

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS A

EIC | **電子情報通信学会**
A | **論文誌** VOLJ84-A NO.6 JUNE
基礎・境界 2001

基礎・境界ソサイエティ

社団法人 **電子情報通信学会**

THE ENGINEERING SCIENCES SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

ノコギリによる切離抵抗力の表現

本間 達^{†a)} 若松 秀俊[†]

Analysis of the Cutting Resistance by a Saw-Type Edged-Tool

Satoru HONMA^{†a)} and Hidetoshi WAKAMATSU[†]

あらまし 通信ネットワークを利用した遠隔マニピュレーションシステムに不可欠なフォースディスプレイシステムを構成し、精密な位置と力の表現及び操作感覚を実現する。そのために、ハサミとナイフによる粘弾性仮想物体の切離機序に関する筆者らの先の研究を基礎にして、物体を横びきノコギリによって切離した場合に現れる抵抗力の発生機序を解析的に扱った。それをもとに、物性値を与えた仮想物体を構築しこの物性値に基づいた動的な力学の問題として切離抵抗力や接触感を実現する基本的方法を確立した。

キーワード 人工現実感, 仮想物体, ノコギリ, 切離抵抗力

1. ま え が き

通信ネットワークの発達により、遠隔マニピュレーションシステム [1]~[4] が種々開発されている。これらの装置を使用することにより、これまで不可能であった環境における様々な操作の可能性が広がってきた。その場合に精密な位置と力の表現及び操作感覚を実現するフォースディスプレイシステム [5]~[12] が不可欠である。しかしながら従来のシステムでは、フィードバックする応力の計算が変形時の力学的解析に基づいていないので、物質の変形時の微妙な感触や切離感覚が視覚的表現と一致しないという原理的な欠点と限界があった。これを解決するために筆者らは物性値を与えた仮想物体を構築し [5], [13], [14], この物性値に基づいた動的な力学の問題として切離抵抗力や接触感を実現し、現実の感覚に近い感覚を経験できるような方法を可能にした。

本研究では先に提案したハサミとナイフによる粘弾性体の切離機序の研究 [13], [14] を基礎とし、粘弾性体として構成した仮想物体を横びきノコギリによって切離した場合に現れる抵抗力の発生の機序について仮説を設け、これを解析的に表現し、シミュレーションにより検討する。

2. 切離器具の選択と被切離物体の構築

2.1 ノコギリの選択と仮定

ノコギリは切離目的によって、縦びきと横びきに大別することができる。これらの切離機序 [15] の違い、すなわち切削と切離の違いに基づいて歯の形状がそれぞれ異なっている。横びきノコギリの歯は図 1 に示すように各々がナイフと同様の形状をしている。本研究では横びきノコギリの切離抵抗力について考え、歯の部分から受ける抵抗力を微小なナイフの集合体として近似する。なお、議論の簡略化のためにノコギリの歯は胴に対して垂直であるとする。

2.2 仮想物体の構築

筆者らが既に提案した、各辺が微小弾性体からなる正四面体構造の連続モデル [5], [13], [14] を用いて仮想物体を構築する。このモデルでは正四面体構造の各頂点に質点が存在する。本研究では、ノコギリでの切離

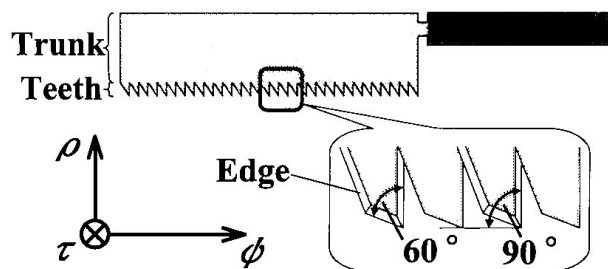


図 1 横びきノコギリの歯の拡大図
Fig. 1 Details of teeth of the saw.

[†] 東京医科歯科大学, 東京都
Tokyo Medical and Dental University, 1-5-45 Yushima,
Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8519 Japan
a) E-mail: hommtec@tmd.ac.jp

を前提としているので構築する仮想物体を弾性定数が十分に大きい弾性体、すなわち剛体であるとした。正四面体は理論上限りなく小さな構造とみなすことができるので、ワイヤフレームモデルとして構成した仮想物体を、内部の充てんしたソリッドモデルとして扱うことが可能である。このモデルに与えた弾性、塑性、質量などの物性を任意に変更することによって種々の剛体が表現できる。

3. 歯の切離抵抗力の解析

本章ではノコギリによって物体を切離する場合に発生する抵抗力について解析的な表現を試みる。解析は図2を参照し以下の手順で行う。

- ① ノコギリ歯が ρ 軸負の方向の力 F_D により物体に押入する深度 r を求める。
 - ② 深度 r において、歯の刃が物体を切離するときの抵抗力 F_{ST} を計算する。
 - ③ 切離時に物体に加わる力 F_1 によって生じる板状物体のたわみにより胴が挟まれて生じる摩擦力 F_{TF} を求める。
 - ④ ①～③によって得られた結果を総合的に考えて、ノコギリ全体に加わる力 F_{saw} を計算する。
- このために、まずノコギリに作用する力を物体に対して垂直方向 (ρ 軸方向) と水平方向 (ψ 軸方向) に分解して考える。このとき、ノコギリを保持する腕の手首・肘・肩を基準点とする力のモーメントと物体内部

で発生した力のモーメントが平衡状態になった場合について考える。ただし、本研究ではノコギリのグリップの形状及び操作者の体格については考慮しないので、表現上、解析によって得られた力のモーメントを切離抵抗力として定義する。

3.1 粘弾性物体に歯が刺さる深さの解析

横びきノコギリによる切離時の解析のために、ノコギリを歯と胴の部分に分けて力学的に表現する。図2は平板状の物体に対して垂直方向、すなわち図中に設定した座標系における ρ 軸方向負の向きの力によって、ノコギリの歯が物体内部に押入されている様子である。ここでは切離を伴わずに物体内部に歯を押し入れたとき沈降が生じるものと定義する。すなわち歯が物体を切離することにより生じる沈降はないと仮定する。また歯の押入により生じる物体の形状の変化は微小であるので本節では考慮しない。ノコギリの歯の各々は微小なナイフとして考えられるので、ナイフによる切離と同様に扱う。物体を切離するときノコギリに加える力を、物体に対して垂直な方向、すなわち、 ρ 軸方向負の向きの力のモーメント F_D と水平方向、すなわち ψ 軸方向の力のモーメント F_{ST} に分解して考える。このとき、物体に接触し切離に関与する歯の数を n とすると、1個の歯にかかる力のモーメントは F_D/n で与えられる。ここでは押し入れたノコギリ全体にかかる ρ 軸方向負の向きの力のモーメント F_D と、 n 本の歯が深さ r まで押し入られて物体から受ける力の ρ 軸方向への分力の合計として得られる力のモーメントが釣り合い平衡状態になると考える。このとき、図2で設定した座標系に関して、物体内に押し入れた歯の座標 τ において ρ - ψ 平面に平行な断面①と②を考える^(注1)。

歯の肉厚を h とし尖端の角度を α, β ($\alpha \geq 0, \beta \geq 0$) とする。刃の鋭利さを表す角度 ϕ は α, β によって微小の違いがあるが、一定値と仮定した。また、刃が押し入られたときの平衡状態では摩擦力を考慮しない。

押し入られた歯の断面積と物体断面の面積変化量が等しいと考え^(注2)、弾性定数として面積弾性率であるヤング率 E を採用すれば、図2中に示した①の部分が受ける力 $f_\alpha(\tau)$ は

$$f_\alpha(\tau) = E \times r^2 \tan \alpha / 2 \quad (1)$$

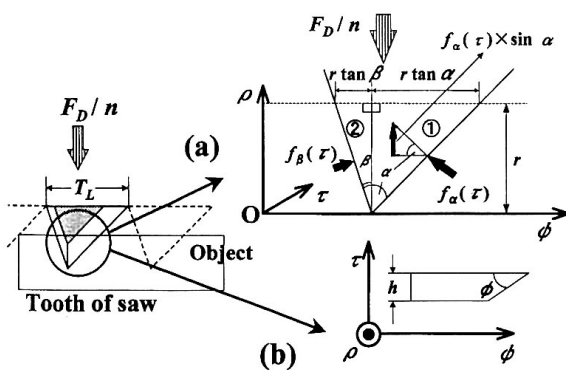


図2 ノコギリの歯の刺入時の力の平衡図
(a) ρ - ψ 面に平行な断面
(b) τ - ψ 面に平行な断面

Fig. 2 Force equilibrium in which a tooth of the saw enters the object.

- (a) Section of the blade in parallel to ρ - ψ plane.
- (b) Section of the blade in parallel to τ - ψ plane.

(注1) : $\rho = 0$ を刃先とした。

(注2) : 力 F 、ヤング率 E 、ひずみ ϵ 、面積 S 、面積変化量 ΔS の間には $F = E \cdot \epsilon S = E \cdot \Delta S$ なる関係式が成立することが知られている [15]～[17]。

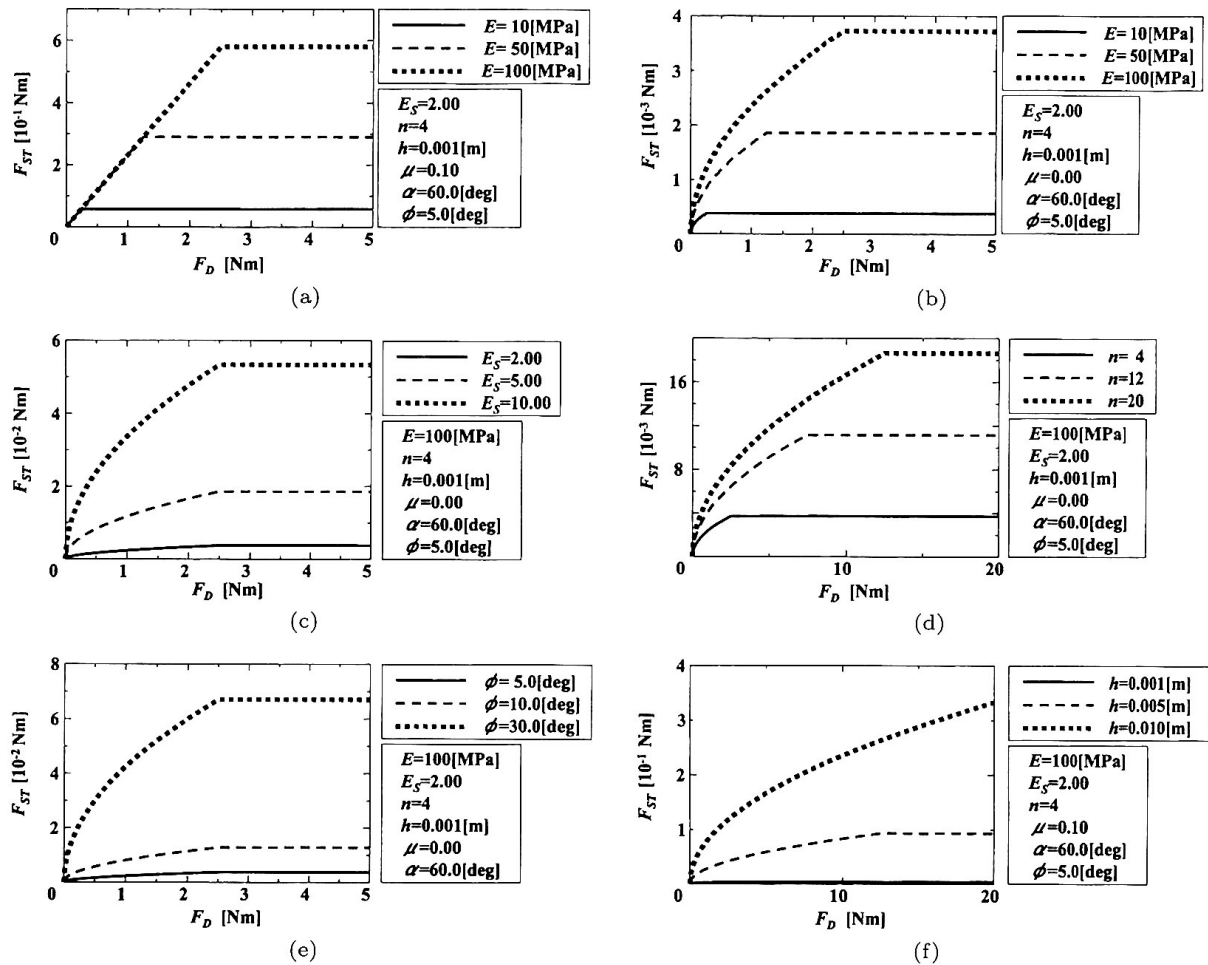


図8 ノコギリの歯及び物体の性質と切離抵抗力の検討

- (a) 被切離物体の硬度と切離抵抗力の関係
 (b) 被切離物体の硬度と切離抵抗力の関係 ($\mu = 0$)
 (c) 見かけの弾性限界と切離抵抗力の関係 ($\mu = 0$)
 (d) 切離に関する歯の数と切離抵抗力の関係 ($\mu = 0$)
 (e) 歯の刃の鋭利さと切離抵抗力の関係 ($\mu = 0$)
 (f) 歯の肉厚と切離抵抗力の関係

Fig. 8 Examination of the cutting resistance depending on the physical properties of saw's tooth and object.

- (a) Cutting resistance of the object related to its elasticity.
 (b) Cutting resistance of the object related to its elasticity ($\mu = 0$).
 (c) Cutting resistance of the object related to its apparent elastic limit ($\mu = 0$).
 (d) Cutting resistance of the object related to the number of saw's teeth ($\mu = 0$).
 (e) Cutting resistance of the object related to the sharpness of saw's tooth-edge ($\mu = 0$).
 (f) Cutting resistance of the object related to the thickness of saw's tooth.

[m], $F_{D,0} = 10.0$ [Nm] とし、シミュレーションごとに他のパラメータをそれぞれ変更した。ただし、図 10 (b) では $E = 100$ [MPa] とした。この結果から以下のことがわかる。

① 同図 (a) より物体の弾性定数が増大し、硬くなるほど ψ 軸方向に生じる切離抵抗力 F_{saw} は増大し、切離に要するノコギリの延べ総歯数が増加する。このとき、切離抵抗力 F_{saw} は弾性定数に応じて大きく

なっているが、延べ総歯数は弾性定数がしきい値を超えるまではほぼ一定である。

② 同図 (b) よりノコギリの肉厚 h が増加するほど ψ 軸方向に生じる切離抵抗力 F_{saw} は増大し、切離に要する延べ総歯数が増加する。このとき、肉厚 h がしきい値を超えると切離抵抗力 F_{saw} はほぼ一定となるが、延べ総歯数は肉厚 h に応じて増加する。

③ 同図 (c) よりノコギリの引込み角度 θ が大きく

なるほど ψ 軸方向に生じる切離抵抗力 F_{saw} は小さくなり、切離に要する延べ総歯数も少なくなる。引込み角度がしきい値を超えると切離抵抗力 F_{saw} 及び切

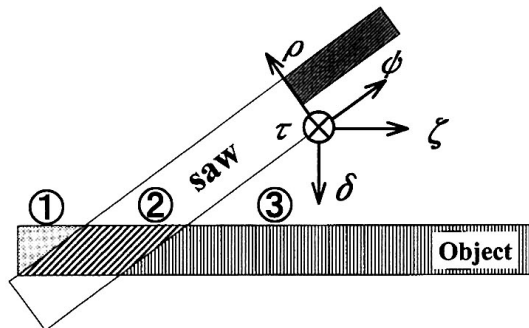


図 9 シミュレーションの分類
Fig.9 Classification of simulation.

離に要する延べ総歯数がほぼ一定となる。

④ 同図 (d) より被切離物体の厚さ a が増加しても、 ζ 軸方向の切離距離が増加し、切離されない部分の長さ x が、物体全体の長さ b に対して 2 割以下の長さになるまで ψ 軸方向に生じる切離抵抗力 F_{saw} はほぼ一定になる。一方、切離に要する延べ総歯数は被切離物体の厚さ a に応じて増加する。

5. 考 察

ノコギリから被切離物体に対して ρ 軸方向負の向きに加える力が一定である場合、ノコギリの切離感覚について以下のような経験則が一般的に知られている。

- ・ 物体の弾性定数大きい、すなわち硬いほど切離抵抗力は大きい。
- ・ ノコギリの肉厚が厚いほど切離抵抗力が大きい。

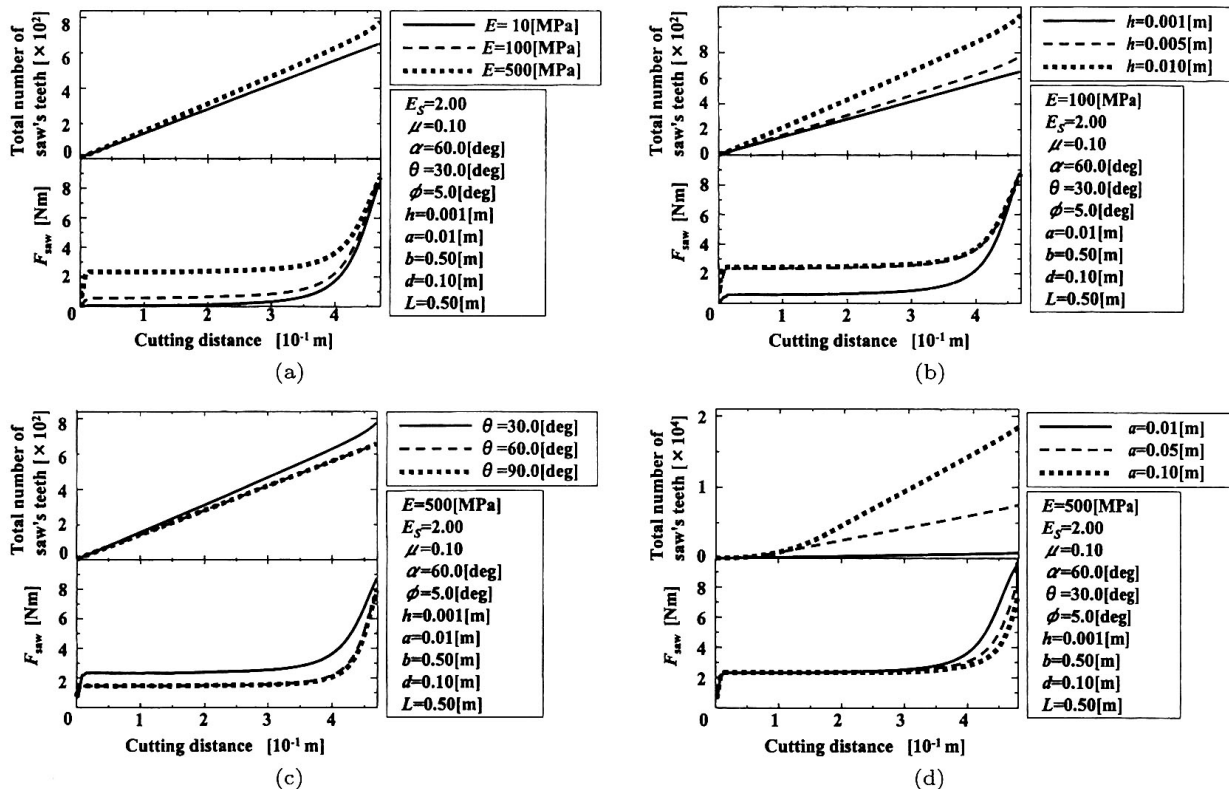


図 10 ノコギリ全体における切離抵抗力の検討
(a) 被切離物体の硬度と切離抵抗力の関係
(b) ノコギリの肉厚と切離抵抗力の関係
(c) ノコギリの引込み角度と切離抵抗力の関係
(d) 被切離物体の肉厚と切離抵抗力の関係

図 10 Examination of the cutting resistance of the object by the saw.
(a) Cutting resistance of the object related to its elasticity.
(b) Cutting resistance of the object related to the thickness of the saw's tooth.
(c) Cutting resistance of the object related to the moving angle of the saw.
(d) Cutting resistance of the object related to its thickness of the object.

・ノコギリが板状材料に垂直に近いほど、すなわちノコギリの引込み角が大きいほど切離抵抗力は小さい。

・被切離物体の厚さによらず切離抵抗力はほぼ一定となる。

・より厚い物体を切離する場合に、ノコギリを動かす回数がより多くなる。すなわち延べ総歯数が大きくなる。

・被切離物体に対する切離距離が物体の長さ b に対するしきい値を超えるまで抵抗力はほぼ一定であり、しきい値を超えると抵抗力が急増する。

前章のシミュレーションの結果はこれらの経験則と一致しており、解析の正しさを裏づけている。

摩擦係数が0であるときの切離抵抗力 F_{ST} について、それぞれの条件の場合について検討すると、摩擦係数が0.10の場合と比較して、0.003~0.05倍と非常に小さな値となっている。更に、図8と図10より摩擦係数が同じである場合、歯の部分が受ける抵抗力 F_{ST} は、胴の部分を含めたノコギリ全体が受ける抵抗力 F_{saw} の0.05~0.1倍となっていることがわかる。これらより、ノコギリが受ける切離抵抗力 F_{saw} の大部分は物体のたわみによって胴の部分が受ける摩擦力 F_{TF} であると考えられる。すなわち、ノコギリによる切離抵抗力に最も影響を与えるパラメータは摩擦係数であると考えられる。

本研究では、ノコギリの胴の長さ由来する切離可能長を考慮しなかった。しかしながら現実の場合は、運動方向を適宜反転することによって連続的な切離が可能となっている。したがって、反転時に切離速度が0となる瞬間が存在する。一般に静止摩擦力は動摩擦力と比較してかなり大きいので、引き終えたノコギリを戻し、再度引く瞬間における抵抗力は極大となる。このときノコギリの胴が受ける摩擦による抵抗力 F_{TF} が、歯を物体に沈降させる外力 F_D を超過したとき、歯が物体に沈降せず切離が不可能となる。また、ノコギリを ψ 軸方向手前の向きに引こうとする力 F_{ST} を超過すると、ノコギリを引くことができなくなるので切離不可能となることが、シミュレーションの結果から説明可能である。

一般にノコギリの使用に際して、1回の切離距離、すなわち押入深度 r を一定とするために物体に対して与える ρ 軸方向負の向きの力 $F_{D,0}$ を任意に変動させている。本研究ではこの力 $F_{D,0}$ を一定としたので、被切離物体の厚さ a が変動して接触する歯の数 n が変化しても、摩擦などを考慮した切離抵抗力 F_{saw} は

ほぼ一定となる。なお、摩擦係数は物体の温度によって変化する弾性、粘性、塑性のほか、物体とノコギリの接触面の状態などによっても変化する値である。本研究では摩擦係数を一定と仮定して議論したが、これらの間の関係を解析的に表すことは今後の研究課題である。

ところで、切離距離に対して必要となる延べ総歯数が求められることにより、効率良く切離を完了するための条件を与えることが可能である。また、本研究では切離抵抗力 F_{saw} を力のモーメントとして求めている。これはノコギリの使用において、人間の肘や肩を支点とした力の伝達を考慮しなければならないことを示唆している。使用する人の体格や使用環境・使用目的などを考慮して性能に優れたノコギリの設計を行うことは人間工学的な観点からも興味深い。

6. む す び

弾性体を横びきノコギリによって切断した場合に現れる切離抵抗力を、物体に固有の物性値及びノコギリの形状を反映して解析的に表現することができた。

本研究では、一般的に広く用いられ、切削として原理が知られている縦びきノコギリ[15]ではなく、ナイフと切離機序が共通する横びきノコギリを採用した。横びきノコギリの解析例は少なく、人工現実感の研究における力覚表示を実現する上で重要な意味をもつと考えられる。

本研究の一部は三菱財団の補助によるものであり、研究の遂行にあたって有益な議論を頂いた東京医科歯科大学の張曉林博士に深い感謝の意を表します。

文 献

- [1] R. O'toole, R. Playter, and W. Blank, "Assessing skill and learning in surgeons and medical students using a force feedback surgical simulator," Lect. Notes Comput. Sci., vol.1496, pp.899-909, 1998.
- [2] P.F. Neumann, J. Gieser, and L.L. Sadler, "Virtual reality vitrectomy simulator," Lect. Notes Comput. Sci., vol.1496, pp.910-917, 1998.
- [3] L. Serra, R.A. Kockro, and C.G. Guan, "Multi-modal volume-based tumor neurosurgery planning in the virtual work bench," Lect. Notes Comput. Sci., vol.1496, pp.1007-1015, 1998.
- [4] J. Marescaux, J.M. Clément, V. Tasseti, C. Koehl, S. Cotin, Y. Russier, D. Mutter, H. Delingette, and N. Ayache, "Virtual reality applied to hepatic surgery simulation," The Next Revolution, ANNALS OF SURGERY, vol.228, no.5, pp.627-634, 1998.
- [5] 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, vol.119-C, no.10, pp.1126-1132, 1999.

- [6] 若松秀俊, 盧 泰均, 張 曉林, 本間 達, “力覚表示可能なノコギリ型遠隔操作装置による仮想物体の立体視加工,” ME 誌, 37(supplement), p.479, 1999.
 - [7] 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.
 - [8] 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ー学会論文誌, vol.3, no.3, pp.75-82, 1998.
 - [9] 阪口正道, 古莊純次, “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ー学会論文誌, vol.3, no.3, pp.133-140, 1998.
 - [10] 田中厚子, 広田光一, 金子豊久, “仮想空間における切断作業,” 日本バーチャルリアリティー学会論文誌, vol.3, no.2, pp.47-53, 1998.
 - [11] 若松秀俊, 今井照泰, “抵抗感を伴う立体視画像切断システムの開発,” 電学論, vol.113-C, no.8, pp.627-634, 1993.
 - [12] 本間 達, 若松秀俊, “仮想物体を操作できるノコギリ型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.2, no.2, pp.1-2, 2000.
 - [13] 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, vol.119-C, no.12, pp.1437-1443, 1999.
 - [14] 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.
 - [15] 臼井英治, 白樫高洋, 加工の力学入門, 東京電機大出版局, 東京, 1996.
 - [16] 宮本 博, 菊池正紀, 材料力学, 裳華房, 東京, 1987.
 - [17] 都竹卓郎, 玉井英次, 兼松和男, 大学課程実験物理学, オーム社, 東京, 1970.
- (平成 11 年 10 月 25 日受付, 12 年 6 月 1 日再受付)



若松 秀俊 (正員)

昭 47 横浜国大修士課程了。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。昭 48~50 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 6 オレゴン州立大学, 平 7 釜山国立大学, 平 8 華中理工大学, 天津大学など客員教授 (工博)。



本間 達 (学生員)

平 5 日大・理工卒。平 9 東京医科歯科大医学部卒, 平 11 同大医学系研究科博士前期課程了, 同年同大医学系研究科博士後期課程入学。現在に至る。電気学会, 日本バーチャルリアリティー学会, 化学工学会, 日本臨床生理学会各会員。