i+j \leq p} \alpha_{ij} x^i y^j \quad (式4)$$

となる。この近似式を、最小二乗法で近似する。



図6 最小曲率線

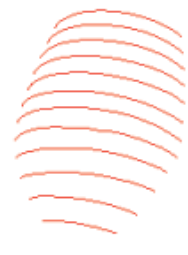
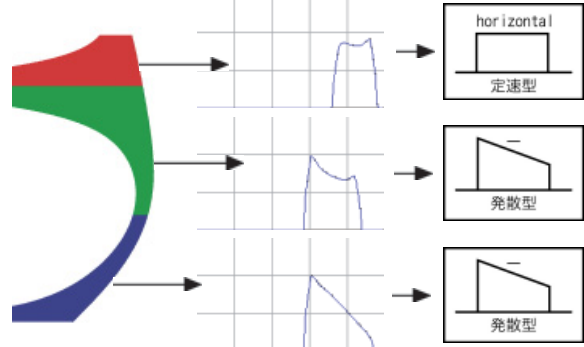


図7 最大曲率線



単調曲線分割 曲率対数分布図 視覚言語

図8 ワイングラス分析結果

- 2) この多項式近似プログラムを作成し、曲面のノイズが大きいデータの主方向を曲率線抽出システムにより求めた。±6ノイズ軽減処理での実行結果と多項式近似した曲面の実行結果を図4, 5に示す。±6ノイズ軽減処理でも多少滑らかにはなっているが曲率線が求まるほどノイズを取り去ることができていない。しかし、多項式近似によって創成された分析曲面ではノイズを取り去り、主方向の流れが見える。

## 3. 自然造形物・工芸品における曲率線の性質分析

各曲面の曲率線を抽出し、曲率線の性質として曲率対数分布図を求め、その傾き [注1]より曲率線がどの視覚言語とその組み合わせで構成されているかを求める [注3]。

### 3.1 ワイングラスにおける曲率線の性質分析

ワイングラスの曲面は細かい凹凸が無く、ノイズ軽減処理を行えば曲率線を滑らかに抽出できる。これにより最小曲率線,最大曲率線をそれぞれ取得した(図6, 7)。

#### 1) 最小曲率線分析

最小曲率線を抽出した結果、最小曲率線は垂直方向の断面線であるので、どの曲率線も等しいことが言える。つまり、1つ曲率線を分析すればその他の曲率線の分析結果を得ることができる。その分析の結果、最小曲率線は定速型 発散型 発散型の3つの視覚言語が順に接続した曲線となっている(図8)。

#### 2) 最大曲率線分析

最大曲率線を抽出した結果、最大曲率線は水平方向の断面線であるので、どの曲率線も等しいことが言える。さらに、ワイングラスは回転体であることから、その断面線はシングルRとなる。よって、最大曲率線はシングルRとなる。

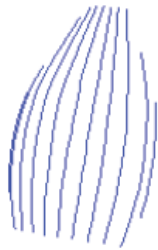


図9 最小曲率線

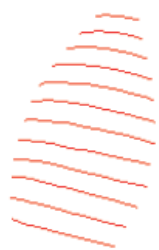


図10 最大曲率線



図12 最小曲率線



図13 最大曲率線

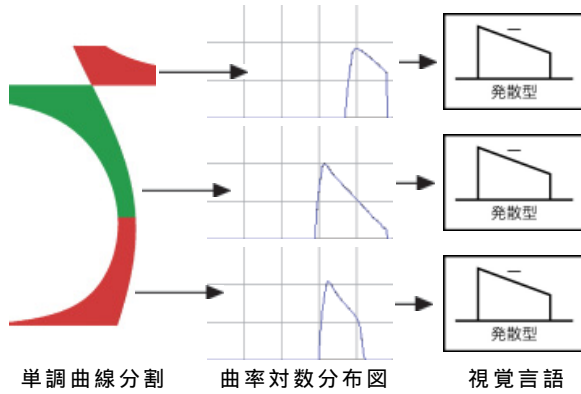


図11 デリ分析結果



図14 最小曲率線の分解

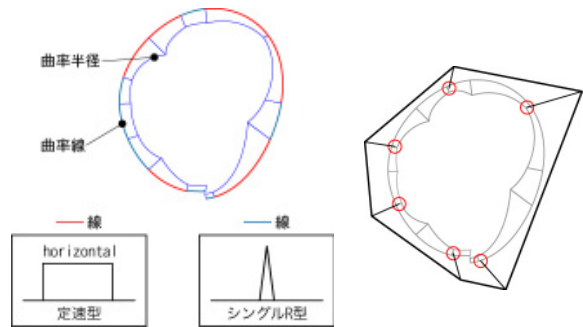


図15 石の曲率線1の分析結果 図16 元の石の形状

### 3.2 デリにおける曲率線の性質分析

徳リの曲面は、ワイングラス同様、細かい凹凸が無く、ノイズ軽減処理を行えば曲率線を滑らかに抽出できる。これにより最小曲率線、最大曲率線をそれぞれ取得した(図9, 10)。

#### (1) 最小曲率線分析

最小曲率線を抽出した結果、最小曲率線は垂直方向の断面線であるので、どの曲率線も等しいと言える。つまり、ワイングラス同様、1つ曲率線を分析すればその他の曲率線の分析結果を得ることができる。その分析の結果、最小曲率線は発散型が3つ接続した曲線となっている(図11)。

#### (2) 最大曲率線分析

最大曲率線を抽出した結果、最大曲率線はワイングラス同様、水平方向の断面線であるので、どの曲率線も等しく、さらに、徳りは回転体であることから、その断面線はシングルRとなる。よって、最大曲率線はシングルRとなる。

### 3.3 石における曲率線の性質分析

石の曲面は凹凸が大きく、ノイズ軽減処理をしても曲率線を滑らかに取得できない。そのため、曲面の多項式近似を行い、分析曲面の創成を行った。近似次数は6次である。この分析曲面の最小曲率線、最大曲率線をそれぞれ取得した(図12, 13)。

#### (1) 最小曲率線分析

最小曲率線は2つの部分に分かれており、それぞれの曲率線を分解して分析を行った。分解した曲率線を曲率線1、曲率線2とする(図14)。そして、各曲率線を2投影面に投影させ、平面曲線を取得した。しかし、曲率線1は

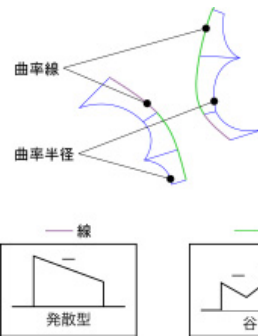


図17 石の曲率線2の分析結果

その空間曲線自体がほぼ平面曲線とみなせることより、1投影面への投影によって得られた平面曲線进行分析した。

まず、曲率線1の投影曲線について、その投影曲線は定速型の曲線をシングルRでつないだ曲線となっている(図15)。さらに、曲率半径が小さくなっている箇所が6箇所あることから、この石がもともと六角形の石であり、それが長い時間かけて削られ、現在の形状になったことが推測される(図16)。次に、曲率線2のX-Y平面投影曲線について、その投影曲線は発散型と谷型[注3]を接続した曲線となっている(図17)。次に、曲率線2のX-Z平面投影曲線について、その投影曲線は一定のルールを得られなかった。

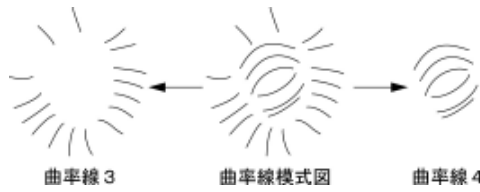


図 18 最大曲率線の分解

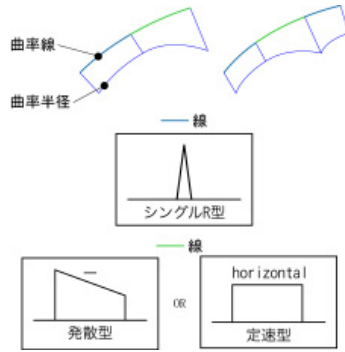


図 19 石の曲率線 3 の分析結果

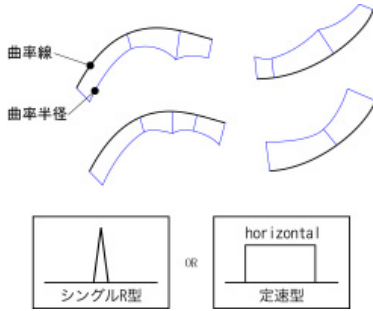


図 20 石の曲率線 4 の分析結果

2) 最大曲率線分析

最大曲率線においても、最小曲率線と同様に 2 つの部分に分かれており、それぞれの曲率線を分解して分析を行った。分解した曲率線を曲率線 3、曲率線 4 とする(図 18)。そして、各曲率線を 2 投影面に投影させ、平面曲線を取得した。しかし、曲率線 3、4 共に空間曲線自体がほぼ平面曲線とみなせることより、1 投影面への投影によって得られた平面曲線のみ分析を行った。

まず、曲率線 3 の投影曲線について、その投影曲線はシングルR型-発散型が接続した曲線、シングルR型-定速型が接続した曲線、シングルR型-発散型-シングルR型が順に接続した曲線、シングルR型-定速型-シングルR型が順に接続した曲線の 4 種類に分類できる(図 19)。次に、曲率線 4 の投影曲線について、一定のルールを得ることができなかったが、全ての曲率単調曲線がシングルR、もしくは、定速型であり、それらが 2 ~ 4 つ接続した曲線となっている(図 20)。

3.4 分析曲面の体系化

同様に、マウスについてもその曲面における曲率線を抽出し、その分析を行った。また、それらの分析結果をまとめ、各曲面における曲率線の視覚言語を体系化した(図 21)。

		曲率線	X-Y平面投影	X-Z平面投影	Y-Z平面投影
石	最小曲率線				
	最大曲率線				
ワイングラス	最小曲率線				
徳利	最小曲率線				
マウス	最小曲率線				
	最大曲率線				

投影面	単調リズム曲線			複合リズム曲線		シングルR
	—線	—線	—線	—線	—線	—線
発散型						
定速型						
収束型						

図 21 曲率線の体系化

4. まとめ

本研究では以下に示す成果が得られた。

- 1) 計測した曲面の点群から曲率線を抽出するシステムを開発し、曲面の凹凸や計測誤差を含んでいるデータでも曲率線を抽出できるように改良した。これにより、さまざまな曲面の曲率線を抽出することが可能となった。
  - 2) 抽出した曲率線を投影面に投影し、それによって得られた曲線の曲率対数分布図を作成した。その曲率対数分布図の傾きから曲率線を構成する視覚言語を求めることができた。  
今後の課題として以下のようなものが挙げられる。
- 1) 曲率線を投影面に投影し、平面曲線化して分析するには限界があり、複雑な曲率線を分析することができない。そのため、曲率線(空間曲線)自体を分析する方法の考案が必要である。
  - 2) 今回の結果をもとに曲面を再構成し、その曲面がもとの造形物らしいか検証する必要がある。

注および参考文献

- 1) 原田, 吉本, 森山: 魅力的な曲線とその創成アルゴリズム, 形の科学学会誌, 第 13 巻第 3 号, pp. 149-158, 1998.
- 2) 原田, 中嶋他: 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, 第 47 巻第 5 号, pp. 21-28, 2001.
- 3) 原田, 中嶋他: 自然造形物・工芸品における曲線の分析, デザイン学研究, 第 47 巻第 3 号, pp. 29-38, 2000.