

平成19年度
研究開発成果報告書

生体ボリュームデータに基づくネット
ワーク型 VR 手術手技教育訓練システム

委託先： 三菱プレシジョン(株)

平成20年4月

情報通信研究機構

平成19年度 研究開発成果報告書 (一般型)

「生体ボリュームデータに基づくネットワーク型 VR手術手技教育訓練システムの研究開発」

目次

1	研究開発課題の背景	2
2	研究開発の全体計画	
2-1	研究開発課題の概要	5
2-2	研究開発目標	5
2-2-1	最終目標	5
2-2-2	中間目標	7
2-3	研究開発の年度別計画	8
3	研究開発体制	10
3-1	研究開発実施体制	10
4	研究開発実施状況	11
4-1	生体ボリュームデータに対応したボリュームグラフィック表示手法の 改良研究	11
4-1-1	概要	11
4-1-2	実施状況	11
4-1-3	まとめ・今後の課題	13
4-2	生体ボリュームデータを高速に並列処理する手法の 研究開発	14
4-2-1	概要	14
4-2-2	実施状況	14
4-2-3	まとめ・今後の課題	18
4-3	生体ボリュームデータに基づくリアルタイム変形手法と触覚提示手法の 研究開発	21
4-3-1	概要	21
4-3-2	実施状況	21
4-3-3	まとめ・今後の課題	29
4-4	総括	31
5	参考資料・参考文献	33
5-1	研究発表・講演等一覧	33

1 研究開発課題の背景

近年の医療技術の進歩には目覚ましいものがある。その代表的な例が、CT、MRI、PET、超音波などの診断装置の高性能化（3次元化、高解像度化）と、内視鏡などを用いて患者への負担を最低限に抑えようとする低侵襲手術の登場である。これらの医療技術の進歩は、早期診断・早期発見・早期治療・早期治癒により、これまでにない治療成績を挙げることが可能となり、患者にとって大きな福音となっている。しかし、高度先端医療技術を使いこなすには、これまで以上に高度な専門知識と多くの経験が必要であり、技術に精通しない未熟な医療従事者による安易な使用は、近年問題となっている医療事故増加の一因となっている。また、その技術を習得し使いこなさなければならぬ医師などの医療従事者にとっては大きな負担、ストレスともなっている点も見逃せない。

このような状況のもと、熟練した専門医の知識および技術を、いかに安全に効率よく継承することが出来るか、その方策はどのようなものがあるかが、従来から行われている手術現場における訓練者を助手として熟練医師のもとでおこなう実手術によるOJTも含めて、検討されている。現在一般に行われている訓練法は、医療機器メーカーによる、実機を用いた機器の取り扱いを中心とした講習会と、「ウェットラボ」と呼ばれる実験動物を用いた模擬手術訓練が中心である。前者は、機器の取り扱いと操作の習得が中心であり、手術手技の訓練ではない。後者は、切開や血管縫合などの訓練は可能であるが、人間と動物の解剖学的差異から手術の訓練が逆に誤った空間的認識を与える可能性があり、また近年の動物愛護の観点から実験動物を準備することが難しくなっている。

一方、計算機技術の発展とともに1990年代初頭から研究開発が盛んになった仮想現実感（VR）技術の有力な応用分野の一つとして、生体を使わずに高度な臨床手術手技を訓練するツールであるVR手術シミュレータが注目されている。この装置は、計算機上に構築された人体と疾病のデータベースを元に、実際の手術状況を模擬することにより手術訓練を体験することが出来るもので、多くの研究開発が行われている。

しかしながら、いままでに開発されたVR手術シミュレータは、未だ実用的な段階には達していない。

解決すべき問題点として、

- ① 模擬精度が低い：特に、手術中の臓器の変形に関するモデルが現実感に乏しく、切開や縫合時における「映像表現」や手に感じる「力覚表現」の模擬が十分でない。
- ② 対応する疾患の数が少ない：対象とする臓器や疾患のデータ作成が手作業であり費用と時間がかかるため、多くの疾患に対応できない。
- ③ 手術の重要な手順が模擬できていない：特に手術中に発生が予想される突発事項（合併症）の模擬は医療事故を防止する上で非常に重要な機能である。

などが挙げられる。

しかし、これらの実現は技術的に難しい課題である。研究受託者は、CT、MRIなどの医療診断機器で取得される実際の生体データをもとにデータのモデリングを行う手法を確立しようとしている。

CT、MRIなどによって得られた生体データから作るモデルデータ（ボリュームデータ）は、内部に情報を持つため、データ量が膨大となる。現状では大量のボリュームデータをリアルタイムシミュレーションする手法がないため、表面にのみ情報を持つ、手術

シミュレータ用に特別にモデル化された手作りの単純なモデルデータによりシミュレーションが行なわれている。

今後、多くの症例や患者固有の生体データに対応できるシミュレータが必要となってくることは必然であり、その際には実際の生体データであるボリュームデータを用いた手術シミュレータの構築技術が必要となる。また、VRシミュレータで行う切開や縫合操作では、操作者に対して操作感覚を把握させるため、現実感のある視覚や力覚の呈示が重要であると言われている。

しかし、現在、ボリュームデータに基づく手法は計算量が膨大であるため、(1)現実的な数理モデル、(2)視覚・力感表現法、等に大きな技術課題があり実時間化が達成されておらず、今後の開発が望まれている。

一方、受託者と異なり表面にのみ情報を持つモデルデータを用いた内視鏡下手術を対象とした外国製品は、国内で販売が行われ始めた。現在、次の2製品が国内で販売されている。

(1) スウェーデン Surgical Science 社製 The LapSim System

(2) 米国 Simbionix 社製 LapMentor

これらの製品では内視鏡下手術の限定的な訓練は実現されている。前者は、映像模擬において大変優れるが術具を通して臓器の操作感覚を得る仕組みが弱い。後者は手術の操作感を得ることが可能であるが、模擬の精度に欠ける。精度が不十分ではあるが、現状では手術訓練の代替がないため、各大学の医学部で、これらのシミュレータの利用が始まっており、研究段階である、当プロジェクトにとって大きな脅威ではある。特に、Simbionix 社製 LapMentor は装置として目的手術を明確にすることによりコンパクトな実装を実現しており製品としての完成度が高い。

一般に手術シミュレータは、目的とする技術的難易度および装置の価格から、(1)手術具の操作訓練のみを目的としたもの、(2)対象手術の手順および手術部位と術具の相互関係を訓練するもの、(3)術前のリハーサルにより、危険予知や熟練度を向上させる、「ミッションリハーサル」等に分類される。図1-1に、これに従った分類を示す。分類(1)から(3)に向かうに従い、技術的難易度および装置の価格は高くなる。分類(1)は、実術具を機械的に統合したものが主流である。VR技術を用いたものは分類(2)以上の訓練を目的としており、現在、分類(2)までが商用化されている。前記の製品は分類(2)の前半から中位の位置に属する。当プロジェクトでは、対象部位(軟組織など)の変形や微妙な術具の操作感を、映像および力感により高精度に模擬できる手法および装置の開発を目標としており、これは分類(2)の後位から(3)の前半に属し、かつ、分類(3)を本格的に実現できるように発展可能な技術基盤を目指すものである。

このように、本プロジェクトで研究開発中のシステムは、臓器表面の他、臓器内部の情報も用いて模擬精度の高いシミュレーションを行う、高い忠実度を必要とされる手術訓練用途への適用を目指している。

前記のシミュレータ(既存製品)は、特定の手術に固定されたものであり、同一装置による他の手術への移行は困難である。また、患者固有のデータ利用や手術に即応(ミッションリハーサル的な目的)して対象部位を変えることが難しいと考える。

一方、受託者のシステムでは、手術シミュレータ本体以外に、データモデル作成装置を持つため、手術部位を固定せず、異なる人体部位の手術訓練が原理的に可能である。

したがって、対象手術訓練に特化したシナリオ、即ちコンテンツと、術具の入れ替えにより、複数の部位の手術への対応が可能となる。また、ネットワークを経由して、熟達者と、訓練生が協調して訓練可能な仕組みを持つ。

これらのことから、目的に応じた用途の棲み分けが行えるので、研究終了時の競争力は維持可能と考える。

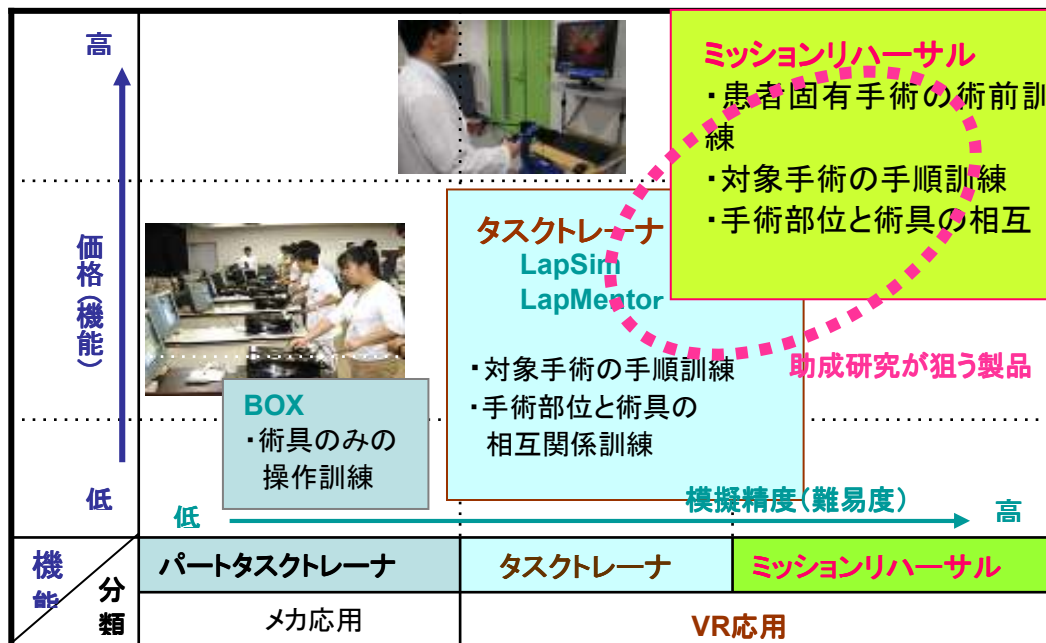


図 1 - 1 . 委託研究が目標とする分野

2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

本研究は、バーチャルリアリティ（VR）技術を利用して内視鏡下手術を対象とした現実感の高い実用的な手術シミュレータを開発するための基盤技術の研究開発を目的としている。

従来の表面のみに情報を持ち内部は中空である状態でのシミュレーション方法では、高い現実感を得られない。このため、3次元的に内部にも密にデータを持つボリュームデータ（生体モデルデータ）を用いて力学計算を行い、映像および力覚の呈示を行うことが特徴である。

この複雑な生体モデルデータの作成を効率化するため、MRI・CTなど医療機器から直接得た2次元スライス画像を元に、対象部位を半自動で抽出してボリューム形式とする手法の研究・開発も並行して実施している。

このために、研究開発を

- (1) サブテーマ1： 主に表示技術の研究
- (2) サブテーマ2： 生体モデル生成法の研究（高速演算装置を含む）
- (3) サブテーマ3： 力学計算モデルの研究（力覚装置を含む）

の主要3テーマに分けて、要素技術の研究開発を行うと共に、これらの要素技術を統合して検証するための試作機をスパイラルアップ的に開発している。

現在、主に研究成果を統合して手術シミュレータの雛形となる第一試作を実施し、手術シミュレータの骨格の完成を目指している。この試作は、生体データ作成装置部、手術シミュレータ本体部から構成される。

各サブテーマの中間目標は、手術シミュレータの第二次試作を完成させるための必須の目標であり、中間目標を達成した。

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標（平成21年3月末）

本提案にて実施する研究開発の最終目標は、

- ・ CT、MRIなどの医療診断装置によって得られる生体ボリュームデータを基に、手術対象となる臓器の抽出とモデリングを行い、
- ・ 疾患データと触覚データを持つ「バーチャル患者データベース」を容易に構築し、
- ・ ネットワークで接続された装置（シミュレータ）により、複数の参加者（指導医と研修医、助手など）が一つの仮想術野空間を共有して、
- ・ 内視鏡下手術などの高度先端医療技術を体験習得できる教育訓練システムを提供することにある。

本目標を達成するために、2-1に示した研究開発課題を、大きく3つの研究開発サブテーマに分け、研究開発を推進していく。

各サブテーマの詳細内容、及び到達目標を以下に示す。

サブテーマ1

「生体ボリュームデータに対応したボリュームグラフィック表示手法の改良研究」

- (1) ボリュームグラフィックスの高速表示手法の研究開発
 - (a) 512x512x512以上のボリュームデータを表示できること
 - (b) ボリュームデータの表示更新レートは20fps以上であること
- (2) 通常のコンピュータグラフィックスとボリュームグラフィックスの融合手法の研究開発
 - (a) ボリュームデータとポリゴンデータを同時に表示できること
 - (b) ボリュームデータをポリゴンデータの前後関係が正しく表示できること
 - (c) 表示更新レートは20fps以上であること

サブテーマ2

「生体ボリュームデータを高速に並列処理する手法の研究開発」

- (1) 生体データとしてのボリュームデータをネットワーク上で共有する手法の研究開発
 - (a) ギガビットネットワーク上において10fps以上でボリュームデータを更新、共有できること。
- (2) ボリュームデータに適合する生体モデル手法の研究開発
 - (a) シミュレータに必要なデータを保持した生体モデルであること。シミュレーションに必要な弾性率を保持し、実際の生体に近い挙動ができること。
- (3) 実際の生体データからのシミュレータ用ボリュームデータ生成手法の研究開発
 - (a) 実際のMRI、CTから得られたボリュームデータからシミュレーション用のボリュームデータを生成できること。
 - (b) 一般のユーザがモデルを生成できるような分かりやすいインターフェイスを備えること。

サブテーマ3

「生体ボリュームデータに基づくリアルタイム変形手法と触覚提示手法の研究開発」

- (1) 手術シミュレータ用モデルとして利用できるように、リアルタイムボリュームデータの変形手法
 - (a) 10fps以上の頻度で、データ形状の更新ができるボリュームデータ変形手法であること。
- (2) ボリュームに基づく触覚提示手法
 - (a) ボリューム間を滑らかに結ぶ触覚を提示できること。
 - (b) 力覚の更新レートは1KHz以上であること。

2-2-2 中間目標（平成19年2月末）

以下が本プロジェクトの中間目標であり、H19年10月25日実施されたNICT殿による「H19年度中間評価ヒアリング」にて、中間目標の達成は、既に確認されている。

サブテーマ1

「生体ボリュームデータに対応したボリュームグラフィック表示手法の改良研究」

- (1) ボリュームグラフィックスの高速表示手法の研究
 - (a) 512x512x512以上のボリュームデータを表示できること
 - (b) ボリュームデータの表示更新レートは20fps以上であること。

サブテーマ2

「生体ボリュームデータを高速に並列処理する手法の研究開発」

- (1) 生体データとしてのボリュームデータをネットワーク上で共有する手法の研究開発
 - (a) ギガビットネットワーク上において10fps以上でボリュームデータを更新、共有できること。

サブテーマ3

「生体ボリュームデータに基づくリアルタイム変形手法と触覚提示手法の研究開発」

- (1) 手術シミュレータ用モデルとして利用できるように、リアルタイムボリュームデータの変形手法の研究開発
 - (a) 10fps以上の頻度で、データ形状の更新ができるボリュームデータ変形手法であること。

2-3 研究開発の年度別計画

金額は非公表

研究開発項目	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	計	備考
生体ボリュームデータに基づいたネットワーク型 VR 手術手技教育訓練システムの研究開発				中間評価 ▽	▽	最終評価	
サブテーマ1 「生体ボリュームデータに対応したボリュームグラフィック表示手法の改良研究」					→	-	主に、労務費
(1)ボリュームグラフィックスの高速表示手法の研究開発			→				
(2)通常のコンピュータグラフィックスとボリュームグラフィックスの融合手法の研究開発					→		
サブテーマ2 「生体ボリュームデータを高速に並列処理する手法の研究開発」					→	-	主に、労務費
(1)生体データとしてのボリュームデータをネットワーク上で共有する手法の研究開発			→				
(2)ボリュームデータに適合する生体モデル手法の研究開発					→		
(3)実際の生体データからのシミュレータ用ボリュームデータ生成手法の研究開発					→		

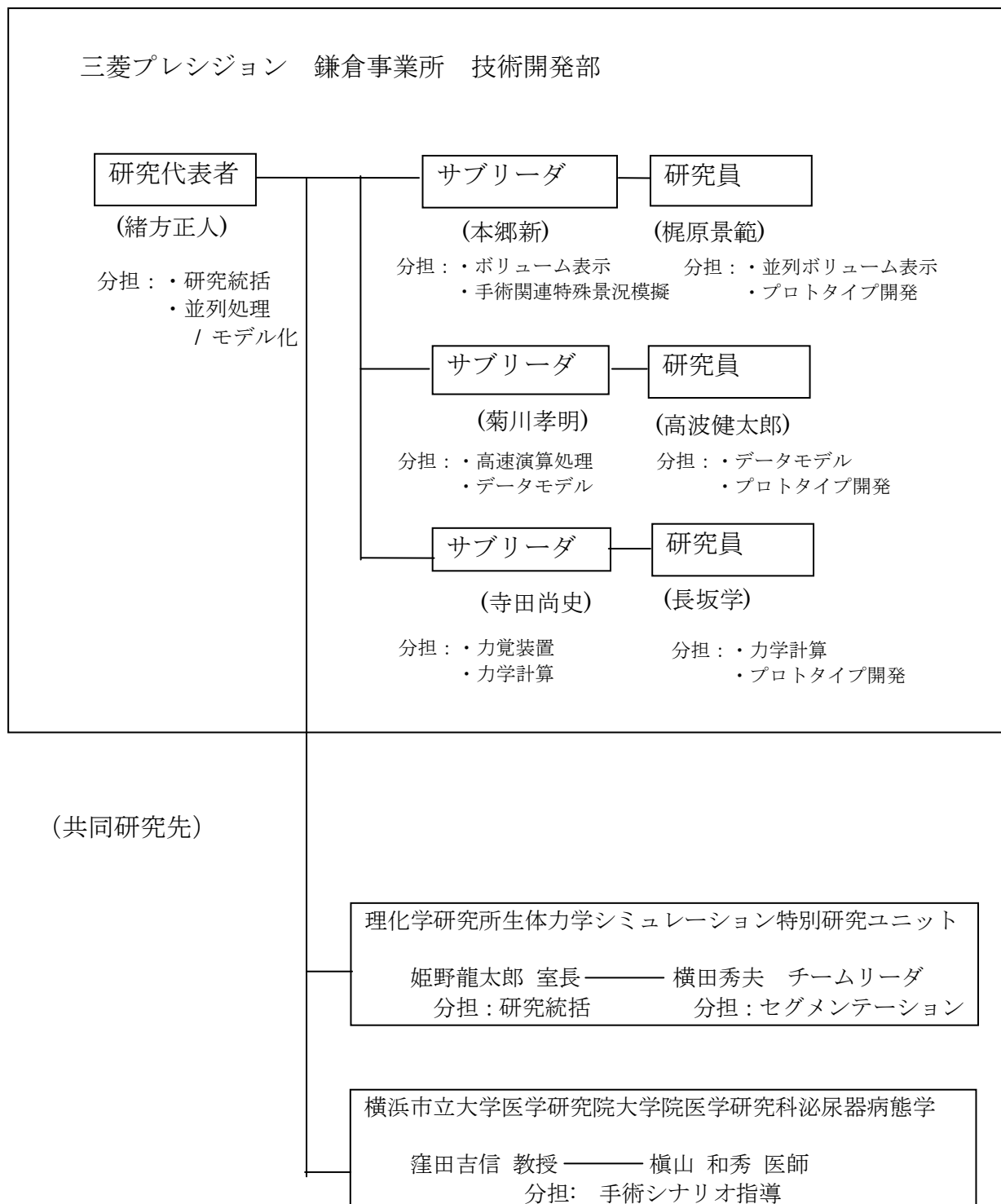
研究開発項目	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	計	備考
サブテーマ3 「生体ボリュームデータに基づくリアルタイム変 形手法と触覚提示手法の研究開発」						-	主に、労務費
(1)手術シミュレータ用モデルとして利用できる、リ アルタイムボリュームデータの変形手法							
(2) ボリュームに基づく触覚提示手法							
プロトタイプ機の試作・評価						-	主に、購入設備費、及び装 置改良費
①第一次試作							
②第二次試作（評価・改良を含む）							
間接経費額（税込み）	-	-	-	-	-	-	
合 計	-	-	-	-	-	-	

- 注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上（消費税を含む。）。
- 2 備考欄に再委託先機関名を記載
- 3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制

受託機関の研究分担者の体制



4 研究開発実施状況

4-1 生体ボリュームデータに対応したボリュームグラフィック表示手法の改良研究

4-1-1 概要

大量のボリュームデータを実時間で表示するための手法および装置の開発が本テーマの主たる研究内容である。他のサブテーマとの関係では、本研究はサブテーマ2がオフラインで生成したボリュームデータを基に、形状の実時間表現を行う。この表現時には、サブテーマ3の力学計算結果に常時連動した形状変化を実時間で表示する。さらに、手術シミュレーションにおける臨場感ある仮想的な映像空間を発生する。

4-1-2 実施状況

[調査]

以下に示す関連学会やシンポジウム、講習会等に参加するとともに、論文を中心とした文献の調査、有識者との面接による技術調査等により、ボリュームレンダリング技術やPCクラスタシステム、手術シミュレータによる訓練等に関する、既存技術・研究動向等を調査した。

(1) 第7回PCクラスタシンポジウム

本会の構成メンバーとして、「並列化による手術シミュレーションの高速化」という講演を行った。また、PCクラスタ計算機システムの開発動向、およびシステムを用いた3次元表示技術、高速処理技術の継続的調査を行った。

(2) 横浜市大手術シミュレータ見学・名古屋大手術シミュレータ見学

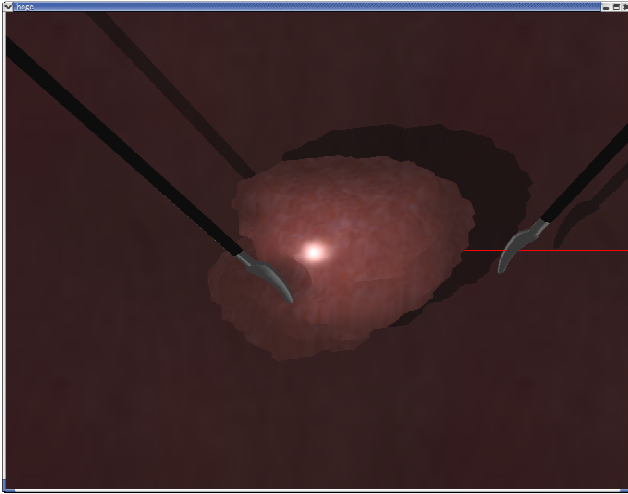
手術シミュレータによる手術訓練の実施状況の調査のため、大学病院が保有している手術シミュレータの見学を行った。市販されている手術シミュレータは模擬精度が低く、手術の訓練用途には使われていないことがわかった。また、術前シミュレーションを行う機能も実装されておらず、技術的に発展途上であることが分かった。

[研究]

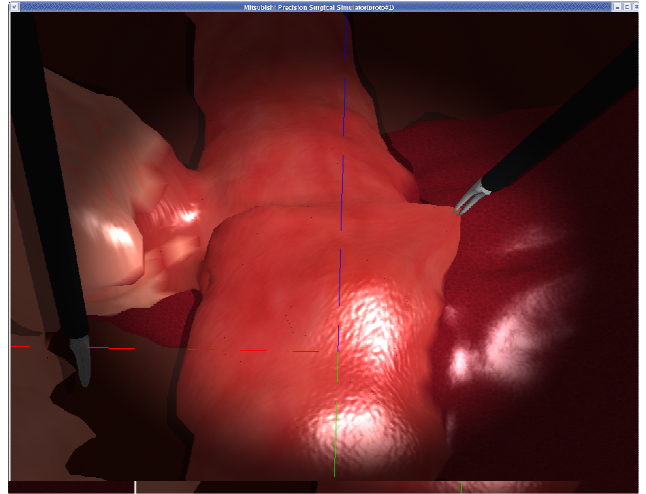
上記の調査を元に、手術シミュレータを構築するのに適したボリュームレンダリング手法の検討を行った。手術シミュレータでは、大容量ボリュームデータの表示、ボリューム変形・ボリューム切断/切開、実時間でのレンダリング、ポリゴンとの合成などの機能が必要とされる。実際の人体では、複数の臓器が互いに、力学的に影響しあいながら存在しており、本システムではそれを実時間で模擬する必要があるため、多臓器モデルの描画を行わなければならない。また、手術訓練の効果を高めるため、実際の手術に近い環境を模擬する必要がある。よって、平成19年度は大容量ボリュームデータのレンダリングに関し、多臓器モデルの描画、及び臨場感を高め、模擬精度向上を図る手法の研究開発を行った。

[開発]

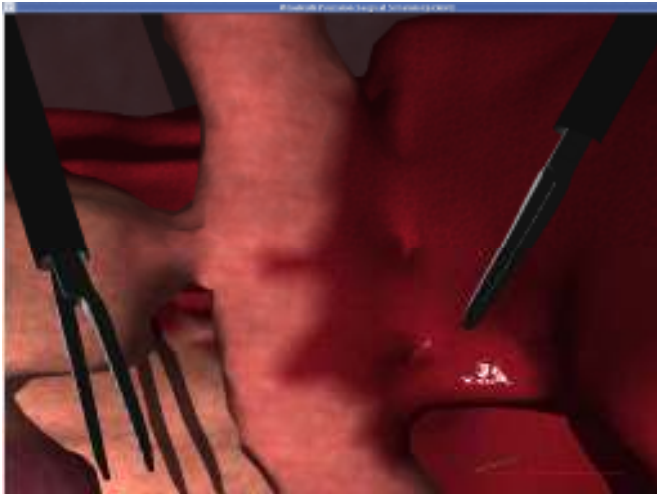
上記の研究を元に、変形計算を行ったボリュームデータのレンダリング手法を開発して実装した。多臓器モデルの表示に関しては、臓器モデルの高速な描画、及び描画臓器間境界のブレンディングを行った。また、模擬精度向上に関しては、モデルの質感を表現するライティング機能の強化、モデル表面の凹凸表現（バンプマッピング）、臓器、術具などの前後関係を表現するための陰影のリアルタイム描画、さらに、臓器切開時に、切開面を滑らかに表示するために法線ベクトルのリアルタイム生成、電気メス使用時の発煙景況などの実装を行った。描画例を図4-1-2に示す。



(a) 第1次試作時の描画例



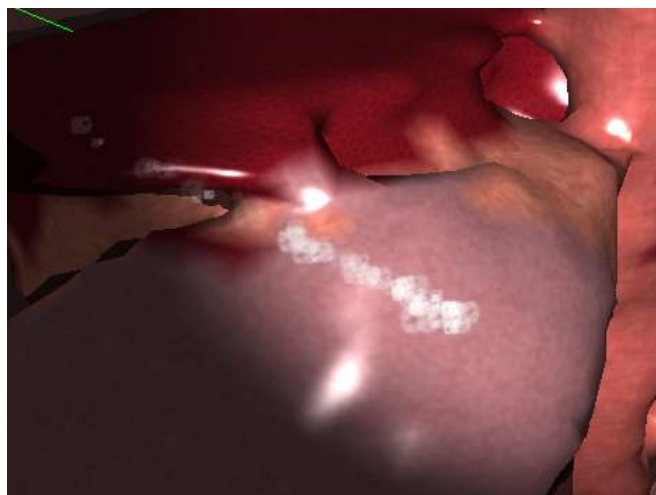
(b) 多臓器モデル描画例



(c) 臓器間ブレンディング及び陰影の描画例



(d) 切開時の法線ベクトル実時間生成



(e) 電気メス使用時の発煙景況

図4-1-2 描画例

4-1-3 まとめ・今後の課題

[調査]

関連学会やシンポジウム、講習会等に参加するとともに、論文を中心とした文献の調査、有識者との面接による技術調査等により、手術シミュレータ、ボリュームレンダリング技術や、内視鏡下手術（特に泌尿器科領域）等に関する、技術・研究動向等を調査することが出来た。

[研究]

ボリュームデータの描画をポリゴンを使用し描画することで、20Hzでの更新レートとなった。同時に、ボリュームデータとポリゴンデータの前後関係を正しく表示することも可能になった。これにより、平成19年度継続提案書サブテーマ1の目標は達成した。更に実用的な手術シミュレータとしての模擬精度を高めるために、多臓器モデルの表示、シェーディングおよびライティング機能の強化、術具モデルの精度向上、モデル表面の凹凸表現（バンプマッピング）電気メス使用時の発煙景況などの実装を行った。

[開発]

試作機に研究内容をプログラムとして実装することで、手術シミュレータの描画に関する基本的な機能を実現した。今後の課題として、複数臓器の描画に対応するためシーングラフの導入、また、さらに、実際の模擬環境に近づけるために、膜の表示、出血状態の表示、切断痕などの描画などの実現がある。これらの課題は来期実施の予定である。

[委託研究実施計画（19年度）との対比]

(1)通常のコピュータグラフィックスとボリュームグラフィックスの融合手法の研究開発

(a) ボリュームデータとポリゴンデータを同時に表示できること

達成した。

臓器、術具、粉塵を正しく表示することを可能とした。

(b) ボリュームデータとポリゴンデータの前後関係が正しく表示できること

達成した。

ボリュームデータとポリゴンデータの前後関係を正しく表示することを確認した。

(c) 表示更新レートは20fps以上であること

達成した。

モデル形状表現に粗密を付けることで映像の表現力（臨場感）を落とさず、20Hzでの描画更新レートを達成した。

4-2 生体ボリュームデータを高速に並列処理する手法の研究開発

4-2-1 概要

CT、MRI などを用いて部位を特定して採取した生体ボリュームデータに、力学シミュレーションに必要な各種の物理定数等を付加して、手術シミュレータのデータを生成することが本研究の目的である。このとき、実用的な手術シミュレータを構成するのに必要なボリュームデータの分解能は $512 \times 512 \times 512$ 程度の格子点数と非常に膨大な量である。この生体データから、人体の構成要素である、骨格、血管、各種臓器毎に3次元的な画像認識により、対象を分離してラベル付けするセグメンテーション技術の研究開発が主たるテーマである。

本研究は、サブテーマ1の映像発生の基となるモデルデータであり、またサブテーマ3のシミュレーションに用いられるデータでもある。

研究テーマ1および3を連携した最終目標における課題洗い出しから、実時間での力学シミュレーションを行うには、モデルを分割して並列処理を可能にする「高速演算処理装置」の開発が必要であると予測され、新に高速演算処理装置の開発を、サブテーマの一つに加えた。

4-2-2 実施状況

[調査]

以下に示す関連学会やシンポジウム、講習会等に参加するとともに、論文を中心とした文献の調査、有識者との面接による技術調査等により、セグメンテーション技術や高速データ処理技術に関して既存技術・研究動向等を調査した。

(1) 理化学研究所 (和光)

理化学研究所は、生体データの情報収集に関して長い研究実績を持つ。また、施設にMRIを持ち、分解能の高い生体データを自由に採取できる設備および環境を持つ。生体モデルデータの構築、及び生体の変形シミュレーション技術において共同研究を実施し、相互に補間している。

(2) 横浜国立大学大学院工学研究院

連立方程式の高速計算アーキテクチャに関する、検討、討論および情報交換を継続的に実施している。また、数値計算の並列化の手法に関する検討も実施している。

(3) VCAD シンポジウム

理化学研究所では、生体の物理化学現象のモデル化に関連した、ボリュームCAD (VCAD) の研究を行っている。生体力学シミュレーションに関する技術調査のため講演を聴講した。

(4) 可視化カンファレンス

医療分野に特化したメディカルトラックプログラムが新設され、医用3Dデータの構築、医用画像による診断プラットフォーム他、医療アプリケーションにおける可視化の手法を調査した。

(5) 「VCAD システム研究会」 定例研究会

理化学研究所を主体として行なわれてきた VCAD システム研究プログラムが新たに特定非営利活動法人「VCAD システム研究会」として発足し、その定例研究会へ生体力学シミュレーション、シミュレーションモデル生成に関する技術調査のため参加し、研究発表を聴講した。

(6) SIGGRAPH' 07

モデル生成、生体力学シミュレーション技術、GPU 応用技術に関する技術調査として各分野の研究発表を聴講した。

[研究]

(1) セグメンテーション

(a) 生体データモデル生成システム

前年度構築した生体データモデル生成システムの各処理に関して改良を実施した。画像抽出プログラムの要である適応型リージョン Growing 処理において、入力時のスライス画像データ群を指定したブロックごとに区切ることで入力データが大容量の場合にも対応できるよう改良を実施した。更に高速化処理として、メディアン計算処理を GPU 処理に置き換える事で処理速度が向上した。また、有限要素分割プログラムにおいては詳細度分割制御機能を付加し、作成したモデルの部位毎に詳細度を変更することが可能となった。更に高精度な詳細度分割処理が可能になるよう改良中である。上記の改良を踏まえて、実際の CT 画像データより、主要な臓器を抽出し複合臓器モデルとして有限要素分割データを生成し、手術シミュレータ試作機に適用した。(図 4-2-1)

現在模擬対象である腎臓周辺部の抽出について手動修正処理を減らし、より効率的にモデル生成が行えるような改良を検討している。

また、前年度作成した MRI 画像の歪補正プログラムについては複数のスライス画像を一括して歪補正が行えるように改良し、現在精度評価中である。

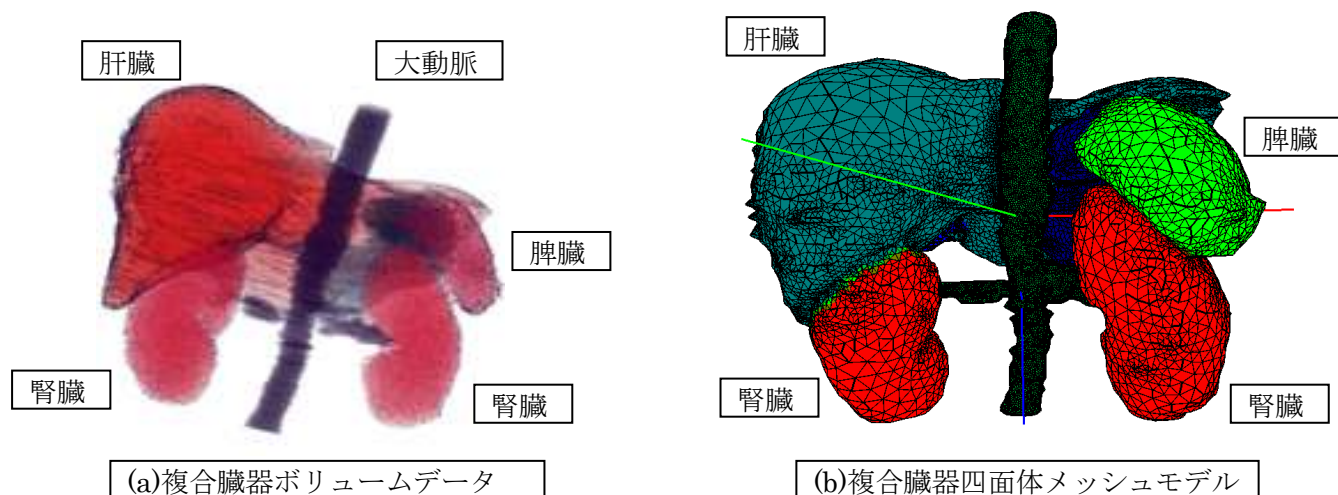


図 4-2-1 複合臓器モデル

(b) 構造化データベースの構築

実際の人体では、複数の臓器が互いに、力学的に影響しあいながら存在しており、本システムではそれを実時間で模擬する必要がある。そこで、複数臓器の接触処理を高速に実施するためのデータベース構造をテーマとして追加し、実施した。

・高速に接触判定を行うための構造化データベース（構造化DB）の構築

複数臓器同士の接触、及び自己接触を高速に検出し、実時間で変形計算を可能とするための臓器データベースを構築した。この構造化DBは、2分木ツリーの構造を持ち、分岐点と終端に「節ノード」および「終端ノード」をもつ。各「ノード」はメタデータ（処理を高速化するために、前処理により準備するデータ）を保持し、特に「節ノード」は下位のノードを包含したデータを持つことで、接触判定処理を効率的に管理する。

力学計算の各イタレーションの初頭に、このツリーを辿り、干渉判定処理を行う。このとき、変形後の臓器の形状を反映するため、メタデータは変形計算結果に基づいて随時更新する。図4-2-2に構造化DBの概念図を示す。

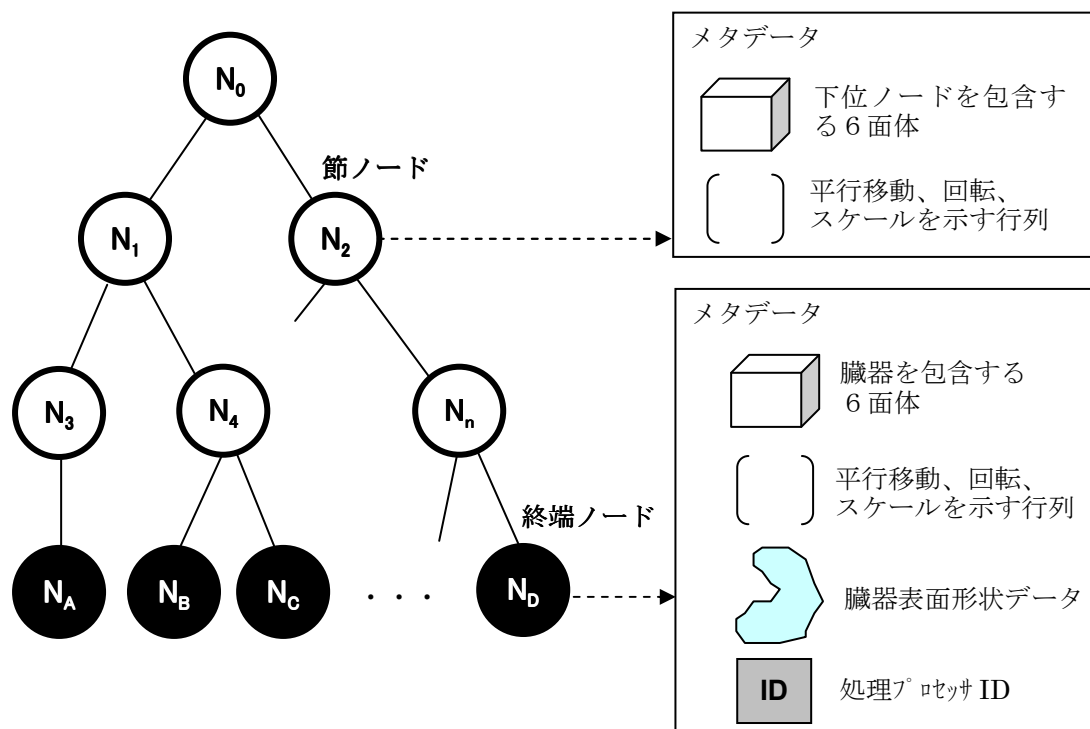


図4-2-2 構造化された臓器データベースツリーとノードの持つメタデータ

(2) 高速演算装置

大量のボリュームデータにもとづく、リアルタイムシミュレーションを実現するための計算プラットフォームの構築が本テーマの目的である。画像発生専用計算機である GPU (Graphics Processing Unit) は、他のデバイス、CPU、FPGA、Cell に比較し、演算性能、メモリバンド幅、性能向上速度及び価格の全てにおいて優位である。そこで、GPU による計算基盤の構築を 18 年度から継続して実施した。

昨年度 (18 年度) の高速演算装置第一次試作機においては、生体変形計算モデルに FEM の動的解析を実装し、4,771 ノードの生体モデルデータの変形シミュレーションを 22fps で更新可能とした (中間目標の 10fps を達成)。

19 年度では、高速演算装置第二次試作機の基盤構築を実施した。ホストコンピュータの更新、および新アーキテクチャ GPU への生体変形計算の実装により、システム全体の性能を第一次試作機の約 9 倍に向上させた (生体モデルデータ 29,234 ノードの変形計算を 33fps で更新可能とした)。この高速演算装置第二次試作機においては、GPU へ変形計算を実装することで、CPU で計算した場合に比較して、約 2 倍の性能を得た。図 4-2-3 に GPU と CPU の性能比較を示す。また、ホストコンピュータ、及び GPU は 1U ラックマウント型ユニットを用いることで、計算機システムの小型化を図った。図 4-2-4 に高速演算装置試作機の外観比較を示す。

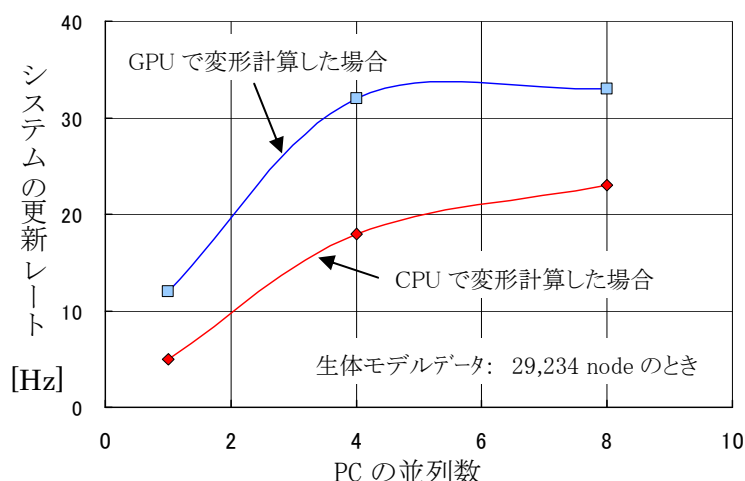


図 4-2-3 高速演算装置第二次試作機におけるシミュレーション更新レート



図 4-2-4 高速演算装置第一次試作機と第二次試作機の比較

① 数値計算の GPU 実装 (画像生成に基づく API から CUDA への移行)

GPU では、画素処理は並列化された専用回路で高速に実行される。これを高次元の数値計算に適用することを試みてきた。このとき、GPU は画像生成専用であるため、画像生成手順に基づく数値計算 API を作成する必要があった。そこで、昨年度 (18 年度) は、(a) 連立一次方程式の共役勾配法による解法を用いた静的解析、及び (b) 時間積分法による FEM の動的解析、を GPU に実装する API の構築を実施し、性能向上を得た。

しかし近年、GPU は画像生成のみでなく、数値計算の実装を考慮し、マルチコア型アーキテクチャへと推移した (CUDA: Compute Unified Device Architecture [NVIDIA 社] 等)。それにともない、本システムにおいても、画像生成に基づく数値計算 API から CUDA への移行を行った。新アーキテクチャ

GPU では、実装が汎用的になった反面、性能を得るには、さらに最適化が必要となった。そこで、マルチスレッドとメモリアクセスの最適化を実施し、時間積分法による FEM の動的解析を用いた生体の変形計算において、画像生成に基づく API の手法と同等の性能を得た。

② 複数臓器の干渉処理（木構造のデータと干渉処理）

上記「セグメンテーション」の項目に示した、複数臓器の接触処理を高速に実施するための、構造化臓器データベース（構造化 DB）の構築にともない、臓器干渉処理の実装を行った。

構造化 DB を用いる主な目的は、衝突の可能性がある臓器の部分空間抽出を、高速に実施することにある。処理手順は、①2 分木のツリー構造を再帰的に辿り、②メタデータ（下位ノード臓器を包含する 6 面体）を用い、節ノード間で接触の可否を判断する。③次に、臓器を包含する 6 面体間において重複する領域を計算し、その空間領域内の臓器表面のみを抽出する。④抽出した臓器表面間で正確な接触判定を行い、接触部の力学計算を行う。⑤最後に、計算結果に基づき、各ノードのメタデータを更新する。

節ノードによる接触判定を行うことで、下位ノードを含有した接触の有無を判断し、効率的に干渉のある臓器の部分領域を抽出することができる。

4-2-3 まとめ・今後の課題

[全体]

セグメンテーションでは生体データモデル生成システムの各機能（画像抽出、有限要素分割）を改良し、人体複合臓器のデータモデルを作成した。今後の課題は①システムの機能向上（GUI の操作性改良、物理定数設定の GUI 化）、②歪補正機能追加及び高精度化、③有限要素分割の詳細度制御機能の高精度化、及び④臓器等を覆っている膜のモデル生成である。

また、複数臓器の接触処理を高速に実施するための臓器データベース構造の構築、及び臓器干渉処理手法の確立を新テーマとして実施した。今後、詳細な接触処理と統合することで、複合臓器のシミュレーションが可能となる。

高速演算処理装置では、第二次試作機を構築し、**29, 234node** のモデルに対し、**33Hz** の更新レートを得た。このとき、GPU への変形計算の実装は、近年の GPU アーキテクチャの変遷に対応し、**CUDA** による実装へと移行した。

図 4-2-3 のグラフによると、PC の並列数が増加することで性能が飽和しているが、これは、ネットワーク負荷が原因であり、特に画像生成のためのデータ転送がネックとなっている。この現象は、画像生成を並列化し、かつ画像合成装置を用いることで、改善することができる。

[調査]

関連学会やシンポジウム、講習会等に参加するとともに、論文を中心とした文献の調査、有識者との面接による技術調査等により、セグメンテーション技術や高速データ処理技術に関して既存技術・研究動向を把握した。

セグメンテーションに関しては、文献及び各種シンポジウム、研究会聴講により他研究機関の各種手法について更なる理解を深めると共に、現在開発中の方式との相違を確認した。画像抽出、四面体メッシュモデル生成の各処理を改良する上での参考とする。

高速演算処理装置に関連しては、並列コンピュータアーキテクチャ、近年のGPU、CPUの技術動向、PCクラスタの動向、及び生体力学シミュレーションの動向について情報収集を行った。

[研究]

セグメンテーションでは生体データモデル生成システムにより試作機で用いる生体データモデル（複合臓器）を作成した。

上記に伴い、画像抽出処理の改良（大容量化、GPU処理を用いた高速化）有限要素分割処理の改良（詳細度制御処理追加）を実施した。及びMRI歪補正プログラムの改良（処理の効率化）も実施した。また、複数臓器の接触処理を高速に実施するための臓器データベース構造の構築、及び臓器干渉処理手法の確立を新テーマとして実施した。

高速演算処理装置に関しては、新アーキテクチャGPUへの変形計算実装し、高速演算装置第二次試作機を構築するとともに、複数臓器の接触処理を高速に処理するための実装を行った。

[開発（システム構築）]

高速演算処理装置に関しては、第二次試作機を構築、ホストコンピュータ、及びGPUはCUDAアーキテクチャ1Uラックマウント型ユニットを用いることで、計算機システムの小型化、高性能化を図った。

[委託研究実施計画（19年度）との対比]

- (1) 生体データとしてのボリュームデータをネットワーク上で共有する手法の開発
(a) 10fps以上でボリュームデータを更新できること

達成した。

GPUを用いた「高速演算装置第二次試作機」の基盤構築を実施した。これにより、システム全体の性能を第一次試作機の約9倍に向上させた。

- (2) ボリュームデータに適合する生体モデル手法の研究開発
(a) シミュレータに必要なデータを保持した生体モデルであること。シミュレーションに必要な弾性率を保持し、実際の生体に近い挙動ができること。

達成した。

有限要素法を用いた変形計算に対応する生体データベースを生成し、実際の生体の挙動を模擬可能とした。また、臓器同士の接触判定を高速に行うため、構造化モデルの構築を行った。

- (3) 実際の生体データからのシミュレータ用ボリュームデータ生成手法の研究開発
(a) 実際のMRI、CTから得られたボリュームデータからシミュレーション用のボリュームデータを生成できること

達成した。

リージョンローイング処理において、スライス画像データをブロックごとに区切ることで大規模なデータからボリュームデータを生成可能とした。

- (b) 一般のユーザがモデルを生成できるような分かりやすいインターフェイスを備えること

達成した。

処理速度を向上させると共に、平易なユーザインターフェイスを作成した。

4-3 生体ボリュームデータに基づくリアルタイム変形手法と触覚提示手法の研究開発

4-3-1 概要

本サブテーマはリアルタイム性を維持しながら、非常に大量なボリュームデータを用いて、変形・切断等のシミュレーションを行う技術の確立が最重要課題である。特に、力覚の生成では、計算更新レートは1kHz程度以上が望ましいと言われており、ハードウェア（高速演算処理装置）とソフトウェア、両面からのアプローチが必要である。ハードウェアに関しては、サブテーマ2で主に扱い、本研究では、シミュレーション計算手法として有限要素法を中心に、ハードウェアアーキテクチャを考慮した手法の研究を進めた。

また、触覚を提示するためのハプティックデバイスとして、対象とする手術で扱う器具・装置に適したデバイスの研究開発が必要であると考え、これまでに培ってきたパラレルリンク型ハプティックデバイスを元に、本研究用に試作した。

さらに、対象となる手術、及び人体のモデル構築として、「腹腔鏡による腎臓（あるいは副腎）摘出術」をターゲットに、手術の手法や手順、操作器具、対象となる臓器の形状・構造・性質等の調査・研究を進めた。

本年度は、H19年2月に行われた中間評価の内容を踏まえ、最終目標達成に向け、第一次試作の改良を中心に第二次試作を行った。また最終年度に予定している共同研究先である横浜市立大学医学部泌尿器科学教室での評価試験を見据えて、実臓器シミュレーションに対応すべく、

- ・多臓器シミュレーション
- ・変形手法の高速化
- ・力覚計算の高速化

に関する研究・開発を実施した。

4-3-2 実施状況

[調査]

以下に示す関連学会やシンポジウム、講習会等に参加するとともに、論文を中心とした文献の調査、有識者との面接による技術調査等により、触覚提示（特に、粘弾性物体の変形に関する手法）技術や、システムに必要なハプティックデバイスのスペックを決定するための既存技術・研究動向等を調査した。

(1) 計測自動制御学会 SI2007

手術シミュレータ、粘弾性物体の変形に関する手法、ハプティックデバイスに用いる新しいアクチュエータ技術等に関する技術動向調査・技術習得を行った。

(2) 横浜国大工学部

膜構造の力学計算、多臓器接触シミュレーション法の検討を行った。

(3) 横浜市大医学部

内視鏡下手術（泌尿器科分野）に関する調査・情報収集等を行った。

(4) Siggraph2007

物理シミュレーション、多点シミュレーションに関する技術動向調査・技術習得を行った。

(5) ICM2007

- 手術シミュレータ、粘弾性物体の変形に関する手法、ハプティックデバイスに用いる新しいアクチュエータ技術等に関する技術動向調査・技術習得を行った。
- (6) VR 医学会第 7 回大会
手術シミュレータ、粘弾性物体の変形に関する手法、ハプティックデバイスに用いる新しいアクチュエータ技術等に関する技術動向調査・技術習得を行った。
- (7) VR 医学会「医療安全研究委員会」研究会
手術シミュレータ、粘弾性物体の変形に関する手法、ハプティックデバイスに用いる新しいアクチュエータ技術等に関する技術動向調査・技術習得を行った。

[研究]

・多臓器シミュレーション

実用的な手術訓練を可能とするためには、多臓器シミュレーションが必要であるため、これを達成するための研究を行った。

現在、多臓器間の力学計算について、方式設計をほぼ終えた。臓器同士の接触問題において、各物体に拘束条件を与えるための接触部位の検出とその条件の与えかたが大きな問題である(図4-3-1)。従来の手法として、直接的にラグランジュ未定乗数法やペナルティ法の適用が挙げられる。ラグランジュ未定乗数法は、解析的に正確な解が得られるが、連立方程式を解かねばならず、実時間処理としては不利である。ペナルティ法は、干渉距離 d を力 F に変換し ($F = \alpha d$: α はペナルティ係数)、拘束条件として与える手法である(図4-3-2)。単純かつ効果的であるが、ペナルティ係数の決定が問題となる。現在、サブテーマ2で実施中の2進木を用いたデータの構造化とペナルティ法を組み合わせることにより、多臓器シミュレーションを実施中である。即ち、二進木により構造化された臓器間の接触判定を粗い近似として、この接触可能性がある臓器間に対してペナルティ法を用いて正確に変形を計算する方向で研究を進めた。

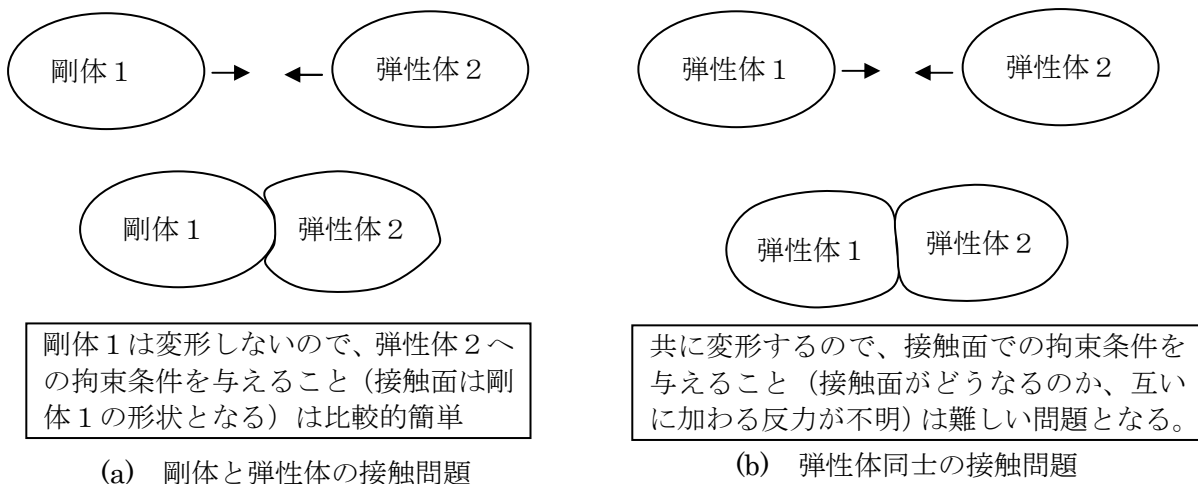


図4-3-1. 多臓器シミュレーションの問題

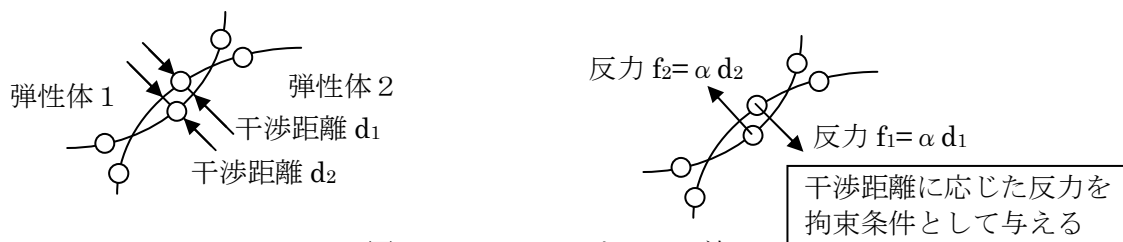


図4-3-2. ペナルティ法

次に、このペナルティ法を取り入れた実装アルゴリズムを構築する。処理負荷の軽い手法、リアリティの高い手法として2手法提案し、検討を行った。

検討手法1. 高速処理の観点からアルゴリズムを構築する。お互いのモデルのノード間距離が閾値以下のときに接触と判定する。閾値が小さいと、自分のノードが相手のノードとノードの間をすり抜けてしまう。また閾値が大きいと、映像上では接触していないのに、接触と判定されるといった映像上との乖離が見られる。

検討手法2. リアル性の観点からアルゴリズムを構築する。上記の様なすり抜けや、映像上との乖離を防ぐために、自分のノードとポリゴンの接触判定を行う手法とする。

これらの手法を単体試験にて確認した。単純な接触判定（ノード間距離計算とノードとポリゴンの接触幾何計算）の処理負荷を比較すると、比べることもなく前者が圧倒的に早い（各判定処理一回に対し0.027 : 0.330[μ s]）。しかし、データを構造化する（バウンディングボリューム、階層構造、空間分割等）ことで処理を効率化しすることができる。また、ノードに表面かどうかのフラグを持たせており、内部との接触判定は排除している。判定処理の効率化するためのデータ構造については、サブテーマ2にてツリー構造の構築を検討している。来年度、これらの成果を統合し、最終試作機へ反映する。

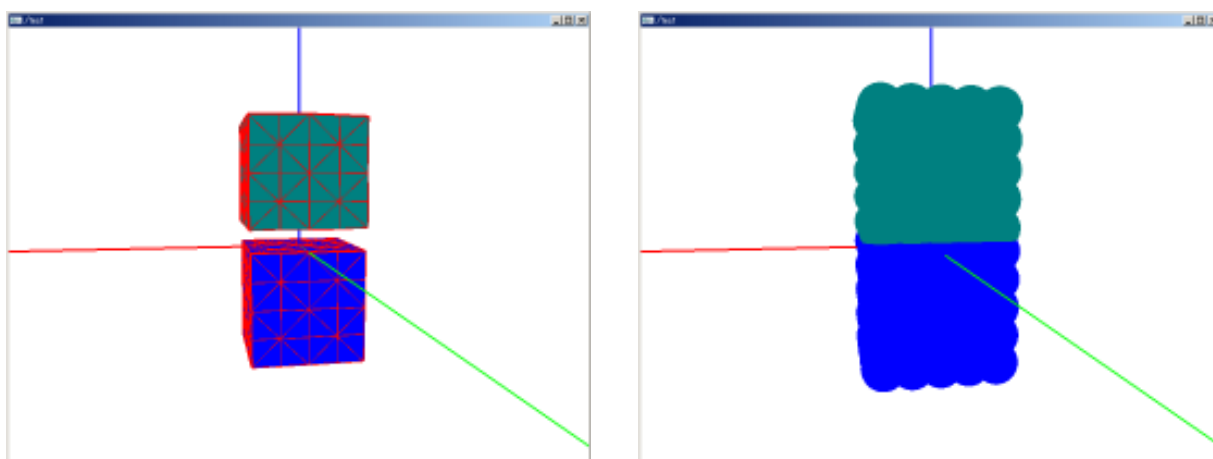


図4-3-3. 多臓器シミュレーションの検討手法1：四角形の物体（模擬臓器）同士が衝突している。ノード間距離により判定するため（右図：接触判定するノード間距離を半径とする球を表示）、実際の映像では少しスキマができてしまう（左図）。

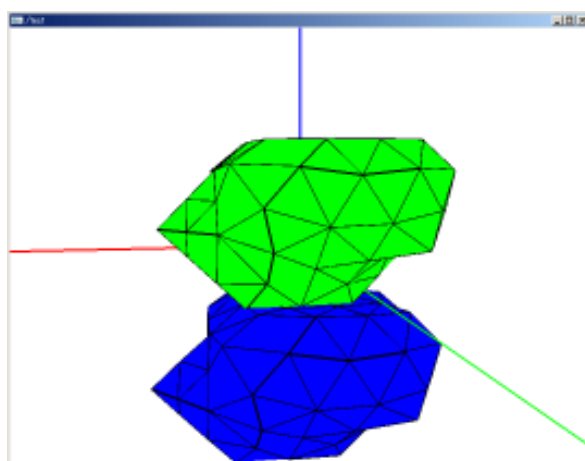


図4-3-4. 多臓器シミュレーションの検討手法2：自分のノードと相手のポリゴンとの接触判定を行っている。図4-3-3に比較して、リアルな表示となっている。

また、簡略した多臓器シミュレーション手法として、多臓器を一つのモデルとする手法が考えられる（図4-3-5）。力学計算としては一つのモデルであり、密着面を介して、ある臓器の変形挙動が他方の臓器の変形挙動へと伝達される。ただし、接触点（臓器同士の密着点）はモデリングの際に決定しているので、変形により、他の部分が接触しても、変形しない問題がある。しかし、処理が単純であるのでシミュレータとしての有効性のトレードオフにより前記処理との併用を目指している。

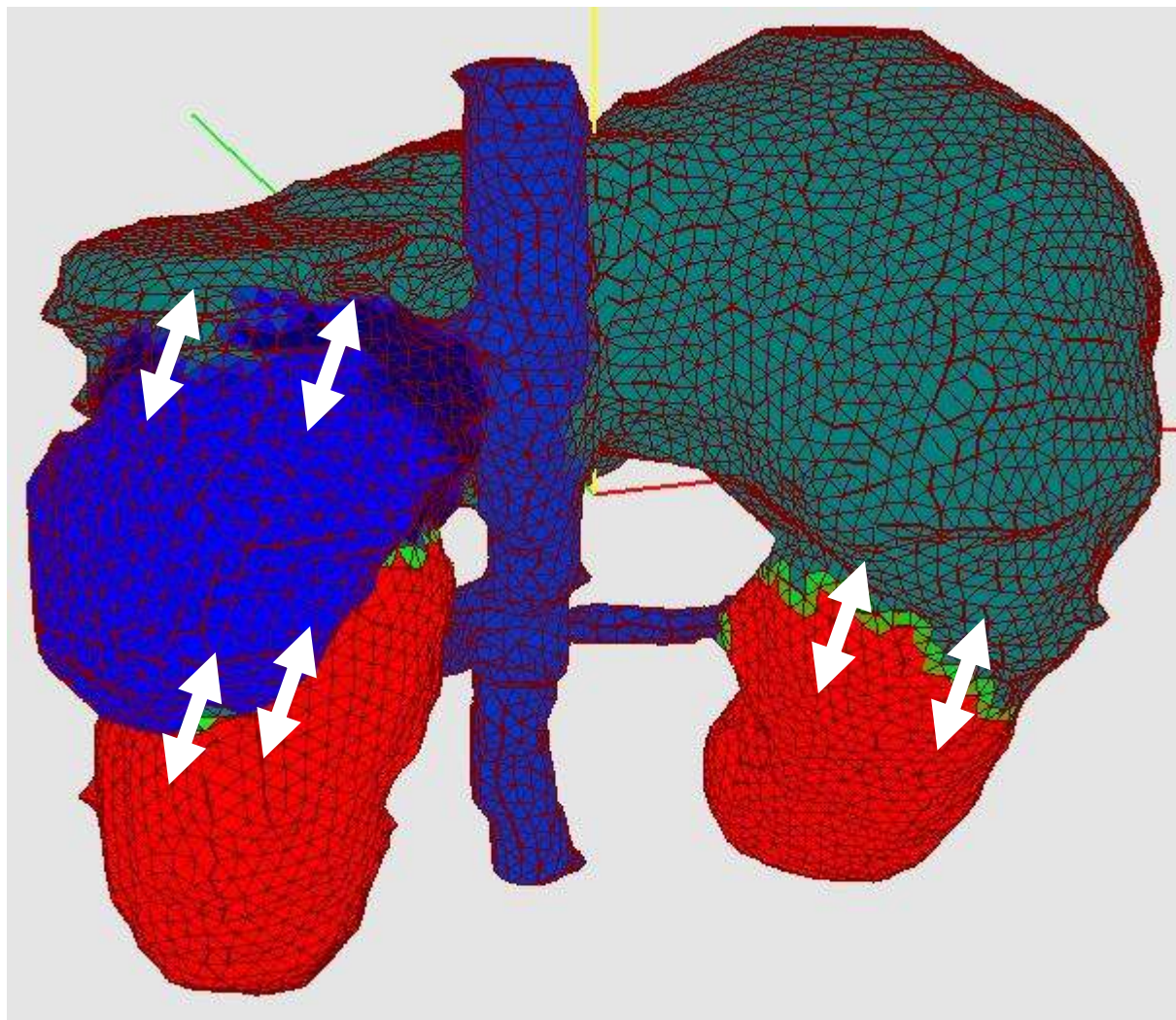


図4-3-5. 多臓器シミュレーション
密着した状態でモデリングしており、接触面を介して（図中矢印）それぞれの挙動が伝達される。

- 変形手法の高速化

サブテーマ2での構造化を組み合わせることにより高速化を図る前記手法と、以下の異なる手法を研究として実施中している。

より滑らかな力覚提示を実現するためには、対象となる臓器（物体）の分割精度を向上する（空間分解能を小さくする）必要がある。本システムにおいて想定している作業空間（臓器を含む腹腔内空間） $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ に対して、手術具先端部の大きさなどから、空間分解能目標値として、 $1\text{-}2\text{mm}$ 程度としている。これに対して、現システムでの空間分解能は $3\text{-}5\text{mm}$ 程度であり、 $2\text{-}3$ 倍の精度向上が必要である。

計算機能力（速度及びメモリ容量等）を考慮した場合、想定している作業空間全

体を高分解能に分割することは難しい。現在、変形計算において用いている「有限要素法」による手法では、前処理として、臓器の表面(術具や他の臓器と干渉するところ)や構造が複雑な部分を細かく、臓器内部や均質で一様な部分などを粗く分割することで「階層化」を行う方法が広く行われており、本システムにも導入している。しかしながら、本システムのように、接触・把持の部位が不特定であり、また切断や縫合等により状況が刻一刻と変化するシステムにおいては、模擬手術訓練中に実際に術具が臓器に触れている部分は細かく、そこから十分に離れた部分は粗く分割する、「動的な階層化」手法が有効と考える。本方式を高速に行うためには、各ノード間の結合情報が明確にかつ規則的になっている必要がある。その一つの方法として、規則格子を変形させて臓器に当てはめる手法の方式設計を行っている。

本方式は、図4-3-6(1)-(3)に示すように、規則格子(立方格子)を徐々に変形させて対象となる臓器(物体)の形状に一致させた後、立方格子(各立方体)をメッシュ(5個の四面体要素)に分割して有限要素法を適用するものである。

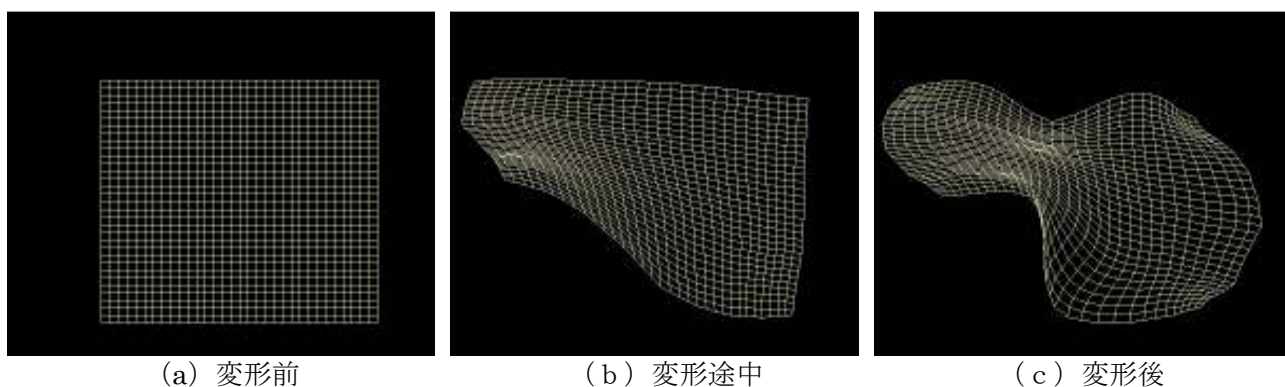


図4-3-6 2次元規則格子の変形(手動操作)

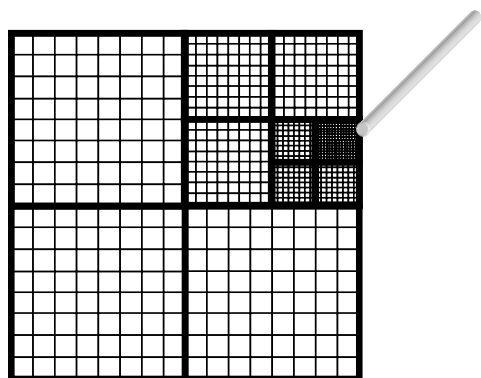


図4-3-7 2次元での階層化ノード

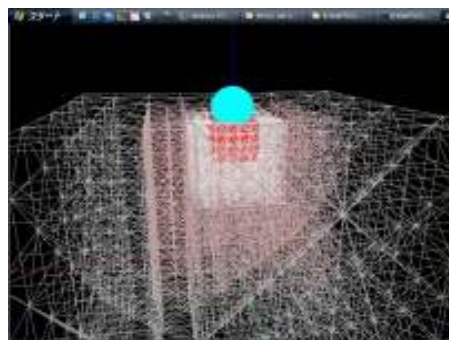


図4-3-8 3次元での変形シミュレーション

また、階層化は図4-3-7に示すように、(実際は3次元であるが、簡単のため2次元で描いている。)2分割4階層、各階層は更に16分割することを想定している。この場合、最も細かいノードは、 $1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/16 = 1/128$ となり、想定している作業空間では、約1mmの分解能となる。

一方、各階層のノード数は、 $(16+1)^3 = 4913$ ノード、四面体要素数は約25000となり、現状の計算能力でも十分に可能な数値である。

変形計算高速化のための階層化手法の基礎実験として3次元正方格子を4階層(図4-3-8)に階層化した場合の実験結果を表4-3-1に示す。なお、この際に使用した実験システムは、図4-3-9に示すように、ホスト計算機としてXeon3.2GHz Quadタイプのインテル社製CPUを用い、各階層の計算を並列に行っ

表 4-3-1 変形シミュレーション実験

項目	設定及び結果
格子形状	正方格子
階層数	4
分割ノード数	9 × 9 × 9 (各階層とも)
更新レート	約 40Hz

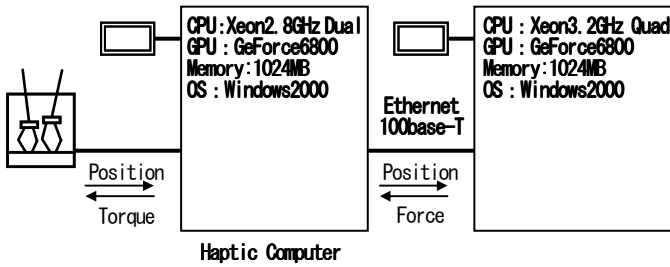


図 4-3-9 実験システムの構成

た。この結果、約 40Hz の更新レートで計算を行えることを確認した。

今後、3次元でのモデル変形と、第2次試作機での実験を経て、実臓器への適用の実現性を確認する。

・力覚計算の高速化

滑らかな力覚を得るには、一般的に 1 kHz 程度の更新レートが必要とされている。現システムにおいては、変形計算の更新並びに転送レート数 10Hz に対し、力覚計算部において力覚指令値にフィルタリング処理により平滑化することで、1kHz での力覚更新を行っている。

しかしながら、フィルタリング処理は「時間遅れ」を伴うため、触覚提示精度の更なる向上のためには、これに変わる手法が必要となる。

変形計算の更新並びに変形計算部と力覚提示部のデータ転送レートはそれぞれ数 10Hz となっており、力覚計算 1kHz に対して、数 10 分の 1 の更新レートである。補間手法としては、フィルタの挿入、予測制御手法の導入、力覚計算側でローカルに力を生成し変形処理の出力と合成する方法、などが考えられる。このうち、他システムでも実績があり、比較的容易に実装が可能な「ローカル生成手法」に関し、方式検討を行った。

この方式は、数 10Hz で計算される変形情報を基に、力覚計算側で手術具近傍の（接触が予想される）面を仮定し、1kHz で更新される手術具位置情報から接触の判定と力覚の計算を行う方式である(図 4-3-10)。この術具近傍にある物体(臓

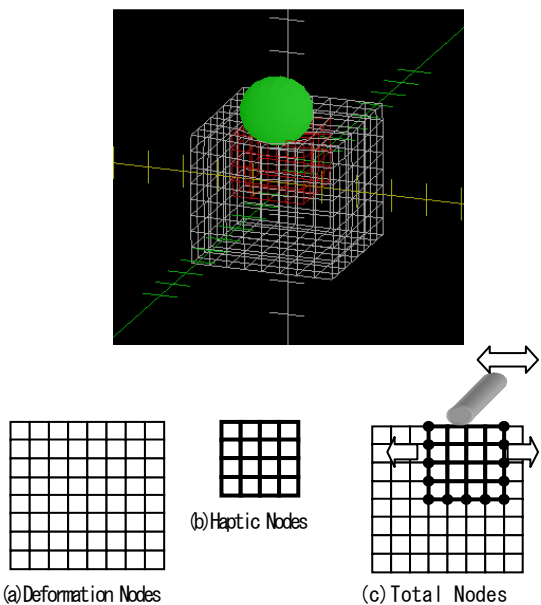


図 4-3-10 変形ノードと力覚ノード

表 4-3-2 力覚計算高速化実験の設定値

Item	Deformation	Haptic
Model Nodes	9 × 9 × 9	5 × 5 × 5
Total Size[mm]	40	20
Cell Size[mm]	5	5
Up-date Rates[Hz]	≒ 30Hz	1000Hz
Young's Modulus[Pa]	50000	
Poisson Ratio	0.48	
Mass(each nodes)[g]	100	
Dumping[N/m/sec]	5	
Diameter of device[mm]	10	
Amplitude(p-p) [mm]	4	
Frequency[Hz]	1	

器)の一部領域にのみ有限要素法を適用することで、計算能力の低い力覚計算機でも、1kHzの更新レートでより精度の高い力覚計算を行うことが可能である。

現在、多臓器間の力学計算について、方式設計を終えた。

図4-3-9と同じ実験システムにより、ロー・パス・フィルタを用いる従来手法と本手法の比較実験を行った(表4-3-2に実験の際の設定を示す。)。対象となる物体は、40mm×40mm×40mmの立方体で、各軸とも9×9×9の正方格子に分割されている(従って一つの格子は5mm×5mm×5mmの立法体となる)。一方、力覚シミュレーション領域は5×5×5の領域であり、模擬術具の動きに合わせて中心位置が移動する。なお模擬術具の動きとして、実際にハプティックデバイスを使わずに、ハプティックPC側でサイン波形状に動かした場合と、実際にハプティックデバイスを用いた場合のデータを取得した。図4-3-11に従来手法(変形・力覚シミュレーション+ローパスフィルタ)による結果を、図4-3-12に本手法(変形シミュレーションと力覚シミュレーションの分離)による結果を示す。これらの結果から、以下のことがわかった。

- ① 最大力出力値のばらつきの低下(図中①の部分)
- ② 出力不安定及び、はね返り現象の解消(図中②の部分)

今後、変形計算の高速化と同様に、3次元でのモデル変形と、第2次試作機での実験を経て、実臓器への適用を行っていく予定である。

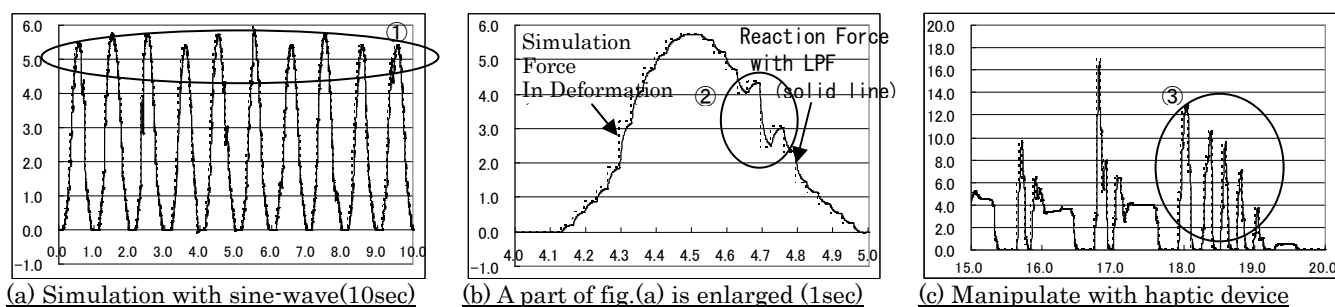


図4-3-11 従来手法(変形・力覚シミュレーション+ローパスフィルタ)による結果

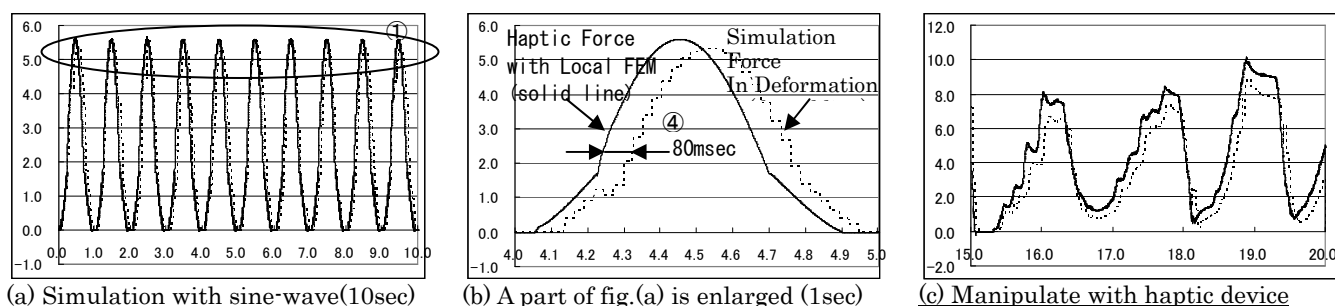


図4-3-12 本手法(変形シミュレーションと力覚シミュレーションの分離)による結果

[開発 (システム構築)]

・ 第二次試作

① 模擬手術具部ハードウェア (メカニカル部分) の改修

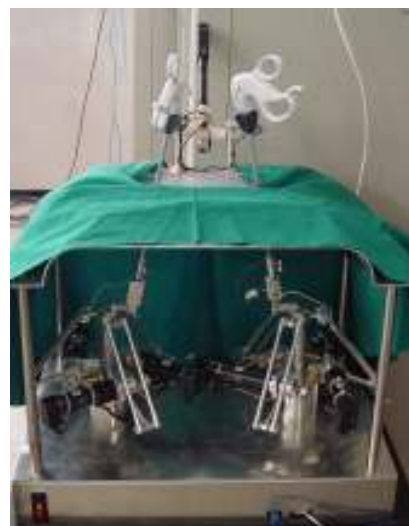
ソフトウェアにより力覚精度の向上が図られても、「機械系のガタ」等が大きいと滑らかな触覚を得ることが出来ない。第一次試作で作成した模擬手術具部においても数 mm 程度の「ガタ」が存在しており、触覚提示精度低下の原因となっていたため改修を行った。また併せて、実際の手術環境に近づけるために、模擬手術具と模擬内視鏡の位置、模擬手術具を挿入するポート部分の改良等を行い、当初の目的を達成した。来年度予定の横浜市大医学部での評価試験において最終的な検証を行う。

② (廉価版) 模擬手術具部の製作

製品化には、各装置の低価格が必要である。このため、既存の、高精度模擬術具の他に、比較的精度の低い用途向けに模擬術具の開発を進めている。そのため、米国 Sensable 社の PHANTOM Omni を用いた廉価版の模擬術具部を製作した。これにより、模擬術具部のコストを 1/2 程度に引き下げられる目途が立った。力覚出力が小さい等の問題があるが、来年度詳細な評価試験を行い、完成度を上げる予定である。



(a) 比較的低精度模擬術具



(b) 高精度模擬術具 (既開発)

図 4-3-13. 模擬手術具部

4-3-3 まとめ・今後の課題

[全体]

前年度の研究結果をさらに発展させ、並列化による大規模シミュレーションを実現した。さらに、手術シミュレータとして必要な、切断模擬について研究を進めた。これらの成果を手術シミュレータ第二次試作機に実装し、その有効性及び中間目標を達成したことを確認した。現システムは単一臓器のシミュレーションであるが、リアリティ向上のために、本年度は多臓器シミュレーション手法についての研究を行った。また、触覚提示手法においては、滑らかな触覚提示を行うために、変形手法、力覚計算の高速化について研究を行った。この結果、最終目標(20年度)に対し、以下の結論を得た。

・サブテーマ3-(1)-(a)

中間検査で確認いただいたように既に目標の「10fps以上」を達成しているが、今年度は更なる高速化と「多臓器」への拡張に関する研究開発を行い、提案手法が有効であることを確認した。

・サブテーマ3-(2)-(a),(b)

ボリューム間を滑らかに結ぶ触覚提示するために、模擬手術具部ハードウェア(メカニカル部分)の改修と「ローカル生成手法」の基礎研究を実施した。ハードウェアの改修では、「機械的ガタ」が減少し、目標であったより滑らかな力覚を提示できることを確認した。また「ローカル生成手法」に関しては、単純形状での基礎実験において、1kHzでの動作確認を行いその有効性が実証された。最終年度では、この成果を実シミュレーションに適用し、評価を行う。

来年度は、これらの研究成果を試作機に統合し、最終目標の達成を確認すると共に、手術シミュレータとしての評価を行う予定である。

[調査]

関連学会やシンポジウム、講習会等に参加するとともに、論文を中心とした文献の調査、有識者との面接による技術調査等により、手術シミュレータ、触覚提示(特に、粘弾性物体の変形に関する手法)技術や、内視鏡下手術(特に泌尿器科領域)等に関する、技術・研究動向等を調査することが出来た。

[研究]

多臓器シミュレーションの方式検討を行った。単体試験を行い、方式を固めつつある。今後は、試作機へ反映し、製品として仕上げていく。

滑らかな力覚提示を実現するために変形手法の高速化について研究を行った。

[開発(システム構築)]

多臓器シミュレーションを可能なように構造化モデルデータおよびその処理を実装して手術シミュレータ第二次試作機に実装した。

ハプティックデバイスの改良し、実際の手術装置に近づけた。

製品価格の引き下げのため、廉価版の模擬術具部の試作機を製作した。

[委託研究実施計画（19年度）との対比]

(1) 手術シミュレータ用モデルとして利用できる、リアルタイムボリュームデータの変形手法の研究開発

(a) 10fps以上の頻度で、データ形状の更新が可能であること。

達成した。

切断、クリップ部分固定、複数臓器制御を含め 10fpsの更新レートを得た。

(2) ボリュームに基づく触覚提示手法

(a) ボリューム間を滑らかに結ぶ触覚を提示できること。

達成した。

ハードウェアの改修により、「機械的ガタ」が減少し、滑らかな力覚を提示できることを確認した。

(b) 力覚の更新レートは1KHz以上であること。

達成した。

単純形状での基礎実験において、1kHzでの動作確認を行いその有効性が実証された。

4-4 総括

具体的な大きな成果として、各サブテーマ（3テーマ）の研究成果を融合して「手術シミュレータの基本構成要素技術」を確認する第二次試作（H19年度分）を実施した（図4-4-1）。これは、製品化時の手術シミュレータを構築するための基盤技術となる、(1)生体データ作成装置（構造化モデルの作成機能）、(2)手術シミュレータ本体（高速演算装置+力学計算モデル+変形表示+力覚装置）からなる。

今回、モデルデータを構造化する機能を開発したことにより、人体模擬領域の構造化モデルの取り扱いが可能となり、臨場感の高い手術環境を作り出す一連の工学的基礎技術が確立(多臓器シミュレーション)できた。この構造化により手術シミュレータ構成上の大きな技術課題であった臓器間のすり抜け等の問題が解決したことは大きな成果である。この技術は手術シミュレータに限らず、VRにおける映像と力学計算の不一致（即ち、映像としてあるものが、お互いの間を反発力なくすり抜ける現象）の一つの解であり、他のVRアプリケーションに適用可能である。

この基盤技術上に、対象手術の手順や勘所などの手術訓練に必要な医師のノウハウをシナリオとして取り入れることができる。

来期から共同研究先の医師の指導を受けながら、手術のノウハウをシナリオとして実装することにより（手術シナリオの実装により二次試作が完了）、実用的な手術シミュレータへ逐次改良・発展させて行く。

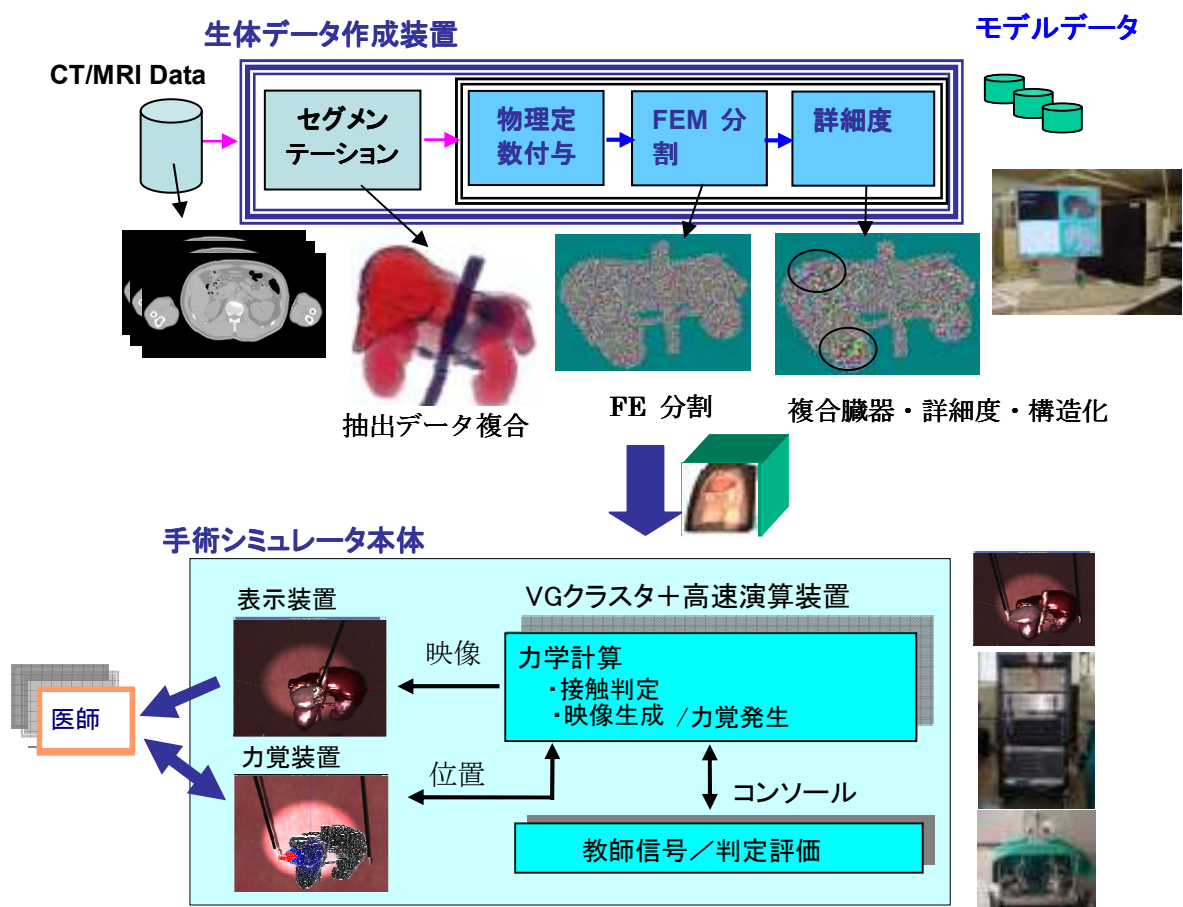
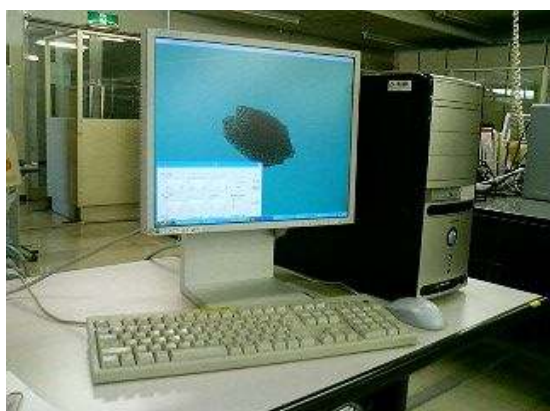


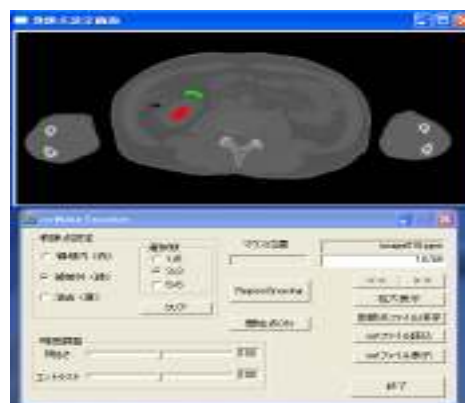
図4-4-1. 研究開発の成果

図4-4-2に、研究開発の成果である試作した手術シミュレータの概観を示す。図4-4-2(a)、(b)に生体データ作成装置の外観を示す。この装置はモデルデータの作成に使用するものであり、H19年度の成果としては、臓器間の力学計算を正しく行うための構造化モデルデータの作成が可能となった点がある。

また、図4-4-2(c)(d)に手術シミュレータ本体の外観を示す。手術シミュレータ本体は、計算装置(VG クラスタ+高速演算装置)と模擬術具から構成される。高速演算装置二次試作機の開発により、装置がコンパクトになったことと、上記構造化モデルデータの実時間処理が可能となった。



(a) 生体データ作成装置 (構造化)



(b) 生体データ作成装置 (操作画面)



(c) 手術シミュレータ本体 (装置全景)
(VG クラスタ+高速演算装置)



(d) 手術シミュレータ本体 (操作)

図4-4-2. 第二次試作の成果物 (生体データ作成装置および手術シミュレータ本体)

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

1. 菊川、長坂、高波、本郷、寺田、緒方、“生体モデルデータに基づくリアルタイム手術シミュレータ”、生体力学シンポジウム、理化学研究所、2008年3月
2. 本郷、“手術シミュレータにおける可視化の並列化”、第7回PCクラスタシンポジウム、PCクラスタコンソーシアム、2007年12月
3. 長坂、菊川、本郷、高波、緒方、“高速演算装置を用いた手術シミュレータのための臓器変形手法の研究”、第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、計測自動制御学会、2007年12月
4. 寺田、長坂、菊川、本郷、高波、緒方、“規則格子を用いた臓器モデリング手法の検討”、第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、計測自動制御学会、2007年12月
5. 三菱プレジジョン、理化学研究所、横浜市立大学、“教育訓練用装置の開発ー手術の感覚再現ー”、日経産業新聞、2007年10月19日
6. 緒方、“生体ボリュームデータに基づくネットワーク型VR手術手技教育訓練システムの研究成果展示”、CEATEC JAPN2007、2007年10月
7. 長坂、“手術シミュレータにおける臓器変形手法の並列計算”、PCクラスタワークショップ、PCクラスタコンソーシアム、2007年9月
8. M. Nagasaka, K. Takanami, S. Hongo, T. Terada, T. Kikukawa, M. Ogata, "A Real-Time Deformation Model using Patients-Specific Medical Data", ACM SIGGRAPH 2007 Poster, Aug. 2007
9. 菊川、長坂、緒方、“実時間物理シミュレーション” Visual Computing/グラフィックスとCAD合同シンポジウム、画像電子学会・情報処理学会、2007年6月
10. T. Terada, M. Ogata, T. Kikukawa, S. Hongo, M. Nagasaka, T. Takanami, K. Kajihara, "Virtual Human Body using Haptic Devices for Endoscopic Surgery Training Simulator", IEEE International conference on mechanics, May. 2007.