

IEICE

電子情報通信学会技術研究報告

IEICE Technical Report

MVE2009-1 – MVE2009-23

マルチメディア・仮想環境基礎

Multimedia and Virtual Environment

2009年6月8日～9日

June 8-9, 2009



社団
法人

電子情報通信学会

The Institute of Electronics, Information
and Communication Engineers

<http://www.ieice.org/>

ともに種々の粘弾塑性を備えた仮想臓器と仮想器具間の 相互作用による変形

本間 達[†] 若松 秀俊[†]

[†]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

E-mail: hommtec@tmd.ac.jp, wakamats.bse@tmd.ac.jp

あらまし 将来の医療分野への応用を念頭に置いて、相互作用を表現可能な粘弾塑性モデルで構築した仮想臓器を変形加工する器具の動態について検討する。本研究では特に、ナイフで切る場合と採血針で刺す場合を想定する。具体的には薄く細長い板状の物体をナイフ、先端を斜めに切り落とした中空の円筒を採血針とみなし、空間内での移動の他、器具のねじりの運動などについても検討する。仮想臓器として任意形状の中実物体や血管を想定した(中空)管状物体を構築する。

キーワード 力覚表示システム, 粘弾塑性体モデル, 相互作用, 実時間操作, 破壊

Deformation by mutual action of virtual internal organs and instruments both represented as visco-elasto-plastic materials

Satoru HONMA[†] Hidetoshi WAKAMATSU[†]

[†]Graduate School of Health Care Sciences, Tokyo Medical and Dental University

1-5-45 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8519 Japan

E-mail: †{hommtec,wakamats.mtec}@tmd.ac.jp

Abstract The dynamic characteristics of the virtual system are discussed for the medical application. The internal organs synthesized by visco-elasto-plastic materials have interactions in consideration of their distortion and destruction caused by virtual tools. The operation of blood vessel by a thin plate-like and a hollow-cylindrical object with oblique edge were synthesized as a knife and a blood needle, respectively. The motion of the virtual tools in twist, rotation or parallel movement was also examined on their operation of virtual tissues and organs.

Keyword force display system, visco-elasto-plastic materials, interaction of virtual objects, real-time operation, destruction

1. はじめに

人工現実感研究の目的の一つに、現実で不足する事象の補完が挙げられる。このために最も重要なことは現実の物理法則を反映した仮想世界の構築である。これを解決するために物理モデルがしばしば用いられるが、再現性を高めるために有用なことはより多くの物

性を考慮し、要素を細分化することである。しかし、演算量の増加は時間のズレが大きくなり、例えば現実から仮想空間内を操作することなどは困難になる。一方、仮想空間内に物体を準備して現実から操作し、その操作感覚や破壊をともないながら物体の形状変化を検討することは、例えば医療のような生命にかかわる

領域において有意義である。このため、多くの場合は現実感に影響しない範囲で誤差を容認し、演算量を減少して現実と同一の時間軸での操作を可能にする必要がある。多くの研究では、上述の観点から弾性および粘性のみを考慮した Kelvin-Voigt モデルで仮想物体を構築してきた[1]。本間らはこれを発展させて、応力-ひずみ曲線を折れ線近似して単純化した塑性を組み合わせた粘弾塑性体モデルを提案した[2]。このモデルは実体を持たない仮想物体同士が力学的に相互作用する手法についても提案しており、実時間での演算の可能性を示している。すなわち物性値と質量を任意に与えることで、さまざまな固体を表現しうることが示唆されている。

ところで、物体の加工の多くは、不可逆的な変形や破壊を伴うが、物体を整形する意図のもとに形状を変化させる破壊の一つとして物体を「切る」ことがある。切るという動作は使用する器具によって、切り裂く、断ち切る、切削するなどのように表現が変化する。これに対応する器具はそれぞれナイフ、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が行われてきた[3]。この中で、力覚を与える手法として、切離時に器具に存在する支点を基準点とし、実測値にもとづき、あるいは解析的な手法によって位置姿勢をパラメータとしてモーメントを近似的に表現し、演算時間の短縮が試みられている。これは実時間での操作を実現するうえで重要な手法であるが、一方で、物理モデルに与えたパラメータと必ずしも一致しない点、および器具を剛体として考えてその変形・破壊を考慮していない点などの問題点があった。そこで、本研究では現実での取り扱いに倫理的な観点からも注意を要する臓器を仮想物体として構築し、これを操作・加工するシミュレータの開発を前提とする。このために、切離器具と物体を粘弾塑性固体モデルで構築し、その相互作用による破壊を表現する手法について提案する。さらにこのシステムで、物理モデルを構成する質点の運動に基づいた力覚の提示方法についても検討する。

2. 切離器具型力覚表示システムの構築

2.1 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するが、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。ところで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する 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[2]。このモデルでは物体同士の相互作用による変形・破壊も表現できることが示されている。また、このモデルは一般的な PC でも実時間での演算が可能であることが示されており、力覚表示システムへの応用に適している。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。

本研究では仮想空間内に存在する固体の物体を全て粘弾塑性体モデルで構築する。物体ごとに異なるかたさ、もろさ、密度などはモデルに与える弾性、粘性、塑性、質量の各パラメータを変更して表現する。これらのパラメータはモデルの要素ごとに設定可能なので、現実の物体に存在する物性の不均一さなども表現可能である。

2.2 物理モデルを用いた人工現実感世界の構築

上述のモデルを用いて仮想臓器と仮想器具を構築する。具体的には図1のようにそれぞれの形状を示す領域を設定し、その内部に存在する要素が各物体を構成すると定義する。仮想器具は外部からの入力によりその位置姿勢を変化する。ところで器具と臓器は仮想空間内でそれぞれ力学的に相互作用し、弾性限界を越え要素が破断して物体に切離・穿孔などを生じる。これは詳細にはモデルとモデルの相互作用であり、作用部位のモデルに与えた物性、質量などによる効果である。

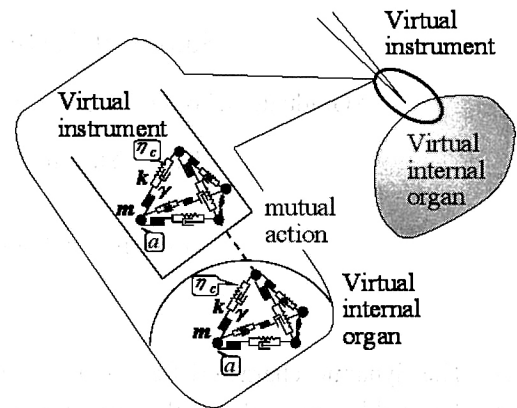


図1 仮想臓器と仮想器具間の相互作用の概念

2.3 物理モデルを用いた臓器と器具の構築

2.3.1 物理モデルで構成するナイフ型デバイス

仮想のナイフ型物体として図2のように正四面体構造を2層の板状に配置した物体1を構築する[4]。一般にナイフのような金属はゴムなどの弾性体と比較して形状変化が少ないので剛体として取り扱うが、本研究では操作による応力で刃が欠けるなどの破損を生じる場合も想定するので、上述の粘弾塑性体モデルで構築

する。剛体に近い特性を与えるため弾性定数を大きくし、質点の質量は臓器を構成する質点の100~1000倍程度とする。また、ナイフの傾き、ねじり、向きを表す角度 θ_{1k} , θ_{2k} , θ_{3k} をパラメータとして考え、仮想空間内の位置はマウス操作により任意に移動可能とする。これは力覚表示システムとの接続を前提としており、操作デバイス設計のための基礎とする。

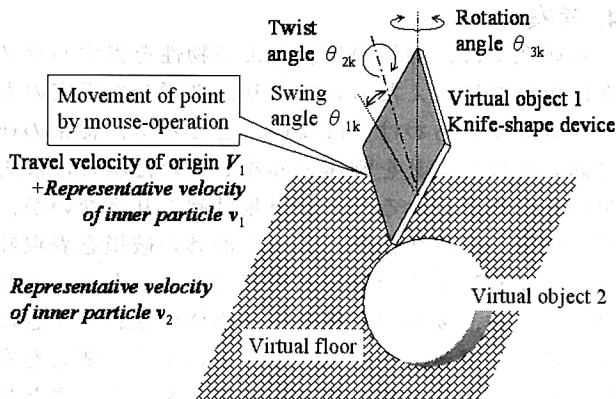


図2 仮想ナイフと球状物体の定義

2.3.2 物理モデルを用いた採血針モデルの構築

採血や注射など人体に針を刺す医療行為は多い。そこで、図3に示すように円筒の先端を斜めに切り落とした形状の採血針モデルを構築する[5]。針は後述する血管モデルとの対比から、正四面体構造1層の厚みとする。モデルのパラメータはナイフと同様に剛体に近い特性を与える。採血針の傾き、ねじり、向き、および鋭さを表す先端角を表す角度 θ_{1n} , θ_{2n} , θ_{3n} , θ_{4n} を定義し、マウス操作により仮想空間内の位置姿勢を任意に移動可能とする。

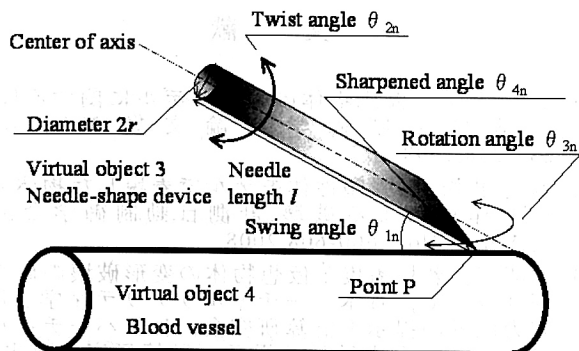


図3 採血針と血管モデルの定義

2.3.3 物理モデルを用いた臓器モデルの構築

臓器は形状ならびに物性がそれぞれ異なるが、一般には内部まで充実した中実臓器と内部に空間がある中空臓器がある。本研究では仮想器具で臓器を操作して

変形し、切離・穿孔などの加工が目的なので、中実臓器として球体モデルを、中空臓器として円筒形の血管モデルをそれぞれ図2中の物体2、図3中の物体4のように構築する。これらの物体は柔らかい臓器を想定するので弾性定数を小さく設定する。

2.4 操作デバイスの開発

仮想空間内にある器具を現実から操作し、空間内の物体から受ける反力を提示するシステムが力覚表示システムである。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。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。すなわち、力覚表示システムは仮想空間と現実を接続する窓であり、インターフェースである。このため、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ことが可能な操作デバイスを開発しなければならない。操作デバイスは設計上可動範囲が設定されるが、これは仮想空間内で器具の動作範囲より大きいことが必要である。そこで、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。

2.5 操作デバイスの位置・姿勢に基づいた力覚の算出

力覚を表示するために、一般的には力を算出するが、操作デバイスに組み込んだアクチュエータの多くはトルク制御を行う。上述のように、操作される物体のみならず、操作する器具もそれぞれ物性の異なる仮想物体として考え、仮想空間内に存在する全ての物体を物理モデルで構築し、器具を構成するモデルの要素ごとに質量と速度・加速度を演算する。このとき、各軸方向への成分を考慮した質点同士の相互作用により及ぼされる力を用いて、力覚を及ぼすモーメントを算出す

ることが可能である．具体的には，デバイスと仮想器具の姿勢が一致するので，操作デバイスの関節部にあるモータの軸を基準点と考え，器具との相対位置から空間内に設定した仮想の基準点まわりのモーメントを要素ごとに算出し，操作デバイスのモータより出力する．

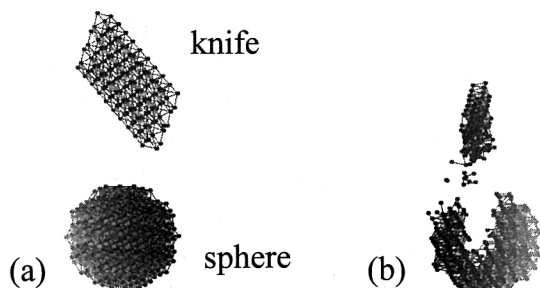


図4 ナイフによる球体の切離

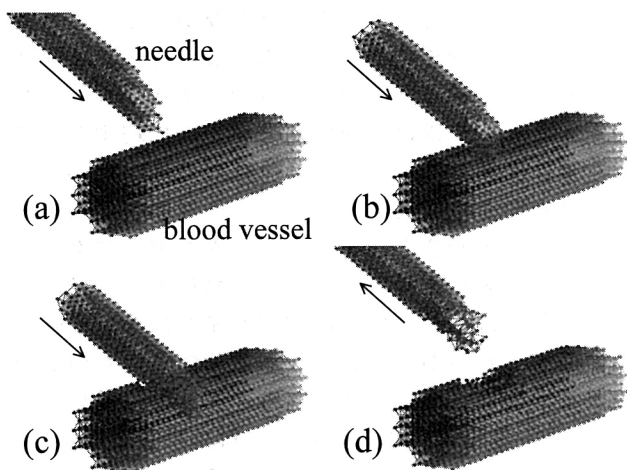


図5 採血針による血管への穿刺

3. 結果

仮想空間内でナイフの傾きと向きを変えながら物体を切る様子を図4に示す．また，物体を半分ほど切ったあと，ナイフを抜いた様子を視点を変えて示したのが図4(b)である．マウスで操作する仮想ナイフにより実時間で切離加工を表現した．このとき，ナイフも物体からの反力を受けて変形し刃が欠けている様子が分かる．次に構築した針モデルを用いて，採血針による血管穿刺のシミュレーションを行った．マウス操作により採血針を仮想空間内で動かした．その様子を図5に示す．図中(a)から(c)は穿刺している様子であり，(d)は針を抜いた時の様子である．穿刺操作により，血管に穴が空いたことが分かる．このモデルでは血管モデルのパラメータをもろく壊れやすい状態に設定した．このため血管があまり伸展することなく穿孔を生じて

いる．同時に，針の操作時の手ぶれにより先端部に損傷を生じている．血管モデルについて伸展するまで破損を生じないように設定すると，針先に応力集中を生じ，それをきっかけとして針が壊れることを確認した．これらの結果から，器具と物体をモデルで構築すると，現実で起こりうる器具の破損を表しうることを確認できた．

4. 考察

本研究では，物体の形状および物性を表すパラメータは仮想的に与えたものであり，必ずしも現実のものと一致しているわけではない．ところで，従来の研究において仮想器具を剛体とみなしていた場合には刃が欠ける，針が折れるなどの現象は起こりえないが，本研究成果から操作条件によって器具の破損を表現叶であり，より現実的な表現が可能であることが示されている．一方，要素の配置条件が物体の壊れやすさに影響することが示唆された．ナイフの場合，要素を多層構造にすると，全体の形状を維持しやすく，また物体を切る場合にも短辺側で物体を切離し，衝撃を長編方向で受ける場合は，逆の場合と比較して形状を維持しやすい．これらのことから仮想物体の壊れやすさは，モデルに与えた物性値のみならず形状や運動方向によっても変化することが示唆された．針も先端に配置した要素に最初に応力が集中し，ここに生じた破損が広がる例が多く見られた．これらのことから，現実の物体と動特性を一致する場合のパラメータは要素の配置条件も全て考慮し，決定しなければならない．これらは今後の検討課題である．また力覚提示に重要なモーメントの算出および提示用操作器具の開発については，本研究成果に基づいた今後の検討が必要である．

文 献

- [1] 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
- [2] 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.
- [3] 本間達, 若松秀俊：仮想物体の変形破壊の研究を振り返って, 日本バーチャルリアリティ学会第1回力覚の提示と計算研究会, 日本バーチャルリアリティ学会力覚の提示と計算研究会報告書, Vol.001, No.HDC01, 25-28, 2009
- [4] 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
- [5] 本間, 若松：採血時の穿刺による血管変形の表現, 生体医工学 Vol.47(supple), 214(24amO-15-4), 2009