

仮想レオロジー物体のモデリングとそのパラメータ同定に関する研究

村田 康幸[†] 登尾 啓史[†]

[†]大阪電気通信大学大学院 工学研究科 情報工学専攻

1 はじめに

近年、仮想空間上で物体を構築して、体感や操作する研究が盛んに行われている。この手法は、物体のシミュレータと、ハプティクスデバイス(触覚フィードバック装置)を組み合わせることにより、粘土細工や食品加工などを行うことできる。しかし、剛体や粘弾性体について、この手法は多く提案されているが、レオロジー物体についてはあまりされていない。レオロジー物体とは、粘性と弾性の両方の性質を有する物体である。加重すると変形して、除重すると徐々に元に戻ろうとする(戻り変位)が、完全に戻らない(残留変位)特徴があり、粘土や食品などが例として挙げられる。本研究では、仮想空間上に3要素のMSDモデルと格子構造モデルを用いて、仮想レオロジー物体を表現する。次に、レオロジー物体の特徴を表現するために、MSDモデルを形成するパラメータ(未知係数)を遺伝的アルゴリズムで同定する。最後に、2種類の外力を用いて仮想物体を変形し、力誤差による評価を行うことを目的とする。

2 MSDモデル

MSDモデルの基本要素として、弾性要素と粘性要素があり、これらを組み合わせてレオロジー物体の特徴を表す。本研究では、図1(a)に示す3要素を基本要素として扱う。左側のフォークト部を形成する弾性要素を K 、粘性要素を C_1 とする。この部分は、戻り変位を制御する役割を担う。右側のダンパ部を形成する C_2 は、残留変位を制御する。また、フォークト部とダンパ部の長さの比率を $a:1-a$ 、質点 P_i, P_j の質量を M とする。

3 格子構造モデル

MSDモデルは、変形の特徴のみを表現できるだけで、3次元での物体の変形を表現することができない。そこで、MSDモデルを組み込んだ3次元格子構造モデルを用いて、レオロジー物体の変形を表現させる[1]。格子構造モデルとは、X,Y,Z軸に沿って、等間隔に質点を配置する。基本要素は、全ての隣接する質点間に配置される。

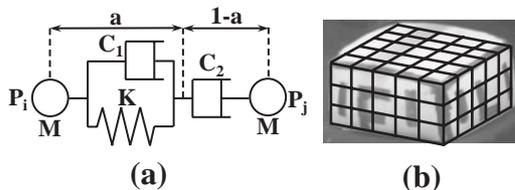


図1: (a) 基本要素 (b) 格子構造モデル

4 凝着力の生成

レオロジー物体には、他の物体と接触した場合に凝着する特徴がある。そこで本研究では、接触している物体同士の間で発生する凝着力を計算する手法を提案する。図2(a)より、質点 R が稜線 Q から離れる方向と逆方向に凝着力が発生し、剛体と干渉する方向に質点 R の力が働く場合は、凝着力が発生しない。また、相対速度が閾値を超えた場合も、凝着力は発生しない(式1)。ここで、係数 P は物体同士が離れる時の相対速度を表す。ここで、 L_r はフォークトモデルの長さ、 V_r は相対速度、 V_t は相対速度の閾値とする。

$$F_c = \begin{cases} K_r L_r + C_r V_r & (-V_t < V_r < 0) \\ 0 & (0 \leq V_r \text{ or } V_r \leq -V_t) \end{cases} \quad (1)$$

5 摩擦力の生成

剛体とレオロジー物体が接触した場合、摩擦力が生じる。摩擦力は、アモントン・クーロンの法則に従って、静止摩擦力和動摩擦力を計算して求める(式2)。静止摩擦力で対象の物体が移動するかどうか判定して、レオロジー物体の質点にかかる摩擦力を計算する(図2(b))。ここで、 F_f はレオロジー物体の質点にかかる摩擦力、動摩擦係数を μ_k 、静止摩擦係数を μ_s 、実験台からの垂直抗力を F_d 、レオロジー物体の質点の内力を F_i とする。

$$F_f = \begin{cases} \mu_k F_d & (\mu_s F_d < F_i) \\ F_i & (\mu_s F_d \geq F_i) \end{cases} \quad (2)$$

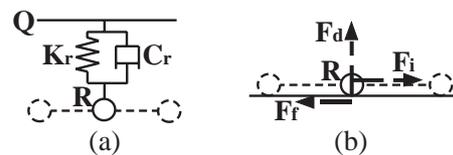


図2: (a) 凝着力 (b) 摩擦力

6 実物体と仮想物体の比較

6.1 実物体の計測

本研究では、実験対象として小麦粉と水を混ぜたレオロジー物体を使用し、 $10 \times 5 \times 7$ [cm]の大きさにした。この実物体を、ロボットアームの先端と移動台に取り付けた剛体で左右から挟むように変形させた(図3(a))。変形させる際に、ロボットアームと移動台にかかる反力を計測する方法として、6軸力覚センサ(ニッタ株式会社)を使用した。このセンサは、各軸方向の力3成分、各軸まわりのモーメント3成分をリアルタイムで計測することができる。

6.2 仮想物体との比較

仮想物体は、実物体と同じ大きさである、 $10 \times 5 \times 7$ [cm]で構成する。仮想物体から剛体にかかる反力を、左右の剛体と接触する質点での、内力の合計としている。剛体が、レオロジー物体を押し切った後(t_0)から静止し

Deformation of Rheologic MSD Models Calibrated and Evaluated by External Forces

Yasuyuki Murata[†], Hiroshi Noborio[†]

[†]Graduate School of Engineering, Osaka Electro-Communication University

ている間 (t_n) の時間で, 1 サンプルタイムごとの反力の誤差を計算する. そして, 誤差の絶対値の合計を力誤差 (S_{force}) として比較する (図 3(b)). ここで, 実物体の反力を f_a , 仮想物体の反力を f_b , サンプルタイムごとの刻みを t_x と置いた場合, $t_0 \sim t_n$ までの反力の誤差による合計 S_{force} は式 3 になる.

$$S_{force} = \sum |f_a(t) - f_b(t)| \quad (3)$$

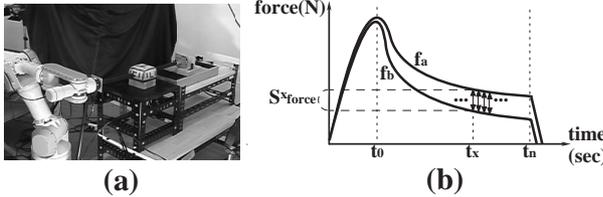


図 3: (a) 計測実験風景 (b) 力による比較

7 外力の導入

実物体では, 剛体を使用して押すことにより変形する. しかし, 仮想物体では外力を使用しなければ, 変形することはできない. そこで, 本研究では 2 種類の外力を用いて, 仮想物体の変形を行う.

7.1 変位による外力

変位による外力とは, 剛体の移動に合わせて, 仮想物体の質点を移動させる手法である. この手法では, 質点の速度を剛体の速度に置き換えることにより, 剛体が移動した距離だけ質点を移動させることができる. 図 4(a) より, 剛体の速度 I_v と先端の座標 I_c のとき, 質点 H の速度と座標は, それぞれ $H_v = I_v$, $H_c = I_c$ となる. この手法により, 仮想物体と実物体で押す深さとあわせることができる.

7.2 計測値による外力

6.1 で実物体を力覚センサで計測した際の, 反力を仮想物体に加える手法について説明する. 図 4(b) より, 力覚センサで力を計測した場合, F_b の値を計測する. F_b は作用・反作用の法則により, 逆方向の力 F_r と同じ大きさ ($F_b = -F_r$) と考えられるので, 外力として扱うことができる. 最後に, 各サンプルタイムの反力を, 仮想物体で剛体に接触している質点群に外力を振り分ける.

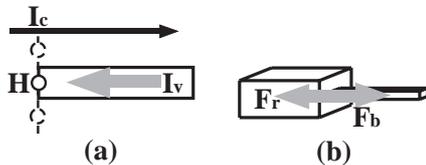


図 4: (a) 剛体に接触する箇所の断面 (b) 力の作用・反作用

8 比較実験

MSD モデルと摩擦力, 凝着力について, 遺伝的アルゴリズムを用いてパラメータの同定を行った [2]. 遺伝的アルゴリズムとは, ダーウィンの進化論に基づいて最適解を求める手法である. 求めたパラメータを用いて, レオロジー物体を変形させたときの力の変化を比較した. 実験環境として, CPU:Pentium4 3GHz, メモリ:2GB の PC を使用し, グラフィックスライブラリとして OpenGL を使用する.

仮想空間では, 時間微分のサンプルタイムを $2.0[\text{msec}]$ として, 実物体の計測と同じ $3[\text{sec}]$ 間でレオロジー物体を 1500 回変形させる.

8.1 実験結果

今回の実験では, 図 5 に示す押し方でレオロジー物体を変形させた. また, この実験結果は, S_{force} のパラメータ同定を行った時の, S_{force} 評価を載せている.

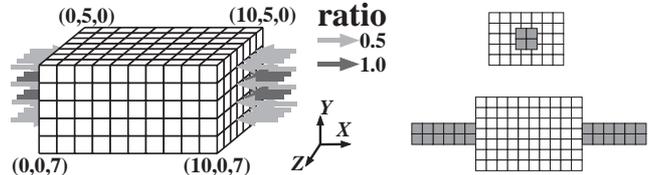


図 5: 押し方

変位による外力で押した場合の評価結果を図 6(a)(b), 計測値による外力で押した場合の評価結果を, 図 6(c)(d) に示す.

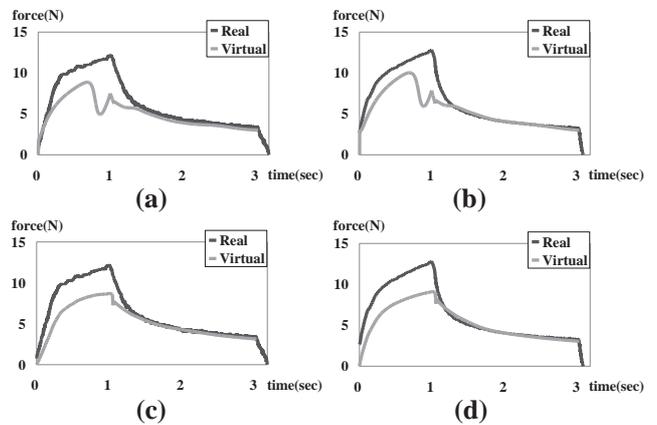


図 6: 変位による外力で押した場合のロボットアーム (a) と移動台 (b), 計測値による外力で押した場合のロボットアーム (c) と移動台 (d)

9 おわりに

今回, MSD モデルと 3 次元格子構造モデルを用いて, 仮想物体を構築し, 凝着力や摩擦力を適用させた. さらに, 2 種類の外力を用いて, 仮想物体の変形を行った. そして, 力覚センサを用いて, 実物体の反力を計測し, 仮想物体のパラメータ同定と評価を行った. 実験の結果, 両手法とも実物体の反力に近い波形が表れ, 本研究の手法に対して有効であることがわかった. 実物体との反力の差は, 変位による外力の場合は $735.94[\text{N}]$, 計測値による外力の場合は $494.36[\text{N}]$ となった.

今後の課題として, 形状での評価を行うことが挙げられる. リアルタイムでの 3 次元情報を計測するカメラを用いて計測し, 仮想物体の変形形状を比較する.

References

- [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] 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.