

平成27年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

題目

膵臓手術シミュレータ Pancsim の改良

主専攻 知能情報メディア専攻

著者名 松村 佳祐

指導教員 三谷 純、金森 由博

## 要 旨

本研究では膵臓手術シミュレータ『Pancsim』の改良を行なった。具体的にはまず、露出血管が多く存在する膵臓手術シミュレーションの血管の挙動のリアリティを向上させるために、シミュレーション中に動的に血管と臓器間の接続関係を編集する機能を追加した。次に膵臓のみのシミュレーションにのみ対応していた Pancsim に十二指腸モデルを追加した。これにより実際の膵臓手術で行われる多くの操作がシミュレーション中でも行えるようになりシミュレーションの有用性が増した。そして最後に Pancsim にシミュレーションの過程をリアルタイムに録画し出力する機能を追加した。ここでいう録画とは動画ではなくモデルの頂点データをフレームごとに保存することを意味しており、これによって各種 3DCG オーサリングソフトウェアによるレンダリングや独自ビューア等による様々な活用が可能になった。

# 目次

第1章	序論 .....	1
第2章	関連研究 .....	3
2.1	手術シミュレーションに関する研究 .....	3
2.1.1	リアルタイム変形可能な臓器モデルに関する研究 .....	3
2.1.2	手術シミュレータに関する研究 .....	4
2.2	Pancsim .....	6
2.2.1	シミュレーション中に行なえる操作 .....	7
2.3	SOFA: Simulation Open Framework Architecture .....	9
第3章	Pancsim の改良 .....	10
3.1	露出血管と臓器間接続の動的編集機能の追加 .....	10
3.2	シミュレーションへの十二指腸モデルの追加 .....	11
3.3	手術シミュレーションのリアルタイムモデルデータ録画機能の追加 .....	15
第4章	結果と考察 .....	16
4.1	Pancsim による手術シミュレーション動画作成 .....	16
4.1.1	手術見学 .....	19
4.1.2	手術シミュレーションの構築 .....	19
4.1.3	手術シミュレーション結果と考察 .....	21
4.1.4	手術シミュレーション動画のレンダリング .....	23
第5章	結論と今後の課題 .....	24
5.1	結論 .....	24
5.2	今後の課題 .....	24
5.2.1	露出血管の挙動のさらなる改善 .....	24
5.2.2	露出血管と臓器間接続編集のユーザビリティの改善 .....	25
5.2.3	シミュレーションの高速化 .....	25
謝辞	.....	26
参考文献	.....	27
付録	.....	29

# 目次

図 1-1	ハプティックデバイスを鉗子として用いている手術シミュレータ (左図:画像出典: [2], 右図: INRIA hepatic surgery simulator 画像出典: [3])	1
図 1-2	Liversim のシミュレーション画面	1
図 1-3	改良前の Pancsim のシミュレーション画面	2
図 2-1	デフォーマブルモデルの3つのアプローチ(画像出典: [2])	3
図 2-2	ハプティックデバイスを用いた腹腔鏡下手術トレーニングシステム(画像出典: [10])	4
図 2-3	Lap-PASS(ソフトウェアだけでなくハードウェア込みでかなり高性能に開発されている.) (画像出典: [11])	4
図 2-4	左: ハプティックデバイスを用いた脳外科手術シミュレータ. 右: 鈍的剥離操作に関する変形・破壊モデルの破壊シミュレーション(画像出典: [13])	5
図 2-5	INRIA が開発した腹腔鏡下肝臓手術用 AR システム(腹腔鏡に取り付けたカメラからリアルタイムに映像を取得し, その映像に追従するように臓器モデルを変形させその結果を映像に合成しモニタに表示している.) (画像出典: [15])	5
図 2-6	Pancsim の画面説明	6
図 2-7	医師による臓器抽出(膵臓や血管などは自動抽出の精度が低いため手動で行う必要がある)	6
図 2-8	膵臓の牽引操作(左:牽引前, 右:牽引後)	7
図 2-9	操作点による牽引(左: 臓器と接続した操作点, 右: 操作点の移動による臓器の牽引)	7
図 2-10	臓器モデルの切離(左: マウสดラッグによる切離線の入力, 右: 切離後, 深さは 2cm)	7
図 2-11	露出血管の切断(左: 切断前, 右: 切断後)	8
図 2-12	露出血管の剥離(左: マウสดラッグによる切断線の入力, 右: 剥離後. 動脈と臓器の接続が切れていることがわかる)	8
図 2-13	コンポーネントの組み合わせによる肝臓デフォメーションモデルの表現.(SOFA ではこのようなコンポーネントの集まりをシーングラフと呼びシミュレーションの構築はシーングラフの構築に等しい.)	9
図 2-14	モデル間のマッピング(SOFA ではデフォメーションモデルと衝突処理用モデル, 表示用モデル間でのマッピングが定義されており粗いデフォメーションに対して高解像度な表示用モデルを用いるなど柔軟なシミュレーション構築が可能となっている.)	9
図 3-1	露出血管と臓器間接続の動的追加機能((a)のように片方の要素を選択しながらドラッグすると(b)のように最近傍の接続対象にスナップする.この状態でドロップすると(c)のように新たな接続バネが生成される.)	10
図 3-2	膵頭十二指腸切除術(PD)(画像出典 [18])	11
図 3-3	十二指腸を追加したシーングラフ(紺色は子要素を持つ中間ノード, 空色は SOFA コンポーネントであり緑色ノードが十二指腸)	12
図 3-4	十二指腸ノード(実装詳細のため図のコンポーネント群は抽象化している.)	12
図 3-5	十二指腸と他モデルとの接続(左図: 自動生成された露出血管との接続. 右図: 手動生成した十二指腸との接続)	13

図 3-6 十二指腸を含めたシミュレーション((a):表示用モデル.(b):デフォメーションモデル.(c)衝突処理用モデル.(d):デフォメーションと衝突処理用モデル間のマッピング)	13
図 3-7 十二指腸衝突処理用モデルの改良. 図では衝突球半径を膵臓のものより4割小さくしている.	14
図 3-8 リアルタイムモデルデータ録画機能アーキテクチャ(ER: Exclusive Read, EW: Exclusive Write)	15
図 4-1 医師による要望説明((a): 十二指腸を小腸方向へ引っ張った様子. (b): 十二指腸を引き抜いた時膵頭部から見た様子. (c):実際の膵頭部からの視点画像との比較)	16
図 4-2 膵臓と十二指腸の解剖学テキスト(下図は図 4-1(c)に対応している.)(画像出典:[19])	17
図 4-3 十二指腸から小腸にかけての動脈の解剖学テキスト(点線で囲ったあたりがPancsimでシミュレーションを行っている部分である. 十二指腸は不完全な状態でシミュレーションを行っているので引き抜く動作を再現するには血管との接続バネ配置など工夫が必要となる.)(画像出典:[19])	18
図 4-4 手術見学の様子	19
図 4-5 新しいシミュレーション用モデル	19
図 4-6 シミュレーション構築((a):膵頭部と十二指腸の接続. (b):膵頭部の固定拘束. (c)(d):回結腸動静脈の固定拘束の解除.)	20
図 4-7 自動生成された露出血管と臓器間の接続バネ	20
図 4-8 修正した接続バネ配置(胃側十二指腸及び膵体部はあまり動かさないため修正は加えていないが膵頭部付近では既存の接続バネを削除している. そして不完全な十二指腸で引き抜き操作を再現するため, 回腸動静脈を空腸側十二指腸に接続している.)	21
図 4-9 十二指腸の小腸方向への引っ張り操作	21
図 4-10 十二指腸の引き抜き操作	22
図 4-11 腸間膜(十二指腸は右後方へ牽引している)	23
図 4-12 シミュレーション結果のレンダリング画像	23
図 5-1 関連研究で紹介したLap-PASSでの組織間結合の様子(Pancsimよりも臓器解像度が高く非常に多くのバネで連続的に接続されていることがわかる.)(画像出典:[11])	24

# 第1章 序論

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敬遠される傾向にあり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]。

筑波大学も取り組む手術シミュレータの研究開発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世界中で行われており、内視鏡を用いた間接的手術数が増えていることから特に、鉗子や内視鏡を模したハプティックデバイス(力覚デバイス)を用いた腹腔鏡下手術シミュレータの開発が多く行なわれている (図 1-1)。



図 1-1 ハプティックデバイスを鉗子として用いている手術シミュレータ (左図:画像出典: [2], 右図: INRIA hepatic surgery simulator 画像出典: [3])

3D-CG バーチャル手術シミュレーションユニットが開発した手術シミュレータに『Liversim』(図 1-2) [4]がある。Liversim はリアルタイム肝変形が可能な肝臓手術シミュレータであり、患者固有の臓器 3D 情報からシミュレーションを構築できる。

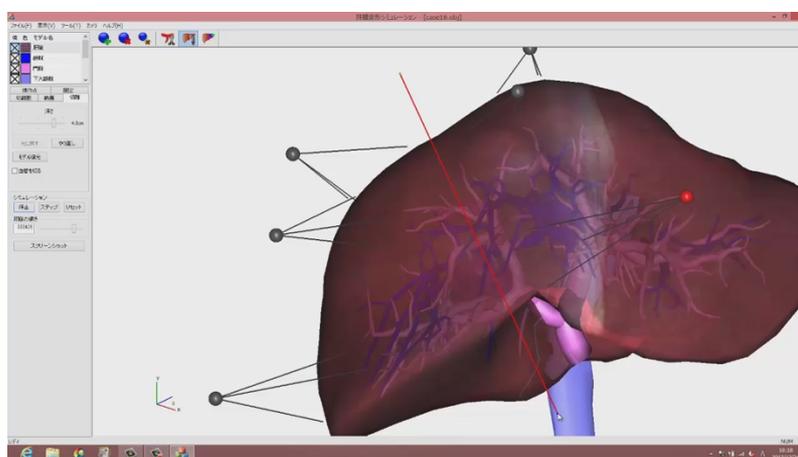


図 1-2 Liversim のシミュレーション画面(肝臓左様が球状で示された操作点で固定されている。)

同じく同リサーチユニットが現在開発を進めている Pancsim(図 1-3)は Liversim の発展版であり膵臓手術向けに開発が行われたシミュレータである。露出血管を多く含む膵臓手術をシミュレートするために多数の改良がおこなわれており Liversim と同様にリアルタイムに膵臓の切開を行なうことが可能となっている。なお, Liversim, Pancsim と一般的なコンピュータでの利用を目指した手術シミュレータのためハプティックデバイスなどは必要としておらず, マウス, キーボードのみでシミュレーションを操作することが可能となっている。

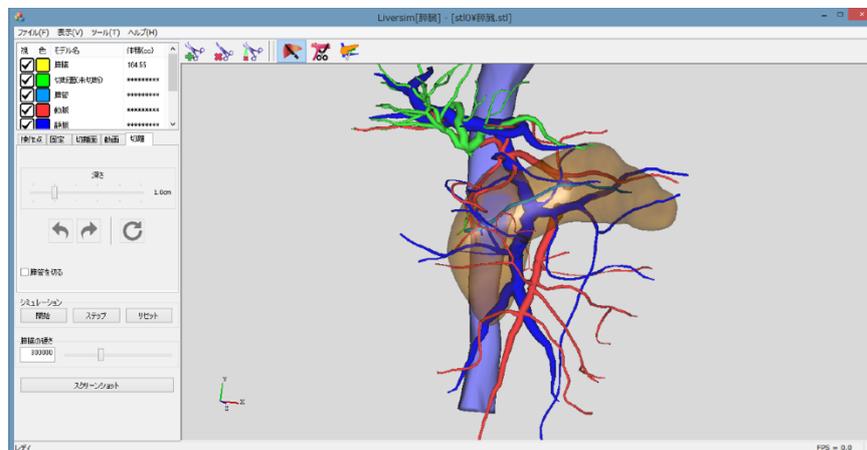


図 1-3 改良前の Pancsim のシミュレーション画面(半透明の臓器が膵臓である。図 1-2 で示した Liversim とは違い臓器外に露出した血管が多く確認できる。)

本研究ではこの Pancsim の改良を行なった。改良は共同で研究を行っている医師らとのミーティングで挙げられた改善点を改善しフィードバックを得るという流れの繰り返しにより行われ, 全体で以下の改良を行なった。

- 露出血管と臓器の動的な接続関係編集機能の追加
- シミュレーションへの十二指腸モデルの追加
- シミュレーションのリアルタイムモデルデータ録画機能の追加

1 つ目の改良は図 1-3 のように露出血管が多数を占める膵臓手術シミュレータにおいて, 改良前の Pancsim では露出血管の挙動が本物らしくないとの医師らによる指摘に基づいている。2 つ目の改良は膵臓手術において膵臓のみを扱う術式はなく, 十二指腸も扱うものばかりである点と, Pancsim が元々複合臓器手術シミュレーションを見据えて開発がすすめられていたという点の 2 つの理由に基づいている。最後の改良は Pancsim には静止した状態で上下左右に回転するだけの動画, いわゆるターンテーブル動画の出力機能しか備えておらず, シミュレーション結果の可視化をおこなうことができなかったことに基づいている。

露出血管と臓器の動的な接続関係編集機能の追加およびシミュレーションへの十二指腸モデルの追加により, 十二指腸を含めたよりリアリティのある膵臓手術シミュレーションを行なうことが可能になった。そしてシミュレーション結果を可視化する機能を追加したことで 3D-CG オーサリングソフトウェアによるレンダリングやその他様々な活用を行えるようになり教育教材としての利用を見込んでいる。

## 第2章 関連研究

本章では本研究に関連する既存研究について紹介する。まず手術シミュレーション全般に関する既存研究について紹介し、次に本研究が改良を行なった膵臓手術シミュレータ Pancsim について紹介した後、Pancsim が用いている物理シミュレーションフレームワークである SOFA を紹介する。

### 2.1 手術シミュレーションに関する研究

外科手術シミュレーションに関する研究は大きく分けると”Deformable Model”と呼ばれるリアルタイムに変形可能な臓器モデルについての基礎研究、臓器モデルと内視鏡や鉗子などのハプティックデバイスを用いた手術シミュレータ開発に関する応用研究に分けることができる。次項よりこれらについての既存研究を紹介する。

#### 2.1.1 リアルタイム変形可能な臓器モデルに関する研究

手術シミュレーションを行う上で必須となる臓器モデルに関する研究は 1987 年の Terzopoulos らによる”Deformable Model” [5]の提案以降現在まで活発に行われており、リアルタイム性と精度の板挟みの中で2つの両立を目指して図 2-1 のように様々な臓器モデルが提案されてきた [2] [6]。

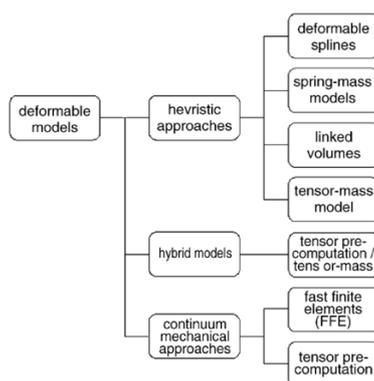


図 2-1 デフォーマブルモデルの3つのアプローチ(画像出典: [2])

Terzopolos らのオリジナルの手法は線形弾性を用いた連続体力学に基づくものであり当時は計算量の多さと計算機の非力さによりリアルタイムに変形を行なうことができなかったため速度を重視した spring-mass モデルや linked volume モデルなどの厳密ではないヒューリスティックモデルが臓器モデルとして利用された。しかし精度が低く今日ではあまり利用されていない。一方で、計算機の性能向上によって連続体力学によるアプローチが活発に提案されるようになり線形弾性を用いた有限要素法による臓器モデルは手術シミュレーションで多く用いられるようになった [3]。さらに今日では大変形により体積が膨張する線形弾性を用いた有限要素法の問題を改善するために非線形弾性を考慮した有限要素法による臓器モデルも提案されている [7]。一方で速度との兼ね合いから非線形弾性を線形弾性によって近似する Co-rotational 有限要素法も近年よく用いられている。

臓器モデルの切断に関してはアプローチごとに手法が異なるが連続体力学を用いた臓器モデルでは X-FEM がよく用いられている [8]。なお、臓器モデルの切断全般に関しては文献 [9]に詳しい。

### 2.1.2 手術シミュレータに関する研究

内視鏡による底侵食手術手法の発展によって専門器具を用いた手術に対する医師のトレーニングが必要不可欠になっていること、手術シミュレータによるトレーニングによって手術の成功率・クオリティが向上することから世界中で様々な外科手術について手術シミュレータの研究開発が進められている。

Basdogan [10]らは腹腔鏡下手術に使われる様々な鉗子をハプティックデバイスを用いて再現し図 2-2 のような腹腔鏡下胆嚢切除手術トレーニングシステムを構築している。

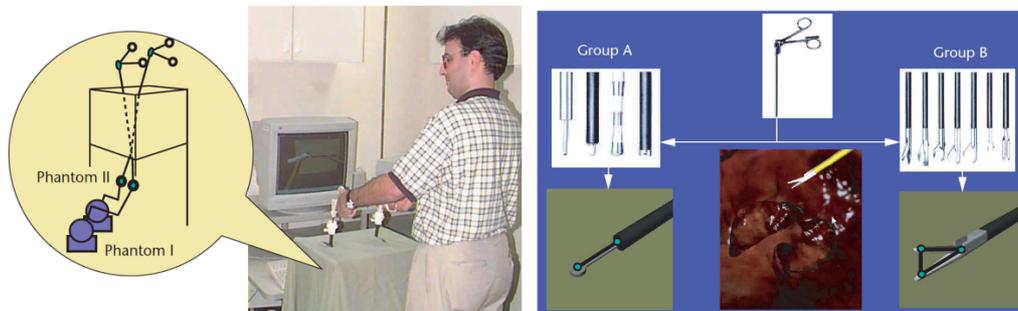


図 2-2 ハプティックデバイスを用いた腹腔鏡下手術トレーニングシステム(画像出典: [10])

同じく エラー! 参照元が見つかりません。でも紹介した INIRA hepatic surgery simulator [3]は INRIA によって開発されたハプティックデバイスを用いる腹腔鏡下肝臓手術シミュレータである。

国内でも筑波大学 3D-CG バーチャル手術シミュレーションユニットはもちろんとして手術シミュレータ開発は 1990 年代頃から盛んに行われている。三菱プレジジョンによって開発が進められている商用腹腔鏡下手術シミュレータ Lap-PASS [11]は横浜市立大学医学研究科との医工連携プロジェクトであり患者固有の形状データから手術シミュレーションを構築できる点が特徴である。図 2-3 に示したように Lap-PASS は手術シミュレータだけではなくハプティックデバイスを含めて開発が行なわれている。

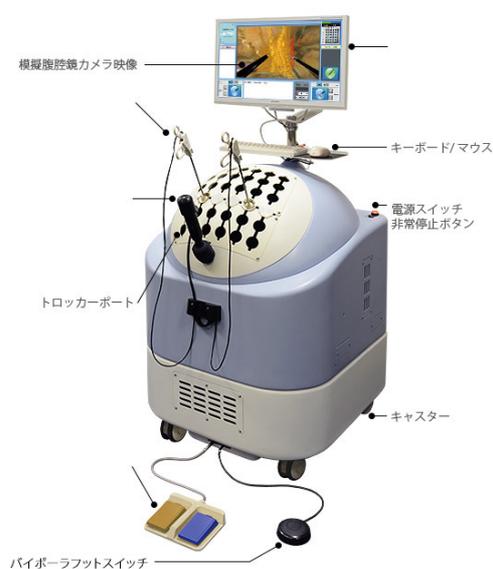


図 2-3 Lap-PASS(腹腔鏡カメラや監視などがハプティックデバイスを用いて再現されている。)(画像出典: [11])

北海道大学では Konno らによって図 2-4 右図のような脳の鈍的剥離操作に関する変形・破壊モデルや脳の生体組織から粘弾性パラメータの同定など脳の詳細な物理モデルについての研究,そしてそれらを応用した図 2-4 左図のようなハプティックデバイスを用いた脳外科手術シミュレータの研究開発が進められている [12].

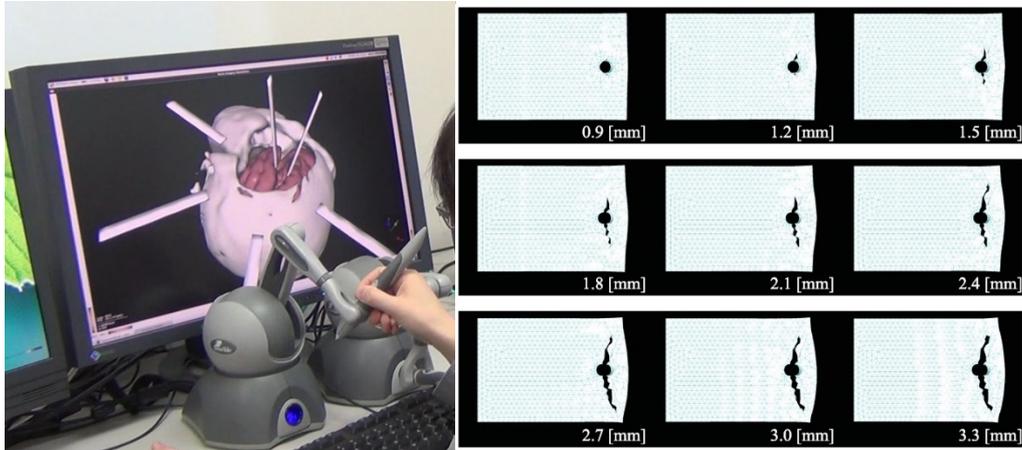


図 2-4 左: ハプティックデバイスを用いた脳外科手術シミュレータ. 右: 鈍的剥離操作に関する変形・破壊モデルの破壊シミュレーション(画像出典: [13])

また,近年実際の手術において拡張現実(AR: Augmented Reality [14])と呼ばれる技術の応用に注目が集まっている. 利用方法としては手術中に手術部位をリアルタイムで撮影し,それに対応するように手術シミュレーションを変形させ変形した血管や臓器輪郭などをプロジェクターで手術部位に投影したり別モニターに動画に合成して表示したりすることで円滑な手術を行なうといった利用が挙げられ, 実際の応用例としては図 2-5 に示した INRIA が開発したシステム [15]や京都大学とパナソニック AVC が共同開発した可視光投影装置 [16] などがある.

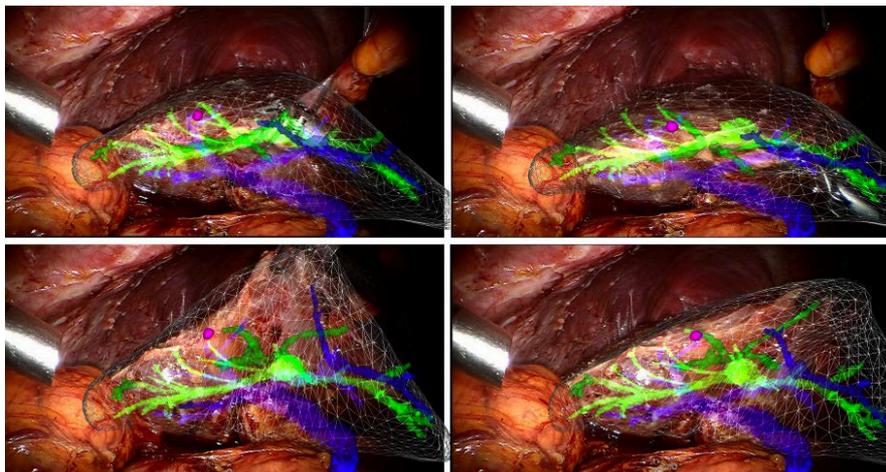


図 2-5 INRIA が開発した腹腔鏡下肝臓手術用 AR システム(腹腔鏡に取り付けたカメラからリアルタイムに映像を取得し,その映像に追従するように臓器モデルを変形させその結果を映像に合成しモニターに表示している.)(画像出典: [15])

## 2.2 Pancsim

Pancsim は筑波大学 3D-CG バーチャル手術シミュレーションユニットによって開発が行なわれている膵臓手術シミュレータである(図 2-6). CT, MR 画像より抽出した臓器 3D モデルを読み込むことで, 患者固有の臓器情報から膵臓手術シミュレーションを構築することができる. なお CT, MR 画像からの 3D 臓器モデル抽出機能は Pancsim は備えておらず富士フィルムが開発販売を行っている SYNAPSE VINCENT を用いて図 2-7 のように半自動もしくは医師が手動で作成したものを使用している.

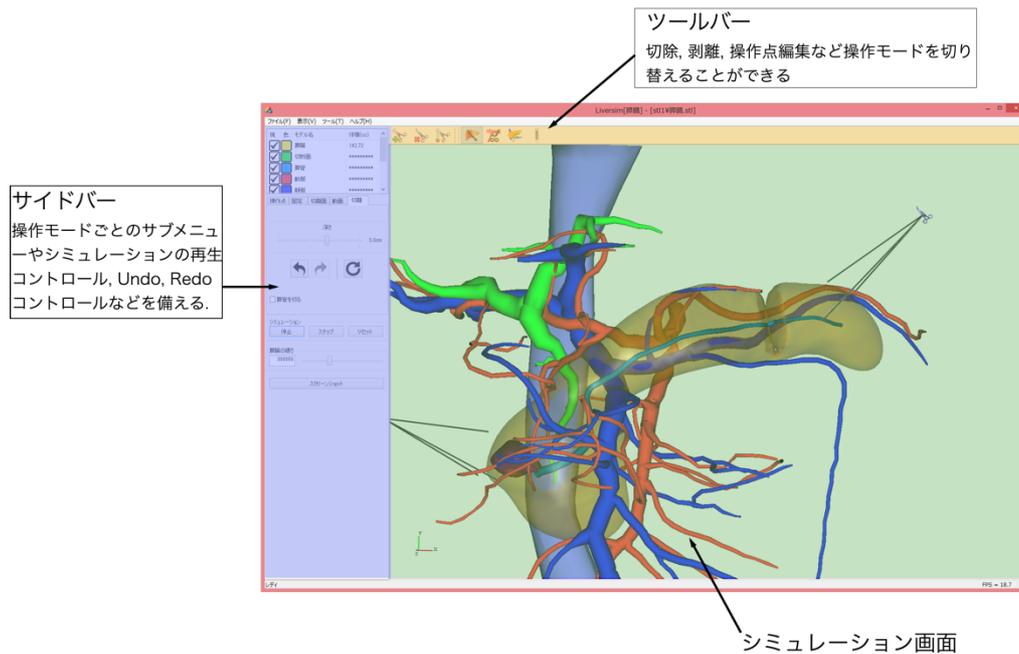


図 2-6 Pancsim の画面説明



図 2-7 医師による臓器抽出(膵臓や血管などは自動抽出の精度が低いいため手動で行う必要がある)

## 2.2.1 シミュレーション中に行なえる操作

Pancsim では手術シミュレーション中、ハプティックデバイスではなくマウスとキーボードを用いて以下の操作を行なうことができる。

### マウス操作による牽引

SHIFT+マウス左ドラッグによってポインタの再近傍にある頂点に仮想的な力を伝えることができ臓器や血管の牽引を行うことができる。(図 2-8)

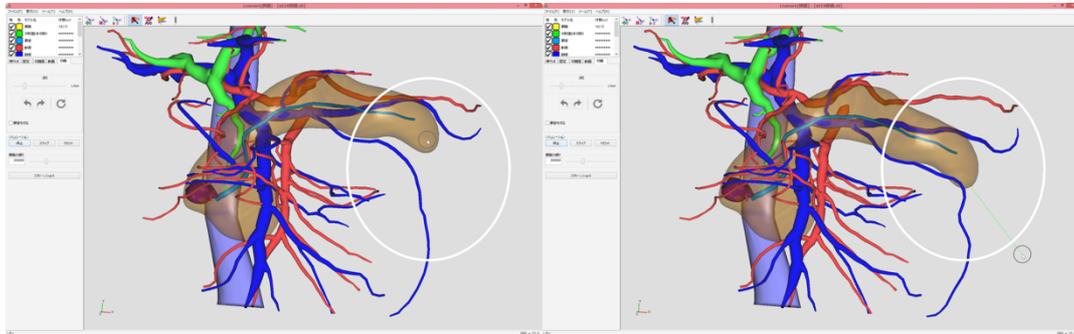


図 2-8 膵臓の牽引操作(左:牽引前, 右:牽引後)

### 操作点による臓器の牽引

操作点と呼ばれる仮想点をシミュレーション中に配置し臓器と接続することで、臓器に力を伝えることができる。(図 2-9)

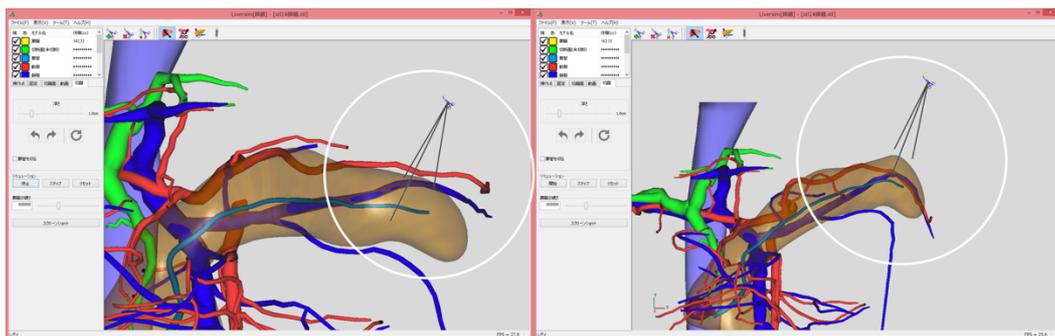


図 2-9 操作点による牽引(左: 臓器と接続した操作点, 右: 操作点の移動による臓器の牽引)

### マウス操作による臓器の切離

Pancsim の臓器モデルは変形だけでなく切離も行うことができる。マウス操作で切離線を入力すると臓器モデルが切離される。なお、切離の深さはサイドバーの深さ調節スライダーで行うことができる。(図 2-10)

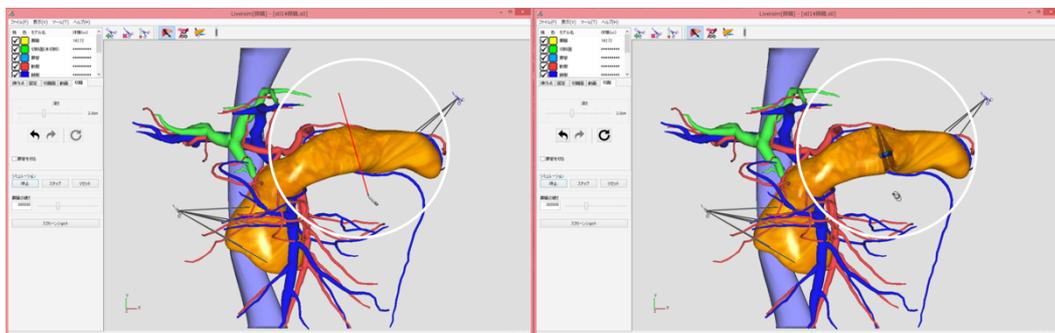


図 2-10 臓器モデルの切離(左: マウスドラッグによる切離線の入力, 右: 切離後, 深さは2cm)

## マウス操作による血管の切断

露出血管や膵管は切断したい部分をクリックすることで切断することができる。(図 2-11)

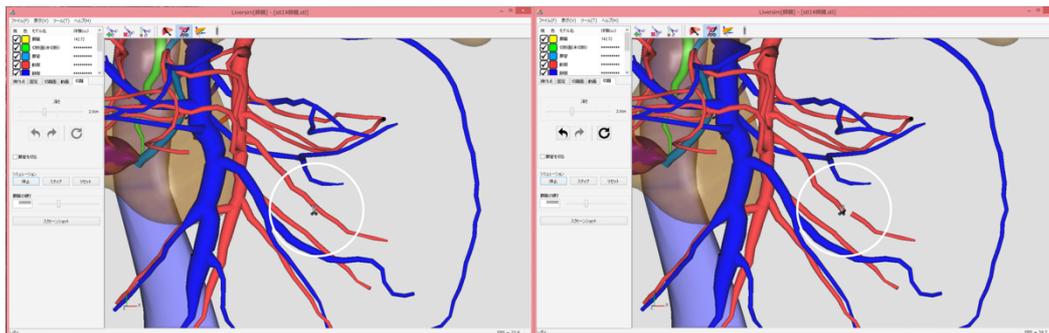


図 2-11 露出血管の切断(左: 切断前, 右: 切断後)

## マウス操作による血管の剥離

露出血管と臓器の接続はPancsimではバネによってモデル化されている。この露出血管と臓器間の接続バネはシミュレーション構築時に際近傍探索によって自動生成されており、これを切断することが血管を臓器から剥離することを意味する。マウス操作によって切断線を入力することで交差するバネを切断し、露出血管を剥離することができる。(図 2-12)

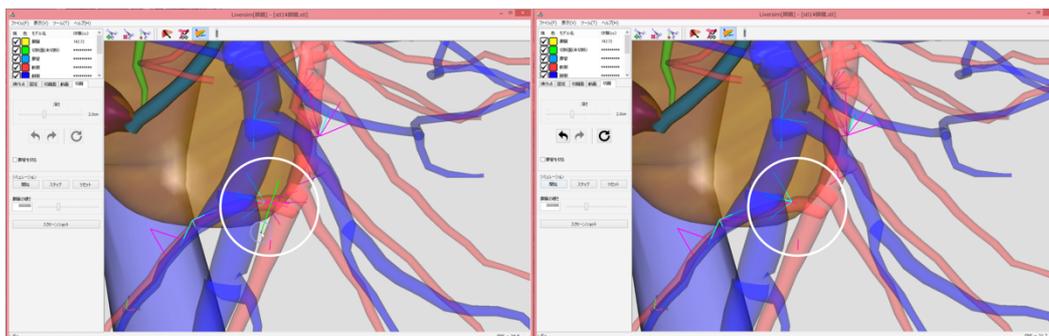


図 2-12 露出血管の剥離(左: マウสดラッグによる切断線の入力, 右: 剥離後. 動脈と臓器の接続が切れていることがわかる)

## 2.3 SOFA: Simulation Open Framework Architecture

Pancsim は物理シミュレーション部分は独自開発したものではなく SOFA [17] フレームワークを用いている。SOFA は 2007 年頃から INRIA で開発が進められている開発言語にテンプレートベースの C++ を用いた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り、高度にモジュール化されたコンポーネントを組み合わせることで力学シミュレーションだけではなく流体力学シミュレーションや電磁気学シミュレーションなど様々な物理シミュレーションを構築することができる。しかしながら INRIA 自身が SOFA を用いて手術シミュレータの開発 [3] [15] を進めていることから手術シミュレータ開発に用いられることが多い。

図 2-13 に SOFA を用いたシミュレーション構築例として、表面と実質を持つ肝臓の例を挙げる。また、図 2-14 には、SOFA フレームワークの特徴であるマッピングについての例を示している。

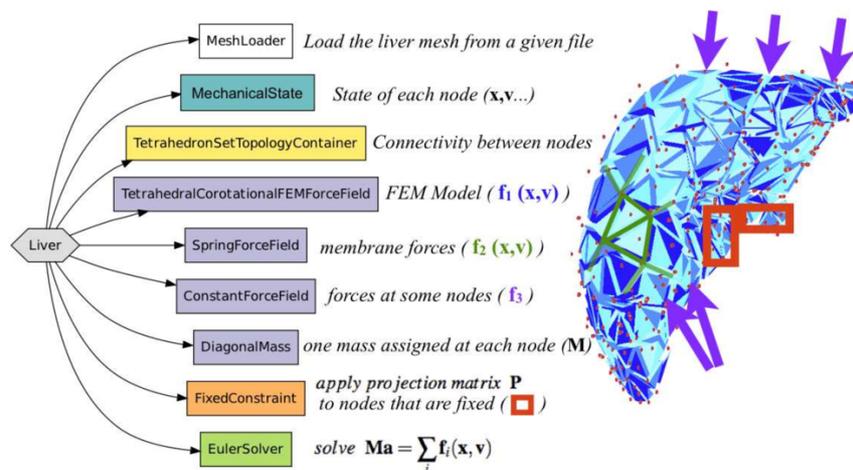


図 2-13 コンポーネントの組み合わせによる肝臓デフォメーションモデルの表現。(SOFA ではこのようなコンポーネントの集まりをシーングラフと呼びシミュレーションの構築はシーングラフの構築に等しい。)

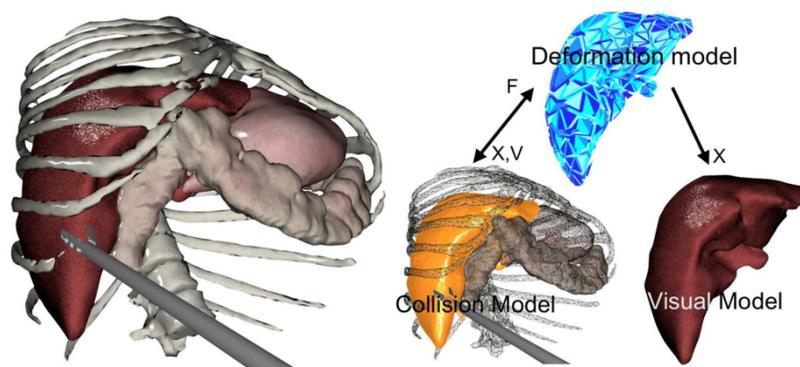


図 2-14 モデル間のマッピング(SOFA ではデフォメーションモデルと衝突処理用モデル, 表示用モデル間でのマッピングが定義されており粗いデフォメーションに対して高解像度な表示用モデルを用いるなど柔軟なシミュレーション構築が可能となっている。)

## 第3章 Pancsim の改良

本章では本研究で行なった Pancsim の改良について述べる。

### 3.1 露出血管と臓器間接続の動的編集機能の追加

Pancsim では露出血管と臓器間の接続を再現するために臓器頂点と血管節点間に自動生成されたバネが張られていること、そしてそのバネを切ることによって露出血管の臓器からの剥離を再現していることはすでに述べたとおりである。しかし、Pancsim を使用した医師らからは自動生成された露出血管と臓器間の接続バネ配置では露出血管の挙動にリアリティが無いとの指摘が挙げられた。

自動生成による接続バネ生成配置の改良によってリアリティのある露出血管の挙動を目指すのは症例ごとに臓器配置に違いがありすぎるため難しい、そこで本研究では手動で露出血管と臓器間の接続をシミュレーション時に動的に編集できる機能を追加することで、最適な接続バネ配置を達成することを目指した。

露出血管と臓器間接続の動的編集機能を追加するにあたって Pancsim には血管臓器接続バネを切る機能が露出血管の剥離機能という名目で既に存在しているため実質的には図 3-1 のように血管臓器接続バネを動的に追加する機能の開発を行なった。

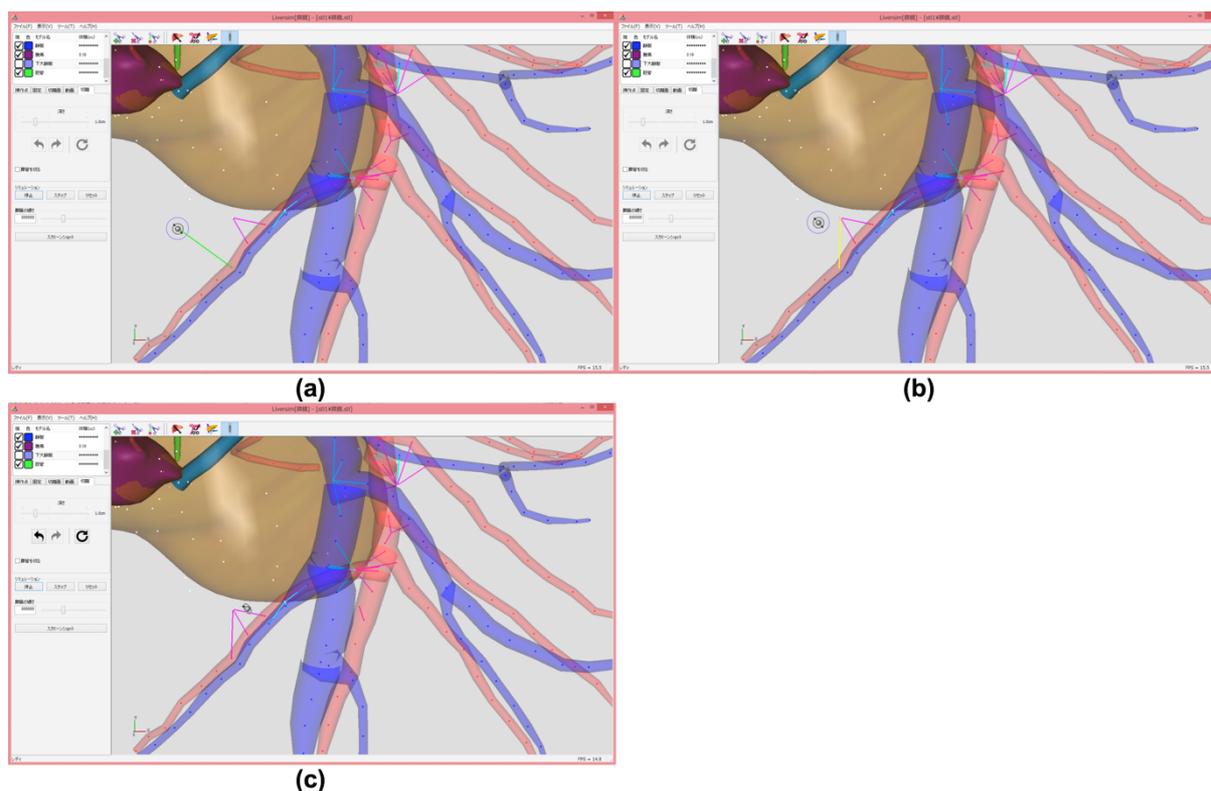


図 3-1 露出血管と臓器間接続の動的追加機能((a)のように片方の要素を選択しながらドラッグすると(b)のように最近傍の接続対象にスナップする。この状態でドロップすると(c)のように新たな接続バネが生成される。)

上図は開発した接続バネの追加機能である。追加されたバネは接続された2頂点間の長さを持ち剛性や減衰係数はすべてコンパイル時に設定したパラメータである。

### 3.2 シミュレーションへの十二指腸モデルの追加

改良前の Pancsim では膵臓のみの手術シミュレーションを行えたが実際の膵臓手術では十二指腸(duodenum)も重要な要素である。例えば膵頭部領域の膵癌に対する術式である膵頭十二指腸切除術(PD: pancreaticoduodenectomy)では,図 3-2 に示すように膵臓だけではなく十二指腸の切除,膵臓との接合も行なう。このように膵臓手術シミュレーションにとって重要,むしろ必須であると言える十二指腸であるが手術シミュレーションに追加するにあたってはどこまで再現するかが問題である。本研究では十二指腸を動かした際にどのように露出血管が連動するかを確認したいとの医師らの要望をもとに,デフォメーションのみに対応した十二指腸モデルの Pancsim への追加を行なった。

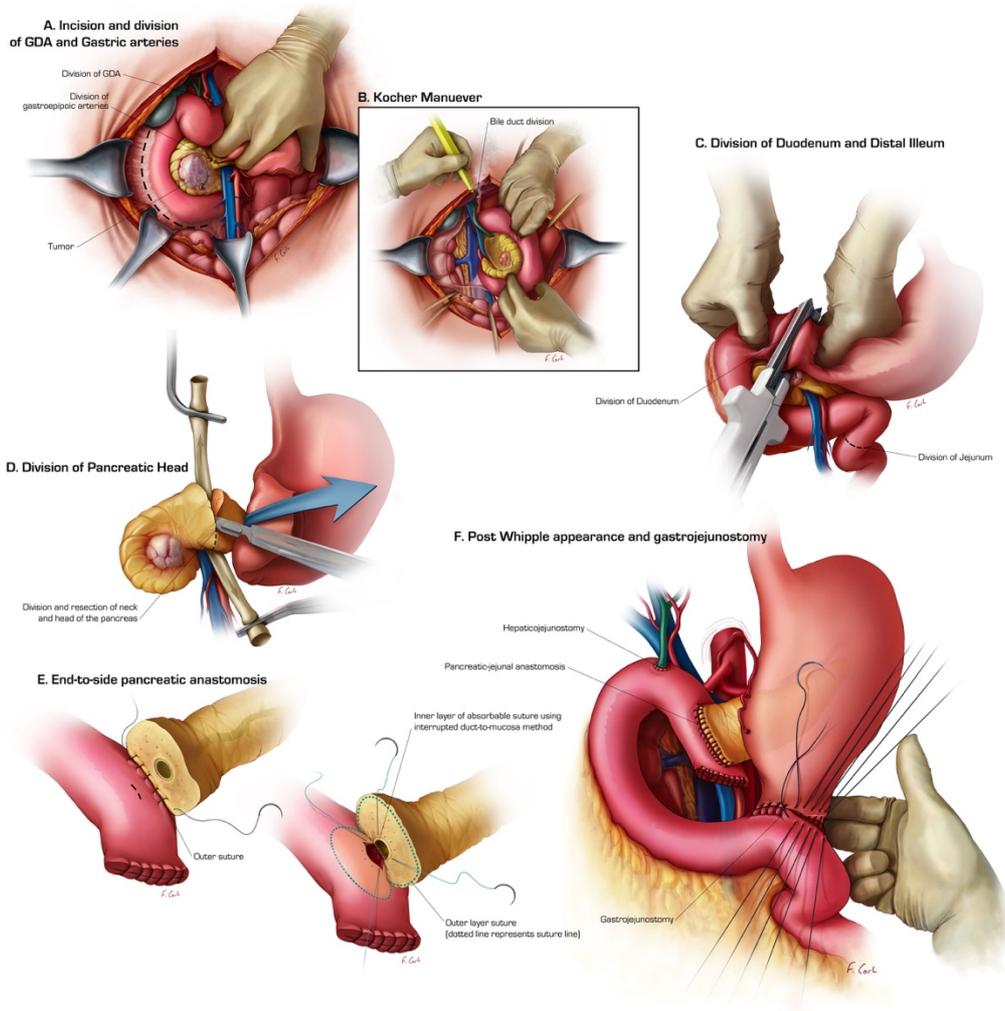


図 3-2 膵頭十二指腸切除術(PD)(画像出典 [18])

以下の2図(図 3-3,図 3-4)は十二指腸を Pancsim に追加した状態の抽象化シーングラフである。

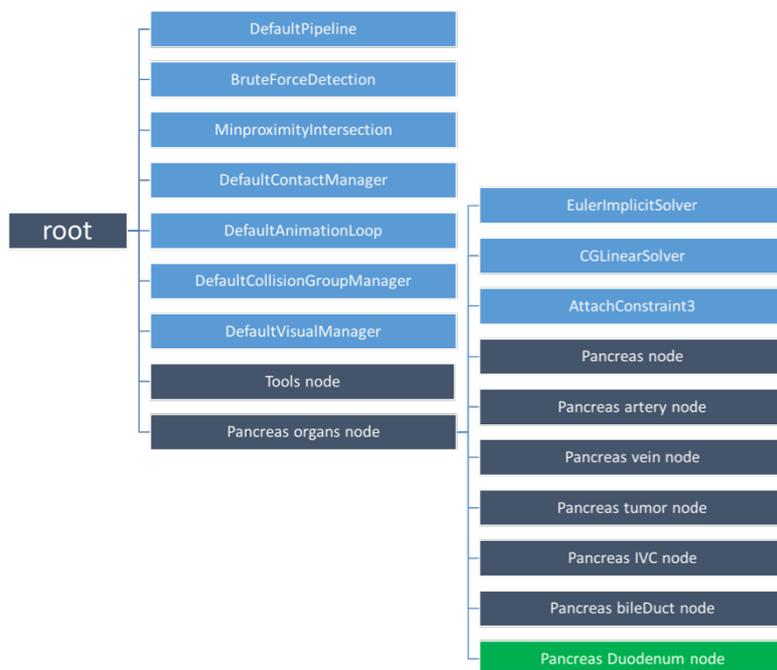


図 3-3 十二指腸を追加したシーングラフ(紺色は子要素を持つ中間ノード，空色は SOFA コンポーネントであり緑色ノードが十二指腸)

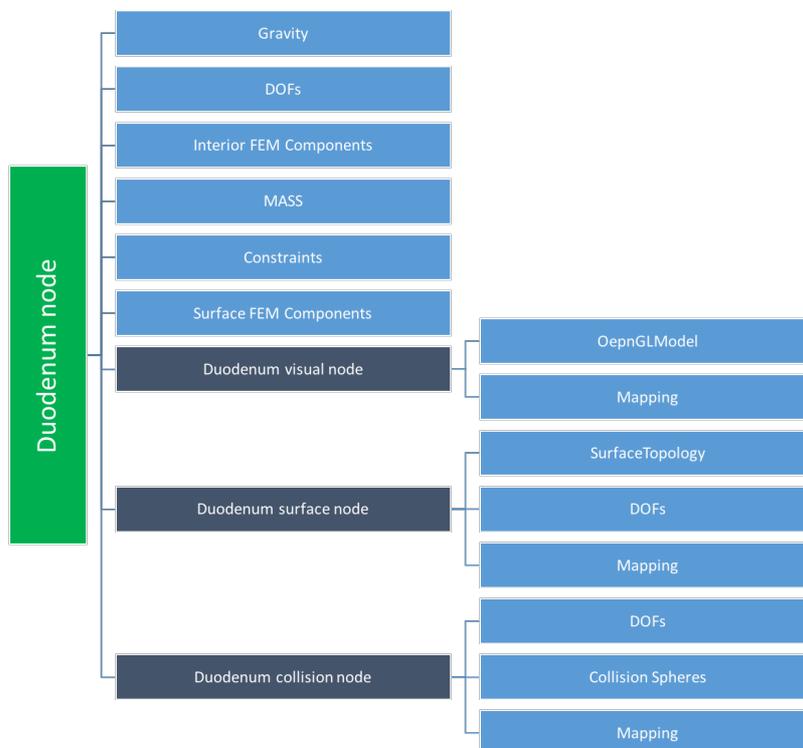


図 3-4 十二指腸ノード(実装詳細のため図のコンポーネント群は抽象化している.)

十二指腸ノードの抽象化シーングラフは図 3-4 に示したとおりである。患者固有 3D 臓器モデルから生成した四面体モデルを用いて FEM モデル化しており、図 2-14 のように SOFA の特徴であるデフォメーションモデルと表示用モデル、衝突処理用モデルを分けるマッピングを用いた構成となっている。また、図 3-5 に示すように膵臓と同じく露出血管との接続、さらに臓器間の接続も行なえるような設計とした。デフォメーションモデル、衝突処理用モデル、表示用モデルなどは図 3-6 に示すとおりである。

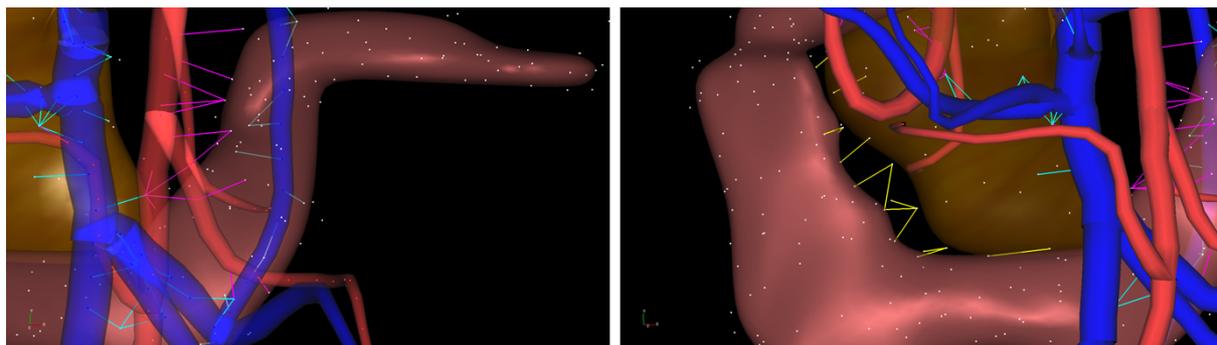


図 3-5 十二指腸と他モデルとの接続(左図: 自動生成された露出血管との接続. 右図:手動生成した十二指腸との接続)

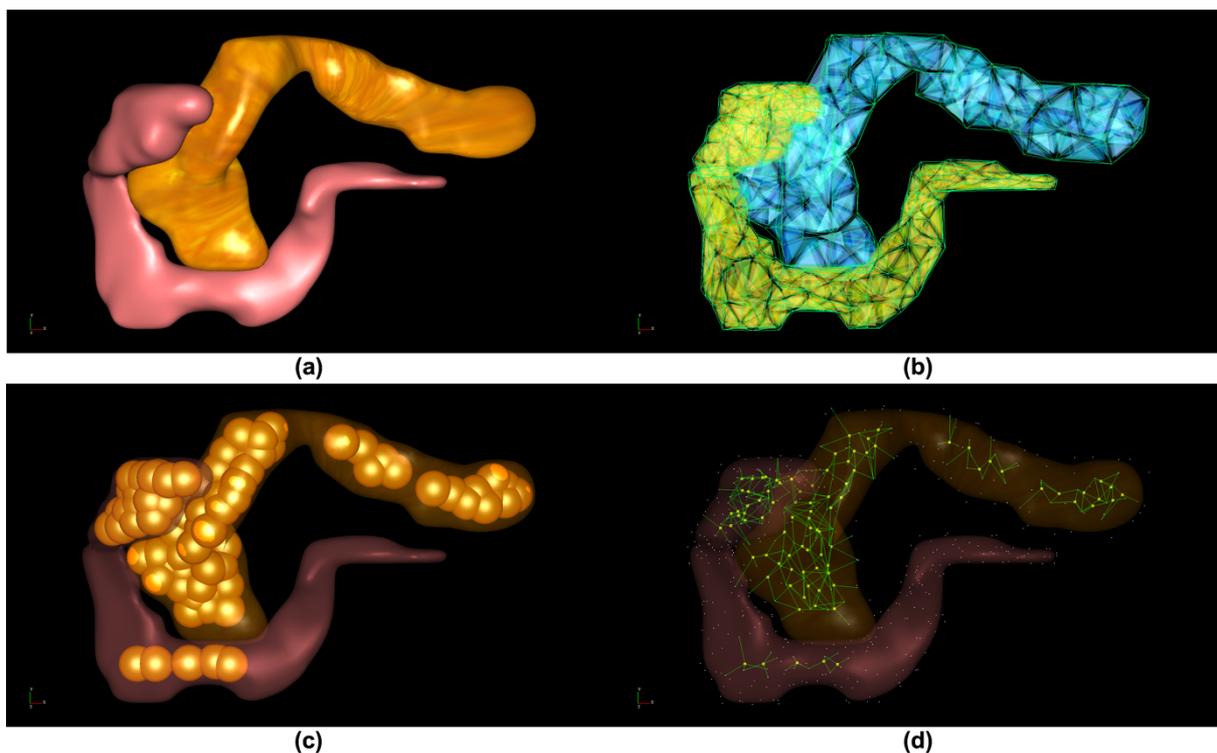


図 3-6 十二指腸を含めたシミュレーション((a):表示用モデル.(b):デフォメーションモデル.(c)衝

#### 突処理用モデル.(d):デフォメーションと衝突処理用モデル間のマッピング)

十二指腸モデルの衝突処理用モデルは膵臓と同じく球を用いており、作成ルーチンも膵臓と同じものを用いていた。衝突球作成ルーチンは膵臓のようなある程度の太さを持つ臓器モデルを想定していたため衝突処理用モデルの構成時に十二指腸のような細い管状モデルでは、図 3-6(c)のように衝突球が作成されない箇所があることがわかる。これを解決するためにノード構成は変えず、図 3-7 のように衝突処理用モデル作成ルーチンで十二指腸モデルの場合は衝突球の半径を小さくすることで解決を図った。

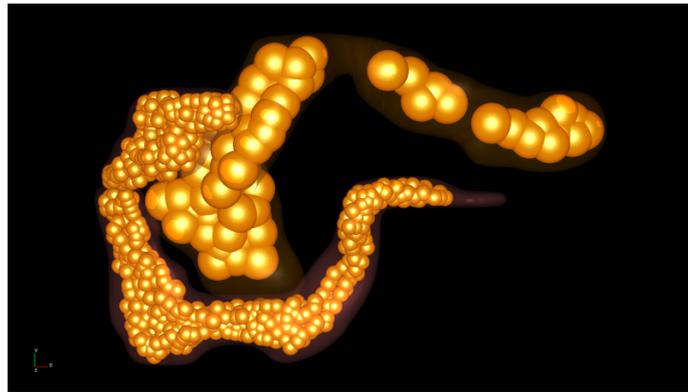


図 3-7 十二指腸衝突処理用モデルの改良。図では衝突球半径を膵臓のものより4割小さくしている。

### 3.3 手術シミュレーションのリアルタイムモデルデータ録

#### 画機能の追加

改良前の Pancsim には手術シミュレーションを行なった過程を保存する手段を備えておらず、シミュレーション前のシーンを縦・横に回転させた動画、いわゆるターンテーブル動画を保存する機能のみを備えており、活用は手術時に手術室で再生するといった活用に限定されていた。第 1 章でも述べた通り 3D-CG バーチャル手術シミュレーションユニットでは革新的な外科学教育システムの構築を目標としている。Pancsim で手術シミュレーションを行なうことも大切であるが、その結果から学習できることも多分にあると考えられる。そこで本研究では Pancsim に図 3-8 のような手術シミュレーションの過程をリアルタイムで録画する機能を追加した。

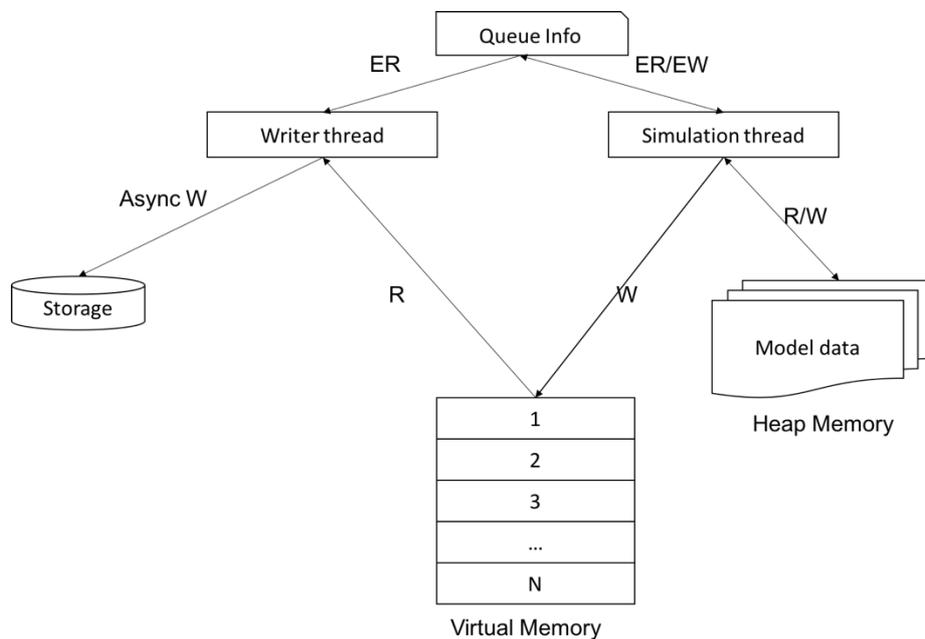


図 3-8 リアルタイムモデルデータ録画機能アーキテクチャ(ER: Exclusive Read, EW: Exclusive Write)

ここでいう録画とはシミュレーション画面フレームバッファの動画としての保存ではなく、上図に示したように膀胱や十二指腸、血管などシミュレーションステップごとに変形するモデルの、ステップごとの頂点データの録画である。愚直にステップごとにモデルデータをシケンシャルにファイルに書き込んでいてはリアルタイム性は全く保障できないため、本研究では 1 ステップの録画に必要なメモリサイズを要素の大きさとするサイズ N のキューを仮想メモリに確保し、ステップごとにモデルデータをキューに挿入、別スレッドが読み出し非同期書き込みを行なうことでシミュレーションのリアルタイム性を確保した。膀胱、十二指腸、血管を含むシミュレーションの場合 1 ステップ録画に必要なメモリサイズは 2MB ほどであり Pancsim では 100 フレーム分、つまり約 200MB 分を確保している。この場合の録画時の FPS の低下は 15%程度である。次章ではこの機能によって得られたモデルデータのレンダリング結果を示している。

## 第4章 結果と考察

本章では前章で述べた3つの改良を加えた Pancsim で行なった十二指腸を引き抜くシミュレーションの動画作成について述べ、作成過程及び得られた結果をもとに考察を行なう。

### 4.1 Pancsim による手術シミュレーション動画作成

Pancsim に3つの改良を施した段階で、共同で研究を行っている医師から膵臓手術で行なう十二指腸の操作を再現した動画が見たいとの要望をうけた。

医師の要望は以下の通り。

- 十二指腸を小腸方向に引っ張りそのときの血管の挙動を確認したい。(図 4-1(a))
- 十二指腸を引き抜き持ち上げた際に血管を含めどう見えるか確認したい。(図 4-1(b))

以下、図 4-1 に医師手作りの膵臓模型による要望の説明写真と補足資料として膵臓及び十二指腸付近の解剖学テキスト図 4-2 図 4-3 を示す。

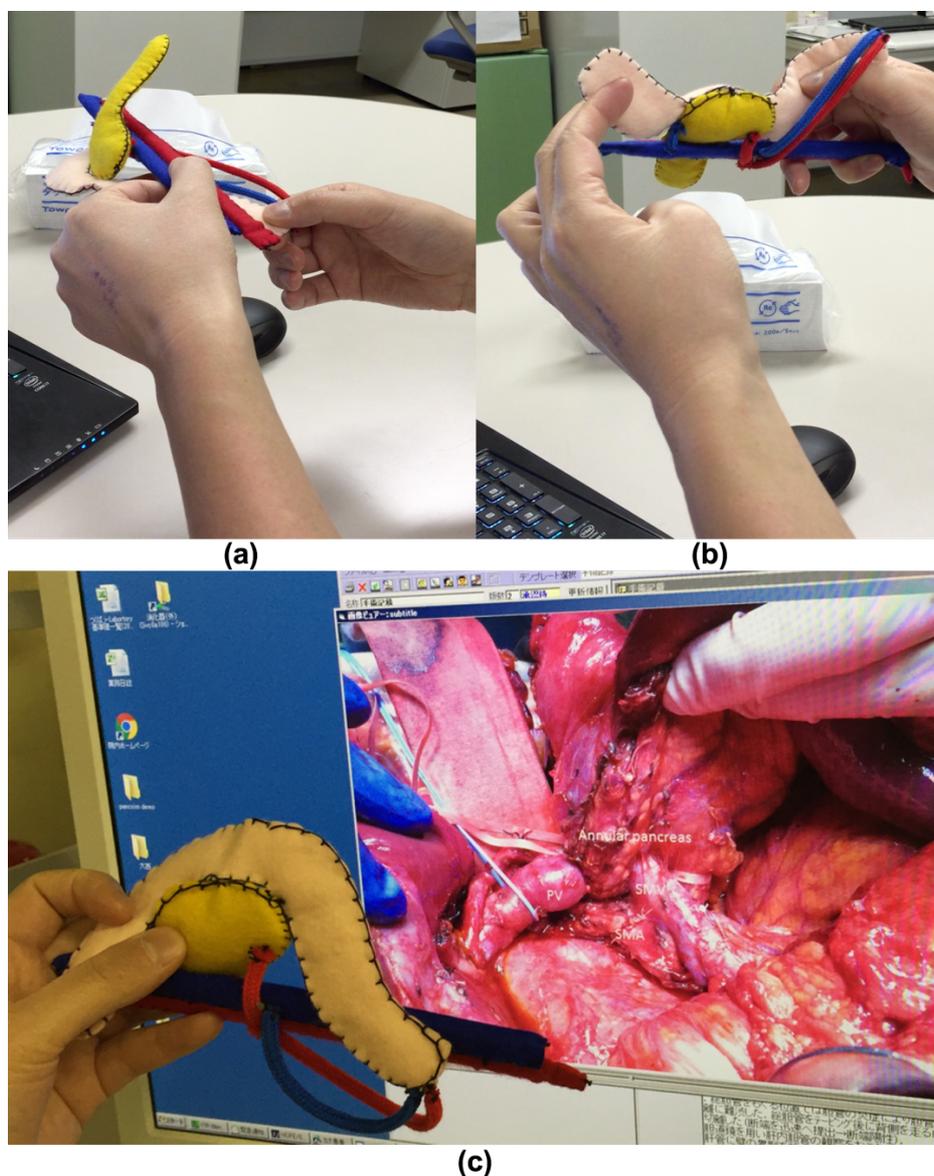
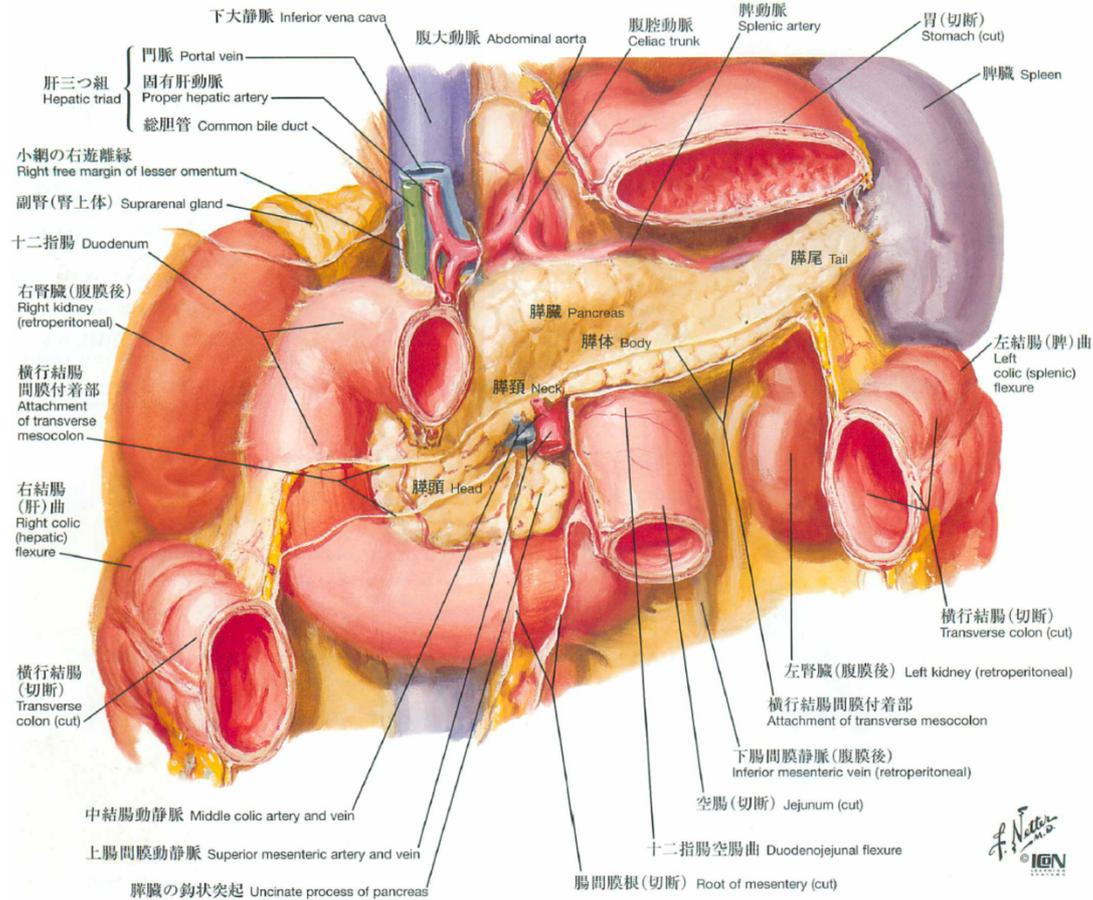


図 4-1 医師による要望説明((a): 十二指腸を小腸方向へ引っ張った様子. (b): 十二指腸を引き抜いた時膵頭部から見た様子. (c):実際の膵頭部からの視点画像との比較)



十二指腸と膵頭を左方に翻転

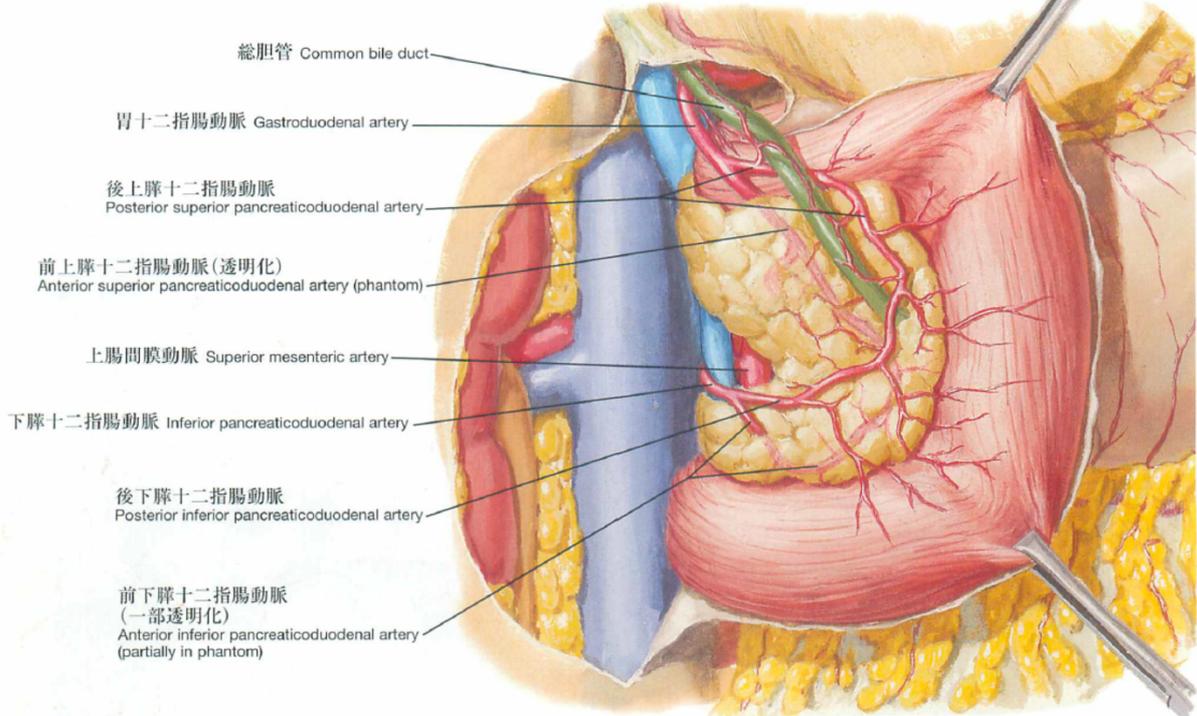


図 4-2 膵臓と十二指腸の解剖学テキスト(下図は図 4-1(c)に対応している。)(画像出典: [19])

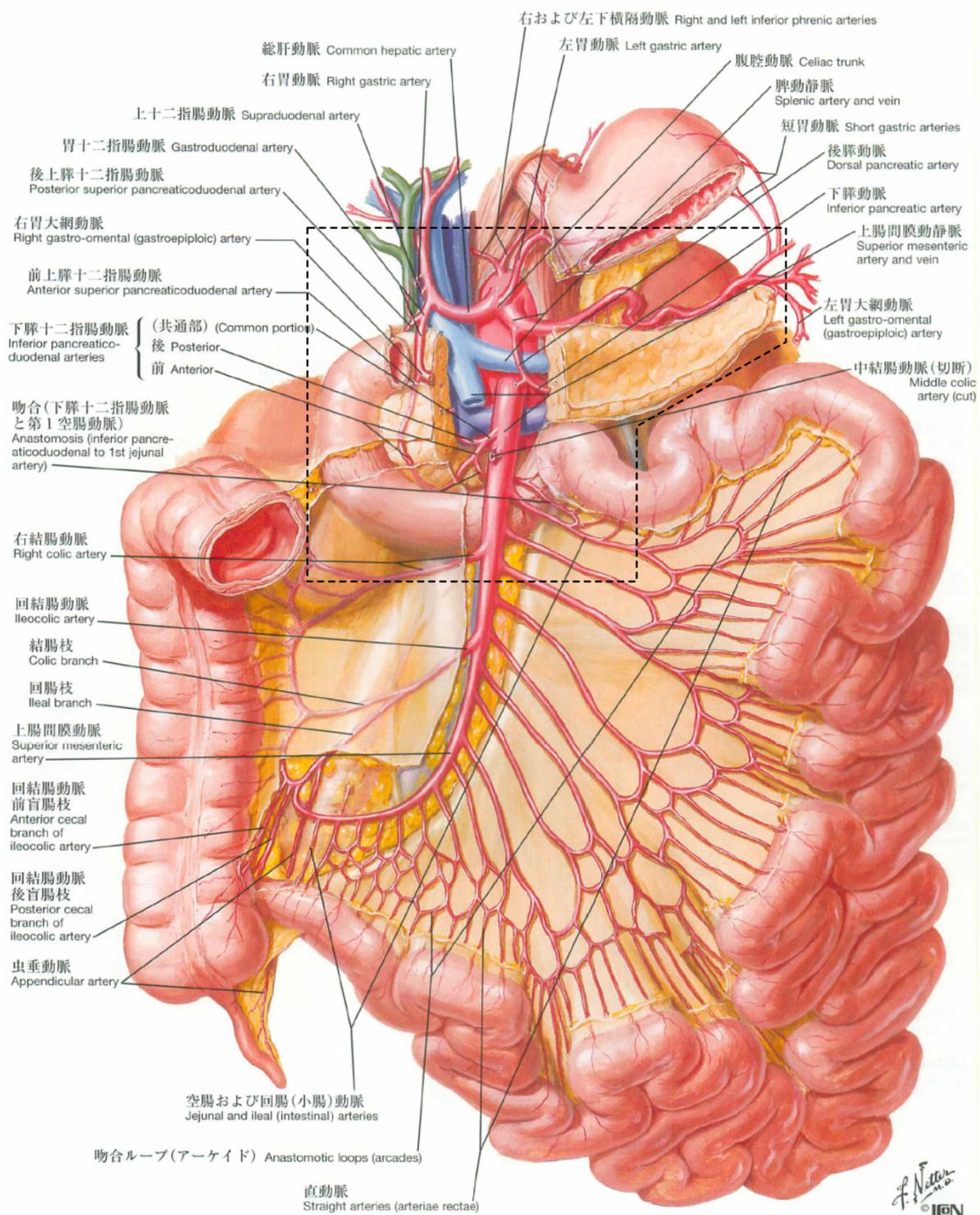


図 4-3 十二指腸から小腸にかけての動脈の解剖学テキスト(点線で囲ったあたりが Pancsim でシミュレーションを行っている部分である. 十二指腸は不完全な状態でシミュレーションを行っているので引き抜く動作を再現するには血管との接続バネ配置など工夫が必要となる。)(画像出典: [19])

#### 4.1.1 手術見学

医師によって挙げられた要望は膵臓手術に精通している者にとっては理解できるものの、医学生でも理解するのは難しいらしく、ましてや工学系の学生である筆者にとっては理解できるものではなかったため、医師の勧めもあり膵臓手術への理解、臓器や血管の挙動についての理解を深めるため膵臓十二指腸切除術の手術見学を2015年11月30日及び12月25日の2回行なった。手術見学の様子は図4-4の通りである。



図 4-4 手術見学の様子

両日とも7時間を超える手術となり、大画面モニターによる間接的な見学及び脚立に乗っての直近からの直接的な見学を行なうことができた。手術見学以前も手術動画を視聴し膵臓手術に対する理解を深める努力は行ってきたものの、医師の解説を交えた実際の手術見学は貴重な体験となったのと同時に臓器を切離した時、血管を剥離切断した時、十二指腸を引き抜いた時などの実際の挙動について知識的・感覚的な理解を得ることができた。

#### 4.1.2 手術シミュレーションの構築

手術見学の後、医師の指導のもと実際の手術シミュレーションの構築を、図4-5のような大動脈を追加した新しい手術シミュレーション用モデルを用いて進めた。

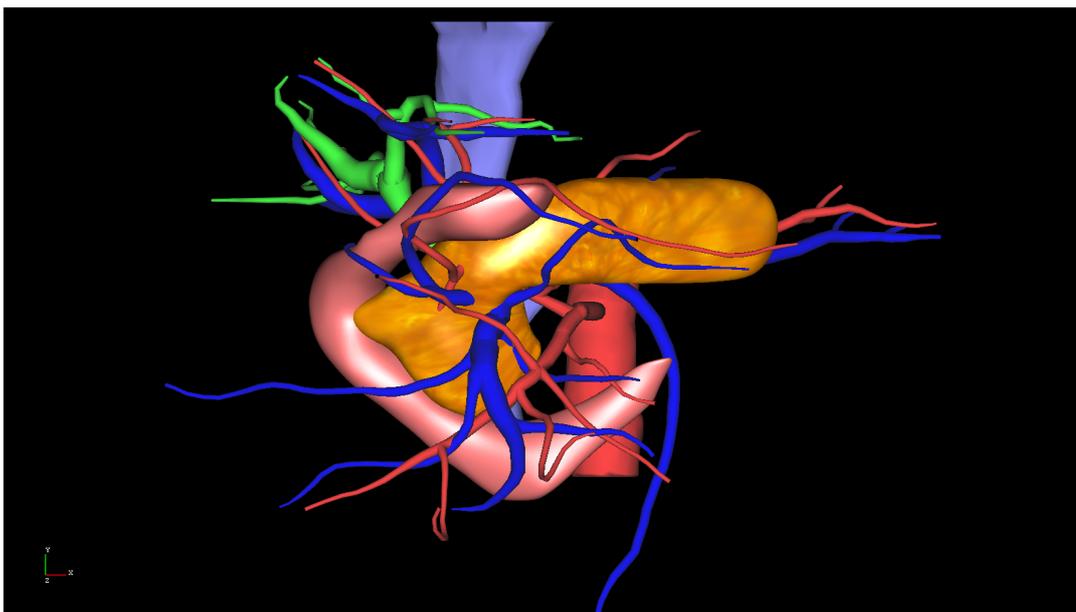


図 4-5 新しいシミュレーション用モデル

まず図 4-2 (c)のような膵臓と十二指腸間の接続を再現するために臓器間の接続バネの配置，そして十二指腸を動かすために回結腸動静脈の固定拘束の解除及び，十二指腸につられて膵臓が動きすぎないようにするための膵臓固定拘束の追加を行なった(図 4-6).

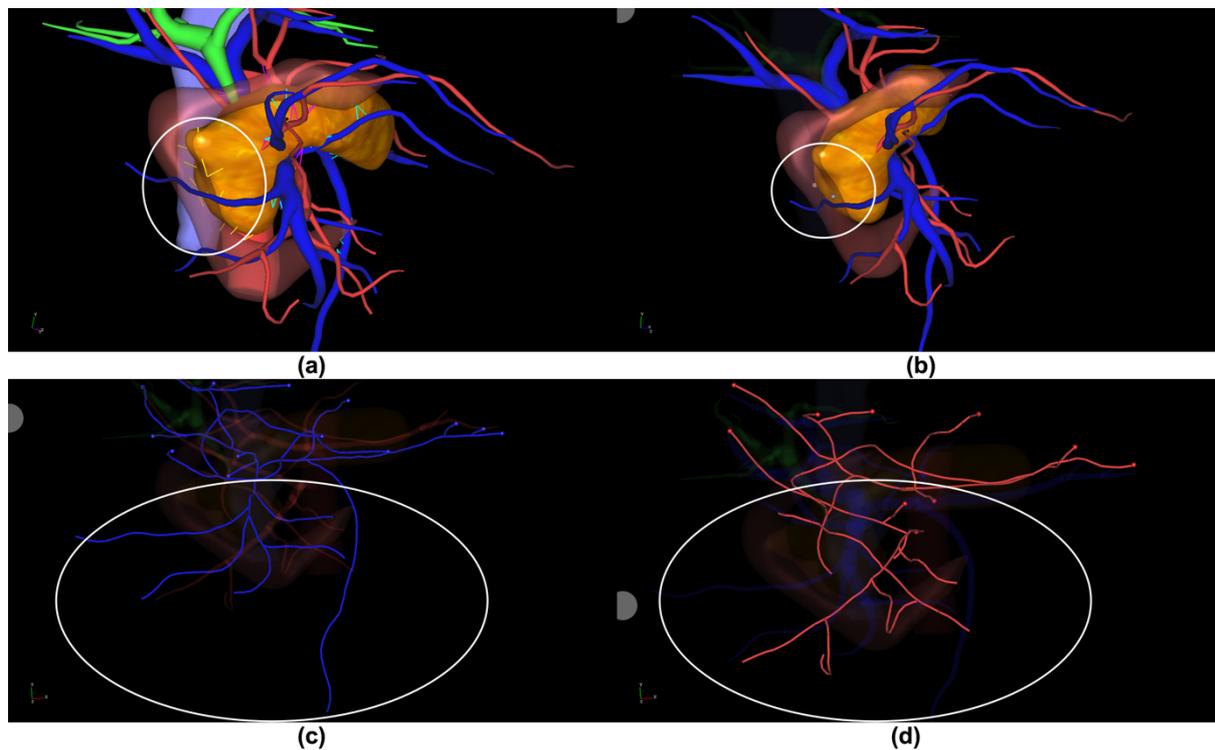


図 4-6 シミュレーション構築((a):膵頭部と十二指腸の接続. (b):膵頭部の固定拘束. (c)(d):回結腸動静脈の固定拘束の解除.)

続いて図 4-7 に示すシミュレーション構築時に自動生成した接続バネ配置では十二指腸を操作した際にリアリティのある動きが得られないため，露出血管と臓器間の接続バネの配置の改善を行った。

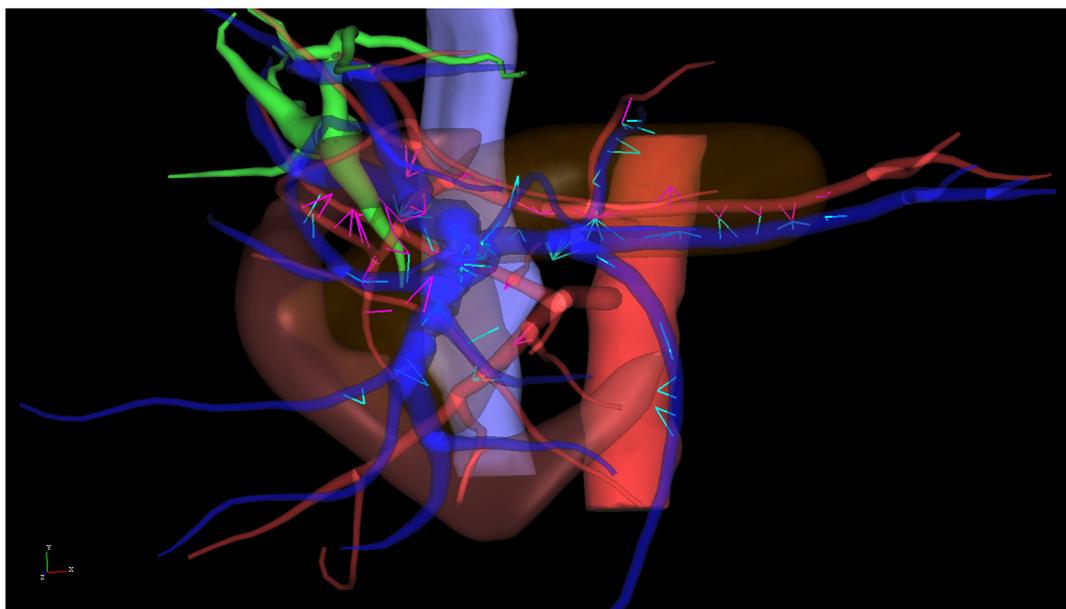


図 4-7 自動生成された露出血管と臓器間の接続バネ

改善にあたって図 4-3 に示したように十二指腸を引きぬく操作を行なうにはそもそも十二指腸ひいては空腸の長さと同結腸動静脈の長さが足りないため、医師と試行錯誤を重ね一番リアルティのある露出血管の挙動をする接続バネ配置を模索した。図 4-8 に採用した接続バネ配置を示す。

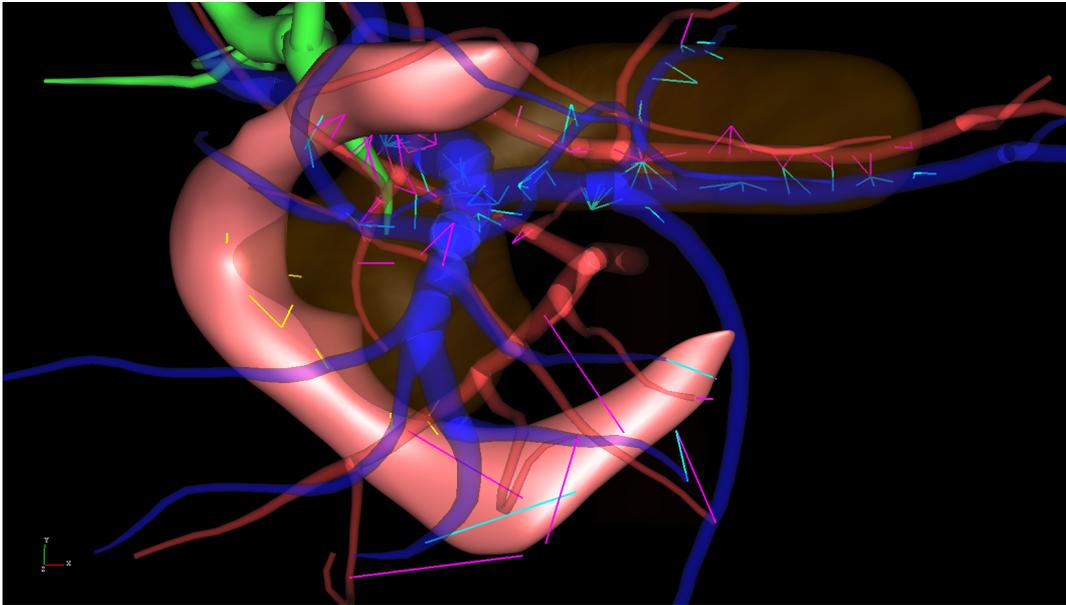


図 4-8 修正した接続バネ配置(胃側十二指腸及び膵体部はあまり動かさないため修正は加えていないが膵頭部付近では既存の接続バネを削除している。そして不完全な十二指腸で引き抜き操作を再現するため、回腸動静脈を空腸側十二指腸に接続している。)

#### 4.1.3 手術シミュレーション結果と考察

前項で構築した手術シミュレーション内で医師の要望があった2つのシーンの再現を行った。十二指腸の操作は図 4-9 に示すように操作点ツールを十二指腸末端に接続し行なっている。

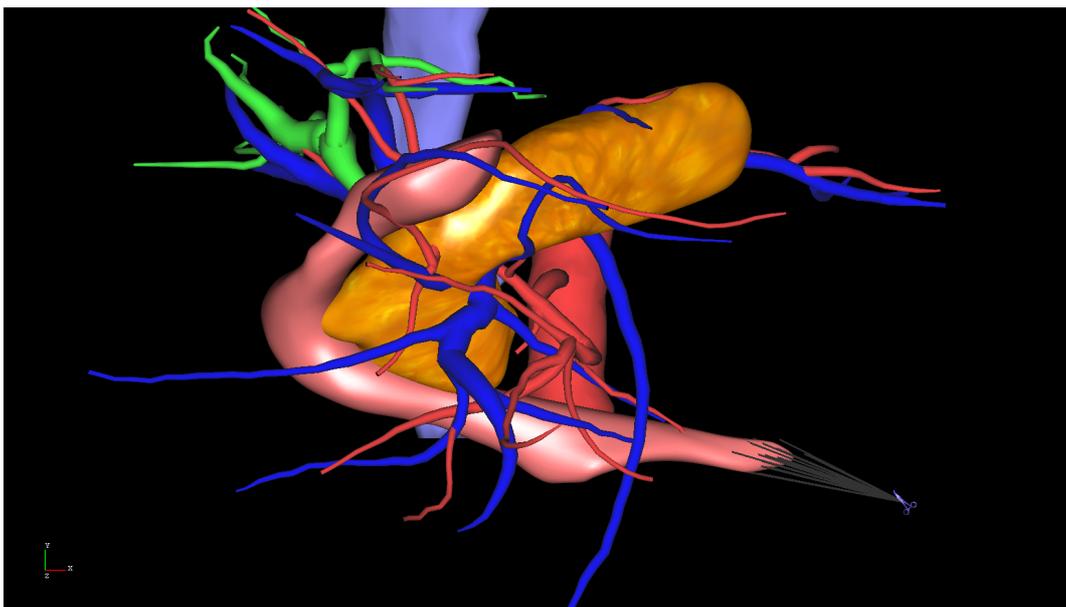


図 4-9 十二指腸の小腸方向への引っ張り操作

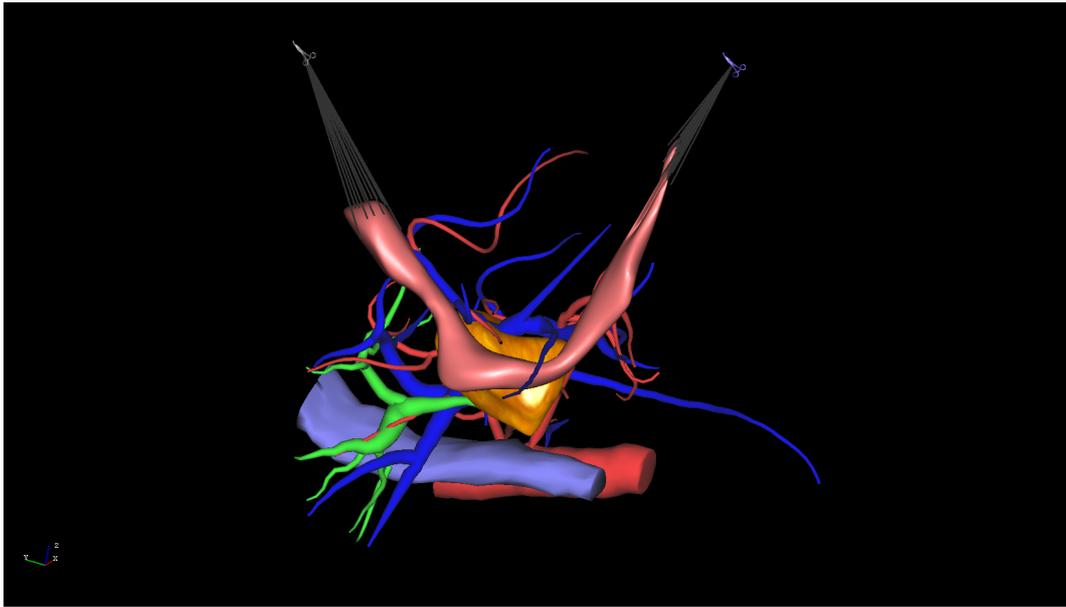


図 4-10 十二指腸の引き抜き操作

図 4-9 で示した十二指腸の引っ張り操作は十二指腸の動きに合わせて回腸動静脈が連動して引っ張られており膵臓外科医からの評価も高かった。一方で図 4-10 の十二指腸の引き抜き操作については十二指腸の動き，上腸間膜動脈が上腸間膜静脈の下をくぐる様子などは良い評価を受けたものの回腸動静脈の挙動が正しく再現できていないとの評価を受けた。

十二指腸の引き抜き操作をうまく再現できなかった原因としてはまず十二指腸の長さ，回腸動静脈の長さが足りなかったことが挙げられ，そのため十二指腸と露出血管との正しい接続関係を構築することができずリアリティのある動きが得られなかったと考えられる。

2つ目の原因としては実際の露出血管と臓器間の接着状況を再現するにはシミュレーションの解像度が不足していることが挙げられる。血管の芯線間隔が長く臓器表面三角形解像度が低いため狙った場所に接続バネを貼ることができず，また連続した接着を多数の接続バネによって表現できないためうまく血管が十二指腸の動きに追随することができなかったと考えられる。また，この解像度の問題は露出血管の剥離操作のリアリティにも関連しているため重要である。

一方で，そもそも露出血管と十二指腸との接続をバネによって行なっていることがうまく引き抜き動作を再現できていない原因である可能性もある。図 4-11 や図 4-3 に示したように回結腸動静脈，回腸動静脈などの露出血管は十二指腸及び小腸の腸間膜に存在しており，この膜を再現することで十二指腸引き抜き動作のリアリティの向上につながるのではないかと考えている。

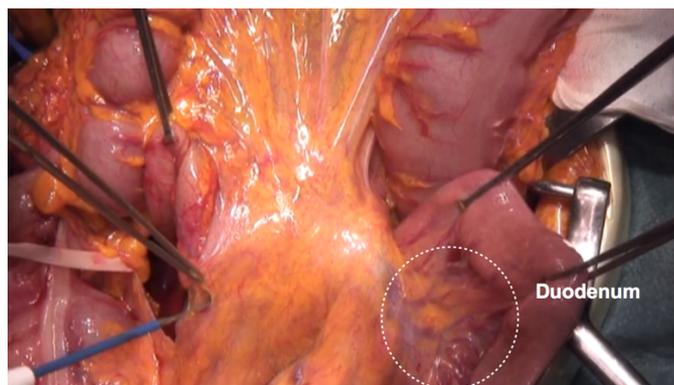


図 4-11 腸間膜(十二指腸は右後方へ牽引している)

#### 4.1.4 手術シミュレーション動画のレンダリング

前項で行った手術シミュレーションは本研究で開発した録画機能を用いてシミュレーションステップごとのモデルデータをすべて録画しており、3D オーサリングソフトウェアを用いて動画のレンダリングを行なった。動画全体では 30 秒ほどの長さであり 図 4-12 に前項で示した要望部分のシミュレーション画像に対応するフレームを示す。

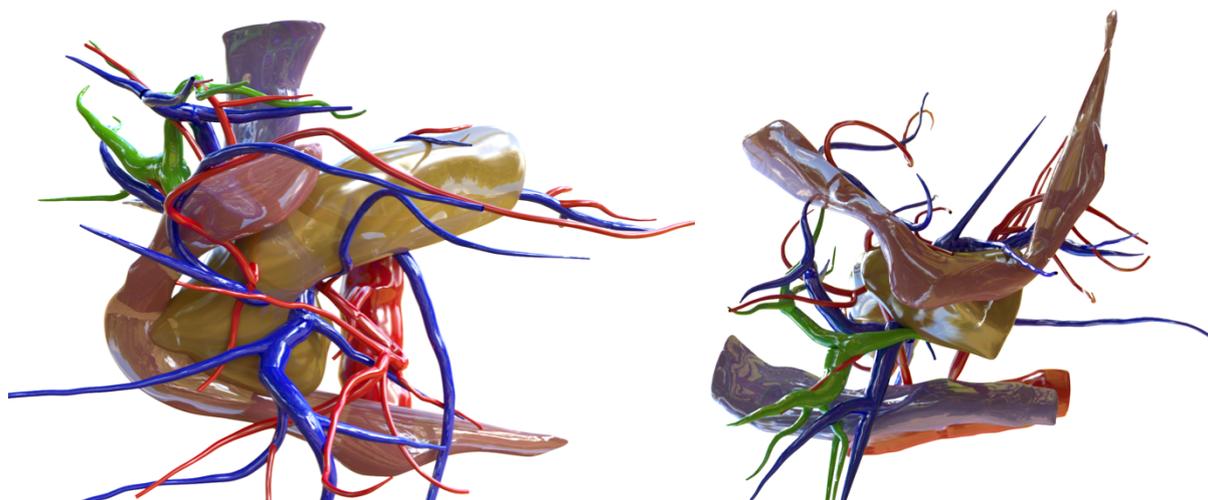


図 4-12 シミュレーション結果のレンダリング画像

モデルデータからのレンダリングなので 3D オーサリングソフトウェア内で自由にカメラワークが設定できるため、医師が重要だと考える視点も動画内で再現することができた。動画にすることで膵臓手術に精通している医師の感覚を医学生や実習生に伝えることができるようになったと言える。さらに見栄えの良い映像は教材利用だけでなく一般向けの興味を引くデモ作品としての利用価値もある。

実際に 2 名の膵臓外科医に本動画を見せたところ、両名共に教育用途として非常に有用であるとのコメントをいただいた。なお、コメントの全文は付録に記載している。

しかし、今回の制作で動画出力の問題点も明らかとなった。動画ではあらかじめカメラワークが設定されているためある時点のシーンを自由な視点から見るができないのである。より柔軟なシミュレーション結果の可視化手法としては録画モデルデータを読み込み表示する独自ビューアの開発が考えられ本研究では図 4-12 のような写実的な映像を手軽に表示することができる Unreal Engine を用いて開発途中ではあるが独自ビューアの開発をすでに進めている。

## 第5章 結論と今後の課題

本章では本研究の結論を述べた後、今後の課題について述べる。

### 5.1 結論

本稿では、筑波大学 3D-CG バーチャル手術シミュレーションユニットのプロジェクトとして開発が進められてきた膵臓手術シミュレータ **Pancsim** の改良を行なった。**Pancsim** の問題点として指摘されていた露出血管の剥離操作の改善のために露出血管と臓器間の接続バネを動的に編集できる機能を追加した。さらに膵臓手術シミュレータとしては不完全だった **Pancsim** に十二指腸モデルを追加したことでより多くの膵臓手術に必要な操作が行なえるようになった。しかし、手術シミュレーションの過程・結果を保存・可視化する仕組みを **Pancsim** は十分に備えていなかったため、本研究ではさらに手術シミュレーション過程をリアルタイムに録画する機能を追加し、その有用性を確認した。

### 5.2 今後の課題

様々な改善を行なったことで有用性を増した **Pancsim** であるが前章で述べた考察とともにいくつかの課題が存在する。

#### 5.2.1 露出血管の挙動のさらなる改善

本研究では露出血管と臓器間接続の動的編集機能を **Pancsim** に追加し医師自らが最適と思われる位置に接続バネを配置することができるように改善した。しかし、4.1.3 で述べたように、血管芯線、臓器表面三角形の解像度を上げ図 5-1 のように、より連続的に接続バネを配置することでよりリアリティのある剥離操作や十二指腸の操作が行なえるようになると考えている。

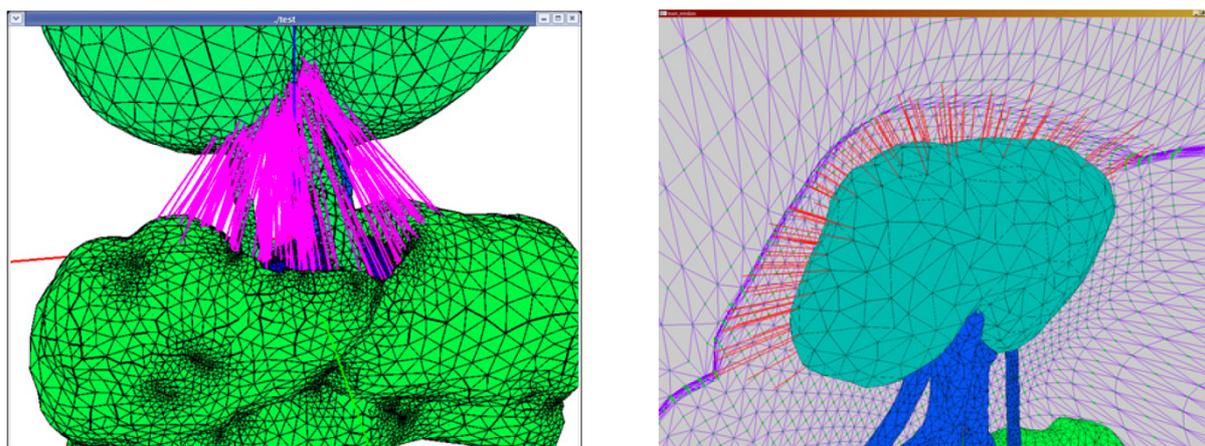


図 5-1 関連研究で紹介した Lap-PASS での組織間結合の様子(**Pancsim** よりも臓器解像度が高く非常に多くのバネで連続的に接続されていることがわかる。)(画像出典: [11])

### 5.2.2 露出血管と臓器間接続編集のユーザビリティの改善

現在の **Pancsim** では露出血管の剥離操作とその逆操作である接着操作を露出血管と臓器間に貼られた接続バネを切り張りすることで再現している。剥離操作に関しては剥離線の入力によって接続バネの切断が行なわれるが、実際の手術では電気メスによって血管と臓器の間に貼られた膜を連続的に剥がしていく。よりリアリティを高めていくには剥離操作や接着操作もペン入力のような実際の操作に近い連続的なインターフェースに変更することが必要であり改善することでシミュレーションのリアリティやユーザビリティを向上することができると考えられる。

### 5.2.3 シミュレーションの高速化

5.2.1 で述べた **Pancsim** のシミュレーションの高解像度化はよりリアリティが向上するものの、シミュレーションの速度が低下する大きなデメリットがあるため、リアリティを維持したままシミュレーションを高速化する必要がある。現在の **Pancsim** はこれまで述べてきたように精度よりも速度を優先した形となっているものの物理シミュレーション部分はシングルスレッドで行なっており無駄がある。有限要素法は並列化にとっても適した手法であるため現状 **Pancsim** で一番簡単な高速化手法としてはマルチスレッド化や GPU による並列処理が考えられる。現在実装途中であるものの CUDA による物理シミュレーション部分の並列処理化の実装を行なっている。

## 謝辞

本論文の執筆にあたり三谷純先生，金森由博先生，医学医療系奥田洋一先生には多くのご助言やご指導をいただきました。中でも三谷純先生，奥田洋一先生には研究や論文執筆，私生活に至るまで丁寧なご指導を頂きました。心より感謝致します。また，非数値処理アルゴリズム研究室の皆様にも大変お世話になり，日頃から貴重な助言やご意見を頂き感謝しています。

最後に，大学まで進学させてくれた母と中学1年生の時から2016年1月12日まで家族の一員でいてくれたオカメインコのパセリに最大級の感謝と愛情を示し，本論文を捧げます。

## 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://www.u-tsukuba-vrsurg.jp> [アクセス日: 11 1 2016].
- [2] Meier, Ullrich , et al., “Real-time deformable models for surgery simulation A survey,” *Computer methods and programs in biomedicine* 77.3, 2005.
- [3] Delingette, Herve , and Nicholas Ayache., “Soft Tissue Modeling for Surgery Simulation,” *Computational models for the human body*, 2004.
- [4] Ohiro, Yukio , et al., “Novel 3-dimensional virtual hepatectomy simulation combined with real-time deformation.,” *World journal of gastroenterology: WJG* 21.34 9982, 2015.
- [5] Terzopoulos, Demetri , et al., “Elastically deformable models,” *ACM Siggraph Computer Graphics*. Vol. 21. No. 4., 1987.
- [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.
- [7] Zhong, Hualiang, Mark P. Wachowiak , and Terry M. Peters., “A real time finite element based tissue simulation method incorporating nonlinear elastic behavior.,” *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 8.3 , 2005.
- [8] Vigneron, Lara M., Jacques G. Verly , and Simon K. Warfield., “On Extended Finite Element Method (XFEM) for Modelling of Organ Deformations Associated with Surgical Cuts,” *Medical Simulation*. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [9] Wu, Jun, Rüdiger Westermann , and Christian Dick., “Physicallybased simulation of cuts in deformable bodies: A survey.,” *Eurograph. State-of-the-Art Report 2* , 2014.
- [10] Basdogan, Cagatay , et al., “Haptics in minimally invasive surgical simulation and training.,” *Computer Graphics and Applications, IEEE* 24.2, 2004.
- [11] 緒方正人 , et al., “患者固有の形状データに基づく手術手技訓練用シミュレータ.,” *情報処理学会論文誌* 53.1, 2012.
- [12] Sase, Kazuya , et al., “GPU-accelerated surgery simulation for opening a brain fissure,” *ROBOMECH Journal* 2.1, 2015.
- [13] “ 脳 外 科 手 術 シ ミ ュ レ ー タ の 開 発 , ” <http://scc.ist.hokudai.ac.jp/research/brainsurgery/brainsurgery-j.html>. [アクセス日: 25 1 2016].
- [14] Azuma , Ronald T., “A survey of augmented reality,” *Presence* 6.4, 1997.
- [15] Haouchine, Nazim , et al., “Impact of Soft Tissue Heterogeneity on Augmented Reality for Liver Surgery,” *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on* 21.5, 2015.
- [16] “世界初のプロジェクションマッピングを応用したリアルタイムナビゲーションシステムの手術臨床応用 , ” [http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/events\\_news/department/hospital/news/2015/151016\\_1.html](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/events_news/department/hospital/news/2015/151016_1.html). [アクセス日: 24 1 2016].

- [17] 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.
- [18] “Medical Illustration Gallery,” <http://www.ctisus.com/learning>. [アクセス日: 20 1 2015].
- [19] F. H.Netter, Netter 解剖学アトラス, 3 編

## 付録

本章では、第 4 章で述べた十二指腸引き抜きシミュレーション動画を見ていただいた 2 名の膵臓外科医のコメントを掲載する。

### Pancsim を見た感想

筑波大学 消化器外科 倉田昌直

膵ならびに十二指腸、肝臓の血管が下記の 1 点を除き正確に描出されていた（胃結腸静脈幹が膵臓の中に埋もれていた点は修正が必要）。また胆管も描出されており、解剖学的な把握が容易であった。このことはこれから膵臓手術をしようとする若手外科医、それから研修医や医学生への教育用ツールとして効果が得られるものと思う。さらに手術を受ける患者やその家族への説明用ツールとしても使用できるものとする。

上記に関しては、一般的な 3D 画像でも効果が期待できるため、今回作成した Pancsim が今までと何が違い、今後どう発展していけばよいか考察してみた。

まず十二指腸、膵臓を自由に動かせ、血管や膵臓を切離することができる点が従来と異なり、このことが複雑な膵臓周囲の解剖や手術手技の理解を向上させている。次に様々な視野から操作、観察が可能であるため、開腹手術のみならず、鏡視下手術特有の背側・尾側からの視野にも対応でき、今後普及するであろう鏡視下膵切除のイメージトレーニングにも役立つと考える。

最後に、これだけ詳細に血管の描出が可能であるならば、肝門部においても動・門脈、胆管の脈管構築を描出させることも、腫瘍の位置を描出することも可能と思われる。特に難易度の高い肝門部胆管がん手術において、このソフトを応用して術前シミュレーションをすることは切除マージンを確保したり血管切除・再建をしたりする上で、臨床的にも有用な modality になると期待できる。

## 新しいモデルの感想

筑波大学 消化器外科 奥田 洋一

膵頭十二指腸切除術において、膵臓の周囲にある脈管の位置関係と走行を術前より理解し把握しているとは最も重要な事のひとつである。具体的には、肝十二指腸間膜内の肝動脈・門脈・総胆管の走行、総胆管より分岐する胃十二指腸動脈の位置と走行、上腸間膜動脈より膵臓へ流入する IPDA の位置、門脈より膵臓へ流入する PSPDV の位置、上腸間膜動静脈より分岐する第一空腸動静脈の位置と走行などである。それらの脈管の臓器との位置関係と走行を把握するため、我々外科医は術前に CT 等の画像をもとにスケッチを行い手術のイメージをわかせていた。

近年、三次元画像解析ソフトの出現により CT をもととした 3D-シミュレーションの作成が可能となり、より正確で印象的な 3D の画像を用い術前のシミュレーションを行う事が可能となった。

しかし、膵頭十二指腸切除術においてもうひとつ手術の理解を難しくしていることが、手術操作に伴う脈管の位置関係の変化である。膵頭十二指腸切除術では、場面々々で臓器を牽引して行う術野の展開が異なりそれに伴い脈管の位置関係・走行が変化する。この事が、初めてこの手術を経験する若手外科医にとって手術内容を理解することを難しくしている。従来の 3D-シミュレーションでは、ニュートラルな状態での各々の臓器と脈管の位置関係を正確に表現する事はできても、変化した後の位置関係を表現する事はできなかった。

今回新しく開発された新しいモデルでは、脈管の臓器への属性を保った状態で各々の臓器を自由に操作する事が可能となったため、場面が移った際にどのように脈管が牽引され位置・走行が変化するのかを表現することが可能となった。さらに、驚くほどのクオリティーで画像が表現され、各々の場面を自由な角度と遠近で観察することも可能となったため実際に術中に観察しているかの様な錯覚にさえ陥る。作成されたシミュレーションはパイロット版であり、現状では同じクオリティーのものを毎症例ごとに作成する事は困難であるが、若手外科医や学生に対する教育的なシミュレーションとしては十分なものであると感じた。