

## 形状と質感の融合のためのモデリング法

藤本 忠博 大野 義夫

慶應義塾大学 理工学部

本研究では、微細形状の集合が生み出す秩序である「パターン」を形状として生成することで、「形状」と「質感」とを融合するモデリング法を提案する。「パターン」のもつ本質的な特徴として、「空間／スケール方向の局所的類似性」の概念を考え、それが「スプライン補間」および「フラクタル」に関連するものであることを示す。そして、その概念を具体化するための道具として、「反復交差変換」(Iterated Shuffle Transformation: IST)を提案する。さらに、「交差ウェイブ」という直観的なユーザインタフェースを通して、このISTを実際の形状モデリングに適用することを試みる。結果として、本手法により、さまざまな特徴的な「パターン」を容易に形状化することが可能であることが確認できた。

## A Modeling Method for Unifying Shape and Impression

Tadahiro Fujimoto Yoshio Ohno

Faculty of Science and Technology, Keio University

A “pattern” consists of a great number of tiny shapes and has its own unique order. In this paper, we present a modeling method which creates a “pattern” as shape and unifies “shape” and “impression”. We consider the concept of “local resemblance in space / scale direction” to be an essential character of “pattern”. The concept is related with “spline interpolation” and “fractal”. We propose “Iterated Shuffle Transformation” (IST) as a tool to realize the concept. IST is applied to our modeling method in suitable form, and user can intuitively create shapes by “shuffle wave” interface. As a result of some experiments, we conclude that our method can easily create various kinds of characteristic “patterns” as shape models.

## 1 序論

人間の視覚による物体形状の把握のしかたには、そのスケールにより、1) 幾何学的に正確に把握する（「外形」）、2) 微細形状の集合が生み出す秩序として抽象的に把握する（「パターン」）、の二通りがあると考えられる。そして、物体のもつ質感の決定には、2) の「パターン」が重要な役割を果たす。

従来の形状モデリングでは、まず、ユークリッド幾何に基づく方法で「外形」を作成し、続いて、その外形に対してテクスチャマッピングやバンプマッピング等により質感を与える、という流れが一般的である。この方法では、質感を生み出す「パターン」を形状として扱ってはならず、「形状」と「質感」は分離されたものとなっている。

本研究では、「パターン」を形状として生成することで、「形状」と「質感」とを融合するモデリング法を提案する。形状としての「パターン」には、変形等の通常の形状に対する操作が適用可能であり（当然、テクスチャ等には適用できない）、この融合には、質感を伴う形状を自由かつ容易に作成していくことを可能とする利点がある。

本研究では、「パターン」を特徴付ける本質的な要因として、「空間／スケール方向の局所的類似性」の概念を考える（2節）。「空間方向の局所的類似性」は「スプライン補間」に、「スケール方向の局所的類似性」は「フラクタル」に関連するものである。そして、その概念を形状モデリングに応用する道具として、「反復交差変換」を提案する（3節）。さらに、「交差ウェイブ」と呼ぶユーザインタフェースを利用して、この「反復交差変換」を実際の形状モデリングに適用し、その有効性とモデリング能力の高さを検証する（4節）。

## 2 空間／スケール方向の局所的類似性

本研究では、「パターン」のもつ本質的な特徴として、「空間／スケール方向の局所的類似性」の概念を考える。

「空間方向」とは「縦、横、高さ」のような「視点」の移動に関する方向性であり、「スケール方向」とは「拡大、縮小」という「視野」の移動に関する方向性とする。本研究では、人間の視覚はこの二種類の方向性によって物体の形状をとらえるものとする。また、「類似性」とは「平行移動や回転、拡大や縮小といった何らかの変換の下で、はじめと

類似した状態を維持する」という、「対称性」や「相似性」を含んだ概念とする。

物体の形状を構成する個々の点は、当然のことではあるが、それぞれ周囲の点と「つながり」をもち、その「つながり」が形状全体を構成する。そして、近傍の点どうしは、当然、その位置や属性（色など）が類似したものである。すなわち、これが「空間方向の局所的類似性」であり、これにより、人間は形状を形状として知覚するものと考えられる。

一方、「スケール方向」に関する形状の特性として人間の視覚に対して印象的に飛び込んでくるのは、「連続的な拡大／縮小の変化の下で次々と類似した形状が出現するような特性」であると考えられる。すなわち、これが「スケール方向の局所的類似性」である。

「空間方向の局所的類似性」は「スプライン補間」に関連し、「スケール方向の局所的類似性」は「フラクタル」に関連する概念である（3.3節）。

## 3 反復交差変換

### 3.1 反復交差変換の定義

本研究では、「空間／スケール方向の局所的類似性」の概念を具体化するための道具として、「反復交差変換」（Iterated Shuffle Transformation : 以下、IST とする）を提案する。この変換は、座標軸上の定義区間に関して、繰り返して細分割を行ないながら、近傍の分割区間どうしを一定の規則に従って相互に入れ換えていくことで、不連続的な写像  $F_{IST} : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$  をつくり出す。具体的には、以下のような手続きにより、ソース座標軸（S座標軸）とディステーション座標軸（D座標軸）の間の不連続的な対応関係を構築する（図1）。

(1) 初期設定。

- 1) 座標軸上の定義区間  $[a, b]$  で  $N$  個のベース区間  $A_i = [a_i, a_{i+1})$  ( $i = 0, \dots, N-1$ ) を設定する。  $a_0 = a, a_N = b$ 。
- 2) 各ベース区間  $A_i$  に交差区間数  $M_i$  を設定する。
- 3) 各ベース区間  $A_i$  に関するリスト  $L_i^0$  中にそれぞれのベース区間を小区間として格納する。  $L_i^0 \leftarrow \{A_i\}$

(2) 反復処理。反復回数  $K$  に対して、以下の処理を  $k = 1, \dots, K$  について繰り返す。

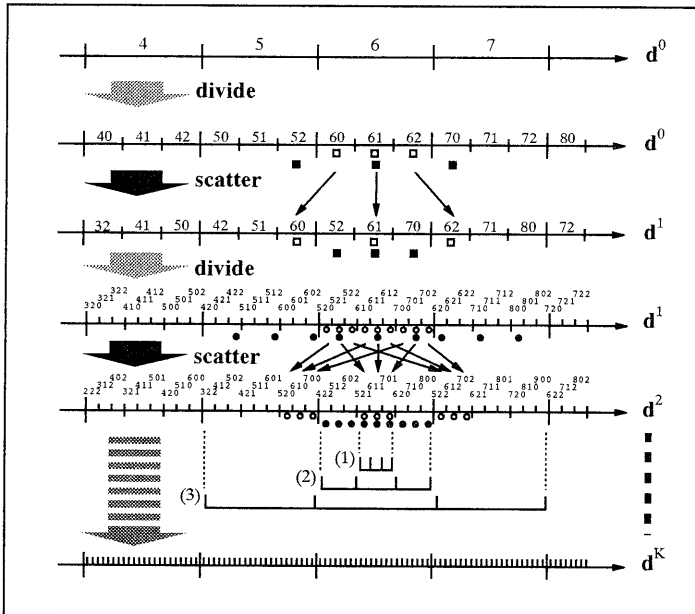


図 1: 反復交差変換.

- 1) 各ベース区間に関するリスト  $L_i^{k-1}$  中に格納されている各小区間を  $2M_i + 1$  個に分割する.
- 2) 1) で分割したものを自分と両脇の  $M_i$  個の計  $2M_i + 1$  個のベース区間に振り分け, それらを新たなリスト  $L_i^k$  中に格納する.

上記の手続きを図示したものが図 1 である. 図 1 中のはじめの  $d^0$  軸を S 座標軸,  $K$  回の反復後の  $d^K$  軸を D 座標軸として, IST による不連続的写像  $\mathcal{F}_{IST}$  がつくられる.

IST により, 座標軸上の小区間は反復ごとに細かくなり, もとの座標値が周囲に拡散していく. また, 不連続的写像  $\mathcal{F}_{IST}$  は, S 座標軸と D 座標軸の座標値を「1 : 1 対応」の関係で対応付ける<sup>1</sup>. このことは, 例えば, S 座標軸をパラメータ座標軸, D 座標軸を実空間座標軸とした場合に, S 座標軸上の各パラメータ値が実空間上の位置座標を一意に規定する役割を果たすことを示す.

<sup>1</sup> 小区間の「つなぎ目」の値は後方の小区間に含まれるものとする.

$K$  回の反復処理により, 座標軸が  $d^0 \rightarrow d^1 \rightarrow d^2 \rightarrow \dots \rightarrow d^K$  のように変換される. すべてのベース区間で交差区間数は 1 とする. 最上図の軸上の 4, 5, 6, 7 は各ベース区間に付けた番号であり, 左右にさらに続くものとする. また, 小区間をあらわすための番号付けは,  $6 \rightarrow \{60, 61, 62\} \rightarrow \{\{600, 601, 602\}, \{610, 611, 612\}, \{620, 621, 622\}\} \rightarrow \dots$  という具合に, 分割にしたがって下位の方向に  $n$  進数で表記していくものとする (この例では  $n = 2 \cdot 1 + 1 = 3$  である). 図中の白黒の四角および丸印は分割された各小区間がどこに移るかをあらわす.

また, 座標軸のタイプとして以下の二種類が考えられる<sup>2</sup>.

- 並進軸  $\dots -\infty \leftrightarrow +\infty$  の範囲で値をとる.
- 巡回軸  $\dots$  周期的に巡回する.

図 2 のように, 並進軸が有限長である場合には座標軸の端の部分で振り分け方に変化がみられる. 一方, 巡回軸では座標軸に切れ目がないため, このような状況は起こらない.

### 3.2 座標値の計算方法

不連続的写像  $\mathcal{F}_{IST}$  の具体的な計算は以下のように行なうこととした.

- (1) 小区間の分割は, それぞれ振り分けられるベース区間の長さ按比例した比率で分割を行なう.
- (2) S 座標軸と D 座標軸の座標値の対応は, 各ベース区間について, その座標区間  $A_i = [a_i, a_{i+1})$  とそれに含まれる小区間のそれぞれの座標区間とを線形に対応させる.

<sup>2</sup> 本来, 「並進」および「巡回」は群論における用語であるが, 座標軸の性質をあらわすものとしてこれらの用語を用いる.

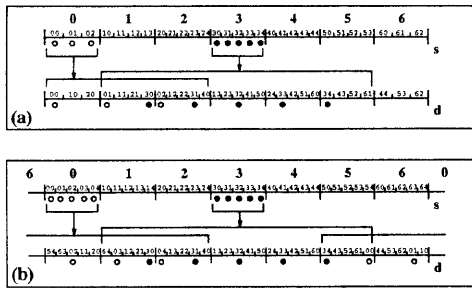


図 2: 並進軸と巡回軸. すべてのベース区間で交差区間数 2.  
 (a) 並進軸. 端の部分では実際に振り分けられるベース区間数が変わる.  
 (b) 巡回軸. どこでも振り分け方は変わらず, 端の部分では振り分けが巡回する.

### 3.3 反復交差変換の性質

#### (1) スプライン補間との関連

「空間方向の局所的類似性」は「スプライン補間」にみられる特徴である. すなわち, 例えば, スプライン曲線上の点はその近傍のいくつかの制御点により影響を受け, 逆に, 各制御点はその近傍の曲線上の点に影響を与える. これにより, 曲線上の点は連続的な「つながり」をもち, 近傍の点どうしが位置についての類似性を有することになる.

図 3 は IST の例である<sup>3</sup>. 図 3 では, step = 0 における各ベース区間の関数値が反復によって次第に近傍の区間に拡散していくことがわかる. そして, 「スプライン補間」とは異なり, 図 3 では横軸の座標値に沿って関数値が連続的な「つながり」をもつというわけではないが, ある座標区間とその近傍の座標区間を比べた場合, お互いに関数値の取り方が類似したものとなっていることがわかる. このことは, IST が「空間方向の局所的類似性」をつくり出すことを示す.

<sup>3</sup> 図 3, 4 は, 2次元図形としてではなく, 横軸を座標値, 縦軸を関数値として考える. また, 1) 横軸に対して IST を適用した, 2) 横軸上の区切り線はベース区間の区切りをあらわす, 3) 横軸下の数字は交差区間数, 4) step は反復回数, とする.

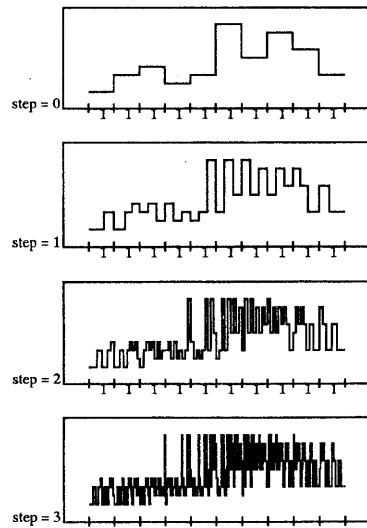


図 3: IST の例. 交差区間数は 1.

#### (2) フラクタルとの関連

「フラクタル」のもつスケール方向の変化に対する自己相似性は, 「スケール方向の局所的類似性」である.

図 4 は IST の例である. この例では, 各ベース区間が全ベース区間に振り分けられ, 反復によって次第に自己相似的な「フラクタル」的構造を形成していくのがわかる<sup>4</sup>. すなわち, これは, 類似性が大域的となった場合を示している.

#### (3) 空間/スケール方向の局所的類似性

図 1 の  $d^2$  軸上の区間番号の並び方について, 図中の (1), (2), (3) の範囲ごとに注目する. 区間番号の最上桁の数字に注目すると, 各範囲内で 3 つに区切られたそれぞれの区間は, 互いにその数字が 1 ずつずれたものとなっていることがわかる. これは, IST が「空間/スケール方向の局所的類似性」の構造をつくり出すものであることを明示している.

<sup>4</sup> 図 4 を 2次元図形としてみた場合には, 縦軸方向の縮小がないため, フラクタル図形ではない.

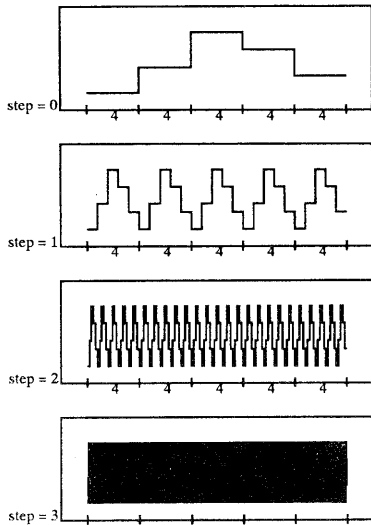


図 4: IST の例. 交差区間数は 4.

## 4 形状モデリングへの適用

### 4.1 モデリングの手順

以下の手順により、形状モデリングを行なう。

- (1) ソース形状の作成.  
S座標系上でソース形状 (S形状) を作成する。
- (2) IST の構築.  
各座標軸に対して、ベース区間、交差区間数、反復回数を設定し、S座標系からD座標系への不連続的写像  $F_{IST} : s \rightarrow d$  を構築する。
- (3) サンプリング処理.  
D座標系上でサンプリングを行ない、S形状に関するデータ値を取り出す。
- (4) ディスティネーション形状の生成.  
サンプリングしたデータ値をもとに、D座標系上でディスティネーション形状 (D形状) を生成する。

今回は、S形状を B-Spline 曲面により作成し、そのパラメータ座標系  $(u, v)$  の二軸に対して IST を適用した。S形状は、基準面とデータ値によりつくられることとした。データ値は (高さ値, 色情報値) からなり、各  $(u, v)$  値について、基準面

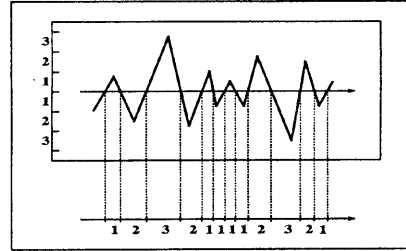


図 5: 交差ウェイブ. 折れ線の「交差ウェイブ」から下の座標軸のベース区間と交差区間数が決まる。

の法線方向に高さ値を加えた点を実際の形状上の点とした。この高さ値が IST により近傍に拡散されることで、特徴的な「パターン」が生み出される。サンプリングは、D座標系上に、1) 規則的な正方形格子網、2) ランダムな三角格子網、のいずれかをつくり、行なうこととした。

### 4.2 ユーザインタフェース

IST のベース区間および交差区間数の設定を、ユーザにとって直観的な方法で行なうため、図 5 に示す「交差ウェイブ」をユーザインタフェースとして採用することとした。

### 4.3 適用例

本研究のモデリング法により作成した画像を図 6 に示す。「空間/スケール方向の局所的類似性」に基づき、それぞれの形状を特徴付ける「パターン」が生み出されていることがわかる。

## 5 結論

本研究の成果として、以下の結論が挙げられる。

- 「反復交差変換：IST」が「空間/スケール方向の局所的類似性」を制御し、特徴的な「パターン」を生み出すことを可能とする。
- S形状と交差ウェイブの二つの情報のみから、目的の形状を容易かつ直観的に作成できる。
- 質感を与えるためのテクスチャやバンプ関数は不要であり、質感を伴う形状を統一的に「形状」として作成できる。それらには、当然、通常の形状に対する操作が適用可能である。

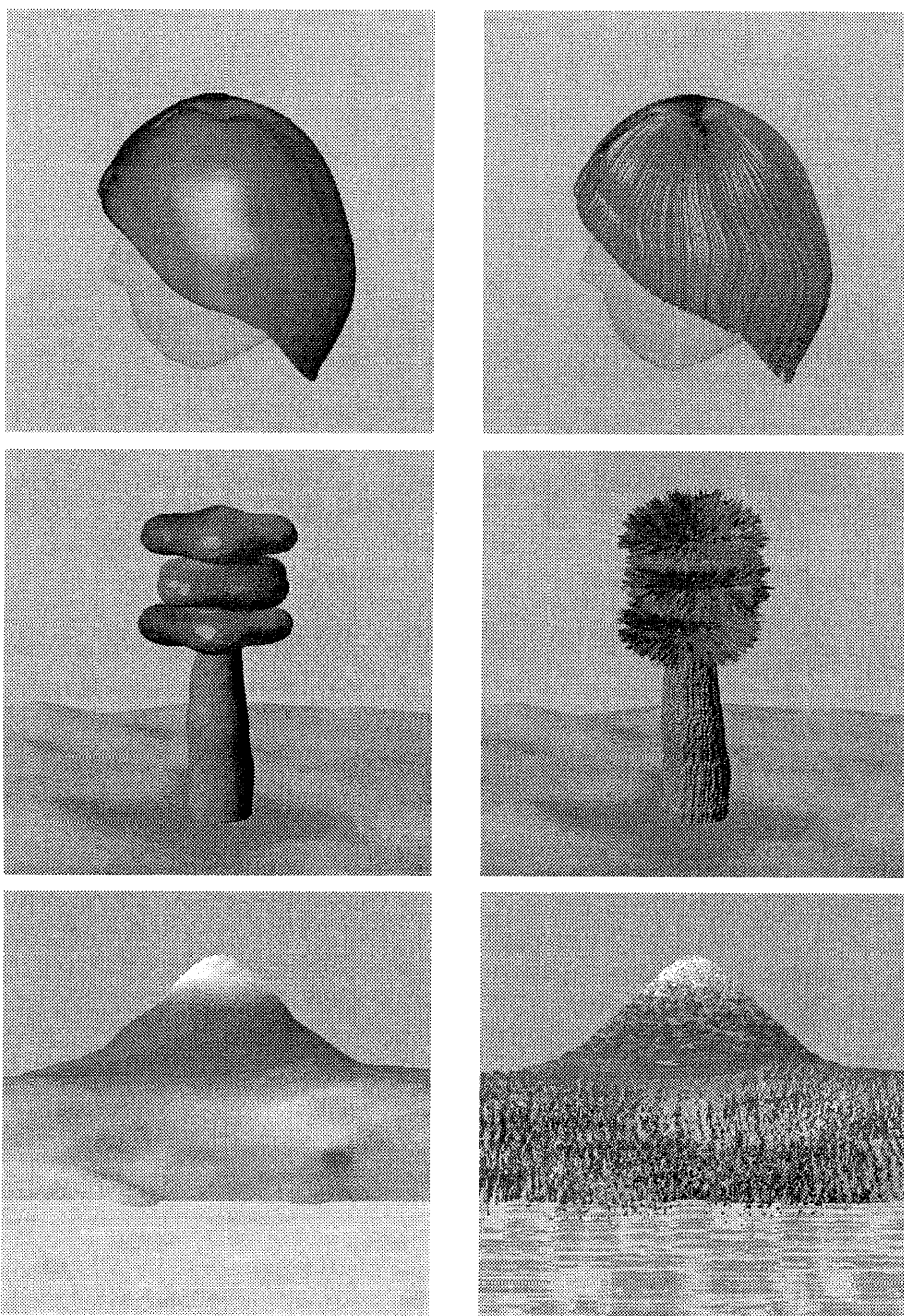


図 6: 作成した画像の例. 各段とも, 左図 (S形状) から右図 (D形状) が生成される. それぞれの形状はポリゴンで作られている. (上段) 髪, (中段) 葉, 樹皮, (下段) 川の水流, 草原, 山肌, がそれぞれ I S T により生成されている.