

K-031

# テクスチャによる擬似凹凸を用いた 仮想レオロジー物体の力覚モデリング

## Haptic Rheological Simulation using Pseudo-Roughness of Texture

山岡 正和<sup>†</sup>  
Masakazu Yamaoka

井門俊<sup>†</sup>  
Shun Ido

### 1 まえがき

現実世界に存在する物体のほとんどは変形するため、シミュレーションにおいて変形する物体である柔軟体を扱えるようにすることで、医療における臓器や食品加工におけるゼリーなどの様々な分野において、現実の資源を使うことなく何度もシミュレーションによりテストすることができるようになる。柔軟体を応力とひずみの関係から分類した場合、弾性体、塑性体、レオロジー物体の3種類に分類することができる。図1に柔軟体の種類を示す。

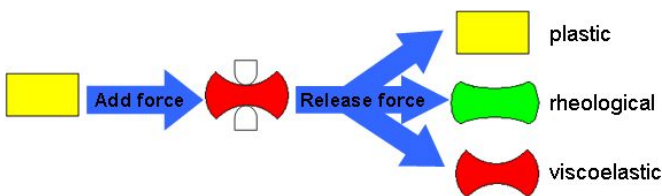


図1 物体変形

それぞれの物質に外力を加えた後に、外力を解放したときの特徴について説明すると、弾性体は外力を解放すると外力を加える前の形状に完全に戻り、塑性体は外力を解放しても変形した形状は全く元には戻らない。そして、レオロジー物体は弾性体と塑性体の両方の性質を持っているため、変形した形状がある程度は戻るが完全には戻らない。それゆえに、レオロジー物体を表現することにより、臓器やゼリーなどのほとんどの物質を表現することができるようになる [1]。しかし、単一のバネやダンパだけでレオロジー物体の変形を表現することは難しい。そこで、複数のバネモデルとダンパモデルを組み合わせた力学モデルにより、レオロジー物体の変形を表現する。例えば、三要素モデルはレオロジー物体を表現できる力学モデルの中でも、必要なバネダンパの数が最も少なく単純なモデルである。三要素モデルの研究例として、Zhongkui Wang により2次元のFEモデルによる変形と力の測定が行われている [2]。その他の研究例として、Ryo Nogami が実験データから基本要素のバネとダンパの係数をランダムイズドアルゴリズムで同定することで、MSD法の力伝播や形状変化の精度がよくないという問題点を克服している [3]。しかし、これらの研究では力が加えられたときのレオロジー物体の正確な変形などを扱ってはいるものの、物体表面の凹凸などの情報を、より細かく実時間で取得する方法を扱っていない。

<sup>†</sup>愛媛大学大学院理工学研究科

物体表面の凹凸の細かさは、物体を分割したときの面の大きさによって決まってしまう。また、物体をより細かくすると、シミュレーションの精度は向上するが、計算の速度は落ちてしまう。そのため、高速な処理が必要な力覚提示において、詳細な物体表面の凹凸を表現することは難しい。この問題を解決した研究として、脇田により凹凸の情報を格納したテクスチャを物体表面に張り付けることで、より細かい物体表面の情報を力覚提示可能な速度で取得している [4]。しかし、この研究では物体のモデリングのみを扱っており、物体のシミュレーションを行っていない。

そこで本研究では、レオロジー物体表面に凹凸に関する情報を持ったテクスチャを貼り付けることで、レオロジー物体表面のより詳細な凹凸を実時間で力覚提示できるシミュレーションシステムを構築する。本研究の目的として、人間本来の感覚である力覚を表現し、バーチャル空間のレオロジー物体と、より現実に近いインタラクションを可能にすることで、現実世界に近い優れた操作性を持つバーチャル空間を実現する。

### 2 レオロジー物体の構築

#### 2.1 四面体格子モデル

本研究ではレオロジー物体を構成するモデルとして四面体格子モデルを採用する。四面体格子モデルとは、物体を有限個の立方体格子の集合として表現し、その立方体格子の一つ一つを5つの四面体格子で構成するモデルのことである。また、立方体格子の各頂点には質点を配置し、それらの質点により質量などの管理や衝突判定などを行っており、各質点間に張られた辺はレオロジー物体の変形を表現するための三要素モデルで表現されている。図2に四面体格子モデルで表現されたレオロジー物体を示す。

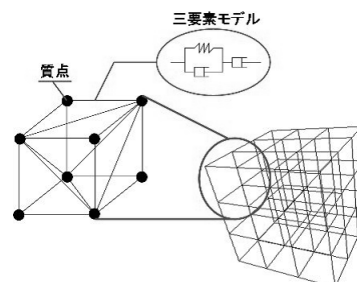


図2 四面体格子モデル

## 2.2 三要素モデル

図3に示す三要素モデルは、加えられた力により変形した形状がある程度元に戻るレオロジー物体を表現できる力学モデルであり、他のレオロジー物体を表現できる力学モデルと比べて自身を構成するバネとダンパの数が最も少ない。

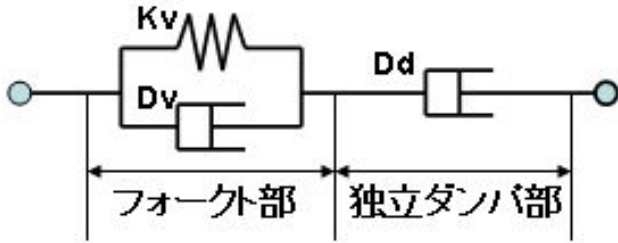


図3 三要素モデル

三要素モデルによって発生する力は以下の式により計算できる。なお以下の式において、各パラメータは、 $k_v$  がフォーク部弾性係数、 $c_v$  がフォーク部粘性係数、 $c_d$  が独立ダンパ部粘性係数、 $L$  がフォーク部の自然長、 $a$  がフォーク部の比率、 $X$  が三要素モデルの長さ、 $dX$  が質点の速度差、 $e1$  が1つの質点からもう1つの質点への向きの単位ベクトル、 $e2$  が速度の単位ベクトル、 $F$  が三要素モデルによって発生する力を示している。

$$da = \frac{-K_v(aX - L) - dX(D_v a - D_d(1 - a))}{X(D_v + D_d)}$$

$$f1 = K_v(a * X - L)e1$$

$$f2 = D_v(da * X * e1 + a * dX * e2)$$

$$F = f1 + f2 (f1 < f2 \text{ なら } F = 0)$$

## 2.3 形状の維持

現実のレオロジー物体には外力が加わったときの体積の変化が小さいという性質がある。また、シミュレーションにおいてレオロジー物体が大きな外力を受けても破断しないことは、正常なシミュレーションを続けるために重要なこととなってくる。しかし、三要素モデルによるトラス構造のみで構築したレオロジー物体は、外力を加えて変形させると体積が大きく変化し破断しやすい。そこで、バネモデルによりレオロジー物体の面積や体積を維持する必要がある。なお、体積の変化が小さいという性質を表現するために、体積だけでなく面積も維持しているのは、面積を維持することで体積も、より維持しやすくなるからである。図4に本研究で形状を維持するための計算を施した要素を示す。

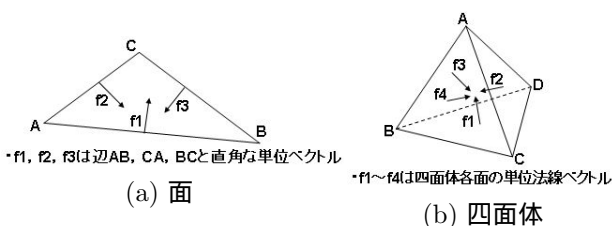


図4 形状を維持する要素

以下にレオロジー物体の面の面積を維持するための式を示す。なお、 $k$  は弾性係数、 $Area(t)$  は現在の面の面積、 $area_{init}$  はシミュレーション開始時の面の面積、 $f1 \sim f3$  は各辺と直角な単位ベクトル(ベクトルは三角形の面に沿っている)、 $FA \sim FC$  は図4(a)の質点A~Cに加わる面積を維持するための力であり、 $f_{abs}$  は数値を絶対値にする関数である。

$$FA = \left( \frac{k * (Area(t) - area_{init})}{f_{abs}(area_{init})} \right) * \left( f1 - \frac{f2 + f3}{2} \right)$$

$$FB = \left( \frac{k * (Area(t) - area_{init})}{f_{abs}(area_{init})} \right) * \left( f2 - \frac{f3 + f1}{2} \right)$$

$$FC = \left( \frac{k * (Area(t) - area_{init})}{f_{abs}(area_{init})} \right) * \left( f3 - \frac{f1 + f2}{2} \right)$$

上記の計算式を適用しているのはレオロジー物体表面に存在する面のみであり、計算結果によって得られる力の合計は0になるため、面積の維持によって作用反作用の法則は破らることがない。

レオロジー物体の体積を維持するためには、レオロジー物体を構成する各四面体の体積を計算する必要がある。以下の式により四面体の体積を求めることができる。なお以下の式において、 $ABCD$  は図4(b)で示す四面体の頂点の位置を表している。

$$\text{四面体の体積} = \frac{(A - D) \cdot ((B - D) \times (C - D))}{6}$$

上記の式により得られる四面体の体積は正だけでなく負になる場合もある。ただし、レオロジー物体の初期形状における体積の符号は正と負のどちらでもよく、以下の式によりレオロジー物体の体積を維持するための力を計算することができる。なお、 $V$  は現在の体積、 $V_{init}$  はシミュレーション開始時の体積、 $f1 \sim f4$  は図4(b)で示す四面体の各面の単位法線ベクトル、 $FA \sim FD$  は質点A~Dに加わる体積効果によって発生した力である。

$$FA = \frac{k(V - V_{init})}{f_{abs}(V_{init})} * \left( f1 - \frac{f2 + f3 + f4}{3} \right)$$

$$FB = \frac{k(V - V_{init})}{f_{abs}(V_{init})} * \left( f2 - \frac{f1 + f3 + f4}{3} \right)$$

$$FC = \frac{k(V - V_{init})}{f_{abs}(V_{init})} * \left( f3 - \frac{f1 + f2 + f4}{3} \right)$$

$$FD = \frac{k(V - V_{init})}{f_{abs}(V_{init})} * \left( f4 - \frac{f1 + f2 + f3}{3} \right)$$

体積を維持するための力は、表面の面にしか適用しなかった面積を維持する力と異なり、レオロジー物体を構成する全ての四面体に適用する。

## 3 力覚提示装置

本研究では力覚を発生させるために、力覚提示装置としてSPIDARとFalconという2種類の力覚提示装置を採用している。図5に力覚提示装置SPIDARとFalconを示す。



(a) SPIDAR



(b) Falcon

図5 力覚提示装置

SPIDAR-G は東京工業大学精密工学研究所の佐藤誠研究室で開発された力覚提示装置であり、8本のワイヤと8個のモータにより、グリップの位置と姿勢を検出することで移動・回転の6自由度の操作と力覚提示ができる[5]。Falcon は Novint Technologies が開発・販売している力覚提示装置であり、3つのアームによりグリップの位置を検出することにより、移動の3自由度の操作と力覚提示ができる[6]。

#### 4 テクスチャによる凹凸

通常レオロジー物体の表面の凹凸を表現しようとした場合、レオロジー物体の質点を増やして面を細かく分割せねばならないが、質点の増加により計算量が増えてしまい、実時間によるインタラクションをするのは難しい。そこで、テクスチャからパラメータを取得することで、質点数を増やすことなくテクスチャサイズに応じて面の凹凸を表現できる。図6にテクスチャによる凹凸の仕組みを示す。

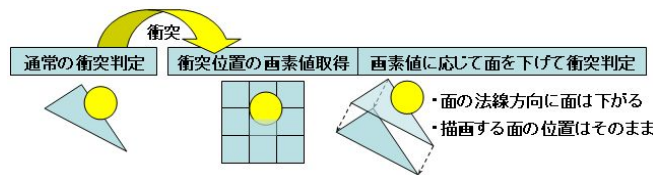


図6 テクスチャによる凹凸の仕組み

テクスチャの凹凸を実現するためには高さマップと法線マップという2種類のテクスチャが必要となる。図7に高さマップと法線マップの例を示す。

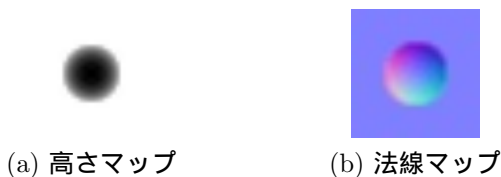


図7 凹凸表現に必要なテクスチャ

高さマップとはレオロジー物体表面の高さを表現したテクスチャのことである。高さマップの画素値にはレオロジー物体の面の高さを下げる量が格納されており、以下の式で計算した値の面の高さ分をレオロジー物体の面から下げる。なお以下の式において、 $x$  は高さマップから取得した画素値を示している。

$$\text{面の高さを下げる距離} = (255 - x) / 255$$

上記の式では面を下げる範囲は0~1となっている。高さマップだけで表現したテクスチャによる凹凸には問題点がある。それは高さマップだけでは面の法線まで表現していないために、力覚ポインタが衝突している画素と

は別の画素に触れた瞬間に動作がなめらかでなくなるという問題である。そこで、法線マップにより画素を移動した時の力覚をなめらかにする。

一方、法線マップとはレオロジー物体表面の傾きを表現したテクスチャである。法線マップの画素値 RGB には、それぞれレオロジー物体表面の XYZ 軸方向における法線の値が格納されている。法線マップから得た法線を使用するためには、物体が衝突した面とそのテクスチャから接空間を求めなければならない。接空間とは法線マップを貼り付けた面の空間(座標系)のことである。レオロジー物体を構成する三角形の面に貼り付けたテクスチャは三角形の形状に応じて図8のように方向が異なるため、テクスチャ空間の座標系を三角形の面が属するローカル座標系に合わせて法線マップの法線を使う必要がある。

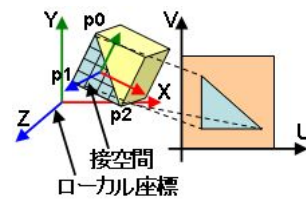


図8 接空間

テクスチャ空間の座標系を UV 座標系としたときの接空間を求める式を以下に示す。なお以下の式において、 $p_0, p_1, p_2$  はレオロジー物体表面を構成する面の頂点の位置であり、 $u_0 \sim u_2, v_0 \sim v_2$  はそれぞれ  $p_0, p_1, p_2$  の UV 空間における座標であり、 $T, B, N$  はそれぞれ接空間の XYZ 軸を示している。

$$\begin{aligned} P &= p_1 - p_0 & Q &= p_2 - p_0 \\ s_1 &= u_1 - u_0 & t_1 &= v_1 - v_0 \\ s_2 &= u_2 - u_0 & t_2 &= v_2 - v_0 \\ T &= \frac{t_2 P - t_1 Q}{s_1 t_2 - s_2 t_1} & B &= \frac{-s_2 P + s_1 Q}{s_1 t_2 - s_2 t_1} \\ N &= Q \times P \text{ (面の法線)} \end{aligned}$$

求めた TBN の行列を以下の式で用いることにより、法線マップに合わせた法線を得ることができる。なお以下の式において  $n_{texture}$  は、計算によって得られた衝突判定で使う法線であり、 $n_{surface}$  は、三角形の面の法線である。

$$n_{texture} = n_{surface} \begin{pmatrix} T \\ B \\ N \end{pmatrix}$$

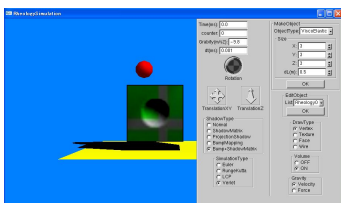
法線マップによる回転の中心位置は、力覚ポインタとレオロジー物体の面との衝突点となっている。回転の中心を衝突点としている理由は、回転の中心位置によって力覚ポインタと回転後の面との衝突判定の結果が異なってしまう、衝突しているのに衝突していないこととなる可能性があるからである。

5 シミュレーション実験

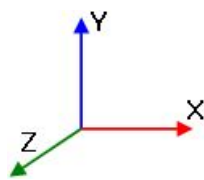
テクスチャによる凹凸がシミュレーションに与える影響を確認するために、同じシミュレーション環境で、テクスチャによる凹凸を有効にした場合と無効にした場合それぞれどのような違いが生じるかを確認した。シミュレーションの内容は球をレオロジー物体に自由落下させるものであり、球がシミュレーション開始から1000ステップまでの間にどのように移動するかを測定する。また、球が最初にレオロジー物体と衝突する部分は、法線マップの勾配が比較的大きい部分となっている。図9にシミュレーション開始時の初期状態を示す。また、実験で使用したテクスチャとして図7のテクスチャを使用した。なお、シミュレーションにおけるレオロジー物体のパラメータは表1で示すものになっており、表1以外のパラメータとして、シミュレーション開始時におけるレオロジー物体の底辺から床までの距離は0.5mであり、高さ値は最大値が0.3mで、最低値が0mとなっている。

表1 シミュレーション実験におけるパラメータ

パラメータ	レオロジー物体	球
半径	なし	0.5m
質量	100.0kg	1.0kg
初期の中心位置	(-1,0,0)	(-1.7,2.5,0.0)
1辺当たりの質点数	6個	なし
初期の質点間最短距離	0.6m	なし
フォークト部弾性係数	1000	なし
フォークト部粘性係数	0.8	なし
独立ダンパ部粘性係数	100000	なし
形状維持の弾性係数	100	なし



(a) シミュレーション画面



(b) (a)の座標系

図9 シミュレーションの様子

シミュレーションの結果得られた球のXY軸における動作が図10であり、図10で赤のグラフがテクスチャによる凹凸を無効にした場合を、緑のグラフがテクスチャによる凹凸を有効にした場合を示している。また、縦軸がY座標を、横軸がX座標を示している。

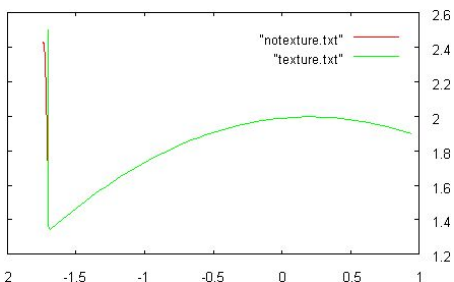


図10 衝突における球の動作

図10より、レオロジー物体と衝突した球はテクスチャによる凹凸を無効にしている場合(図10赤色の線)は上に跳ね上がるのに対して、テクスチャによる凹凸を有効にしている場合は(図10緑色の線)テクスチャの勾配に応じて横に移動している。このことから、テクスチャにより凹凸を発生させることができているといえる。

6 おわりに

レオロジー物体シミュレーションにテクスチャを組み合わせることで、テクスチャ表面の詳細な凹凸を表現することができた。また、バンプマッピングにより擬似的な凹凸を描画することで、テクスチャ表面のどの部分に凹凸が存在するかを認識しやすくなった。

今後の課題として、直方体以外の形状のレオロジー物体シミュレーションを行うことにより、医療分野における臓器や、食品加工における様々な形状の加工食品などを扱えるようにしていく予定である。また、レオロジー物体の倒壊や切断を実装することにより、より現実に近いシミュレーションを行えるようにしていく予定である。

参考文献

- [1] Masafumi Kimura, Yuuta Sugiyama, Seiji Tomokuni, and Shinichi Hirai, Constructing Rheologically Deformable Virtual Objects, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3737-3743, Taipei, September, 2003.
- [2] Zhongkui Wang, Kazuki Namima, and Shinichi Hirai, Physical Parameter Identification of Rheological Object Based on Measurement of Deformation and Force, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1238-1243, Kobe, May 12-17, 2009.
- [3] Ryo Nogami, Fumiaki Ujibe, Hiroki Fujii and Hiroshi Noborio, "Precise Deformation of Rheologic Object under MSD Models with Many Voxels and Calibrating Parameters," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1919-1926, 2004.
- [4] Wataru Wakita, Kenji Murakami, and Shun Ido, "A Texture-Based Haptic Model Design with 3D Brush," Proceedings of 18th International Conference on Artificial Reality and Telexistence(ICAT2008), pp.51-56, Yokohama, Japan, Dec. 2008.
- [5] Makoto Sato, "Development of String-based Force Display: SPIDAR", VSMM2002(The Eighth International Conference on Virtual Systems and Multi Media), pp.1034-1039, 2002 9
- [6] Novint Technologies. <http://www.novint.com/>