

VRにおける自然な操作性を目標とした 自由形状モデリングの研究

On the Free Form Modeling Aimed at Natural Feeling Operation in VR

森 久視[†] 平松 誠治^{††} 加藤 厚生^{††}

Hisashi MORI[†], Seiji HIRAMATSU^{††}, Atsuo KATO^{††}

Abstract: Computer graphics are used not only in movies or games but in various fields now, and necessity is increasing considerably. However, there are seldom those who can master 3D modeling tools. As one of the reason, there is a difference in the actual object manufacturing method like clay work or glasswork, and the manufacture method by the computer. Therefore, it takes a long time until a beginner gets used to general 3D modeling tools. In this research, we propose the free form modeling based on human's intuitive operation method. And even beginners can operate the tool after easy learning.

1. はじめに

1.1 研究の背景

コンピュータグラフィクス技術はさまざまな分野で用いられており、人々はテレビゲームや映画などいろいろな機会に3次元オブジェクトを見ることができる。しかし、この技術を用いて3次元オブジェクトを制作できる人は少ない。その理由として、人間が実際に行う物体制作方法とコンピュータによる制作方法に違いがあるからである。

バーチャルリアリティ (VR) において3次元画像オブジェクトを制作する場合、現在の一般的な3次元モデリングツールを用いると初心者はそのツールに慣れるまでに長い時間を要する。そこではマウスやジョイスティックなどの2次元装置を入力装置として使用するため直観的な操作が困難であり、くわえて曲面作業が簡単でないので長い作業時間を必要とする。

ところで、人間が実際に物体制作をする時は、それまでに修得したスキルを動員して自らの手を用いて物体を制作し、完成させる。学習した時間と先天的な能力によって完成物に個人差は存在するが、自らの手を用い最終的に対

象物を完成させるのが特徴である。そこで、本研究ではより人間の物体制作方法に近い3次元オブジェクトの制作方法を提案する。

1.2 本研究の目的

本研究では、提示した問題点を改良して最新技術の1つであるバーチャルリアリティ触覚技術を用い、より人間の制作方法に近い3次元オブジェクト制作方法を提案する。本研究の目的は、初心者が短時間の学習で3次元オブジェクト制作を可能にすることである。そのために、今回の研究では、部分並進変形時に力覚を提示することにより、直観的な操作性のみならず、曲面作業をより簡単にすることを考慮した。

2. VRに関する基礎研究

2.1 ハプティックインタフェース

従来のロボット工学における主流は、人間と機械の相互的なインタフェースがない自動化システムだった。しかし、ロボットシステムが人間と能動的な相互交感をすれば人間の物理的な力を増加させ、人間の精度を高め、人間が作業するのに困難な環境を遠隔操作するなどして、人間にも

[†] 愛知工業大学 工学部電気電子工学専攻 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 工学部電子工学科 (豊田市)

っと多くの能力と可能性を与えることができる。

人間には, 外部力に対して Tactile (触覚) と Kinesthetic (運動感覚) という 2 種類のセンシングシステムがある¹⁾。Tactile システムは, 人間に静接触から形, 大まかな手触り, 温度感覚を与える。また, 表面上で指を滑らすような動接触により, 表面の正確な手触り, 摩擦特性, 弾性係数や粘性係数についての情報を得ることができる。Kinesthetic システムでは, 筋肉, 腱, 関節の中に存在する受容器により, 運動を感じとることができる。人間の脳はこれらの受容器からの信号を判読し, 位置と接触力を知る。

人間は, 力の振動と不連続に非常に敏感である。人間の皮膚には Pacinian 小体という受容器があって速度計測器として働いている。この受容器により人間は, Tactile 感覚では, 最高 1kHz までの振動周波数を計ることができる。この意味は, 1kHz 以上の周波数に対しては 1kHz の周波数と同じようにしか感じないということである。この点から我々のハプティックインタフェースのサーボレートは 1kHz くらいが適当ということになる。この意味はもし外力が振動を含まない場合はそんなに速いサーボレートは必要ないということである。

2・2 接触検出

コンピュータ上で仮想のオブジェクト間の接触をより早く判断するために I-Collide²⁾, V-Collide³⁾, BVH⁴⁾, BSP-Tree⁵⁾ などのアルゴリズムが提案されてきた。その中で, ある一定のポリゴン領域を囲む境界ポリボリュームでオブジェクトの構造を表す Bounding Volume Hierarchies (BVH) は, 接触検出のアルゴリズムとして広く使われている。

多様な境界ポリボリュームの形があるが, 最も一般的に使われるポリボリュームは Axis-Aligned Bounding Box (AABB)⁶⁾, Sphere, Oriented Bounding Box (OBB)⁷⁾ である。それぞれ長所, 短所があり, 場合により性能が変わるので, ある 1 つが一番良いとは言えない。なお, 本研究では OBB Tree 構造 (図 2.1) を採用した。

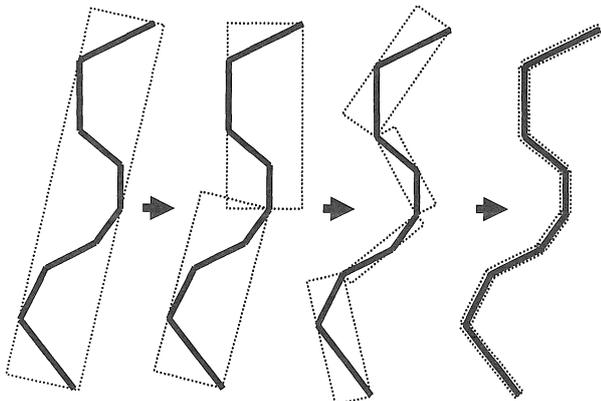


図 2.1 OBB Tree の生成

2・3 力覚提示アルゴリズム

Constraint-based Rendering Algorithm⁸⁾ はハプティックインタフェースにおいて指先の動きを妨害する拘束平面上の接触点を探す方法である。MIT で提案された God Object Algorithm では拘束平面上の接触点を Ghost Point と呼び, その点を求めるためにまず, エネルギー関数を求めた後, ラグランジェ方程式に代入し, これを偏微分して God Object の位置を探す。

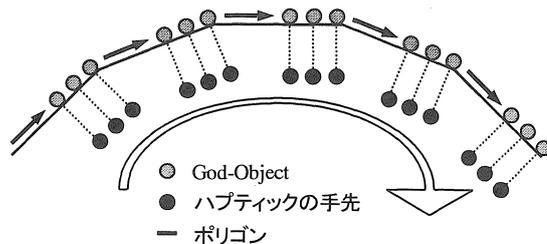


図 2.2 Ghost Point の経路追跡

すなわち, God Object の位置は, ハプティックインタフェースの指先の位置と仮想物体表面間を最短距離で結ぶ仮想表面上の点になる。図 2.2 はハプティックの手先がオブジェクトに衝突してから, 力を出すために行う Ghost Point 経路追跡である。このような Ghost Point を保存することにより, history (前段階のサーボサイクルでの Ghost Point の位置) がわかる。Ghost Point の位置が決まれば簡単なインピーダンス制御式で, 提示する力を計算する。フックの法則を用いて次のようになる。

$$F_{stiffness} = k(g_p - h_p) \quad (2.1)$$

$$F_{damping} = b(\dot{g}_p - \dot{h}_p) \cdot \bar{N} \cdot \bar{N}$$

ここで k は弾性係数, b は粘性係数, g_p は Ghost Point の位置, h_p はハプティックインタフェースの手先の位置, そして N は単位法線ベクトルである。それで平面から発生する力の式は次のようになる。

$$F_{normal} = F_{stiffness} + F_{damping} \quad (2.2)$$

3. オブジェクトの変形

3・1 FFD (Free-Form Deformation)

FFD⁹⁾ とは, Sederberg と Parry により提唱された概念であり, ある形状に対して何らかの法則により制御点を定義し, その制御点を動かすことで形状を大域的に変形する手法のことである。

FFD は, 一般的な形状に対する変形手法であり, 応用範囲が大変広いため, その後のほとんどの手法がこの方法に基づいている。この手法では, まず変形される対象形状を内包するような, 格子状に配置した制御点からなる制御立体

を生成する。制御立体格子内は3方向のパラメータ空間と定義され、内部に存在する点は3変数 (trivariate) のベルンスタイン多項式 (式(3)) により決定される。

$$B_i^n(t) = \frac{n!}{(n-i)!i!} t^i (1-t)^{n-1} \quad (3.1)$$

制御立体の変形はパラメータ空間そのものの変形となり、この変位が対象形状の変形に写像されることにより、自由変形が実現される。

3・2 空間領域選択方法

図 3.1 のようにオブジェクトとの接触を保ちながら球や立方体などの3次元カーソルをオブジェクトに重ね、その空間内にあるすべての領域を変形領域として選択する方法である。本研究では、この空間領域選択法により領域選択を行うとき力覚を提示し、2次元視覚ディスプレイ使用によるユーザの距離感覚の問題を改善した。そして、重みを付けるときに基準点を常にオブジェクトの表面上に置くことで奥行き問題を解決した。領域を選択する手順と方法は次のようになる。

1. 力覚アルゴリズムにより、オブジェクトの表面上で動く God-Object と呼ばれる仮想的な移動点 V を求める。
2. オブジェクトに接するバーチャルプロキシポイントを中心とした仮想的な領域を描く。
3. 2で描いた領域内のすべての頂点を1の移動点の周りから始めて順に検出していき、変形領域として選択する。

各頂点は手順1での移動点との距離に関する重み α を持つ。図 3.1 は球をカーソルとして領域を選択していることを表している。

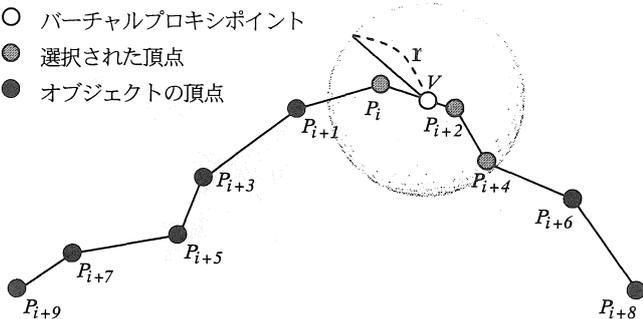


図 3.1 球を用いた空間領域選択

3・3 選択領域の変形

空間上にあるオブジェクトを構成する頂点を V_i とし、その V_i の中で領域選択により重みを与えられたすべての頂点に対して、次の式のように重みと手先の移動ベクトルに応じた並進変形を行う。次の式(7)で W_{V_i} は点 V_i の重み、 B

は対象物の姿勢と位置を表すアフィン行列、 L は手先の移動ベクトルである。

$$V'_i = V_i + W_{V_i} \times B^{-1} \cdot L \quad (3.2)$$

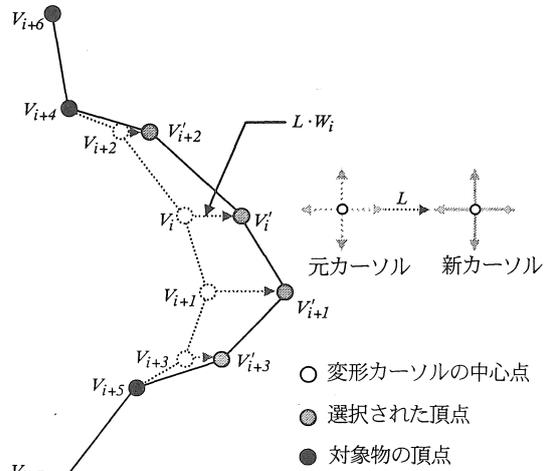


図 3.2 並進変形

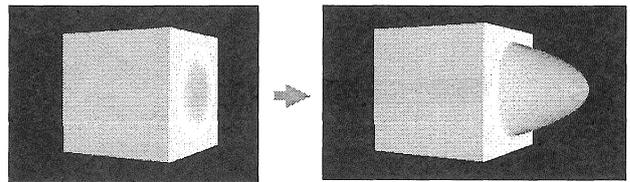


図 3.3 並進変形の結果

3・4 変形途中の力覚提示

本研究では、より直観的なモデリングを実現するために、重み付けによる部分並進変形時に力覚を提示させた。変形途中の力覚提示として、弾性・塑性・粘性という特性に着目した。

3・5 提示した力覚の特性

1. 弾性

固体は外力を受けると変形により変位・ひずみを生じ、外力に抵抗して応力を生じる¹⁰⁾。外力を取り去ると元の形状に復するときこの性質を弾性という。このような変形を弾性変形という。これらの量の間には変位とひずみ、ひずみと応力の関係がある。

2. 塑性

多くの固体は適当な条件のもとにおかれると、大きな外力の作用で破壊することなしに連続的に変形し、外力を除いても物体はもはやもとの形に戻らず永久ひずみを生ずる¹¹⁾。固体の示すこのような変形の特性を塑性という。そして塑性変形を行なう物体を塑性体という。一般に固体に作用する外力の大きさをしだいに増していくと、物体内の

応力もしだいに増していくが, ついにある値に達すると応力はほとんど増さないのに永久ひずみが急激に増しはじめる. この応力の限界値を降伏値 (降伏点) という.

3. 粘性

水をかき混ぜたとき抵抗を感じることを我々は経験的に知っている. このときかかる抵抗は速く動かしたときは大きくなり遅く動かしたときは小さくなる. つまり粘性は速度勾配を減少させ速度を平均化する作用を持つものである.

3・6 力覚の表現

並進変形をするときに, 弾性と粘性の力を加え塑性を表現した. 距離に依存して変化する力として弾性を表現し, 速度に依存して変化する力として粘性を表現した. 弾性領域での応力はフックの法則に従い距離に比例して力を返す. 塑性領域は, 図 3.4 のような応力が返るよう設定した. 粘性は領域に関係なく常に変形途中の速度に依存した力を返すように設定した.

3・7 変形途中におけるアルゴリズム

1. 弾性領域の応力

弾性領域の応力に使用した式を次式に示す.

$$f = kx + b \frac{dx}{dt} \quad (3.3)$$

式の f は応力, k は弾性係数, b は粘性係数, x はひずみである.

2. 塑性領域の応力

距離に依存した力が線形に従い減少する (図 3.4). この式を以下に示す.

$$f = -k(x - x_i) + b \frac{dx}{dt} + kx_i \quad (3.4)$$

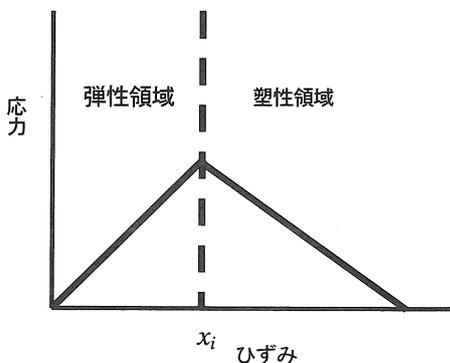


図 3.4 塑性領域の応力

4. 実験

本研究では提案したモデリングツールに力覚を提示した場合と, 提示していない場合との比較実験および実際の素材との比較実験を行った.

実験はそれぞれの目的に応じて, 3 種類行った. 以下に実験の内容とその目的を説明する.

まず, 実験 1 では力覚提示の有無が人の操作性にどのような影響を与えるかを検証する. 次に, 実験 2 では力覚提示の有無がモデリングツールとしての総合的な評価にどのように影響するかを検証する. さらに, 実験 3 では本研究で提案した手法が, 実際の素材の力覚をどの程度表現できるかを検証する.

4・1 実験方法

実験 1 では, 視覚情報を得ることが難しい手前方向へのオブジェクト変形をするとき, 力覚の有無により, 距離の正確さにどの程度差が生じたかを検証した.

具体的な実験方法を説明する. まず, 被験者にオブジェクト表面上の始点 (図 4.1(1)) から画面手前の基準点 (図 4.1(2)) までの距離を力覚提示なしで並進変形させ, その感覚を記憶させる. 基準点に達したときは, 画面に「HIT」という文字を表示し, 基準点に到達したことを知らせる. 次に, 基準点に到達したことを知らせず, 記憶した視覚情報のみで先程と同じ変形動作を複数回繰り返させる. また, 力覚を提示した場合においても, 始点から基準点までの距離を視覚情報と力覚情報をもとに記憶させ, 同様な変形動作を複数回繰り返させる. 今回使用した応力は図 3.4 の弾性領域のみで, $k=40,000$, $b=100$ とした. それぞれ基準となる距離とのずれとばらつきを算出し, 値を比較した. 被験者は PHANTOM™ および本研究のモデリングツールの使用経験のない 10 名を選出した.

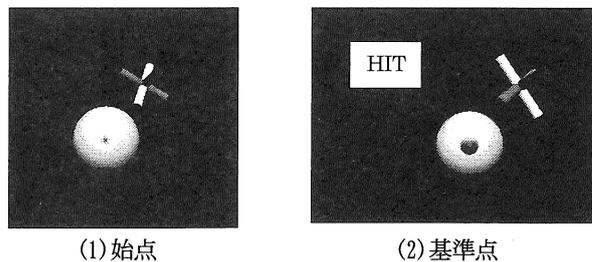
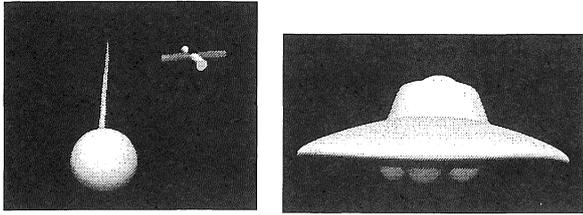


図 4.1 実験 1 の実験方法

実験 2 では, 実際にモデリングツールとして使用したとき, 力覚提示の有無による操作性への影響を検証する. 具体的な実験方法を説明する. まず, 特徴の異なるサンプルを 2 種類用意する.

サンプル 1 では長く引っ張る変形を目的とし, サンプル 2 では細かい変形を目的とした. これらのサンプルを見本

として被験者3名が力覚を提示した場合と提示しない場合でモデリングを行い、感応テストをした。使用した応力は実験1と同様で、被験者は、経験者1名(被験者A)と未経験者2名(被験者B・C)を選出した。感応テストは5段階評価で行った。



(1) サンプル1 (2) サンプル2

図 4.2 実験2の変形目標

実験3では、本研究で提案した力覚(弾性・粘性)により、実際の素材の特徴をどの程度表現できたかを検証する。具体的な実験方法を説明する。実際の素材としてねり消しゴムとねりあめを用意した。ねり消しゴムでは弾性に着目し、ねりあめでは粘性に着目した。それぞれの素材に近い力覚を提示し、PHANTOM™および本研究のモデリングツールの使用経験のない被験者10名に実際の素材と比較させ感応テストを行った。応力は図3.4を使用し、ねり消しゴムでは、 $k=120,000, b=50, x_f=0.15$ 、ねりあめでは、 $k=1, b=700, x_f=20$ とした。感応テストは5段階評価で行った。

4・2 実験結果

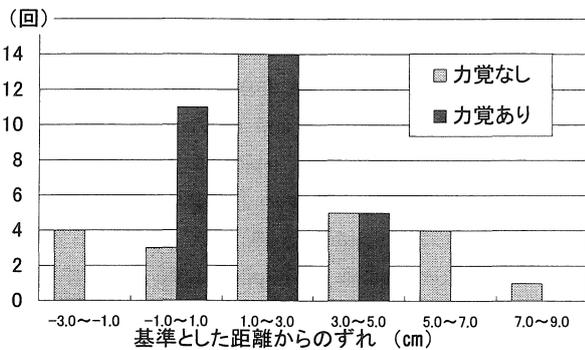


図 4.3 実験1の結果

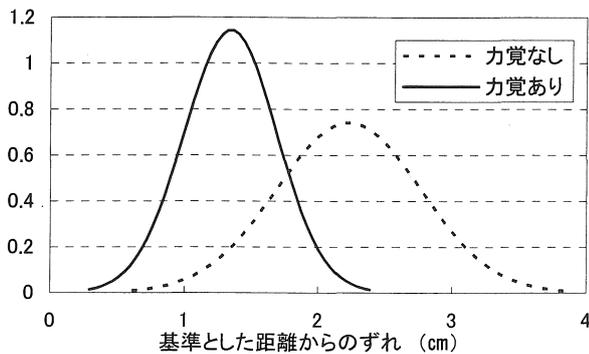


図 4.4 実験1の分布図

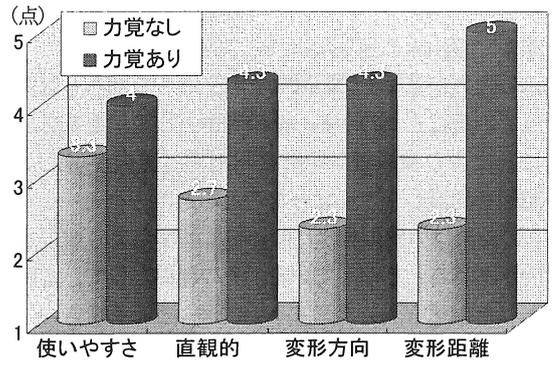


図 4.5 サンプル1の感応テストによる評価

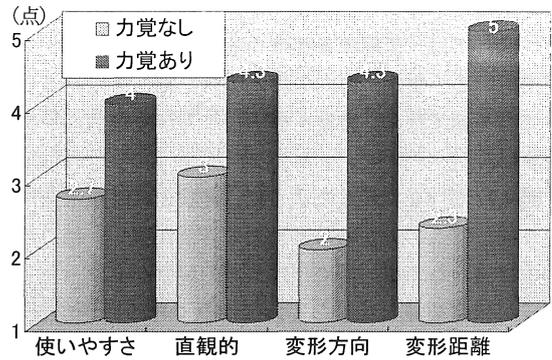


図 4.6 サンプル2の感応テストによる評価

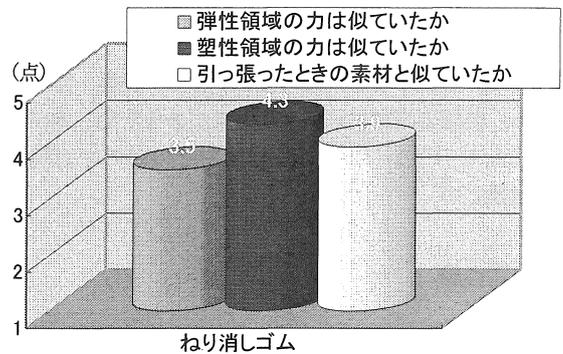


図 4.7 実験3の感応テストによる評価

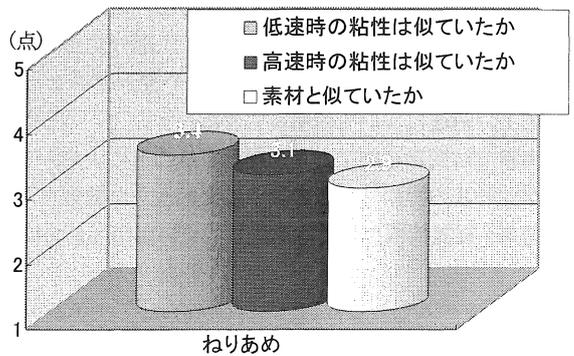


図 4.8 実験3の感応テストによる評価

5. 考察

図 4.3, 図 4.4 に示したように, 実験 1 の結果から力覚を提示した方が基準との距離のずれ, ばらつきともに少なくなっていることがわかる。その理由として, 力覚を提示したことにより被験者が距離を判断する情報が増えたことで距離を認識しやすくなったことがあげられる。また, 実験 1 の結果は力覚の有無に関わらず基準点より遠方を選ぶ傾向があることを示している。その理由として, 本研究で使用した仮想空間を投影する手法は, 画面手前方向に対しての視覚情報を正確に再現することができないことがあげられる。

図 4.5, 図 4.6 に示したように, 実験 2 の結果は全体的に力覚を提示した方が高評価である。特に変形距離の評価項目に関しては, 変形する距離や細かさに関わらず大きな差が出ている。また, 方向の評価項目に関しては始点に向かって力を返すため, 力覚を提示した方が変形方向を認識しやすい。

図 4.7, 図 4.8 に示したように, 実験 3 の結果は全体的にねり消しゴムの方がねりあめより評価が高い。ねり消しゴムの評価としては, 特に塑性領域の評価が高かった。弾性領域が塑性領域と比較して評価が低くなった理由として, ねり消しゴムは温度など様々な要因により, 弾性特性が変化することがあげられる。ねりあめの評価としては, ねり消しゴムと比較して評価が低くなった。その理由として, 粘性係数を高く設定したとき PHANTOM™ のモーターの震動が手に伝わってしまうことがあげられる。

今回の実験で提示した力覚は, 弾性・粘性・塑性のみである。実際の素材には様々な力覚があるため, 本研究で提案したモデリングツールでは素材そのものを表現することは難しい。

6. まとめ

本研究では人間の直観的な操作性を用い, 変形途中に力覚を提示するモデリング方法を提案した。そして, 提案したモデリング方法を実現するために必要なバーチャルリアリティの触覚に関する定義, 利用方法, アルゴリズムを始め, 大まかな変形に使われる FFD と, 部分変形を行うために本研究で提案する領域選択方法や変形アルゴリズムや仕上げ処理について説明してきた。

実験では変形途中に力覚を提示することにより, モデリングツールの操作性がどのように変わったか検証した。その結果, 視覚情報だけでは認識しにくい画面手前方向の変

形距離が力覚を提示することにより認識しやすくなり, より直観的なモデリングが可能になった。また, 変形途中に力覚を返すことにより, 実際の素材に基づいた粘性・塑性を表現することを可能とした。

今後の課題として, 本研究で提示した以外の力覚を提示することで実際の素材の力覚特性を表現することである。また, 本研究では考慮しなかった複数のオブジェクトが存在するときの変形を可能にすることである。

参考文献

- 1) 大山正, 今井省吾, 和気典二. 新編感覚・知覚心理学ハンドブック. 誠信書房, 1994.
- 2) J. D. Cohen, M. C. Lin, D. Manocha, and M. K. Ponamgi. I-COLLIDE: An interactive and exact collision detection system for large-scale environments. In Proc. ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, pages 189–196, 1995.
- 3) M. Lin and S. Gottschalk: Collision Detection between Geometric Models. M. Lin and S. Gottschalk. In the Proceedings of IMA Conference on Mathematics of Surfaces, 1998.
- 4) Stefan Gottschalk: Collision Queries using Oriented Bounding Boxes. Ph.D. Thesis, 1999.
- 5) J.D. Foley, A. Van Dam, S.K. Feiner, J.F. Hughes. Computer Graphics: Principles and Practice. Addison-Wesley, Second edition, 1990, ISBN 0-201-12110-7.
- 6) G van den Bergen. "Efficient Collision Detection of Complex Deformable Models using AABB Trees." Journal of Graphics Tools, 2(4):1-13 (1997).
- 7) S.Gottschalk, M.C.Lin, and D.Manocha. OBBTree: A hierarchical structure for rapid interference detection. In Proc. SIGGRAPH '96, pages 171–180, 1996.
- 8) Zilles, C.B., Salisbury, J.K., "A Constraint - based God-object Method for Haptic Display." ASME Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 1994, Dynamic Systems and Control 1994 (Chicago, Illinois, Nov. 6-11), vol. 1, pp.146-150.
- 9) Thomas W. Sederberg and Scott R. Parry: Free-Form Deformation of Solid Geometric Models, ACM Computer Graphics, Vol.20, No.4, pp.151-160, 1986.
- 10) 和田明宏. 材料力学ハンドブック<基礎編>. 日本機会学会, 1999.
- 11) 南條光章. 化学大辞典 5. 共立出版, 1997.

(受理 平成15年 3月19日)