

触覚フィードバックデバイスで 仮想レオロジー物体を操作する際の諸問題について

小川 典久[†] 守野 雅也[†] 吉田 晴行^{††} 登尾 啓史[‡]

[†] 大阪電気通信大学大学院学生 ^{††} 大阪電気通信大学工学部 [‡] 大阪電気通信大学総合情報学部

1 はじめに

近年、VR 技術の進歩により、仮想空間内に実在する物体を構築・操作する技術の研究が盛んに行われている。この研究の確立により、その仮想物体の変形過程を見たり、ハプティクスデバイスを介して仮想物体の変形力を体感することが可能となる [1][2]。

しかし、これまでこの研究分野において、剛体や弾性体、塑性体のモデリングは多く行われてきたが、これらの特性を完全に表す物体は実世界には存在せず、弾性と粘性を併せ持った複雑な特性を示すものがほとんどである。そのため現実同様の挙動を示す物体のモデリングには、この複雑な特性を表現しなくてはならない。この複雑な力学挙動を有する物体をレオロジー物体と呼ぶ。レオロジー物体のモデリングは、医療手術や陶芸、食品加工などの幅広い分野に波及すると考えられる。

そこで本研究では、これらレオロジー物体を仮想空間内に構築し、触覚フィードバックデバイス PHANToM で操作する仮想剛体と接触させることにより、仮想レオロジー物体の変形を体感するシミュレータの開発を目指す。その際、仮想剛体からの反力を発生させるアルゴリズムとして、2 種類のペナルティ法について説明し、評価する。

2 仮想レオロジー物体の構築手法

本章では、レオロジー物体の変形をシミュレートするため、仮想レオロジー物体の構築手法について述べる。ここでは、仮想レオロジー物体の変形を高周波で実現するため、比較的計算量の少ないアルゴリズムである力学 3 要素モデル (MSD モデル) について述べる。そして仮想レオロジー物体を 3 次元空間上で構築するため、3 次元格子構造モデルについても述べる。

2.1 力学 3 要素モデル (MSD モデル)

力学 3 要素モデルとは、マス(質量)、バネ(弾性要素)、ダンパ(粘性要素)を用いた力学モデルであり、弾性体や粘弾性体などの変形特性を容易にモデリングすることができる。本研究ではレオロジー物体の特性を表現するために、図 1(a) に示すように、比較的容易に解ける少ない要素数で構成された 3 要素モデルを用いる [1]。このとき、左側のバネとダンパの並列部が戻り変位を表し(フォークト部)、右側が残留変位を表す(独立ダンパ部)。

まず 3 要素モデルが伝播する力を立式する。力学 3 要素モデルのフォークト部の弾性パラメータを K 、粘性パラメータを C_1 、独立ダンパ部の粘性パラメータを C_2 とし、フォークト部と独立ダンパ部の長さをそれぞれ l_{voigt} 、 l_{damper} とする。これらを用い、フォークト部が伝播する力 f_{voigt} と独立ダンパ部が伝播する力 f_{damper} を立式すると、式 (1)、式 (2) を得る。

$$f_{voigt} = -K(l_{voigt} - L) - C_1(\dot{l}_{voigt}) \quad (1)$$

$$f_{damper} = -C_2(\dot{l} - \dot{l}_{voigt}) \quad (2)$$

このとき、式 (1)、式 (2) は等しいと考えられるため、式 (3) が成り立つ。

$$\dot{l}_{voigt} = \frac{-K(l_{voigt} - L) + C_2\dot{l}}{C_1 + C_2} \quad (3)$$

式 (2)、式 (3) により、力学 3 要素モデルが伝播する力を求めることができる。

2.2 構造モデル

仮想空間内で仮想レオロジー物体に現実同様の変形をさせるには、モデルを 3 次元で構築する必要がある。本研究では、仮想レオロジー物体の構築手法として 3 次元格子構造モデルを用いる [2]。

格子構造モデルは、1 次元の力学 3 要素モデルを格子状に結合することで、3 次元の仮想レオロジー物体を構築する(図 1(b))。まず、 x, y, z の各軸方向への分割数を設定し、物体の各軸に等間隔に分割線を配置する。そしてその分割線の交点に質点を配置し、質点を端点とする稜線を各々全ての隣接質点間に配置する。最後にそれら稜線に力学 3 要素モデルを配置することで構成される。

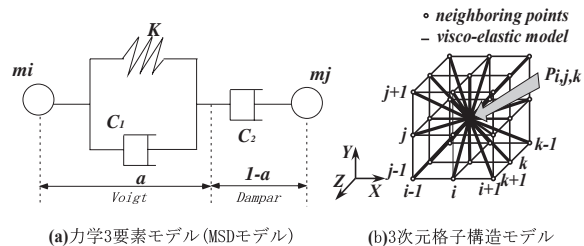


図 1: 仮想レオロジー物体の構築手法

3 外力の計算手法

本システムでは、仮想レオロジー物体に外力を与えることで、レオロジー物体の変形をシミュレートする。物体に外力を与える手法としては、物体同士がめり込んだ量、及び物体同士の相対速度を元に反力を計算するペナルティ法、物体同士が衝突した際の衝突力を計算する撃力法などがある [3]。本システムでは、触覚フィードバックデバイスである PHANToM を用いて仮想剛体を操作するため、仮想剛体の 3 次元位置の変化量を元に外力を発生させる必要がある。そこで本システムでは、物体と仮想剛体のめり込み量、及び物体と仮想剛体の相対速度から反力を求めることのできるペナルティ法を用いる。そしてペナルティ法を用いて求めた反力をより正確に仮想レオロジー物体に与える手法として、双一次補間についても述べる。

3.1 ペナルティ法

ペナルティ法とは、物体同士がめり込んだ量を侵食した部分(ペナルティ量)とし、その量に対して反力(ペナルティ力)を与える手法である。ペナルティ量については、めり込んだ距離、及びめり込んだ体積とする 2 手法が考えられる。めり込み距離を用いた場合、接触状態にある面と仮想剛体の距離を求めるだけでよく、高周波での処理が可能である。しかし、仮想剛体を点として扱う必要があるため、仮想剛体の形状を変更することができないという欠点がある。対してめり込み体積を用いた場合、物体同士の接触している体積を求めるため、より正確なめり込み量の算出が可能になり、かつ仮想剛体の形状を任意に変更することが可能となる。しかし、本システムでは複雑な変形特性をもつレオロジー物体とのめり込み体積を求める必要があるため、処理が非常に複雑になるという欠点もある。本稿ではこの 2 種類のペナルティ法について述べる。

ペナルティ法は、2 つの接触する物体間に力学フォークトモデルを配置し、物体同士のめり込み量、及び相対速度に応じて反力を発生させる手法である(図 2(a))。

次にペナルティ法によって発生させる反力を立式する。物体間に

配置するフォークモデルの弾性パラメータを λ , 粘性パラメータを μ , めり込み量を p , 相対速度を v とすると, ペナルティ力 $F_{penalty}$ は式 (4) で求められる.

$$F_{penalty} = \lambda p + \mu v \quad (4)$$

3.2 双一次補間

仮想レオロジー物体に外力を加える際, 図 2(b) のように, 質点ではなく面に接触する場合がほとんどである. そのため, 面に接触した場合には, その面を構成する質点全てに対して外力を分配する必要がある. しかしそれらの質点全てにかかる外力は, 面のどの部分に接触したかによって変化させる必要がある.

そこで本稿では, 外力の分割手法として双一次補間を用いる. 双一次補間は, 図 2(b) のように, 接触した位置をもとに面を 4 分割し, その面積比によって外力を分割し, その面を構成する質点に各々の外力を加える手法である.

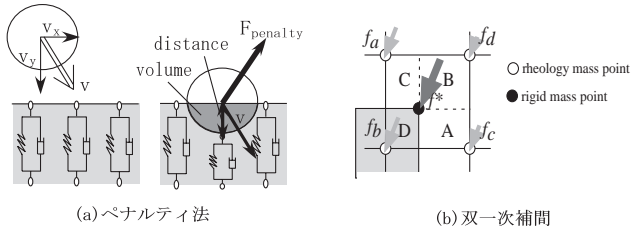


図 2: 外力の計算手法

4 実物体の変形実験

本研究では, 現実の世界での変形実験を行うことで, 第 2 章, 及び第 3 章で示した手法により構築した仮想レオロジー物体の変形との比較を行う. 本章では, 実レオロジー物体の定義および変形実験に関して述べる.

4.1 実レオロジー物体

実レオロジー物体として本研究では, 小麦粉と水を 2 : 1 の割合で混ぜ合わせた物体を採用した. この物体を $10.0[cm] \times 5.0[cm] \times 7.0[cm]$ に成型し ($510[g]$), 変形実験を行う.

4.2 変形実験

実際の変形実験として, 前節で定義した実レオロジー物体をロボット・マニピレータと移動台の先端に取り付けた剛体によって正確に変形させる (図 3(a)). 加重実験では, $5.0[cm] \times 7.0[cm]$ の両面を $2.0[cm/sec]$ の速度で水平に $1.0[sec]$ 間加重し, その状態を $2.0[sec]$ 保持し, そして除重する. これらをそれぞれ加重期, 保持期, 除重期とする.

そしてそのときの, 変形実験時のロボット・マニピレータと移動台の剛体にかかる反力を計測する方法として, 6 軸力覚センサ (ニッタ (株) 社製) を使用する. このセンサは, x, y, z 軸の 3 軸の力成分と各軸周りのモーメント成分をリアルタイムで計測できる. 計測は実験開始時から除重前までの間を対象とする.

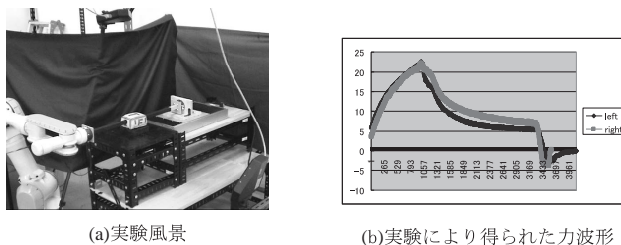


図 3: 実レオロジー物体の変形実験

5 パラメータ同定

仮想レオロジー物体の変形, 及び力覚提示をより現実のものに近づけるためには, 実験データとの比較を行う必要がある. そこで本章では, 実験データを元にパラメータ同定を行う手法について述べる.

5.1 波形の分割

本稿では, 得られた波形 (図 3(b)) を加重期, 保持期, 除重期に分割して, それぞれの特徴を元にパラメータ同定を行う. まず加重期は, レオロジー物体に対して剛体から外力を加えているため, 仮想剛体が仮想レオロジー物体に外力を与えている部分と考えることができる. そのため, 加重期でペナルティ法の係数 λ , 及び μ についてパラメータ同定を行う. 次に保持期の力波形は, 剛体を停止させているため, レオロジー物体の復元力のみを表していると考えられる. そのため, 保持期では仮想レオロジー物体を表現する力学 3 要素モデルの係数 $K, C1, C2$, 及び M についてパラメータ同定を行う. 除重期の波形については用いないものとする.

6 結果

本章では, 第 3 章で述べた 2 種類のペナルティ法についての評価を行う. なお, 距離によるペナルティ法では仮想剛体として点を, 体積によるペナルティ法では仮想剛体として, 実験時に使用した形状 (底面が $1[cm] \cdot 1[cm]$ の四角柱) を用いた. 今回使用した PC は Pentium4 2.2[GHz], メモリ 2.0[GHz] で, 各ペナルティ法の計算を 3000 回行ったものについて, 150 回の平均をとった. 力波形の精度, 及び処理時間の評価を図 4, 及び表 1 に示す.

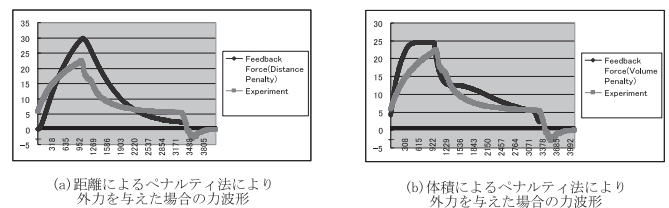


図 4: 実験, 及びシミュレータの力波形比較

表 1: 距離ペナルティ法と体積ペナルティ法の比較

	距離ペナルティ法	体積ペナルティ法
平均力誤差	4.21[N]	3.18[N]
平均処理時間	3.7[nsec]	34.3[nsec]

表 1 より, 体積によるペナルティ法は, 距離によるペナルティ法に比べ約 9 倍の処理時間が必要となるが, 力波形の精度は 25% 向上した.

7 終わりに

本報告では, まずレオロジー物体の特性を表現するために力学 3 要素モデルについて説明した. そして, レオロジー物体を仮想空間上に構築するために 3 次元格子構造モデルについて説明した. 次に, 仮想レオロジー物体と仮想剛体の接触により発生する外力を計算する手法として, 距離によるペナルティ法, 及び体積によるペナルティ法を説明し, それらを仮想物体に正確に与えるために双一次補間を説明した. そしてペナルティ法 2 手法について力波形の精度, 及び処理時間の面から比較した. その結果, 体積によるペナルティ法は, 距離によるペナルティ法よりも約 9 倍の処理時間を要するが, 力波形の精度は 25% の向上を見せた.

これらを踏まえ, 今後の課題としては, まず体積によるペナルティ法の処理時間の短縮が挙げられる. かつ, 今回は仮想剛体として四角柱でのみ評価を行ったが, その他の形状, 例として球などでも評価を行う必要があると考えられる.

参考文献

- [1] 徳本真一, 平井慎一, "形状制御のためのレオロジー物体の変形モデリング", 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.8, pp.87-94, 2001
- [2] R.Nogami, H.Noborio, S.Tomokuni and S.Hirai, "A comparative study of rheology MSD models whose structures are lattice and truss", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3809-3816, 2004
- [3] A. Joukhadar, A. Deguet, C. Laugier, "A Collision Model for Rigid and Deformable Bodies" Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 4, pp.982-988, 1998