

平成18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19年4月

情報通信研究機構

平成18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	12
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	13
4-2-1	概要	13
4-2-2	実施状況	13
4-2-3	まとめ・今後の課題	16
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	18
4-3-1	概要	18
4-3-2	実施状況	18
4-3-3	まとめ・今後の課題	21
4-4	総括	21
5	参考資料・参考文献	24
5-1	研究発表・講演等一覧	24

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。

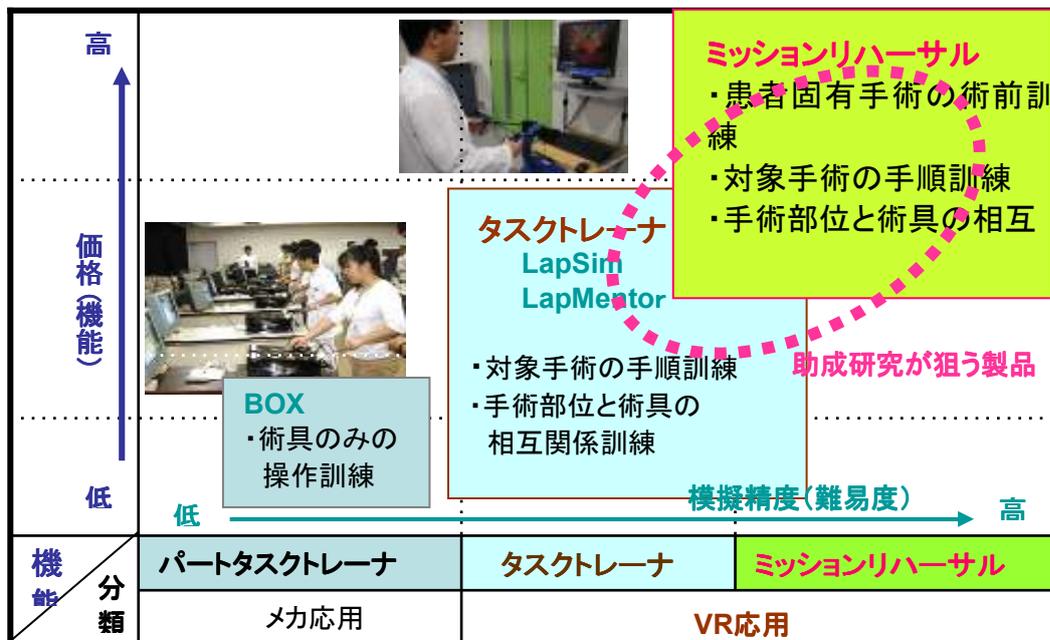


図 1 - 1 . 委託研究が目標とする分野

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一次試作ができ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）

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	主に、労務費	
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			→					
(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」					→			
(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			→		→			
								主に、労務費

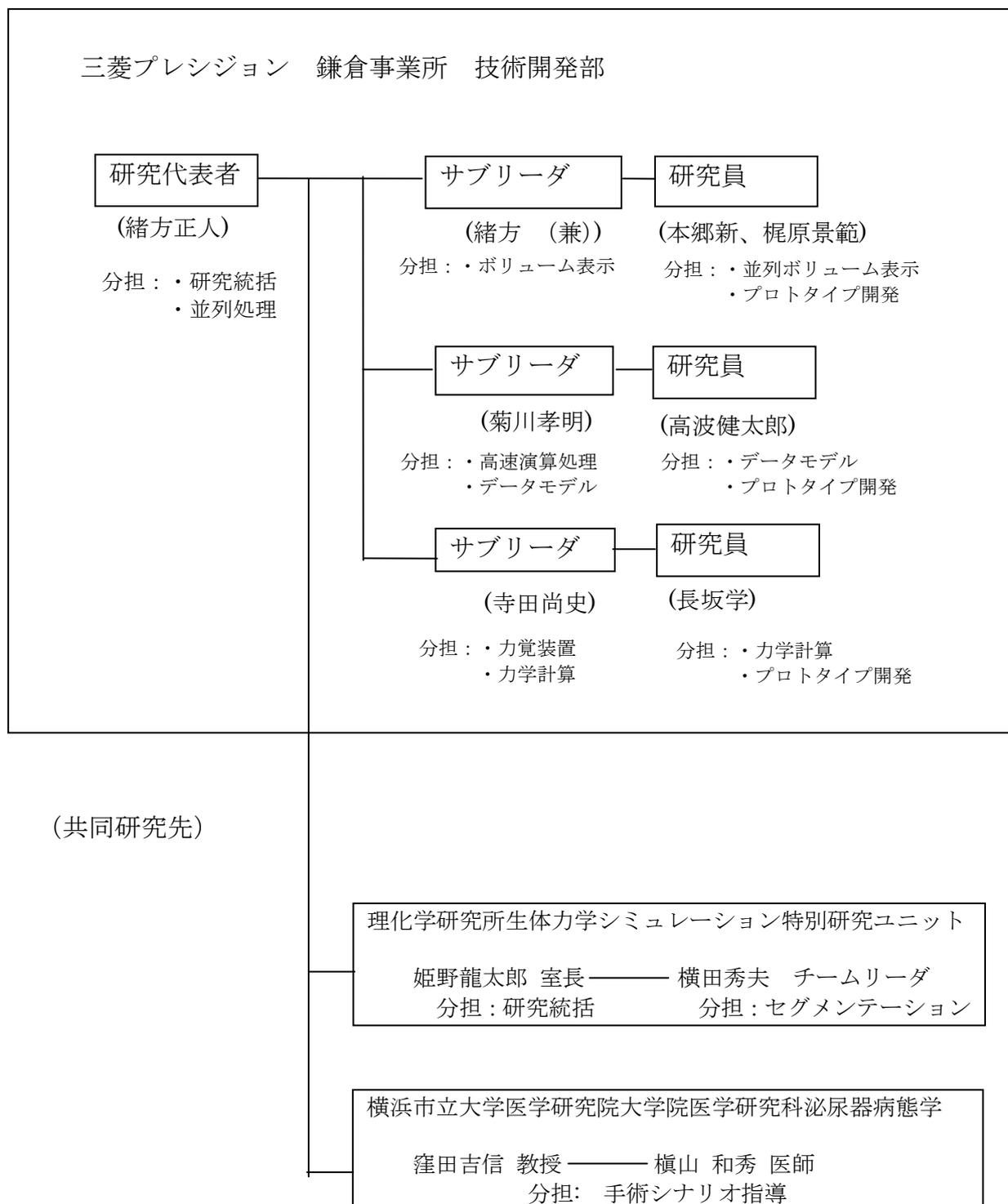
研究開発項目	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	計	備考
サブテーマ3 「生体ボリュームデータに基づくリアルタイム変 形手法と触覚提示手法の研究開発」					→		主に、労務費
(1)手術シミュレータ用モデルとして利用できる、リ アルタイムボリュームデータの変形手法			→				
(2) ボリュームに基づく触覚提示手法					→		
プロトタイプ機の試作・評価					→		主に、購入設備費、及び装 置改良費
①第一次試作		→					
②第二次試作（評価・改良を含む）					→		
間接経費額（税込み）							
合 計							

- 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、可視化技術等に関する、既存技術・研究動向等を調査した。

(1) PC クラスタコンソーシアム開発部会、および PC クラスタシンポジウム

本会の構成メンバーとして 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) 第 5 回 VizLab オープンセミナー

可視化技術の先端的研究の調査のため、VizLab オープンセミナーに出席した。大規模シミュレーションに関する可視化技術、クラスタリングやスケーラビリティについて具体的な発表があり、大いに参考になった。

(3) Cell プログラミング実践講座

描画プログラムの並列化・高速処理に関する調査・情報収集を行った。

(4) 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継続的に聴講した。

[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。平成 18 年度はボリュームレンダリングを並列化することで、大容量ボリュームデータを高速にレンダリングする手法の研究開発を行った。また、ポリゴンにより内部構造を表現する手法について研究を行った。

[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。また、内視鏡による視点の移動・回転に対応し、より実際の内視鏡下手術を想定できる模擬環境を構築した。描画品質を高めるため、術具のモデリング、テクスチャの自動付与、リアルタイムでのライティング・シェーディング等の機能を実現した。

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】

ポリゴンを使用しボリュームデータを描画することで、60Hzでの更新レートを確保することができた。また、並列描画を実施し、ボリュームデータの大容量化にスケラブルに対応することが可能となった。

【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、実際の模擬環境に近づけるために、出血状態の表示、電気メスを使用した際の煙・切断痕などの描画、モデル表面の凹凸表現（バンプマッピング）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。

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。生体データの修得法に関して討論および教授を受けた。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。

(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

高速演算装置開発に関連し、並列コンピューティング、Cell プロセッサ及び最新のGPU (Graphics Processing Unit) に関する調査を行った。

(5) 第6回PCクラスタシンポジウム

高速演算装置開発に関連して調査を実施した。PCクラスタは、ハイパフォーマンスコンピュータとして研究施設を中心に大規模システムが稼動しており、産業界に導入されつつある。

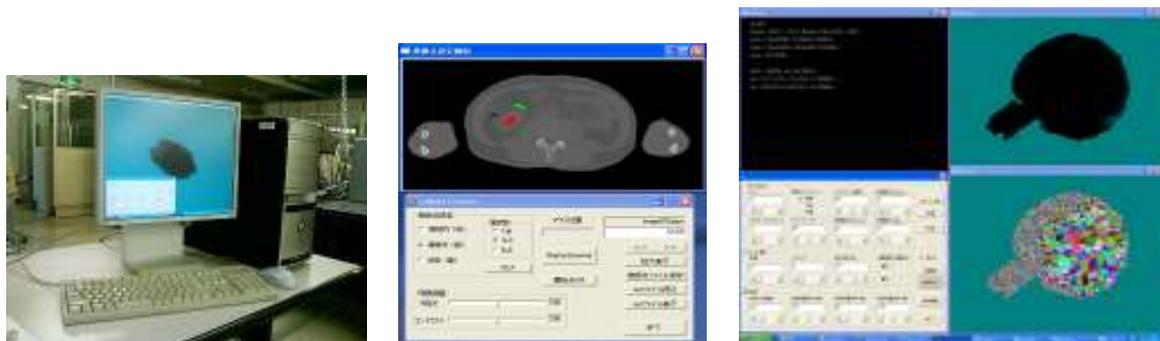
(6) 九州大学内視鏡外科手術トレーニングセンター

LapSim などの他社製品調査及びトレーニング内容調査のため訪問した。センターには 3 台の VR シミュレータが設置されており、実際に使用してみることで現在の当社の試作機との比較を行なった。

[研究]

(1) セグメンテーション

前年度、適用を決定した抽出手法：適応型リージョンローイングによるセグメンテーションプログラム及びボクセルデータの有限要素分割プログラムによる生体データモデル生成システムを構築した。このシステムは PC1 台で構成している。(図 4-2-1)



(a) システム外観

(b) セグメンテーション

(c) 有限要素分割

図 4-2-1 生体データモデル生成システム

画像抽出プログラムにおいて、メインの適応的リージョンローイング処理部分を従来のアルゴリズムより 50%程度高速化した。更なる高速化及びデータの大容量化に対応した改良を現在取り組んでいる。また、有限要素分割プログラムにおいては任意の形状のボリュームデータを分割可能に改良し、更に部位毎に要素の詳細度が変更可能なことを確認した。現在詳細度分割の制御機能を付加すべく改良中である。

このシステムを用いて、実際の CT 画像データより腎臓部位を抽出、ボリュームデータ化した後、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 4-2-2) ボリュームデータ構築に当たっては抽出画像を手動で修正している。



(a) ボリュームデータ

(b) 有限要素分割データ

図 4-2-2 生体データモデル (腎臓及び尿管部)

現在、腎臓周辺部の他組織を抽出、より実際の人体内部に近いデータモデルの構築を図っている。また、モデル生成の際、MRI 画像データには撮像装置由来の画像歪が生じていることを受けて、アフィン変換若しくは射影変換を用いて歪補正を行なう画像変換プログラムを作成した。

(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 プロセッサに比較し、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目的とし、17 年度に作成した GPU の「汎用計算実装 API」を実装、さらに最適化を施し、約 2 倍の高速化（同一 GPU での比較であり、CPU との比較では約 10 倍を達成）を達成した。さらに、GPU による演算装置の構築により、ネットワーク負荷の軽減、演算性能の向上を実施し、各 PC に 1 GPU を実装した GPU クラスタ（手術シミュレータ第一次試作機）を構築し、4,771 ノード (22,324 要素) のモデルに対し、22Hz の更新レートを得、H18 年度目標性能を達成した。

図 4-2-3 に手術シミュレータ第一次試作における高速演算装置概観を示す。

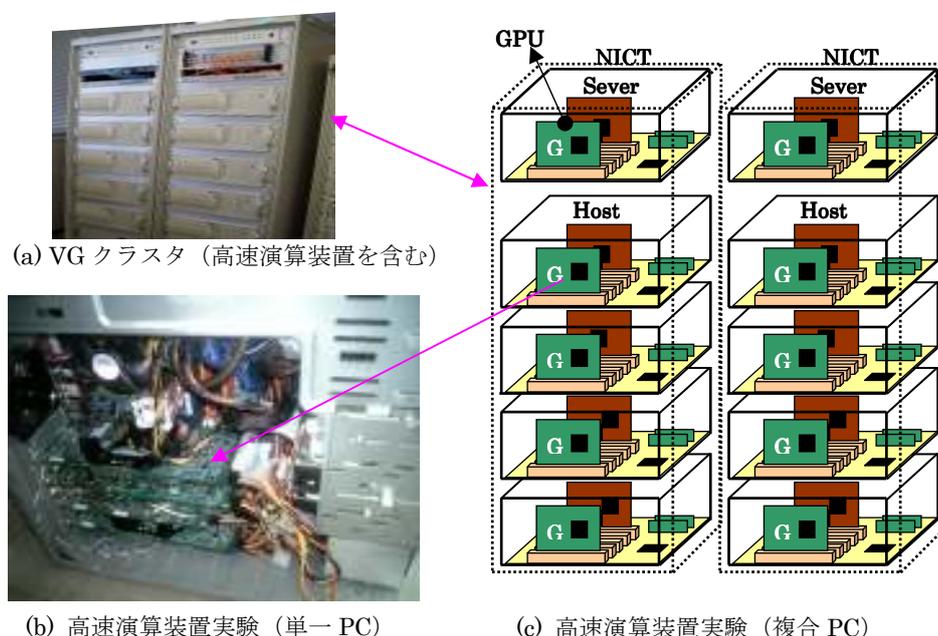


図 4-2-3 高速演算装置 (GPU の計算への利用)

高速演算装置に関する、主な実施内容の詳細を以下に示す。

① GPU 実装最適化 (汎用計算実装用 API の開発)

GPU は画像発生専用のデバイスであり、画素処理は並列化された専用回路で高速に実行される。そこで、画像の各画素にベクトルの要素を対応させることで、高次元のベクトル計算を高速に実施可能である。しかし、画素処理回路間でのデータの受け渡しができないため、ベクトル要素の総和を計算する処理には時間がかかる。これは、ベクトルの内積、及び行列×ベクトルの計算性能に影響する。

今回、ベクトルの内積計算、行列×ベクトル計算の高速化を考慮した、行列要素のメモリ格納機能と、計算出力のフィードバック機構を GPU への汎用計算実装用 API に追加した。これにより、同一環境で、17 年度性能検証結果の約 2 倍の性能を得た。

② 変形シミュレーション計算モデルの実装と性能評価

生体の変形シミュレーション計算，ここでは(a)連立一次方程式の共役勾配法による静的構造解析，及び(b)ルンゲ・クッタ・ギル法による動的構造解析を、上記 API を用いて GPU に実装し、パフォーマンス評価を行った（手術シミュレータ第一次試作機では、生体の変形計算モデルにルンゲ・クッタ・ギル法による動的構造解析を適用している）。処理時間測定結果を図 4-2-4 に示す。変形シミュレーション対象の次元が低い場合は CPU が優位であるが、3K 次元付近で GPU が逆転し、次元が高い領域（100K 次元付近）では GPU が CPU に比較して、(a) (b) 共に約 10 倍の性能が得られた。但し、これは単体 PC での検証であり、手術シミュレータ第一次試作機には現在反映していない。

③ マルチ GPU 制御

演算性能を得るため、PC に複数 GPU を装着し、並列に制御する手法を検討し、機能確認を行った。OS:Linux、GPU の API:OpenGL の環境では、マルチプロセスを起動し、それぞれのプロセスの初期化処理において異なる GPU を指定することで、複数 GPU を並列に動作させることが可能となった。これにより、画像生成、変形シミュレーション、干渉判定等の計算を GPU に実装し、並列処理を実施する基盤が得られた。但し、これは、単体 PC での検証であり、手術シミュレータ第一次試作機には現在反映していない。

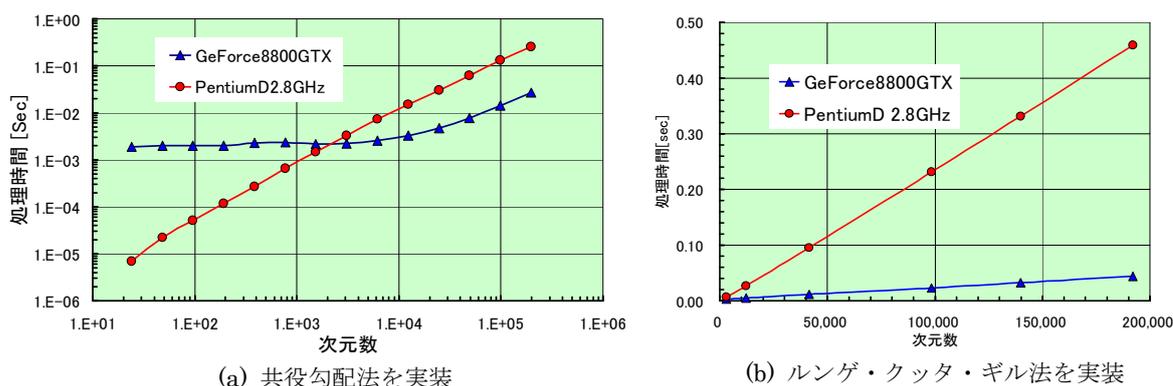


図 4-2-4 変形シミュレーション計算実行時の問題の次元数と処理時間の関係 GPU と CPU を比較

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を構築し、実際に試作機で用いる生体データモデルを作成した。これにより実際の人体データよりの手術シミュレータ用データモデル生成が可能になった。

今後の課題はシステムの機能向上（物理定数付加等の GUI 改良、扱うデータの大容量化）、データの歪補正機能追加、及び有限要素分割の詳細度制御機能追加である。

高速演算処理装置では、1 GPU を実装した PC による GPU クラスタ（手術シミュレータ第一次試作機）を構築し、22,324 要素のモデルに対し、22Hz の更新レートを得、H18 年度目標性能を達成した。また、単体 PC により、変形シミュレーション計算の実装と性能評価を行い CPU に比較し、約 10 倍の性能を得た。そして、複数 GPU の並列制御手法を確立した。

今後の課題は、GPU による変形シミュレーションの更なる高速化、及びマルチ GPU 制御の手術シミュレータ試作機への適用である。

[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、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。また、今後生体データモデル生成システムに複数の抽出手法を導入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、FPGA、Cellプロセッサの技術動向、PCクラスタの動向の情報収集を行った。

[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を構築するとともに試作機で用いる生体データモデル（腎臓）を作成した。

システム内の有限要素分割プログラムにおいては任意の形状のボリュームデータを分割可能に改良し、更に部位毎に詳細度を変えて有限要素分割が行なえることを確認した。また、より正確なデータモデル生成のためMRIデータに生じる画像歪の補正プログラムを作成した。この補正プログラムは上記システムに組み込み予定である。

高速演算処理装置に関しては、手術シミュレータ第一次試作機を構築するとともに、単体PC実験において、更に高い性能を得るための計算実装手法、並列化手法を確立した。

[開発（システム構築）]

1 GPUを実装したPCによるGPUクラスタ（手術シミュレータ第一次試作機）を構築した。さらに、マザーボード、CPU、GPU、電源、を換装し、手術シミュレータ第二次試作機のための基盤構築を行った。

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、研究開発期間の中間評価年度であり、各サブテーマの成果を統合した手術シミュレータ第一次試作を行った。この第一次試作により、本テーマの中間目標が達成できたことを確認した。

<中間目標>

- (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。

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、粘弾性物体の変形と切断に関する手法）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 SI2006

手術シミュレータ、粘弾性物体の変形と切断に関する手法、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

有限要素法および並列処理に関する調査・研究を行った。

(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) Cellプログラミング実践講座

変形手法の並列化・高速処理に関する調査・情報収集を行った。

[研究]

前年度の研究成果から、リアルタイム変形手法として、線形有限要素法に動的変形を加味したモデルを、ルンゲ・クッタ・ギル法による数値積分を用いて処理する

手法を採用した。今年度の研究では、大規模なモデルに対応するために、処理の高速化を行った。高速化の実現法として、PCクラスタ技術による並列処理化を検討した。並列処理化は、“アルゴリズムの分割”アプローチも考えられるが、直感的にわかりやすい“モデルの分割”アプローチを行う。図4-3-1のようにモデルを分割し、各PCにそれぞれ分割した部分モデルについて、変形計算処理させる。このとき、部分モデルの分割面においてはオーバラップした共有要素を持つこととする。共有要素について、互いのデータを交換することで、部分モデル間のインタラクションが実現する。

また、手術手技の追加として、臓器の切断手法について研究を行った。一般的に、モデルの切断を想定する場合、モデルのトポロジが変化するため、有限要素法における剛性マトリクスを再計算が必要となる。しかし、一般的に剛性マトリクスを再計算する場合、処理に時間がかかるため、実時間シミュレーションを行うことは困難である。そこで、元の有限要素から、切断箇所の微小要素を削除する方法を考案した。元の剛性マトリクスを \mathbf{K} 、切断後の剛性マトリクスを \mathbf{K}_{new} 、切断箇所の微小要素の剛性マトリクスを \mathbf{K}_{local} とすると、

$$\mathbf{K}_{new} = \mathbf{K} - \mathbf{K}_{local}$$

である。既知の微小要素 \mathbf{K}_{local} を取り除くだけなので、比較的処理は速く、また、任意の箇所を切断することができる。ただし、デメリットとして、要素を消失することが挙げられる。そのため、ある程度の詳細なモデルが必要となり、このことから高速処理の必要性が高まる。

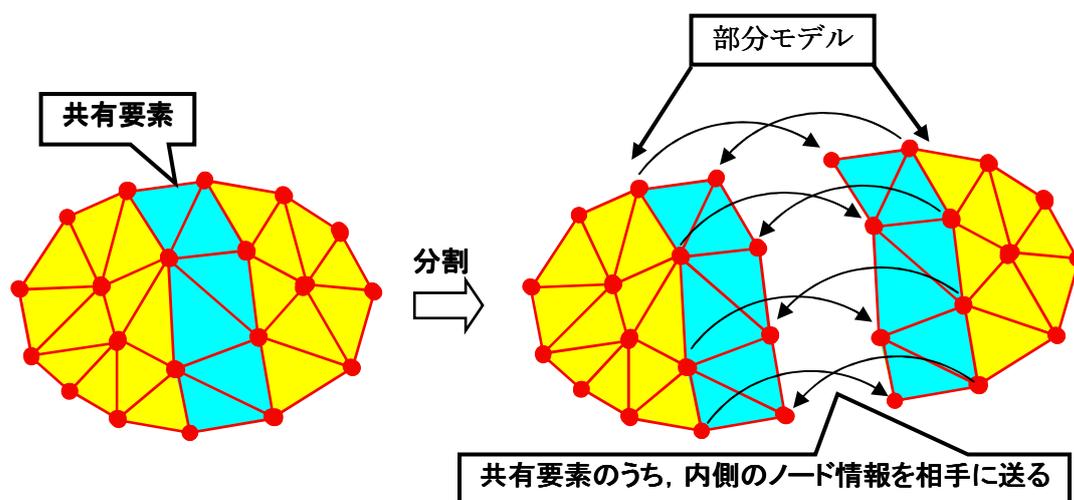


図4-3-1. 変形手法の並列化

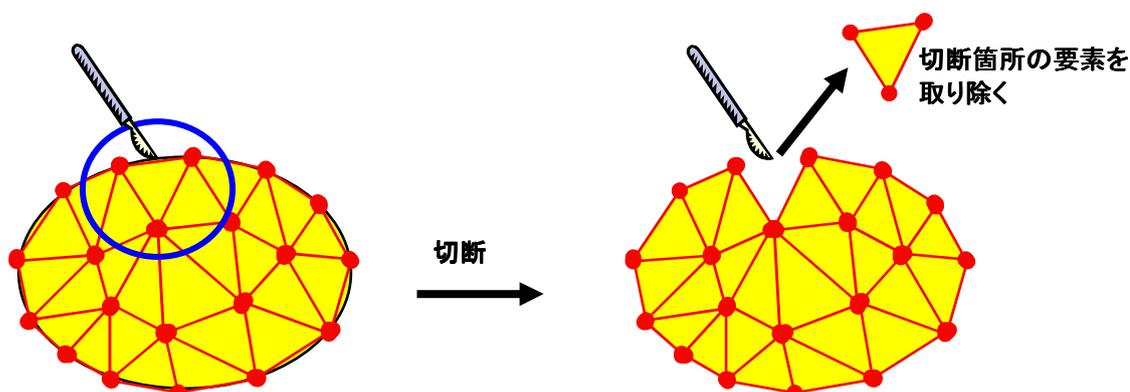
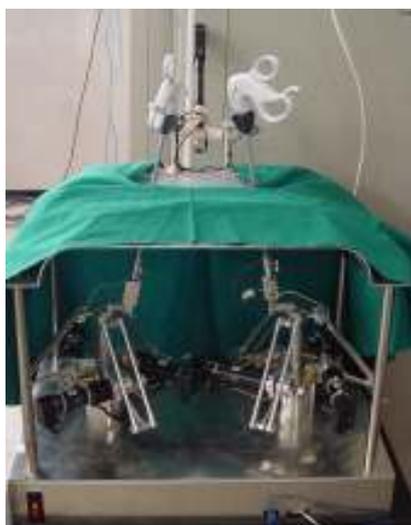


図4-3-2. 切断手法

[開発（システム構築）]

ハプティックデバイスにおいては、模擬術具を実際の手術に用いられている術具に換装し、つまむ・はさむ・切るなどの操作がより現実になくなった。また内視鏡を模擬した模擬内視鏡を新たに取り付けたことにより、内視鏡映像の位置、回転、ズームなどが可能となり、オリエンテーションの変化による「ハンド・アイ・コーディネーション」のトレーニングや、ポート位置の変更に対応した訓練などより高度な模擬が実現された。

本年度に製作した手術シミュレータ第一次試作に、本テーマの成果を実装した。8並列処理により、4,771ノード(22,324要素)の腎臓モデルに対し、22Hzの更新レートを達成した。触覚呈示手法においては、変形手法から計算される反力を1,000Hzで内挿したものを出力しているため、速い応答の場合は、若干の遅れが感じられる。この力覚計算については、最終年度の目標であり、大きな課題の一つとして取り組む予定である。



(a) 装置概観



(b) 模擬術具



(c) 模擬内視鏡

図4-3-3. ハプティックデバイス

- (a) 装置概観
- (b) 模擬術具
- (c) 模擬内視鏡

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一次試作に実装し、その有効性および中間目標を達成したことを確認した。現在は、単一臓器のシミュレーションであり、今後は多臓器へと拡張することが課題となる。また、触覚提示手法については、更新レート数10Hzの変形情報から、1 kHzの更新レートに最適補間する方法が今後の課題となる。

[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、粘弾性物体の変形と切断に関する手法）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]

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。

[開発（システム構築）]

手術シミュレータ第一次試作に実装した。

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。

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」を確認する第一次試作を製作した（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に必要となる、(1)生体データ作成装置、(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。この結果、臨場感の高い手術環境を模擬する一連の工学的基礎技術が確立できた。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者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、実用的な手術シミュレータへ逐次改良・発展させて行くことができる。

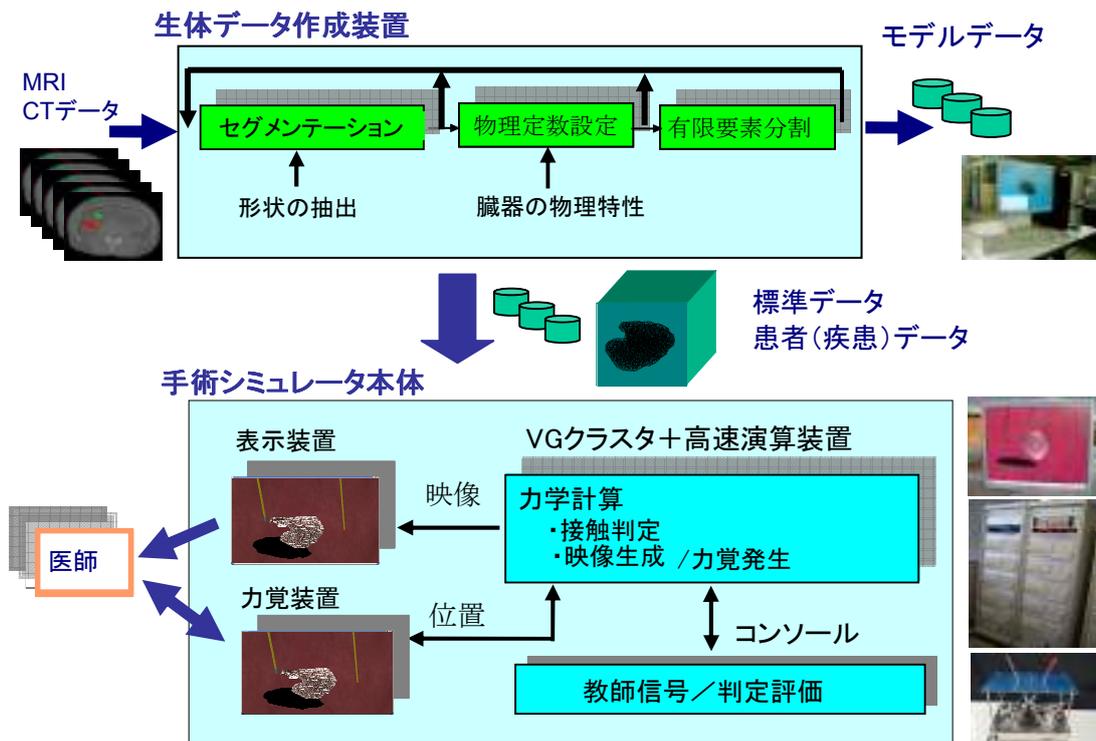
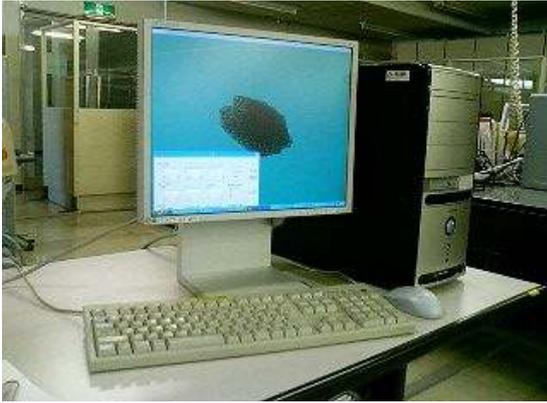


図 4-4-1. 研究開発の成果

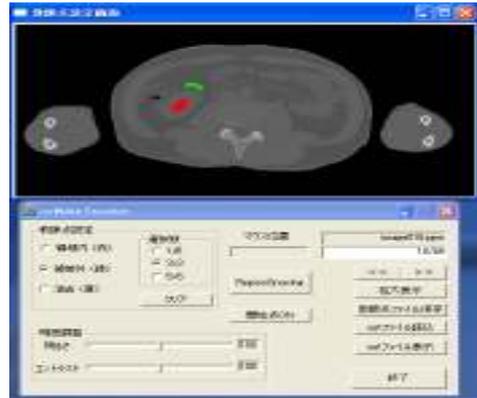
図 4-4-2 に、研究開発の成果である試作した手術シミュレータの概観を示す。 図 4-4-2 (a)、(b) に生体データ作成装置の外観を示す。 この装置は比較的小規模のモデルデータを作成する場合に使用するもので、製品イメージに近い。 また、大規模のモデルデータ（人体全部位など）を対象とする用途には処理時間との関係から、高速演算装置を利用して製品化の予定である。

図 4-4-2 (c)、(e) に手術シミュレータ本体の外観、(d)、(f) に手術シミュレータ本体を構成する装置を示す。 現時点（第一次試作）では、機能性能を確認するための試作装置であり、性能を出す必要性和汎用性のため大型化している。 最終的な製品とするには、現装置（主に VG クラスタ+高速演算装置）のコンパクト化が必要である。 このためには、各種処理を整理して処理の無駄を無くすとともに、単一 PC の計算能力を向上させる必要がある。これは、サブテーマ 2 で実施中の高速演算装置の研究開発で来期引き続き実施する予定である。 この研究により、単一 PC 内で複数の GPU が並列動作できるようになり演算能力が向上することから、装置のコンパクト化が可能と想定している。

また、製品としては、大規模システムから小規模システムまで対象とするシミュレーションの規模に応じて、アーキテクチャは同じであるが装置のサイズを変える予定。



(a) 生体データ作成装置 (小規模用)



(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)



(d) 高速演算装置 (単一 PC)



(e) 手術シミュレータ本体 (操作)



(f) 力覚装置

図 4-4-2. 第一次試作の成果物 (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. T. Terada, M. Ogata, T. Kikukawa, M. Nagasaka, T. Takanami, K. Kajihara, M. Fujino, "Haptic Devices for Endoscopic Surgery Training Simulator", Eurographics and IEEE Symposium on Haptic Interface for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Mar. 2007.
2. 菊川, 緒方, 寺田, 本郷, 長坂, 高波, "生態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," 理化学研究所生体力学シミュレーション研究会, 2007 年 2 月
3. 長坂, 寺田, 菊川, 本郷, 高波, 藤野, 梶原, 緒方, 土肥, "内視鏡下手術訓練シミュレータにおける臓器変形手法の研究," 第 7 回計測自動制御学会システムインテグレーション部会講演会, 2006 年 12 月
4. 寺田, 長坂, 菊川, 本郷, 高波, 梶原, 緒方, "内視鏡下手術訓練シミュレータ用模擬術具装置の開発," 第 7 回計測自動制御学会システムインテグレーション部会講演会, 2006 年 12 月
5. 緒方, 菊川, 長坂, 本郷, 寺田, 高波, "実時間シミュレーションへ向けて," 理化学研究所生体力学シミュレーション研究会, pp.79-90, 2006 年 11 月
6. 菊川, 緒方, 梶原, 土肥, "GPU を用いた物理シミュレーションの高速化," 情報処理学会グラフィックスと CAD 研究会, Vol.2006 ,No.91,pp.49-54,2006 年 7 月
7. M.Ogata, K. Kajihara, T. Kikukawa, and T.Terada, "An Evaluation of the Communication Cost of Parallel Processing in Real-Time Simulations Using an Image-Composition Devices", IPSJ Transactions on Advanced Computing Systems, Vol.47. No.SIG 7, pp152- 161 ,May 2006.