

## 力覚表現を考慮した仮想物体の変形手法

田中厚子<sup>†</sup> 広田光一<sup>†</sup> 金子豊久<sup>†</sup>

本研究では、変形操作にともなう力覚の表現について検討した。仮想空間における変形物体の力学的な表現には、これまでバネモデルが広く利用されてきたが、この方法は力学的な特性を表現するバネのネットワークと表面形状を表現するポリゴンモデルとが構造を共有しており、このため、変形計算の実時間性と形状表現の精度とがトレードオフの関係にあることが問題であった。本研究では、力学的な変形を記述するバネモデルと、対象物形状を記述するポリゴンモデルとを独立の構造として持たせ、バネモデルの変形に対してポリゴンモデルを空間補間の計算により変形させることで、操作の結果を形状に反映させる手法を提案する。これにより、バネモデルの構造を粗くとした場合でも滑らかな変形が実現され、また、力覚フィードバックに要求される短いサイクルタイムでの力計算が可能となる。本論文では、以上の考え方を實現する具体的な計算方法を論じる。空間補間には3次元のCoonsパッチの近似的な計算を用いた。また、直接操作を實現するために、変形操作中の指先の動きを操作点近傍の物体形状に反映する手法を提案した。これらの変形手続きを力フィードバックの實現された仮想空間に実装し、提案した手法により実時間での変形操作と力覚の表現が可能であることを確認した。

### A Method of Deforming Virtual Object with Force Feedback

ATSUKO TANAKA,<sup>†</sup> KOICHI HIROTA<sup>†</sup> and TOYOHISA KANEKO<sup>†</sup>

In this paper, we describe a method of simulating deformation of a virtual object and providing force feedback during the deformation. A spring model has been commonly used as a physically based deformation model in virtual space. In this method, however, a spring network model shares the structure with a polygon model. Therefore it is difficult to reduce calculation time without losing the resolution of the surface of the polygon model on the surface. For solving the problem, we propose a new method which separates the problem of physical reaction and that of surface representation. The surface is represented by a geometry model while the force reaction is realized based upon interpolation of force generated by a coarse spring model. We found that the object surface is smoothly deformed even though the spring model is much more coarsely defined. The computation time was reduced substantially for real-time operation. We implemented the models described above. In this way we could realize deforming an object with a force sensation in real-time.

#### 1. はじめに

計算機によって作り出された合成情報を人間の感覚器官に直接提示することにより、仮想世界の能動的な疑似体験を可能にする仮想現実感 (Virtual Reality) の技術が注目を集めている。仮想空間の實現にあたっては、視覚・聴覚の提示に加え触覚・力覚を含む体性感覚の提示が重要であるとされる<sup>1)</sup>。特に、力覚は操作の器用さに深く関与しているとされ、仮想空間においても操作の際の力覚表現の重要性が指摘されている。一方、仮想空間における現実の疑似的体験を實現しようとする、仮想の対象物の挙動などに関して、現実

を模したシミュレーションが必要であることが認識される。

本研究では、変形操作にともなう力覚の表現について検討した。変形に関する研究としてはこれまで次のような報告がある。

幾何学的方法としては、空間補間を利用したFFD (Free Form Deformation)<sup>2)</sup>が一般的に使用されている。この方法では、空間補間を利用するので滑らかな変形が表現できるが、コントロールポイントを制御することにより物体表面を変形させるので、操作に対する形状変化が予想しにくい。これはまた、形状表面そのものを操作しないという意味で、間接操作による方法である。これに対して直接操作による方法としては、ポリゴンを直接操作して変形を實現する方法や、指先を通して繰返し計算で変形後の面を求めるDDM

<sup>†</sup> 豊橋技術科学大学情報工学系  
Department of Information and Computer Sciences,  
Toyohashi University of Technology

(Direct Deformation Method)<sup>3)</sup>がある。ポリゴンを直接操作して変形を実現する方法としては、指先と対象との干渉計算の容易さなどから Height Map が好んで使用されるが<sup>4)</sup>、この方法では高さ方向の情報しか持たないので、中空物体など、複雑な形状の物体の表現が困難である。

一方、変形にともなう力を表現することを考えた場合、何らかの力学的なシミュレーションが必要となる。力学的な方法としては、有限要素法やバネのネットワークによるモデル（以下、バネモデル）が広く使用されている<sup>5),6)</sup>。有限要素法は対象を要素に分割し、すべての要素に関してたてられる複数の方程式を境界条件の下に連立して解く方法であり、一般にはその計算に多くの時間を要し、実時間操作には適さない。実時間計算により力覚表現まで実現した例<sup>7)</sup>もあるが、これは変形の自由度を制限して2次元のモデルによる計算を行ったものであり、3次元での計算は一般の計算機環境では今なお困難である。その反面、計算の精度は高いとされ、この点を重視して、有限要素法を使用した変形をCGに適用した報告<sup>8)</sup>がある。バネモデルを用いる方法は力-変形の特性をバネの結合で表現し、その挙動をバネの力に基づくノードの運動により実現するものであり、力学的に分かりやすいモデルである。また、有限要素法に比べて、変形から力を求める計算を短い時間で行えることから仮想空間での変形物体の表現に広く利用されてきた。しかしながら、このバネモデルにおいても複雑さが増すと実時間での処理は難しくなる。従来のバネモデルの使用法では、バネによるメッシュと、表面ポリゴンとが構造を共有していることが一般的であった。この方法は、形状モデルの精度、すなわち複雑さをあげると、力学モデルの計算量も増加してしまうことが問題であった。また、安定性の問題や裏返りの問題<sup>9)</sup>も指摘されている。

変形にともなう力覚を違和感なく提示するためには、この計算を高速に行うことが不可欠である。使用するデバイスにもよるが、力覚を表現するためには力の計算が1kHz以上であることが望ましいとされる<sup>10)</sup>。このような制約の下で、視覚的にも滑らかに物体表面が表現できる手法が望まれている。

本研究では、力学的モデルと幾何学的モデルを互いに独立の構造として定義することで、変形とこれにともなう力の表現の計算の実時間性の向上を試みる。なお、力学モデルとしてバネモデル、幾何学的モデルとしてポリゴンモデルを仮定した。形状の定義にポリゴンモデルを用いることにしたのは、複雑な形状でも比較的高速に描画でき、実時間でのインタラクションに

適しているためである。

## 2. 力覚表現および変形のためのモデル

従来のバネモデルにおける変形計算の速度と、形状表現の精度とのトレードオフの関係を解消するために、上述のように、バネによる力学モデルと表面ポリゴンによる形状モデルとは異なる構造を持つものとし、力学モデルは粗く、形状モデルは細かくすることを考えた。操作などにより生じる力学モデルの変形を空間補間により形状モデルに反映することで滑らかな変形が可能になると予想される。

変形操作を行う際、操作点近傍の物体の変形が指先の動きに追従する必要がある。ここでは Coons パッチの性質を利用して実現した。Coons パッチでは、端点に対して位置および接線方向に関する境界条件を与え、これを満たす補間関数が定義される。3次元の Coons パッチでは、パラメータ座標により張られる立方体領域について、その8個の頂点における位置ベクトルおよび各パラメータ座標軸方向の接線ベクトルを用いて、空間補間関数が与えられる。このような特徴から、操作点位置にパッチの頂点に来るようにし、この頂点の位置および接線方向に指先の動きが直接に反映されるようにすれば、操作点付近にある形状に対しても指先の動きが直接反映されるはずである。

パッチがあらかじめ生成されている場合には、指先とパッチ頂点が一致するとは限らない。これに対する1つの解決法として、変形開始時に操作点を決定してから、この点に頂点に来るようにパッチを生成する方法をとった。一方、力学モデルは立方体形状のセルを単位とするものとした。このセルをパッチと1対1で対応させることで、力学モデルの変形をパッチの変形に反映させることが容易になる。

力学モデルのセルは、物体の材料で構成される体積領域を表現するものである。したがって、力学的計算に先だてて物体の立体形状をセルの集合で近似的に表現する処理が必要である。さらに、変形の局所性、すなわち、操作点周りの限られた領域のみ変形すると仮定し、この領域にセルによるモデルを作ることにより、操作点付近の形状のみを変形する。この局所性の仮定は、細長い物体をたわませる場合などは必ずしも成り立たない。自然な変形の表現に適したセルの配置の決定は今後の課題であると考えている。

簡単のため、操作点を中心に立方体領域を考え、物体内部にあるセルおよび物体と交差するセルのみを残すことで実現した（図1参照）。以下、このセルの集合をメッシュと呼ぶことにする。この方法により、操

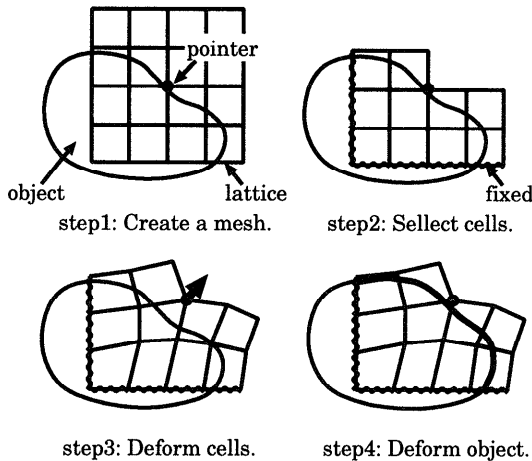


図1 変形概念図  
Fig. 1 A concept of deforming.

作点がセルの頂点上にくるので操作点の位置やその方向が直接指定できる。以下、詳細を述べる。

### 2.1 メッシュの生成

対象物体において、ポリゴンどうしの距離が近いからといって必ずしも物体上で接続しているとは限らない。したがって、操作点からの距離で変形の範囲を決定すると、操作点周りのポリゴンを介して接している部分だけでなく、空間を介して接している部分まで変形される場合がある。そこで、次のような手順で変形範囲を決定した(図2参照)。なお、対象とする物体はすべて3角形ポリゴンで構成されると仮定する。また、計算にあたってはこのモデルをさらに3角形要素と頂点に分解し、相互の結合関係により形状情報を持つものとした。

まず、(1) 操作点に一番近い頂点を探す(図2(a))。次に、(2) その頂点に接続する3角形要素に対して、立方体領域との内外判定、交差判定を行う。つづいて、(3) 3角形要素が立方体領域内にある、もしくはこれと交差している場合にはその3角形要素をマークし、3角形要素を構成する頂点に対して(2)を実行する。(2)と(3)を再帰的に実行することにより、操作点に一番近い頂点から立方体領域内でたどれる範囲の3角形要素がマークされる(図2(b))。このマークされた範囲の3角形要素を変形の対象とする。最後に、マークされた3角形要素またはこれより物体の内側の領域を含むセルが選択され、生成される(図2(c))。変形領域は現実の物体では、本来意図的に指定できるものではないが、本手法では立方体領域に限定された局所的な変形モデルを構成するので、これにより変形範囲が限定される。

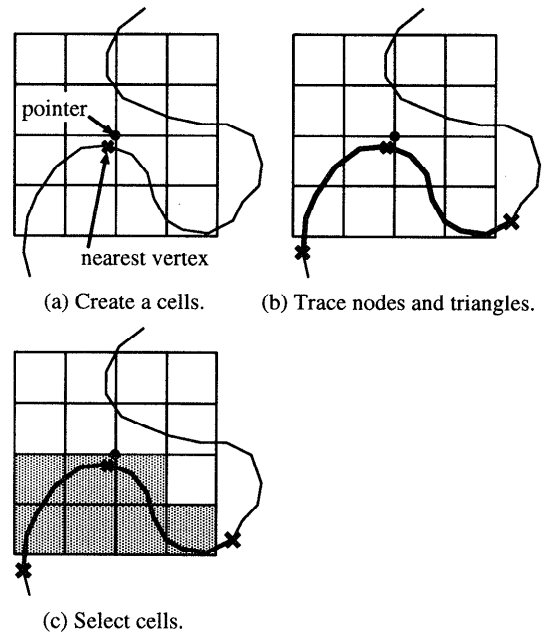


図2 ポリゴンをたどる方法  
Fig. 2 A method of searching polygon.

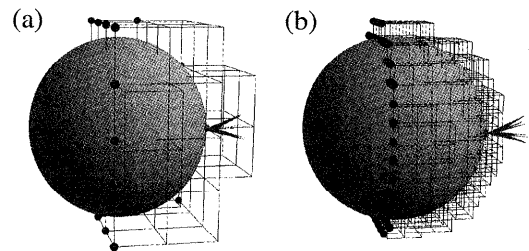


図3 粗さの異なるメッシュの生成例  
Fig. 3 Variation of mesh size.

メッシュは細かくすればするほど、物体の力学モデルが物体形状に近くなるので、力学的計算は精度が良くなるが計算時間を多く必要とする。すなわち、速度の速い計算機を使えば、より精度を上げることができ、逆に、遅い計算機でもモデルを粗くすることにより実時間性を得ることができる。メッシュが粗い場合と細かい場合の例を図3に示す。図3(a)はメッシュの粗い例、図3(b)はメッシュの細かい例である。なお、球の半径は45 [mm]、セルの1辺はそれぞれ25 [mm]と8.3 [mm]である。メッシュが細かいほうが、セルの集合の形状が物体形状に近いことが分かる。なお、計算時間については、3.3節で述べる。

### 2.2 力覚表現のための計算

上述のように力学モデルのセルは立方体の形状を持つとした。このような体積領域の力-変形関係を表現

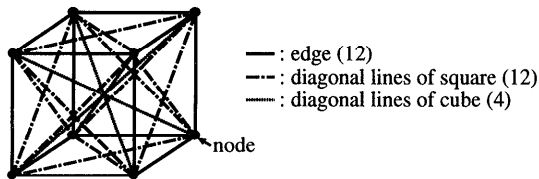


図4 セルの構造  
Fig. 4 Structure of cell.

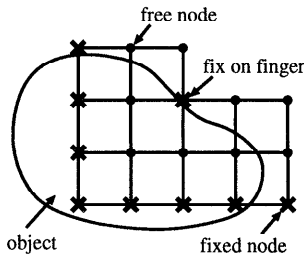


図5 境界条件の与え方  
Fig. 5 Boundary condition.

するモデルとして、頂点どうしがバネで接続されているような構造を仮定した(図4)。バネは立方体の頂点すべての組合せについて張られている。すなわち、1つのセルにつき28本のバネを持つ。なお、すべてのバネのバネ定数は同一である。以上は、セル単位での構成であり、セルが互いに接して定義されたモデルの中では、辺および面のバネは重複して張られる。バネモデルの中のバネ定数は一般的には決定方法が確立されていないが、ここで用いた構造のモデルにおいては、引っ張り弾性定数とバネ定数 $k$ との関係は、引っ張り弾性定数を $E$ 、自然状態での1辺の長さを $L$ とすると次式で与えられることが報告されている<sup>11)</sup>。

$$E \cong 4.64k/L. \quad (1)$$

バネの自然長はセルの大きさによって変化するので、バネ定数はバネの自然長の関数として表される。なお、3章で示す結果では、 $E = 10 [\text{kg}/\text{sec}^2 \text{mm}]$ とした。

メッシュの範囲の外は変形しないことから、メッシュの外表面と物体が交差している面は固定の境界条件を、また、空気と接している点では自由の境界条件とすることが適当である。これは、具体的には物体と交差している面のノードはすべて固定ノード、それ以外を自由ノードとすることにより実現される(図5参照)。なお、操作点は指先とともに移動する強制変位ノードとする。

一般に物をつかむ場合、指先から物体への力は分布力として発生する。また、指先の柔らかさなどの影響から、操作点以外では強制変位を与える境界条件は適当ではない。ここでは、指と物体との間の作用・反作

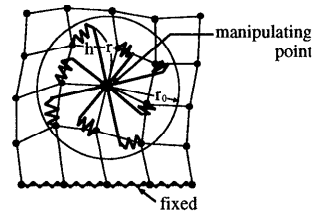


図6 指先と物体の間の力の表現  
Fig. 6 Representation of distributed force.

用の力についても、これをバネの結合で表現するものとした(図6参照)。この結合の強さを表すバネ定数 $h$ の決定方法であるが、操作点を中心として半径が大きくなるに従って把持剛性が低下するものと仮定して、このバネの定数の値を次式を用いて定義した。

$$h = \begin{cases} \frac{\alpha V}{2} (\cos(\frac{r}{r_0} \pi) + 1) & (r \leq r_0) \\ 0 & (r > r_0). \end{cases} \quad (2)$$

これは物体内部を含めて体積に対して作用するような力を仮定したことを意味する。ここで、 $\alpha$ は比例定数、 $V$ はメッシュの単位体積、 $r$ は操作点からの距離である。また、 $r_0$ は指先からの力の働く範囲であり、この値を変化させることでつまみ方などによる影響の範囲の違いを表現できると考えられる。3章で示す結果では、 $\alpha = 1 [\text{kg}/(\text{sec}^2 \text{mm}^3)]$ とした。指先から物体に対する力は本来は物体表面のみに作用するものであるが、2指でつまむ場合など操作方法によっては、内部体積領域に対して高い剛性で作用することが可能であるなど、現実の現象は非常に複雑である。このような力の分布の現実的な仮定は今後検討すべき課題の1つである。一方、指先に作用する力は、これらの結合が発生する力と操作点で力学モデルが発生する力との総和として、また、トルクはこれらの結合が指先に対して発生するトルクの総和として計算された。

### 2.3 変形のための計算

空間補間による変形は、バネモデルにより変形されたセルに合わせて、セル内部に含まれる形状を歪める処理である。ここでは上述のように3次元のCoonsパッチによる補間関数を利用する。この補間関数は、隣接するセルと境界条件を一致させることで境界での連続性が保証されることから、各々のセルに含まれるノードの位置計算をセルの単位で独立に行ってもセルの境界部分において変形の滑らかさが損なわれることはない。この補間計算では、変形前のセルにおける物体の頂点座標 $P$ をセル内のパラメータ座標 $(r, s, t)$ に変換し、これを3次のCoonsの式を用いて変形後のセルにおける物体の頂点座標 $P'$ を求める。ここで

はこれを近似的な計算で行った(付録 A.1 参照)。この計算の中では、変形後の各セルの頂点の位置およびそこにおけるパラメータ座標  $r$ ,  $s$  および  $t$  方向の3つの接線ベクトルが使用される。各セルの頂点の位置は、セルが力学モデル(バネモデル)と変形計算のためのパッチとで共有されていることから、バネモデルのノードの位置をそのまま用いることができる。一方、接線ベクトルは次の方法により決定した。それぞれのノードには、求めたいパラメータの方向に接続しているノード(以下、接続ノードとする)が1つまたは2つ存在する。接続ノードが1つだけの場合には、接続ノードと注目ノードを結ぶ方向ベクトルを接線ベクトルとして用い、接続ノードが2つの場合には、2つの方向ベクトルの平均を接線ベクトルとして用いるものとした。ただし、操作点の位置と接線ベクトルは、指先の動きに従うものとする。このような操作点位置および接線ベクトルは操作開始時の指先の位置姿勢に対する現在の位置姿勢を表現する座標変換を求め、これを用いて操作開始時の操作点位置および接線ベクトルに変換をほどこすことで求められる。なお、力学モデルにおいて固定の境界条件が与えられたノードでは、位置・接線ベクトルともに変化しないものとした。

### 3. 操作環境の試作

2章で述べたような方法により、変形操作とこれにともなう力覚の表現を実現した。以下、その環境と評価のための実験について述べる。

#### 3.1 システム構成

試作されたシステムの構成を図7に示す。このシステムでは、変形のための操作入力と変形の際の力覚の提示を行うデバイスとして PHANTOM (SensAble Device) を用いた。また、3次元物体を操作するためには視覚的奥行き感の表現が必要であることから、液晶シャッターメガネ (Crystal Eyes PC, Stereo Graphics) を利用した視差立体視を実現した。変形にともなう計算および結果の描画は DOS/V PC (Pentium Pro 200 MHz) により行われる。なお、描画の高速化のためにアクセラレータ付きのビデオカード (Fire GL 1000, Diamond Multimedia) を使用した。また、OSとしては WindowsNT を用いた。変形の開始と終了は、ボタンの押下、解放によりシステムに通知される。この間、力および変形の計算が行われ、力が提示される。

#### 3.2 変形操作の実行

試作された環境における変形の作業とこれにより作成された形状の例について述べる。

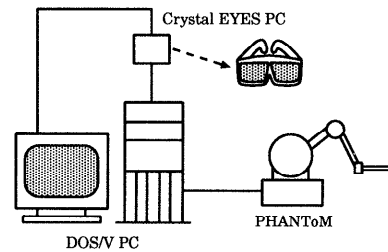


図7 システム構成図

Fig. 7 System construction.

まず、変形の操作の様子を図8に示す。図(a)は変形開始時の状態を示しており、矢羽がカーソル、カーソルを中心としたワイヤフレームがメッシュである。メッシュ上の球は固定ノードを表す。同図(b)は、変形途中の状態である。メッシュの変形とともに物体も変形していることが確認される。同図(c)は変形終了時で、変形の終了とともにメッシュは削除される。前章で述べたような指先からの力の作用の仮定により、引く押すだけでなく捻る操作が可能となり、またその際のトルクを求めることができる。物体を捻った例を図9に示す。なお、ここで使用した力覚デバイスはトルクを表現できないため、現在の環境では捻り際のトルクはフィードバックされていない。

2.1節で述べたような、変形範囲を操作点に一番近い物体の頂点からポリゴンをたどっていくことで選択する方法と、単純に操作点からの距離によって決定する方法とで、生成されるメッシュとその結果として生じる変形の違いを図10に示す。後者の方法(同図(a))では、メッシュが物体全体に広がっており、したがって、操作点周りが引っ張られるのとともに本来変形がほとんど及ばないと考えられる部分まで変形されている。それに対して前者の方法(同図(b))では、生成されたメッシュの領域も小さく、操作点周りのみ変形されていることが分かる。

指先からの力の働く範囲(式(2)の  $r_0$ )を変化させた場合の例を図11に示す。同図(a)および(b)は各々  $r_0$  の値を 30 [mm] および 10 [mm] としたものであり、前者では後者に比べて物体が“大きく”つままれている様子が表現されている。なお、対象物体の1辺の長さは 100 [mm] である。また、メッシュが粗い場合と細かい場合の比較を図12に示す。なお、球の半径は 45 [mm]、セルの1辺はそれぞれ 25 [mm] と 8.3 [mm] である。メッシュの粗さは、モデルの精度であるので、変形の特徴はこれに依存しないことが望ましい。実際、どちらの場合も変形の仕方はほぼ同程度であることが確認される。

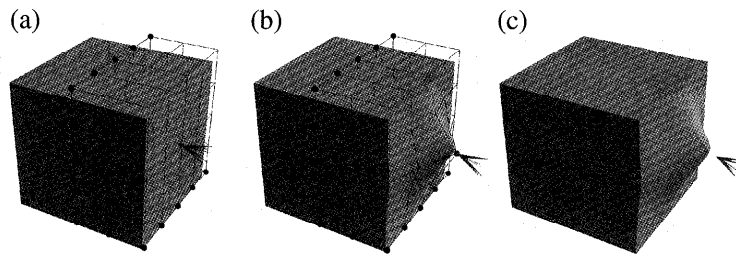


図 8 変形過程

Fig. 8 Process of deforming operation.

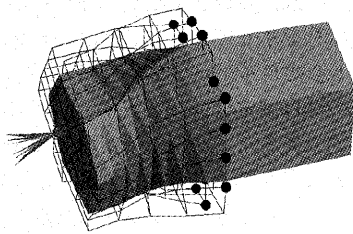


図 9 捻りの表現

Fig. 9 An example of twisting operation.

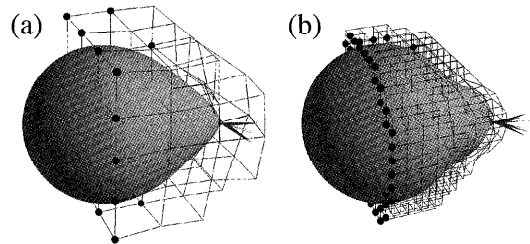


図 12 メッシュの粗さの異なる例

Fig. 12 Variation of mesh size.

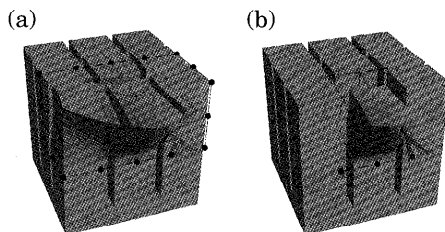


図 10 変形範囲の決定方法の違いによる例

Fig. 10 Global deformation vs. local deformation.

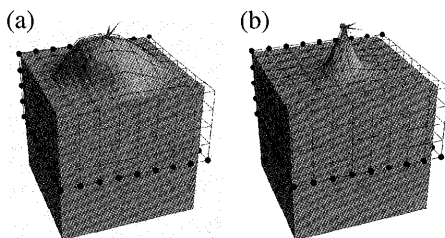


図 11 変形領域の異なる例

Fig. 11 Variation of deform range.

### 3.3 計算時間に関する評価

ここでは、バネモデルとポリゴンモデルが同一の構造を持つ従来のモデルと、本研究で提案した手法について計算時間の比較を試みた。従来法のモデルとしては 2.2 節で述べた構造を持つセル  $N \times N \times N$  個で構成される立方体形状を仮定し、これに対して、本手法

では、この立方体形状の表面ポリゴンのみを、変形の対象とするものと仮定した。

まずバネモデルの計算 1 サイクルに要する時間と空間補間に必要な計算時間とを表 1 に示す。これはバネモデルの単位要素に対する力の計算に必要な時間の実測値 0.0625 [msec] および 1 頂点の補間に必要とされる時間の実測値 0.05 [msec] より計算した推定値である。また、今回の方法に必要な計算時間とメッシュ生成に必要な時間を表 2 に示す。同表に示した本手法の計算時間は  $4 \times 4 \times 4$  のバネモデルを仮定した場合の値であり、表 1 中のバネモデルの計算時間の 4.0 [msec] と同表中の各メッシュ分割数における空間補間の計算時間との合計値となると考えた場合の推定値である。また、メッシュの生成に必要とされる時間は実測に基づくものである。評価条件の 1 例を図 13 に示す。この例では、 $8 \times 8 \times 8$  のメッシュの表面を  $4 \times 4 \times 4$  の力学モデルで変形している (表 2 中  $8 \times 8 \times 8$  の場合に相当)。

メッシュ生成時間は主に、変形に使用するポリゴンの選択に費やされる。したがって、物体を構成するポリゴン数が増加するにつれてメッシュ生成時間も増加する。なお、メッシュ生成は操作開始時に 1 回だけ行われるものであり、力および変形の計算の実時間性を損なうものではない。

これらの結果からも分かるように、図 13 に示した程度に複雑な物体では、これをバネモデルで記述するよりも、粗いバネモデルと空間補間を組み合わせた方

表1 バネモデルと空間補間に必要な計算時間

Table 1 Calculation time of spring model and spatial interpolation.

メッシュ分割数	バネモデル*1	空間補間*2
2×2×2	0.5	1.3
4×4×4	4.0	4.9
8×8×8	32.0	19.3
16×16×16	256.0	76.9

(単位はすべて msec)

\*1 内部にもメッシュを構成

\*2 表面ポリゴンのみを対象とした

表2 今回の方法とメッシュ生成に必要な計算時間

Table 2 Calculation time of our method.

メッシュ分割数	今回用いた方法	メッシュ生成時間
	[msec]	[sec]
2×2×2	5.3	0.132
4×4×4	8.9	0.325
8×8×8	23.3	0.834
16×16×16	80.9	2.227

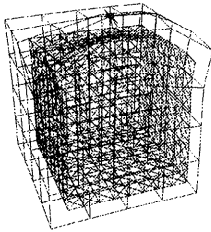


図13 計算時間比較のためのモデル

Fig. 13 A condition of estimating calculation time.

が計算時間は少なくて済み、この傾向はメッシュ分割数が増えるほど顕著となる。

バネモデルの変形計算と補間計算は独立のサイクルで行うことができる。すなわち、バネモデルによる力の計算は、力覚表現のために短い周期で実行し、これに対して、視覚表現は力覚表現ほどには実時間性を要しないので、その合間に実行することが考えられる。ここでは、バネモデルの計算と補間による変形の計算とでスレッドを分けることで非同期な処理を実現した。力の計算は、タイマ割込みにより一定時間間隔で呼び出され、4×4×4のバネモデルでは250 Hzで力の計算の処理を行うことができた。

#### 4. おわりに

本研究では、変形操作にともなう力覚の表現について検討した。力覚を表現するために、実時間で計算できる程度に粗くしたバネモデルと、空間補間を組み合わせて用いる手法を提案し、これをポリゴンモデルに

適用するための計算手順を示した。さらに、立体視と力フィードバックの実現された仮想空間にこの変形の手続きを導入することにより、直接操作による実時間での作業が可能になった。また、力フィードバックにより、物体の柔らかさを表現することも可能になった。

このようなシステムの試作を通して問題点も見い出されている。対象物体において、ポリゴンはメッシュの細かさに比べて十分に小さいものとして変形を行っているが、ポリゴンが大きい場合には分割などの処理が必要とされる。FFDによるポリゴンモデルの変形などの際のポリゴンの分割および統合に関する研究はこれまでも行われており<sup>12)</sup>、本研究においてもこれらの知見を適用できると考えている。

今回は変形の局所性を仮定し、操作点周りのみを変形の対象としている。しかし、現実世界においては、一部分を変形することにより物体全体の形状が変化することもある。これについては、メッシュの生成方法、すなわち、セル数の制約の中で現実的な変形表現に適したセルの配置やそのメッシュの境界条件の与え方の検討によってある程度解決されるのではないかと考える。また、把持剛性を式(2)のように仮定したが、現実的な力の分布についてはさらに検討する必要がある。

力の表現のための力学モデルの近似精度も問題である。上述の結果からも明らかなように、力学モデルのセルは一般に物体からはみ出して生成される。したがって、計算される力の大きさも大きくなっているはずである。このような問題を解決する1つの方法として、物体からはみ出したセルのバネを弱くするなどの工夫が考えられる。

#### 参考文献

- 1) 廣瀬通孝：バーチャル・リアリティ，産業図書(1993)。
- 2) Sederberg, T.W. and Parry, S.R.: Free-Form Deformation of Solid Geometric Models, *SIGGRAPH '86*, Dallas, pp.151-161 (1986)。
- 3) Yamashita, J. and Fukui, Y.: A Direct Deformation Method, *VRAIS'93*, Seattle, U.S.A., pp.499-504 (1993)。
- 4) 広田光一，齊藤 淳，廣瀬通孝：面提示型触覚デバイスによる形状生成作業の支援，日本機械学会論文集(C編)，Vol.61, No.586, pp.260-265 (1995)。
- 5) 矢野博明，岩田洋夫：自律的自由曲面を用いた仮想環境による協調作業，電学論C，Vol.115, No.2, pp.215-222 (1995)。
- 6) Norton, A., Turk, G., Bacon, B., Gerth, J. and Sweeney, P.: Animation of fracture by physical





においては、このような問題は意識されない程度に軽微なものであった。

(平成 10 年 3 月 13 日受付)

(平成 10 年 6 月 5 日採録)



田中 厚子

1997 年豊橋技術科学大学工学部情報工学科卒業，同大学院修士課程在学中．仮想空間を利用した対象物操作の研究に従事．日本 VR 学会会員．



広田 光一（正会員）

1988 年東京大学工学部産業機械工学科卒業，1990 年同大学院産業機械工学専攻修士課程修了，1994 年同博士課程修了，1995 年豊橋技術科学大学情報工学系助手．主にヒューマンインタフェースの研究に従事．日本 VR 学会，日本機械学会，計測自動制御学会各会員．



金子 豊久（正会員）

1962 年東京大学工学部電気工学科卒業，1964 年同大学院電気工学専攻修士課程修了，1970 年プリンストン大学電気工学科博士課程修了（Ph.D.）．同年 IBM 入社，ワトソン研究所研究員，1982 年日本 IBM 東京基礎研究所に移り，東京サイエンティフィックセンター長など歴任．1994 年豊橋技術科学大学情報工学系教授．主に医用画像処理と CG の応用に関する研究に従事．ACM，IEEE，電子情報通信学会各会員．