

柔らかい物体の仮想破壊

日大生産工(学部) ○小林 輝

日大生産工 吉田 典正

1. はじめに

現実の世界には弾性や塑性の性質をもつ物体が多く存在するが、パンやゼリー、生体組織などの弾性領域が広く、形状が変化しやすい柔らかい物体も存在する。これらの物体を仮想的に構築・破壊することによって、食品加工や手術といった様々な分野のシミュレーションに応用できると考えられる[1].

本研究では、柔らかい物体を対象とし、質点・バネモデルを用いて弾性のみを考慮して破壊現象を表現する。物体は四面体により構成され、実装のしやすさを考慮し、バネを切断するのではなく、質点を分割することにより破壊を行う手法を提案する。

2. 破壊対象のモデリング

本研究では、柔らかい物体を質点・バネモデルを用いて構築する。まず、対象物体を複数の立方体で構成されるように質点を配置し、質点の間を稜線で結ぶ(図1 (a))。また、それぞれの立方体は、5つの四面体で表現される(図1 (b))。その後、四面体の個々の稜線に対し、バネとダンパ(図1 (c))を重複しないように配置する。このようにして構築した物体(図1 (d))を用いてシミュレーションを行う。

図1 (d)において、質点 i に生じる応力 f_i は、粘性抵抗 c_i を用いて、次式で表される[2].

$$f_i = m_i \frac{dv_i}{dt} + c_i v_i \quad (1)$$

$$c_i = 2\sqrt{km_i\alpha^2} \quad (2)$$

ここで t は時間、 m_i は質点 i の質量、 v_i は質

点 i の速度ベクトル、 k はバネ係数、 α は粘性抵抗係数である。

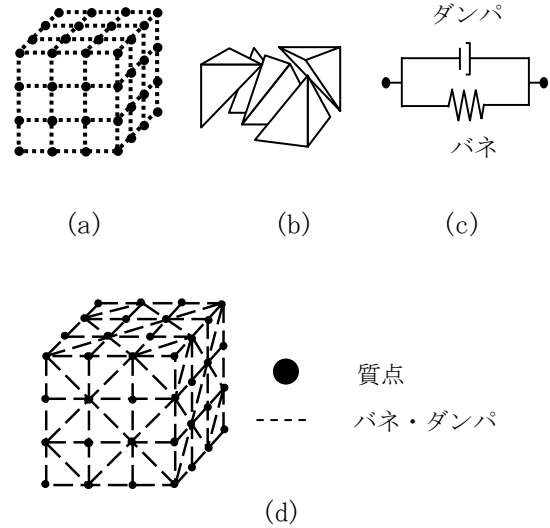


図1 破壊対象のモデリング

式(1)を変形することにより、質点 i の速度ベクトル v_i 、位置ベクトル x_i を次式で求めることができる。

$$v_i = v'_i + \left(v'_i - \frac{f_i}{c_i} \right) \left\{ \exp\left(-\frac{c_i}{m_i} \Delta t \right) - 1 \right\} \quad (3)$$

$$x_i = x'_i - \frac{m_i}{c_i} \left(v'_i - \frac{f_i}{c_i} \right) \left\{ \exp\left(-\frac{c_i}{m_i} \Delta t \right) - 1 \right\} + \frac{f_i}{c_i} \Delta t \quad (4)$$

ここで v'_i は t 秒前の速度ベクトル、 x'_i は t 秒前の位置ベクトルである。また、応力 f_i は質点 i にバネによって接続された質点 j からバネの

張力によって受ける応力の総和であることから、次式で表される。

$$f_i = -\sum_j k_{ij} \frac{x_i - x_j}{|x_i - x_j|} (|x_i - x_j| - l_{0ij}) \quad (5)$$

ここで k_{ij} は質点 i j 間のバネ係数、 l_{0ij} はバネの自然長である。

3. 破壊対象の変形

破壊対象を変形する場合、まず破壊対象を構成する質点と球体との衝突判定を行う。球体の領域内に質点が進出した場合は、質点を球体の領域外に移動させることにより破壊対象を変形する(図2)。

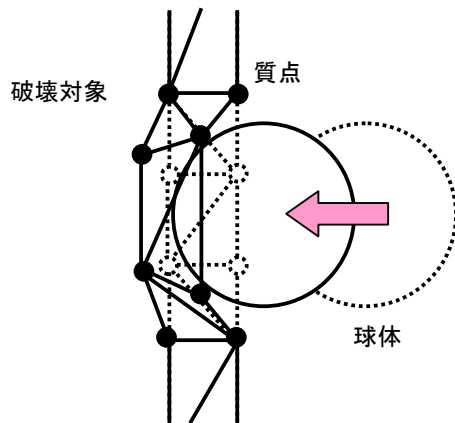


図2 破壊対象の変形

4. 四面体の形状保持

2節で述べた方法で物体を構築し変形した場合、四面体が反転してしまうことがある(図3(a))。反転してしまった四面体は、本来の形状に戻ろうとする力が逆方向に働き、反転した状態で安定してしまい本来の形状に戻ることができない。そこで本研究では、擬似的な力 f_a を特定の質点に加え四面体が反転しないようにする[3]。

面 abc と、その面に含まれない四面体上の質点 p との距離を d とし、距離 d がある一定の

長さ以下になったとき、擬似的な力 f_a を質点 p に対して発生することにより四面体の反転を防止する(図3(b))。

$$f_a = \begin{cases} 0 & (d > d_0) \\ -n * f_{a0} & (d \leq d_0) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 f_{a0} は擬似的な力の比、 d_0 は擬似的な力を発生させる質点 p と面 abc の距離、 n は面 abc の法線ベクトルである。

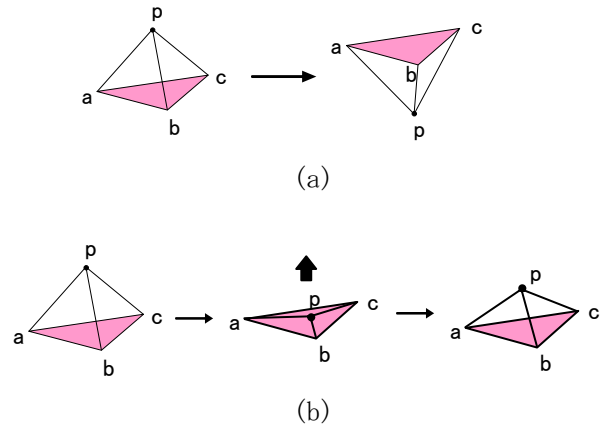


図3 四面体の形状保持

5. 破壊現象の表現

本研究では、バネに式(7)を用いて限界長 l_{max} を設定する。

$$l_{max} = l \times l_p \quad (7)$$

ここで l は現在のバネの長さ、 l_p は限界長比と

し、バネの長さが $l > l_{max}$ の場合は3節で述べた方法で対象の質点を移動させる。また、 $l \leq l_{max}$ の場合はバネにより接続されている両端の質点 i に生じる応力 f_i を比較し、応力の大きい質点と応力・速度・位置が等しい質点を生成する。そして、この生成した質点に接続するバネ・ダンパも生成した後、対象となっているバネに接続するすべての四面体の質点のうち、分裂させた質点に接続するバネを生成した質点に接続関係を変更する。このときバネに接続している四面体数が「0」になった場合は、その

バネ・ダンパを削除する(図4).

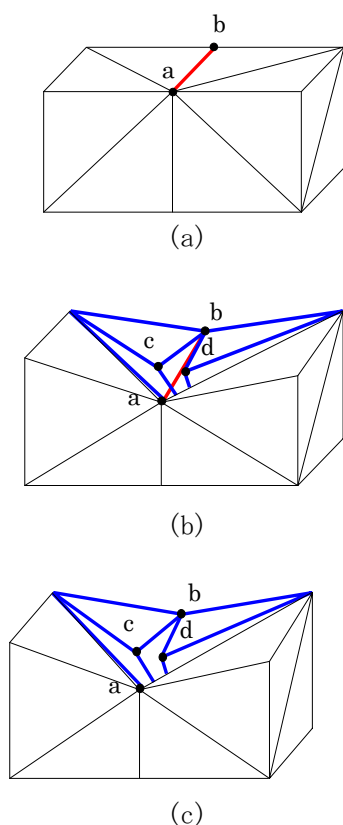


図4 破壊現象の表現

6. シミュレーション結果

シミュレーションでは破壊対象のパラメータを表1に示す数値に設定し、Pentium(R)4 CPU 3.20GHz, Memory1.00GB RAM、Windows XP Professional Version 2002 を使用することで対話的にシミュレーションできた。シミュレーション結果を図5に示す。また、本研究では球体による破壊以外にも、球体時と同様のパラメータで円柱を用いた破壊のシミュレーションを行った。その結果を図6に示す。

7. まとめ

本研究では、柔らかい物体を質点・バネモデルを用いて、バネを切断するのではなく、新たに質点を生成しバネを張り替える方法を用いることで、より簡単に破壊現象を表現できると考えシミュレーションを行った。その結果、本研究で使用した方法でもある程度、破壊現象を

表現できることが確認できた。

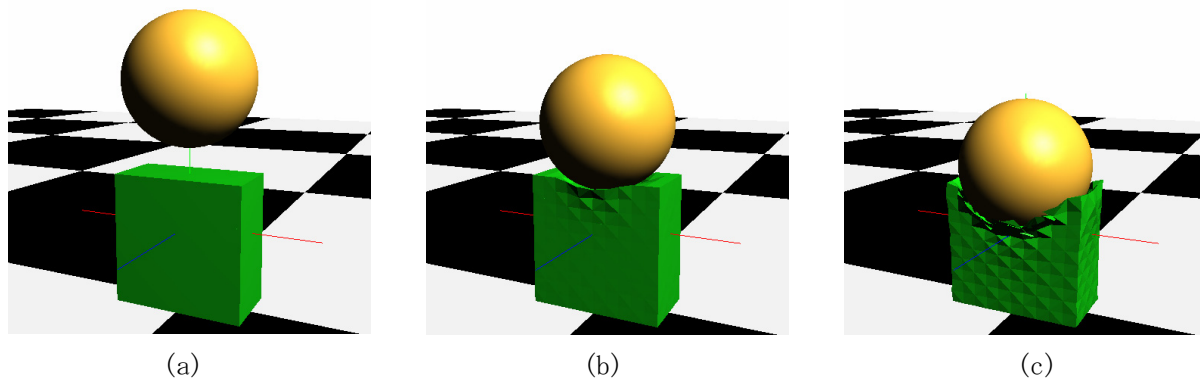
今後の課題として、物体を四面体に分割後、四面体は球体との干渉以外の干渉を行っていないので、四面体どうしが重なり体積が変化しているように見えるため、分割後の四面体どうしの干渉を行う。また、初期物体の四面体以上の分割が行えないため、現実の破壊に近づけるには四面体をあらかじめ細かくしておく必要があるが、細かくすることにより計算時間が多くなりシミュレーション速度に影響が出るため、プログラムの効率化を図る必要がある。その他に本研究では弾性しか考慮していないため、今後塑性に関しても考慮する必要がある。

参考文献

- [1] 友國誠至, 杉山勇太, 平井慎一, 実時間計算可能な名仮想レオロジー物体の構築, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol. 8, No. 3, pp. 247-254, 2003.
- [2] 宮崎徹, 金子豊久, 栗山繁, 力覚提示を伴う 3次元物体の仮想破壊, 情報処理学会研究報告 No. 116, pp. 57-62, 2005.
- [3] 鎌田崇廣, フイン クアン ヴィエト, 植田直樹, 田中弘美, アダプティブメッシュを用いた柔軟物体の変形・切断シミュレーション構築, Visual Computing グラフィクスとCAD 合同シンポジウム pp. 209-214, 2005.

表1 破壊対象のパラメータ

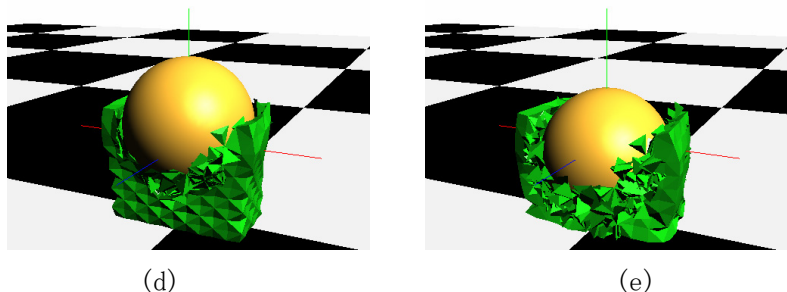
パラメータ	数値
質点数(初期状態)	726
バネ数(初期状態)	3625
四面体数	625
質点の質量	0.01
粘性抵抗係数	10.0
バネ係数	30.0
バネ限界長比	1.3
Δt	0.01



(a)

(b)

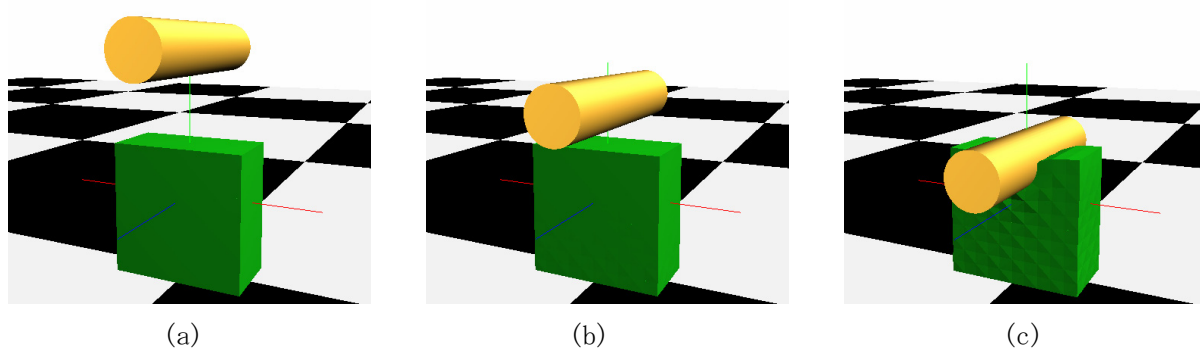
(c)



(d)

(e)

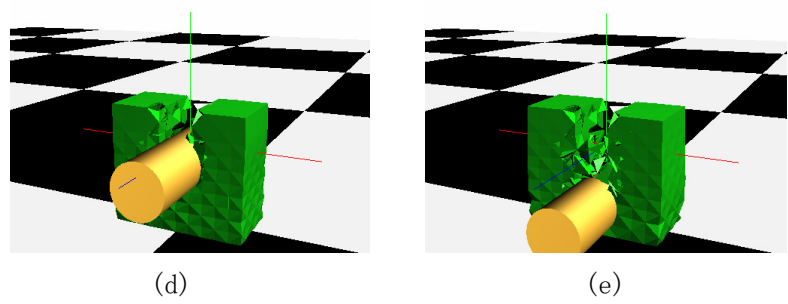
図5. シミュレーション結果(球体)



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

図6. シミュレーション結果(円柱)