

力覚表示可能なハサミ型遠隔操作装置による  
仮想物体の立体視加工

正員 若松 秀俊  
正員 張 曉林  
学生員 本間 達

電気学会論文誌 C  
(電子・情報・システム部門誌)

平成 11 年 10 月号 抜刷

Trans. IEE of Japan, Vol. 119-C, No. 10, Oct., 1999

# 力覚表示可能なハサミ型遠隔操作装置による 仮想物体の立体視加工

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)  
学生員 本間 達 (東京医科歯科大)

## Stereoscopic Manipulation of Virtual Object with Reactive Force Display Using Teleoperational Scissors-Type Cutting Device

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

A stereoscopic manipulating hardware system of 3D virtual objects is proposed on the basis of a human binocular parallax. 3D image objects characterized by assumed physical properties of materials are cut by a stereoscopic virtual edged-tool that is operated in the same way of the master movement of a newly developed scissors-type hardware edged-tool. By manipulation of the hardware edged-tool, stereoscopic virtual objects can be cut into without any particular constraint in its operation. Then, an image-cutting force display system is developed which can provide an operator well attendance to the realistic operation of virtual objects with a smooth reactive feeling dependent on their given physical properties. Some essential techniques are described for the stereoscopic realization of 3D virtual materials and 3D virtual edged-tool, and also for the design of the hardware edged-tool in order to compose a force display system. The proposed force display system is confirmed a useful human interface with direct reactive feeling on fingers and visual recognition of operation including spatial and structural understandings of virtual objects.

キーワード：両眼視差立体視切除，仮想物体，切離抵抗感，鉋状器具，フォースディスプレイ

### 1. まえがき

画像撮影装置の高性能化とコンピュータグラフィックス技術の援用により，内部形状が複雑な構造物を情報密度の高い三次元立体画像に高速合成し客観的に提示することが可能になってきた。ところで，バーチャルリアリティ技術のひとつとして，よりインタラクティブな種々のシミュレーションシステムの開発が試みられている。しかし，多くの場合，視覚情報が擬似三次元表示法によるものであり，相互作用で本質的な役割を演ずる操作時の力学的感覚を十分に実現するには至っていない。著者らは，これまでに物体を加工するときに得られる力覚をフィードバックし，触覚や抵抗感を伴い立体視画像を切離するナイフ型デバイスや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を提案してきた<sup>(1)~(6)</sup>。しかしながら，優れた操作感を実現するためには，デバイスに対する動作入力と，デバイスからの感覚フィードバックとの間の因果関係を適切に表現する仮想世界の記述が必要である。

本研究では画像の操作や加工における一層の臨場感向上

を目指したフォースディスプレイシステムを構成する。そのために，仮想物体を数学的に構築し<sup>(7)~(8)</sup>，物性を反映する画像として表現する。また，この画像による仮想物体に操作を加えた場合に力覚および動作を視覚的に確認できる入力装置の開発を行う。すなわち，遠隔操作型のハサミ型切離デバイスを開発し，これを仮想デバイスとマスタースレーブ方式で連動させ，立体視できるように画像合成した被切離仮想物体を操作加工する総合的なシステムを開発する<sup>(8)</sup>。

### 2. 立体画像操作用デバイス

〈2・1〉 デバイスの構成 まず，立体画像の遠隔操作用デバイスとして開発したハサミ型切離デバイスの構成とその機能について述べる。このデバイスは中間支点式のもの，すなわち2枚の刃を支える軸を支点，握りを力点，2枚の刃と切離物体との交点を作用点とする器具である。デバイスの構成を図1に示す。エンコーダ1はハサミの刃のなす角 $\theta_d$ ，エンコーダ2，3はそれぞれハサミ本体の $y_d$ 軸まわりの回転角 $\theta_{yd}$ ， $z_d$ 軸まわりの回転角 $\theta_{zd}$ を検出す

る。オペレータがハサミに与える前後、上下、左右（それぞれ、 $x_d, y_d, z_d$ ）方向への力  $F_{xd}, F_{yd}, F_{zd}$ 、および  $x_d$  軸まわりの回転トルク  $T_{xd}$  を 6 自由度力センサにより検出し、仮想ハサミの正確な位置姿勢を算出する。また、仮想物体を切離する際の抵抗と仮想ハサミ本体の  $y_d, z_d$  軸まわりの回転時の抵抗を電磁ブレーキ 1, 2, 3 を用いてハサミ型デバイスに与える。その際、切離抵抗力をより正確に実現するために、トルクセンサの値をフィードバック補正している。なお、本デバイスではハサミ部分が支柱に固定されているので、オペレータはデバイスの重みを感じることなく切離時の抵抗力を感じることができる。

〈2・2〉 仮想デバイスの構築と位置姿勢 ハサミ型デバイスと連動してその位置姿勢を変える仮想ハサミの構築は、その支点を座標系の原点とする座標系上で行う。ハサミの構造は単純なので、仮想ハサミの形状も直線および平面を用いた平易な記述で十分な表現が得られる。この仮想デバイスはディスプレイ画面上に透視投影され、更に三次元空間内で立体視される。オペレータが操作するハサミ型デバイスの動作に連動する仮想ハサミの切離動作をせん断応力による切離に限定する。仮想ハサミに必要な動作は図 2 に示すように、

- ①切離時の仮想ハサミの上下の刃のなす回転角  $\theta_s$
- ②仮想ハサミ本体の  $x_s, y_s, z_s$  軸まわりの回転角  $\theta_{xs}, \theta_{ys}$ ,

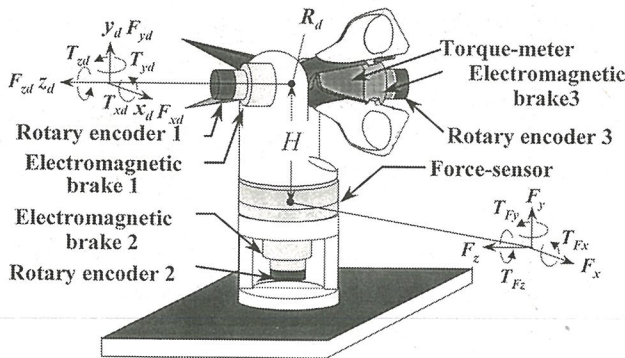


図 1 ハサミ型デバイスの概略と座標系の設定  
Fig. 1. Outline of the scissors-type cutting device with the designation of the coordinates.

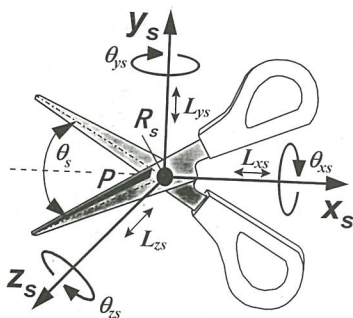


図 2 仮想ハサミの位置姿勢  
Fig. 2. Position and attitude of the virtual scissors.

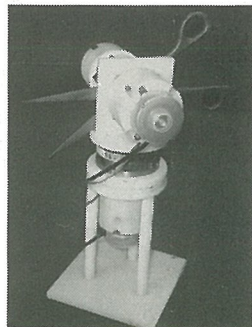


図 3 ハサミ型デバイス  
Fig. 3. The scissors-type cutting device.

$\theta_{zs}$

- ③仮想ハサミ本体の  $x_s, y_s, z_s$  軸方向への移動距離  $L_{xs}, L_{ys}, L_{zs}$

である。①～③の変換を組み合わせると仮想ハサミの位置姿勢の変換式は次のようになる。

$$T = \text{Trans}(L_{xs}, L_{ys}, L_{zs}) \text{Rot}(z_s, \theta_{zs}) \text{Rot}(y_s, \theta_{ys}) \text{Rot}(x_s, \theta_{xs})$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_{xs} \\ 0 & 1 & 0 & L_{ys} \\ 0 & 0 & 1 & L_{zs} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{zs} & -\sin \theta_{zs} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{zs} & \cos \theta_{zs} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{ys} & 0 & \sin \theta_{ys} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{ys} & 0 & \cos \theta_{ys} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{xs} & -\sin \theta_{xs} & 0 \\ 0 & \sin \theta_{xs} & \cos \theta_{xs} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

従って、上側の刃の位置姿勢は  $\theta_s$  を用いて

$$T_U = T \text{Rot}(z_s, \theta_s/2)$$

$$= T \begin{bmatrix} \cos \theta_s/2 & -\sin \theta_s/2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_s/2 & \cos \theta_s/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2)$$

のように求められる。下側の刃の位置姿勢は同様に

$$T_L = T \text{Rot}(z_s, -\theta_s/2) \dots \dots \dots (3)$$

で表せる。これより、デバイスと連動した仮想空間内での仮想ハサミの位置姿勢の表示が可能となる。

〈2・3〉 ハサミ型デバイスと仮想デバイスの連携

ハサミ型デバイスの  $y_d, z_d$  軸まわりの回転角  $\theta_{yd}, \theta_{zd}$  および両刃のなす角  $\theta_d$  を前記に従って測定する。仮想ハサミの  $y_s, z_s$  軸まわりの回転角  $\theta_{ys}, \theta_{zs}$ 、両刃の成す角  $\theta_s$  は、 $\theta_{ys} = \theta_{yd}$ 、 $\theta_{zs} = \theta_{zd}$ 、 $\theta_s = \theta_d$  である。 $x_d$  軸まわりの回転トルク  $T_{xd}$  と前後、上下、左右（それぞれ、 $x_d, y_d, z_d$  軸）方向への力  $F_{xd}, F_{yd}, F_{zd}$  はオペレータがハサミ型デバイスに直接与えたトルクと力の値であり、フォースセンサにより検出できる。しかし、デバイスの支点は床面に固定されているので、仮想ハサミの移動距離  $L_{xs}, L_{ys}, L_{zs}$  は直接得ることができない。ここでは、力センサより出力される力の値をその座標方向への仮想ハサミの移動速度に比例するとし、これらの移動距離を算出する。すなわち、力センサより検出した  $x_d$  軸方向の力を  $F_x$  とすると、仮想ハサミの  $x_s$  軸方向への速度  $V_{xs}$  と移動距離  $L_{xs}$  は係数  $k_x \text{mm}/(\text{Ns})$  を用いて、

$$L_{xs} = \int V_{xs} dt = k_x \int F_{xd} dt = k_x \int F_x dt \dots \dots \dots (4)$$

として求められる。 $y_s$  軸、 $z_s$  軸についても、同様に

$$L_{ys} = k_y \int F_y dt \dots \dots \dots (5)$$

$$L_{zs} = k_z \int F_z dt \dots \dots \dots (6)$$

として移動距離が求められる。ただし、 $k_y, k_z$  の単位は  $\text{mm}/(\text{Ns})$  である

仮想ハサミの  $x_s$  軸まわりの回転角  $\theta_{xs}$  は力センサより得られた  $x_d$  軸まわりの回転トルク  $T_{xd}$  の値と比例する回転角速度を用いて算出される。すなわち、

$$\theta_{xs} = k_{rx} \int T_{xd} dt = k_{rx} \int (T_{Fx} - HF_z) dt \dots\dots\dots (7)$$

である。ただし  $k_{rx} \text{rad}/(\text{Ns})$  は定数であり、 $H$  は力センサの座標原点からハサミの支点までの距離である。

以上のように、仮想ハサミの姿勢を決めるパラメータを三次元空間の中で仮想ハサミの移動を算出することができるので、実際には床面に固定したハサミであるにもかかわらず、仮想ハサミの移動を制御できる。従ってオペレータは手指から得られる力覚と仮想ハサミの空間内での三次元の動きの視覚的認識から移動感を得ることができる。

### 3. フォースディスプレイシステムの構成

これまで、操作のための切離デバイスと仮想の切離器具の構成やその基礎となる手法を述べた。次に、これらを用いたフォースディスプレイシステムの構成とその機能について述べる。

〈3・1〉 ハードウェアの構成 前述のハサミ型デバイスをコンピュータに接続し、インタラクティブに視覚的・力覚的操作が可能なフォースディスプレイシステムを図4のように構成する。ハサミの作用点と被切離仮想物体との切離条件を満足した瞬間に、仮想ハサミによる切離動作が開始される。この仮想ハサミの動作は、実空間のデバイスの動作と同期したものであり、その切離状態、切離位置に応じて、ハサミ型デバイスに配した電磁ブレーキを駆動する。仮想ハサミの挙動は、ハサミ型デバイスへの動作入力を正確に反映しており、オペレータが操作によって得られる抵抗感、電磁ブレーキにより力覚として与えられる。すなわち、オペレータはデバイスに操作を加えながら、視覚的に状況をとらえ、切離時抵抗感を得ることが可能である。装着されたエンコーダ1, 2, 3からの出力はカウンタを経て、また力センサからの出力はコントローラを経てコンピュータに入力される。前述のように、これらの入力デ

ータは切離デバイスの位置姿勢、刃の回転角度、切離距離、被切離仮想物体のたわみなど、仮想物体を表記するための計算に必要な値として用いられる。同時に、コンピュータからはこれらの情報を含む画像データと、ハサミ型デバイスの支点  $R_d$  と  $y_d, z_d$  軸に取り付けられた電磁ブレーキ1, 2, 3を制御する信号が出力され、オペレータに操作感を与える。

〈3・2〉 三次元画像の立体視と動作の概略 本研究では、仮想物体を立体視するために、両眼視差法を用い、実空間および仮想空間内に仮想ハサミおよび、被切離仮想物体を構成する。そのためにディスプレイ画面上を透視投影面とし左右両眼用に透視投影する。本システムにおいて、オペレータが仮想物体を仮想ハサミを用いて切離するとき、仮想ハサミの作用点と仮想物体との接触が前提となる。仮想ハサミが切離条件を満足している場合には、仮想ハサミによる仮想物体の切離が開始される。前述のように仮想ハサミの動作は、実空間のデバイスの動作と同期したものであり、その切離状態、切離位置に対応して抗力を与えるようにハサミ型デバイスに配した電磁ブレーキを駆動する。

以上により、オペレータは主な操作感である切離動作における抵抗感を得ることができるので、視覚のみならず力覚的臨場感を含めた感覚の体験が可能である。

### 4. 被切離仮想物体の合成と力学的特性

〈4・1〉 仮想物体のモデル化 本研究ではハサミ型デバイスによって切離される仮想物体の表現を前提としているので、Kelvin-Voigt model<sup>(10)</sup>を接続して、連続した粘弾性固体を構成するものとする。すなわち、被切離物体を無数の質点とそれらを接続するばねと減衰素子からなる微小な粘弾性体の集合として構築し、これをワイヤフレームとして実時間表示する。ここでは、塑性については考慮しないものとする。ところで、直線で構成される形状の安

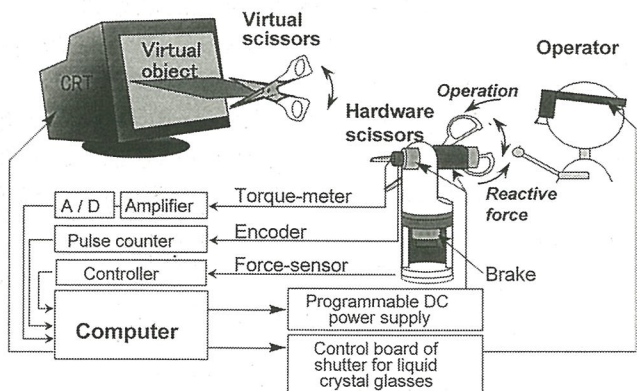


図4 切離感覚を実現する遠隔操作システムの構成図

Fig. 4. Block diagram of the teleoperational system for the realization of the cutting-feeling.

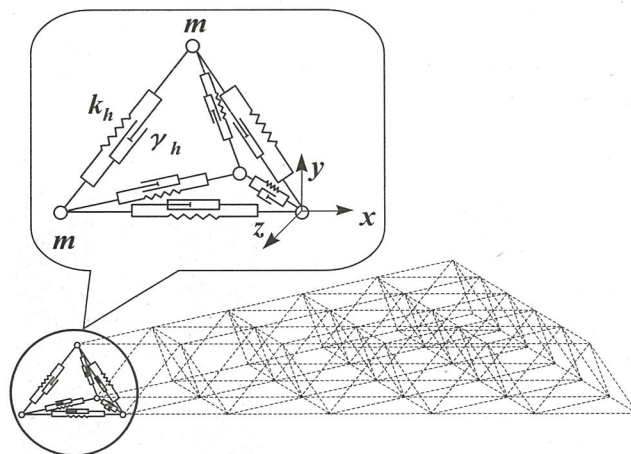


図5 粘弾性体モデルの基本要素とシート状被切離物質の三次元基本モデル

Fig. 5. The unit viscoelasticity model and the 3D model of sheet-type virtual object to be cut.

定なもつとも基本的な立体は四面体なので<sup>(9)</sup>、仮想物体を四面体の頂点に質点が存在し、質点と質点を結ぶ各辺が粘弾性体に対応する四面体の連続体として構成する。ここでは被切離仮想物体を四面体が互いに空間を埋め合うような平面からなるシート状のものとする。この様子を図5に示す。四面体を構成する質点に働く力は粘弾性体からの応力と重力加速度のみである。質点はこれらの力により支えられているので、粘弾性体が仮想ハサミによって切離される時切離部分に変形、すなわち「たわみ」を生じる。

〈4・2〉 物体の切離に伴う変形の表現 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ために<sup>(9)~(12)</sup>、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差分を計算する。これにより、実時間で仮想物体の変形を表現する。空間内における各質点との座標をもとに、粘弾性体の長さを計算し、更にばねの自然長とばねの伸縮の方向を考慮してばねの応力を求める。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。速度に比例する抵抗成分、すなわち粘性抵抗は、各ばねの両端に結合している二つの質点の相対速度に従って算出される。粘弾性体の両端の質点の相対速度が等しければ、粘性により生じる抵抗力は0となる。各質点ごとに作用する粘性抵抗も同様に合力として計算される。計算上、 $h$ 番目の粘弾性体について、注目する質点に加わる力は次のように求められる。

$$|f_h| = |-k_h(l_h - L) - \gamma_h dl_h/dt| \dots \dots \dots (8)$$

伸縮した粘弾性体の長さ

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

を考慮し、粘弾性体の応力  $f_h(t)$  の  $x, y, z$  軸方向成分を

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

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

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

とすれば、ばね同士的位置関係を考慮することなく、各質点の座標の偏差から各質点の加速度が求められる。ただし、 $L$ は粘弾性体の自然長、 $k_h$ は弾性定数、 $\gamma_h$ は粘性定数、 $x_h(t), y_h(t), z_h(t)$ はそれぞれ粘弾性体  $h$  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。

〈4・3〉 板状仮想物体の切離時の画像表現 ハサミ型デバイスの動きに連動した仮想のハサミによる仮想物体の切離を係数  $\xi$  によって特徴づける。すなわち粘弾性体が接続しているとき  $\xi=1$  であり、切離されているとき  $\xi=0$  であるとする。この係数を弾性定数および粘性定数に乗ずることにより、各粘弾性体ごとにその応力および切離された状態の表現が可能である。ところで、鉛直方向である  $y_s$  軸方向については重力加速度を考慮している。質点は粘弾性体の応力により支えられているので、粘弾性体が仮想ハサミによって切離される時、各質点ごとに重力によって下降しようとする。同時に切離されなかった粘弾性体の応力によって吊り上げられ、双方の力の平衡によって切

離部分に生じた変形、すなわち、仮想物体のたわみが表現できる。

〈4・4〉 切離開始位置と切離距離 ここで、仮想ハサミの両刃は中心軸  $v$  について鏡像の関係にあり、それぞれの刃は中心軸  $u, w$  に関して対称で、その頂角を  $2\phi$  とする。支点  $R_s$  から仮想ハサミの握りまでの距離を  $\Psi_s$  とする。支点  $R_s$  から作用点  $P_s$  までの距離  $\sigma = R_s P_s$  は  $\Delta P_s Q_U R_s$  において  $R_s Q_U = R_s Q_L = A$  とし正弦定理を用いると、

$$\sigma = R_s P_s = A \sin \phi / \sin(\phi + \theta_{Ps}/2) \dots \dots \dots (9)$$

である。ハサミによる切離は図6に示すように各刃の中心軸  $u, w$  のなす角  $\theta_{Ps}$  が変化する際に作用点が  $P_s$  から  $P'_s$  に移動する物理現象である<sup>(4)~(6)</sup>。刃が動いて  $\theta_{Ps}$  が  $\theta'_{Ps}$  になるとき、同様にして  $R_s P'_s$  を求めると切離距離は  $\sigma' - \sigma = R_s P'_s - R_s P_s$  となる。

〈4・5〉 操作者への抵抗力の実現 ハサミによって物体を切離したときの抵抗力はハサミの2枚の刃の間、および刃と被切離物体との間に生じる摩擦力と被切離物体から受ける応力、すなわち物体と刃の間の反発力の合力として与えられる<sup>(11)</sup>。被切離物質と両刃の間の力は被切離物質の厚み、密度、弾性、粘性に依存する。前述の仮想物体の質点、弾性、粘性の定数は基本的にこれらに相関する係数である。ハサミによる粘弾性体の切離を弾性の限界の逸脱と考える。議論を簡単にするために、粘弾性体の厚さを無視する<sup>(12)</sup>。また、2枚の刃の間隔  $d$  を一定とし、ナイフの刃のような切離を考えないものとする。ところで、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、物性値を変更した場合の抵抗感の変化に必ずしも実際と一致しない

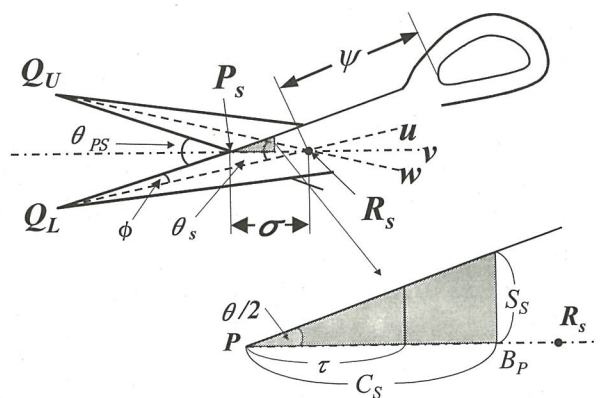


図6 ハサミの作用点の位置  
Fig. 6. Position of the point of action of the scissors.

(注1) 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、ここではとくに考慮しないものとする。  
(注2) 厚さを無視することは、被切離シート状物体の法線方向の弾性力と切り込みの力を無視することであり、せん断力のみを考慮することである。また、厚さがなくは作用点が一点しかないことを意味し、解析上複雑さを回避できる。

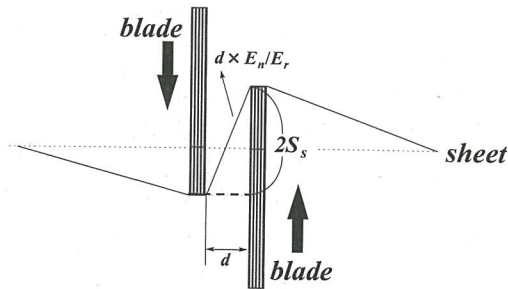


図7 ハサミによる切離時のシート状物体の変形  
Fig. 7. Distortion of the sheet-type material on its cutting by the scissors.

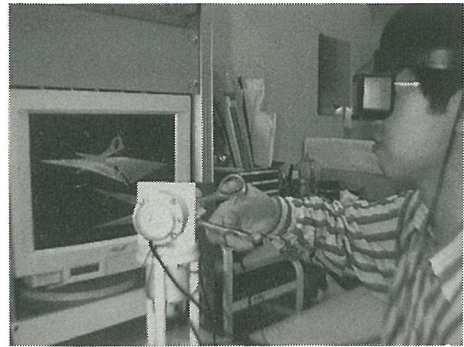


図8 切離感覚を実現する実際の遠隔操作システム

Fig. 8. Teleoperational system with the realization of cutting-feeling.

点があった<sup>(4)~(6)</sup>。以下では、粘弾性体モデルに適当に与えた物性値を基礎に、仮想物体を切離した場合の抵抗力の発生機序について述べる<sup>(7)</sup>。

ハサミによる切離では図6のハサミの交差部位  $P_s$  から、伸長した粘弾性体が切離される部位  $B_p$  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。この機構を説明するために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様子を示したのが図7である。ここで粘弾性体の弾性の限界の伸展率を  $E_n$ 、ハサミで切る直前の粘弾性体の伸展率を  $E_r$  とする。これらの定数を用いて切離される瞬間の粘弾性体の長さが  $d \cdot E_n / E_r$  で表せる。ここで、図6で示したハサミの作用点  $P_s$  と切離される瞬間の粘弾性体の切離部位  $B_p$  との間の距離を  $C_s$  とする。このとき、 $P_s$  と  $B_p$  間の座標  $\tau$  における粘弾性体の応力  $f(\tau)$  を粘性定数  $\gamma$  およびハサミの支点  $R_s$  を中心とした回転運動の角速度  $\omega$  を用いて算出できるので、座標  $\tau$  におけるハサミの運動方向の応力  $f_y(\tau)$  も求められる<sup>(#3)</sup>。従って座標  $\tau$  における抵抗感を与える応力  $R(\tau)$  は  $T_s = 2 \tan(\theta/2)$ 、 $E_s = E_n / E_r$  と置き、この原理と一般的に満足する条件  $\sigma \gg \tau$  を用いて、以下のように近似できる。

$$R(\tau) = \sigma / \psi \times \left[ K\tau T_s - (Kd - \gamma\omega\sigma) \left\{ \tau T_s / \sqrt{d^2 + (\tau T_s)^2} \right\} \right] \dots \dots \dots (10)$$

ここで  $C_s = 2S_s / T_s$  を考慮して、(10)式を区間  $[C_s, 0]$  で積分することによって、以下のような全体の抵抗感  $R_T$  が導かれる

$$R_T = \sigma d (E_s - 1) \{ Kd(E_s - 1) + 2\gamma\omega\sigma \} / (2\psi T_s) \dots \dots \dots (11)$$

ただし、 $K$  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る見かけの弾性定数である。

### 5. フォースディスプレイによる仮想物体の切離

図8は切離感覚を実現する実際の遠隔操作システムの実

(注3) ここで、ハサミの刃と刃の間隔  $d$  を一定としたので、刃と刃の間隔を小さくする方向の力  $f_x$  は考慮しない。

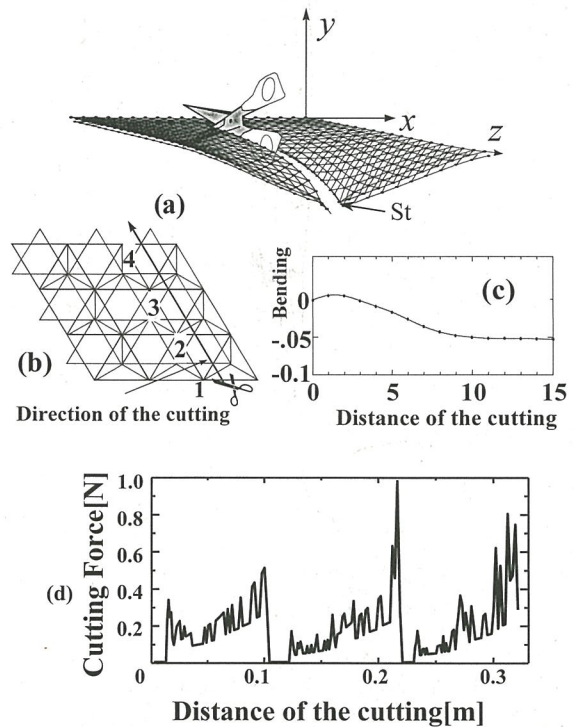


図9 CRT画面の外部に被切離仮想物体が存在する場合の切離の様子：(a)先端のたわみ、(b)仮想ハサミの運動方向、(c)切離距離と先端たわみの大きさ、(d)切離抵抗の大きさと切離距離  
Fig. 9. Appearance of the cutting of the virtual sheet object outside of the display: (a) bending of the edge of virtual object, (b) direction of the cutting of the virtual object, (c) bending according to the distance of its cutting, and (d) resistance force in accordance with the distance of its cutting.

験風景である。

$\phi = 5.0 \text{ deg}$ ,  $K = 8.0 \times 10^4 \text{ N/m}$ ,  $d = 0.1 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $E_s = 4.0$ ,  $A = 0.15 \text{ m}$ ,  $\psi = 0.07 \text{ m}$ ,  $\gamma = 10.0 \text{ Ns/m}$  なる条件下で、ハサミの角速度としてデバイスを動作したときに得られる実測値を用いて、切離のシミュレーション実験を行ったところ図9に示す結果が得られた。同図(a)は仮想

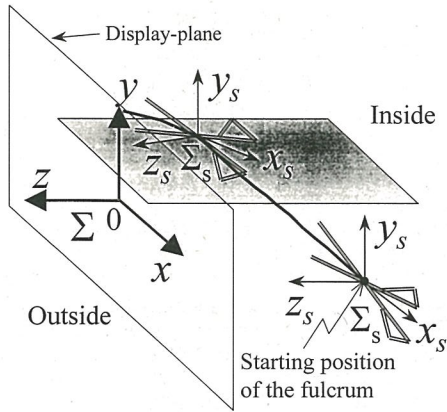


図 10 ディスプレイ画面の内部に存在する仮想物体の切離時の仮想ハサミの支点の運動  
 Fig. 10. Movement of fulcrum of the virtual scissors on the cutting of the virtual object existing in an inner space of the display.

のハサミが仮想物体を切離するときの仮想ハサミの切離と先端部分のたわみを示している。同図(b), (c)はそれぞれ仮想ハサミの切離方向とたわみによる端点  $S_t$  の位置の変化を示している。なお、仮想物体の切離時の抵抗感の大きさを同図(d)に示した。仮想物体からの力覚フィードバックの値は実物を忠実に再現しているわけではないが、抵抗力を表すグラフの形状が良好に一致している<sup>(5)(6)</sup>。また、操作者がデバイスを動かした場合にはハサミの角速度は一定しないので、その角速度の微小変化に伴って破壊の様子が波状の抵抗力で表される。これよりハサミで切離するときに得られた抵抗感と被切離物質のたわみを材料力学的に実現できたことがわかる。このことは被切離仮想物体の構成の妥当性を示すだけでなく、用いたグラフィックス技法は、切離により生じる被切離仮想物体の形状の変形を簡便に、しかも実際に即した形で実時間で表示することを可能にした。仮想物体がデバイスからの操作入力に対して、切離時の実時間形状変形の表現や材料の自重によるたわみだけでなく、質量とばね定数、粘性定数、ばねの自然長などの与えられた物性による性質の違いとそれを用いたより高度にリアルな表現を可能とした。仮想デバイスの挙動は、ハサミ型デバイスへの動作入力を正確に反映しており、オペレータがデバイスを操作し仮想物体を切離する時には、せん断力に相応する力が電磁ブレーキによりデバイスに与えられるので、本システムによりデバイスに操作を加えながら視覚的に状況をとらえ、切離時抵抗感を得ることが可能である。なお、デバイスが操作時に受ける前後、左右、上下(それぞれ、 $x_s, y_s, z_s$  方向)の力の変化によって起こると感じる仮想デバイスの仮想座標とディスプレイの現実の座標との関係を併せて図 10 に示した。ただし、空間の基本座標系  $\Sigma$  をディスプレイの中心点を原点とし、図のように座標軸を定めたとき得られる仮想ハサミの支点  $R_s$  の運動軌跡を示す。ここでは、仮想物体は三つの辺が水平に保持されている大きさが  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$  のシート状

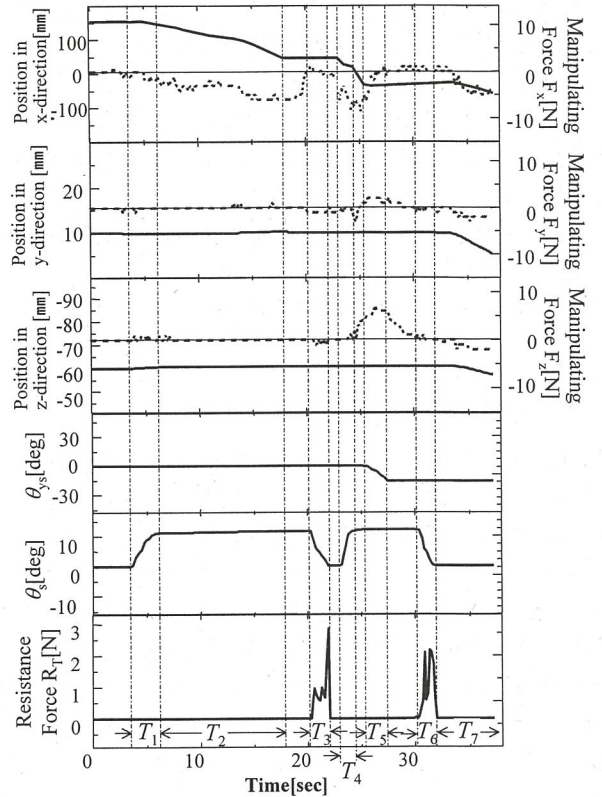


図 11 ハサミ型デバイスに対する操作力(破線)と仮想ハサミの位置姿勢の対応関係、および仮想物体の切離時の力覚フィードバック  
 Fig. 11. Position and attitude of the virtual scissors, manipulating forces (dotted lines) and feedback resistance force on the cutting of virtual sheet by the virtual scissors controlled by scissors-type device.

の物体を想定している。

図 11 はこの仮想物体を切離するために、各座標軸ごとの仮想ハサミの支点の軌跡とその運動を制御する力センサの値との関係、更に仮想ハサミの切離方向、両刃のなす角を示す。以下、実験開始時から時間を追って順に仮想ハサミの動き、およびデバイスの操作について説明する。ここでは、説明の簡略化のために、ハサミの  $x_s$  軸まわりの回転はなく、 $\theta_{xs}=0$  とする。また、ハサミの初期位置での支点  $R_s$  の座標系  $\Sigma_s$  の姿勢は基本座標系  $\Sigma$  と一致するものとする。区間  $T_1$  はハサミを開く作業の様子を示す。ハサミ型デバイスの刃のなす角は仮想ハサミの角度と連動しているため、図は仮想ハサミの刃のなす角  $\theta_s$  のみを示す。区間  $T_2$  ではハサミ型デバイスに力を加えることによって仮想ハサミを仮想物体と接触するまで移動する様子を示す。区間  $T_3$  は仮想物体を切離する様子を示す(図中  $\theta_s$  軸と  $R_r$  軸を参照)。区間  $T_4$  ではハサミを再度開きながら切り口に沿って進んでいる様子を示す。この場合、仮想ハサミは切り口の方角のみに移動できるようにプログラムしたので、 $y_d, z_d$  軸方向に力  $F_{yd}, F_{zd}$  を加えても、ハサミの移動方向が変わらない。区間  $T_5$  では仮想ハサミを  $y_d$  軸まわりに回転させる、すなわち、切離方向を変化させる様

子を示す。区間  $T_6$  では2度目の切離動作を示す。区間  $T_7$  では仮想物体が切断され、仮想ハサミが自由運動できるような状態を示す。ここで注意すべきことは仮想ハサミが  $y_s$  軸まわりの回転した場合、すなわち、 $\theta_{ys} \neq 0$  のとき、仮想ハサミの支点座標系  $\Sigma_s$  の姿勢は三次元空間の基本座標系  $\Sigma$  の姿勢と一致しないことである。

以上の実験からわかるように、空間内の物体がデバイスからの操作入力に対して、実時間でインタラクティブにตอบสนองする抵抗感を伴う臨場感の得られるフォースディスプレイシステムが可能となった。

## 6. あとがき

本システムは、これまでの「デバイス-仮想物体」一体型から、デバイスと仮想物体の画像を空間的に分離した点と被切離仮想物体の表現に力学モデルを採用したことに特徴がある。本論文では、ハサミによる物体の切離の本質的メカニズムを物体の構造を特徴づけるなかで論じた。そのために物体の構成要素の安定な幾何学的構造と整然としたその配置を仮定した。そして物体の変形・破壊を構成単位の構造変化としてとらえて、弾性限界からの構造逸脱を切離と定義した。すなわち、可能な限り線形モデルの複合システムとして被切離物質を表現し、弾性の範囲内の線形特性と弾性の限界から逸脱したことによる破壊の非線形特性を切離とした。それゆえ、塑性が物質の切離後に現れるとして本研究では特に言及しなかった。しかしながら、塑性が実際には変形の仮定で広範に現れることを考えると、本モデルにより忠実に物質の物性と挙動を実現した訳ではない。本フォースディスプレイシステムはマスタースレーブ方式で制御する仮想切離器具により立体視仮想物体を操作する臨場感・操作感に優れたものであり、これまでの拘束条件の多い方式によるものとは異なるものである。なお、この方法は画像の操作によってハードウェアを逆に制御し得る遠隔操作のための基礎としても十分に期待できるものである。

とはいえ、本文中のデバイスはその形状、大きさと共に操作時の臨場感を正確に再現するものとしては装備が多く、迅速な操作に重量の点で不十分な点がみられるので、ブレーキ、モータ、デバイス本体の小型化によって、更に違和感の少ない現実感に優れた操作環境の構築が必要である。また、本研究では被切離仮想物体としてシート状物体を用いているが、複雑形状物体を扱う場合には、モデル構築のみならず、その物体の切離時の抵抗力を定量化したり、物性を考慮した形状の変化を計測し検証する総合的なシステムの開発も必要である。

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

(平成10年12月15日受付, 同11年5月17日再受付)

- (1) 今井照泰・若松秀俊:「両眼視差を用いた立体視による脳画像の三次元切除法」, 電学論C, **111**, 242~248 (平3)
- (2) 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)
- (3) 若松秀俊・今井照泰:「抵抗感を伴う立体視画像切離システムの開発」, 電学論C, **113**, 627~634 (平5)
- (4) 若松秀俊・安名正和:「狭状デバイスによる紙状立体仮想物体の切離感覚の実現システム」, 電学論C, **116**, 1163~1168 (平8)
- (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: "Operational systems of stereoscopic cutting 3D virtual objects with reactive feeling". *Proc. IFAC 13th World Congr., Biomed. Control*, 409~414 (1996)
- (7) 本間 達・若松秀俊・張 曉林:「粘弾性体モデルで表現した仮想物体の構築と加工」, 電気学会電子情報部門大会論文集, 481~484 (平10)
- (8) H. Wakamatsu, X. Zhang, and S. Honma: "Teleoperational force display system in manipulation of virtual object using scissors-type cutting device". *Proc. Asia-Pacific Conf. Control Meas.*, 312~316 (1998)
- (9) 広田光一・金子豊久:「仮想物体の弾性モデルに関する検討」, 計測自動制御学論, **34-3**, 232~238 (平10)
- (10) 棚橋隆彦: 連続体の力学(3)-物質の構成方程式一, (昭61) 理工図書
- (11) 半谷裕彦・川口健一: 形態解析 一般逆行列とその応用, (平3) 培風館
- (12) 宮崎慎也・安田孝美・横井茂樹・鳥脇純一郎:「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, **J79-A-11**, 1919~1926 (平8)

若松 秀 俊 (正員) 1972年, 横浜国立大学工学研究科修士課程修了。同年東京医科歯科大学医用器材研究所助手。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年天津大学, 華中理工大学, 首都医科大学など客員教授(工学博士)。



張 曉 林 (正員) 1985年中国東北電力大学卒業。85~86年上海電力建設局勤務, 横浜国立大学研究生を経て, 89年同大学院修士修了。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)。



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

