

## 退化形状や非剛体をも統一的に表現できる 幾何モデラの開発

望月 剛<sup>†</sup> ・ 速水 康晴<sup>††</sup> ・ 越川 和忠<sup>†††</sup> ・ 山本 正信<sup>†</sup>

<sup>†</sup>新潟大学 工学部 情報工学科

<sup>††</sup>日本電子計算機(株)

<sup>†††</sup>電子技術総合研究所

**概要** 3次元の形状処理技術における幾何モデルとして従来は、winged-edge構造に代表される境界表現やCSGのように対象をソリッドと考えたモデルが中心であった。しかし、最近ではこれらのモデルのみでは、紙や布のような厚さがないと見なしたほうがよい対象を表わすことが難しく、不十分であると認識されてきた。そこで、本研究では通常の立体はもちろん、紙や布のように十分薄いものも、位相的には多面体と同じと見なすことにより、物体形状を統一した構造様式で表現できる新しいモデラとして「モチーフ編みの形状モデラ」の開発について報告する。

**キーワード** 幾何モデル、退化形状・非剛体、モチーフ編みモデル

## A Motif-Knitting Modeler for Degenerated and Non-Rigid Shape

Tsuyoshi Mochizuki<sup>†</sup>, Yasuharu Hayami<sup>††</sup>, Kazutada Koshikawa<sup>†††</sup>,  
and Masanobu Yamamoto<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Department of Information Engineering, Niigata University

<sup>††</sup>Japan Computer Corporation

<sup>†††</sup>Electrotechnical Laboratory

**Abstract** As a geometrical model for the shape of the objects in three dimensional scene, B-rep represented winged-edge structure and model whose object considers solid like CSG have been the leading existence. However, an insufficiency of these model has been recognized, since it is difficult for these model to express the object which should have been considered with no thickness such as a sheet of paper and a piece of cloth. So, in order to represent not only solid objects but also thin objects, we propose a "Motif-Knitting Modeler" which can express any type of structure by unified style.

**Key Words** Geometrical Model, Degenerated Shape • Non-Rigid Body, Motif-Knitting Model

## 1 はじめに

コンピュータビジョンでは、画像を解釈しシーンの3次元構造を推定することが行われてきた。得られた解釈は、コンピュータ内の幾何モデル上に蓄積される。シーンの正確な解釈には、1つの固定された視点からの画像からだけでは不十分で、カメラの移動による異なる視点からの画像あるいは動画のように、複数の画像の利用が一般的となってきた。新たな画像からの解釈が加わる度に、これまでの解釈を修正することも必要となる。解釈の変更に対応して、幾何モデル上の記述も動的に変更しなくてはならない。

通常、物理的対象は皆体積を持っている。しかし、紙や布のような対象は厚さがなく体積のない物体とみなした方がよい。また、紐や針金のような対象は面積すらない物体とみなした方がよい。このような体積のない物体を体積を持っている物体に対して、退化形状物体とよぶ。シーンの中には、通常の物体の他に退化形状物体も含まれている。新たな画像からの観測によって、通常の物体と解釈されていたのが退化形状物体に修正される場合もあるし、その逆もありえる。

これまで、コンピュータビジョンのための幾何モデルとしては、winged-edge 構造を持つものが使われてきた。しかし、この構造は構造化のメカニズム(ポイント類)が稜に集中しているため、通常の物体と退化形状物体を動的に変化させるときには困難であり、動的な扱いがしやすいモデルが望まれる。このような問題に関する研究[3, 4]が報告されているが、具体的な実装に関しては報告されていない。

そこで本論文では、通常の体積のある物体も、退化形状物体も統一して扱うことのできるモデル、「モチーフ編みの形状モデル」を開発したので報告する。このモデルは越川によって先に提案[1]されたもので、今回はその実装を行った。

モチーフ編みモデルの構造は、閉曲面の組合わせ的な性質から導いたものであるが、頂点・稜・面は素子(セルとして扱う)の種類にすぎず、閉曲面としての構造は隣接する素子間の関係を表わす「継ぎ手」(次項で説明)によって表すことにしている。よって、個々の図形要素の具体的な形には直接関連していないので、紙や布のような十分に薄いものも位相的には多面体と同じと見なすことにより、物体形状を統一した構造形式で扱うことを可能としている。

## 2 モチーフ編みモデル

形状表現における要素(点、線、区画)間の関係から、モチーフ編みモデルの構造(継ぎ手による構造)を導き、その構成要素とトポロジーの表現の説明、複合節(Euler 節)の導入を行なう。

## 2.1 継ぎ手による構造

位相的な観点から、独立な構成要素である素子間の関係を考察する。まず頂点、稜、面で分けられた閉曲面の一部分を考えると、それは図1のように表すことができる。この図1においては頂点、稜、面が次元性の異なる図形である点(V)、線(E)、区画(F)のような要素となって表現される。しかし、素子表現としては図2のように表わされる。このように多角形の素子となり、区画の種類によって頂点、稜、面などに分けられる。また、図形要素として独立させるために図3のように考える(離散性を考慮)。しかしこのままでは要素間を関係付けることができない。

そこで図4のようなポイントを導入し、ポイントによって素子間を関係付けることにする。しかしポイントを素子に持たせることにすると素子としてのサイズが不定になり、素子を記憶領域に割り当てる際に不都合となる。

そこで図5にあるような素子間の関係を表すためだけの「継ぎ手」を用意し、これで素子間を関係付ける。こうすることによって、同じサイズの継ぎ手で隣接する素子間の関係を表示する。また継ぎ手間同士を関係付けるポイントも導入する。このポイントは1つの素子間にある継ぎ手を関連付けるためのもので、これによって継ぎ手同士間はつながって輪を形成する(図6)。このような構造化することによって、素子としてはこれらの継ぎ手のポイントの内どれか1つを持ってよいということになる。このような構造を(単位となる図柄を編みつないで作る編物になぞらえて)「モチーフ編みモデル」と定義する。

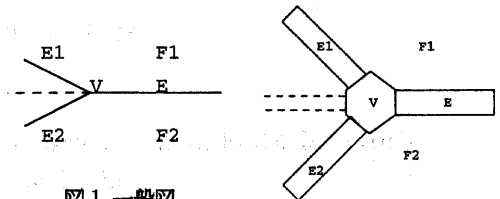


図1. 一般図

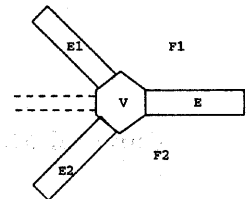


図2. 要素としての平等性の概念図

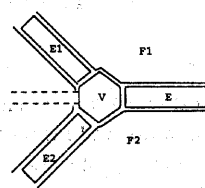


図3. 素子としての図形要素の独立性の概念図

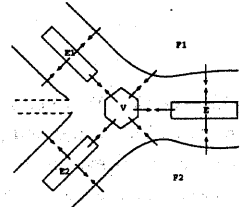


図4. 図形として隣り合う素子間の参照関係

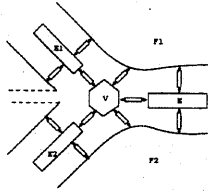


図5. 図形要素の素子  
を関係付ける” 継ぎ  
手” の導入

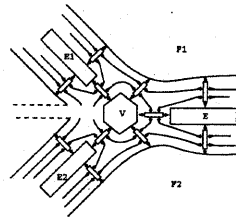


図6.” 継ぎ手” による構  
造化 (モチーフ編みモデ  
ル)

## 2.2 モチーフ編みモデルの構造の構成要素

前項で導いた構造形態は、素子を糸で絡ませた網目 (Stitch) に見立てることができる。図6の一部を拡大した図7を参考に、モデルの構成要素を以下のように定義する。

- 素子を「モチーフ」
- 継ぎ手を「節」
- 素子と継ぎ手を関係付けるポイントを「縦糸」
- その縦糸で素子を実際つないでいる代表ポイントを「糸口」
- 継ぎ手と継ぎ手を関係付けるポイントを「横糸」
- 輪で隣り合う節のつながりを「連結」
- 連結の糸で囲まれて素子がないところを「隙」

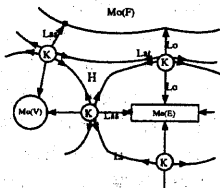


図7. モチーフ編みモデルの構造の構成要素  
Mo: モチーフ (V, E, F), K: 節, Lo: 縦糸, Las:  
糸口, Lat: 横糸, Li: 連結, H: 隙

## 2.3 形状トポロジーの表現

このモチーフ編みモデルによる形状トポロジーの表現 (図8) から次のことが言える。

1. 形状要素としての頂点、稜、面はモチーフの種類であって、構造的にはいわば受容的に参加。
2. 節の縦糸によって関係付けられているモチーフ種類の組は次の3種類だけである。
  - 頂点と面 (V-F) →  $\alpha$  節とする
  - 頂点と稜 (V-E) →  $\beta$  節とする
  - 面と稜 (F-E) →  $\gamma$  節とする
3. モチーフにポイントを向ける節の縦糸から相手モチーフを見ながら、輪の横糸にそって節を辿ると、一般に

- 頂点では面と稜が
- 面では頂点と稜が
- 稜では頂点と面が

それぞれ交互に関係付けられている。  
このうち、稜は、頂点 → 面 → 頂点 → 面  
(→ 頂点に戻る) の4個に固定。

4. 「隙」については3種類の節が1つずつあり、その2つずつの連絡が三辺形を形成する。

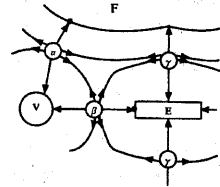


図8. 形状トポロジーの構成要素

## 2.4 複合節 (Euler 節) の導入

図8のモチーフと節の部分に注目すると、節のつながりである (連結) ポインタは全部で12個ある。ここで  $\alpha, \beta, \gamma$  を関係付ける内部に入った6個のポインタをひとまとめにすると考ええる。こうするとその6個は不要となる。また素子をつなぐポインタは1つあれば素子を参照できるので、その代表以外は不要となる (残り3個)。

以上の点をふまえたのが図9の複合節 (Euler 節) である。これを用いたモチーフ編みモデルの構造を図10に示す。この Euler 節を導入することによって、ポインタの数が減少し処理が扱い易くなる。

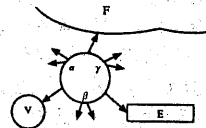


図9. 複合節 (Euler 節)

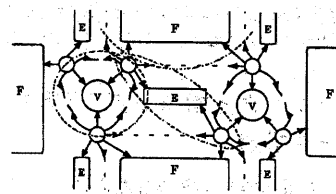


図10. Euler 節による構造

## 3 モデルの生成と改編

モデルの生成と改編について、物体形成の基本となる処理は、次の3点である。

1. モチーフ素子を生成、あるいは削除すること。

2. それに伴って生じる素子間の関係付けを改めること。
3. 素子に内容を記載する、あるいは読み出すこと。

しかし、対象物を組み合式的に表現できるようにするには、これらの処理を、モチーフ編みモデルが常に成り立つような、ある程度まとめた処理を基本単位とする必要がある。そして、一般の操作はその基本操作の逐次実行だけで果たせるように制限する。このような単位となる基本操作は、Baumgart[2]が頂点、稜、面のトポロジーを常に保ちながら多面体を構築するため創始した「Euler操作」の考え方を踏襲するもので、ここでも、その単位操作子を「Euler操作子」と呼び、これらは次の3対の操作になる。

- Euler操作子 A. 個体の発生、消滅  
最も簡単な個体として、頂点を1つ持つだけの面(一面体とする)を発生させる。  
最も簡単な一面体の状態で個体を消滅させる。
- Euler操作子 B. 稜の編み込み、解き外し  
頂点と頂点を新たな稜で結ぶ。  
頂点と頂点を結んでいる稜を取り除く。
- Euler操作子 C. 稜の分割、融合  
稜の途中に頂点を設け、稜を2つに区分する。  
稜の途中にある頂点を取り除き、稜を一本にする。

これらを、モチーフを編んでいくための基本操作とし、このEuler操作子を用いて基本的な形状の「素網」を形成していく。今回のモデラにおいては、まずEuler操作を実装し、それらを組み合わせて物体形成の基礎となる基本的な形状(Shape)、枝(枝を伸ばす)、複合枝(枝をn段伸ばす)、複合輪奈\* (頂点に多辺輪奈を作る)、面内の穴(面内に多辺輪奈を作る)、支柱(多角形面に支柱を立てる)、錐(面を放射分割する)、台(面を台形分割する)などを作成する。これらはある形状の「生成」であるが、その逆の「解体」も対になるEuler操作を逆の順序に適用することによってはたすことができる。さらにShapeとEuler操作の組合せで物体の「生成」・「解体」を行う(ESTObject)。

#### 4 オブジェクト指向モデラ EST におけるデータ構造

モチーフ編みモデルを作るための、オブジェクト指向モデラ EST を実装する。ESTは「Extendable Solid modeler for vision engineering research on Tcl」の略称である。

図10の点線部に注目すると、この図からモチーフ編みモデルは、half-edgeデータ構造に頂点周りのボ

\*わな。頂点が1つで稜が輪になった形態。境界表現でいう「ループ」と区別するため、本論文ではこの語を用いる

インタと面周りのポイントを併せもったデータ構造を採ることが分かる。このようなデータ構造を作るにあたって、次の事を考慮に入れてデータ構造を作成した。

- 各素子を一つのセル(情報が入っている → 自分自身の情報)として扱う。
- セルとセルとの関係を Euler 節で結ぶ。
- セルの中には次に迎るべき情報を入れる。
- トポロジーと幾何を分けて考える。
- トポロジー素子(位相的データ)から幾何素子(幾何学的データ)を参照できる。

このデータ構造の特色としては、位相(トポロジー)情報を位相のためのセル(Vertex,Edge,Face)に分け、それぞれのセルに対して幾何情報のセル(Point,Curve,Surface)に持たせている。このように位相と幾何を分けて考えることによって、厚さが無い物体も幾何"0"を与えることによって表現可能となる(非剛体も同じ閉曲面として統一可能)。

具体的な例として紙の場合を挙げると、位相的には存在するが幾何としては存在しないように扱う。つまり、直方体を押しつぶして紙を作ると考えると、頂点が"接している"という空間的な内容を直接表現するわけではなく、側面なしに、紙の縁が「一方の面ともう一方の面を分ける稜」と見なすことで達成される。これはトポロジーと幾何を分けて扱えるデータ構造だからこそ可能となる。

それでは、今回の実装のために作成した素子の説明と、それらがどのような親子関係であるかを説明する。各役割(機能)は表1のように作成した。

#### 4.1 素子(セル)間の親子関係

素子間の親子関係を図11に示す。この図における点線の左半分は、モチーフ編みモデルとして作ったもので、右半分は、モデラのデータ構造として後で加えたものである。また、各セルには書いてはないが、表1で説明したExtraというセルがついている。

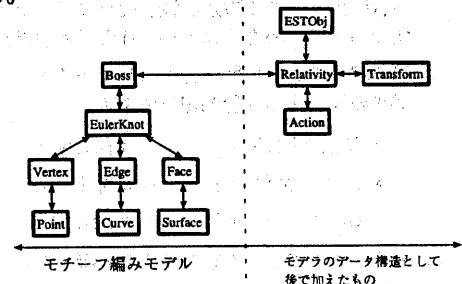


図11. 素子間(セル)の親子関係図

表 1. 各素子 (セル) 名とその役割 (機能)	
Create CellClass	
CellClass	全体的なもの定義。各セルが共通して持たなければならないものをまとめて作る (Flag・Extra)→必要な機能が親から子につたわる
JointClass	2つの素子の関係付けのための「継ぎ手」の定義 (今回は4本で点回りと面回りのポインタ→図5参照)
MatrixClass	同次変換行列 (4×4) の定義
VectorClass	ベクトルの値を記録する。4次元ベクトルの点を定義
Create model cell Class	
ESTObjClass	素子モデルのセル及びモデルのデータ構造として後で加えたセルの代表。これだけはユーザが名前 (物体名) を付け、他のセルは自動的に決まるように定義
BossClass	体主 → 個体としての統括のための定義
ExtraClass	特別の情報を付加するための素子の定義
EulerKnotClass	図形要素のトポロジ-的關係付けの定義。すなわち Euler 節の定義 (Boss, V, E, F)
RelativityClass	2の個体の相対的關係付け定義
VertexClass	点であるというトポロジ-の要素が書いてある。Euler 節と実際に値が入っているセル (Point セル) を結ぶ
EdgeClass	稜線であるというトポロジ-の要素が書いてある。Euler 節と実際に値が入っているセル (Curve セル) を結ぶ
FaceClass	面であるというトポロジ-の要素が書いてある。Euler 節と実際に値が入っているセル (Surface セル) を結ぶ
TransformClass	座標変換の定義
ActionClass	動作を記録するための定義 (物体を表示するとしら何か)
PointClass	幾何素子。頂点の座標値
SurfaceClass	幾何素子。曲面方程式
CurveClass	幾何素子。稜方程式
EulerOp	オイラー操作を定義 (実装)
Shape	物体形成の基礎となる基本的な形状の「生成」・「解体」を行う
ESTObject	Shape (Euler 節に対したも) で生成した形状を呼び出し、ここで物体の「生成」・「解体」を行う
ESTCommand	物体の「生成」・「解体」に関するコマンドの設定
ESTAction	生成した物体をリストに登録し、実際表示するかしないかを設定
ESTTrans	物体の回転・並進を扱うコマンドの設定
ESTRelate	物体間の親子関係を扱うコマンドの設定
ESTFile	物体の Load・Save を扱うコマンドの設定
ESTDisplay	物体を表示する時に点、線、面を構造から判定し、どのように描くかを決定するカメラの設定
ESTCamera	カメラの設定
ESTDebug	デバッグ用の関数の定義
Add Class value, method (proc)	
ESTDefault	Default の値の設定。
ESTFlagMask	フラグのマスクの値の定義
ESTMatrix	行列の計算を扱う
CellUutil	ガーベッジ収集 (ごみ集め) を扱う

またクラスとしての親子関係を図 12 に示す。ここで出てくる SuperClass とは親クラスのこと、SubClass とは子クラスのことである。この関係は、親クラスに子クラスが共通して持つ内容を持たせる意味で、関係を結ぶ。これはオブジェクト指向的なクラスの継承で、例えば PointClass は CellClass, VectorClass を継承することで、両方の性質を備えられる (プログラムの再利用が可能となる)。

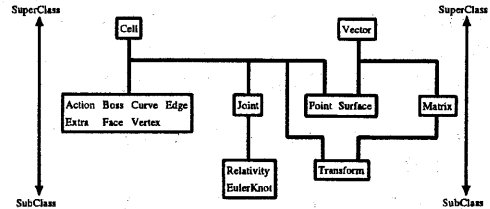


図 12. クラス間の親子関係図

## 5 EST の実装

実装は次のような考えで行った。

- Tcl/Tk<sup>†</sup>上で実装。
- 素子をセルにして、素子間の対応をセルとセルの対応とする。
- その他に動作 (表示関連)、変換 (回転・並進) などのセルも作成。
- セルは必要なときに取りだせ、不要になったら戻せるように作成 (ガーベッジ・コレクション機能)。

Tcl/Tk 上の実装には次のような特徴がある。

- アプリケーションに高度なマクロ機能を簡単に付けられる。
- アプリケーションを作るのが早くできる。GUI 制御の作成が非常に楽なので表示の際用いるウインドウ周りが楽になる。
- 一度、Tcl/Tk の文法を覚えれば、アプリケーションにまたがって利用可能である。これはコマンドラインで非常に高度な作業を記述・実行させる為のプログラムとして、awk や Perl という言語が存在するが、これは単独の処理系であってアプリケーションに組込むことができなかった。一方 Tcl はライブラリであり、アプリケーションとリンクすることで機能を実現することができる。
- 単独のプログラムではないので、各種プログラムに埋め込み可能。

<sup>†</sup>ライブラリ及び、ライブラリを利用したサンプルシェル等の一連のプログラムである言語

このような特徴から、実装における拡張が容易にできる。また、Euler操作を適用して物体を形成するが、その操作はセルの組み合わせである。その操作を用いて現在のところ、孤立点、線分、多角形、角錐、角柱、多層角柱、凸多角形などの作成と表示、さらに自由曲線・曲面の作成と表示が可能となっている。自由曲線・曲面の場合は位相情報としてはコントロールポイントで制御を行っている。これら物体の表示に関しては、OpenGLもしくはOpenGLの互換ライブラリであるMesaを使用した。今回の実装はSUNまたはSGIのワークステーション上で行い、必要となる環境は以下の通りである。

- OSとしてはSolaris 1.1以降またはIRIX 5.3以降
- Tcl 7.4/Tk 4.0、C(GLまたはMesaの関数を用いた) Tclのコマンドに変換するため
- (MIT)OTcl Ver 0.96(MITのTclのオブジェクト指向拡張)
- tkogl 1.1(TkにOpenGLの描画ウィンドウを加える拡張)
- OpenGLもしくはMesa

## 6 モデルの生成と表示例

ESTで作成した角柱と自由曲面を表示する。まずモデラを立ち上げると生成した物体名のメニューパネルが作成表示される(図13の左上のパネル。このパネルのボタンFileは物体のLoad,Saveを扱い、ボタンObjectは新たな物体を作成する時に用いる)。メニューの物体名をマウスでクリックすると物体を表示したウィンドウが作成され、このウィンドウにはCameraとTransformボタンがあり、それぞれカメラの変更、物体の並進・回転を行なうパネルを作成する。

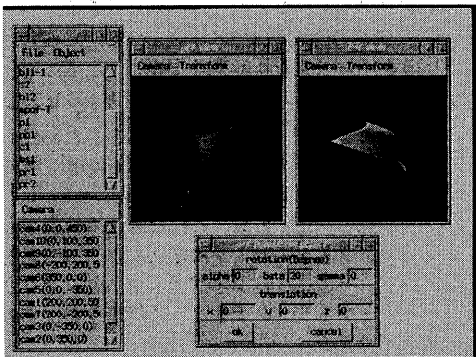


図13. モデルの生成の表示例<sup>†</sup>

<sup>†</sup>表示方法としてはワイヤフレームとサーフェスマデルが使える。今回はサーフェスマデルで表示。カメラ移動は視点と参照点とカメラ

## 7 結論と今後の課題

本研究では、モチーフ編みの形状モデラを紹介し、その実装を行った。このデータ構造で基本物体(孤立点、線分、多角形、角錐、角柱、多層角柱、凸多角形)と自由曲線、曲面(ベジェ曲線・曲面を使用)を扱うことが出来た。現在、物体変換の機能としては、並進・回転を行える。また照光処理が行える。本手法は、トポロジーと幾何を分けて扱えるというデータ構造を持っているため、厚みの無い物体も作成表示可能となった。またこのモデラを使えば、人体モデルに衣服のモデルを加えることができるため、動画像解析による、セカンダリーモーションの抽出が可能となる。

今後の課題とその検討と以下に述べる。

- 凹多角形の表示。  
凹多角形の表現についてはOpenGLの関数では、凸多角形しか表現できないので、ステンシルバッファ<sup>§</sup>による塗りつぶした凹多角形の表現が考えられる。
- 物体の合成。  
複数の物体間の集合演算を行なう。
- 物体の変形。  
物体に凹凸などの変形を加え、望みの物体を作成する。
- ユーザーインターフェース。  
本稿のモデラにおいて、ユーザの意図するモデルを生成する為のインターフェースを構築し、意図的にモデラに変化を与える事を可能とした。

## 参考文献

- [1] 越川 和忠: 計算機による物体認識のためのモチーフ編みの形状モデリング, 電子技術総合研究所研究報告 第 916号, 1990
- [2] B. Baumgart: *Geometric Modeling for Computer Vision*, Stanford Artificial Intelligence Laboratory Memo AIM-249, STAN-CS-74-463, 1974
- [3] 山口 泰, 木村 文彦: 非多様体位相の隣接関係の表現と操作, 情報処理学会論文誌, Vol. 32, No. 6, pp. 731-739(1991)
- [4] 山口 泰: 境界表現のための位相モデルの分類, 情報処理学会論文誌, Vol. 38, No. 1, pp. 73-80(1997)

ラ上方向ベクトルで決定。位置を変えたカメラをいくつか用意。照光処理としては照明の作成と材質特性の機能を用意。

<sup>§</sup>定型化された画像を描くために、スプレー式のペンキと併用するマスキングの型紙があるように、画面の特定の部分への書き込みを規制すること