

サイバー空間における物体の変形と力感覚提示

坂間 裕孝

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

田中 豊

法政大学工学部機械工学科

荒木 孝昌

(株)ソニー・コンピュータエンタテインメント

人工現実感生成技術を応用してシミュレーションやトレーニングなどを行う場合、力感覚や接触感覚などの情報を操作者にフィードバックすることができる触覚ディスプレイと計算機内に構築したサイバー空間における現実感のあるオブジェクトのモデルの2つの要素が不可欠である。また、オブジェクトの変形を表現するためのアルゴリズムに用いられる定数は、表現する物体の性質と密接に関連しているにも関わらず、試行錯誤的に決定しているのが現状である。本研究ではサイバー空間内でオブジェクトの変形を表現するために、感覚提示装置との組み合わせを想定し、リアルタイム処理を重視した、仮想変形オブジェクトモデルを提案するとともに、仮想変形オブジェクトの変形アルゴリズムに用いられる定数を実験的に評価し、その評価結果に基づいて決定した定数を仮想変形オブジェクトモデルに適用し、触覚ディスプレイを用いた提示実験により、その妥当性を検討した。

1. はじめに

近年、計算機内に構築されたサイバー空間を利用してシミュレーションやトレーニングなどを行う試みが増え続けている。中でも手術などの人間による細かな手作業を実現するためには、現実と同じようなサイバー空間への情報伝達が可能であるだけでなく、力感覚や接触感覚などの情報を操作者へフィードバックする触覚ディスプレイとサイバー空間における現実感のあるオブジェクトのモデルの2つの要素が不可欠である^{[3][4][5]}。また、オブジェクトモデルの変形アルゴリズムに用いられている定数は、表現する物体の性質と密接に関連しているにも関わらず、試行錯誤的に決定しているのが現状である^[2]。

本研究では、まずサイバー空間でのオブジェクトの変形を表現するために、バネモデル^[1]を簡略化し、拘束条件を加えることにより、変形に対して体積変動の少ないモデルとしてオブジェクトを表現した仮想変形オブジェクトモデルを提案し、このモデルと触覚ディスプレイを組み合わせることにより、サイバー空間で人間の指先での細かな手作業を実現する基本システムを構築する。次にこの仮想変形オブジェクトモデルの変形アルゴリズムに使用される定数を実験的に評価し、その評価結果に基づいて決定した定数を仮想変形オブジェクトに適用し、触覚ディスプレイを用いた提示実験により、その妥当性を検討する。

2. 仮想変形オブジェクトモデル

2.1 仮想変形オブジェクトの概念

実世界で人間が対象物に触る場合に、人間は力感覚、接触感覚などを受けるだけではなく、対象物に対しても何らかの作用をおよぼすことになる。このためサイバー空間で作成されるオブジェクトも同様に、接触することによって起こるオブジェクトの運動を忠実に再現する必要がある。特に、サイバー空間において柔らかさを感じた

り、造形作業を行うといった場合にはオブジェクトの変形は重要な要素となる。本研究で提案する仮想変形オブジェクトモデルは、オブジェクトの変形現象をシミュレーションし、変形に対して体積変動の少ないオブジェクトの表現をおこなうものである。例えば人間の体などは、その構成要素のほとんどが水分であることを考えると、接触などにもなう変形による体積変動はほとんどない。本研究で提案する仮想変形オブジェクトモデルは、このようなオブジェクトをサイバー空間で表現するのに適したモデルである。

Fig.1 は本研究で提案する仮想変形オブジェクトモデル

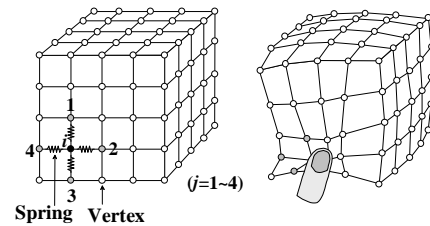


Fig.1 Virtual Deformable Object

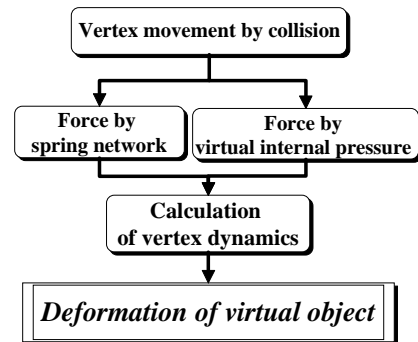


Fig.2 Algorithm of Calculation for Deformation

ルである．この仮想変形オブジェクトはポリゴンモデルであり，オブジェクト表面のポリゴンの頂点にバネネットワークを定義する．またオブジェクト内部の力学的影響はオブジェクトの変形にともなう仮想的な内圧変化を仮定する．このような仮定を設けることにより変形にともなう体積変動の少ないモデルを表現することができる．

Fig.2 にオブジェクトモデルの変形アルゴリズムを示す．オブジェクトの変形アルゴリズムは，まず外部との接触による頂点移動が生じ，次に仮想内圧変化による各頂点に作用する力を求め，さらにバネネットワークによって各頂点に作用する力を求め，その2つの力から各頂点の頂点運動を計算する．最後にこの頂点移動の結果からオブジェクトの変形を求める．すなわちオブジェクト表面のポリゴンの頂点を受ける力は，仮想内圧変化によるオブジェクトの伸縮を考慮したバネネットワークによる力である．

2.2 仮想内圧変化による力

オブジェクトが外部デバイス(指先)と接触状態にあるときのオブジェクト内部が受ける力の大きさ f を，指先とオブジェクトの初期状態時の境界表面との距離 x と，オブジェクトの性質により決まる係数 K を用いて次のように定義する．

$$f = \sum_i Kx_i \quad (1)$$

このオブジェクト内部が受ける力の大きさ f は，オブジェクトと外部デバイスが接触している面積 A_c と仮想内圧変化 p を仮定すると以下の式で表わされる．

$$f = pA_c \quad (2)$$

よってオブジェクトの全表面積を A_0 ，オブジェクト表面の頂点の個数を n_0 ，頂点 i を共有する各ポリゴンの法線ベクトルの合成単位ベクトルを v_n^i とすれば，内圧によりオブジェクト表面の頂点 i が受ける力ベクトル f_p^i は以下の式で表わされる．

$$f_p^i = p \frac{A_0}{n_0} v_n^i \quad (3)$$

2.3 バネネットワークによる力

オブジェクト表面の隣接する頂点どうしは Fig.1 に示すようにバネによって結合されている．接触による頂点移動によって頂点 i が隣接する頂点 j から受ける力 f_k^i は，頂点間のバネ定数 k を用いて以下の式で与えられる．

$$f_k^i = \frac{l_{ij}}{|l_{ij}^0|} k (|l_{ij}| - |l_{ij}^0|) \quad (4)$$

ただし

$$l_{ij} = (w_i + u_i) - (w_j + u_j) \\ l_{ij}^0 = w_i - w_j$$

ここで w_i, w_j は初期状態における頂点 i, j の位置ベクトル， u_i, u_j は頂点 i, j のバネネットワークによる運動ベクトルである．

2.4 オブジェクト表面の頂点運動

各頂点 i に働く力 f^i は，(3)式の仮想内圧変化による力と(4)式のパネによる復元力とを加えた力と以下の式のように与えられる．

$$f^i = f_p^i + f_k^i \quad (5)$$

また加速度 a^i は，以下の式で与えられる．

$$a^i = \frac{f^i}{m} \quad (6)$$

ここで， m は頂点の質量である．

この時の速度 v^i は以下の式で与えられる．

$$v^i = a^i \Delta t + v_0^i \quad (7)$$

さらに次式より， Δt 時間後の頂点の位置が求められる．

$$x^i = v^i \Delta t + x_0^i \quad (8)$$

この計算を計算機の処理速度に依存した時間ステップ Δt ごとに繰り返すことで，全体として自然な変形をシミュレーションすることができる．

3. 触覚提示システム

Fig.3 に触覚提示システムの構成を示す．本システムは触覚ディスプレイである Haptic Master，データの受け渡しを行うパーソナルコンピュータ，作業環境となるサイバー空間を生成したり，サイバー空間で操作デバイス(指先)とオブジェクトとの接触があった場合に，反力の計算を行うグラフィックスワークステーションからなる．

Fig.4 は本研究で使用した触覚ディスプレイ (Haptic Master) である．この触覚ディスプレイは3自由度のブロックが3つ設置されている．反力発生用アクチュエータ(DC モータ)，角度センサはすべて各ブロックの基底部に設置されている．このためブロック先端に余計な重量がかからず，操作性が良い．可動範囲は 40cm 四方を

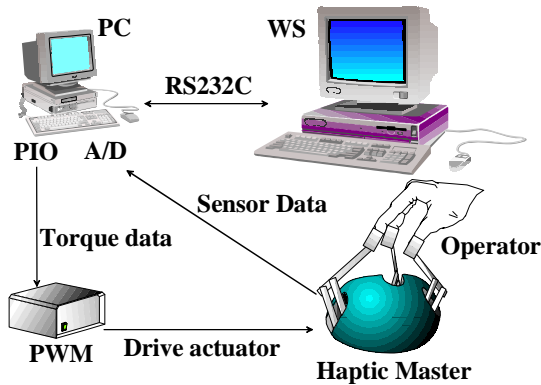


Fig.3 System Configuration

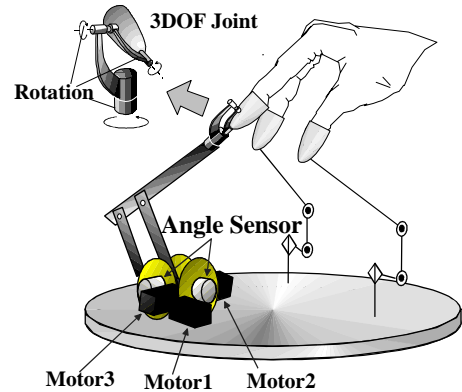


Fig.4 Haptic Master

持ち、比較的広範囲な作業のインターフェイスとして使用することができる。

また、Haptic Master を人間の指先の細かな作業の実現に対応させるために、ブロック先端のジョイント部を新たに作成し、改良を行った。このジョイントはロール、ピッチ、ヨウの3自由度を持ち、各ブロックに6自由度を与えることができる。これによって親指、人差し指、中指の指先3点により、人間が通常行う指先の作業が可能になる。

ワークステーション内のサイバー空間は SENSE8 社のサイバー空間作成用ライブラリである World Tool Kit Release6 を用いてプログラムを記述して作成した。この World Tool Kit はポリゴンの頂点を直接操作することが可能で本研究のオブジェクト作成に適している。

Fig.5 に作成したサイバー空間を示す。サイバー空間内には操作者の親指、人差し指、中指の3本の指先に相当する球状の操作デバイスと立方体のオブジェクトが存在する。

操作者が指を動かし、球状の操作デバイスがオブジェクトに接触すると、オブジェクトは接触状態にみあう変形を行う。操作者は変形にともないサイバー空間から反力の提示を受ける。これにより操作者とサイバー空間内の作業オブジェクトとの間に臨場感のある相互作用が実現できる。

4. オブジェクト定数の評価実験

オブジェクトの性質により決まる(1)式中の仮想内圧変化の定数 K と、(4)式中のパネネットワークの定数 k の値を評価決定するため、定数評価実験を行った。Fig.6 に定数評価実験に用いたシステムを示す。実験システムは、計測データを処理する PC、オブジェクトを押し込む力を測定する力センサ、Haptic Master より構成される。オ

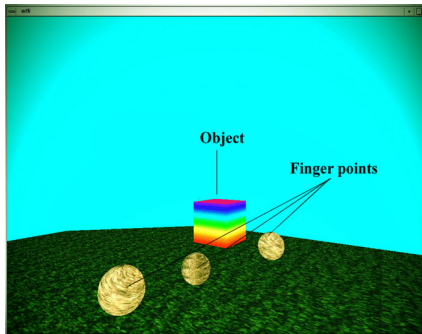


Fig.5 Virtual World

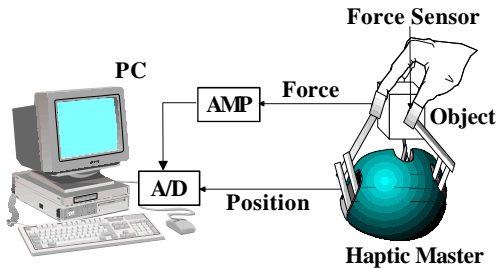


Fig.6 Experimental System for Evaluation of Objective Constant

ブジェクトを押し込む距離は Haptic Master のポテンシオメータにより測定する。力センサは、片持ちはりとしみゲージを用いて自作し、オブジェクトと点接触するように工夫してある。

実験は、Table 1 に示す、大きさと表面の材質および内部物質の異なる3つの立方体(一辺の長さ: l)を力センサを介して指で徐々に押し込んでいき、そのときの押し込まれた距離 x と力 F との関係を測定する。

オブジェクト表面にかかる張力 S と伸び λ は、オブジェクトの表面を単純支持はりのモデルで近似し、はりの中心に力 F を作用させた場合の変形現象と仮定し、以下の2式を用いて算出した。

$$S = \frac{Fx}{2\sqrt{(l/2)^2 + x^2}} \quad (9)$$

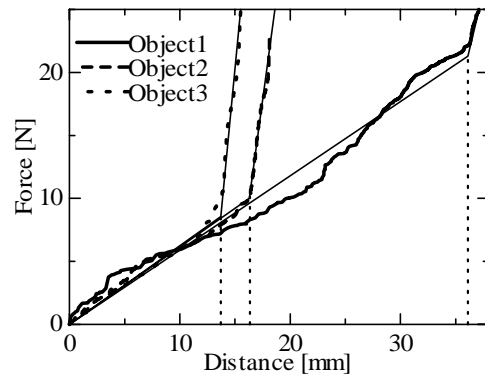
$$\lambda = \frac{Sl}{2AE} \quad (10)$$

Table 1 Real Object for Evaluation

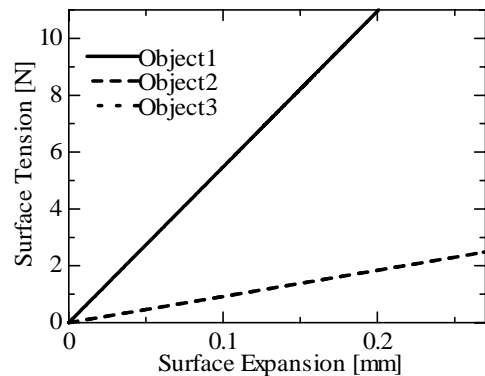
	l [mm]	Material of Surface	Material of inside
Object 1	50	Nylon	Air
Object 2	165	Vinyl	Air
Object 3	165	Vinyl	Water

Table 2 Objective Constants

	K_1 [N/mm]	K_2 [N/mm]	x_0 [mm]	k [N/mm]
Object 1	0.59	2.24	36.3	54.8
Object 2	0.61	7.23	16.3	9.2
Object 3	0.62	9.13	13.7	9.2



(a) Relation between Distance and Force



(b) Relation between Surface Expansion and Surface Tension

Fig.7 Experimental Results for Evaluation

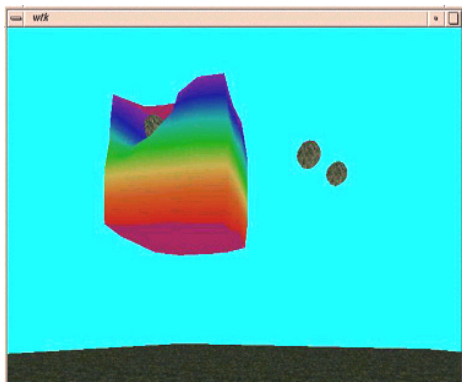


Fig.8 Collision With Deformable Object

ここで、 λ は表面の伸び、 A ははりの断面積、 E は縦弾性係数である。

Fig.7 に評価実験の結果を示す。Fig.7(a)は、オブジェクトを押し込む距離 x と押し込む力 F との関係である。Fig.7(a)の結果より、3つのオブジェクトはいずれも、ある押し込み距離 x_0 を境に異なる変形特性を示している。特に Object 3 では、13.7mm をしきい値に、押し込み距離に対してより大きな力を必要としている。したがって、オブジェクト毎に、押し込み距離に応じて、2つの異なるバネ定数 K_1, K_2 ($K_1 < K_2$) を設定し、仮想変形オブジェクトにおける仮想内圧変化の定数とした。各オブジェクトに対する定数 K_1, K_2 と押し込む距離のしきい値 x_0 を Table 2 に示す。

Fig.7(b)は、式(9)と(10)のモデルを用いて算出されたオブジェクト表面の伸び λ と張力 S との関係である。Fig.7(b)の結果より、3つのオブジェクトとともに、表面の伸びと張力との間の関係は比例関係にあることがわかる。また、表面材質がナイロン製の Object 1の方が剛性が高い。したがって、仮想変形オブジェクトにおけるバネネットワークの定数 k を、各グラフの傾きより求めた。各オブジェクトに対する定数 k の値を、同様に Table 2 に示す。

5. 仮想変形オブジェクトへの適用

Table 2 に示した定数を仮想変形オブジェクトモデルに適用した実験を行った。実験は、3章で説明したシステムを用い、健康な男女8名を被験者とし、それぞれのオブジェクトに対して、Haptic Master を用いて、サイバー空間内のオブジェクトを触ったときと実際のオブジェクトを触ったときとの感覚を比較してもらい、その結果を4段階で評価した。Fig.8 に実験時のサイバー空間の一例を示す。

Fig.9 に実験結果を示す。3つのオブジェクトとも、実際のオブジェクトに触ったときの感覚を完全に表現できていないものの、実物に触れたときに似た感覚を提示できたと考えられる。このことから、定数評価実験により求めたオブジェクト定数を仮想変形オブジェクトに適用することにより、仮想空間内で体積変動が少ないオブジェクトの変形現象を表現できると考えられる。

6. おわりに

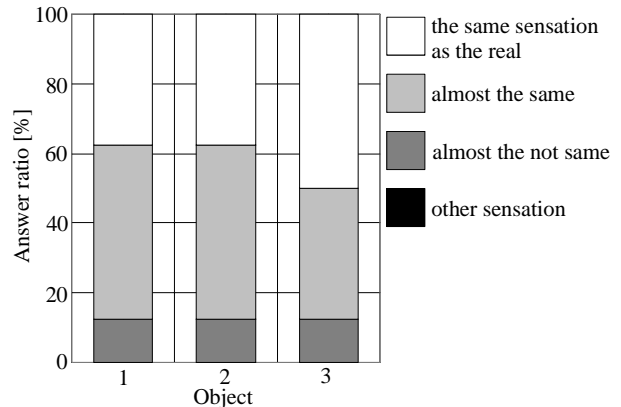


Fig.9 Experimental Results for Haptic Sensation

本研究では仮想空間のオブジェクトの表現手法として仮想変形オブジェクトモデルを提案し、人間の指先での作業が可能な触覚ディスプレイを組み合わせた基本システムを構築するとともに、仮想変形オブジェクトにおける定数を実験的に同定し、その定数を仮想変形オブジェクトに適用し、触覚ディスプレイを用いた提示実験を行い、その妥当性を検討した。その結果、操作者はサイバー空間において、接触によりオブジェクトにおよぼす変形という作用を体感することができた。また、今回行った実験から求めた定数を仮想変形オブジェクトに適用することにより、サイバー空間内で実際のオブジェクトに近い変形を表現できることを確認し、この仮想変形オブジェクトモデルの表現手法は、変形にともなう体積変動が少ないという性質を表現することができることを確認した。

本研究で作成した仮想変形オブジェクトモデル適用アプリケーションは、触覚ディスプレイとは独立して作られているため、多くの種類の触覚ディスプレイに対して、容易に表現手法を適用させることができる。この仮想変形オブジェクトモデルは、その性質を考えるとサイバー空間において人体などの表現に向いているため、手術シミュレーションなどへの適用が考えられる。しかし、現在のところオブジェクトの切断を表現することができない。これは今後の課題となる。

参考文献

- [1] 広田光一, 金子豊久: 仮想物体の弾性モデルに関する検討, 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.3, 232/238, 1998
- [2] 溝渕友樹, 広田光一, 金子豊久: 顔部変形モデルの生成と実測に基づく力覚の再現, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集, 85/88, 1999
- [3] 寛直之: ポリゴンモデルを用いた触覚表現手法, 日本機械学会第75期通常総会講演会資料集(), No.98-1 F19-(2), 1998
- [4] 小木哲朗: 接触世界における物体の変形運動表現, 日本機械学会第75期通常総会講演会資料集(), No98-1, F19-(5), 1998
- [5] 廣瀬通孝, 岩田洋夫, 池井寧, 小木哲朗, 広田光一, 矢野博明, 寛直之: 触覚用共通ソフトウェア(HIP)の開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol.3, No.3, 1998

キーワード.

サイバー空間, 人工現実感, 触覚ディスプレイ, 仮想変形オブジェクト, オブジェクト定数

Summary.

Haptic Rendering for Virtual Object in Cyber Space

Hiroataka Sakama
Graduate School, Hosei University

Yutaka Tanaka
Department of Mechanical Engineering, Hosei University

Takamasa Araki
Sony Computer Entertainment Inc

Recently simulation or training using virtual reality technology has been carried out in engineering fields such as virtual prototyping. In this case, it is more important factor to develop a haptic interface devices with stimulating human's receptor such as reflecting force or touch sensation from cyber space to operators and an object model with calculating dynamic characteristics of a real object in computers. In this paper, a virtual deformable object model with the surface of spring network and the virtual internal pressure has been proposed for cyber space in computer. The virtual deformable object model is combined with the haptic interface device; the Haptic Master, to communicate for operators between cyber space and real space. Objective constants for the virtual deformable object are identified through experiments for measurement of stiffness for the real objects with the modified haptic interface device. The proposed virtual deformable object model with the identified objective constants in cyber space is applied to the haptic interface system and gives good interactions between the operator in real space and cyber space.

Keywords.

Cyber Space, Virtual Reality, Haptic Device, Deformable Object, Objective Constant