

平成17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18年4月

情報通信研究機構

平成17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」

目次

1	研究開発課題の背景	2
2	研究開発の全体計画	6
2-1	研究開発課題の概要	6
2-2	研究開発目標	7
2-2-1	最終目標	7
2-2-2	中間目標	8
2-3	研究開発の年度別計画	9
3	研究開発体制	11
3-1	研究開発実施体制	11
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開発	12
4-1-1	概要	12
4-1-2	実施状況	12
4-1-3	まとめ・今後の課題	14
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	15
4-2-1	概要	15
4-2-2	実施状況	15
4-2-3	まとめ・今後の課題	19
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	27
4-4	総括	28
5	参考資料・参考文献	29
5-1	研究発表・講演等一覧	29

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。しかしながら一方、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となっており、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の増加の一因となっていることは衆知のことである。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、高度医療先端技術においては、従来から行われている、手術現場において、訓練者を助手として熟練医師のもとで実際の患者を用いたOJTによる技術継承を含めて、如何に安全に効率よく技術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検討されている。現状で一般に行われているのは、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訓練が中心である。前者は、機器の取り扱いと手順の習得が中心であり、技術向上のための訓練には向いていないこと、後者は、切開や血管縫合などの訓練は可能であるが、病気に応じた疾患への対応などは難しく、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（IT）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に発達した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。三菱プレジジョン（提案者）と三菱電機情報総研においても、1997年より旭川医大の協力を得て、眼球手術シミュレータの開発を行った。さらに、1999年より、通信放送機構（TAO）の助成を得て京都大学医学部附属病院にて研究を行った「ネットワーク型VR手術シミュレーション統合管理システム」に、一連の装置とソフトウェアを提供しその研究開発に大きく貢献している。ここで開発した装置の特徴は、ネットワークにより、複数の手術シミュレータを接続し、指導者と訓練者が共通の手術空間を共有し訓練を効果的に行うことが出来ることであり、教育効果の検証も行われている。

しかしながら、現在開発されているVR手術シミュレータは（提案者らの装置も含めて）、まだ実用化の段階に達しているものはないと言っても良い。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」の模擬精度改善に大きな余地がある。

② 対応する疾患の数が少ない：対象となる臓器や疾患のモデリングに多くの時間（と費用）がかかり、多くの疾患に対応できていない。

③ 手術の各手順全てに対応できていない：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。これらの問題を解決するのは容易なことではないが、一つの方法として注目されているのが、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モデリングを行う手法である。

CT、MRIなどによって得られる生体データは、データサイズの大きいボリュームデー

タであるが、現状ではボリュームデータをネットワーク上での共有、リアルタイム表示する手法がないため、手術シミュレータ用に特別にモデル化された少ない種類の生体データを用いてモデリングとシミュレーションが行なわれている。今後、多くの症例や患者の生体データをそのもの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手術シミュレータでは操作者に対して、切開や縫合の感覚を把握させる視覚および力覚は、体験訓練のリアリティを向上させるとともに、それらの情報に対する素早い反応が、手術訓練において非常に重要であることが示唆されている。しかし、ボリュームデータに基づく手法は計算量が膨大であり、(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。

他方、三菱プレジジョンでは、ここ数年急速に研究開発が行われ様々な分野で実用化が行われている「PCクラスタ」技術を用いて、大量のボリュームデータを並列に処理し、リアルタイムに表示する「VGクラスタ」の研究開発を手がけ、サイエンティフィック・ビジュアルライゼーション分野での研究開発に採用されている。この「VGクラスタ」技術をVR手術シミュレータに応用することにより、生体ボリュームデータを扱うことが出来るようになり、上記の課題も解決できる可能性があるものと考えられる。

本提案システムでは情報ネットワークを用いて指導医と研修医が実際の生体データを用いて術野空間を共有し、直接指導を受けられる世界初のネットワーク型VR手術手技教育システムを構築し、教室型や通信教育型の新しい臨床医学教育形態を創出する。具体的には、実際の生体データの表現手法であるボリュームデータを用いて仮想現実感(VR)技術によって構築されたコンピュータグラフィクス(CG)による仮想人体を、情報ネットワークを用いて複数地点で共有し、指導医と研修医が同一の仮想臓器を触りながら手術手技教育を行える環境を構築する。これにより、

- ① 稀少症例に対する実患者を使わない施術訓練の実現
- ② 通信教育による手術手技訓練の実現
- ③ 複数の仮想空間を用いた教室型臨床医学教育の実現を行うことができる。

さらに、本提案で研究開発を行う手法を一步進めることにより、手術を行おうとしている患者の医療診断画像データをもとに、疾患のモデリングとシミュレーションを行うことが可能になり、手術直前の最新データをもとに手術計画を策定し、更には模擬訓練を行う「術前シミュレーション」や、策定した手術計画をもとにした手術画像などを実際の術野映像に投影して手術の安全性を向上させる「術中ナビゲーション」などへの応用が開かれることを想定している。

VR手術シミュレータ等の医用VRシステムは、実患者を用いることなく稀少症例に対する手術の「独習」が行える環境として、広く研究が進められており、製品化されているものもいくつか存在する。三菱プレジジョンと三菱電機情報総研により開発した「眼科用手術シミュレータ」もその一つであるが、先に挙げたいくつかの理由により広く使われているシステムはまだないと言える。特に、国内においてはいくつかの大学における研究レベルのシステムが存在するのみであり、企業において本格的に製品化の研究開発を行っているシステムはない。表1-1に製品化されている手術シミュレータの例を、表1-2に研究・開発が行われている手術シミュレータの例を示す。

さらに手術シミュレーションを実現するためには仮想術具と仮想臓器の間の視覚・力覚的インタラクションについても共有し、的確な視覚・力覚フィードバックを行う必要

があるが、これを実現した例は通信放送機構（TAO）の助成により京都大学医学部附属病院により研究開発を行った、「ネットワーク型VR手術シミュレーション統合管理システム」以外にない（三菱プレジジョンと三菱電機情報総研は本研究開発において、装置とソフトウェアの開発を請け負った）。ただし、このシステムもポリウムデータではなく通常のコンピュータグラフィックスで用いられるポリゴンデータを用いている。また、ポリウムデータに関しても各分野で研究されており、ポリウムグラフィックス表示用ハードウェアボードやポリウムデータによる触覚提示ソフトウェアなどが既に製品化されているが、ポリウムデータの変形を伴い、視覚・触覚を含めてネットワーク上でポリウムデータの共有を実現しているものはない。表1-3に本提案と既存のシステムにおける研究開発内容の比較を示す。

表 1-1 製品化されている VR 手術シミュレータの例

名称	システム概要	メーカー名
CathSim® AccuTouch®	人工関節置換手術用、観察用内視鏡システムなど。	Immersion Corporation
眼科用手術シミュレータ	硝子体手術訓練シミュレータ（黄斑前膜症、網膜下手術、糖尿病網膜症の3症例）	三菱プレジジョン、三菱電機

表 1-2 研究・開発が行われている VR 手術シミュレータの例

名称	システム概要	研究機関名
バーチャル手術システム	切開や切離といった臓器の内部構造の切断に対応。	慈恵会医大
挿入訓練用力覚付きバーチャル内視鏡	特殊なローラメカニズムにより医師が操作する実物内視鏡へ力を返す。	名古屋大学工学部
ネットワーク型 VR 手術シミュレーション統合管理システム	ネットワークにより複数の装置を接続し、指導者と訓練者が一つの術野空間を共有し、脳動脈瘤クリッピング術の訓練を行う。	京都大学医学部附属病院

表 1-3 本提案と既存研究における研究開発内容の比較

	本提案	既存研究
VR 手術シミュレータ	医用データであるポリウムデータをそのまま使えるため、実際の生体データを仮想モデルとして用いることができるようになる。	既存研究多数 ただし生体モデルはポリゴンデータによるものであり、実際の医療データを利用するためには、データ変換が必要であり、また自動化もされていない。
ネットワーク共有	今まで、データの大きさからネットワークでは扱えなかったポリウムデータをネットワークで共有できるようにする。また、ポリウムデータを触ることできる触覚を伴ったモデルとなる。	画像を共有したネットワーク型手術シミュレーションはあるが、触覚まで伴ったものは、提案者等による「ネットワーク型 VR 手術シミュレーション統合管理システム」しかない。しかしながら、生体データはポリゴンのままである。

また、本研究開発の基盤技術となる、「VG クラスタ」技術と、「ハプティックデバイス」技術に関しては、様々な研究が行われている。まず、「VG クラスタ」に関しては、多くの企業が参加して「PC クラスタコンソーシアム」を作り、経済産業省リアルワールドコンピューティングプロジェクトを推進した技術研究組合 新情報処理開発機構が開発した SCore クラスタシステムソフトウェアおよび Omni OpenMP コンパイラを中核とした PC クラスタシステムソフトウェアの開発、発展、普及に努めている。三菱プレジジョンもこのコンソーシアムに参加するとともに、並列処理された画像データをリアルタイムに合成し表示する「画像合成装置」を開発し、データ処理に重点をおいている PC クラスタ技術において、ポリウムデータのリアルタイム画像表示という、リアルタイムシミュレーションでは必須技術の研究開発を行っている。また、「ハプティックデバイス」も 90 年代に多くの研究開発がなされたが現在市販されているものは、米国 SensAble™ 社の PHANToM™ のみと言っても過言ではなく、この PHANToM™ も最近ではプロダクトデザイン用途へ重点をおいており、VR 手術シミュレーションで必要となる、高精度・高剛性の性能を十分満足しているとは言えない。三菱プレジジョンでは、「眼科用手術シミュレータ」の開発や、「センシブルヒューマンプロジェクト」、京都大学医学部附属病院への装置納入等を通して、VR 手術シミュレーション用に用いるパラレルリンク型ハプティックデバイスの研究開発を行って来た。

2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

本研究では、生体ボリュームデータに基づいたネットワーク型 VR 手術手技訓練環境の構築を行う。また、CT・MRIなどの医用画像データをそのまま簡単に手術シミュレータで扱える手法を構築するとともに、手術中の臓器の変形や力覚提示の精度向上に関する手法の研究開発を行う。これらの実現のためには以下の課題を解決する必要がある。

①ボリュームグラフィックスの高速表示手法

通常のグラフィックアクセラレータでは高速に扱えないボリュームグラフィックスの高速表示手法を検討する。提案者等が開発したボリュームクラスタを基本としてリアルタイム変形するボリュームデータに対しても表示できるようにする。

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

手術シミュレーションでは、ボリュームデータによる生体データだけでなく、メスなどポリゴンデータで表された術具も同時に表示する必要がある。したがって、ボリュームデータとポリゴンデータを正しく重畳表示する手法を開発する必要がある。提案者等が開発したボリュームクラスタの手法をポリゴングラフィックスにも適応できるように拡張する。

③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

ボリュームデータを複数のPCでネットワークを介して共有する手法を開発する。ボリュームデータの部分変更や、データ圧縮などから適切な手法を選択する。

④ボリュームデータに適合する生体モデル手法

生体モデルに必要な生体モデルデータを決定する。生体のすべてのデータを扱うことは難しいため、シミュレーションに必要なデータを取捨選択し、モデルを定義する。

⑤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

実際のMRI、CTから得られた情報を基に上記生体モデルを生成する手法を開発する。現在あるセグメンテーション手法を基に、必要なデータをさらに追加取得できるような手法を開発する。必要に応じて複数のデータから一つのモデルを構築する手法も検討する。

⑥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

上記モデルを手術シミュレータの目的に沿うように、実体の生体と同じく変形させる手法を開発する。シミュレーションに用いるためにはリアルタイムで処理することが重要である。提案者等が過去に行なってきた有限要素法によるリアルタイム変形手法の適応を検討する。

⑦ボリュームに基づく触覚提示手法

ボリュームで表されたデータから滑らかな触覚を提示する手法を研究する。提案者らが開発したボリュームデータでの力覚提示手法を基に、手術シミュレーションに

適した手法を開発する。

本研究では、開発技術を適用することによって手術シミュレーションを構築し、実際の臨床現場に適用して、情報技術による臨床医療教育改革の可能性を確認する。

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、1-2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、各サブテーマ毎のサブリーダーを中心にして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）

以下の項目に関しては平成19年2月末の中間目標として確認を行う。

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)並列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			→		→		

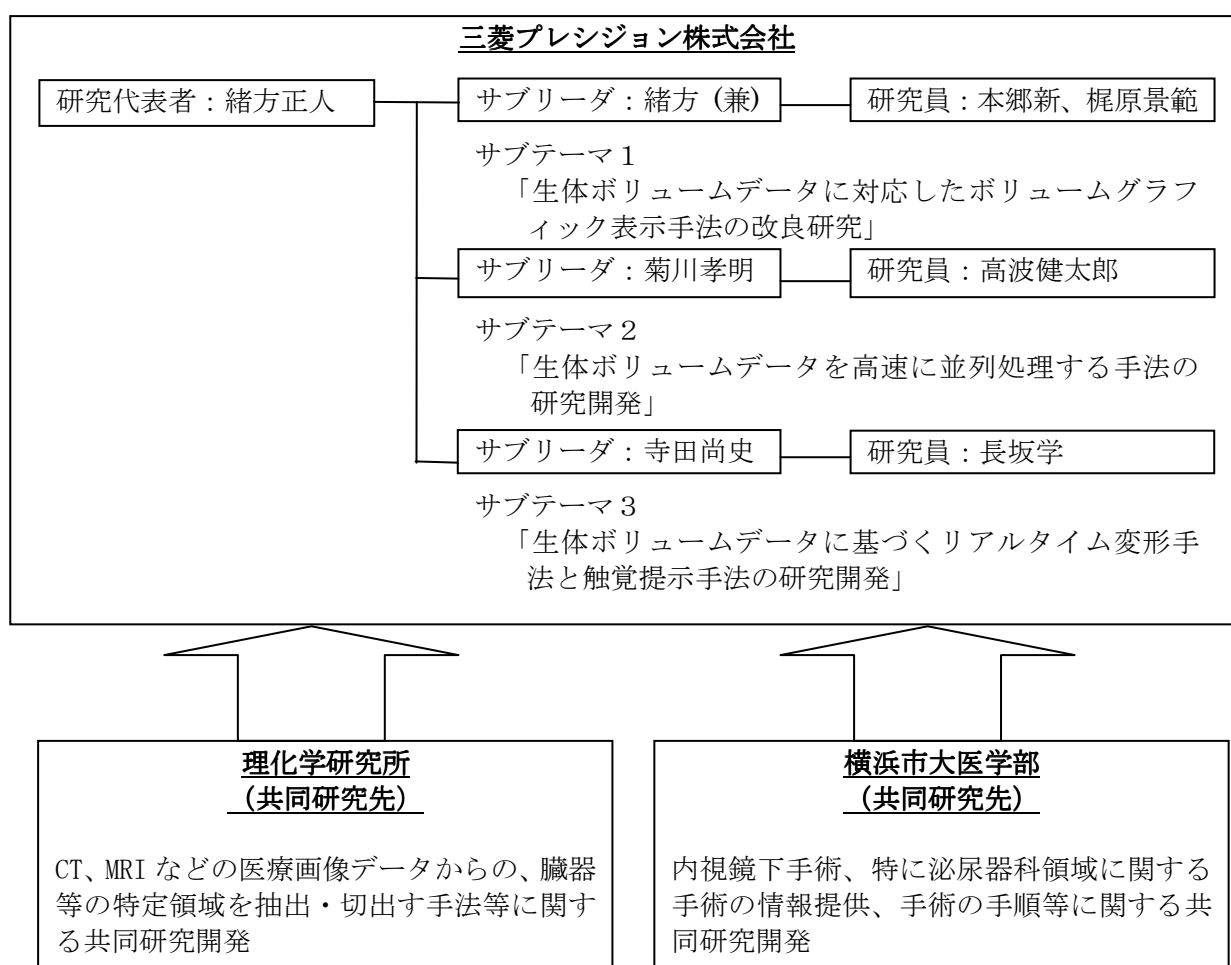
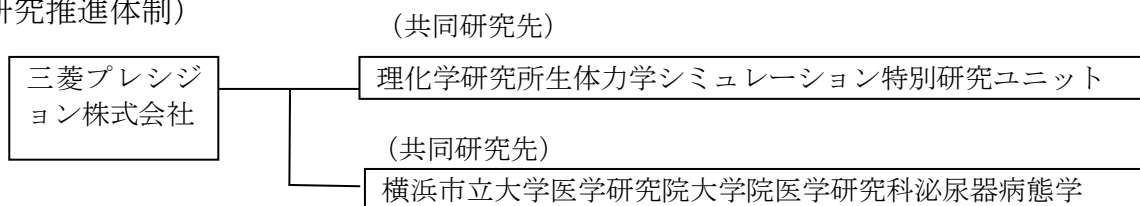
研究開発項目	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	計	備考
サブテーマ3 「生体ボリュームデータに基づくリアルタイム変 形手法と触覚提示手法の研究開発」							主に、労務費
(1)手術シミュレータ用モデルとして利用できる、リ アルタイムボリュームデータの変形手法			→				
(2) ボリュームに基づく触覚提示手法					→		主に、購入設備費、及び装 置改良費
プロトタイプ機の試作・評価					→		
①試作		→					
②評価・改良					→		
間接経費額（税込み）							
合 計							

- 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

(研究推進体制)



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研究開発

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、当然、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う。

(2) SIGGRAPH2005

ボリュームレンダリング技術（特に GPU を使用した演算処理）の動向調査
特に、医療用画像のビジュアライゼーションに関する調査実施した。

[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、のボリューム変形・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 17 年度は、手術シミュレータに適するレンダリング手法の研究を行った。平成 18 年度以降に、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をする。



図 4-1-1 3次元テクスチャを使用したボリウムレンダリングによる表示例

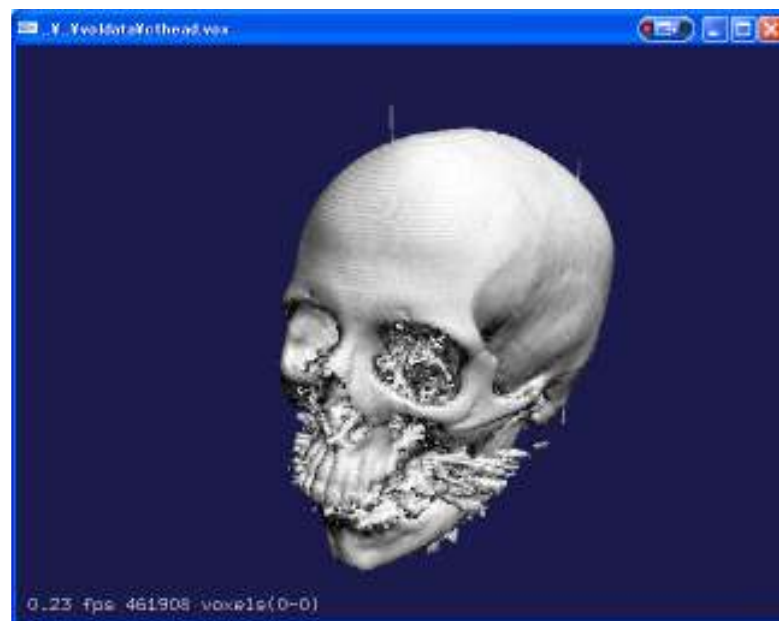


図 4-1-2 Splatting を使用したボリウムレンダリングによる表示例

図 4-1-1、図 4-1-2 に、手術シミュレータを構築する上で有望と思われるレンダリング手法での表示例を示す。

3次元テクスチャは、市販の画像表示プロセッサ上のハードウェアを利用したボリウムレンダリング手法である。ハードウェアを利用するため、非常に高速なレンダリングが可能である。しかし、現在の画像表示プロセッサの画像メモリが 256メガバイト程度であるため、大容量のボリウムデータの格納を行い難いという欠点がある。また、画像メモリに格納したボリウムデータの変形に時間がかかるため、実時間性に問題が生じる可能性がある。図 4-1-1 の描画速度は、ボリウム変形を含め約 45fps (CTHEAD:256x256x113 ボクセル) である。

Splatting 法は、ボリウムデータを構成する最小単位であるボクセルを直接、描画面に投影することでレンダリングを行う手法である。Splatting 法によるレン

ダリングは、ボリューム変形処理に適しており、また並列レンダリングも行いやすい。ただし、ボクセル単位で処理を行うため、実時間でのレンダリングを行うには、隠頭処理、並列処理などの高速化のための処理を行う必要がある。図 4-1-2 の描画速度は、同じボリュームデータを使用して、約 0.2fps である。

4-1-3 まとめ・今後の課題

[全体]

ボリュームレンダリング手法には、等値面を作る間接的手法としてマーチングキューブ法、直接的手法としてレイキャスト法、Splatting 法、中間的な手法として Shear-Warp 法、ハードウェアを利用した 3 次元テクスチャ法などがある。

本年度の研究は、手術シミュレータに必要な機能・性能を満たすボリュームレンダリング手法の選定を実験により実施した。シミュレーションを行うには、実時間でのレンダリングが必要であり、また、手術を模擬するという観点から、ボリュームデータの変形、ボリュームとポリゴンの合成、大容量ボリュームデータのレンダリングという機能が必要とされる。

本年度の研究成果により、上記の観点から CT、MRI などによって取得した生体ボリュームデータを表現する手法として、3 次元テクスチャ法と、Splattting 法を選定した。既に述べたように、各手法とも、長所・短所が存在する。平成 18 年度以降の研究で並列処理による大容量ボリュームの高速なレンダリングの実現を行う。

[調査]

関連学会やシンポジウム、講習会等に参加することにより、3 次元表示技術、高速処理技術の技術動向が確認できた。今後、ポリゴンとボリュームの表示を融合していくにあたり、実写映像の利用、ポイントベースレンダリング等、高度な表現法が参考になる。また、ボリュームレンダリングとポリゴンを自然に融合したポイントレンダリングが、ここ数年で技術の主流になる可能性がある。

[研究]

複数の計算機 (PC) を並列に動作させる「PC クラスタシステム」と弊社が開発した「画像合成装置」を組み合わせた「VG クラスタシステム」を用いて、手術シミュレータの計算基盤とする予定である。これは、手術シミュレータに必要な計算 (シミュレーション) と表現 (表示・力覚) の同時進行を行う計算装置である。本年度、選定したレンダリング手法を「VG クラスタシステム」に実装し、大容量ボリュームのレンダリングを行う。

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、「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、本サブテーマの一つに加えた。本サブテーマに、高速演算処理装置の開発を加えたのは、研究チームの特性を考慮したものである。

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) 横浜国大大学院環境情報研究院

非線形の最適化法である遺伝的アルゴリズムを画像処理に用いて認識処理を実施して成果を挙げている。この技術のボリュームデータへの適用可能性に関して情報交換を行った。

(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、情報交換および、討論を継続的に実施している。

(3) 東北大学工学部 (REDEEM プロジェクト)

工学系技術者を対象として医療技術の習得を目指した講習会に参加し、医療技術の基礎（生体の特性、病気の種類、治療法等）について知識を習得した。

(4) 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。

(5) 第5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、産業界においても導入されつつある。これに関連する近年のCPU、メモリ、ネッ

トワーク等プラットフォーム技術の動向を調査した。

- (6) ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム (HPCS2006)
高性能計算機システムの研究者とそのユーザである計算科学研究者との間で、
討論、情報交換が行われた。特に、高速演算装置開発に関連して、並列計算アーキテクチャについての情報収集をおこなった。
- (7) セミナー：「画像処理の基礎と応用」
日本テクノセンター主催のセミナー「画像処理の基礎と応用」を受講した。講習は主に OpenCV というライブラリを用いた画像処理の実習であり、OpenCV がセグメンテーション処理の実装手段として有効であるとわかった。
- (8) MEDICAL IMAGING 2006
「MEDICAL IMAGING 2006」は SPIE (国際光工学会) 主催の医用画像に関する研究報告会である。セグメンテーション処理ならびに手術シミュレータに関する研究発表を聴講し、情報収集を行なった。
- (9) 理研シンポジウム
理化学研究所主催の生体力学シミュレーション研究に関するシンポジウムに参加し、弊社の研究開発状況を発表した。また、他の参加者 (大学及び企業の研究者、医師) との情報交換を図り、手術シミュレータに関する動向調査を行なった。

[研究]

(1) セグメンテーション

17年度当初は処理手法を決定するため、文献等を調査し、既存手法の理解に努めた。現在、セグメンテーション処理として確立されている手法は大別して、①対象物の「かたち」に着目した「構造的手法」、②対象物の「色 (画素値)」に着目した「統計的手法」、③「構造的手法」、「統計的手法」を合わせた「混合手法」に分けられる。現在よく用いられている手法は③の「混合手法」である。

混合手法の1つに「リージョングロウイング」があり、これは、ある点における近傍画素が設定条件に適合するかを判定し、適合すれば抽出領域に加えるという処理を繰り返し実行し、対象領域を抽出してゆく手法である。検討の結果、この「リージョングロウイング」法を改良した、理化学研究所殿考案の「適応的リージョングロウイング」法をセグメンテーション処理に用いることに決定した。

「適応的リージョングロウイング」は初期設定条件に加えて、判定する画素の周囲の画素情報も判定に加味することで、精度向上を図っている。

人体腹部の CT 画像を用いて「適応的リージョングロウイング」の抽出試験を行なった結果を3次元化したものが図4-2-1である。

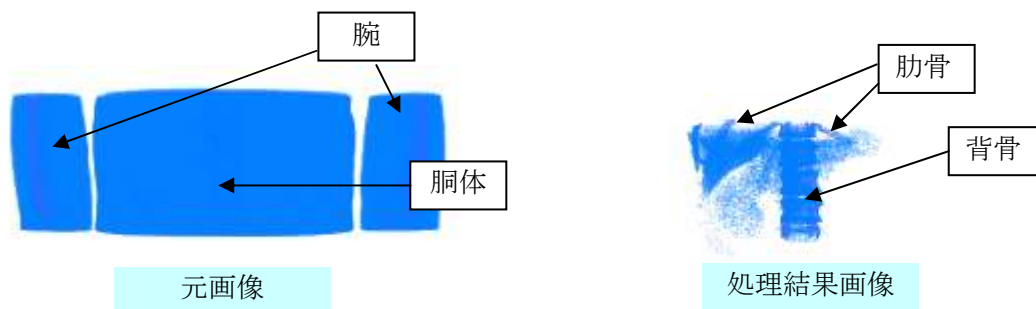


図4-2-1：適応的リージョングロウイングによる抽出試験結果

試験に用いた画像データのサイズは 512x256x69 ピクセル、処理時間は約 4 分 30 秒であった。

この試験は骨の抽出を目的として行なったものである。やや余分な箇所も抽出しているが、その点は初期設定条件を最適化することで改善が可能であり、最適な初期設定条件導出のため、抽出試験を続行している。

また、セグメンテーションによるボリュームデータ構築は生体データ生成の最初の処理であり、生体力学シミュレーション、主に臓器等の変形シミュレーションを有限要素法で行なうためにボリュームデータを有限要素に分割しなければならない。そのため、サンプルとして球のボリュームデータを有限要素に分割する試験を並行して行なった。結果は図4-2-2の通りである。

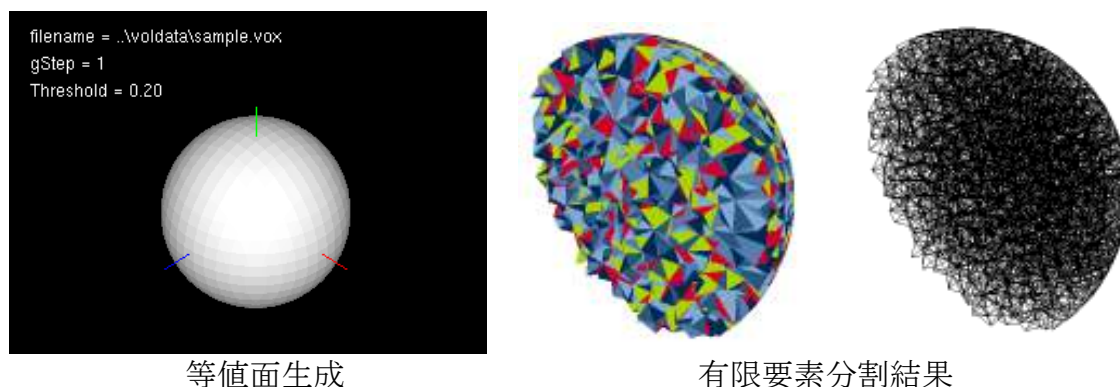


図4-2-2：有限要素分割試験結果

処理としてはまず、球のボリュームデータから等値面を作成（マーチングキューブズ法を使用）、その後有限要素に分割するという2段階から成り立っている。分割結果画像に現れている通り、球データの内部も含めた有限要素分割が確認できた。

(2) 高速演算処理装置

平成17年度当初、高速演算処理装置をFPGA(Field Programmable Gate Array)により構築する方針で検討を進めた。その過程で、解法する連立方程式の規模、それに伴う必要なメモリ容量、演算精度、演算速度等を詳細に検討するに至り、現在のFPGAでは実現困難との結論に達した。主な理由は次のものであった。①メモリとの接続ピン数及び動作周波数が制限されており、必要なメモリバンド幅が得られない。②FPGAは低精度の固定少数点演算は高速に処理できるが、浮

動小数点演算においては処理時間を必要とする（本システムでは、少なくとも32bit浮動小数点の精度が必要と試算している）。③ 浮動小数点演算器は、FPGAの資源を大量に消費するため、多くを実装できない。④ FPGAは高価である。

そこで、近年急速に性能向上が見られるGPU(Graphics Processing Unit)により、高速演算処理装置を構成することを検討した。GPUは本来画像生成用プロセッサであるが、プログラム可能であり、近年汎用計算に適用する試みがなされている。GPUは、FPGAに比較して浮動小数点演算能力、メモリバンド幅及びコストの点で勝っており、演算性能で約2倍、コストで1/20との試算となった。

次に、高速演算処理装置で処理する計算を明確にするため、連立一次方程式の解法について調査を行った。ここでは、有限要素法により構造解析を行い、生体の変形模擬を実施することを想定した。連立方程式の解法は次の反復法について、主に反復回数と処理時間の調査を行った。① Jacobi法、② Gauss-Seidel法、③ SOR(Successive Over-Relaxation)法、④ CG(Conjugate Gradient)法、⑤ ICCG(Incomplete Cholesky Conjugate Gradient)法、⑥ Multi Grid法

さらに、上記解法をGPUへ実装し評価を行うため、GPUでの汎用計算実行用にAPIプログラムを開発した。これを用いて、収束までの反復回数が少なく、前処理の無いCG法をGPUへ実装し、データ規模を変化させながら、その処理時間の測定を行った。これと、同等の処理をCPUで実施した場合の処理時間との比較を行った。図4-2-3に測定結果を示す。ここで、約20万次元のデータ規模での処理時間は、GPU 0.195Sec、CPU 0.261Secであった。

また、連立方程式の反復解法以外の計算（画像処理）をGPUを用いて計算速度を測定し、CPUと比較することでGPUの評価を行った。図4-2-4に平均化フィルタでの処理時間測定結果を示す。2048×2048画素では、GPU 4.96mSec、CPU 567mSecとなった。

以上から、計算内容とデータ規模によるが、GPUではCPUに比較し、1.3倍～100倍の高速化を確認した。

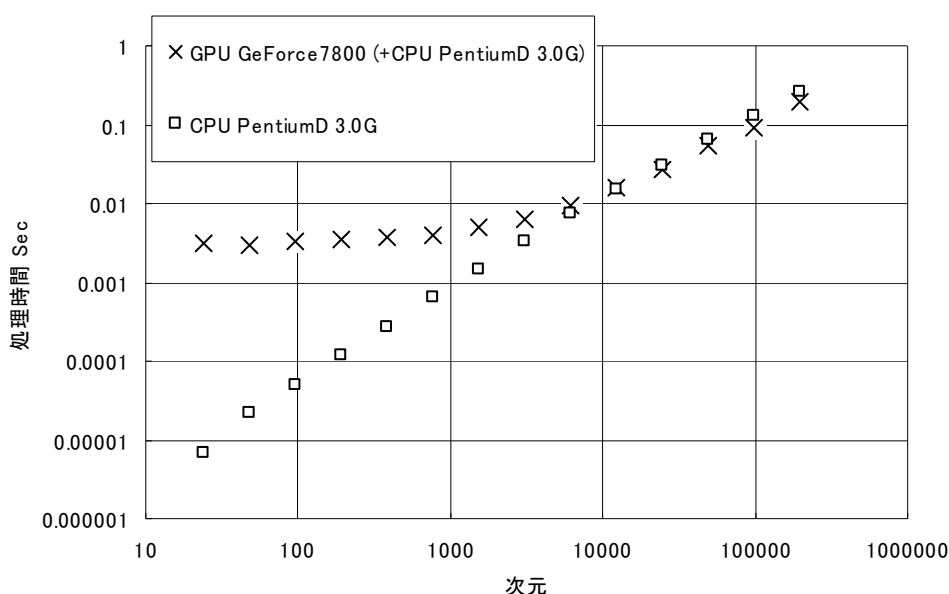


図4-2-3 CG法の計算時間比較

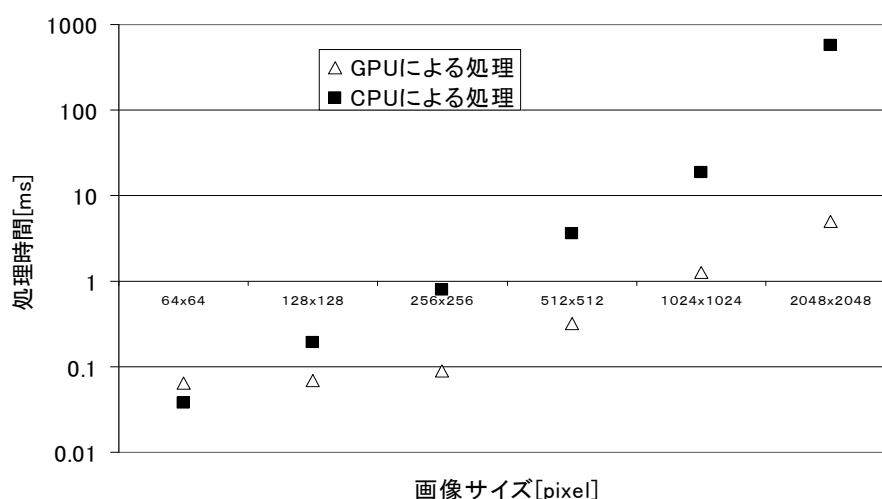


図 4-2-4 平均化画像フィルタの計算時間比較

4-2-3 まとめ・今後の課題

[全体]

セグメンテーションでは、検討の結果、適用する手法を明確にし、CT画像データからの抽出実験を実施した。これにより、本システムの主な機能確認は完了した。今後は、抽出精度の向上を図る。また、抽出したボリュームデータの有限要素データ分割手法について、球状テストデータによりそのアルゴリズムの確認を完了した。課題は、任意形状への対応と、要素の詳細度レベルを考慮した分割である。

高速演算処理装置では、GPUを適用する方針を固め、GPUへの汎用計算実装用プログラムを開発した。また、これを用いてGPUのパフォーマンスを測定し、CPUと比較して、より高速に処理できることを確認した。

今後の課題は、複数GPUによる並列処理及びGPUに実装する計算の最適化である。

[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・研究動向を調査することが出来た。

セグメンテーションに関しては、既存の処理手法を文献調査によってほぼすべてを把握するとともに、学会聴講により、抽出対象に適した手法、既存の手法を改良した、より抽出精度の高い手法について調査を行なった。

また、高速演算処理装置に関連し、並列コンピュータアーキテクチャ、近年のGPU, CPU, FPGA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は、処理手法の検討の結果、理化学研究所で研究されている適応的リージョン Growing法を元に物体の抽出を行うことに決定し、人体のCT画像データによって臓器や他組織の抽出試験を行なった。今後、抽出精度の向上、

処理時間の高速化を図る。また、ボリュームデータの有限要素分割の試験を行ない、データの有限要素への分割を確認した。今後は任意の形状のボリュームデータを分割可能なように改良する。

高速演算処理装置に関しては、FPGA (Field Programable Gate Array) と GPU(Graphic Processor Unit)との比較検討を進めた結果、GPU がより適しているとの結論を得た。次に、GPU へ連立一次方程式の解法その他を実装し、そのパフォーマンスを測定した。今後 GPU を並列に用いること、GPU へ実装する処理を的確に選択することで処理の高速化が見込まれる。

[開発 (システム構築)]

VG クラスターの各計算ノードにおいて、4GPU を搭載し、GPU による並列処理を行うシステムの設計を行った。平成 18 年度にシステム構築し、開発のプラットフォームとする。

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。

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、「内視鏡下手術（腹腔鏡手術、胸腔鏡手術）」に関する調査・研究等を実施した。

(1) ME 学会

最新治療機器、医療教育、手術シミュレータに関する技術動向調査を行った。

(2) 計測自動制御学会 SI2005

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。

(3) 日本 VR 医学会学術大会

医療教育、手術シミュレータ等に関する技術動向調査・技術習得を行った。

(4) VR 学会大会

バーチャルリアリティ全般、手術シミュレータ、物体変形処理等に関する技術動向調査を行った。

(5) MMVR14 (Medical Meet Virtual Reality)

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（特に干渉計算手法、触覚計算手法）等に関する技術動向調査・技術習得を行った。

- (6) 日本シミュレーション外科学会
実際に現場で使われている手術シミュレータ（主に形成外科領域）等に関する技術動向調査・技術習得を行った。
- (7) コンピュータ外科学会大会
手術ロボット、手術ナビゲーション、手術シミュレータ、医用画像処理等に関する技術動向調査・技術習得を行った。
- (8) 日本内視鏡外科学会大会
内視鏡下手術に関する調査・情報収集を行った。
- (9) 東大先端研研究室公開
生体シミュレーション等に関する調査を行った。
- (10) REDEEM 医工学技術者養成講座受講
生体力学情報等に関する調査・研究を行った。特に動物（ウサギ）の解剖を通して、臓器の位置や構造、触感などを習得した。
- (11) 東京大学医学部「臨床情報工学」
医療情報工学、生体力学情報、医療画像情報等に関する調査を行った。
- (12) 横浜国大工学部
有限要素法およびマルチグリッド法に関する調査・研究を行った。
- (13) 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、手術見学等を行った。
- (14) VR 医学会「医療安全研究委員会（第1回- 第3回）」
手術シミュレータに関する技術開発・研究動向、医学会での手術シミュレータへの反応、今後の導入などに関する調査・情報収集を行った。

[研究]

変形手法として、有限要素法(FEM)を中心として研究を進めている。

FEMでは一般的に、連立一次方程式を解く必要がある。そこで、4-2の高速演算処理装置の研究と共同し、各数値解法(反復法)を線形FEMモデルに導入した場合の、変形計算の処理速度の比較を行った(表4-3-1,図4-3-1)。ヤコビ法、SOR法ではモデルのノード数が少なければ収束するが、表のモデル(11 x 11 x 11)程度の規模になると、計算が収束しなくなる(1000回で計算打ち切り)。CG法と、ICCG法においては、ノード数に関わらず、若干ICCG法の方が処理時間は短い結果となった。(図4-3-2)。

また、上記の線形FEMモデルでは静的変形だが、動変形(時間応答性)を行うために、線形FEMモデルに粘性、慣性を取り込む研究を行った。このとき、離散時間系に伴う数値不安定性や処理速度の観点から、時間積分法について、いくつかの手法の評価を行った(表4-3-2)。今回の結果から、リアルタイム変形手法として適する手法はルンゲ・クッタ・ギル法と考えている。ただし、処理速度においては未だ不十分なため、並列化等により処理を発展させていく必要がある。

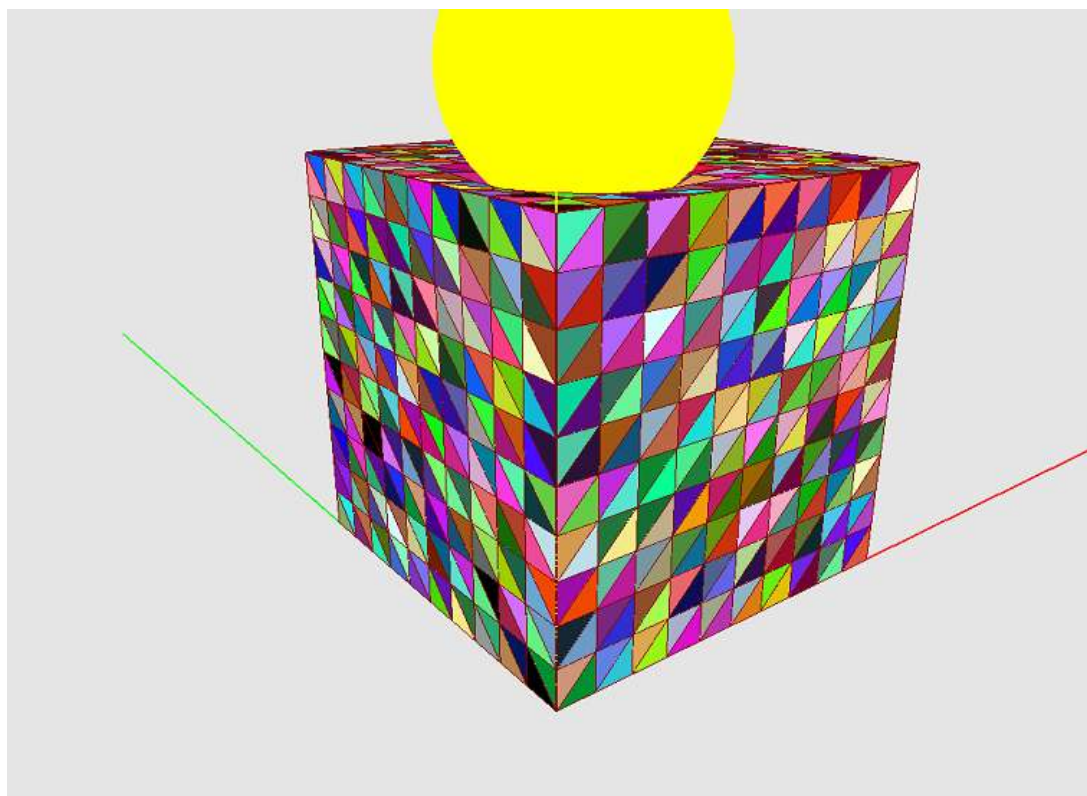


図4-3-1. テストプログラム(11 x 11 x 11)

表 4-3-1. モデル 11×11×11, 接触時の拘束条件：変位

	ヤコビ法	SOR 法	CG 法	ICCG 法
最大繰返し回数	—	—	258	198
最大処理時間[s]	—	—	0.29	0.27

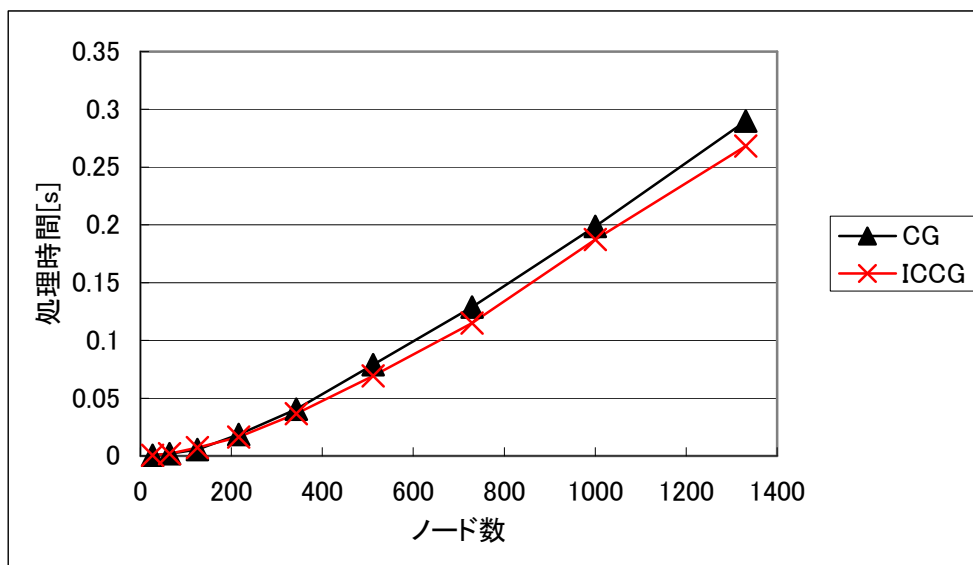


図4-3-2. 変位拘束条件におけるノードと処理時間の関係

表 4-3-2. 時間積分法の評価

手法	精度(誤差)	安定性	処理速度	総合評価
修正オイラ法	△ (0.34)	△	○ (9[ms])	×
改良オイラ法	△ (0.34)	△	○ (9[ms])	×
ルンゲ・クッタ法	○ (0.00007)	×	○ (12[ms])	×
ルンゲ・クッタ・ギル法	◎ (0.00002)	○	○ (12[ms])	○
アダムス・バッシュフォース法	×	×	○ (7[ms])	×
台形則法 (予測・修正子法)	△ (0.17)	○	×	×
アダムス・ムールトン法 (予測・修正子法)	○ (0.01)	△	×	×
ミルン法(予測・修正子法)	×	—	—	×
タステイン法	△ (0.17)	◎	×	△
クランク・ニコルソン法	×	◎	×	×
差分法(加速度:後退、 速度:後退)	×	◎	×	×
差分法(加速度:後退、 速度:前進)	×	○	◎ (4[ms])	△

※ミルン法の場合、精度検証時、細かい振動が見られるため、不適とした。(図 4-3-3 b))

※安定性・処理速度の検証実験は図 4-3-1 と同じモデルを使用した。

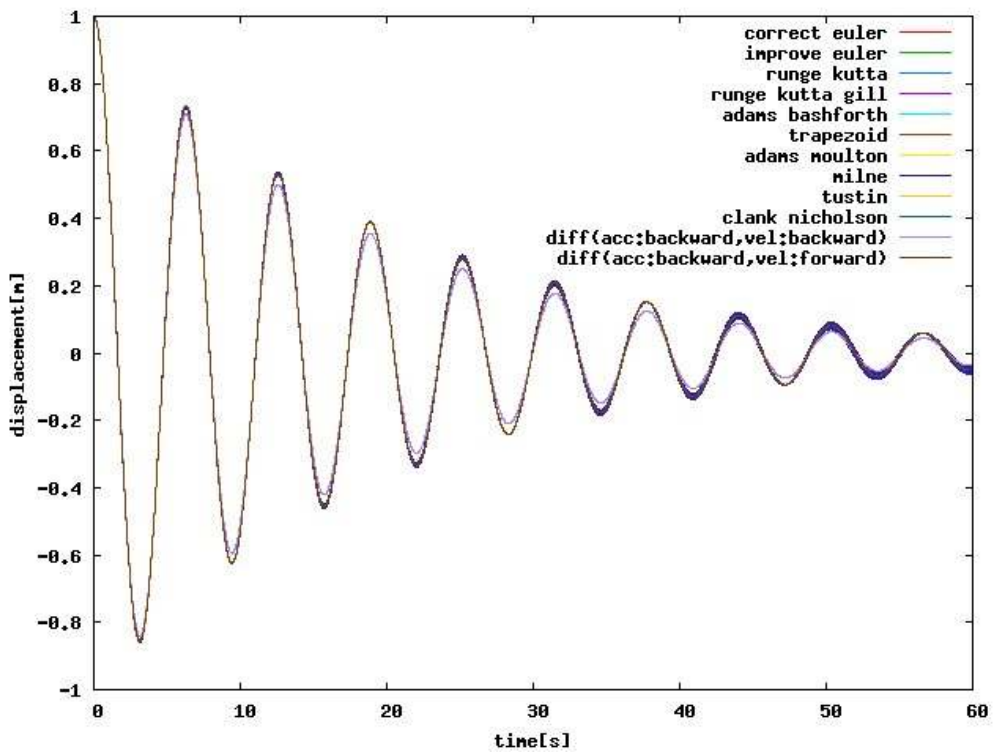


図 4-3-3 a). 精度検証実験(1 質点モデルによる減衰振動)
質量 1[kg],バネ定数 1[N/m],粘性係数 0.1[n/(m/s)]

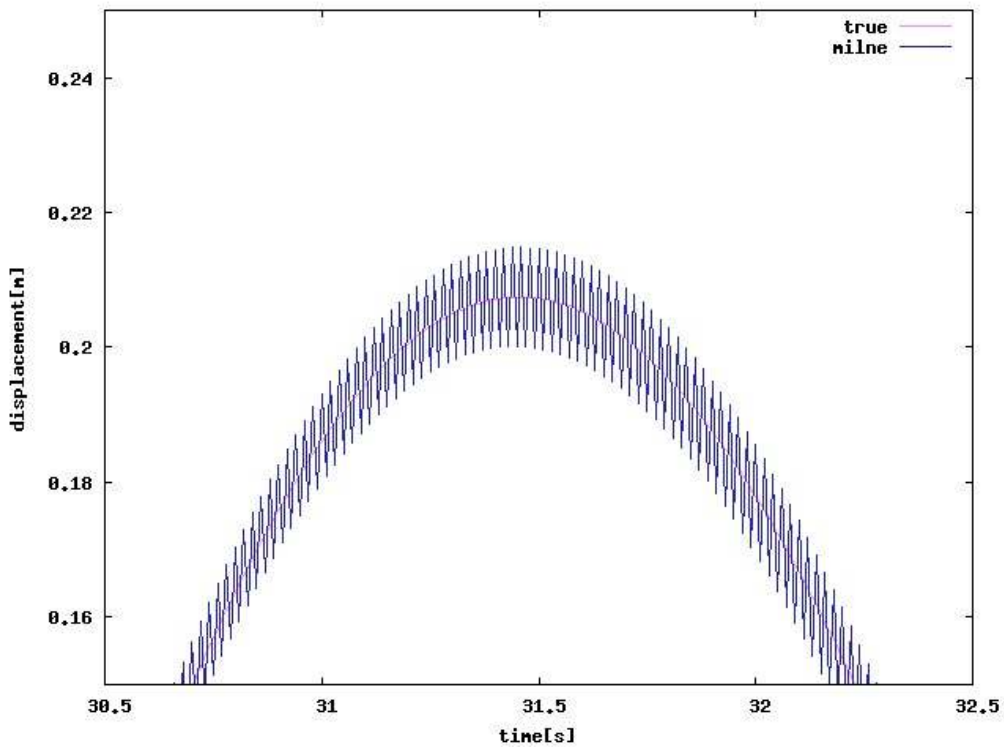


図 4-3-3 b). 精度検証実験(1 質点モデルによる減衰振動) : ミルン法

その他、ボリュームに基づく触覚提示手法に関して有効と思われる、セルラオートマトン法、VolumeHaptization 法、SphereFill モデル、Particle 法などに関し検討を行った。触覚の計算では、対象となる物体と操作物体との接触（重なり）を計算する「干渉計算」が必要であるが、複数の物体を対象とするには多くの処理時間が必要となり、従来手法では一長一短があり、そのまま適用するには難しいことが分かった。

[開発（システム構築）]

図 4-3-3 に示すような、パラレルリンク型 3 自由度ハプティックデバイスを 2 台用いた手術シミュレーション装置（模擬術具部）の製作を行い、単体での動作確認試験を行った。装置の諸性能を表 4-3-3 に示す。装置の機能・性能は概ね所期の目的を達成したが、機械的ガタがありまだ改良の余地がある。また本年度、VG クラス装置と接続しての動作確認試験を予定していたが現在未実施であり、平成 18 年度早急に行う。



図 4-3-3 手術シミュレーション装置（模擬術具部）

表 4-3-3 手術シミュレーション装置ハプティックデバイス性能

項目	性能
1. 可動範囲	並進 3 自由度：150mm×150mm×150mm
2. 発生力	最大 10N（可動範囲中央にて）
3. インタフェース	USB2.0
4. 更新レート	1000Hz

4-3-3 まとめ・今後の課題

[全体]

変形手法として、有限要素法を中心として研究を進めている。

有限要素法でも、時間積分法に関しいくつかの手法が提案されており、各手法に関し数値精度と計算に要する時間等を実測した。その結果、本システムとして、精度が高く処理速度も比較的速い「ルンゲ・クッタ・ギル法」などをさらに研究することとした。しかしながら従来どおりの手法では処理速度の面でまだ不十分であることも判った。

これに対して、サブテーマ2にて言及している「高速演算処理装置（GPUクラスター）」を用いた並列分散処理を行うことで中間目標を達成できると考えている。

さらに、解の収束に関して時間の低減が見込まれる「マルチグリッド法」などの新しいアルゴリズムの導入も視野に入れて今後の研究を進める。

その他、ボリウムに基づく触覚提示手法に関して有効と思われる、セルラオートマトン法、VolumeHaptization法、SphereFillモデル、Particle法などに関し検討を行った。触覚の計算では、対象となる物体と操作物体との接触（重なり）を計算する「干渉計算」が必要であるが、複数の物体を対象とするには多くの処理時間が必要となり、従来手法では一長一短があり、そのまま適用するには難しいことが分かった。

このため、当初予定していた、従来手法をプロトタイプ機に実装しての確認が未実行となった。平成18年度は、上記手法を中心に本装置に適した提示手法を構築し早急にプロトタイプ機での確認を行う予定である。

[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]

ボリウムに基づく触覚提示手法に関して、有限要素法を中心に、マルチグリッド法、セルラオートマトン法などの研究を行った。

[開発（システム構築）]

パラレルリンク型3自由度ハプティックデバイスを2台用いた手術シミュレーション装置（模擬術具部）の製作を行い、単体での動作確認試験を行った。

4-4 総括

研究全体を「要素技術研究・開発フェーズ」（平成16年、17年度）、「システム統合化フェーズ」（平成18年度以後）と捉え実施している。要素技術研究・開発フェーズでは、手術シミュレータを構築する基礎技術の研究開発を各サブテーマ毎に実施し、その解決すべき技術課題、技術の過不足を明確にした。平成17年度の研究開発を終え、平成16年度から実施してきた前半の要素技術研究開発フェーズを終えた。これらの成果により、中間目標を達成する基盤技術の開発はほぼ終了したと考える。

平成17年度の研究開発の成果を、サブテーマ横断的に総括すると、

- (1) MRI および CT を基にしたモデルデータ生成法に目処をつけた。
- (2) 実時間での生体モデルの力学計算法に目処をつけた。
- (3) 実時間で力学計算、表示および力覚呈示を行う計算システムに目処をつけた。
- (4) 手術のシミュレーション対象（模擬手術内容）明確にした。

などである。

平成18年度は、これらの要素技術を統合して手術シミュレータ第一次試作を行い、中間目標を実現する予定である。図4-4-1に第一次試作する手術シミュレータのブロック図を示す。

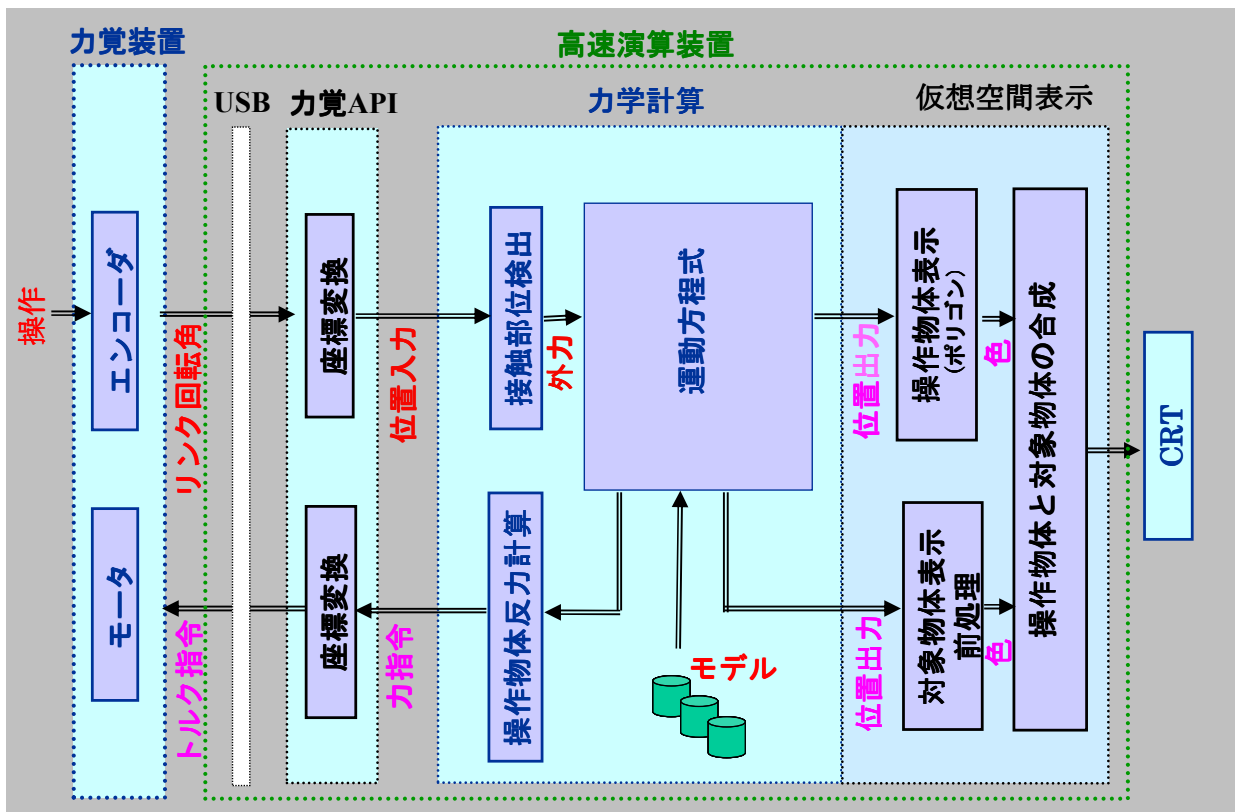


図 4-4-1 手術シミュレーション装置ブロック図

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

- (1) 平成17年8月18日： 情報処理学会、講演会
グラフィックスとCAD研究会
タイトル：イメージ合成装置を用いたシミュレーションと可視化の並列処理
における通信コストの評価
著者： 緒方 正人、菊川 孝明、梶原 景範
- (2) 平成18年1月19日： 情報処理学会、講演会
ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム (HPCS2006)
タイトル： An Evaluation of Communications Cost for Simultaneous Processing with
Simulation and Visualization using an Image-Composition Device
著者： Masato Ogata, Kagenori Kajihara, Takaaki Kikukawa, Takafumi Terada
- (3) 平成18年3月7日： 理研、講演会
理研シンポジウム生体力学シミュレーション研究
タイトル： 「生体ボリュームデータに基づく手術手技訓練システムの開発」
著者： 緒方 正人、寺田 尚史、菊川 孝明、本郷 新
- (4) 平成18年5月掲載予定： 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム
(ACS14)、Vol.47 No.SIG7
タイトル： An Evaluation of Communications Cost for Simultaneous
Processing with Simulation and Visualization using an
Image-Composition Device
著者： Masato Ogata, Kagenori Kajihara, Takaaki
Kikukawa, Takafumi Terada