

## 基本変形を用いた曲面物体の大まかなモデリング方法

福嶋茂信

産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究ラボ

E-Mail: s-fukushima@aist.go.jp

非専門家であるユーザが容易に理解できる基本的な変形（基本変形）を用いる大まかな形状のモデリング方法について述べる。今回、素材となるプリミティブが直方体である場合を例題とし、物体表面が主に曲面から構成される場合のモデリングの実現を目指す。(i) プリミティブの主軸や主軸と垂直な断面に対する変形、(ii) 主軸の向きを含めた互いに直交する3方向に対する変形、及び、(iii) 物体中心を基準とした変形を扱う。これらの変形の中からアンケート調査をもとに6種類の基本変形を選び、13個の操作によるモデリングシステムを構築した。主軸が明かな物体に関しては、十分にモデリング可能であることを示す。

## Rough Modeling Method of Curved Surface Object Using Basic Deformations

FUKUSHIMA Shigenobu

Digital Human Laboratory,

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

In this paper, we present a rough modeling method for curved surface object by basic deformations that are comprehensive to non-expert users. We use object models consisting of primitives represented by the basic deformations. and we deal with three classes of deformations; (i) axis-based deformations, (ii) face-based deformations and (iii) center-based deformations. From these deformations, we select 6 classes of basic deformations according to the questionnaire results. Furthermore, we construct the modeling system using 13 deforming operations and show that we can design an object if it has a fairly clear axis.

## 1 はじめに

非専門家であるユーザが、3次元形状データを扱う機会が増大しつつある。このようなユーザの間では、全体的な形状がうまく表現されているだけの大まかなモデルでよいからもっと簡便な操作で作成したいという要求が強い。また、モデルが簡素に記述されていれば、このような3次元モデルをインターネット上で加工、共有する場合にも有利である。このためのモデリング手法が確立されれば、プレゼンテーション、年少者に対する教育システムのような学習支援、あるいは、CSCW環境下での作業支援への応用が期待できる。

本研究では、一般的なユーザに共通する変形概念が存在するとし、これを表す複数の基本的な変形（基本変形）によるモデリングの実現を目指す。物体形状の把握の容易さという観点から、CVの分野で多用されている一般化円筒モデルを拡張して利用する。素材となるプリミティブ（素材プリミティブ）として直方体を選ぶ。アンケート調査によって得る変形サンプルを分析することで、(i) 主軸を曲げたり、主軸に沿って断面を変化させるなどの変形（主軸ベースの変形）と、(ii) 面に対する変形（面ベースの変形）から基本変形を選ぶ [9][11]。さらに、主に曲面から構成される物体形状のモデリングを可能にするため、(iii) 物体中心ベースの変形からも基本変形に選ぶ。こうして選んだ基本変形を用いるモデリングシステムを構築し、主軸がある程度明確である物体ならば、大まかなモデリングができることを示す。

## 2 基本変形

### 2.1 フィーチャと基本変形

形状モデリング作業において、ユーザは得ようとする形状を想定し、現在の形状を想定する形状に変換するための変形を求め、これを実行する。このとき、形状は、どのような形をしているかという宣言型知識である。一方、変形は、どのようにして形を変えるかという手続き型知識である。この二つの異なる型の知識を扱うことがしばしばユーザにとって負担となる。

この問題を解決するものとして、フィーチャ（モデリング操作の意図を反映した物体の部分形状）を利用したフィーチャベースモデリングがある [1][2][3]。例えば物体に開ける穴を意味するフィーチャを用い「穴」という形状を表すと、物体に対し「穴を開ける」という変形が加えられたことを含意することができる。このように、フィーチャを用いると宣言型知識である形状と手続き型知識である変形とを一元的に扱うことができる。

本研究では、一般的なユーザに共通する変形概念が存在するとし、これらを表す複数の基本的な変形（以下、

基本変形と呼ぶ）をフィーチャとする。このようなフィーチャによって、物体の大まかな形状とこの形状を得るための変形とがほぼ表現できると考える。以下では、これらの仮定に基づき、大まかな物体形状を対象としたフィーチャベースモデリングの実現を図る。

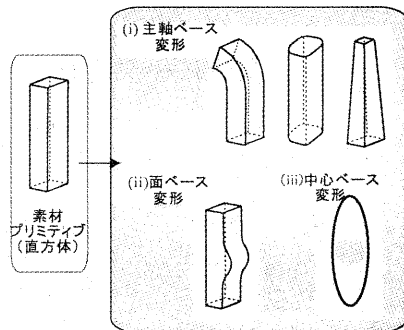


図1 変形の分類

### 2.2 一般化円筒モデルの拡張

基本変形をフィーチャとして用いるためには、形状とモデル記述間の対応が容易である必要がある。この点に着目し、CVの分野で多用されている一般化円筒モデル [6][7] を拡張して使用する。一般化円筒モデルは、物体の主軸を表す空間曲線、この主軸に垂直な物体の断面形状、断面の大きさの主軸に沿っての変化によって物体を記述する3次元モデルである。多くの物体は骨格となるような軸を持つため、一般化円筒モデルは自然な物体形状記述である。

しかし、一般化円筒モデルでは断面形状が一様であり、主軸を規定するこの種の物体モデルでは、断面形状の変化に対する記述能力は概して低い [13][14][15]。本研究では、一般化円筒モデルを記述する内部パラメータの変化による変形に加え、直交する3方向（ただし、このうちの1方向は主軸と平行とする）に対する変形も扱うことで、断面形状の変形を可能にする。

我々は、これまで、主軸が明確な物体として直方体を素材プリミティブに選び、図1内に示す次の2系統の変形を扱ってきた [11]。第1は、一般化円筒モデルの内部パラメータの変化として記述できる変形、具体的には、主軸に対する変形、主軸と垂直な断面形状に対する変形、及び、断面の主軸に沿っての変形である。第2は、プリミティブごとに定義される3次元直交座標系の座標軸方向の変形であり、いずれかの座標軸と平行な向きに凸面、または凹面を発生させる変形である。それぞれは、(i) 主軸ベースの変形、(ii) 面ベースの変形である。

### 2.3 曲面物体モデリングへの拡張

曲面物体のモデリングを考える場合、楕円体は基本的な形状である。直方体を素材プリミティブとするとき、全体的形状が直方体より楕円体に近い物体のモデリングが難しい。本研究では、素材プリミティブが楕円体である場合も併せて扱う。2種類の素材プリミティブからの変形を統一的に表すため、直方体から楕円体へ変化させる変形を基本変形に加える。この変形は、物体中心を考えこれを基準に球状に変化させる変形であり、(iii) 物体中心ベースの変形である。このとき、楕円体を素材プリミティブとする変形は、直方体に対し球状にする変形を加えた後に変形を加えることと等価である。

## 3 基本変形の選択

### 3.1 アンケート調査実施

ユーザが直方体に対して必要とする変形を、非専門家である被験者(60名)を用いたアンケート調査をもとに求める[10]。主軸の存在が明らかな素材形状として棒状の直方体を選び、ここで扱う変形(i), (ii), (iii)に該当するものを選ぶ。変形が困難であったり、変形をする意味がないサンプル15.5%を除いたものを有効サンプルとする。各変形が有効サンプルに占める比率を表1に示す。

表1 変形サンプルの分類結果

主軸ベース	面ベース	中心ベース	その他
22.2%	49.3%	1.5%	27.0%

### 3.2 変形の分類

本研究で扱う変形を、以下の6種類の変形に分類する。

- D1 主軸を曲げる変形
- D2 主軸を中心に回転させる変形
- D3 断面形状を一様に変化させる変形
- D4 断面の大きさを主軸に沿って変化させる変形
- D5 面に対する変形
- D6 中心を基準に一様に変化させる変形

(i) 主軸ベースの変形については、一般化円筒モデルの内部パラメータの変化の仕方にに基づき、4種類の基本変形D1~D4に分類する。??(a)-(d)にそれぞれの基本変形による変形例を示す。

(ii) 面ベースの変形については、一つの凸面あるいは凹面を生成する「面に対する変形」とする。複数の凸面ま

たは凹面を持つ曲面に関しては、基本変形操作を複数回適用すると考える。また、凹面を生成する変形については、凸面を生成する変形を裏向きに適用するものとして、同種の基本変形D5として扱う。

最後に、(iii) 中心ベースの変形は、プリミティブの中心を考えこれを基準に一様に変化させる変形D6である。

それぞれの基本変形について、典型的な変形例を図2に示す。

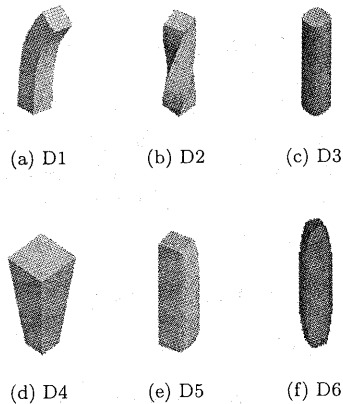


図2 基本変形によるモデリング例

### 3.3 変形サンプルの分析

前節では理論的見地から範囲の広い変形クラスを規定したが、変形サンプルに現れる変形は、その一部である。これは、次節の変形操作の選択に反映する。

また、面に対する変形D5に関しては、以下の知見を得た。

知見1.

直方体の一つの面*i*について、直交する二辺と平行に $U_i$ 軸、 $V_i$ 軸をとり、法線方向に $W_i$ 軸をとる。 $U_i$ 軸、 $V_i$ 軸方向の座標値をそれぞれ $u_i$ 、 $v_i$ とし、 $W_i$ 軸方向の変形量を $w_i$ とする。ピークを一つだけ持つ山形の2変数関数を $f_2$ 、ピークを一つだけ持つ山形の1変数関数を $f_1$ とすると、変形量は、以下の三つの型に大別できた。

$$w_i = f_2(u_i, v_i) \quad (1)$$

$$w_i = f_1(u_i) \quad (2)$$

$$w_i = f_1(v_i) \quad (3)$$

知見2.

同様の変形を複数の面に対し実行する変形が、かなり多く含まれる。

これらの知見に基づき変形操作を複数用意する。

### 3.4 基本変形操作

基本変形を実行するための変形操作を定義する。主軸ベースの変形 (D1~D4) に対しは、それぞれ一つの変形操作 OP1, OP2, OP3, OP4 を割り当てる。ただし、OP2, OP3, OP4 の内容は、変形サンプルを代表する以下の内容に限定する。

OP2 主軸を中心に螺旋状にねじる変形

OP3 断面形状を丸くする

OP4 断面の大きさを主軸に沿って一様に大きくする

面に対する変形に関しては、ユーザの操作性を考慮し、以下の2項目の内容に応じて、適宜異なる変形操作 OP5~OP12 を割り当てる。さらに、複数の面に対し同様の変形が加わる場合については、出現頻度が高いものにつき操作を割り当てる。

- 変形の向き (主軸と垂直な向きか、平行な向きか)
- 変形の型 (前節の知見1)

面ベースの変形操作による変形結果を図3に示す。また、中心ベースの変形 D6 については、球状に変化させる変形に関し、変形操作 OP13 として定義する。

こうして得た13コマンドを、変形を表す語句にマッピングし、言語的指示による変形を実現する。このマッピングは、別のアンケート調査をもとに決定した。マッピングの結果を表2に示す。

表2 基本変形操作の名称の選択結果

基本変形操作	選択した名称
OP1	bend
OP2	twist
OP3	round
OP4	enlarge
OP5	bulge
OP6	protrude
OP7	curve
OP8	obtrude
OP9	hump
OP10	expand
OP11	bow
OP12	swell
OP13	globe

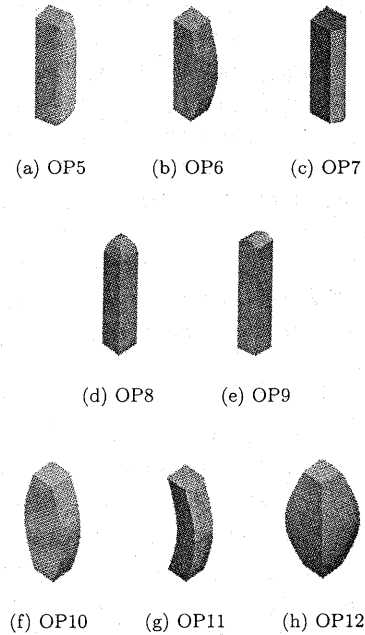


図3 面に対する基本変形操作

## 4 基本変形によるモデリングの実装

### 4.1 基本変形情報の入力

一般的に、変形は変形対象と変形操作の情報からなる。本研究では、プリミティブ表面の部分領域である変形対象に関し、(1) 変形の中心位置、(2) 変形の範囲の二つの情報を用いて指定し、変形操作に関し、(3) 変形操作の種類、(4) 変形の程度の二つの情報を用いて入力する。変形の向きは、変形の中心位置と変形操作の種類から得る。

一つの基本変形は、変形操作の種類と、変形の中心位置、範囲、程度を表す3種類のパラメータとによって表す。パラメータからプリミティブの概略形状を表す制御点配列を得る。この制御点配列をなめらかに補間 [16][17] することによって、変形後のプリミティブの表面を表すポリゴンメッシュを生成する。

### 4.2 基本変形の統合

複数の種類の変形が加わる場合、変形の統合が問題となる。ここでは、以下の手順で素材プリミティブに変形を加えていき、変形結果を得る。

手順1. 素材プリミティブ (直方体) の各面について、面ベースの変形を求める。

手順2. 面ベースの変形を実行する.

手順3. それ以外の変形については, D4, D3, D2, D1, あるいは, D4, D5, D2, D1の順に加える.

面に対する変形とそれ以外の変形とは互いに独立である. よって, これらは別々に処理する. 主軸に関する変形を加えると, 座標軸と面の法線方向とが一致しないため, 面に対する変形ができない. このため, 面に対する変形を行った後, 主軸に関する変形を行う.

主軸に関する変形は互いに独立であるが, D1, D2の変形によって主軸自体が変形を受けた場合, D3, D4は実行できない. また, 変形D6とD3に関しては同時に行うことができず, どちらか一方のみを実行する. よって, これらの変形については, D4, D3, D2, D1の順に, あるいは, D4, D5, D2, D1の順に行う.

## 5 モデリング手法の有効性検証

### 5.1 モデリング例

直方体の側面に2種類の基本変形操作 OP12(swell) と OP1(bend) を適用し, 図4に示す物体をモデリングした. ユーザが各変形操作を十分理解していれば, どの基本変形が用いられているかを認識することは難しくない. すなわち, モデルを構成するプリミティブがこの程度の変形の組合せから生成される場合, ユーザはプリミティブを作成するフィーチャを認識できる. このことは, 形状と変形とを一元的に扱うフィーチャベースモデリングの枠組みが大きなモデリングに適用できることを示している.

図5.1(a)は, 人台(型紙製作用の人体模型)をモデリングしたものである. この基本変形の適用の具合を図5.1(b)に示す. 物体の主軸の存在が明確な物体に関しては, 曲面で構成される場合でも, 大きかにならばモデリング可能である. 原理的にも, パラメータ調整まで含めた提案変形手法を複数回適用することで一般化円筒モデルの作成が可能である. 通常的一般化円筒モデルの場合, 個々のプリミティブは凸物体であり断面形状は一様であるが, 提案手法では, 凹面を生成することができ, さらに主軸と直交する向きへの変形も可能である.

### 5.2 モデリング能力の検証

(i) 主軸ベース, (ii) 面ベース, (iii) 物体中心ベースの各基本変形によってアンケート調査によって得た変形サンプルがどれだけモデリング可能かを示す. 全有効変形サンプルに対しモデリング可能なものの比率を, それぞれ,  $R_{axis}$ ,  $R_{face}$ ,  $R_{center}$  とし, これらの合計を  $R$  とする.

結果を表3に示す. すべての基本変形操作を組み合わせると, 全有効変形サンプルの66.9%がモデリング可能

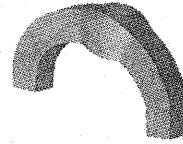


図4 二つの基本変形の組合せ例

であり, 大まかなモデリングを行う上で十分な数字であると考えられる.

表3 モデリング可能な基本変形の比率

$R_{axis}$	$R_{face}$	$R_{center}$	$R$
19.3%	47.6%	1.5%	68.4%

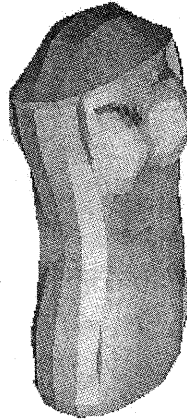
## 6 おわりに

非専門家であるユーザが理解容易な基本変形を用いる大まかな形状モデリング方法について述べた. (i) 主軸ベース, (ii) 面ベース, (iii) 中心ベースの3系統の変形を扱うとし, アンケート調査から, 6種類の基本変形, 及び, 13の基本変形操作を抽出した. アンケート調査から得られる変形サンプルの68.4%がモデリング可能である. 主軸を定めることができる物体に関しては, 曲面物体であっても十分にモデリング可能である. このような基本変形を実装したモデリングシステムを構築し, モデリング例を示すことで, 提案手法の有効性を示した. 今後は, より多くのモデリングへの適用事例を示すことで, ここで提案した基本変形の検証をしていきたい.

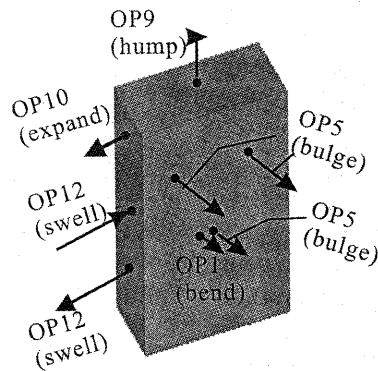
## 参考文献

- [1] 山口泰, 設計とCAD, 6章 CADとフィーチャーモデル朝倉出版, pp.76-83, (1993).
- [2] 日経CG: CADの基礎知識, 日経BP社, pp.70-74, (1995).
- [3] C. M. Hoffmann and J. R. Rossignac: A Road Map To Solid Modeling, IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, Vol.2, No.1, pp.3-10 (1996).
- [4] J. C. Cavendish and S. P. Marin: A procedural feature-based approach for designing functional surfaces, Topics in Surface Modeling, Chap.8, pp.145-168, SIAM (1992).
- [5] C. K. Au and M. M. F. Yuen: A semantic feature language for sculptured object modeling Computer Aided Design, Vol.32, No. 1, pp.63-74 (2000).

- [6] D. Marr and H. K. Nishihara: Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes. Proc. of the Royal Society of London, Vol.200, pp.269-294 (1978).
- [7] デビッド・マー: ビジョン, 産業図書, 第5章 認識のための形状表現, pp.324-359 (1987).
- [8] S. Fukushima, M. Minoh: Flexible Building-block System Using Linguistic Expressions, FUZZ-IEEE/IFES'95 Demonstration, Vol.5, pp.16-17 (1995).
- [9] 福嶋茂信, 美濃導彦, 池田克夫: 言語的指示も併用した3次元モデル作成法, 情処研報 GCAD77-5, pp.27-34 (1995).
- [10] 福嶋茂信, 美濃導彦, 池田克夫: 言語表現を利用する3次元形状モデル作成, 情処研報 GCAD87-11, pp.55-60 (1997).
- [11] 福嶋茂信: 形状特徴を重視した変形ベースの形状モデリング法, 京都大学大学院工学研究科学学位論文, chap.2, pp.13-32 (2001).
- [12] 有泉徹: 実践「パラメトリックフィーチャベース」, No.525, pp.120-126 (1998).
- [13] Alan H. Barr: Global and Local Deformation of Solid Primitives, Computer Graphics, Vol. 18, No. 3, pp.21-30 (1984).
- [14] I. Bierderman: Human Image Understanding: Recent Reserch and a Theory, CVGIP, 1985, 32, 29-73.
- [15] 柿本正憲, 村上公一: 軸による自由形状変形の制御, 情処研報 CG, Vol.52, No.8, pp.51-58 (1991).
- [16] 古川進, 伊藤誠, 黒田満, 清水誠司: 自由曲線, 曲面の生成時における制御点決定の一手法, 精密工学会誌, pp.715-719 (1992).
- [17] M. Kuroda, F. Kimura, S. Furukawa and K. J. Chang: Quartic C 2 Interpolating Curve with Given Tangential Directions, Trans. on IPSJ, Vol.36, No.3, pp.784-786 (1995).



(a) モデリング例 (人台)



(b) 加えた基本変形操作

図5 モデリング例 (人台)