

仮想レオロジー物体における接触のモデリング

杉山 勇太, 木村 政文, 友國 誠至, 平井 慎一
立命館大学ロボティクス学科

Modeling of Contact among Virtual Rheological Objects

Yuuta SUGIYAMA, Masafumi KIMURA, Seiji TOMOKUNI, and Shinichi HIRAI
Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.

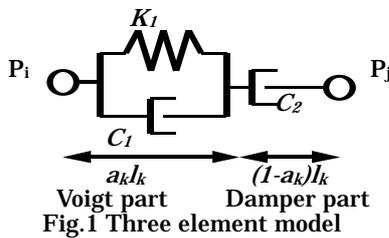
Abstract : In this paper, we will present a technique of modeling contact among virtual rheological objects. A collision of virtual rheological objects, which are modeled as a lattice structure model, is expressed using artificial forces between the edges and the nodes. We will develop the time-integrated penalty method, where an artificial force involves a time-integral term.

1. はじめに

食品や生体組織など、レオロジー的変形特性を有する物体に関しては、仮想物体を構築する手法が確立していない。レオロジー物体とは、戻り変位と残留変位を有する柔軟物である。著者らは、レオロジー物体をモデリングする手法を提案した[1][2]。さらに、物体同士の衝突や摩擦をモデリングする必要がある。衝突を表現する手法として、侵入量に比例した力を発生させるペナルティ法がある[3][4]。ペナルティ法は1回ステップあたりの計算量が少なく、並列リアルタイム計算に向いている。しかしペナルティ法では、物体がめり込んでいるように見える場合がある。本研究ではペナルティ法に侵入量の時間積分によって発生する力を追加した手法を提案する。

2. レオロジー要素

Fig.1に示す3要素モデルが、レオロジー物体の変形特性のモデリングに適している。要素の両端を P_i と P_j とする。フォークト部のバネ係数を K_1 、ダンパー係数を C_1 、フォークト部と直列に配置されたダンパーのダンパー係数を C_2 とする。稜線の長さを l_k 、稜線を分割する比率を a_k とすると、フォークト部の長さは $a_k l_k$ となる。このレオロジー要素を格子状に配置することによってレオロジー物体をモデリングする。



3. 接触のモデリング

3.1 提案するペナルティ法による衝突

Fig.2(a)に示す物体Aと物体Bの衝突を、局所的な稜線と頂点の関係に基づいて表現するとFig.2(b)になる。ペナルティ法では干渉が生じた時に、干渉を解消する人工力を発生させる。稜線Qと頂点Rの垂直方向の長さを L 、垂直方向の相対速度を V とする。従来のペナルティ法では、 L の値を負とし、頂点Rに与える人工力 F_c は、

$$F_c = -K_c L - C_c V \quad (1)$$

と表される。ここで、 K_c はバネ係数、 C_c はダンパー係数を表す。従来のペナルティ法では、重力や電磁気力等の物体力 F_g により干渉が生じた場合、干渉は完全には解消されない。例えば、物体を床に置いた場合に、物体が床にのめりこんだままとなる。この場合は、重力と釣り合うための人工力 F_c を発生させるために、侵入量 L が必要だからである。

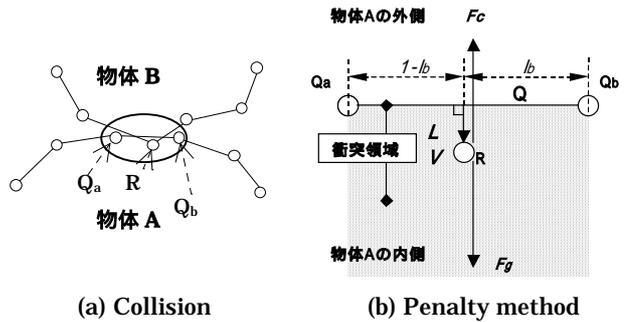


Fig.2 Collision between node and edge

そこで、時間が経つにつれて理想的な状態である、頂点が稜線上にある状態に近づくために、ペナルティ法に侵入量の時間積分の項を加える。以下この手法をペナルティ時間積分法と呼ぶ。Fig.3に示すペナルティ時間積分法での人工力 F_{co} は、

$$F_{co} = -K_c L - C_c V - I_c \int_{t_0}^{t_1} L dt \quad (2)$$

と表される。ここで、 I_c は積分係数、 t_0 は衝突判定領域に侵入した時間、 t_1 は現在の時間とする。

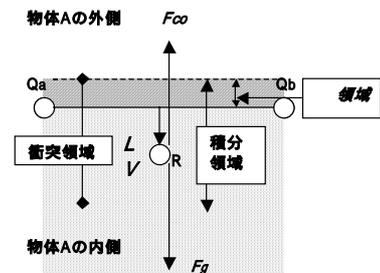


Fig.3 Time-integrated penalty method

時間積分の値は、衝突判定領域から離れると、初期値0に戻るものとする。離散的な計算では、稜線上での人工力 F_{co}

と物体力 F_g は必ずしも等しくならなく, $F_{co}>F_g$ の場合では頂点は稜線の外側へ離れてしまう. そうなると, 時間積分の値が初期値に戻ってしまうため, 頂点Rは振動的な挙動を示す. そこで, 衝突判定領域を微小な長さ だけ稜線の外側に設け, その間に頂点がある場合でも時間積分をそのまま続けるようにする. その領域を 領域とする. これにより頂点Rは稜線近傍に収束する.

3.2 安定性の向上

Fig.4は物体の鋭角な部分に頂点Pが稜線Mから, 物体内に入った場合であり, 稜線M,Nからの侵入量を L_m, L_n とすると,

$$-L_m < -L_n \quad (3)$$

となる. このような干渉を(2)式のバネ力の項のみで表すと, 頂点Pに稜線M, Nより発生する人工力 F_m, F_n は,

$$\begin{aligned} F_m &= -K_c L_m \\ F_n &= -K_c L_n \end{aligned} \quad (4)$$

となる. この時, それぞれのバネ係数は,

$$\frac{F_m}{-L_m} = \frac{F_n}{-L_n} = K_c \quad (5)$$

となる. ここで, 頂点Pはなるべく稜線M側より出ようにしたい. そこで, (2)式より導かれる, 頂点と稜線の間が発生する人工力 F_{co} に, 定常的な力 K_c を加える. 新たな人工力 F_c は,

$$F_c = F_{co} + K_c \quad (6)$$

となる. (5)式のようにバネ係数を算出すると,

$$K_c + \frac{K_c}{-L_m} = \frac{F_m}{-L_m} > \frac{F_n}{-L_n} = K_c + \frac{K_c}{-L_n} \quad (7)$$

となる. これは, 侵入量 L が短いほど, みかけのバネ係数が大きいことを示している. よって, 頂点Pは稜線M側より出やすくなる. (6)式をペナルティ時間積分法の形で表すと, 人工力 F_d は,

$$F_c = -K_c(L -) - C_c V - I_c \int_{t_0}^{t_1} L dt \quad (8)$$

ただし,

$$\int_{t_0}^{t_1} L dt \leq 0$$

となる. つまり, 領域の始めをバネの初期位置とする. (8)式により, 頂点は, 物体力 $F_g \geq K_c$ の時には $L=0$ に収束し, $F_g < K_c$ の時には 領域内で収まる.

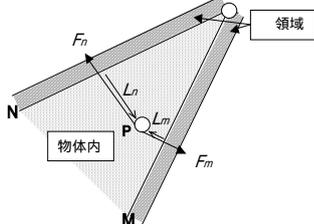


Fig.4 Collision with acute region of object

3.3 力の分配法

稜線を構成する頂点には, 衝突によって発生する力の反作用を与える必要がある. Fig.2(b)に示すように, 稜線を構成する頂点を Q_a, Q_b とし, 頂点Rの稜線 $Q_a Q_b$ への足が稜線を内分する比を $(1-l_b):l_b$ とする. この時, Q_a, Q_b に作用する力 F_{ac}, F_{bc} は,

$$\begin{aligned} F_{ac} &= -l_b F_c \\ F_{bc} &= -(1-l_b) F_c \end{aligned} \quad (9)$$

となる.

3.4 摩擦力

衝突により発生する力 F_c を垂直抗力とみなすことにより, クーロン・アモントン則により, 摩擦力を表現できる.

4. 実験

従来のペナルティ法と, ペナルティ時間積分法を用いた場合による物体の位置比較を行う. 床の高さを0として物体を床の上に置いた場合の物体の位置を示す.

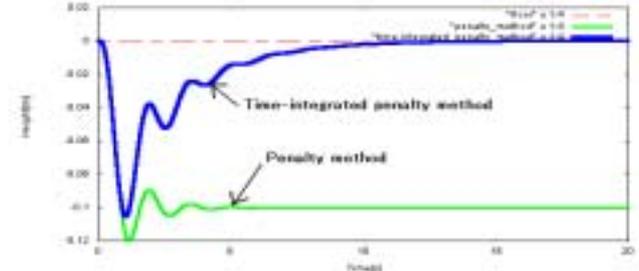
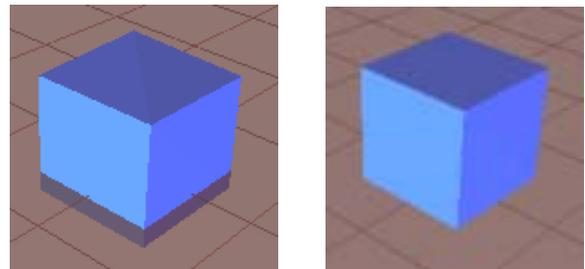


Fig.5 Height of object



(a) Penalty method (b) Time-integrated penalty method

Fig.6 Height of object in 3D space

Fig.5のように, 従来のペナルティ法では物体が床に侵入した状態が続くが, ペナルティ時間積分法では最終的には高さ0の位置になる. Fig.6 はペナルティ時間積分法を3次元に応用した結果である. 3次元では面と点, 稜線と稜線の関係に基づいてペナルティ時間積分法を適用すれば, 2次元と同様の結果が得られる.

5. まとめ

ペナルティ時間積分法を用いると, 物体が侵入しつづけることなく, 稜線上で釣り合うことを示した. 今後, 実物体の接触から, ペナルティ時間積分法のバネ係数, ダンパー係数, 積分係数を同定する手法を確立する.

参考文献

- [1] 徳本, 平井, 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.1141-1148, 2000
- [2] 木村, 杉山, 友國, 平井, 仮想レオロジー物体の変形シミュレーション, 日本バーチャリアリティ学会第7回大会論文集, pp.183-186, 2002
- [3] Terzopoulos.D, Platt.J, Barr.A, and Fleisher.K, *Elastically Deformable Models*, Computer Graphics, Vol.21, No.4, pp.205-214, 1987
- [4] Moore.M, Wilhelms.J, *Collision Detection and Response for Computer Animation*, Computer Graphics, Vol.22, No.4, pp.289-298, August 1988