

# 仮想物体の変形破壊の研究を振り返って

Review of Distortion and Destruction of Virtual Objects Using Various Kinds of Haptic Systems

本間 達, 若松 秀俊

Satoru HONMA and Hidetoshi WAKAMATSU

東京医科歯科大学 大学院保健衛生学研究科

(〒113-8519 東京都文京区湯島 1-5-45, hommtec@tmd.ac.jp)

**Abstract:** In order to represent 3D brain inner structure in stereoview, some concerning studies had been started with virtual materials proposed as triangular, later tetrahedron mosaics in our laboratory. The cutting methods by 3D-mouse and cutting tools (scissors, knife and saw) were proposed together with viscoelastic (later visco-elasto-plastic) models of materials. To realize cutting feeling and reactive force of distortion and destruction of materials by the appropriate operation in the attendance of reality, physical processes were described for the force display systems by using 3 kinds of cutting tools. Our pertinent studies since 1989 will be briefly reviewed in this occasion of the first workshop on force display systems.

**Key Words:** *force display system, virtual material, elasto-visco-plastic model, cutting tools, real-time destruction*

## 1. はじめに

解剖学の教科書に平面的に描かれた臓器、とくに脳の解剖図から立体構造と各領域の相対的位置関係を把握するのは医学生にとって容易ではない。立体視がこれを解決するという考えから、両眼視差を利用して立体視操作する人工現実感の研究が我々の研究室ではじまった。当時のコンピュータの演算処理能力で実現するために、3次元構成したラット脳を三角面素法で表示し、さらに内部構造を外部から観察するために適当に開口して内部の位置関係を直感的に理解するための手法について模索した。この中で、模擬手術装置を用いて加工する手法や、三次元立体視マウスを用いて現実に存在しない物体を加工する手法を考案し応用した。この経験から視覚に次いで触覚も加えることは上記の目的に有効であると考え、特に抵抗感を与える実用的な装置として、加工器具型力覚表示システムの開発に着手し、最初にナイフ型デバイスを開発した。ついでハサミ型デバイスを開発し、この中で、切離前後の仮想物体の変形等を物理法則に基づき粘弾性固体を表現する Kelvin-Voigt モデルで表現する手法を開発した。このモデルで構築した物体と器具の相互作用による切離時の抵抗感を与える手法を検討した。さらに、ナイフとノコギリの切離モーメントの発生について検討し、より現実感を伴う方法に進化させ、並行してノコギリ型デバイスの開発も行った。ところで物体を「切る」ということは、物体を整形する意図のもとに形状を変化する破壊である。ナイフの場合は切り裂く、ハサミの場合は断ち切る、ノコギリの場合

は切削するなどの表現が、これらの器具による物体の破壊の機序をほぼ表現することができた。このような視点から、物体の破壊をより自然な形で表現するために、物理法則に則って破断するモデルについて開発した。引き続き Kelvin-Voigt モデルに塑性を組み合わせ、実時間での破壊表現を可能にする粘弾塑性体モデルを開発し、仮想物体同士の間相互作用による実時間の破壊を実現した。現時点では操作器具を物理モデルで構築して、応用する研究を進行中である。

本発表では、研究会の第1回ということ踏まえ、著者らが1989年より開始し取り組んできた一連の人工現実感の研究を振り返ってみたい。

## 2. 切離器具型力覚表示システムの構築

力覚表示システムでは操作デバイスが入力装置であると同時に力覚を表示するための出力装置でもある。このため、物体および操作に用いる器具の特性を十分に備えつつ、エンコーダのような単純なセンサでその動態を検出し、モータなどのアクチュエータで力覚表示を行う。操作デバイスの設計・開発は再現する器具の解析に基づいて行う。器具がもつすべての特徴を再現するためには自由度を大きくすることが必要であるが、重量の向上による操作感覚の障害を回避するために、一部の動態は簡略化してデバイスを軽量化し、ソフトウェアでこれを補完・支援する必要がある。このため、実際の器具を想定した専用デバイスを、センサ出力の計測およびアクチュエータの制御プログラ

ムも含めて開発しなければならない。

### 2.1 三次元マウスを用いたラット脳の加工

仮想物体に復元不可能な変形・加工を施す研究は 1991 年に論文が発表されている。これは、両眼視差を利用して立体視しながら仮想のラット脳に  $z$  軸方向の移動も考慮した三次元立体視マウスにて図 1 のように頂点の位置を指定した多角形の穴を開け、その穴から内部の様子とくに脳室を観察することを可能にした例である。この当時の PC は処理速度が現在と比較して非常に遅く、穴をあけてから画像を再合成して描画するのに数分の時間を要した [2][4][5][6]。

若松らはこの研究の中で、仮想臓器の模擬手術で力覚を与えるために模擬手術装置 [1] を考案し 1989 年に特許申請している。これは 3 方向に張ったワイヤにより把持したポインタにテンションを加えて任意の方向に力覚を生ずるものである。同様の原理によるものを佐藤ら [3] が SPIDAR としてほぼ同時期に発表している。

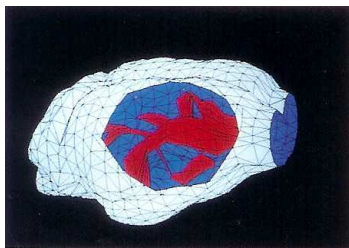


図 1 一部を切除した場合のラット脳と脳室の三次元画像

### 2.2 ナイフ型操作デバイスの開発

上記の三次元マウスは  $z$  軸方向の移動を左右のマウスクリックによって実現していたので、空間内での直感的な指示が困難であった。また仮想物体を操作した時の力覚を提示するのが不可能であったので、これらの点を解決するためにナイフ型デバイスを独自に開発し [7][8][11]、1992 年に論文を発表した。このデバイスはその重量を操作者が意識することなく力覚のみを得ることができるようにパラレルリンク機構を採用した構造とし、アームの可動範囲内で任意の座標を直感的に指示可能であった。またデバイスの 3 軸のそれぞれに電磁ブレーキを装備し、操作者に力覚を提示可能とした。このデバイスをもちいて仮想空間内で球状物体を加工した。なお、力覚提示機構としてブレーキの代わりにモータを使用しているが、ほぼ同様の構造を持つものとして広く知られているのが PHANTOM である [9]。

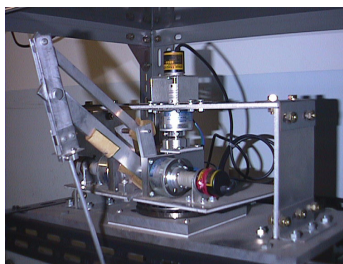


図 2 ナイフ型デバイスの概観

### 2.3 実測データにもとづくハサミ型デバイスへの抵抗感の表示

ナイフ型デバイスに続いてハサミ型デバイスの開発を行った。ハサミは切る方向が一方であるので、図 3(a) のような線路上を直線的に運動する台車によりこの運動を表現するデバイスを開発して 1996 年に論文を発表した [12]。このデバイスにより表現する力覚を与えるために、紙や皮などの材質で出来たシート状の物体をハサミで切る時の抵抗力を、実測値にもとづいたハサミの開き角度の関数として与えた。

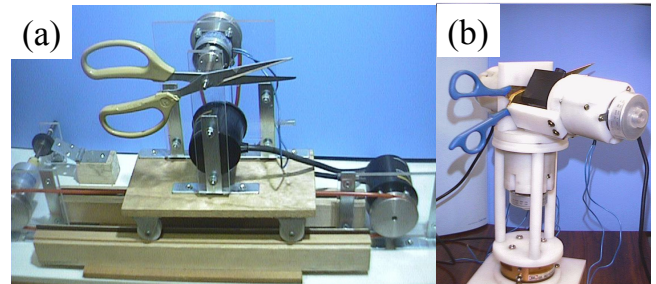


図 3 ハサミ型デバイスの概観

### 2.4 物理モデルにもとづく仮想物体の構築と力覚の表示

ハサミで加工された物体の変形の様子を表示するために粘弾性固体を表現する Kelvin-Voigt モデルで仮想物体を構築し、実時間で切断が可能な仮想物体を構築した。またこのとき、加工する時の力覚について検討し、物体の変形時に生ずる力を器具が受け、これと釣り合うように操作者が与える力の合力を力覚として感じると考えた。ここから、弾性体の破断による破壊を意図的に生ずることが、すなわち切離という事象の本質であると考え、切離の瞬間における物体の動態を思考実験により追跡し、モデルに与えた弾性・粘性・密度などの各パラメータとおよびハサミの大きさ・位置・姿勢などを用いて、切る瞬間の力の発生を解析的に関数として与える手法を開発した [13][14][15]。さらに、空間内を移動して物体にハサミを接触させることを考慮して、水平方向の加速度を測定するセンサを組み込み、図 3(b) に示すような新しいハサミ型デバイスを開発した。これによりはじめて仮想物体を切る時の力覚に現実の物体の物性を反映する根拠を与え、さらに実時間で切離する際の演算時間をほぼ 0 とすることができた。

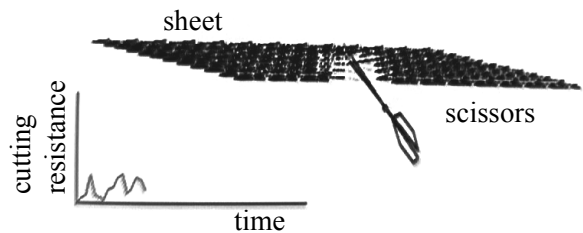


図 4 仮想ハサミによるシート状物体の切断の様子と得られる抵抗力

## 2.5 ナイフの切離モーメントの解析的表現

ハサミにおいて切る瞬間の力の発生を解析的に表現したことは、力覚表示システムにおいて極めて有効であった。これまでにデバイスとして開発してきたナイフについても同様の手法が適切であると考え、ナイフが物体を切る瞬間の変形について解析を試みた。このとき、ナイフの運動をデバイスの運動方向に分解したので、必ずしも現実のナイフの動態を全て表現するものではないが、上記の力覚表示システムにおいては有効であることが示された。ところでデバイスに組み込んだ電磁ブレーキはトルク制御のため、切離時に生じる力によって基準点まわりのモーメントが発生していると考え、これを切離モーメントと表現する[17]。

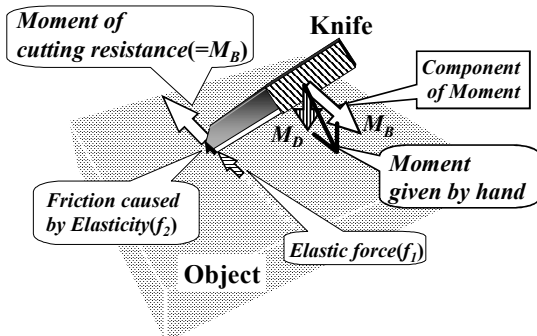


図5 ナイフによる物体の切離時の力およびモーメント

## 2.6 ノコギリの切離モーメントの解析的表現

ハサミ・ナイフについてのシステムを開発したので、切離という事象を解明するためにノコギリについても解析を行った。ノコギリには歯の形状によりたてびきとよこびきに分類されるが、歯がナイフに近い形状であるよこびきを選択した。ノコギリで切り進む時、物体にたわみを生じてノコギリの胴が挟まれ、生じる摩擦によってノコギリの運動を妨げるモーメントを生じる。歯による物体の切離モーメントと摩擦によるモーメントの合成によりノコギリ全体での切離モーメントとなることを示した[16][18]。モータを内蔵したノコギリ型デバイスを開発し、力覚の表示に有効であることを示した[19]。

## 2.7 三種類の切離デバイスを組合わせた力覚表示システム

物体加工の多くは切離器具を単独で用いるが、物体に細かい加工を施す場合、複数の器具を使い分けことがある。また、物体の形状により使用する切離器具の選択は、操作者の熟練度や嗜好によって異なる場合がある。そこで、これまでに開発してきた切離器具を組合わせ、状況にあわせた切離加工を実現する力覚表示システムを開発した[15]。厚みのある物体をハサミで切る場合を想定し、ナイフの刃と同等のものがハサミの刀身にあるとして、両理論を組みあわせ、ナイフ・ハサミ・ノコギリについて統一的な解析

的手法による切離モーメントの表現手法について検討した。このシステムを使っている様子を図9に示す。

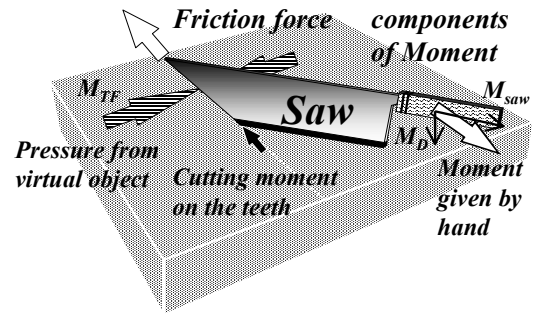


図6 ノコギリによる物体の切離時のモーメント

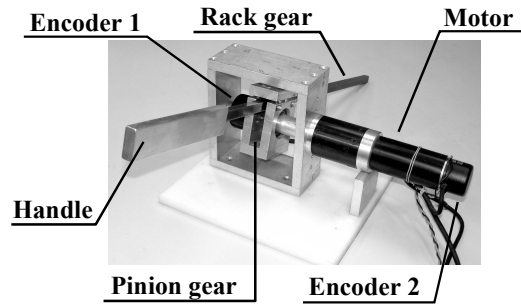


図7 ノコギリ型操作デバイス

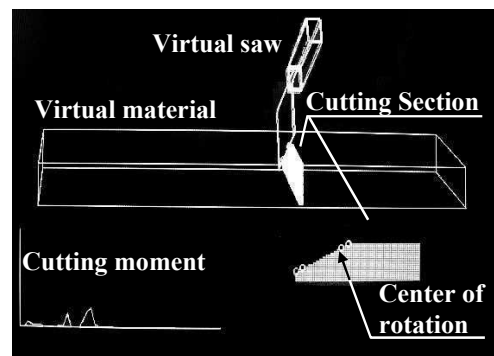


図8 仮想ノコギリによる仮想物体の切離と得られる切離モーメントの様子

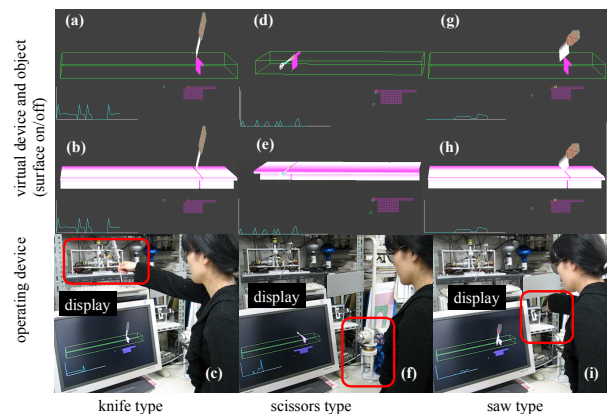


図9 仮想切離デバイスによる仮想物体の切離と得られる

2.8 破壊を表現可能な物理モデルの構築

仮想空間内での変形・破壊を実時間で表現するために、物理モデルで仮想物体を構築した。計算機単独のシミュレーションと異なり、人間の操作により仮想空間に介入するために、単純化したモデルによる実時間での計算を実現する。破壊をとまなう場合には運動方程式の再構築が必要であり、実時間でこれを実現するために、本間らは粘弾性固体を表現した、Kelvin-Voigt モデルに塑性を組み合わせた粘弾塑性体モデルを提案している[20]。このモデルでは、正四面体構造の各辺にモデルを、頂点に質点をそれぞれ配置した基本構造を連続的に接続して任意の形状の物体を構築することが可能である。また、物体同士の相互作用による変形・破壊も表現できる。このモデルは PC でも実時間での演算が可能であることが確認されており、力覚表示システムへの応用に適しており、これを用いた研究を現在進めている[21]。

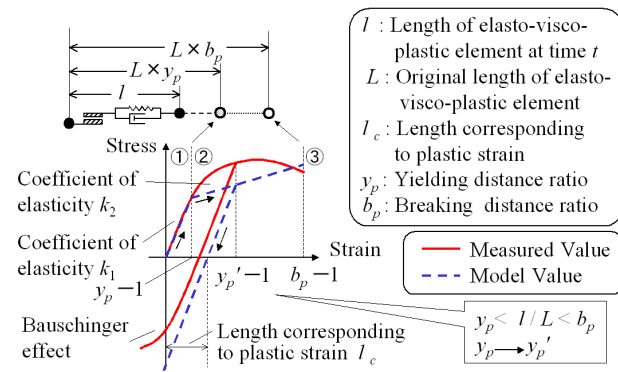


図 10 実測データに基づいた塑性モデルの概要

3. おわりに

力覚表示システムは仮想空間内にある物体の位置・姿勢・形状を視覚情報として提示すると同時に、操作器具が受ける反力を、デバイスを介して力覚として表現する。可能な限り五感の全てに情報をフィードバックするのが望ましいが、最低限、上記の二感に対して同期した情報を表示しなければならない。すなわち視覚情報作成時に利用する物体の情報とデバイスの位置姿勢情報を同時に用いて、実時間で反力を計算し、描画と力覚表示を行う必要がある。仮想空間内の物体と操作器具は現実にとりえない位置・姿勢・形状をとる場合がある。これを避けるために物体の変形が一定の限界を越えた時点での物体の破壊を考慮する必要がある。具体的には、それぞれナイフ、ハサミ、ノコギリであり、これらの作用機序にもとづいた力覚表示システムの開発を行った。さらに、破壊できる仮想物体を構築するために、物理モデルについての研究も行い、粘弾性固体を表現する Kelvin-Voigt モデルに、塑性を考慮した粘弾塑性体モデルも提案し、力覚表示システムに応用している。

[1] 若松：模擬手術装置，公開特許公報平3-98080,出願 1989年9月11日

[2] 北村, 今井, 若松, 澤村：ラットの脳解剖図の3次元合成と立体視，電気関係学会北陸支部連合大会講演会論文集, 116, 1989

[3] 佐藤,平田,河原田：仮想作業空間のためのインタフェースデバイス—SPIDAR—, 信学技報, PRU 89- 88, 51 - 58,1989

[4] 今井,若松：両眼視差を用いた脳画像の三次元立体視切除, 電子情報通信学会報告, IE90-58,7-13,1990

[5] H.Wakamatsu,T.Imai：Stereoscopic display of the inside image of rat brain by three dimensional dissection methods ,J.Int.Fed.Med.Biol.Eng.,29- Suppl.Part1,123,1991

[6] 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,電気学会論文,111-C6,242-248,1991

[7] H.Wakamatsu,T.Imai,K.Okada：Artificial realization of reactive force feeling on stereo-scopical cutting of image of multi-layer sphere,Proc.2ndInt.Conf.Image Process.,552-556,1992

[8] 若松,今井：抵抗感を伴う立体視画像切断システムの開発,電気学会論文誌,Vol.113-C,No.9,627-634,1993

[9] T H Massie, J K Salisbury：The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, Symposium on Haptic Interfaces ,1994

[10] 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.,1,950-955,1995

[11] H.Wakamatsu：Operational systems of stereoscopic cutting 3D virtual objects with reactive feeling , Proc.IFAC 13th World Congr., Biomed. Control,409-414,1996

[12] 若松,安名：鉋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.電気学会論文誌,Vol.116-C, No.10 , 1163-1168,1996

[13] H.Wakamatsu,X.Zhang,S.Honma：Teleoperational force display system in manipulation of virtual object using scissors-type cutting device,Proc.3rd Asia-Pacific Conf. Control.Meas.,312-316,1999

[14] 若松,張,本間：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,電気学会論文誌,Vol.119-C,No.10,1126-1132,1999

[15] H.Wakamatsu,S.Honma.Teleoperational force display system in manipulation of virtual object using various type of cutting devices,Proceedings of the Sixth International Conference on Methods , Models in Automation,Robotics, 631-636, 2000

[16] 本間, 若松：ノコギリによる切離抵抗力の表現, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-A,No.6,860-869,2001

[17] 本間,若松：力覚表示システム構築を前提とした粘弾性体のナイフによる切離モーメントの表現,計測自動制御学会論文集,Vol.40,No.4,459-465,2004

[18] 本間,若松：力覚表示システムに応用可能なノコギリの切離モーメントの算出,日本バーチャリアリティ学会論文誌,Vol.9,No.3,319-326,2004

[19] 本間,若松：異なる種類の切離器具を用いた力覚表示システムの開発,ヒューマンインターフェース学会研究報告集,Vol.9,No.3,23-24,2006

[20] 本間,若松：粘弾塑性体モデルで表現した物体間の相互作用による破壊,計測自動制御学会論文集, Vol.44, No.7 , 600-608,2008

[21] 本間, 若松：物理モデルで構築したナイフによる物体の加工, 電気学会全国大会講演論文集第3分冊, 35(3-026), 2008