

膵臓手術シミュレータ Pancsim への十二指腸モデルの追加

松村 佳祐[†] 三谷 純[‡] 大城 幸雄[§] 大河内 信弘[§]筑波大学情報学群[†] 筑波大学システム情報系[‡] 筑波大学医学医療系[§]

1 はじめに

がん治療の第一選択として手術が広く行われている。しかし、外科医は10年以上の研修期間を要するため、日本の外科医師数は年々減少の一途をたどっている。そのため筑波大学リサーチユニットでは2010年代初頭から3D-CGバーチャル手術シミュレーションユニットを立ち上げ、質の高い外科治療を維持したまま研修期間の短縮を目指し、手術シミュレータの開発と教材づくりに取り組んでいる[1]。本研究ではプロジェクトの一環として膵臓手術シミュレータ『Pancsim』の改良を行った。Pancsimは複合臓器手術シミュレーションを見据えたシミュレータであり本研究の主な貢献は膵臓のみのシミュレーションにしか対応していなかったPancsimに複合臓器シミュレーションの第一歩として十二指腸を追加したことである。これにより膵臓手術に必要な操作や視点の確認が行えるようになった。さらに、シミュレーション結果の可視化に関しても改良を行った。

本研究が対象とするような手術シミュレータは体内断層撮影技術の進歩、計算機の性能向上に伴い現在筑波大学を含め世界中で活発に研究開発が行われており、分野全般に関しては[2]に、特に膵臓手術における活用については[3]に詳しい。

2 Pancsim への十二指腸モデルの追加

2.1 Liversim

本研究で開発を行ったPancsimは前身である肝臓手術シミュレータ『Liversim』の改良版である。Liversimは同プロジェクトによって開発された肝臓手術シミュレータであり、患者固有の臓器3Dデータを用いてリアルタイム肝変形可能な点が特徴である。物理シミュレーションフレームワークはSOFA(Simulation Open Framework Architecture)を用いており臓器はCorotational

FEMによってモデル化されている。

2.2 Simulation Open Framework Architecture

SOFAフレームワークはInriaで開発が進められているオープンソース物理シミュレーションフレームワークである[4]。高いモジュール化を達成しておりモジュール間の結合を様々なマッピングすることによって多様な物理モデルを表現することができるという特徴がある。

2.3 Pancsim

前述のとおりPancsimはLiversimの膵臓手術への改良版である。物理シミュレーションの方法等は同一であるが肝臓手術を対象とするLiversimには無い露出血管が多数存在する点で異なる。膵臓手術において臓器と血管の位置関係を把握することは重要でありPancsimでは血管の物理モデル化および血管と臓器間の結合を以下で述べるように定義している。

血管の物理モデル化

Pancsimでは血管3Dモデルを内部で芯線データに変換し、枝分かれするエッジ群として保持している。芯線間にはバネが張られており全体はベンディングスプリングを構成している。

血管臓器間の結合モデル

露出血管と膵臓や十二指腸との結合関係はモデル頂点間のバネ接続によって仮想的に表現している。シミュレーション開始時に最近傍探索によってある閾値以下の距離にある血管芯線頂点と臓器四面体頂点が接続される。しかし、これだけでは本物らしい血管の振る舞いは再現できないため下で述べるようにシミュレーション中に動的に接続関係を編集できるツールを開発した。

血管臓器間の接続編集ツール

血管臓器接続バネの自動生成では本物らしい臓器と露出血管の結合は再現できないため本研究では自動生成とは別にシミュレーション中に動的に血管と臓器の接続バネを編集できる機能をPancsimに追加した。マウスで臓器頂点と血管

Adding duodenum model to Pancsim, a surgical simulator for pancreatic surgery

Keisuke MATSUMURA[†], Jun MITANI[‡], Yukio OSHIRO[§] and Nobuhiro OHKOHCHI[§][†] School of Informatics, University of Tsukuba[‡] Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba[§] Faculty of Medicine, University of Tsukuba

頂点をドラッグすることで新たな接続を定義でき、また逆の操作も可能である。手動のため手間はかかるものの作業する医師の経験に基づいたより本物らしい露出血管の振る舞いを再現することができるようになった。

2.4 十二指腸モデルのシミュレーションへの追加

改良前の Pancsim は臓器としては膵臓のみがシミュレーション可能であった。そのため膵臓手術で必要となる十二指腸を移動させた場合に膵臓から十二指腸にまたがる血管群がどのように移動変形するかをシミュレートすることができなかった。本研究では新たに CT 画像から生成した十二指腸モデルをシミュレーションに追加することでこの動作を可能にした。SOFA 内ではほぼ膵臓と同一の柔軟体として定義している。十二指腸モデルを追加した後の Pancsim のシミュレーション画面を図 1 に示す。

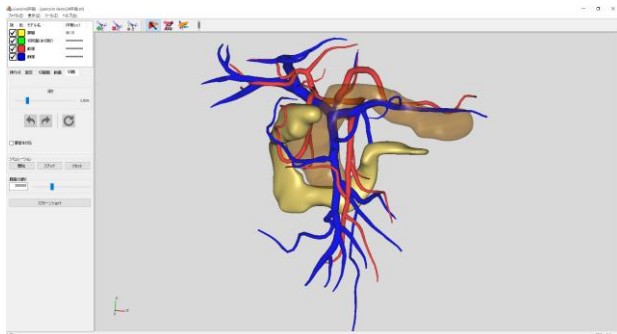


図 1: 十二指腸モデルを追加した Pancsim

2.5 シミュレーション結果の可視化

Liversim, Pancsim とともに静止状態での上下左右方向へのターンテーブルアニメーション動画の出力機能は備えているものの、シミュレーションの結果をリアルタイムで出力機能は備えていなかった。そのような機能があれば重要な手術動作を記録し、後から再生できるようになるため非常に有用であると考え、新たにシミュレーションステップごとにリアルタイムにモデルデータを出力する機能を追加した。予め大容量の仮想メモリを確保し 1 フレームずつキューにコピーし別スレッドで非同期書き出しを行うことでシミュレーションのリアルタイム性を維持している。

出力したモデルデータ群は 3DCG ソフトウェア等に連番読み込みすることでアニメーションレンダリングすることが可能である。しかし、動画としてレンダリングしてしまうとカメラワークは付けられるがある時点で様々な角度から見たいといった要望には応えられないため出力したモデルデータを読み込みリアルタイム再生するビューアの開発も行った。これにより、より自由度の高いビジュアライゼーションを提供することが可能となった。

3 結果

十二指腸モデルを追加した Pancsim で十二指腸モデルを操作し、その結果が実際の手術中の同じ場面の状態にほぼ一致していることが共同で研究している医師らによって確認された。さらに、シミュレーション結果を書き出す仕組みを導入したことにより教材としての有用性も確認できた。

4 まとめと今後の課題

本研究では Pancsim に露出血管の振る舞いのリアリティを向上させるために動的に接続関係を編集できる機能を追加し、複合臓器シミュレーションの第一歩として十二指腸モデルをシミュレーションに追加した。加えて可視化のためのフレームワークも整備した。

今後の課題としては十二指腸モデルを追加したこと、自由に血管臓器接続パネを追加できるようになったことに起因するシミュレーションスピードの低下の解決がある。現在の Pancsim は四面体数を最小限に抑えているもののシミュレーション自体は SOFA によってシングルスレッドで行われているため効率が悪い。SOFA を今後も使用すると仮定した場合の解決案としてはシミュレーションのマルチスレッド化、GPGPU による並列化がある。SOFA を用いずに解決する場合、ある程度シミュレーションの精度を落としてもいい場合は例えば、Extended PBM による高速化[5]や、Model Order Reduction による有限要素法自体の高速化[6]等が考えられる。

参考文献

- [1] 3D-CG バーチャル手術シミュレーションユニット, <http://u-tsukuba-vrsurg.jp/>, (参照 2015-12-28)
- [2] Cueto, Elías, and Francisco Chinesta. "Real time simulation for computational surgery: a review." *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences* 1.1 (2014): 11.
- [3] Fang, Chihua, Wei Cai, and Shizhen Zhong. "The pancreatic surgery in the era of digital medical science." *Digital Medicine* 1.1 (2015): 17.
- [4] Faure, François, et al. "Sofa: A multi-model framework for interactive physical simulation." *Soft Tissue Biomechanical Modeling for Computer Assisted Surgery*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. 283-321.
- [5] Pan, Junjun, et al. "Real - time haptic manipulation and cutting of hybrid soft tissue models by extended position - based dynamics." *Computer Animation and Virtual Worlds* 26.3-4 (2015): 321-335.
- [6] Mena, Andrés, et al. "Towards a pancreatic surgery simulator based on model order reduction." *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences* 2.1 (2015): 1-16.