

別刷

日本バーチャルリアリティ学会 論文誌

日本バーチャルリアリティ学会

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

本間 達*¹ 若松 秀俊*¹

Cutting Moment Analysis of Materials by the Saw for Force Display System

Satoru Honma*¹ and Hidetoshi Wakamatsu*¹

Abstract — In order to represent different states of materials in a mathematical form, their precise dynamical analysis is given according to their physical characteristics including their irreversible transformation. The real time operation to their virtual materials by a saw-type edged tool is discussed for their force display system. On the basis of our previous studies, the practical analysis method with more degrees of freedom and less calculation is proposed for well attendance to the reality of cutting them by the saw-type edged tool. Consequently, it ensures the better real time simulation results in accordance with the experiences of their physical operation.

Keywords: Virtual saw , Force Display system , Viscoelastic model , Cutting moment

1 はじめに

人工現実感の研究では物理法則にもとづく解析により、表現する事象の動特性を理解することが重要である。人間の五感に作用する様々な特性を反映するために、種々の研究[1][2][3][4][5][6][7][8][9]にもとづく様々な手法を組み合わせたシステムが提案されてきた。例えば仮想の物体を仮想のデバイスで加工する研究[10]や粘弾性体モデルを用いて構築した仮想物体のひびわれを表現する研究[11]などが報告されている。また力覚表示システム[12][13][14]では仮想物体を操作する感覚を提示するために、仮想デバイスや仮想物体の視覚的な質感の表示、操作者の触覚に作用する力覚の提示、および聴覚に作用する操作時の発生音の合成・出力などを同時に行い、複合的に現実感を実現する。このとき仮想デバイスや仮想物体に与えた物性値を根拠として、理論式により目標値を算出するが、外部からの操作による仮想物体の形状変化に対応するために膨大な演算を行うことが必要である。また、操作者に操作感覚を与えるためには仮想デバイスや仮想物体の状態に連動した実デバイスの制御が必要であるので、操作対象を限定しているにもかかわらず、実時間での演算処理が困難である。

したがって人工現実感のシステム構築には手順の簡略化と演算処理の高速化が不可欠である。このため、システムの構築においては現実の動特性を選択的に反映したり、複数の演算ユニットを用いた処理の分散化、仮想物体の変化量に応じたモデル要素数の削減[15]などの手法により、計算機にかかる負荷の軽減が試みられてきた。

著者らはこれまでにハサミやノコギリ型のデバイスを用いた力覚表示システム[16][17][18][19][20][21][22][23]での応用を前提として、物体の切離時に

生じる切離モーメントの算出[24][25]を試みてきた。これらは仮想物体の切離時に生じる破壊を伴う形状変化および物体と切離デバイスの特性を反映した理論式により切離モーメントを算出する。すなわち変形の様子を計算し、リアルタイムでの描画処理を行いながら、実デバイスによる操作状態を反映して切離モーメントを算出する。この値に基づいて実デバイスに組み込んだアクチュエータを制御し、仮想物体の切離感覚を表現する。これは有限要素法により変形と力覚を算出する手法[26]と比較して、演算処理時間を大幅に減少し、ストレスの少ない操作感覚が得られ、力覚表示システムの構築にきわめて有効な手法である。

本論文ではこの手法にもとづき、より自由度の高いノコギリ型力覚表示システム[27][28][29][30]を開発するために、著者らが提案したよこびきノコギリでの切離モーメントの理論式[31]を改良する。具体的には被切離物体の任意の位置を切離する場合を考え、ノコギリによる切離速度と物体の粘性をも考慮して理論式を構築する。さらに、改良した理論式についてシミュレーションを行い、従来手法との比較検討を行う。さらにノコギリ型力覚表示システムに適用して実験を行い、その有効性を検討する。

2 理論式の構築

本研究では本間らの研究[31]にもとづき、よこびきノコギリでの切離時に、引き込み角を変化するときの回転の中心、すなわち被切離物体との接点を軸とする切離モーメントを算出する理論式を改良する。ノコギリの特性としてノコギリの胴の厚さおよび幅、歯の幅、歯の鋭さ、被切離物体の特性として弾性、粘性を考慮する。また切離面における静止摩擦係数と動摩擦係数をそれぞれ一定として考える。さらにノコギリと被切離物体の位置関係、すなわち被切離物体に対するノコギリの相対位置と切離速度、およ

*1 : 東京医科歯科大学大学院 保健衛生学研究科

*1 : Tokyo Medical and Dental University Graduate School of Health Sciences

び引き込み角を反映する。議論の簡略化のため歯と胴のなす角度、すなわちあさは考慮しない。

なお操作者は適正な力でノコギリを操作し、ノコギリの胴のたわみは生じないと考え、切離は直線状に行うとする。ノコギリはよこびきを前提とするので、歯はナイフ[25]と同様に物体を切離すると考えた。

ノコギリの切離モーメントは解析的に以下のように表現される[31]。

$$M_{\text{saw}} = M_{ST} + M_{TF} \quad \dots\dots(1)$$

すなわち、ノコギリによる物体の切離時に切離感覚を与える切離モーメント $M_{\text{saw}}[\text{Nm}]$ は、ノコギリの歯に形成された刃で物体を切離する際に生じるモーメント $M_{ST}[\text{Nm}]$ と、切離時に与えられるモーメントによって被切離物体がたわみ、物体の分断された部分がノコギリの胴をはさみ込むことで生じる摩擦モーメント $M_{TF}[\text{Nm}]$ の合成によって得られる。しかしながら従来手法では、 M_{ST} を求める深さ $r[\text{m}]$ と M_{TF} を求める切離速度 $v[\text{m/s}]$ および粘性定数 $\gamma[\text{Ns/m}]$ を考慮していない。また直方体の被切離物体の中線に沿って切離を行うとして、物体のたわみを考慮した。したがって、被切離物体に対するノコギリの位置が常に一定であり、任意の力覚表示が困難である。またモーメントの基準点が不明確であり、力覚表示システムで用いるデバイスの設計が困難であった。そこで、本論文ではこれらの点を明確にし、解決する。

2.1 押入時に歯に生じるモーメントと深度の算出

ノコギリで物体を切離する時、最初に物体に触れるのは歯の先端である。ここで物体に対して歯を垂直に押し当て、内部に押し込むことを押入と定義する[25][31]。ノコギリは歯が物体内部に押入されなければ、切離は生じない。そこで最初に歯の押入について考える。議論を単純化するために、押入時に生じるモーメント(以下、押入モーメント)の議論に関して一本の歯の形状を図1に示すような三角柱としてモデル化する。切離時には歯の先端を中心として引き込み角を決定するので、押入モーメントを考慮する場合、物体に接する歯の先端を通る τ 軸方向の軸(図1中 $O-O'$)をモーメントの基準軸として考える。

歯を押入するとき、 n 本の歯が接しているとする。一本の歯に生じるモーメント M_D/n $[\text{Nm}]$ と物体から歯に加わる力によって生じる押入モーメントが深さ r でつりあうとし[31]、このとき、 ρ 軸方向の基準軸からの位置 $y(0 \leq y \leq r)$ において押入された歯の $\tau-\phi$ 面に平行な断面積と物体断面の面積変化量が等しいとする。力 F 、ヤング率 E 、ひずみ ε 、面積 S 、面積変化量 ΔS の間には $F = E \cdot \varepsilon S = E \cdot \Delta S$ なる関係式が成立することが知られている[32][33][34] ので、弾性定数ヤング率 $E[\text{N/m}^2]$ を考えると、位置 y における断面の受けるせん断力 $f(y)$ は以下の式(2)のようになる。

$$f(y) = Ehy \tan \alpha \quad \dots\dots(2)$$

ただし図1に示すように、歯の先端の角度 α であり、ノコギリの厚さ h である。

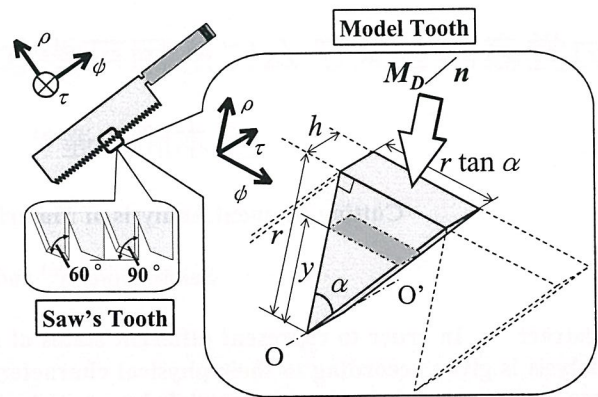


図1 ノコギリの歯におけるモーメントの平衡

Fig.1 The equilibrium state of the moment when a tooth of the saw enters the object.

ここで先端すなわち $y=0$ におけるモーメントが0であることを考慮すると、押入時に歯の受ける基準軸回りのモーメント M_D/n は、面積モーメント法[34]により式(2)を区間 $[0, r]$ で積分して以下の式(3)で表せる。

$$\begin{aligned} M_D/n &= \int_0^r f(y) dy = \int_0^r Ehy \tan \alpha dy \\ &= \frac{1}{2} E h r^2 \tan \alpha \quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

このとき基準軸回りに α を変化させる回転力を生じるが、本研究では角度を一定に保持するためのモーメントが手からノコギリに加えられ、平衡状態になるとしてこれを考慮しない。

また n は整数なので、切離面における被切離物体とノコギリの接触長 C_L 、 ϕ 軸方向すなわち切離方向の歯の幅 T_L およびガウスの記号を用いて、 $n = [C_L/T_L]$ で表される。これを式(3)に代入して押入深度 r を求めると以下の式(4)を得る。

$$r = \sqrt{2M_D/[C_L/T_L] E h \tan \alpha} \quad \dots\dots(4)$$

ただし、ノコギリの歯は胴に付属しているので、最大値 $r_{T\max}[\text{m}]$ は以下の式(5)で与えられる。

$$r_{T\max} = T_L \cot \alpha \quad \dots\dots(5)$$

なお、 $M_D[\text{Nm}]$ は歯を押入するために外部からノコギリに与えるモーメント $M_{D,0}[\text{Nm}]$ と、摩擦モーメント M_{TF} により以下のように補正して得る[31]。

$$M_D = M_{D,0} - M_{TF} \quad \dots\dots(6)$$

2.2 切離時に生じるモーメントの算出

ノコギリの歯で物体を切離する場合に発生するモーメント $M_{ST}[\text{Nm}]$ は、上記と同様に歯の先端を通る τ 軸方向の軸(図1中 $O-O'$)をモーメントの基準軸として以下の式で与えられる[25][31]。

$$\begin{aligned} M_{ST} &= \frac{1}{2} h^2 E r [C_L/T_L] \cos \phi \left(\frac{E_s \sin \phi}{2 \cos \phi + E_s \sin \phi} \right)^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} \mu h E r^2 [C_L/T_L] \tan \alpha \quad \dots\dots(7) \end{aligned}$$

ただし、式中の各パラメータはそれぞれ、切離直前の粘弾性体の伸展率 E_s 、弾性体固有の弾性限界の伸展率 E_m を用いて定義される弾性限界内での見か

けの弾性限界 $E_s = E_m/E_r$ ，歯の刃部の鋭利さを表す角度 ϕ ，摩擦係数 μ である。

2.3 切離時に生じる摩擦モーメントの算出

従来の研究[31]ではノコギリでの切離時に，ノコギリから板状の被切離物体に加わる荷重 F_1 [N]によって，切離方向に両はり様のたわみを生じるとした。これはまだ切離されていない被切離物体がはりを支える構造物となることを考慮している。このとき生じた変形によりノコギリの胴が被切離物体に挟み込まれ，胴の両側面と物体の切離面の間に摩擦モーメント M_{TF} [Nm]を生じるとした。この理論式によるシミュレーションでは，得られる結果が経験則と矛盾しないことが示された。本研究ではこの手法を拡張し，板状物体の中線に平行な任意の位置で切離を行う場合について考える。切離時のノコギリと被切離物体の位置関係を図2に示すように定義する。切離においては右利きの人間による切離を想定して，切離位置 l_1 を被切離物体の右端からの距離とする。

また新たに切離速度が切離モーメントに及ぼす影響を考え，物体の粘性項を導入する[3][22][24]。さらに，物体とノコギリの接触面積を考慮して，本項で摩擦の影響について考慮する。

図2において長さ L [m]の両はりの右端から l_1 [m] ($l_1 \leq L/2$)の位置に荷重 F_1 [N]が加わったときの，最大たわみ位置を示す左端からの距離 l_2 [m]は以下の式(8)で表される[34]。

$$l_2 = \sqrt{(L^2 - l_1^2)/3} \quad \dots\dots(8)$$

このとき，図2中の δ 軸方向，すなわち図中 View1の矢印方向からみたのが図3である。ノコギリで切離した際に生じたモーメントの作用によって物体に加えられる荷重 F_1 により，図3下図のように両はり様のたわみを生じている。最大たわみ位置における最大たわみ量 e_{MAX} [m]および位置 l_1 でのたわみ量 e_1 [m]は，切離残量 x [m]を用いてそれぞれ以下の式(9)(10)で表される。ただし，本研究では $x \gg \text{acot } \theta$ の場合について考え，断面の形状を近似的に長方形と仮定し，断面二次モーメントを $I = ax^3/12$ とした[34]。ただし，ここで θ はノコギリの引込角である。

$$e_{MAX} = 4F_1 l_2^3 / LEax^3 \quad \dots\dots(9)$$

$$e_1 = 4F_1 l_1^3 / LEax^3 \quad \dots\dots(10)$$

図3下図で破線円の内部に示した，ノコギリの胴と被切離物体との接触部における板状物体のたわみを図4に示す直線①②で近似する。直線①②と τ 軸方向とのなす角度 ξ_1 ， ξ_2 をそれぞれ図中に示すように定義すると， $l_3 = L - l_1 - l_2$ を考慮して， $\tan \xi_1$ ， $\tan \xi_2$ はそれぞれ以下の式で表される。

$$\tan \xi_1 = (e_{MAX} - e_1) / l_3 \quad \dots\dots(11)$$

$$\tan \xi_2 = e_1 / l_1 \quad \dots\dots(12)$$

物体上に引いた τ 軸方向の直線に沿ってノコギリで切離が行われると考えるので，ノコギリの左側面は直線と一致する。すなわち，ノコギリはたわみによって変化する切離方向を微調整しながら切離を行なう。したがって，物体とノコギリとの摩擦を生じ

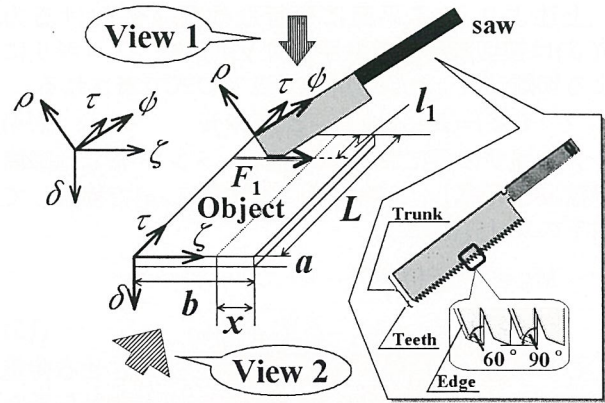


図2 ノコギリによる物体の切離条件
Fig.2 Cutting condition of the object by the saw.

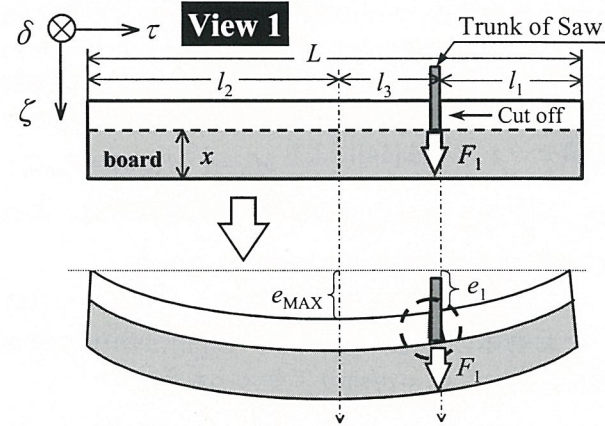


図3 任意の位置に荷重が加わった被切離物体のたわみ
Fig.3 Bending of the object owing to the force at its arbitrary position.

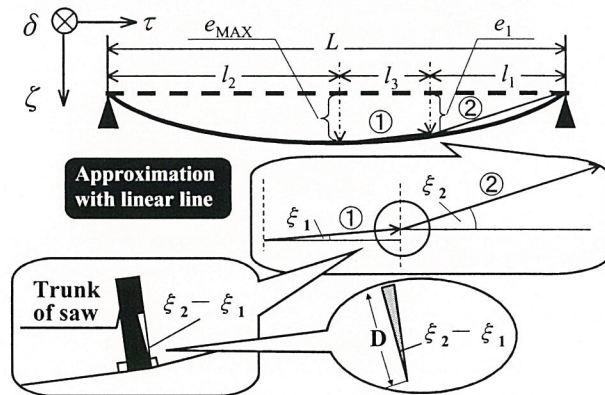


図4 切離部位におけるたわみの直線近似
Fig.4 Approximation of the bending by linear lines at the cutting position

させる変形は，図4中枠内に示すようにノコギリの片側面についてのみ考慮する。

このとき板状物体がノコギリと接触して生じる変形量を表す面積 S [m²]は以下の式(13)で表されるので，式(11)(12)を用いて加法定理により面積 S を得る。

$$S = D^2 \tan(\xi_2 - \xi_1) / 2 \quad \dots\dots(13)$$

ただし D [m]は図5に示すようにノコギリの背から歯先までの長さ d [m]，およびノコギリの引込角 θ を用いて $D = d / \sin \theta$ である。

上述より τ - ζ 平面に平行な位置 δ における力 $F(\delta)$ は被切離物体の粘性定数 γ [Ns/m], ノコギリによる切離速度 v [m/s] を用いて以下の式で表される.

$$F(\delta) = ED^2 \tan(\xi_2 - \xi_1)/2 + \gamma v \quad \cdots \cdots (14)$$

ノコギリの胴における摩擦モーメント M_{TF} は摩擦係数 μ を考慮し, δ 軸について区間 $[0, a]$ で積分して以下の式(15)を得る.

$$M_T = \int_0^a \mu F(\delta) d\delta \\ = \mu ED^2 a \tan(\xi_2 - \xi_1)/2 + \mu \gamma v a \quad \cdots \cdots (15)$$

ところで, 被切離物体にたわみを生じさせる荷重 F_1 [N] は, 図 2 中の矢印で示した View2 方向から見た場合に図 5 に示すように, ノコギリによる物体の切離時の 2 つのモーメント M_D [Nm], M_{saw} [Nm] それぞれにより生じる, 2 つの荷重 F_{MD} [N], F_{Msaw} [N] の ζ 軸方向への分力の合力として得られるとした. すなわち議論を単純化するために本研究では荷重が被切離物体の厚みに対して均等に分布しているとしたので, 面積モーメント法[34]により $M_D = \int_0^{C_L} F_{MD} d\varphi = F_{MD} C_L$,

$M_{saw} = \int_0^{C_L} F_{Msaw} d\varphi = F_{Msaw} C_L$ がそれぞれ成立する. よって荷重 F_1 [N] は以下の式(16)で与えられる.

$$F_1 = (M_D \sin \theta + M_{saw} \cos \theta) / C_L \quad \cdots \cdots (16)$$

なお物体の切離部位の長さ C_L [m] は物体の厚さ a [m] を用いて $C_L = a / \sin \theta$ で与えられる.

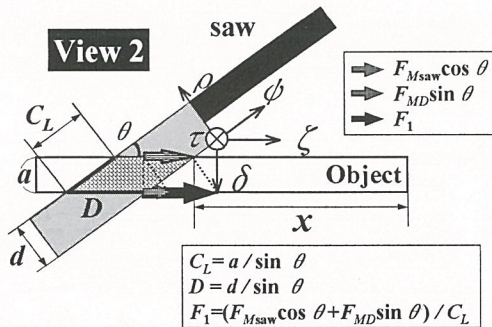


図 5 モーメントと力の関係
Fig.5 The cutting moment by the saw and the force on the object.

3 解析と動特性

3.1 シミュレーションによる検討

構築した理論式について, (a)切離位置の変更, (b)切離速度, (c)被切離物体の粘性定数のそれぞれを変化させて切離を行った場合の切離モーメントをシミュレーションで検討した. その結果をそれぞれ図 6 (a)(b)(c)に示す. グラフの上段は切り進んだ距離に対して使用したノコギリの歯の総数であり, 下段は切離モーメント M_{saw} を示している. このとき, 粘性定数 $\gamma=1.0$ [Ns/m], ノコギリの胴の幅 $d=0.10$ [m], ノコギリの厚み $h=1.0 \times 10^{-3}$ [m], 歯先の角度 $\alpha=60$ [deg], 歯の鋭利さ $\phi=5.0$ [deg], 被切離物体の幅 $L=0.5$ [m], 被切離物体の厚さ $a=0.01$ [m], 被切離物体の長さ $b=0.5$ [m], 歯の幅 $T_L=3.0 \times 10^{-3}$ [m], $r_{Tmax}=1.7 \times 10^{-3}$ [m],

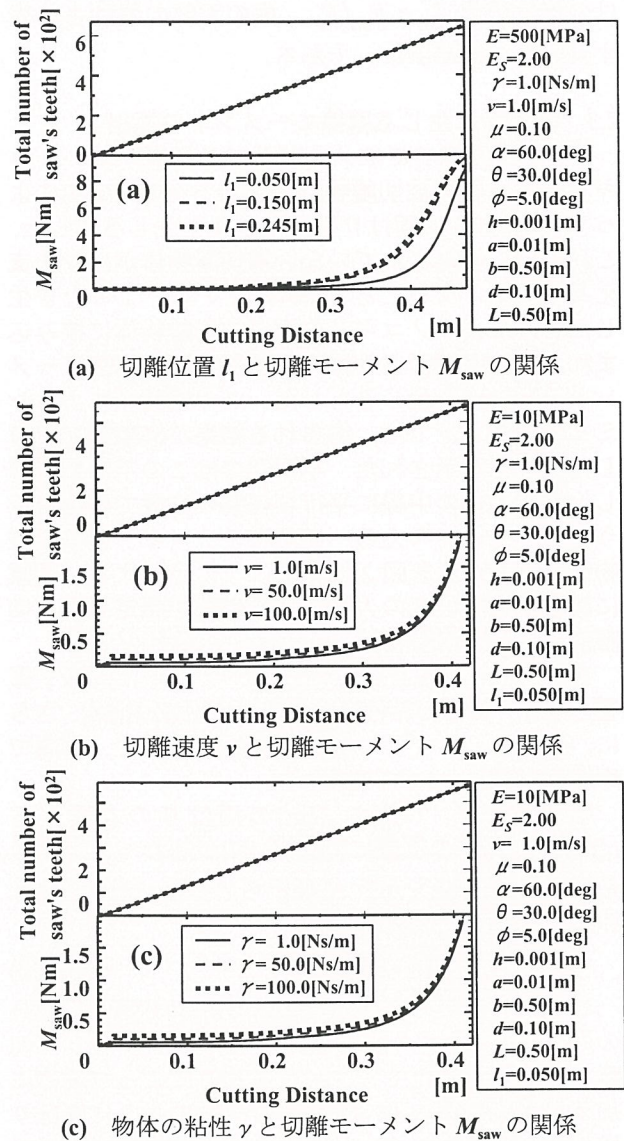


図 6 切離モーメントのシミュレーション結果
Fig.6 Simulation result of the cutting moment.

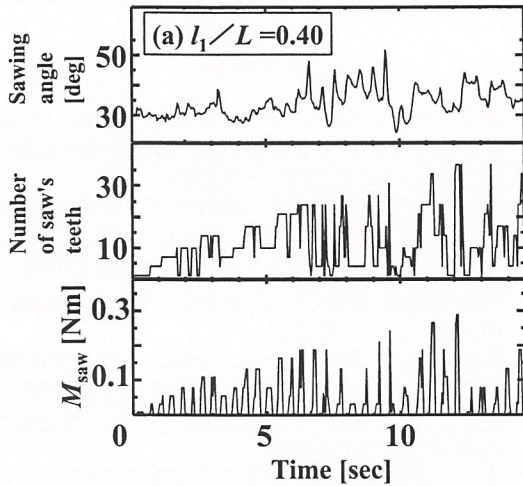
引込角 $\theta=30.0$ [deg] の条件とした. また(a)ではヤング率 $E=500$ [MPa] とし, (b)(c)では $E=10$ [MPa] とした.

同図(a)より板状物体の切離では, 物体の中程までは被切離物体の右側からの切離位置 l_1 によらず切離モーメントがほぼ一定であるが, 切り進んでノコギリが手元に近づいた場合に, 右端からの距離が小さいほど切離モーメントは小さい. また同図(a)(b)より物体がかたい場合, 切離速度は切離モーメントにほとんど影響しない. 物体がやわらかい場合, 切離速度が大きいほど切離モーメントが大きい, 物体の弾性変化や切離位置の変化と比較して極めてその影響は小さい. すなわち, 切離速度はノコギリの切離モーメントにほとんど影響しない. さらに同図(c)より物体の粘性値の変化は切離速度と同様切離モーメントにほとんど影響しない.

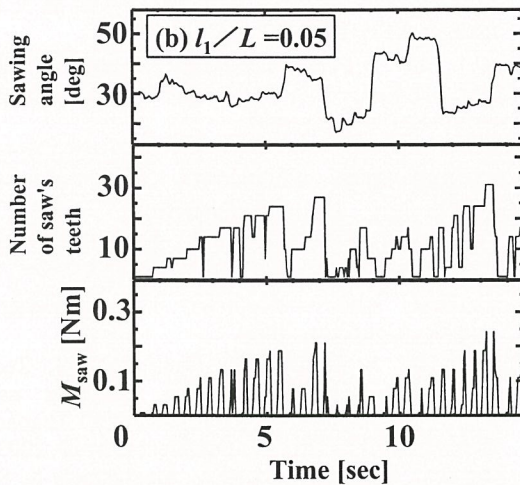
また, 同図(b)(c)より, シミュレーション開始時において, ノコギリの歯のみが物体内にあり, 胴が物体にはさまれていない位置では, 摩擦によるモーメントの影響を受けないので, 切離モーメントが 0 に

近い値となっている。

なお、本シミュレーションでは(a)(b)(c)のいずれの場合も、条件の変更によるノコギリの歯の総数に変化が見られなかったことから、上述の検討は切離に用いる歯の数が等しい場合について成立する。



(a) 被切離物体の中線近傍における切離の様子



(b) 被切離物体の片端近傍における切離の様子

図7 力覚表示システムの実験結果

Fig.7 Experimental result from the saw-type force display system

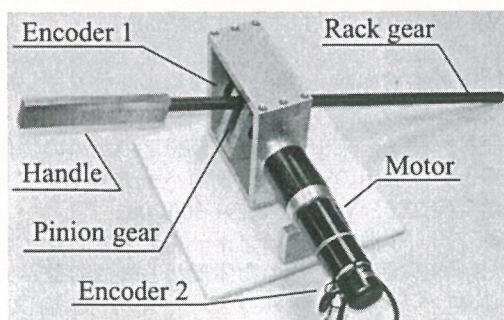


図8 ノコギリ型入力デバイスの外観

Fig.8 Appearance of the saw-type operating device.

3.2 力覚表示システムの実験結果

図7は、本理論式を適用した力覚表示システム[30]による実験結果である。このとき用いたノコギリ型

デバイスを図8に示す。このデバイスは引込角をエンコーダ1(MICROTECH社製, MEH-815-1000)で、ラックとピニオンで回転運動に変換したノコギリの並進運動をモータ(MAXON社製, 118778)と接続したエンコーダ2(MICROTECH社製, MEH-20-2000)でそれぞれ検出する。同時にコンピュータからの信号により、モータで切離モーメントを出力する。

図7に示したグラフのそれぞれ上から引込角 θ 、切離に使用している歯の数、切離モーメント M_{saw} を示している。このとき、ノコギリを引いたときのみ切離モーメントを生じるとした。被切離物体の右端からの切離位置 l_1 を変えた場合の実験結果を示す。同図(a)は $l_1=0.16[\text{m}]$ で被切離物体のほぼ中央近傍を切離した場合であり、同図(b)は $l_1=0.04[\text{m}]$ で、右端近傍を切離した場合の結果である。

また、ノコギリの操作に伴い変動する引き込み角 θ と切離部位の長さ C_L 以外のパラメータについては均一とした。システムにはヤング率 $E=1.0[\text{kPa}]$ 、粘性定数 $\gamma=0.1[\text{Ns/m}]$ 、ノコギリの胴の幅 $d=0.15[\text{m}]$ 、ノコギリの厚み $h=1.0 \times 10^{-3}[\text{m}]$ 、歯先の角度 $\alpha=60[\text{deg}]$ 、歯の鋭利さ $\phi=5.0[\text{deg}]$ 、歯の幅 $T_L=3.0 \times 10^{-3}[\text{m}]$ 、 $r_{\text{Tmax}}=1.7 \times 10^{-3}[\text{m}]$ 、被切離物体の幅 $L=0.4[\text{m}]$ 、被切離物体の厚さ $a=0.1[\text{m}]$ 、被切離物体の長さ $b=0.4[\text{m}]$ なる条件を与えた。また、ノコギリを停止状態から動かす瞬間の摩擦係数は静止摩擦係数とし、動いている状態では動摩擦係数を用い、それゆえ静止摩擦係数を動摩擦係数より大きな値として与えた。

同図から分かるように、切離に要する歯の数が等しい場合、切離位置によらず切離モーメントはほぼ等しい値となっている。これは、シミュレーションの結果(図6(a))と一致する。一方、切離位置が等しい場合でも切離に用いている歯の数が少ないほど切離モーメントは小さくなることが示されている。これは経験則と一致しており、良好な結果であるといえる。

4 考察

シミュレーションの結果から以下のことが推察される。まず、図6(a)より板状物体をノコギリで切離する場合、同一の切離モーメントであるならば、物体の右端に近い位置ほど終端付近まで連続的に切離することが容易であることを示している。また、 $l_1/L=0.45$ と切離位置が中線に近い場合には従来の研究[31]とほぼ同様の結果を得る。これは、本研究結果が従来の研究を継承し、これと矛盾しないことを示している。次に図6(b)(c)より切離速度および粘性定数が高いほど切離モーメントは大きくなるが、その差は顕著ではない。一般に手でノコギリを動かす場合、切離速度と物体にたわみを生じる力の発生の間には関連があるので、切離モーメントに対する影響は大きい。しかしモータなどの動力によって高速で動くノコギリを考えた場合、その切離速度と与えるモーメントの間には、必ずしも関連があるとは言えないので、切離モーメントに対する影響は小さくなると考えられる。

次に、力覚表示システムを用いて得た実験結果では切離位置によらず切離モーメントは、ほぼ同じ値を示しており、切離に要する歯の数の影響を除けば、シミュレーションの結果と一致する。歯の押入深度は被切離物体の弾性定数、すなわちヤング率と押入モーメントによって決定する。本システムに与えた条件では、歯がとり得る深さの最大値まで押入されるので、切離に要する歯の数が増えるほど切離モーメントは大きくなる。また、同時に胴と被切離物体の接触面積も増加するので摩擦モーメントが大きくなり、切離モーメントに影響することが考えられる。なお、ノコギリを押す動作から引く動作に変化する瞬間は速度 0 であり、摩擦係数を考慮するとその瞬間に切離モーメントが大きな値とならなければならないが、実験の結果から歯数の変化による影響の方が大きいことが示されている。これは、引く瞬間には物体のたわみをほとんど生じていないので胴がほとんどはさまれず、摩擦の影響をほとんど受けないことによると考えられる。これは経験則と良好に一致する。

なお、本研究ではノコギリの「あさり」について考慮しなかった。「あさり」は胴と歯の間に角度を形成し、切離時に被切離物体に胴の幅より広く溝を作るので切離モーメントの低減に有効であると考えられる。これについても今後の検討課題である。

5 おわりに

本研究では、ノコギリ型力覚表示システムへの応用を念頭に置いたので、上述の押入モーメントの初期値 $M_{D,0}$ を一定とした。従って、実際の切離に関わる全ての条件を表していない。また、このシステムのために開発したデバイスはノコギリの並進運動および引き込み角の変化を検出するが、構造上、物体に押しつける力を検出しない[28][29][30]。これはデバイス開発時に、この力の検出をする根拠が得られなかったことによる。しかしながら、本研究結果から、デバイスで検出すべき要素が明確になったので、これに合わせてデバイスの改良が必要である。すなわち人工現実感システムに適用するデバイスを開発するとき、現象の理論解析にもとづいて行わなければならないことを示している。

また、本論文ではノコギリの胴に生じるたわみやねじれを考慮していないので、これらを考慮した理論式の構築と、それに基づくデバイスの開発として取り上げる必要がある。

また、本モデルの各パラメータを測定項目として、実際のデバイスを用いて切離を行った場合の切離モーメントを測定し、比較検討することには破壊工学や切離工学の観点からも重要である。

本研究では従来の手法[24][25][31]にもとづき、よこびきノコギリを想定して導出した理論式[31]を改良し、シミュレーションによりその有効性を検討し、切離速度と物体の粘性がほとんど切離モーメントに影響しないことと被切離物体の右側からの切離位置が切離モーメントに及ぼす影響について確認した。

さらに、この理論式をノコギリ型力覚表示システム[28][29][30]に応用し、実際のノコギリを使用した場合に感じる力覚の経験則と一致する結果が得られることを確認した。本モデルの検討により、ノコギリ型デバイスの改良点と、切離モーメントを実測する場合のパラメータを示唆したことは意義がある。

参考文献

- [1] 宮崎, 安田, 横井, 鳥脇: 仮想弾性物体の対話操作のためのモデル化と実現, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J79-A, No. 11, 1919-1926, 1996
- [2] 広田, 金子: 仮想物体の弾性モデルに関する検討, 計測自動制御学会論文集, Vol. 34, No. 3, 232-238, 1998
- [3] 本間, 若松: リアルタイムで切離可能な仮想粘弾性物体の構築, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 6, No. 2, 137-143, 2001
- [4] 黒田, 中尾, 黒田, 小山, 小森, 松田: 複数臓器間の接触シミュレーションを実現する弾性体間の相互作用モデル, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 2, 155-162, 2003
- [5] 竹内, 胡摩, 佐野, 藤本: インタラクティブな手術シミュレーションのための柔軟物操作モデリング, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 2, 137-144, 2003
- [6] 古川, 名倉: 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, 75-82, 1998
- [7] 坂口, 古荘: 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, 133-140, 1998
- [8] 井上, 上杉, 笹間, 新井, 前: 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, 295-302, 2003
- [9] Rasmussen J, Dahlquist J, Damsgaard M, Zee M, Christensen S: Musculoskeletal modeling as an ergonomic design method. International Ergonomics Association XVth Triennial Conference, 24-29, 2003
- [10] Bruyns C, Senger S, Menon A, Montgomery K, Simon Wildermuth S, Boyle R: 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, 21-42, 2002
- [11] 青木, ゴ, 金子: 物理的モデルによる3次元物体の乾燥によるひび割れ表現法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J86-D-II, No. 12, 1756-1764, 2003
- [12] 田中, 広田, 金子: 力覚をともなう変形・切断操作による造形作業, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 3, 573-583, 1999
- [13] 北村, 銅子, 来山, 岸野: 仮想箸のための物体の変形と力覚表示の一検討, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 3, 291-300, 2002
- [14] 長谷川, 小池, 佐藤: フォースディスプレイを用いた剛物体操作のための物体形状と外力の提示方法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 3, 323-328, 2002
- [15] 宮崎, 山田, 長谷川, 安田, 横井: 弾性要素数削減に基づく弾性体モデルの運動計算の高速化, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 1, 85-92, 2003
- [16] H. Wakamatsu and T. Imai: Stereoscopic display of the inside image of rat brain by three dimensional dissection

[著者紹介]

- methods, J. Int. Fed. Med. Biol. Eng., 29-Suppl. Part 1, 123, 1991
- [17] 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, 電気学会論文誌, Vol.111-C, No.6, 242-248, 1991
- [18] H.Wakamatsu, T.Imai and K.Okada: Artificial realization of reactive forcefeeling on stereoscopic cutting of image of multi-layer sphere., Proc. 2nd Int. Conf. Image Process., 1992
- [19] 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.8, 627-634, 1993
- [20] H.Wakamatsu: Operational systems of stereoscopic cutting 3D virtual objects with reactive feeling., IFAC 13th World Congr., 409-414, 1996
- [21] 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., 312-316, 1998
- [22] 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
- [23] 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., 631-636, 2000
- [24] 本間, 若松, 張: 粘弾性体モデルで表現した仮想物体の構築と加工, 電気学会論文誌, Vol.119-C, No.12, 1437-1443, 1999
- [25] 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, 458-465, 2004
- [26] 金沢, 中川, 三浦: 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—, 精密工学会誌, vol.63, No.1, 70-75, 1997
- [27] 若松, 盧, 張, 本間: 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, 医用電子と生体工学, 37(supplement), 479, 1999
- [28] 本間, 若松: 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, 1-2, 2000
- [29] 若松, 高橋, 本間: ハサミ・ナイフ・ノコギリを組み合わせた遠隔操作による仮想物体の加工, 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, 151-154, 2000
- [30] 本間, 若松: 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, 437-440, 2003
- [31] 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
- [32] 臼井, 白樫, 加工の力学入門, 東京電機大出版局, 東京, 1996
- [33] 佐野: 連続体の力学, 裳華房, 2000
- [34] 宮本, 菊池: 材料力学, 裳華房, 1996

(2004年4月9日受付)

本間 達

(正会員)



平成5年日本大学理工学部卒業, 同9年東京医科歯科大医学部卒業, 同14年同大学院保健衛生学研究科博士後期課程修了. 同15年東京医科歯科大学大学院保健衛生学研究科助手. 現在に至る. 博士(保健学).

若松 秀俊

(正会員)



昭和47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. 昭和48-50年, ドイツ連邦共和国学术交流会(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. 平成7年釜山国立大学, 平成8年華中理工大学, 天津大学など客員教授. 工学博士.