

# CAD/CAMを用いた義肢製作支援システムの開発

— 弾性体の形状表現及び変形手法に関する研究 —

河野 裕・清水 誠司・阿部 正人

## Development of Production Support CAD/CAM System for Artificial Limb

— Study on Form Expression and Deformation Method of Elastic Body —

Hiroshi KONO, Seiji SHIMIZU and Masahito ABE

### 要 約

病気や事故などにより人体の一部を損失した障害者が使用する補装具（義肢）の設計・製造を行うCAD/CAMシステムを構築しているが、下腿義足ソケットの形状を決定するための要素研究の一つとして、CAD/CAMシステムで用いるための3次元弾性体（特に人体）の形状表現及びそのデータ構造、形状の表示・変形に関する手法について検討を行った。その結果、3次元サーフェースデータと2次元データを融合させた、最小限のデータで効率よく扱える新しい内部データ構造を提案し、人体（弾性体）形状データの表示と変形が可能となった。

### 1. 緒 言

近年、工業製品のみならず医療やスポーツ業界など広い分野で、コンピュータを応用した物体形状の測定・解析が盛んに行われている。特に医療分野においては、X線CT（X線コンピュータ断層撮影法）やMRI（核磁気共鳴画像診断）、エコー（超音波検査）、シンチグラフィ（アイソトープ検査）などの画像診断<sup>1)</sup>でハイテク化が進んでいる。しかし、病気や事故などにより人体の一部を損失した障害者が使用する義肢装具の製造分野では、画像診断分野ほどのハイテク化が進んでいない。

義肢装具の機械的な部品はCAD/CAMシステムを用いた設計・製造がなされている<sup>2)</sup>ものの、人体と義肢装具をつなぐ義肢ソケットの製造は、その対象部位が指、腕、足など多様であり、被験者のソケット装着感<sup>3)</sup>や採型や修正など製造工程のなかで義肢装具士の豊富な経験と技術力が要求される部分が多いことがその理由である。

これを支援する幾つかのCAD/CAMシステムが開発され<sup>4)</sup>、実用化されているが、対象が人体であるための問題点が幾つか残されている。例えば、

- (1) 人体形状及び内部組織を考慮した形状データの平滑化が難しい。
- (2) 計測データから3次元幾何形状を再構築した後の形状の表示と編集、及び加工情報の生成を行うためのデータ構造を検討する必要がある。
- (3) 3次元モデルの製造方法として、光造形法でのモデルの大型化が難しい。

等である。これらの問題のため、障害者が快適で使い易いものを製作するには必ずしも満足なものとはいえない。

義肢ソケット製作における上記の問題の解決手法を検討

するため、平成8年度より義肢製作支援システムの開発を行っている。前報<sup>5)</sup>では、連続的に撮影された2次元の医療用CT断層画像から3次元身体モデルが再構築可能であることを示した。

現状のCAD/CAMシステムのデータ構造では、人体のように弾性を持ち、かつ形状が複雑な物体を取り扱うには不十分<sup>6)</sup>である。そこで本報では、下腿義足ソケットの形状を決定するための要素研究の一つとして、CAD/CAMシステムで用いるための3次元弾性体（特に人体）の形状表現及びそのデータ構造、形状の表示・変形に関する手法について検討を行った。

### 2. 弾性体の形状表現

#### 2-1 弾性体

弾性体とは、「伸張、圧縮、せん断などの外力によって変形を受けた物体が、その外力を取り去ったとき元の形状・寸法にもどろうとする性質」<sup>7)</sup>を持った物体である。本報で対象とする人体は、骨と表皮や筋肉、脂肪などの軟部組織から構成されており、複合化された構造を持つ弾性体といえる。

#### 2-2 データ構造

CADにおける立体を表す形状モデルには、

- (1) 頂点や稜線による外形線のみで表現されるワイヤフレームモデル。
- (2) 稜線で囲まれた面を幾つか組み合わせ、面の集合体として表現されるサーフェースモデル。
- (3) 各頂点、稜線、面の相互の接続関係と形状内部の情報を持ったソリッドモデル<sup>8)</sup>。

がある。現状のCAD/CAMシステムのデータ構造は上述の

いずれかのモデルで表現されている。

本システムで対象とする人体はその変形を考慮した場合は弾性を持ち、かつ形状が複雑であるため1つのデータ構造で表すのは困難である。そこで、CADでの画面表示およびCAMへのデータ出力は3次元のデータ構造（サーフェースモデル）を利用し、局所的な変形操作については2次元のデータ構造で取り扱い、その変形後に3次元に拡張する手法とした。

コンピュータ上で人体の3次元形状を表現する方法として、多くのCADシステムで使用されており、3面図表示やシェーディング表示の際にデータの取り扱いが容易であり、CAM（レーザーソグラフィ装置）により実モデルの製作を行うことや、従来のCAD技術が応用できることから、方向性を持った面モデル（サーフェースモデル）を採用した。内部データ構造は、頂点の3次元座標データ群、面を構成する頂点のループデータおよび稜線の両端点データで記述される。この3次元データ構造を図1に示す。

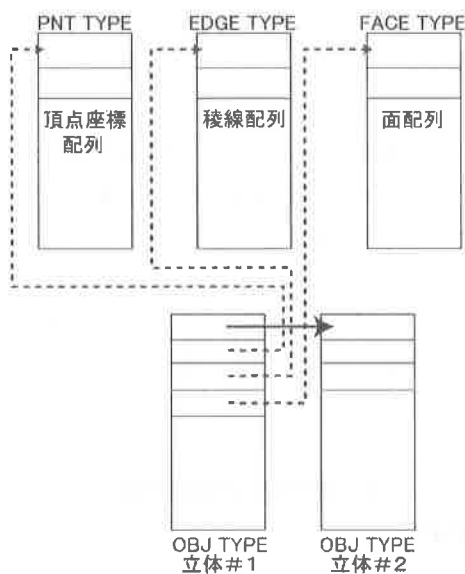


図1 3次元データ構造

さらに、弾性を持つ人体の局所的な変形操作を行うため

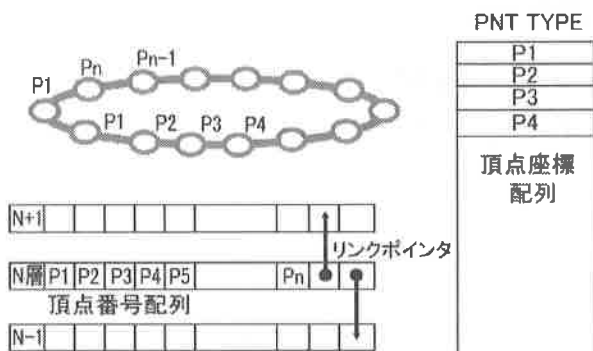


図2 2次元データ構造

の形状表現手法として、X線CT画像やMRI画像のような2次元の断層データの各層ごとに表皮領域の輪郭点列を頂点とする面のループデータを生成し、2次元形状を表現する。この2次元データ構造を図2に示す。各層は表皮輪郭点データ群と属性データ、上層へのリンクを示すポインタ及び下層へのリンクを示すポインタで構成される。

### 2-3 表示例

3次元表示の例を図3、4に示す。図3は膝部周辺のサーフェースモデルでの表示で、図4はそのデータをシェーディング処理して表示したものである。

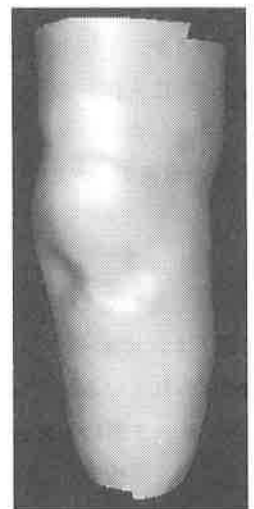
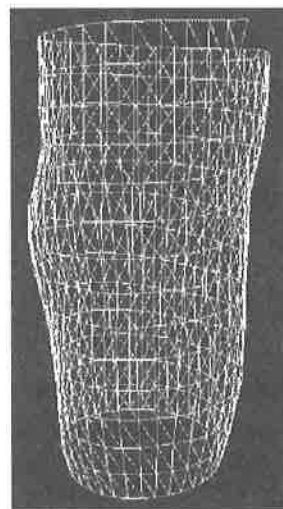


図3 サーフェースモデル

図4 シェーディング表示

データは接触式内面形状測定機により下腿義足ソケットを計測して得られたものである。

## 3. 人体形状データの変形

### 3-1 変形手法

3次元の人体形状データの変形操作を行う方法として、3次元データを輪切りにした2次元断層面に着目した。仮に第n層（第n番目の断層平面）に圧力を付加した場合の変形について考えると、第n層は断層平面に加わる圧力によって、ある変形量を持った形状に変形する。近傍の第n±1, ..., n±i層は加わる圧力の減少により変形量も小さ

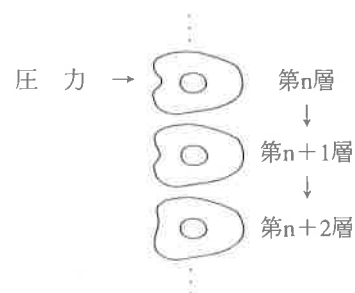


図5 変形の概念図

くなる。よって、変形手法として、外圧の加わった第n層について変形量を算出した後、上下の第n±1, …, n±i層に対しては、距離に応じた減衰量を反映させて変形量を算出して2次元変形形状を決定し、それらを連結させて3次元表現する手法を検討した。概念図を図5に示す。

### 3-2 変形表示

本報では、付加する圧力の方向は断層平面の重心方向に向かい、変形は局所的なものと仮定して考察する。第n層における圧力を想定する円の中心をCn, 半径をrnとして以下の操作を行う。

- (1) 断層平面の重心座標Gnを求める。
- (2) 複数のBezier曲線で表わされている断層平面の輪郭曲線と、圧力を想定する円Cnとの交点Pnを求め、この2点を端点とする3次Bezier曲線を再構築する。
- (3) (2) で求めた交点PnにおけるCnの接線Lnを求める。
- (4) (2) で得られる制御点のうち、断層平面側にあるものをベクトル  $\overrightarrow{(CnGn)}$  方向にLn上まで移動する。
- (5) (2) で求めた交点と距離rn離れた断層平面上の点を求め、この2点間で3次Bezier曲線を再構築し、交点側の制御点のCn側のものをLn上まで移動し、(4) で得た3次Bezier曲線と断層平面のBezier曲線とを連結する。

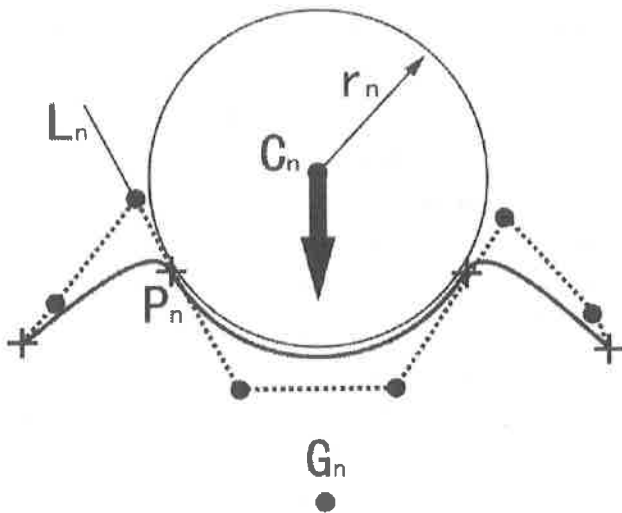


図6 第n層における変形形状

以上により第n層の変形形状が決定される。第n層における変形形状を図6に示す。実線(太)が変形形状、点線が制御ポリゴン、●点が制御点、+点が通過点を示す。

次に第n±1層における圧力を付加する円の半径をr1, 各断層面の高さ間隔をzとすると、

$$r_1 = (r^2 - (1 \times z)^2)^{1/2}$$

であるから、第i層における圧力円の半径riは、

$$r_i = (r^2 - (i \times z)^2)^{1/2}$$

となる。前述の変形操作にこのriを適用すれば、第n±i層における変形形状が決定される。

以上の手法により、円筒形状に変形操作した結果を図7に示す。図の左側が変形前、右側が変形後である。図8には変形後のデータをシェーディング表示したものを示す。

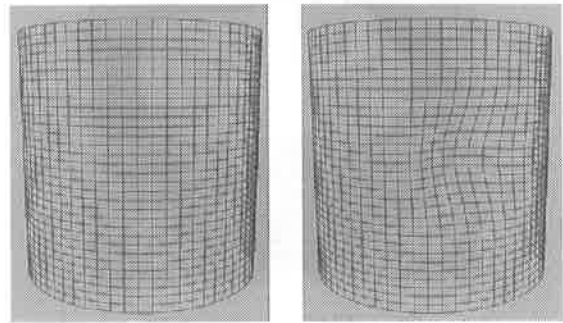


図7 円筒形状の変形

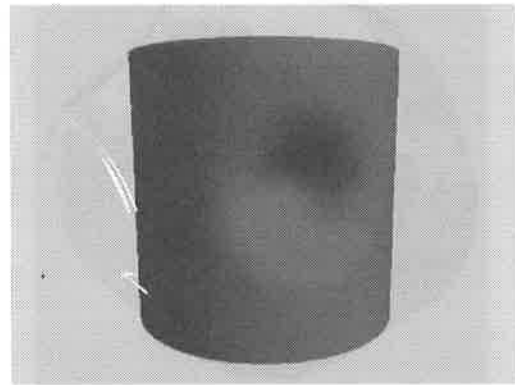


図8 シェーディング表示

## 4. データ構造拡張の必要性

人体のデータ構造として表皮部分のみに着目したが、人体は表皮・筋肉・脂肪・骨など弾性率の異なる物質が複合化された弾性体と考えられるので、データ構造の拡張が必要となる。そこで人体を骨などの硬質な部分と表皮や脂肪などの軟部組織に分類した膝部の断層データを、義肢ソケットの内形状データ(義肢ソケット膝部方向の半分の形状)で押さえつけた際の応力の状態を有限要素法により解析した。図9に解析前の状態を示す。図の上方部分が義肢ソケット形状であり、中央部分が骨などの硬質な部分を表している。この断層データは大腿義足被験者の義肢ソケット装着時と非装着時のX線CT測定結果から得たものである。

この状態から義肢ソケットを装着した(義肢ソケットを装着時の座標値に戻した)状態にしたときの応力分布を、構造解析システム(ANSYS 5.3)により解析した。解析結果を図10に示す。

義肢装具士の経験的データでは、大腿義足は膝頭の下方を左右から2点で支えるのが被験者に痛みや負担が少なく、良い義足だと言われている。この解析結果では、膝部の骨の両側に応力の集中が認められ、ここで体を支えていると

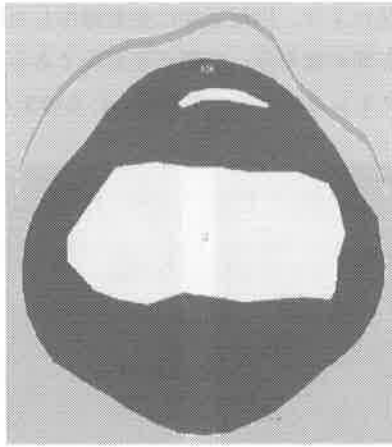


図9 解析前の膝部断層

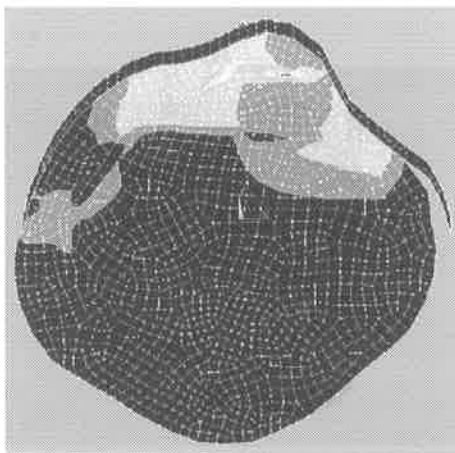


図10 装着時の応力分布状態

考えられる。解析結果からこの下腿義足ソケットは良いソケットであると言えるが、実際この義足の被験者もこの義足で痛みを感じていない。

この解析結果から、義肢ソケットを製作するには、その外形上（表皮部分）だけでなく、皮膚の硬さや骨などの硬質な部分も考慮する必要があり、今後データ構造の拡張も必要であると考えられる。

## 5. 結 言

下腿義足ソケット製作における諸問題の解決手法を検討するため、平成8年度より義肢製作支援システムの開発を行っているが、下腿義足ソケットの形状を決定するための要素研究の一つとして、CAD/CAMシステムで用いるための3

次元弾性体（特に人体）の形状表現手法及びそのデータ構造、形状の表示・変形に関する手法について以下の検討を行い、

(1) 人体（弾性体）の形状表現手法として、CADでの画面表示とCAMへのデータ出力は3次元データ構造（サーフェースモデル）とし、局所的な変形操作には、2次元のデータ構造で取り扱い、変形後3次元に拡張する。

(2) 人体（弾性体）形状の変形手法として、圧力を想定した円を仮定し、3次Bezier曲線の制御点を移動することにより、変形形状を決定する。

3次元サーフェースデータと2次元データを融合させた、最小限のデータで効率よく扱える新しい内部データ構造を提案し、人体（弾性体）形状データと変形表示が可能となった。

最後に、本研究を行うにあたり、ご指導とご助言をいただきました山梨大学工学部 古川進教授、山梨県障害者相談所 佐藤久氏、山梨医科大学医学部付属病院 中島育昌先生、中村修先生、また義肢ソケット製作のモデルとなっていた板橋氏に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 川上, 他: 画像でわかる私のからだ, 講談社, (1996)
- 2) 森本: CAD/CAMの義肢装具への応用, 金属 No.2, (1990)
- 3) 富永, 川村: 装着感を考慮した義足ソケット, バイオメカニズム学会誌 Vol.16 No.4, (1992)
- 4) 森本: CAD/CAMによる義肢ソケット製作システム, 日本義装具学会誌 Vol 9, (1995)
- 5) 阿部, 他: 義足ソケット製作用CAD/CAMシステムの開発—システムの構成と概念設計—, 精密工学会秋季学術講演論文集, (1997)
- 6) 阿部, 他: 義肢製作支援システムの開発—CAD/CAMを用いた義肢製作支援システムの開発—, 山梨県工業技術センター研究報告 第11号, 20 (1997)
- 7) 日本工業標準調査会: JIS K6200 ゴム用語, 日本規格協会, (1976)
- 8) 日本図学会編: CGハンドブック, 森北出版, (1989)
- 9) 三浦, 他: NURBS早わかり, 工業調査会, (1994)