鋏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

正 員 若 松 秀 俊 (東京医科歯科大)

准 員 安 名 正 和 (東京医科歯科大)

Stereoscopic Image Cutting System with Reactive Feeling on Cutting Virtual Sheet Object by Scissors-Type Device

Hidetoshi Wakamatsu, Member (Tokyo Medical and Dental University)

Masakazu Yasuna, Associate member (Tokyo Medical and Dental University)

A stereoscopic cutting of stereoscopic display of 3D virtual object in a real space using a human binocular parallax is discussed. For the cutting of stereoscopically viewed image objects characterized by assumed physical properties, a scissors-type edged-tool with 2-degree of freedom is developed. Then, image-cutting force display system using the scissors-type device is synthesized by which virtual objects can be directly cut into without any particular constraint in its operation. Here, an image of sheet is given as a virtual object to be cut in a real space based on the measured physical properties. The smooth reactive force on its cutting is given to the edged-tool, through which fingers directly obtain feeling of cutting according to given physical properties of a virtual sheet material. The proposed force display system ensures a visual recognition of hand movement in operation including spatial understanding of objects with well attendance to the reality, giving a trace of the edge-point of the device by an indicator.

キーワード：両眼視差，立体視切断，仮想物体，切断抵抗感，鋏状器具，フォースディスプレイ

1. ま え が き

仮想物体に対する操作を実空間内で行う場合に、運動と感覚との相互関連をオペレータに与える新たなインターフェイスとして、フォースディスプレイの導入の効果が種々の分野で期待されている⁽¹⁾。

実感を伴った働きかけが可能な力覚情報の表示機能を備えた代表的なデバイスには、ジョイスティック、マスターアームなどがある。具体的には、テクスチャ表現した仮想物体表面の感触を与えるシステム⁽²⁾、グラフィック合成した手を用いて仮想物体を支持したときの触覚の実現⁽³⁾や4本の糸による指先への圧覚を実現するシステム^{(4),(5)}などが提案されている。その他、CG合成分子の操作時の分子間の反発力の実現システムが提案されている⁽⁶⁾。

筆者らのうちのひとりとは、立体視化マウスカースルを切除用具とみなした3次元画像の立体視切除法⁽⁷⁾と立体視画像に直接切り込み可能で、同時に抵抗感を知覚できる切除デバイスを考案し、これらを組み合わせたフォースディスプレイシステムの構成を行った⁽⁸⁾⁻⁽¹⁴⁾。その結果、手の動きを直接的に視覚認識しながら同時に抵抗を手で感じる事が可能になり、実空間における種々の仮想物体の立体視切除への応用の道を開いた。しかしながら、いずれの場

合でも日常的な器具と比較して操作感に若干の問題があった。

本研究では、日常的に用いられている鋏状器具を用いて、ナイフとは異なった「切る」本質を内包する鋏による物体の切断の物理的機構と感覚を実現する。その第一歩として、進行方向のみに拘束があるだけで操作に特別な拘束のない鋏状器具を用いて、ディスプレイ前面の実空間に存在する紙状仮想物体を抵抗感を伴って切断するフォースディスプレイシステムを被切断物体の性質に基づいて構成する。

2. 鋏による切断の物理的解釈と条件設定

2.1 鋏による切断と動作に関する仮定

まず、2枚の刃を支える軸が支点、握りが力点、2枚の刃の交点が作用点である中間支点式の鋏状器具を切断デバイスとする。鋏は相対する2枚の刃を擦り合わせて、物をはさみ切る道具で、その動作は、この原理に基づいている。鋏で物を切断する場合に、2枚の刃の形状、握りの部分、刃と支点の相対的な位置関係および切断角度、さらに切断対象を構成する物体の弾性、密度などさまざまな要素が切断抵抗感に影響する。これらすべてを考慮して抵抗感を実現することは現在の研究段階では不可能に近い。しか

しながら、仮想物体を現実のものに近い切断デバイスを用いて切断したときに、切断の実感に近い感覚と臨場感を実現することを主眼としているので、ここでは切断対象の構成物質を限定し材質を一定として、切断時に操作者が得る抵抗力の大きさについてのみ議論することにする。

2.2 鋏による切断と得られる感覚

本論文では、鋏の刃を固定してナイフで切るような切り方は除外し、刃を閉じてはさみ切る動作のみに限定して紙状物体を切るものとする。また被切断物体が2枚の刃の交点Pに常に接触しているものとし、鋏本体は被切断物体に対して、図1に示すように一方向のみに移動可能で、下方に位置する刃が常に床面に平行であると仮定する。これにより抵抗感は指のみで感じるものとする。

鋏の刃の回転角を簡単に測定するために刃を固定し、さらにその支点を台車に固定しておけば、鋏の進行方向を仮に変化させるとしても変化が小さいときには、被切断物体の方を動かすことと等価とみなすこともできるし、指先以外の抵抗感についての解析も不必要である。

ここで、鋏による仮想物体の切断時の運動と感覚を実現するために、鋏の「刃の動き」と「本体の動き」を考えてみよう。前者は刃の開閉運動を、後者は本来自由に動かせる鋏が、物を切ることによって受ける一定の動作の制限を意味するものとする。

表1は鋏で紙を切るときを例に取り、刃の開閉時の紙と

図1 実空間での鋏の動きと被切断物体
Fig. 1. Scissors' movement and material to be cut in a real space.

表1 鋏の動きと抵抗
Table 1. Resistance on the movement of scissors and their edges.

Relation between paper and scissors	Reactive force on cutting		Constraint of scissors' movement	
	Close	Open	Forward	Backward
(1)	No	No	No	No
(2)	Yes	No	Yes	No
(3)	Yes	No	Yes	No

- (1) 刃と紙が触れてない状態
- (2) 開いた刃が紙に触れた状態
- (3) 切断分だけ鋏が前進した状態

の位置関係を3つの状態に分けて、「刃」および「本体」の動きと抵抗力の関係を記述したものである。鋏本体の進行方向の動作には、静止と滑らせながら前に押し出す動作の2種類ある。「本体の動き」の自由度は前後方向のみなので、刃を閉じて紙を切断しつつある(2)、(3)の状態のときには、本体は前方向には進まない。すなわち、紙と鋏の刃が一定の交差条件を満足したとき鋏の支点自体は動かずに、操作者は紙を切っている感覚を得る。(3)では刃が開くときの抵抗が被切断物体との接触面積すなわち刃の開き角度によって異なるが、ここではこれを考慮しないものとする。紙と鋏の刃がどのような状態にあっても鋏の後方向への動作に対しては何ら制限を受けない。したがって、鋏の刃の状態と紙の切り込み位置に応じてこのような動作を行えば、被切断物体が仮想物体であっても切断したと同様の動作になる。

3. 切断デバイス

3.1 鋏状器具の概要

切断デバイスは鋏状であり、図2(a)に示すように軸にロータリエンコーダと電磁ブレーキを配置した。両刃の交点Pが立体視画像への切り込み点となる。切断デバイスはz軸に平行に動くので、その動きとジョイントの回転角θからPの座標値が算出できる。同図(b)のように鋏状器具は台車に載り、その前後運動は台車と接続されたベルトを通して軸A、軸Cの回転運動に変換されるので、軸Aに連動したエンコーダにより台車の位置がわかる。台車の軸Cは電磁クラッチを経てラチェットギヤの軸に連結しているので、刃と紙の座標位置が一致したときに台車の前方向への動作を制限する。この様子を示したのが図2(c)である。鋏の操作時に得られる抵抗感は2枚の刃の擦れ合う摩擦力と切断時の抵抗力で決まる。ここでは、鋏状器具の支点の回転軸に回転方向と逆向きに電磁ブレーキ

図2 切断デバイスの概観および電磁ブレーキ、エンコーダの配置と前方の進行制限器

Fig. 2. Outlook of edged-tool with allocation of magnetic brakes and encoders on joints with its constraint apparatus.

を作用させることによって回転方向に対する反力を与えて、鉋を握って物を切断する際の抵抗感を実現する。この場合に、鉋状器具の支柱により、ジョイントに直結した電磁ブレーキを含む切断デバイスの重みをオペレータは感じることなく、両刃の摩擦力と電磁ブレーキの抵抗力のみを感じる。なお、切断デバイスは無理なく手が届き、かつ立体画像が歪まない範囲を想定して、CRT 前面 100~700 mm を可動範囲とした。鉋状器具の刃については支点から先端まで刃の長さを 70 mm、刃の支点 R の高さを 247 mm、刃の最大開き角度を 0.87 rad とした。

3.2 鉋の作用点の移動

鉋による物体の切断は、図 3 のように両刃の中心軸 l, m のなす角が θ から θ' に変化して、作用点が P から P' へ移動することによって生じる物理現象であると考えられる。刃先が鉋の中心軸 n について対称で、それぞれの刃がそれぞれの中心軸に対してなす角を α とし、 $QR=A$ とするならば、 $\triangle PQR$ について、 $S=A\{\sin(\theta/2)/\sin(\alpha+\theta/2)\}$ である。

下側の刃は固定してあるから、

$$\begin{aligned}\Delta S &= S - S' \\ &= A\{\sin(\theta/2)\operatorname{cosec}(\alpha+\theta/2) \\ &\quad - \sin(\theta'/2)\operatorname{cosec}(\alpha+\theta'/2)\} \\ &= A \sin \alpha \{\cot(\alpha+\theta'/2) - \cot(\alpha+\theta/2)\}\end{aligned}$$

が切断の長さである。

図 3 鉋状器具による切断時の作用点の移動
Fig. 3. Displacement of point of action on cutting by a scissors-type device.

4. フォースディスプレイシステム

4.1 システム構成と動作原理

前述の切断デバイスをコンピュータに接続して、実際に制御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^{(9)~(14)}。被切断物体は画像で与えた紙状の仮想物体とする。両眼に入る画像を視差に合わせて合成し、これらを液晶眼鏡の左右の開閉に同期させて交互に見ることに

図 4 立体視画像切断のためのフォースディスプレイシステム構成図

Fig. 4. Force display system for cutting of stereoscopic image.

よって仮想物体を立体視する⁽⁷⁾⁽⁸⁾。コンピュータへの入力、鉋状器具の支点 R および台車の動きと連動した軸 A にそれぞれ連結しているエンコーダからの出力である。これらよりそれぞれの回転角が得られ、切断デバイスの作用点 P の座標値が求められる。また、コンピュータからは立体画像データとともに、作用点 P の座標値に応じて、鉋状器具の軸と台車の軸に連結した電磁ブレーキや電磁クラッチの励磁電圧を制御するための信号が送られる。オペレータが鉋状器具を操作すると、ジョイントの回転角に相当するパルスが出力される。このパルス数から算出した作用点 P の座標が仮想物体の切断条件を満足したときに電源を駆動させる。このための電源は切断デバイスの各ジョイントの電磁ブレーキに接続されており、オペレータへの力覚のフィードバックを実行する。その際、電源の電圧の値を自由に設定することができる。よって、交点 P の位置によって電磁ブレーキに与える励磁電圧を変化させれば、切断対象とする仮想物体の切断時の抵抗力の違いを表現できる。

4.2 立体視切断と力覚実現に関する考慮

切断デバイスを用いて立体視切断と力覚のフィードバックを行う場合、① 2 つのジョイントの回転角の読み取りと、② 回転角からの切断デバイスの作用点 P の 3 次元座標値の算出、③ 先端 P と切断対象の切断条件の判定、そして④ 仮想物体に接触した場合の電磁ブレーキの駆動などの処理のすべてを可能な限り短時間で行わなければならない。というのは、両眼立体視のための液晶シャッタの動作における制限時間や交点 P の位置が逐次変化することを考慮しなくてはならないからである。切断対象の形が複雑なほどこの計算に要する時間は長くなる。よって、液晶シャッタの開閉速度に支障をきたさない程度の時間内にはこの処理が困難であることが少なくない。しかし、切断対象が本研究の紙状物体のように単純な形状をしている場合、交差判定は単純な条件式を用いて行える。

4.3 切断箇所の座標の取得と切断条件

図 5 はモニタと鉋状器具の位置関係を表わしたものであ

図 5 切断条件を与えるパラメータ
Fig. 5. Parameters for cutting conditions.

る。CRT 画面の中央を原点とした基準座標系から鋏状器具の交点 R までの距離 z_R が測定できれば、 x, y 座標が固定されているので、鋏状器具のジョイントの回転角 θ から作用点 P の位置、すなわち原点から紙の切断端までの距離 z_p が求まる。

以上の条件をもとに、鋏状切断デバイスによる紙状仮想物体の切断を考えてみる。まず、 xy 平面に垂直に交わる、三角形面素法により描いた厚さのない網状ワイヤーフレーム平面 $G(y=0)$ を想定し、切断対象とする。各々の面素に硬さなどの物性を特徴づけることができるものとする。切断デバイスは CRT 画面に対して垂直方向のみに進行可能なので、その進路は $x=y=0$ である。操作時点で、すでに切り込まれている平面 G 上の点のうち CRT 画面に最も近い点の z 座標を z_m とする。ここで、 $z_m \geq z_p$ であれば、点 $P(x_p, y_p, z_p)$ が平面 G と交差するので電磁ブレーキを駆動することにより、切断時の力覚フィードバックが行える。したがって、図 4 に示したシステムにおいて、オペレータが立体視している仮想物体に切断デバイスで切り込んだ際に、仮想物体に切り込み線を入力しながら、その切り込みに従って切断部分を分離し、同時にあらかじめ設定された抵抗感を与えることが可能である。

5. 仮想物体の切断と切断感

5.1 被切断物体の切断抵抗の測定

本システムを用いて、仮想紙状物体の切断感覚を得る。ここでは、被切断物体の機械的な特性を種々の物性から明らかにすることができないので、切断時の抵抗感のみに注目する⁽¹⁵⁾。そこで、支点から先端までの刃の長さが 70 mm の実際の鋏を用いてジョイントの回転角および回転速度に依存する切断時抵抗力を実験的に測定した。すなわち、この鋏で紙 (0.17 mm)、ゴム (1.0 mm)、塩化ビニル (0.42 mm) を切断したときの切断時抵抗力を、図 6 に示すようなゴニオメータ (共和電業) と圧力センサ (共和電業, LM-2 KA, 5 KA) からなる測定器により測定した。この結果を図 7 に示す。鋏の軸から遠くなるほど切断のための力は大きくなるが、抵抗力 f は切り込んだ距離には比例していないことがわかる。

実験から得られた切断時の抵抗力 f [kgf] は切断速度にさほど影響を受けないことがわかったので、切り込み回転

図 6 紙状物体の切断時の抵抗力の測定装置
Fig. 6. Outline of measuring instrument of cutting resistance of sheet-like material.

図 7 切断速度を考慮した (—: 速い, - - : 遅い) 3 種の物体の切断時における抵抗力
Fig. 7. Resistance on cutting of three materials with different cutting speeds (—: fast, - - : slow)

角 θ [rad] との代表的な関係を指数関数で近似すると塩化ビニルでは $f(\theta) = 2.24 \exp(-3.47\theta)$, ゴムでは $f(\theta) = 1.79 \exp(-4.79\theta)$, 紙では $f(\theta) = 0.69 \exp(-3.72\theta)$ であり、何も切断せずに鋏の開閉のみ行った場合は $f(\theta) = 0.31 \exp(-4.61\theta)$ であった。これらの結果を図 8 に示す。

5.2 切断抵抗の実現と切断感の検討

CRT の中心を原点としたフォースディスプレイシステムを用いて仮想物体の切断を行い、その抵抗感を得た。ここでは、紙について得られた関数形で与えた抵抗力に比例した種々の電圧で電磁ブレーキを励磁して、鋏状器具を握る指に抵抗感を実現した。このために、5 msec 以内に電圧設定変更可能な励磁用電源 (メトロニクス) を用いた。抵抗力は図 9 で与えた。同図は紙を切るときの様相をできるだけ再現できるように、図 8 から得られる近似曲線を組み合わせて得た曲線である。すなわち、切断デバイスを用いて、仮想平面の表面に順に切り込みを入れた場合に得ら

図 8 3種の物体の関数形で近似した切断時の抵抗力

Fig. 8. Cutting resistances of three materials given by functional approximation.

れる抵抗力を示したものである。図9は鋏状器具の切断角度と切断位置によって、得られる抵抗力が異なることを示している。切断時の1ストロークは、①鋏状器具本体を止め刃を閉じる、②刃を開く、③切断した最終点に作用点Pを移動するの3つの動作からなる。a~bは刃を閉じる。b~cは切断直後、c~dは支点の静止状態で刃を開くd~eは切り込んだ最終点に鋏の2枚刃の交点を移す動作に対応して与える抵抗力である。ここでは、 $A=70\text{ mm}$ 、 $\alpha=0.11\text{ rad}$ の鋏状器具を用いて、紙(0.17 mm)に見たてた仮想紙状物体を切断するとき、鋏の1ストロークごとに25.0 mm、20.0 mm、20.0 mm 進行するとした。

このとき、通常の切り方と実測値を参考にして、切断時の刃の部分の平均回転角速度を0.33 rad/secと仮定した。また、紙を切断した後に刃を開く平均角速度を1.5 rad/secと設定した。図9は鋏状器具の切断角度と切断位置によって、得られる抵抗力が異なることを示している。紙に

図 9 仮想紙状物体に与えた鋏状切断器具の切断点Pの位置と切断時の抵抗力

Fig. 9. Position of cutting point P and cutting resistance on cutting into a virtual sheet of paper by a scissors-type edged-tool.

対するデバイス本体の並進運動は66.7 mm/secで進行するとした。これらを考慮することにより、ジョイントで検出される回転角に関する切断時の抵抗力を指に与え、切断感を実現した。

画像の切断時に、立体視マウスカーソルを呈示すると、その先端と切断デバイスの先端が一致するので、これを切断点のインディケータとして用いた⁽¹⁰⁾。これにより、仮想物体の立体画像の切り込みの様子を目で追跡しながら切断を行えるし、紙の重みを考慮すれば鉛直方向に垂れ下がる様子も示すことができる。しかし、現在の段階では、被切断物体の区別は切断時抵抗力の値の差のみの表現であり、通常物体を切断するときを感じ得るその物体が備える特性をよりよく表現するには至っていない。ところで切断時抵抗力は、人間が感じる抵抗感の主たる部分であるが、すべてを表わしているわけではない。ここで図9で与えた近似曲線に1%程度の一様乱数を重畳した形で抵抗を与えれば、本来感じることでできる抵抗感により近い感覚が得られる。このことは紙状物体を切断する場合に刃先が正確に順に一方方向に移動するのではなく、前後左右に若干揺れながら切り込み線に沿って移動することによって切断が行われることからみても妥当な結果と言えよう。

よって、これまでの切断デバイスに比べて、鋏状デバイスは単純であるにもかかわらず、仮想物体の切断に現実感を伴うだけでなく、特別な拘束感もなく操作性と精度にも優れていることがわかる。

6. あとがき

本研究では、立体視切断の操作性と現実感の向上を目的として、拘束感の少ない現実の切断用具とほとんど変わらない切断デバイスを製作し、力覚のフィードバックが可能なフォースディスプレイシステムを構成した。また、被切断物体の性質の違いを測定できるシステムが開発できたので力学モデルの作成が可能になった。その結果、操作と力覚フィードバックについて、連続的に滑らかな抵抗変化をオペレータに与えることが可能なことを確認した。その際、切断線の軌跡を表示することによって、仮想物体の立体視切断の現実感を増すことができることも確認した。また、このフォースディスプレイシステムで電磁ブレーキに与える励磁電圧を変えることにより異なる力覚フィードバックができるので、たとえば、層状構造板で各層の素材が異なる仮想物体を切断対象と考えれば、素材に依存した切断感と層間切断時に現われる切断感の変化の実現も可能である。このことは多くの場面で用いられている鋏の切る本質、切り方、切れる感じ、切る喜びなどの表現法の手掛かりになると思われる。ところで、本論文で与えた条件である鋏の片刃の固定や支点の台車への固定などの拘束は現実感を大きく阻害するのでこれを取り除く必要がある。このためには、コンピュータとの間の通信による情報交換、動力の伝達、位置の検出および装置の小型化が不可欠である。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費一般研究(C)および立石科学技術振興財団の援助によるものである。

(平成7年11月29日受付, 同8年4月15日再受付)

文 献

- (1) 廣瀬:「空間知覚と認知工学」, 計測と制御, Vol. 27, No. 1, p. 43(1988)
- (2) 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, 2, p. 235(1990)
- (3) H. Iwata: "Artificial Reality with Force Feed-back: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator", Comput. Graph. ACM SIGGRAPH, 24, 4, p. 165(1990)
- (4) 若松, メディカテック:「模擬手術装置」, 日本国特許庁特許公報(B2), 特公平6-82258(1989年9月11日出願)
- (5) 佐藤・平田・河原:「空間インタフェース装置SPIDARの提案」, 信学論, J 74-D-II, 7, p. 887(1991)
- (6) 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, 4, p. 177(1990)
- (7) H. Wakamatsu and T. Imai: "Stereoscopic display of inside image of rat brain by three dimensional dissection methods", J. Int. Fed. Med. Biol. Eng., 29-Suppl. Part 1, p. 123(1991)
- (8) 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」, 電学論, 111-C, 6, p. 242(1991)
- (9) 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., p. 552(1992)
- (10) 若松・今井:「抵抗感を伴う立体視画像切断システムの開発」, 電学論 113-C, p. 627(1993)
- (11) 若松・青柳・高原:「鉗状器具による紙状仮想物体の切断感覚の実現システムの試作」, 電気学会東京支部新潟支所大会予稿集, p. 149(1993)
- (12) 安名・若松・高原:「立体視医用画像の切断システム—鋸状デバイスの開発と切断感覚の実現—」, 電気学会研究会資料, MBE-94-5, p. 37(1994)
- (13) 安名・若松・高原:「ハサミによる物体の切断感の定量化とフォースディスプレイ」, 第34回日本エム・イー学会大会講演会論文集, p. 463(1995)
- (14) H. Wakamatsu, S. Aoyagi, K. Takahara & M. Yasuna: "Force display system for realization of cutting-in feeling of virtual sheet object by scissors", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. & Autom., 1, p. 950(1995)
- (15) 日本塑性加工学会編:「せん断抵抗—プレス加工の基本技術—」, コロナ社(1992)

若松 秀俊 (正員) 昭和47年, 横浜国立大学大学院修士課程修了。同年, 東京医科歯科大学助手。足利工

業大学電気工学科助教授を経て, 平成3年より福井大学工学部電子工学科教授, 現在東京医科歯科大学医学部教授。昭和48年-50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。平成6年オレゴン州立大学客員教授。平成7年釜山国立大学客員教授。平成8年天津大学客員教授(工学博士)。

安名 正和 (准員) 平成6年, 岡山大学電気電子工学科卒業。現在東京医科歯科大学医学系研究科博士前期課程在学中。電子情報通信学会, 日本エム・

イー学会会員。