

医療教育訓練機器の開発のための統合型切離力覚表示システム

正員 本間 達* 正員 若松 秀俊*

Unified Haptic System Using Three Kinds of Cutting Devices for the Basic Use of Medical Application

Satoru Honma*, Member, Hidetoshi Wakamatsu*, Member

Most training simulators of surgery have simply required manipulation of organic models with their deformation by a single operating device. In order to operate them by various kinds of operating devices, we hereby propose a new type of force-display system based on the combination of the haptic cutting systems of knife, scissors and saw, considering the dynamics of cutting operation of materials mathematically analyzed from their corresponding physical viewpoints. The proposed system is well confirmed to represent the dynamic deformation of virtual objects during their operation inclusive of their incidental cutting force.

キーワード：ナイフ，ハサミ，ノコギリ，仮想物体，切離モーメント，ヒューマンインターフェース

Keywords : knife, scissors, saw, virtual objects, cutting moment, human interface

1. はじめに

刃物の切れ味が生活に与える影響は大きく、その評価は古くから行われてきた⁽¹⁾。顕微鏡で刃物と物体の接触部を拡大した観察⁽²⁾⁽³⁾や、有限要素法による力学解析⁽⁴⁾などにより、刃物単独の性能を評価する手法について検討されてきた。このためのアプローチの一つとして、人工現実感の技術を用いて、仮想空間内で仮想の刃物を構築し、その操作を模擬する研究がある^{(5)~(7)}。これらの研究では、汎用の入力装置を用いて操作した仮想の器具による、「切るという動作」の軌跡に注目して、物体を分割する数学的手法に重点がおかれている。また、仮想空間内で仮想物体を操作したときの感覚を操作者にフィードバックするために種々の操作デバイスが開発されてきた^{(8)~(11)}。これらの研究から、仮想空間内で物体操作を行なうときの入力装置であり、力覚表示するための出力装置でもある操作デバイスを適切に用いて、操作者が操作感覚を得る手法が示されてきた。

著者らは、仮想空間内で物体を切ったときの力覚を表現するためのデバイスとして、ナイフ型^{(12)~(14)}、ハサミ型^{(15)~(18)}、ノコギリ型⁽¹⁹⁾の操作デバイスを用いた力覚表示システムを開発してきた。これらのシステムでは仮想の器具で仮想の物体を切ったときの視覚的感覚を得るために、物性モデル⁽²⁰⁾⁽²¹⁾の連続的な配置による仮想物体の構築法について検

討し、実時間で任意に破壊を表現可能な汎用物性モデル⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽²²⁾を開発した。また視覚表現と同期して、仮想物体に与えた物性値と仮想器具の位置姿勢を表現するパラメータから得られるモーメント⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾を操作デバイスに組み込んだアクチュエータに出力し、操作者に適切な操作感覚を与える手法の検討から、刃物の特性だけでなく使い方も切れ味に影響することを示してきた。

ところで、現実においては、単独の器具で加工を行なうことは少なく、複数の器具を組合せて相互の長所を生かすのが一般的である。医療の現場でも複数の器具を用いて「作業」することが多く、例えば整形外科の領域での骨整形術では、術部を開創するためにメス、ハサミなどを駆使し骨の整形にはノコギリの他、ノミ、ヤスリすらも用いて「加工」を施す場合がある。それにもかかわらず、人工現実感で提案されている医療シミュレータの多く⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾は、物体の破壊を考慮しておらず、単独の器具もしくは手指を用いて接触したときの弾性力を提示するにとどまっている。このため現実では臓器などが損傷するような力を加えた場合にも、それに対応する反力が得られるのみなので、慎重さが要求される医療行為の訓練として必ずしも適切であるとは言いがたい。そこで、本研究では将来の教育用医療訓練装置開発を念頭において、統一的に扱うために、多数の器具を同時に操作して物体を加工する力覚表示システム開発のための基礎研究を行う。すなわち、切り進む速度やそのときに感じる抵抗感に応じて、上述の3種類の器具を適切に選択しながら、単一の物性をもつ物体を切離するための力覚表示システム⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾を開発する。このシステムでは、「切

* 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
Tokyo Medical and Dental University, Graduate School of Health
Care Sciences
1-5-45, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8519

る」という行動における、器具と物体の位置姿勢の対応のみならず、特に物体の物性値と器具ごとの特性により生ずる抵抗感覚の違いを表現して、操作者がその感覚に応じた器具の任意の使い分けを実現する。このために、器具ごとに解析してきた、切離器具と物体の位置姿勢変化に伴う、切離という物体の塑性変化を統一的に表現し、ハサミの刀身に存在する刃でナイフのように切るなどの表現を可能にする。すなわち、厚みのある物体をハサミで押しつぶしながら、あるいはハサミを滑らせながら切るという表現を可能にする。これにより、ハサミ、ナイフ、ノコギリで切るときに発生するモーメントを統一した理論により表現し、器具の変更によらず、連続的な破壊の表現を可能にする。

2. システムの開発

〈2・1〉 切離の定義 物体を「切る」ために用いる器具を、その機序により大別するとナイフ型、ハサミ型、ノコギリ型の3種類に分類される[†]。ナイフ型の器具を用いて物体を切る場合は「切り裂く」、ハサミ型の場合は「断ち切る」、ノコギリ型の場合は「切削する」とそれぞれ表現する。これらの表現の違いは、各器具ごとの作用機序の違いを示しているが、物体を「切り離す」という現象を統一的に論ずるとき、表現が統一されていないのは不都合である。そこで、本論文では動作の対象物である物体を中心に現象をとらえ、「切離」という単語の定義により表現を統一して扱う⁽²³⁾⁽²⁴⁾。

〈2・2〉 システムの概要 ナイフ型、ハサミ型、ノコギリ型の3種類の切離器具を適切に選択しながら、仮想物体を切離するシステムの概要を Fig.1 に示す。また、実際の操作デバイスを Fig.2 に示す。操作者がこのデバイスを操作したときに、これに対応する仮想の切離器具が仮想空間内にある仮想被切離物体を切離加工する。各デバイスに組み込んだロータリーエンコーダ（MICROTECH 社製、MEH-815-1000、1000 カウント/360[deg]）の出力を、カウンターボード（CONTEC 社製 CNT24-4A(98)H）を介して測定制御用の PC 1（NEC 社製 PC9821Ra266、Pentium II 266MHz、MS-DOS6.2、MS-C6.0）で測定する。測定データは serial-LAN コンバータ（BITS 社製 BLC-100）を介して PC 2（EPSON 社製 NT340、Pentium M 760 2GHz、WindowsXP SP3、Visual C++ 2005EE）に送出する。送られてきた各デバイスの情報に基づいて PC 2 で仮想空間内における仮想デバイスの位置姿勢を決定する。仮想物体の形状を考慮してデバイスによる切離加工を行い、ディスプレイへの画像表示を行う。同時に切離時に発生するモーメントを算出し、PC 2 から PC 1 へ制御データを送信する。PC 1 はこのデータに基づいて各デバイスに取り付けられたモータもしくは電磁ブレーキを制御する。具体的には、ドライバ経由のトルク制御モータはドライバに入力する電圧に比例したトルクを出力し、電磁ブレーキは入力電圧に比例した制動トルクを生じるの

[†] 例えば包丁や刀はナイフ型、押切はハサミ型として分類可能である。

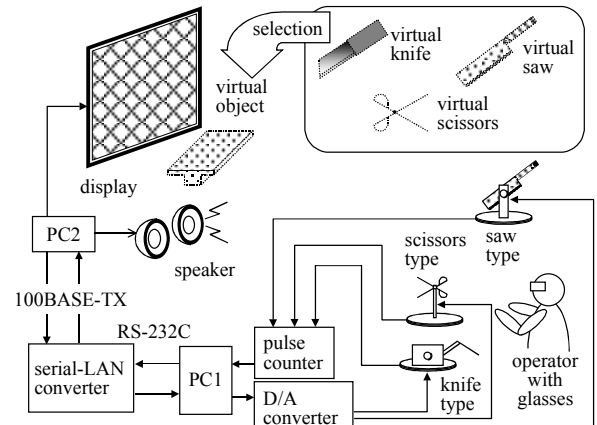


Fig. 1. Outline of force-display system with three kinds of cutting devices.

Magnetic Brake

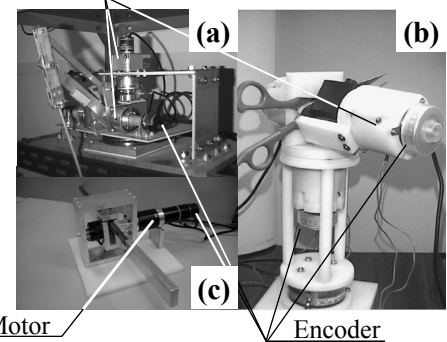


Fig. 2. Overview of actual cutting devices. (a) Knife-type device (b) Scissors-type device (c) Saw-type device

で、PC 1 から D/A 変換器を通じて、後述の切離モーメントに比例した電圧信号を送信する。これにより操作者は切離操作感覚を得る。

〈2・3〉 被切離物体の形状と性状 一般的にはナイフ、ハサミ、ノコギリの切離機序の違いに基づく切離抵抗感や、一動作で切り進む長さによる作業効率などから、経験的にこれらのデバイスを使い分けるので、本研究で開発するシステムでは、デバイスごとの特性を明確に区別することが必要である。そこで、抵抗感覚に影響を与えやすい物体の厚みのみが切離部位により変化する物体を被切離物体として構築する。本研究で対象とする被切離物体を構成する物質は均一な物性をもつ硬質ゴム状の物体を仮定し、粘弾塑性体モデルで仮想物体を構築する。その断面形状は Fig.3 に示すように薄い板と厚い板を組み合わせた変形 T 型とし、切離はこの断面に平行な面（以下、切離面と表現する）に沿って行なう。すなわち、切離器具による加工操作によって、物体に溝を生じるので、その後の加工においては、多くの場合、切離器具の操作方向がこの溝により限定されることを前提とする。

また、仮想の被切離物体は粘弾塑性固体モデル⁽²²⁾の集合として考え、その接続状態を表わす状態変数⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽²²⁾を記録

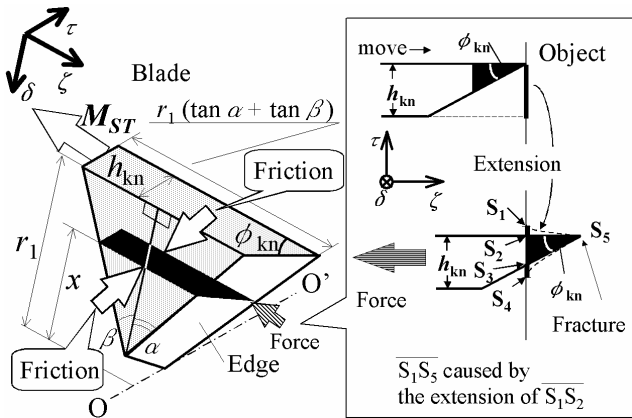


Fig. 5. Relation between an edge and an object at the moment of cutting by knife and saw.

〈3・2〉 ナイフおよびノコギリの歯による切離モーメント

ノコギリは木目と平行に切離するたてびきと木目と垂直に切離するよこびきがある。よこびきのノコギリでは、歯の形状がナイフと同様の刃なので、同一の理論的取り扱いが可能である⁽²⁴⁾。本研究では、ノコギリがよこびきであるとして切離モーメントを得る。

刃による物体の切離では、物体内部にこれを押し込む、すなわち押し入ることで沈降を生じ、手前に引くことにより切離する⁽²³⁾⁽²⁴⁾。Fig.5に示すように、刃が手前に移動して物体を伸展し、弾性限界に達した部位で破断を生じる。押し入る時の刀身と物体のなす角度に応じて、刃の先端を通る押し入方向（図中 δ 軸方向）の直線によって、刃先の角度が α , β [deg] に分割される。この α , β と刃の数 n , および押し入る力によって生じるモーメント（以下、押し入モーメント） M_D [Nm] を用いて刃の沈降深度 r [m] を $r = \sqrt{2M_D/nEh \tan(\alpha + \beta)}$ により得る。ナイフはこの沈降深度で物体を少しずつ切離する。ノコギリの場合、この r とエンコーダ出力から得られるノコギリの引込角 θ_{saw} によって切離点の移動量が決定する。ただしナイフの場合 $\alpha + \beta = 60$ [deg] であり、エンコーダ出力から α を得る。また刃の数 n_{kn} は $n_{kn}=1$ であり、 $M_D = M_{D,0}$ である。ノコギリの場合、 $\alpha = 60$ [deg], $\beta = 0$ [deg] であり、刃の数 n_{saw} は物体にノコギリが接している長さ C_L [m] と歯の切離方向の長さ T_L [m] を用い、ガウスの記号により $n_{saw} = [C_L/T_L]$ である。ノコギリの歯は胴に付属しているので歯の沈降深度の最大値 $r_{Tmax} = T_L \cot \alpha$ であり、押し入モーメント M_D は、後述する、ノコギリの胴にかかる摩擦モーメント M_{TF} [Nm] により $M_D = M_{D,0} - M_{TF}$ のように補正される。

上述のように得られた r と刃の鋭利さを表す角度 ϕ [deg] を用いて、刃の切離モーメント M_{ST} [Nm] が以下の(1)式で与えられる⁽²³⁾。

$$M_{ST} = \frac{1}{2} h^2 Er n \cos \phi \{ E_s \sin \phi / (2 \cos \phi + E_s \sin \phi) \}^2 + \frac{1}{2} \mu h Er^2 n \tan(\alpha + \beta) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 n は切離に関わる刃の数を表わしており、ナイフのとき $n = n_{kn} = 1$ であり、ノコギリのとき $n = n_{saw}$ である。また刃の鋭利さ ϕ はナイフのとき $\phi = \phi_{kn}$ でありノコギリのとき $\phi = \phi_{saw}$ である。同様に刃の厚み h はナイフのとき $h = h_{kn}$ でありノコギリのとき $h = h_{saw}$ である。ただし、本研究では、刃の厚みは器具によらず同一、すなわち $h_{kn} = h_{saw} = h_{sci}$ であるとする。

〈3・3〉 ノコギリによる切離モーメント ノコギリの切離モーメント M_{saw} [Nm]⁽²⁴⁾ は上述の歯による切離モーメント M_{ST} [Nm] および胴に加わる摩擦モーメント M_{TF} [Nm] を用いて、解析的に以下のように表現されることが示されている。

$$M_{saw} = M_{ST} + M_{TF} \dots \dots \dots (2)$$

ただし摩擦モーメントは、分断された物体が、ノコギリから与えられたモーメントにより物体に生じるたわみで移動し、ノコギリの胴をはさむときの摩擦によって生じるモーメントであり、以下の(3)式で与えられる^{(24)††}。

$$M_{TF} = \mu a E D_{saw}^2 \tan(\xi_2 - \xi_1) / 2 + \mu \gamma v_{cut} \dots \dots \dots (3)$$

ここで D_{saw} はノコギリの背から歯先までの長さ d_{saw} を用いて $D_{saw} = d_{saw} / \sin \theta_{saw}$ で表される見かけのノコギリの長さである。また、 v_{cut} [m/s] はノコギリを手前に引くときの切離速度である。 ξ_1, ξ_2 はノコギリを引くときにかかる力によって生じた物体のたわみを 2 本の直線で折れ線近似した場合に、各直線がノコギリの胴の面に垂直な方向となす角度であり、たわみの度合を示すパラメータである。具体的には右端からの切離位置 l_1 ($l_1 \leq L/2$)、最大たわみ位置 $l_2 = \sqrt{(L^2 - l_1^2)}/3$, $F_1 = (M_D \sin \theta + M_{saw} \cos \theta) / C_L$, 切離残量 x , を用いて表わされる切離位置 l_1 におけるたわみ量 $e_1 = 4F_1 l_1^2 / LEax^3$ および最大たわみ量 $e_{MAX} = 4F_1 l_1^3 / LEax^3$ により $\tan \xi_1 = (e_{MAX} - e_1) / l_3$, $\tan \xi_2 = e_1 / l_1$ が成立することが示されている⁽²⁴⁾。ただし $l_3 = L - l_1 - l_2$ である。

〈3・4〉 ハサミによる切離モーメント

切離モーメントの発生は被切離物体の伸展および圧縮による弾性力、切離速度による粘性力、および摩擦力によって発生すると考える。ハサミは持ち手と一体となっている同一形状の刀身が 2 枚 1 組で向かい合わせに支点で接続している。支点から先端まで Fig.6 に示すように刀身に沿って刃が形成されている。以下ではまず、(I) これまでに解析した刀身に刃が形成されていないとしたハサミで、厚みのないシート状物体を切離する場合のモーメントを表わす理論式⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾について述べる。これはハサミの交差による力を利用して粘弾塑性体を弾性限界まで伸展し、破断を生じる場合である。次に、(II) 本研究で新たに上述の理論式を基礎として、厚みのある物体を刀身に沿って刃が形成されているハサミで切離する時の理論式を構築する。すなわち、ナイフが物体に切り込む場合の理論式と組み合わせ、ハサミの両刀身の交差によ

†† 本研究ではこのたわみが微小であるので⁽¹⁹⁾、切離モーメントの導出においてのみ考慮し、画像表示においては考慮しないとした。

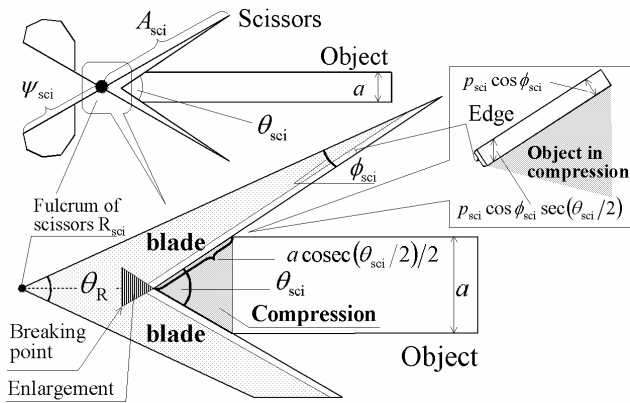


Fig. 6. Cutting condition considering the thickness of an object and edges of scissors blades.

ってなす角度（以下交差角），ハサミの刀身の厚み，ハサミの刀身にある刃の鋭さ，物体の見かけの弾性限界などによって決定する条件により，ハサミを滑らせて切離することが出来る条件とそのときの切離モーメントを解析時に導出する。

(I) ハサミの刀身の交差によりシート状物体を伸展する場合の切離モーメント

被切離物体の厚さ a [m]と刀身にある刃を考慮しないとき，ハサミによる切離抵抗力 R_T [N]が，切離点からハサミの支点までの距離 σ [m]，両刃の間隔 ε_{sci} [m]，切離角速度 ω [deg/s]，支点から手元までの長さ ψ_{sci} [m]，交差角 θ_{sci} [deg]を用いて，以下の(4)式で表現できることが示されている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

$$R_T = [\sigma \varepsilon_{sci} (E_s - 1) \{ E \varepsilon_{sci} (E_s - 1) + 2\gamma\omega\sigma \} \cot \theta_{sci}] / 2\psi_{sci} \quad \dots\dots\dots (4)$$

本研究では厚みのある物体を切離するので，ハサミの刀身にはさまれた物体が圧縮され，刀身の交わる交差点とハサミの支点の間にある破断点まで伸展し，破断点において粘弾性体が弾性限界を逸脱して切離を生じると考える。

伸展による支点まわりのモーメントは(4)式より $R_T \psi_{sci}$ を得る。また，圧縮によるモーメントは $\{Ea^2 \varepsilon_{sci} \cot(\theta_{sci}/2)\} / 4$ と導出されるので⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾，ハサミによる切離モーメント M_{sci} [Nm]を以下のように得る。

$$M_{sci} = R_T \psi_{sci} + \{Ea^2 \varepsilon_{sci} \cot(\theta_{sci}/2)\} / 4 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで，ハサミの位置姿勢を表わすパラメータである σ ， ω ， θ_{sci} はエンコーダの出力から得る。

(II) ハサミの刀身にある刃の切離効果を考慮した切離モーメント

上述の理論式ではハサミの刀身にある刃を考慮していないが，現実のハサミでは，交差角を固定して，ペーパーナイフのように滑らせて薄い物体を切離することがある。このように，切離モーメントを考える際に，刃による切離効果を無視することができない。

ナイフの切離モーメントにおいて，刃が切離直前に粘弾性体を伸展した弾性力と，被切離物体と刀身側面の摩擦力

が切離モーメントを生じると考えた。ハサミの刀身にある刃についても同様に考える^{†††}。

交差角 θ_{sci} が小さくなると厚みのある物体に刀身上の刃が押し入れ，弾性限界により破断を生じる。物体の切離を生じる瞬間の，物体内部に食い込んだ Fig.5 中に示す S_3S_5 に相当する刃の稜線の長さ p_{sci} は以下の(6)式で近似的に表わされる⁽²³⁾。

$$p_{sci} = h_{sci} E_s / (2 \cos \phi_{sci} + E_s \sin \phi_{sci}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ハサミの上下の刃が物体を対照的に圧縮するとしたので，物体に対して $\theta_{sci}/2$ の角度をもつ

したがって，刀身が物体に対して垂直に食い込む長さは $p_{sci} \cos \phi_{sci} \sec(\theta_{sci}/2)$ である。

これより，物体の厚さによって，切離機序が異なることが示唆される。

① $a < p_{sci} \cos \phi_{sci} \sec(\theta_{sci}/2)$ の場合，すなわち，物体の厚さが薄く，ハサミの刃の切離効果により物体に切離を生じるより先に，(3・4)節の(I)で示したように，圧縮された物体がさらに逆方向に伸展して破断を生じるので，切離モーメント M_{sci} は(5)式で表わされる。

② $a \geq p_{sci} \cos \phi_{sci} \sec(\theta_{sci}/2)$ の場合，すなわち，物体が厚く，ハサミの刀身の刃により，物体を切離する場合，上下2本のナイフによる切離として切離モーメントを得ると考える。

すなわち，(4)式では伸展による弾性モーメントと切離速度に応じて生じる粘性モーメントの和として切離モーメントを得るが，物体の厚みおよび刃の切離効果を考慮して弾性モーメントの代わりに2枚の刃による切離モーメントを適用する。具体的には(1)式を応用し，ハサミの刀身の幅 d_{sci} および切離時に刀身上の刃と物体が接触している長さ $a \operatorname{cosec}(\theta_{sci}/2)/2$ を考慮して，以下の切離モーメント M_{sci-bl} を得る。

$$M_{sci-bl} = a \operatorname{cosec}(\theta_{sci}/2) \{ E \cos \phi_{sci} (p_{sci} \sin \phi_{sci})^2 / 2 + \mu E h_{sci} d_{sci} + \gamma\omega\sigma \} \quad \dots\dots\dots (7)$$

(III) ハサミの切離モーメントのシミュレーション

ナイフおよびノコギリの理論式は，これまでの研究⁽²³⁾⁽²⁴⁾において，主としてシミュレーションにより，実物に近い抵抗感覚を与えられることが示されているが，厚みのある物体をハサミで切るときの理論式については，検討されていない。上記の手法により導出した理論式を力覚表示システムに適用することの有効性を検討するために，上述の(5)，(7)式を用いて，シミュレーションを行なった。その結果を Fig.7 に示す。ここでは特に物体の厚みを変更した場合について比較検討する。

ハサミの刀身の厚み $h_{sci} = 5.0$ [mm]とし，刀身の先端の角度 $\phi_1 = 10.0$ [deg]，刀身の長さ $A_{sci} = 0.30$ [m]， $\phi_{sci} = 70$ [deg]， $d_{sci} = 10$ [mm]， $\varepsilon_{sci} = 0.5$ [mm]を設定する。さらに物体の物性値として $E = 10$ [MPa]， $E_s = 2.0$ ， $\gamma = 10.0$ [Ns/m]を与える。また，

^{†††} ナイフの刃の鋭利さを表す角度 ϕ_{kn} は 5 [deg]だが，ハサミの刃の鋭利さを表す角度 ϕ_{sci} は $60 \sim 70$ [deg]である。

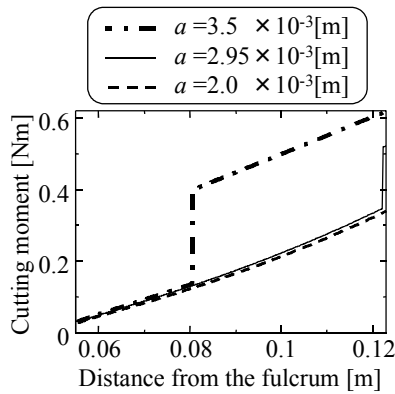


Fig. 7. Simulation of the cutting moment by scissors considering the thickness of the virtual object.

ハサミを閉じる角速度，すなわち切離速度を $\omega=0.1$ [deg/sec] とする。切離点からハサミの支点までの距離 σ は $\sigma = A_{sci} \sin \phi \operatorname{cosec}(\theta_{sci}/2)$ で得る⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

このグラフから被切離物体が厚くなり，引き伸ばす切離から刃による切離に移行すると切離モーメントが急増することが示唆されている。この移行は，物体の厚みが大きくなるほど刀身の先端から手元に近づき，モーメントの増加する割合も大きくなっている。この結果は実測値⁽¹⁵⁾⁽²⁸⁾と良好に一致する。本シミュレーションでは物体の物性値が均一であるとし，刀身のすべりやねじれを考慮していないので，切離モーメントが増加しても切離自体は機械的に行われるとした。しかし，現実のハサミでは，モーメントの増加が大きい場合に 2 本の刀身の間隔が開くようにハサミがすべり，切離を生じないことがある。これらの点から導出した理論式は，本研究で開発するシステムで，ハサミの切離時抵抗感覚を表すのに有効である。

4. 力覚表示システムの実験結果

本研究で述べた切離モーメントの理論は，力覚表示システムで実際のエンコーダの出力を用いることを前提としている。現実のデバイスで異なる操作者が様々な操作すれば，シミュレーションでは想定していなかった条件が与えられ，演算が発散する可能性がある。また，力覚表示システムからフィードバックする力覚に応じて操作を微調整したり，デバイスの交換をするが，それらに即座に対応して適切な応答がなされることを確認する必要がある。そこで，現実のシステムで実験を行い，これを検証する。

被切離物体に関するパラメータとして，ヤング率 $E=1.0$ [kPa]，粘性定数 $\gamma=0.1$ [Ns/m]，被切離物体の幅 $L=0.4$ [m]， x 軸方向の物体右端からの切離位置 $l_1=4.0 \times 10^{-2}$ [m]，被切離物体の切離方向の長さ $b=0.04$ [m]，見かけの弾性限界 $E_s=2.0$ ，ナイフおよびノコギリを物体に押しつける力によって発生する初期モーメント $M_{D_0}=10$ [Nm] をシステムに与える。また，静止摩擦係数は 0.3，動摩擦係数は 0.1 とした。また，被切離物体の厚さは Fig.3 で示したように，部位ごとに異なる値を与えた。

ナイフの特性に関するパラメータとして，厚み $h_{kn}=1.0 \times 10^{-3}$ [m] を使用した。この厚み h_{kn} はハサミの厚み h_{sci} およびノコギリの厚み h_{saw} についても同一の値とした。また歯の鋭利さ $\phi_{kn}=5.0$ [deg] を使用し，ノコギリの歯に作られた刃の鋭利さについても， $\phi_{saw}=\phi_{kn}$ とした。ナイフの切れ込み角度を表す α はエンコーダからの実測値を用いた。

ハサミの特性に関するパラメータとして，刀身にある刃の鋭利さを表す角度 $\phi_{sci}=70$ [deg]，刀身先端の角度 $\phi_1=10.0$ [deg]，切離部位における刀身の間隔 $\varepsilon_{sci}=0.5$ [mm]，刀身の厚み $d_{sci}=10$ [mm]，刀身の長さ $A_{sci}=0.30$ [m] とした。切離角速度 ω [deg/sec]，支点まわりの開き角 θ_R [deg] はエンコーダ出力から得る実測値を用い，交差角 θ_{sci} は $\theta_{sci}=\theta_R+2\phi_1$ で算出した⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

ノコギリの特性に関するパラメータとして，ノコギリの胴の幅 $d_{saw}=0.15$ [m]，歯先の角度 $\alpha=60$ [deg]，歯の幅 $T_{Lsaw}=3.0 \times 10^{-3}$ [m]， $r_{Tmax}=1.7 \times 10^{-3}$ [m]，なる条件とした。また胴の長さは 0.40[m] とし，並進運動によって物体からノコギリがはずれないように設定した。なお，ナイフとノコギリによる切離の進行速度は切離モーメントの算出時に得る沈降深度によって決定し，ハサミによる切離の進行速度は，デバイスの位置姿勢の変更によって決定する。

また，各デバイスの配置に関しては，例えば医療分野で切離器具を用いる場合，その切離対象すなわち患者が，操作者から見て必ずしも切離器具と適正な位置関係に配置できるとは限らない。この場合，切離対象である患者の位置を固定して，操作者が器具を把持する手を伸ばして，切離対象との位置関係を適正にして使用する。これらの点を考慮して，すべての切離器具を操作者にとって適正な位置に配置せず，ランダムに配置した器具を与えられた条件の中で，操作者が任意に選択して使用するとした。

切離抵抗感覚や作業効率などを考慮しながら，適切にナイフ，ハサミ，ノコギリを使い分けて，被切離物体を切離している様子を Fig.8 に示す。同図(a)~(c)にナイフを選択して操作している様子を示しており，同図(d)~(f)にハサミを選択して操作している様子を示しており，同図(g)~(i)にノコギリを選択して操作している様子を示している。一般的に，人工現実感の研究では視覚的に現実感を得ることに重点をおいて研究開発される場合が多い。本研究では人工現実感のシステム開発を通して「切離」という事象の本質を追求し，個別に考えられてきた器具ごとの切離機序を統一的に取り扱うことに重点をおいた。このシステムでは，物体の内部の状態など通常では不可視な状態を，必要な情報にのみ限定し，単純化して可視化することで本質の理解を容易にする。このためには，テクスチャマッピングなどによって実現される視覚的現実感は必ずしも有効ではなく，ワイヤフレームモデルなどによる簡略化表示が適切であり，本システムにおいては有効である。この確認のため，本システムでは仮想被切離物体に張り付けるテクスチャの有無を選択可能とした。同図(a)(d)(g)は被切離物体をワイヤフレームモデルで表わしており，同図(b)(e)(h)は被切離物

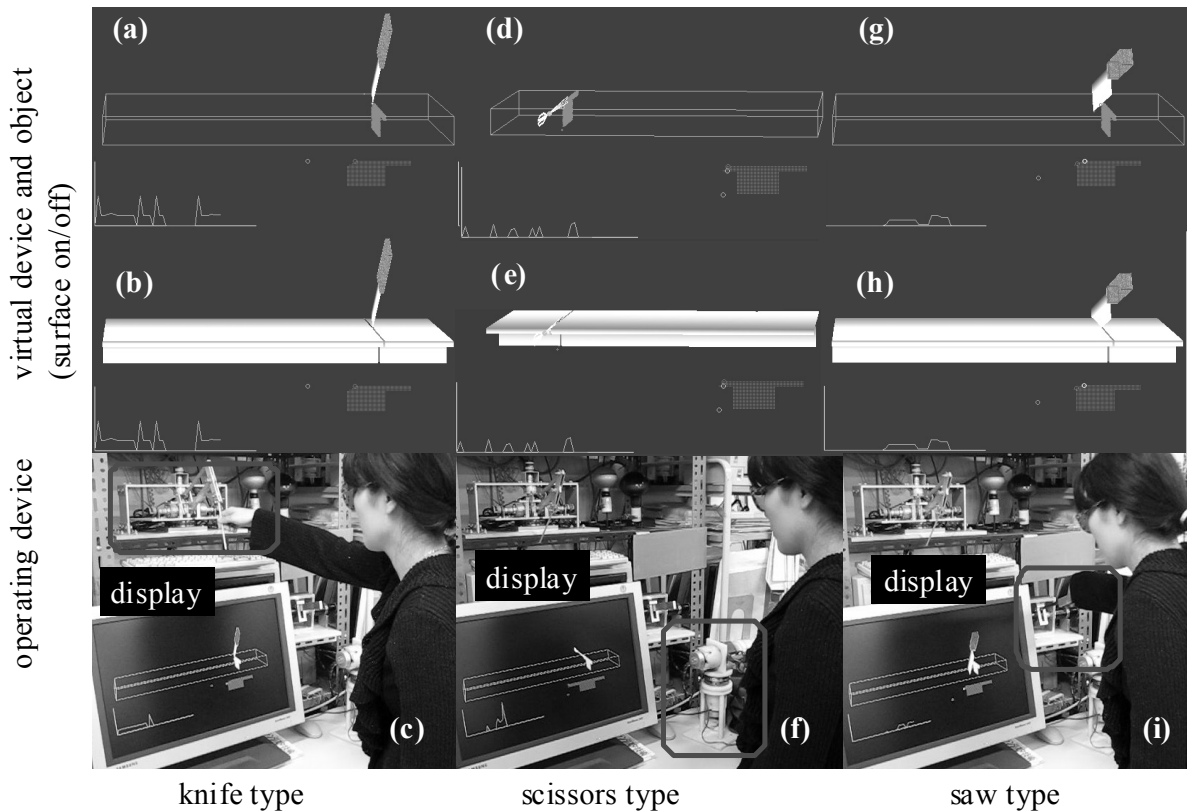


Fig. 8. Cutting of the virtual object with its moment by the virtual cutting devices.

体表面にテクスチャを貼り付けたソリッドモデルで表わしている。すなわち、同図(a)(b), (d)(e), (g)(h)はそれぞれ同じ時刻における切離の様子をワイヤフレームモデルとソリッドモデルで表示したものである。これらの図中、画面右下に表示しているのは切離面の形状の変化であり、画面左下に、グラフ化した切離モーメントを表示している。さらに同図(c)(f)(i)はそれぞれのデバイスを操作している様子である。

Fig.9 に示すグラフは、構築したシステムで任意にデバイスを変更しながら仮想物体の切離を行なったときの動作状態を示したグラフである。すなわち、デバイスに取りつけられたエンコーダ出力と仮想物体の物性値を反映した切離モーメントによる力覚を得ながら、操作者がデバイスを操作した様子であり、エンコーダで計測した器具の位置姿勢と連動して、上述の理論式により力覚を表示したことを示している。横軸はシステムを動作してから時刻を表わしており、ハサミを選択した時間を薄い網掛け、ナイフを選択した時間を濃い網掛け、ノコギリを選択した時間を網掛け無しで示している。グラフは下から選択したデバイスの切離モーメント、ナイフの押入角 (knife-angle) α 、ハサミの交差角 (scissors-angle) θ_{sci} 、ノコギリの引込角 (sawing-angle) θ_{saw} 、ノコギリの並進運動量 (movement of saw) を表わしており、最上段のグラフは、画面に垂直な、操作者から見て手前方向を z 軸の正方向としたときの切離点の z 座標 (cutting position) であり、これが大きいほど操作者側に近づいている。ハサミは前述のように画面奥から手前に切ると

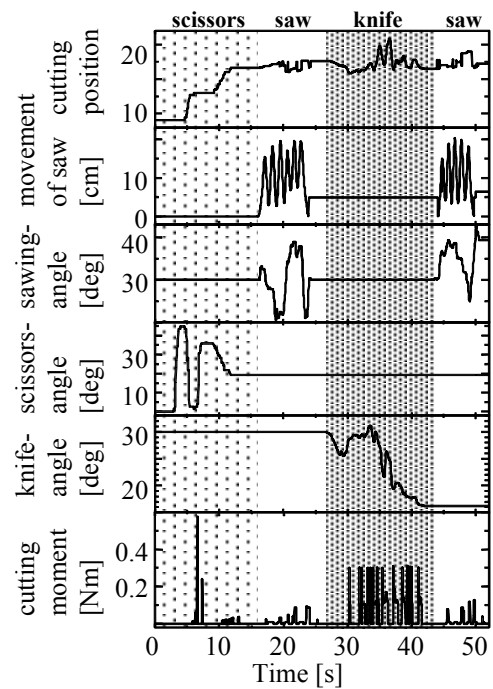


Fig. 9. Cutting moment of the virtual object relating to the motion of force display system using three kinds of cutting devices.

したので、開き角 θ_{sci} の動きに連動して切離を行い、切離点の座標が大きくなっている。ハサミの使用時、この座標は一方に大きくなるのみである。ノコギリの場合、並進運

動によって回転の中心座標が移動するので切離点の座標が小さくなることもある。並進運動量が大きい、切離点の移動が少ないことから、物体を切離する量が少ないことが分かる。手前に引くときのみ切離モーメントを生じるが、3種類の切離器具の中で抵抗感覚が最も少なく切離を行なえる器具であることが示されている。ナイフは、切離点の移動は大きい、物体の表面のみ切離するので何度も往復させなければ完全に切ることができない。このグラフの場合では、手前に切るほど寝かせているのがわかる。刃が一つのみであるので、物体に対する押入量が大きいので、切離モーメントはむしろノコギリより大きい。何度も往復させるので手前に引く瞬間、すなわち切りはじめの速度が0であることから摩擦係数が静止摩擦係数となり動摩擦係数の場合より切離モーメントが大きくなっているのが分かる。なお、フィードバックされる力による作用が感覚的に適切であるかという点については、操作者の経験や器具の好みなどの主観的な要素により変化するので本研究ではこの点の評価は行わず、デバイスの挙動に関する定量的な測定結果を示すのみにとどめた。

5. 考 察

本研究では、器具の違いによる切離機構の違いについて検討するため、仮想空間内でナイフ、ハサミ、ノコギリという3種類の切離器具を用いて仮想物体を切離するシステムを構築した。仮想物体として硬質ゴム状の物体を想定し、弾性定数、粘性定数などの物性値は均一で、部位ごとに異なる厚みを設定した。このとき、切離器具はしなり・ねじれなどを生じない剛体として設定した。

ナイフは押入モーメントが一定である場合、物体に対して一定以上の深度に到達しない。このため、摩擦係数、すなわち直前の運動状態が静止しているか動いているかが、切離モーメントに影響を与える。また操作者から見て手前に引くとき、すなわち Figs. 3~4 に示す z 軸方向に切離が進行するときのみ切離モーメントが発生するとした。本システムでは、ナイフ自体が物体を突き抜けない程度に設定しているので、細かな切離により切離面の仕上げなどに有効である。一方、ハサミは、物体の厚みが一定値以下であれば比較的容易に切り進むことができるが、一定値を越えると切離モーメントが増加するので厚い物体の切離には有効ではない。また、ノコギリは押入モーメントが一定の場合、歯が物体に対して食い込まないので切離の進行速度が遅いが切離モーメントはナイフほど大きくならない。

Fig.9 で、ハサミが開くとき切離点の移動がなく、閉じるときに切離点が移動していることが分かる。閉じるときに切離モーメントを生じており、このとき、切離速度と厚みにより切離モーメントが増加しているのが分かる。このシステムでハサミの刀身の厚みが前述のシミュレーションと比較して小さい値を設定している。このため、切離する物体の厚みが少ない部分について、シミュレーションでは影響を与えない値であるにも関わらず、厚みの閾値自体が小

さくなり、刃の切離効果によるモーメントを生じるので、切離モーメントが大きくなったと考えられる。ノコギリは前後の並進運動により切離を行なうので、切離点も前後に移動する。ナイフはノコギリより大きな切離モーメントとなっている。ナイフの刀身はノコギリの歯と異なり1つであること、および胴に付随していないことから、同一の押入モーメントであってもノコギリの歯より深く押入されてしまうことが原因として考えられる。現実の切離においては切離器具がしなり、あるいは折れることを回避するために、操作者が押入モーメントを調節しているので切離時のモーメントも小さくなると考えられる。

なお、一連の実験では操作に一切の制限を設けず、操作者による任意の操作を入力した。デバイスの可動範囲において、演算は発散することなく動作は安定していた。また、任意の時刻で任意の器具を選択しても、即座に適切な仮想器具に変更され、適切な応答が得られることが確認できた。これらより、本研究で提案した切離モーメントの理論は力覚表示システムの構築に有効な手段であると考えられる。

ところで一般的に刃物を使用する際には、手元のもっとも作業しやすい位置に器具と物体を移動して切離を行う。しかし本研究は、将来的な教育用医療訓練装置を想定した基礎研究であるので、物体の移動が困難で、切離部位を手元に移動できない場合も考慮して、器具を手元から離れた位置に固定した。したがって一般的な切離と異なり必ずしも作業しやすい状態であったと言えないが、異なる切離機序に対応して適切な器具の選択がなされたと考えられる。

なお、本システムではデバイスの動作検出をエンコーダのみで行っており、各デバイスごとの押入モーメントを測定していない。このため、本システムでは押入モーメントを一定のパラメータとして与えたが、切離速度やデバイスごとの位置姿勢、およびデバイスの重量などを考慮することによりこれを算出することが可能であると考えられる。この理論式構築については今後の検討課題である。

また、切離器具と物体の切離面との間の摩擦係数は、物体の弾性定数および粘性定数、切離器具の表面状態などに依存するが、これを明確な数式で表現する根拠が与えられていない。このため本研究では、摩擦係数を独立した固有のパラメータとして与えた。上述のパラメータなどを用いて解析的に与えることが必要であると考えられる。

ところで本システムでは、異なる3種類のデバイスの使い分けを模索するため、同一の切離面での切離を考えた。このとき切離面を粘弾塑性体モデルの集合として構築し、 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ の領域を最小単位とした。これは実時間での演算処理時間を考慮して決定したが、仮想切離器具の厚みとして 1mm を共通に設定したので、この値は適切であると考えられる。なお、デバイスの大きさを変更する場合に、この領域についても変更する必要がある。また、本システムで用いた理論式に与えるパラメータは必ずしも現実の物体の物性値を反映していない。さらに、現実の物体は材質が不均一であるが、本システムでは均一な材質としている

点も現実の物体と一致していない。しかし、この動作データは上述した切離器具ごとの特徴を表現するという点においては良好な結果を得ており、切離機序の違いとこれに伴う切離感覚の表現について検討するための基本システムは構築できたと考えられる。したがって複数の器具を使い分けながら人体組織を分離していく医療行為を仮想的に体験する教育訓練機器開発の第一段階としては良好な結果を得た。一方、仮想臓器を構築し表現するシステムとしては、その演算能力などの点から十分なものとはいえず、総合的なシステムの強化が課題としてあげられる。

なお、本研究では仮想器具を壊れない剛体として取り扱ったが、現実の器具では切離時に生じる応力によって刃こぼれなどを生じることもある。このため、器具自体も粘弾塑性体で表現する手法について、現在検討中である⁽³⁰⁾。

6. おわりに

ナイフ型、ハサミ型、ノコギリ型の器具による切離機序の違いを検討するため、3種類の切離器具を使い分けながら仮想物体を切離し、力覚表示するシステムを開発した。このシステムで切離機序の違いとこれに伴う切離感覚を表現可能なことを確認した。また、デバイスを使い分けることによってそれぞれの長所を生かし相補効果により、任意の加工が可能であることも確認した。本システムでは、切離という現象の本質を明確にするために、物体の物性値や切離器具の形状を表わすパラメータを単純化している。また、物体に形成される溝によって切離面が決定されるとしたので、操作器具のねじれも考慮していない。このため実行結果は必ずしも現実と一致していない場合もある。しかし、物体を構成する粘弾塑性体モデルごとの物性値と、それぞれの切離器具の特性を表現するためのパラメータを任意に設定可能であるので、パラメータの同定を行い、設定することで、より現実的な切離の解析が可能になると考えられ、今後の検討課題である。

(平成 22 年 1 月 25 日受付, 平成 22 年 5 月 19 日再受付)

文 献

- (1) 本多光太郎・高橋金之助・奈良七三郎:「刃物の切味に就いて」, 金属の研究, Vol.3, No.10, pp.465-481 (1926)
- (2) 白井英治・白樫高洋:「加工の力学入門」, 東京電機大出版局, 東京 (1996)
- (3) K. Takekoshi and M. Gotoh: "Studies on Micro-Structure of a Knife-Edge and Degradation of Cutting Performance", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.70-C, No.695, pp.2155-2162 (2004) (in Japanese)
竹腰久仁雄・後藤 學:「刃物の刃先先端のマイクロ構造と切れ味劣化に関する研究」, 日本機械学会論文集 C, Vol.70, No.695, pp.2155-2162 (2004)
- (4) K. Kanazawa, A. Nakagawa, and T. Miura: "Study on Cutting by a Knife-edged Cutter (2nd Report): Simulation on Separation of Cutting Material Using FEM", Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.63, No.1, pp.70-75 (1997) (in Japanese)
金沢憲一・中川 歩・三浦 崇:「ナイフ状刃物による切断加工に関する研究 (第 2 報) —有限要素法による切断材料の分離シミュレー

- ションー, 精密工学会誌, Vol.63, No.1, pp.70-75 (1997)
- (5) H. Noguchi, T. Yasuda, S. Yokoi, and J. Toriwaki: "A Model for Cutting Operation with Scissors in 3D Virtual Space and Implementation", Transactions of Information Processing Society of Japan, Vol.39, No.12, pp.3304-3314 (1998) (in Japanese)
野口博和・安田孝美・横井茂樹・鳥脇純一郎:「仮想空間内でのハサミによる切断操作のモデルと実現」, 情報学論, Vol.39, No.12, pp.3304-3314 (1998)
- (6) C. Bruyns, S. Senger, A. Menon, K. Montgomery, S. S. Wildermuth, and R. Boyle: "A survey of interactive mesh-cutting techniques and a new method for implementing generalized interactive mesh cutting using virtual tools", J. Visual. Comput. Animat., Vol.13, pp.21-42 (2002)
- (7) J. Rasmussen, J. Dahlquist, M. Damsgaard, M. Zee, and S. Christensen: "Musculoskeletal modeling as an ergonomic design method", International Ergonomics Association XVth Triennial Conference, pp.24-29 (2003)
- (8) T. Yoshikawa and A. Nagura: "A Touch and Force Display System for 3D Haptic Interface", Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.3, No.3, pp.75-82 (1998) (in Japanese)
吉川恒夫・名倉彰宏:「3次元空間用無負荷時非接触型力覚提示装置」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.3, No.3, pp.75-82 (1998)
- (9) M. Sakaguchi and J. Furusho: "Development of a 2 D.O.F. Force Display System Using ER Actuators", Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.3, No.3, pp.133-140 (1998) (in Japanese)
坂口正道・古荘純次:「ER アクチュエータを用いた 2 次元力覚提示装置の開発」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.3, No.3, pp.133-140 (1998)
- (10) K. Inoue, R. Uesugi, R. Sasama, T. Arai, and Y. Mae: "Display of Variable Compliance by Haptic Devices Using Flexible Sheet", Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.8, No.3, pp.295-302 (2003) (in Japanese)
井上健司・上杉麗子・笹間亮平・新井健生・前 泰志:「柔軟シートを用いたハプティック・デバイスによる可変コンプライアンスの提示」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.3, pp.295-302 (2003)
- (11) Y. Suzuki, Y. Inoguchi, and S. Horiguchi: "Brush Model for Calligraphy Using a Haptic Device", Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.10, No.4, pp.573-580 (2005) (in Japanese)
鈴木祐一・井口 寧・堀口 進:「力覚提示装置を用いた書道用筆モデルの提案」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.4, pp.573-580 (2005)
- (12) H. Wakamatsu and T. Imai: "Stereoscopic display of the inside image of rat brain by three dimensional dissection methods", J. Int. Fed. Med. Biol. Eng., 29-Suppl. Part 1, p.123 (1991)
- (13) 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., pp.552-557 (1992)
- (14) H. Wakamatsu: "Operational systems of stereoscopic cutting 3D virtual objects with reactive feeling", IFAC 13th World Congr., pp.409-414 (1996)
- (15) H. Wakamatsu and M. Yasuna: "Stereoscopic Image Cutting System with Reactive Feeling on Cutting Virtual Sheet Object by Scissors-Type Device", The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol.116-C, No.10, pp.1163-1168 (1996-10) (in Japanese)
若松秀俊・安名正和:「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」, 電学論 C, 116-C, 10, pp.1163-1168 (1996-10)
- (16) 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., pp.312-316 (1998)
- (17) H. Wakamatsu, X. Zhang, and S. Honma: "Stereoscopic Manipulation of Virtual Object with Reactive Force Display Using Teleoperational Scissors-Type Cutting Device", The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol.119-C, No.10, pp.1126-1132 (1999-10) (in Japanese)
若松秀俊・張 曉林・本間 達:「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」, 電学論 C, 119-C, 10, pp.1126-1132 (1999-10)
- (18) S. Honma, H. Wakamatsu, and X. Zhang: "Mechanics and Manipulation of Virtual Objects Represented by Viscoelastic Model", The trans. the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol.119-C, No.12, pp.1437-1443 (1999-12) (in Japanese)

- 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」, 電学論 C, **119-C**, 12, pp.1437-1443 (1999-12)
- (19) S. Honma and H. Wakamatsu : “Cutting of Virtual Material at Any Position and Attitude by Saw-type Force Display System”, Proc. of the Virtual Reality Society of Japan annual conference, Vol.8, pp.437-440 (2003) (in Japanese)
本間 達・若松秀俊：「任意の位置姿勢で切離可能なノコギリ型力覚表示システム」, 第 8 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.437-440 (2003)
- (20) 佐野 理：「連続体の力学」, 裳華房, 2000
- (21) 宮本 博・菊池正紀：「材料力学」, 裳華房, 1996
- (22) S. Honma and H. Wakamatsu : “Real-time Representation of Destruction Process Considering Interaction between Two Virtual Objects”, Trans. the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.44, No.7, pp.600-608 (2008) (in Japanese)
本間 達・若松秀俊：「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, pp.600-608 (2008)
- (23) S. Honma and H. Wakamatsu : “Analysis of the Cutting Moment of Viscoelastic Material by a Knife-Type Tool for Its Application to Force Display System”, Trans. the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.40, No.4, pp.458-465 (2004) (in Japanese)
本間 達・若松秀俊：「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, pp.458-465 (2004)
- (24) S. Honma and H. Wakamatsu : “Cutting Moment Analysis of Materials by the Saw for Force Display System”, Trans. the Virtual Reality Society of Japan, Vol.9, No.3, pp.319-326 (2004) (in Japanese)
本間 達・若松秀俊：「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」, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol.9, No.3, pp.319-326 (2004)
- (25) Y. Kuroda, M. Hirai, M. Nakao, T. Sato, T. Kuroda, K. Nagase, and H. Yoshihara : “A Study on Organ Exclusion Simulator with Multi-finger Force Feedback Device”, Trans. the Virtual Reality Society of Japan, Vol.11, No.4, pp.515-526 (2006) (in Japanese)
黒田嘉宏・平井 真・中尾 恵・佐藤寿彦・黒田知宏・長瀬啓介・吉原博幸：「多指力覚提示装置を用いた臓器圧排シミュレータに関する研究」, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol.11, No.4, pp.515-526 (2006)
- (26) N. Mukai, M. Harada, and H. Oyama : “Real-Time Deformation of an Artery Model in Neurosurgery Simulators”, Trans. the Virtual Reality Society of Japan, Vol.8, No.1, pp.103-110 (2003) (in Japanese)
向井信彦・原田雅之・小山博史：「脳神経外科手術シミュレータにおける動脈モデルのリアルタイム変形」, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol.8, No.1, pp.103-110 (2003)
- (27) H. Wakamatsu and S. Honma : “Teleoperational Force Display System in Manipulation of Virtual Object Using Various Types of Cutting Devices”, Proc. 6th Int. Conf. Methods & Models Autom. & Robot., pp.631-636 (2000)
- (28) S. Honma and H. Wakamatsu : “Development of Force Display System Using Various Kinds of Cutting Devices”, human interface, Vol.8, No.3, pp.23-24 (2006) (in Japanese)
本間 達・若松秀俊：「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.8, No.3, pp.23-24 (2006)
- (29) K. Takekoshi and M. Gotoh : “Prediction System of Loads to Cut an Object by Scissors”, Journal of the Japan Society for Precision Engineering. Supplement., Vol.70, No.10, pp.1322-1327 (2004) (in Japanese)
竹腰久仁雄・後藤 學：「鋏で物を切る際の所要力の予測システム」, 精密工学会誌, Vol.70, No.10, pp.1322-1327 (2004)
- (30) S. Honma and H. Wakamatsu : “Cutting process of physical models by a virtual knife based on a elasto-visco-plastic model”, National Convention Record I. E. E. Japan part 3, p.35 (3-026) (2008) (in Japanese)
本間 達・若松秀俊：「物理モデルで構築したナイフによる物体の加工」, 平成 20 年電気学会全国大会講演論文集第 3 分冊, p.35 (3-026) (2008)

本間 達



(正員) 1969年3月26日生。1993年日本大学理工学部卒業, 1997年東京医科歯科大医学部卒業, 2002年同大学大学院保健衛生学研究科博士後期課程修了。2003年東京医科歯科大学大学院保健衛生学研究科助手。2004年同大学大学院同研究科助教。現在に至る。博士(保健学)。

若松秀俊



(正員) 1946年11月15日生。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大学院保健衛生学研究科教授。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。オレゴン州立大学, 南京航空航天大学など客員教授。工学博士。