

統合型手術シミュレータの開発 ～ バーチャルリアリティ技術を医学教育へ ～

1. 背景

近年、医療技術の高度化に伴い医師の学習量が増加する中、臨床能力育成に有効な教育方法の確立が求められている。現状では実際の手術体験を通して医師は外科手術手技を体得しており、患者への負担や希少な病態例への対応能力不足など多くの課題がある。また、基礎医学書や臨床講義による外科手術の学習には限界があり、社会運動により動物を用いた訓練も困難になりつつある。近年、様々な VR シミュレーション技術が開発されつつあるが、導入に至るまでの環境が整備されていない。

2. 目的

本プロジェクトでは、高精度かつ対話的な手術手技アルゴリズムの開発を行い、表皮の切開、切開部位の開創、臓器を押しよける圧排といった一連の外科手術プロセスの包括的な体験を可能とする。また、情報提示機構によって、医学書を用いた学習だけでは不十分な術中に注意すべき情報(ピットフォール)等の効率的な学習を支援する。大動脈到達法の術式を具体例として統合型手術シミュレータを構築し、医師および医学生からの試用評価を得ることを本プロジェクトの目的とする。

一方で、VR 手術シミュレーションの目的は臨床への導入を行うことで初めて達成される。しかし、手術手技アルゴリズムの開発や統合システムの構築などに要する多大な開発コストが簡単なアプリケーション開発や臨床導入への足かせとなっている。一般に、手術シミュレーションに必要な力学計算手法は、システム開発に有益なプログラムやライブラリの形で入手することができない場合が多く、基礎力学の習熟や様々なプログラムの実装が必要となる。開発代表者は、平成14年度未踏ソフトウェア採択プロジェクト「実時間力学計算手法のライブラリ化と手術シミュレータの開発」の開発成果の一つとして力学変形計算手法ライブラリを作成した。本年度は、さらに発展させ、切開、開創、圧排といった手術手技のライブラリを作成し、国内外における手術シミュレータ開発及び臨床導入の促進を図る。

3. 開発の内容

上記の目的を達成するため、本プロジェクトでは下記の開発を行った。

- 切開・開創・圧排等の外科手術手技ライブラリ
- 解剖学知識及びピットフォール情報提示機構
- 統合型手術シミュレータ
- ライブラリ配信機構

開発内容の概要を以下に示す。

● 切開シミュレーション

対話的な切開シミュレーションを行うため、切開時は質点系モデルに基づいたシミュレーションを行い、四面体分割によって切開を表現した。また、切開後の四面体要素数増加の抑制を行うため、構成ノードの移動を行うことによって、4あるいは6個の四面体への分割に帰着させた。図1に構成ノ

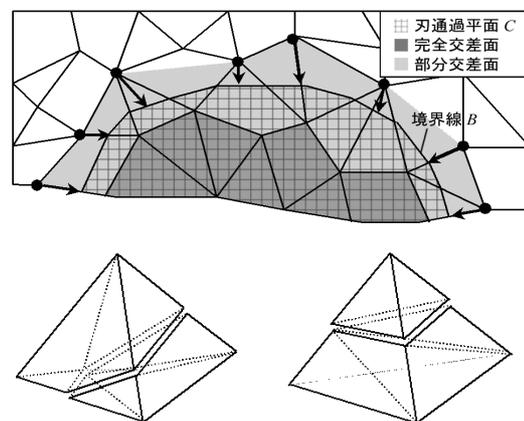


図1: 切開シミュレーション手法
(上: ノード移動方法, 下: 四面体分割パターン)

ードの移動方法、および四面体の分割パターンを示す。汎用 PC 上 (Pentium III Dual 933Mz CPU、メインメモリ 2GByte) で 10,000 ノード程度の仮想臓器オブジェクトに対して実時間処理可能である。

- 開創シミュレーション

切開創の形成後、有限要素法における剛性マトリクス計算などの前処理を自動的に行うことで、切開シミュレーションからのシームレスな移行を可能とした。開創器の面による変位は数点の接触点の変位として近似され、有限要素法に基づく高精度な開創シミュレーションが行われる。開創シミュレーションの様子を図 2 に示す。

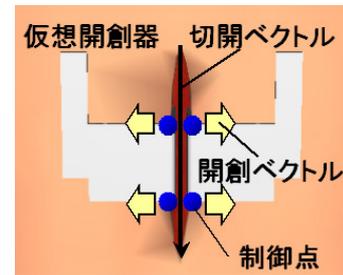


図 2: 開創シミュレーション手法

- 圧排シミュレーション

高精度な変形・反力提示を行うため、有限要素法に基づく変形・反力計算を行った。また、臓器の圧排時には複数臓器の接触が必然的に生じる。本プロジェクトでは、弾性体間に生じる相互作用を記述し高速化することで、仮想臓器同士のめり込みを防ぎ、かつ、硬さなどの力学特性を反映した変形・反力提示を可能とした。

実験の結果、圧排時に直接接触している軟組織モデルを介して奥の軟組織モデルの硬さの違いを提示できることが確認された。図 3 に仮想弾性体の相互作用モデルと複数臓器の圧排シミュレーションの様子を示す。本手法は汎用 PC 上 (Pentium III Dual 933Mz CPU、メインメモリ 1GByte) で 200 ノード程度の仮想臓器オブジェクトに対して実時間処理可能である。

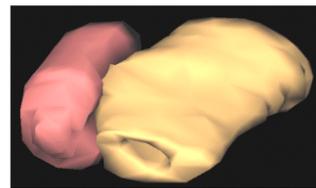
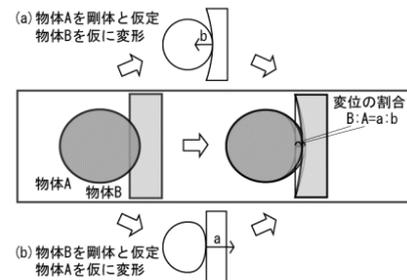


図 3: 圧排シミュレーション手法 (上: 相互作用モデル、下: 圧排の様子)

- 解剖学知識及びピットフォール提示機構

状況に応じた臓器の三次元位置・形状の把握、ピットフォールの習得など高度な知識獲得を目的として、各手術プロセスにおいて解剖学知識及びピットフォール情報を提示する機構を構築した。各手術プロセスでは、シミュレーションプログラムからデータベースに対して SQL 要求が行われ、ユーザに提示すべき解剖学知識及びピットフォール情報がインタフェースに表示される。作成したインタフェースを図 4 に示す。データベースエンジンには Microsoft Access を用い、データベースへのアクセスは Microsoft Visual C++プログラムから ODBC 経由で行う。

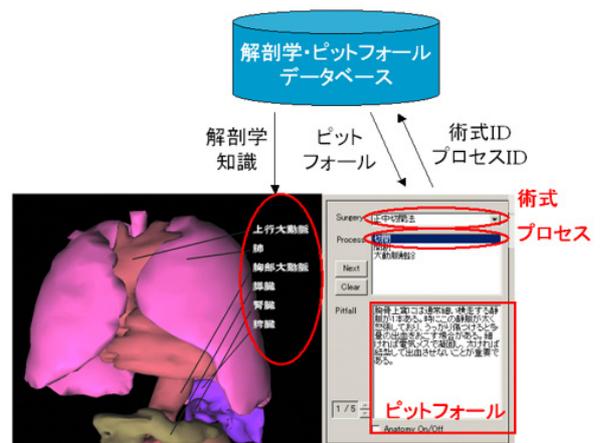


図 4: 情報提示機構

- 統合型手術シミュレータ

上述の手術手技アルゴリズムおよび情報提示機構を用い、効率的な知識・技能習得を可能とする統合型手術シミュレータを構築した。本シミュレータは、計算機(Xeon 2.8GHz Dual CPU, メインメモリ 2Gbyte, Windows2000)、モニタ、力覚提示デバイス(SensAble 社 PHANTOM Premium1.0A)、マウス、立体視メガネ(Elsa 社 3D Revelator)で構成される。

具体的な適用例として、大動脈への到達法仮想手術体験を対象としたシミュレーションソフトウェアの開発を行った。大動脈に到達するまでの一連の手術手技の実施を可能とし、術中に必要な解剖学知識・ピットフォール情報の学習を可能とする。特に切開後の圧排をサポートすることで、胸腹部大動脈のように人体深部の組織を対象とした外科手術の仮想体験が可能となった。胸腹部大動脈への到達法手術シミュレーションの様子を図 5 に示す。



図 5: 胸腹部大動脈への到達法仮想手術シミュレーションの様子

10 年以上の手術経験をもつ心臓血管外科医 2 名による試用評価を受けた。大動脈への三種類の到達法(正中切開法、第四肋間左開胸法、第八肋間左開胸法)を仮想体験していただいた後、コメントを得た。その結果、下記のようなコメントが得られた。

- ・ 術場で体験する機会が少ない第八肋間左開胸法等を仮想体験できることは有意義
 - ・ 手技を行うような環境でピットフォールを学習することができる点が有意義
 - ・ 執刀医や助手など個々の位置での仮想体験は助手から執刀医への移行時に有効
- 一方、臓器の質感や生理的な反応について改良の余地があるというコメントが得られた。

次に、医学部三年生 5 名による試用評価の結果を表 1 に示す。

表 1: 医学生による試用評価の結果

実験後のアンケート項目 回答 1~5(5:はい, 3:どちらとも言えない, 1:いいえ)	平均値(分散)
楽しかった	5.0(0.0)
大動脈への到達法の流れが理解できた	4.2(1.7)
手術のイメージが湧いた	4.2(0.20)
仮想手術体験によって外科手術の理解が深まった	4.2(0.70)
シミュレータを用いた学習には違和感があった	2.2(3.2)

アンケート結果より、統合型手術シミュレータを用いることで具体的な術式に関する理解が確実に深まり、かつ、外科手術一般の理解が深まる傾向がみられた。また、学習意欲が高くなることも推測される。大動脈手術の術野を想像して絵を描かせる自由記述型の質問を行った結果、実験前は各臓器の位置関係が典型的な解剖学図のように記述されるケースが多かったのに対し、実験後は切開後に見える臓器と手術対象となる大動脈との位置関

係が明確に記述される傾向が見られ、外科手術を具体的な問題として理解されるようになったと考えられる。また、手術シミュレータを用いることで不適切な意識や違和感を使用者に与えるといった結果は特に得られなかった。

• ライブラリ配信機構

PHP 言語でウェブベースのライブラリ配信機構を開発した。データベースと連携させ、ライブラリダウンロード時はユーザ登録を必須とする仕組みとした。
(ライブラリ配信サイト) <http://www.kuhp.kyoto-u.ac.jp/~mvl/>

4. 従来の技術との相違

機能に関する相違点

- 対話的かつ切開後の計算量削減を考慮した切開シミュレーション
- 複数臓器の接触状態が頻繁に変化する対話的な圧排シミュレーション
- 手術手技実施時のピットフォール情報提示

ソフトウェアに関する相違点

- 切開、開創、圧排の一連の手術手技を包括的に体験可能な手術シミュレーション
- 外科手術に必要な高度な技能と知識の習得を目的とした手術シミュレーション
- 人体深部の開腹・開胸(Open surgery)手術シミュレーション

5. 期待される効果

本プロジェクトで開発した力学計算手法ライブラリを活用することで、これまで大きな労力を要した手術シミュレータの開発が容易となり、臨床現場での活発なシミュレータ利用が期待される。VR シミュレータの利用が充実すれば、新たな医学教育法の検討やカリキュラムへの積極的な導入など安全な医療の実現へとつながる。

6. 普及の見通し

今後も引き続いて力学計算手法ライブラリ等のシミュレータの開発を支援する環境を充実させ、本ソフトウェアの普及に努める。さらに、シミュレータを利用する医師や教育者が容易に利用可能な環境の構築も合わせて行う。その結果、医用 VR 専門家ではなく、一般のプログラマー、医師、教育者がシミュレータを開発し利用できる環境作りを目指す。

7. 開発者名

黒田嘉宏(京都大学大学院 情報学研究科 ykuroda@kuhp.kyoto-u.ac.jp)

再委託先: 中尾恵(切開・開創手法の開発。京都大学大学院 医学研究科)

再委託先: 糸直人(情報提示機構の開発。京都大学大学院 情報学研究科)

再委託先: 司隆史(立体視環境等の開発。京都大学大学院 情報学研究科)

再委託先: 渡邊孝和(ライブラリ配信機構の開発。京都大学大学院 情報学研究科)

(参考)

VRASS プロジェクト <http://www.kuhp.kyoto-u.ac.jp/~mi/research/vrass/>

- 黒田 嘉宏, 中尾 恵, 黒田 知宏, 小山 博史, 小森 優, 松田 哲也, "複数臓器間の接触シミュレーションを実現する弾性体感の相互作用モデル", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 2, pp.155-162, 2003
- 中尾 恵, 黒田 知宏, 小山 博史, 小森 優, 松田 哲也, 高橋 隆, "物理特性に基づいた高精細かつ対話的な軟組織切開手法", 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No.8, pp.2255-2265, 2003