

粘弾性体モデルで表現した仮想物体の構築と加工

学生員 本 間 達
正 員 若 松 秀 俊
正 員 張 曉 林

電 気 学 会 論 文 誌 C
(電子・情報・システム部門誌)

平 成 11 年 12 月 号 抜 刷

Trans. IEE of Japan, Vol. 119-C, No. 12, Dec., 1999

粘弾性体モデルで表現した仮想物体の構築と加工

学生員 本 間 達 (東京医科歯科大)

正 員 若 松 秀 俊 (東京医科歯科大)

正 員 張 曉 林 (東京医科歯科大)

Mechanics and Manipulation of Virtual Objects Represented by Viscoelastic Model

Satoru Honma, Student Member, Hidetoshi Wakamatsu, Member, Xiaolin Zhang, Member (Tokyo Medical and Dental University)

It is necessary to describe the mechanical characteristics of materials by appropriate mathematical models as a basic technique for the manipulation of their corresponding virtual objects. In this study, virtual objects are assumed to consist of combinations of tetra-polyhedron viscoelastic elements. Their dynamic characteristics is given by the calculation of their discrete-time models. Then, a sheet-like virtual object with given physical properties is theoretically cut by scissors. The resistance force to the grips of the scissors on their cutting of synthesized material is confirmed similar to the actual resistance force on the cutting of its corresponding actual material.

キーワード：粘弾性体モデル，仮想物体，ハサミ，切離抵抗感

1. はじめに

バーチャルリアリティー技術の方法として力覚をフィードバックする種々のフォースディスプレイシステムの開発^{(1)~(11)}が試みられている。そこではデバイスに対する動作入力とデバイスからの力覚のフィードバックの間の因果関係が適切に表現できる仮想世界の記述と仮想物体の構築が不可欠である。仮想物体を物理的性質を含めて表現する方法として、これまでに有限要素法やバネモデル法などが提案されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。ところで、フォースディスプレイシステムを用いてこれらの仮想物体に対する操作による連続的変形や破壊を伴う不連続変形を表現する場合、リアルタイムで表現できることが不可欠である。しかしながら、従来から提案されている手法では仮想物体の形状の変化に応じた運動方程式の再構成が必要であり、デバイスからの入力に対応したリアルタイムでの表現が困難である。

本研究では、フォースディスプレイシステムの操作により変化する仮想物体の形状を高速に表現する手法の基礎を確立する。更に、その仮想物体に物性値を仮定した仮想物体をハサミで切断した場合に現れる抵抗力の発生の機序について検討する。

2. 被切離仮想物体の記述

〈2・1〉 仮想物体のモデル化 本研究では被切離仮想物体を粘弾性体モデルで表現し、ワイヤフレームモデルを

用いてリアルタイムで表示する。そのために仮想物体を無数の質点とそれらを接続する微小粘弾性体の集合として構築する。ここでは、塑性については考慮しないものとする。

粘弾性体のモデルは通常、粘性を表す減衰素子と弾性を表すバネ素子の組み合わせとして表現される。その力学モデルとして代表的なものに粘弾性固体を表す Voigt model (Kelvin-Voigt model) と粘弾性流体を表す Maxwell model がある⁽¹⁴⁾。本研究ではハサミ型デバイスによって切断される仮想物体の表現を前提としているので、粘弾性固体についてのみ考える。ところで、減衰素子とバネ素子を組み合わせた2要素モデルでは、実際の粘弾性体を十分に近似し得ないことが示唆されている⁽¹⁴⁾。しかしながら、これらを多数結合することによって、多要素モデル、すなわち一般化 Voigt model として、被切離物体を図1のように基本要素の端を互いに接続し、連続体を構成すれば、実際の粘弾性体に近い仮想物体を構築することができることを示す⁽¹⁴⁾。

〈2・2〉 力学モデルの定式化 直線で構成される形状の安定なもっとも基本的な立体は四面体なので、仮想物体を四面体の連続体として構成する。すなわち、四面体の頂点に質点が存在し、質点と質点を接続する各辺が粘弾性体に対応する構成を仮想物体の基本単位とする。これをもとにして2層からなるシート状物質を構成した例を図2に示す^(註1)。

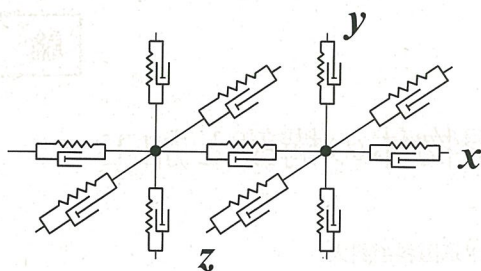


図 1 粘弾性体モデルの基本要素の結合
Fig. 1. Combination of unit viscoelastic models.

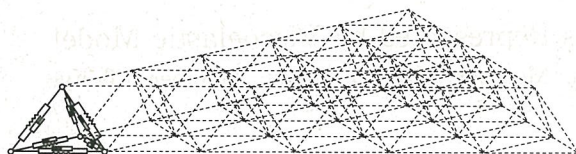


図 2 シート状被切離物質の三次元基本モデル
Fig. 2. 3D basic model of two-layer virtual object to be cut.

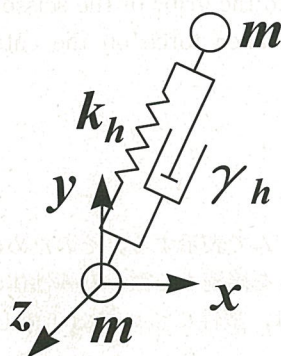


図 3 粘弾性体の応力ベクトルの分解
Fig. 3. Components of stress in a unit of viscoelastic model.

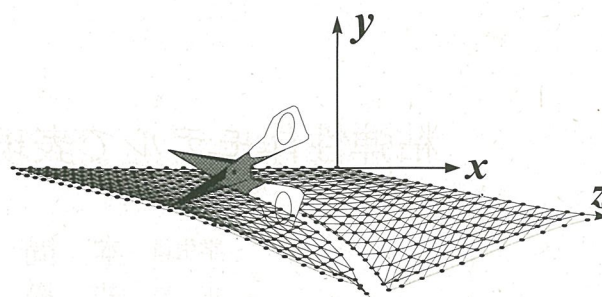


図 4 重力による仮想物体のたわみ
Fig. 4. Appearance of the bending on the cutting of the virtual object caused by gravity.

$$|f_h(t)| = |-k_h \eta \{l_h(t) - L\} - \gamma_h \eta dl_h/dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、質点と質点の間に粘弾性体が接続しているとき $\eta=1$ とし、切断されたとき $\eta=0$ であるとする。これを係数として粘性定数および弾性定数に乗ずることにより、各粘弾性体ごとにその応力を計算することが可能になる。また、 $l_h(t)$ は伸縮した粘弾性体の長さ、 L は粘弾性体の自然長、 k_h は弾性定数、 γ_h は粘性定数である。ばねの応力を x, y, z 軸方向に分解して、各質点の加速度成分が次のように求められる。

$$l_h(t) = \sqrt{x_h(t)^2 + y_h(t)^2 + z_h(t)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$f_{hx}(t) = |f_h(t)| \{x_h(t)/l_h(t)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$f_{hy}(t) = |f_h(t)| \{y_h(t)/l_h(t)\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$f_{hz}(t) = |f_h(t)| \{z_h(t)/l_h(t)\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$a_x(t) = f_{hx}(t)/m_h \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$a_y(t) = f_{hy}(t)/m_h \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$a_z(t) = f_{hz}(t)/m_h \quad \dots\dots\dots (8)$$

上記の $x_h(t), y_h(t), z_h(t)$ はそれぞれ粘弾性体 h (計算上の順番) を介して接続している質点と現在注目している質点の x, y, z 座標の差を表す。 a_x, a_y, a_z はそれぞれ x, y, z 軸方向の加速度である。 $f_{hx}(t), f_{hy}(t), f_{hz}(t)$ はそれぞれ粘弾性体の応力の x, y, z 軸成分である。

〈2・4〉 シート状仮想物体の破壊の表現 次にハサミによる仮想物体の切断について考える。前述の各質点は、それに接続している粘弾性体の重心であり、粘弾性体が切断されるとき、各質点ごとに比例配分される。この接続状態を状態定数 η によって前記のように定義した。従って仮想のハサミによって切断された部位の粘弾性体の状態係数 η を 1 から 0 に変更することにより、リアルタイムで仮想物体の切断された状態の表現が可能になる。

また、このモデルでは y 軸方向を鉛直方向として設定しているので、 y 軸方向の加速度についてのみ重力加速度を加算する。これによって、各質点は重力によって落下しようとするが、質点と質点の間にある粘弾性体の応力により質点を支える力が生じる。これらの力がつりあうことにより、仮想物体のたわみが表現できる。その様子を図 4 に示す。

〈2・3〉 力学モデルの運動方程式 質点とばねが多重に結合した構造体の運動方程式を解くことは困難である。そこで各質点ごとに記述した運動方程式に基づいて、一定のサンプル周期で離散化し、その差分を計算する方法によって、リアルタイムで仮想物体の変形を表現する。

まず、空間内における各質点の座標をもとに、粘弾性体の長さを計算する。ばねの自然長とばねの伸縮の方向を考慮することにより、ばねの応力が求められる。複数のばねが同一の質点で結合しており、質点に加わる応力はそれらの合力となる。なお、粘性抵抗は速度に比例するので、各ばねの両端に結合している二つの質点の相対速度を用いて算出する。

すなわち、注目する質点に与える h 番目の粘弾性体の時刻 t におけるばねの力 $f_h(t)$ は、ばねの接続状態を表現する係数 η を定義して次のように求められる。

(注 1) ここでは相補的に重ねるので 2 層と表現した。実際は単一層である。

3. 仮想物体のハサミによる切離と破壊

著者らはこれまでにハサミ型デバイスを用いたフォースディスプレイシステム⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾を開発している。従来の研究では仮想物体を破壊したときの抵抗感を実測値から得られた関数によって近似的に与えており、物性値と加工デバイスを変更した場合の抵抗感の変化と表示に必ずしも実際と一致しない点があった。以下では、粘弾性体モデルに与えられた物性値を基に、この仮想物体をハサミで切離した場合の抵抗力の発生機序について検討する。

ハサミによって物体を切断したときの抵抗力はハサミ本体の各部分の摩擦力と、物体から受ける応力の合力である。ハサミ本体の各部分の摩擦力はデバイスに依存するので、ここでは特に考慮しないものとする。

図5に示すようにハサミによる切断では2枚の刃の交差により、刃の間に存在する粘弾性体の部分が伸長する。

ハサミの交差部位から、伸長した粘弾性体が切断される部位までの間に存在する粘弾性体により交差の程度に応じた応力が生じる。

ここでは論議を簡単にするために、ハサミの刃は中心線 u, w について対称であるものとし、切断中は刃と刃の間隔 d は一定とする。またハサミの刃にはナイフの刃のような切断力はないものとし、被切離物体は刃の上で滑らないことを前提とした。

支点 R から作用点 P までの距離は、 $\Delta PQ_U R$ または $\Delta PQ_L R$ において正弦定理を用いると、

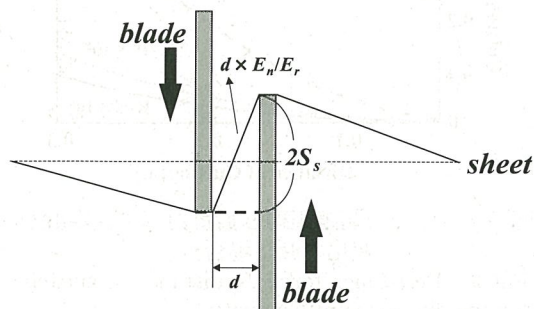


図5 ハサミによる切断部位の拡大図

Fig. 5. Distortion of material on its cutting by the scissors.

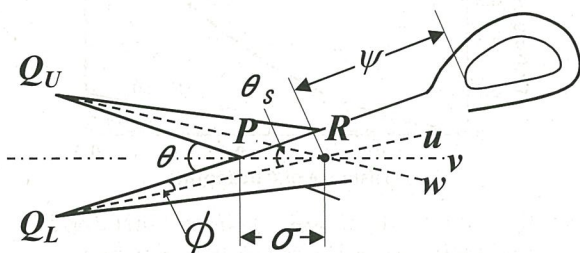


図6 ハサミの作用点の位置

Fig. 6. Position of the point of action of the scissors.

$$RP = A \sin \phi / \sin(\phi + \theta_s/2)$$

となる。ここで $RQ_U = RQ_L = A$ である。以下、 $RP = \sigma$ 、支点 R から手元までの距離を ψ とする。また刃の先端 Q_U と支点 R を通過する中心線 w と刃のなす角を ϕ とし、 Q_L と R を通過する直線 u と刃のなす角も同じく ϕ とする。更に、 u と w のなす角を θ_s とすれば、両刃のなす角度 θ は

$$\theta = \theta_s + 2\phi \dots \dots \dots (9)$$

で与えられる。

ここで、粘弾性体の長さとの比を伸展率 E_m と定義し、粘弾性体が伸長して切断するときの伸展率を弾性の限界 E_n とすれば、 E_n は E_m の最大値である。このとき、ハサミで切る直前の粘弾性体の伸展率を E_r とすれば切断される瞬間の粘弾性体の長さは $d \cdot E_n / E_r$ で表せる。すなわち、 E_m は弾性体に固有の物性値であり、 E_r は切断直前における弾性体の伸展状態を表す変数である。また、 E_s は弾性の限界を逸脱しない範囲で伸展しうる見かけの弾性限界である。従って、粘弾性体の切れ目の位置と両刃のなす角を等分し、ハサミの支点軸を通過する平面 P_v (図7の v) に垂直な距離 S_s は

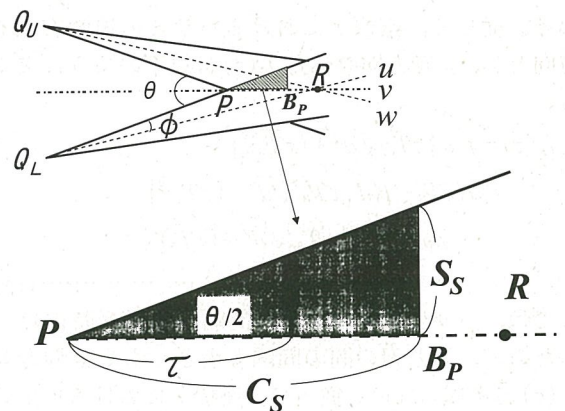


図7 ハサミの切離部位の拡大図

Fig. 7. Enlargement of the point around the point of action.

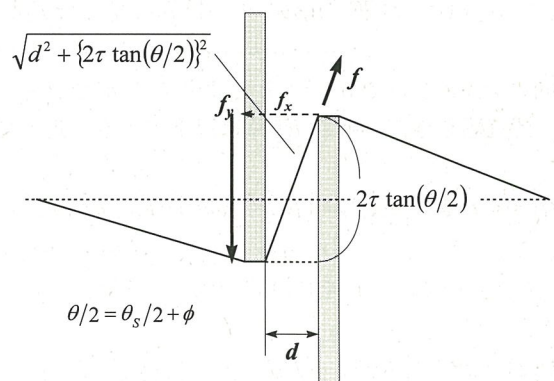


図8 切断時に粘弾性体から受けるハサミの刃へ及ぼす応力

Fig. 8. Cutting force exerted on the two blades of the scissors.

$$S_s = \{d\sqrt{(E_n/E_r)^2 - 1}\}/2 \quad (10)$$

で与えられる。このとき、作用点 P から切断される瞬間の粘弾性体の切り目 B_p までの刃の平面 P_v に投影した距離 C_s は

$$C_s = S_s / \tan(\theta/2) \\ = \{d\sqrt{(E_n/E_r)^2 - 1}\} / \{2 \tan(\theta/2)\} \quad (11)$$

となる。また、 RP 間にある座標 τ における粘弾性体の応力 f は粘性定数 γ を考慮し、ハサミの刃と粘弾性体との相対速度を v_r として

$$f(\tau) = K[\sqrt{d^2 + \{2\tau \tan(\theta/2)\}^2} - d] + \gamma v_r \quad (12)$$

として計算できる。

ハサミの支点 R を中心とした円運動の角速度が ω なので、 v_r に関しては $v_r = (\sigma - \tau)\omega$ が成立する。

また、 $T_s = 2 \tan(\theta/2)$, $E_s = E_n/E_r$ と置き、これらを代入すれば

$$f(\tau) = K\{\sqrt{d^2 + (\tau T_s)^2} - d\} + \gamma(\sigma - \tau)\omega \quad (13)$$

となる。従って、座標 τ におけるハサミの運動方向を y 軸方向とし、 y 軸方向の応力 $f_y(\tau)$ は以下のように求められる。

$$f_y(\tau) = f \times \{\tau T_s / \sqrt{d^2 + (\tau T_s)^2}\} \\ = K\tau T_s - Kd\{\tau T_s / \sqrt{d^2 + (\tau T_s)^2}\} \\ + \gamma\omega(\sigma - \tau)\{\tau T_s / \sqrt{d^2 + (\tau T_s)^2}\} \quad (14)$$

ここでは、ハサミの2枚の刃の間隔 d を切断時には一定としたので、刃と刃の間隔を小さくする x 軸方向の力 $f_x(\tau)$ は考慮しない。従って、座標 τ における抵抗感を与える応力 $R(\tau)$ はこの原理から次のように算出できる。

$$R(\tau) = (\sigma - \tau) / \Psi \times f_y(\tau) \\ = (\sigma - \tau) / \Psi \times [K\tau T_s - Kd\{\tau T_s / \sqrt{d^2 + (\tau T_s)^2}\} \\ + (\sigma - \tau) / \Psi \times [\gamma\omega(\sigma - \tau)\{\tau T_s / \sqrt{d^2 + (\tau T_s)^2}\}]] \quad (15)$$

一般的に $\sigma \gg \tau$ なので $\sigma - \tau \approx \sigma$ とすることができ。従って、抵抗感を与える応力 $R(\tau)$ は以下のように近似できる。

$$R(\tau) = \sigma / \Psi \times [K\tau T_s - (Kd - \gamma\omega\sigma)\{\tau T_s / \sqrt{d^2 + (\tau T_s)^2}\}] \quad (16)$$

$\lambda = d/T_s$ において、これを(16)式に代入すると以下のようになる。

$$R(\tau) = \sigma / \Psi \times [K\tau T_s - (Kd - \gamma\omega\sigma)\{\tau / \sqrt{\tau^2 + \lambda^2}\}] \quad (17)$$

全体の抵抗感 R_T は、(17)式を区間 $[0, C_s]$ で積分することによって(18)式で表せる。

$$R_T = \int_0^{C_s} R(\tau) d\tau \\ = \sigma / \Psi \times [(KT_s/2) \times \tau^2 - (Kd - \gamma\omega\sigma)\sqrt{\tau^2 + \lambda^2}]_0^{C_s} \\ = (\sigma / \Psi)(KT_s/2)C_s^2 \\ - (\sigma / \Psi)(Kd - \gamma\omega\sigma)(\sqrt{C_s^2 + \lambda^2} - \sqrt{\lambda^2}) \quad (18)$$

ここで $C_s = 2S_s/T_s$, $\lambda = d/T_s$ を代入して整理すると、最終的に以下のように全体の抵抗感 R_T が導かれる。

$$R_T = \sigma d(E_s - 1)\{Kd(E_s - 1) + 2\gamma\omega\sigma\} / (2\Psi T_s) \quad (19)$$

4. シミュレーションの結果

(19)式について、各パラメータ値を $\phi = 5.0 \text{ deg}$, $K = 5.0 \times 10^5 \text{ N/m}$, $d = 0.1 \times 10^{-3} \text{ m}$, $E_s = 2.0$, $A = 0.3 \text{ m}$, $\Psi = 0.1 \text{ m}$, $\gamma = 10 \text{ Ns/m}$, $\omega = 10 \text{ rad/s}$ なる条件を設定してシミュレーションを行った。その結果を図9～図14に実線で示す。ところで、同図9～14中に破線および点線で示す結果は、図中に示すパラメータのみを変更した結果である。

以下、これらの結果を用いて各パラメータの変化による抵抗力の変動について比較検討する。

図9は粘弾性モデルに与えた弾性定数を変化させた場合の結果である。弾性定数が増加すると物体は硬度が増

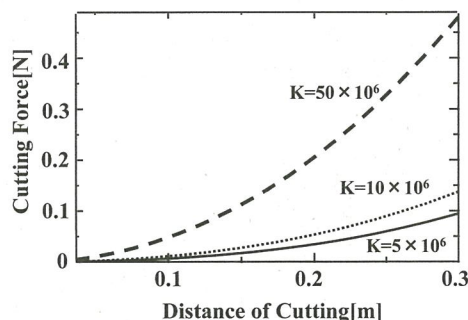


図9 ハサミの切離距離と抵抗力（弾性定数を変化させた場合）

Fig. 9. Resistance force vs. distance of cutting for the difference of elasticity.

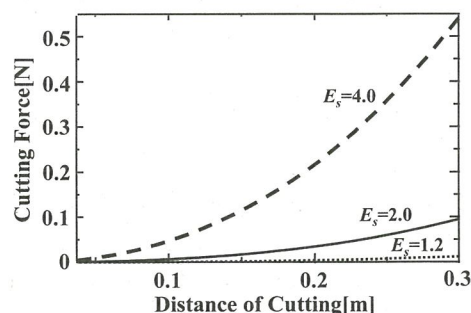


図10 ハサミの切離距離と抵抗力（弾性の限界と仮想物体の伸展率の比を変化させた場合）

Fig. 10. Resistance force vs. distance of cutting for the difference of the ratio of the stretch to the elastic limit of material.

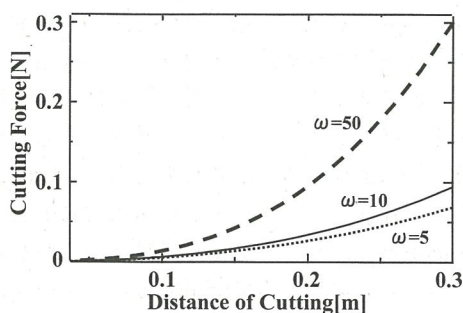


図 11 ハサミの切離距離と抵抗力（ハサミの刃の角速度を変化させた場合）

Fig. 11. Resistance force vs. distance of cutting for the rotational angular velocity of the blades around the fulcrum.

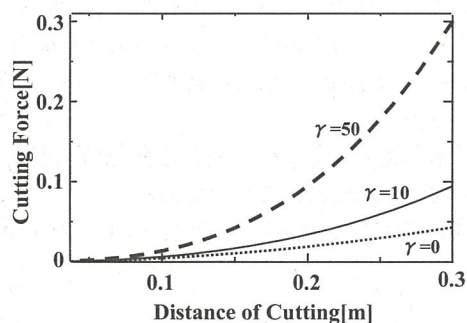


図 12 ハサミの切離距離と抵抗力（粘性定数を变化させた場合）

Fig. 12. Resistance force vs. distance of cutting for the difference of viscosity.

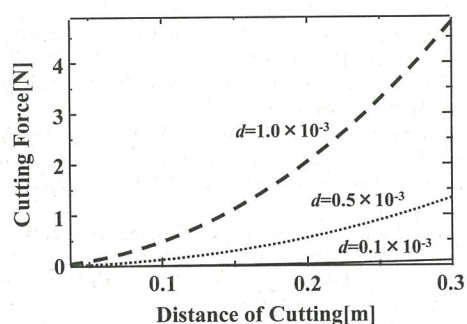


図 13 ハサミの切離距離と抵抗力（ハサミの2枚の刃の間隔を変化させた場合）

Fig. 13. Resistance force vs. distance of cutting for the difference of the distance between two blades.

す。従ってこの結果は硬い物質を切断する場合に、抵抗力が大きくなることを示している。

図 10 は粘弾性体モデルの弾性の限界と仮想物体の伸展率の比を変化させた場合の結果である。この比はすなわち仮想物体の弛緩の程度を示しており、この値が大きいほど仮想物体が弛緩していることになる。従って、この結果は、弛緩している物体を切断するとき、抵抗力が大きくなることを示している。

図 11 は切断時におけるハサミの刃の回転速度、すなわち切断速度の違いを考慮した場合のシミュレーション結果

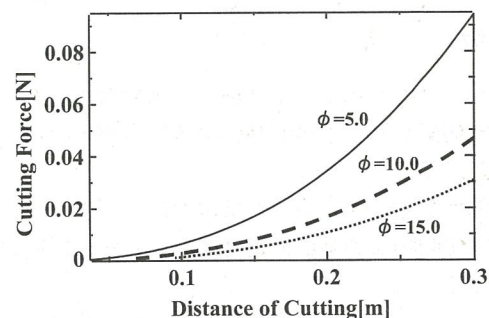


図 14 ハサミの切離距離と抵抗力（ハサミの刃先の角度 φ を変化させた場合）

Fig. 14. Resistance force vs. distance of cutting for the difference of the angle of the edge-point.

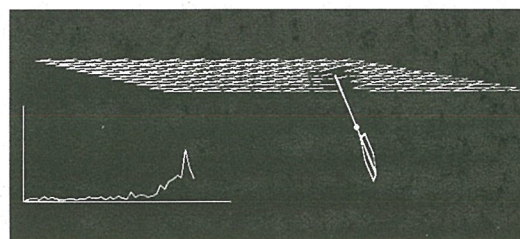


図 15 仮想物体の切断の様子と得られる抵抗力
Fig. 15. Appearance of the cutting of the virtual sheet force by scissors with incidental resistance force.

である。この結果から、切断速度が大きいほど抵抗力が増加することがわかる。これは実測した性質⁽¹⁾とほぼ一致している。

図 12 は仮想物体の粘性定数の違いを考慮した場合のシミュレーション結果である。この結果は、粘性が増大するほど抵抗感が増加することを示しており、実測と一致している。

図 13 は仮想物体が前記と同一の条件にあるとき、ハサミの刃と刃の間隔 d と抵抗力の関係を示したものである。一般的に刃と刃の間隔が大きくなったハサミを、「ハサミがバカになっている」と表現する。すなわち、このようなハサミで切断するとき、抵抗力が大きくなり、切断が困難になっていることを示している。図 14 は仮想物体が同一の条件下で、ハサミの刃先の角度を変化させた場合の抵抗力のシミュレーション結果である。これよりハサミの刃先が細くなるほど抵抗力が大きいたことが示されている。

これらの結果は、物質の実際の物性値と一致していないので数値は異なっているが、実測した性質⁽¹⁾とよく一致する。

ところで、ハサミの抵抗力を解析的に表現できたことにより、ハサミ型デバイスの動きに連動して、リアルタイムでハサミの抵抗力を表現できるようになった。フォースディスプレイシステムに応用した例が図 15 であり、ハサミの速度によって抵抗力が変化の様子を図中左下に示した。

5. 考 察

提案した粘弾性体モデルに種々の物性値を与えてこれをハサミで切断したときの物理的動特性の解析の結果から以下のことが示唆される。

- ① 弾性定数が大きいほど抵抗力が大きくなる
- ② 被切断物質の弛緩の程度が大きいほど抵抗力が大きくなる
- ③ ハサミの切断速度が速くなるほど抵抗力が大きくなる
- ④ 切断速度一定の場合、被切断物質の粘性が大きくなるほど抵抗力が大きくなる
- ⑤ ハサミの刃と刃の間隔が大きいほど抵抗力が大きくなる
- ⑥ ハサミの刃先の角度 ϕ が小さくなるほど抵抗力が大きくなる

上記は経験的事実に即したことであり、本モデルとその解析法が正しいことを示唆している。

パラメータの変化に対する抵抗力の変化の割合についてシミュレーションの結果を総合的に検討すると、ハサミの刃と刃の間隔 d の変化に対する、抵抗力の変化の割合がもっとも大きいことがわかる。このことからハサミの抵抗感を決定するもっとも重要な要素はハサミの刃と刃の間隔 d であると考えられる。これは経験的な事実と一致しており^(注2)、本研究における切断に関する解析の正しさが別の視点から確かめられるものである。

本研究ではシート状仮想物体を2層構造として構成し、ハサミに与える抵抗力の計算では粘弾性体の長さのみを考慮して厚さを考慮しなかった。実際には、厚みのある物体を圧縮する際に生じる応力も抵抗力に関与する。ここで、切断される部位では物体の厚さを無視した。しかし、圧縮によって生じた平面は基本モデルとして考えた粘弾性体が圧縮された状態で存在している。従って、シミュレーションで与える弾性定数 K は水平方向の粘弾性体だけではなく、厚みを与える鉛直方向に対する弾性定数 k およびそれらの運動方向に対する成分も考慮して決定されなければならない。

ところで、議論を簡単にするために、本論文ではハサミの刃と刃の間の隙間におけるハサミの刃と被切断物質との間の摩擦力や、両刃の間の間隔を変動させる力の発生、ハサミの刃の湾曲による両刃の間の間隔の変動、厚みをもつ被切断物質を圧縮する際に生じる応力、およびハサミの刃の鋭さについては考慮しなかった。これらの要素が抵抗感に対して影響することは明らかであり、この点についての定量的解析は今後の研究課題である。

6. あとがき

ハサミにより仮想物体の加工を行う場合に、高速でその

(注2) これにより「???とハサミは使しよう」という慣用句によって表現されるような日常的な経験も説明可能である。

物理的変化の計算が可能な粘弾性体モデルを提案した。このモデルでは破壊を含めた仮想物体の変形を高速で計算することが可能であることを確認した。更に、物性値を粘弾性体モデルに与えることにより、ハサミの刃のなす角度とハサミの寸法に依存する切断時の抵抗力を解析的に表すことができた。従って、デバイスからの入力に応じて瞬時に抵抗力が決定され、リアルタイムで動作するハサミ型フォースディスプレイシステムに応用することを可能にした。

本研究で提案したモデルは切断のみにとどまらず、物質に衝撃を与えたときの振動の伝播や、それに伴う崩壊なども表現可能であり、材料工学におけるシミュレーションモデルとしても有効である。

更に、ハサミの切断時における抵抗力の解析的表記はハサミの設計にも有効である。すなわち、解析的に表された抵抗力の式より、最も抵抗力の少ない条件を算出することが可能であり、理論的に最も「切れ味」の良いハサミを設計することができる。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費基盤研究(C)および三菱財団の助成によるものである。

(平成10年10月14日受付、同11年6月21日再受付)

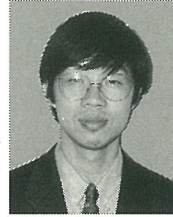
文 献

- (1) 若松・安名:「鉄状デバイスによる紙状立体仮想物体の切断感覚の実現システム」, 電学論C, **116**, 1163~1168 (平8-10)
- (2) 今井・若松:「両眼視差を用いた立体視による脳画像の三次元切除法」, 同上C, **111**, 242~248 (平3-6)
- (3) 若松・今井:「抵抗感を伴う立体視画像切断システムの開発」, 同上C, **113**, 627~634 (平5-8)
- (4) H. Wakamatsu, T. Imai, and K. Okada: "Artificial realization of reactive force feeling on stereoscopic cutting of image of multi-layer sphere", *Proc. 2nd Int. Conf. Image Process.*, 552~556 (1992)
- (5) H. Wakamatsu, S. Aoyagi, K. Takahara, and M. Yasuna: "Force display system for realization of cutting-in feeling of virtual sheet object by scissors", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. & Autom.*, **1**, 950~955 (1995)
- (6) H. Wakamatsu, X. Zhang, and S. Honma: "Teleoperational force display system in manipulation of virtual object using scissors-type cutting device", *Proc. 3rd Asia-Pacific Conf. Control & Meas.*, 312~316 (1998)
- (7) M. Minsky, M. Ouh-young, O. Steele, F. P. Brooks, and M. Behensky: "Feeling and Seeing-Issues in Force Display", *Comput. Graph. ACM SIGGRAPH*, **24**, No. 2, 235 (1990)
- (8) F. P. Brooks, M. Ouh-young, J. J. Batter, and P. J. Kilpatrick: "Project GROPE-Haptic Displays for Scientific Visualization", *Comput. Graph. ACM SIGGRAPH*, **24**, No. 4, 177 (1990)
- (9) H. Iwata: "Artificial Reality with Force Feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator", *ibid.*, **24**, No. 4, 165 (1990)
- (10) 古川・名倉:「3次元空間用無負荷時非接触型力覚提示装置」, 日本バーチャリアリティ学会論 (JPN), **3**, No. 3, 75~82 (平10)
- (11) 阪口・古荘:「ERアクチュエータを用いた2次元力覚提示装置の開発」, 同上, **3**, No. 3, 133~140 (平10)
- (12) 宮崎・安田・横井・鳥脇:「仮想弾性物体の対話操作のためのモデル化と実現」, 信学論(A), **j79-A**, No. 11, 1919~1926 (平8)
- (13) 広田・金子:「仮想物体の弾性モデルに関する検討」, 自動制御学論, **34**, No. 3, 232~238 (平10)
- (14) 棚橋:「連続体の力学(3)―物質の構成方程式―」, (昭61)理工図書

本 間 達 (学生員) 1993 年 3 月日本大学理工学部卒業。
97 年東京医科歯科大医学部卒業。同年同大学医学系研究科博士前期課程入学, 現在に至る。化学工学会員。



張 曉 林 (正員) 1985 年中国東北電力大学卒。85~86 年上海電力建設局勤務。横浜国立大学研究生を経て, 同大学院修士課程修了。89~91 年同大工学部助手。95 年横浜国立大学大学院博士課程修了。現在, 東京医科歯科大学医学部助手 (工学博士)。



若 松 秀 俊 (正員) 1972 年横浜国大修士課程修了。同年東京医科歯科大学助手。足利工業大学助教授, 福井大学工学部教授を経て, 現在, 東京医科歯科大学医学部教授。1973~75 年, ドイツ連邦共和国学術交流会 (DAAD) 給費により留学。Erlangen-Nürnberg 大学医学部客員研究員。94 年オレゴン州立大学, 95 年釜山国立大学, 96 年華中理工大学, 天津大学など客員教授 (工学博士)。

