

平成16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17年5月

情報通信研究機構

# 平成16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	6
2-1	研究開発課題の概要	6
2-2	研究開発目標	8
2-2-1	最終目標	8
2-2-2	中間目標	9
2-3	研究開発の年度別計画	10
3	研究開発体制	12
3-1	研究開発実施体制	12
4	研究開発実施状況	13
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	13
4-1-1	概要	13
4-1-2	実施状況	13
4-1-3	まとめ・今後の課題	16
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	17
4-2-1	概要	17
4-2-2	実施状況	17
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	20
4-3-1	概要	20
4-3-2	実施状況	20
4-3-3	まとめ・今後の課題	24
4-4	総括	25
5	参考資料・参考文献	26
5-1	研究発表・講演等一覧	26

## 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（共同研究者）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。

本年度は、これらの研究開発項目のうち、その基礎となる以下の項目に関して研究を行う。また、初年度であるので、共通の研究機材（主に計算機）の設置・整備も同時に行う。

#### 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」  
主に前記技術課題の⑤の解決を図り、本年度は、

- ① 高現実感高速表示法の方式検討を行う。
- ② VG クラスタを構築し、現在実装しているボリュームグラフィックス技術を基にして、上記検討方式の評価実験を行う。

#### 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」  
主に前記技術課題の①、②、③の解決を図り、本年度は、

- ① 生体データからシミュレーション用ボリュームデータ生成手法に関して、現有方式での実現性を検討、および実験を行う。
- ② 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として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、共有できるアーキテクチャに関して検討する。

#### 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」

主に前記技術課題の④、⑥の解決を図り、本年度は、

- 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方式検討をおこなう。特に、10fps 以上で力学シミュレーションが可能なボリュームデータ変形手法を検討する。
- ② ボリュームに基づく触覚提示手法の検討を行う。



## 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18年1月末）

以下の項目に関しては平成18年1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)

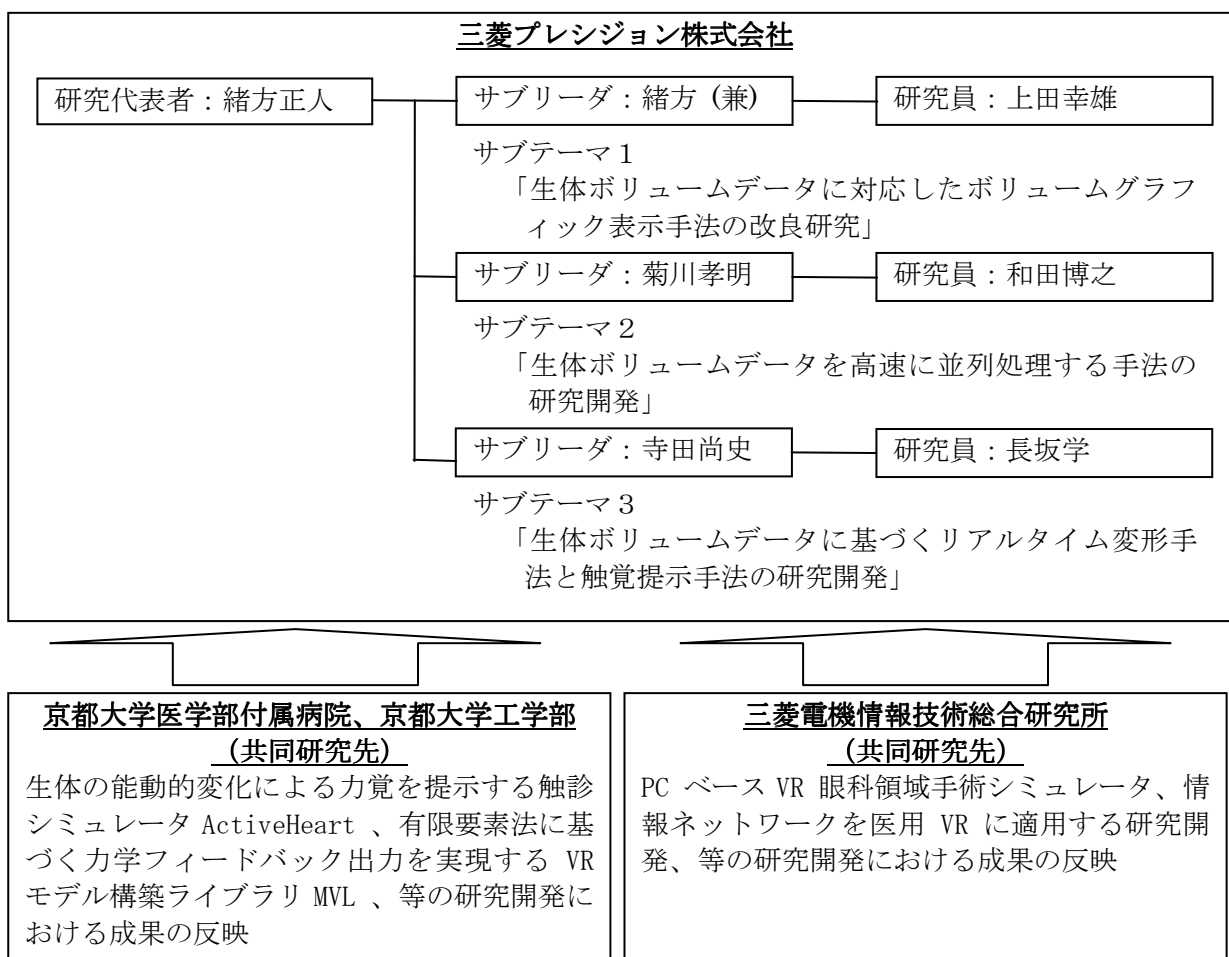
研究開発項目	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	計	備考
生体ボリュームデータに基づいたネットワーク型VR手術手技教育訓練システムの研究開発			▽中間評価			▽最終評価	
サブテーマ1 「生体ボリュームデータに対応したボリュームグラフィック表示手法の改良研究」					→		主に、労務費
(1) 高現実感を持つ実時間映像発生手法		→					
(2) 並列化					→		
サブテーマ2 「生体ボリュームデータを高速に並列処理する手法の研究開発」					→		主に、労務費
(1)計測データから必要な属性の抽出		→					
(2)計測データを用いたシミュレータ用モデルデータ生成手法			→				
(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					→		

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)実時間でのシミュレーション							
(2)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)試作							
(2)評価							
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



## 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) 可視化情報学会

3次元表示技術の動向調査・技術習得

##### (a) 可視化手法(等値面、ボリュームレンダリング)

三次元スカラデータ可視化手法として、間接ボリュームレンダリング法である等値面生成と直接ボリュームレンダリング法の解説。

##### (b) グラフィックス・ハードウェア

GPUの台頭による利用技術に関する解説。適切な利用によりGPUは通常のCPUの数10倍程度の性能がでる場合がある。

##### (2) 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。

##### (3) Electronic Imaging2005

手術シミュレータ、および医用画像を中心とした3次元表示技術(特に計測データからの医用3次元画像再構築手法等)の動向調査

特に、医用画像データを高臨場感で立体表示する装置(「CAVE」等)に関する調査実施した。

##### [研究]

上記の調査を元に、ソフトウェアによる高速表示手法とハードウェアによる高速表示手法の検討・実験を行った。また、これまで研究開発を行ってきたVGクラスタ上での表示技術の改良研究と、本年度新たに構築したシステム上での処理性能確認等を行った。

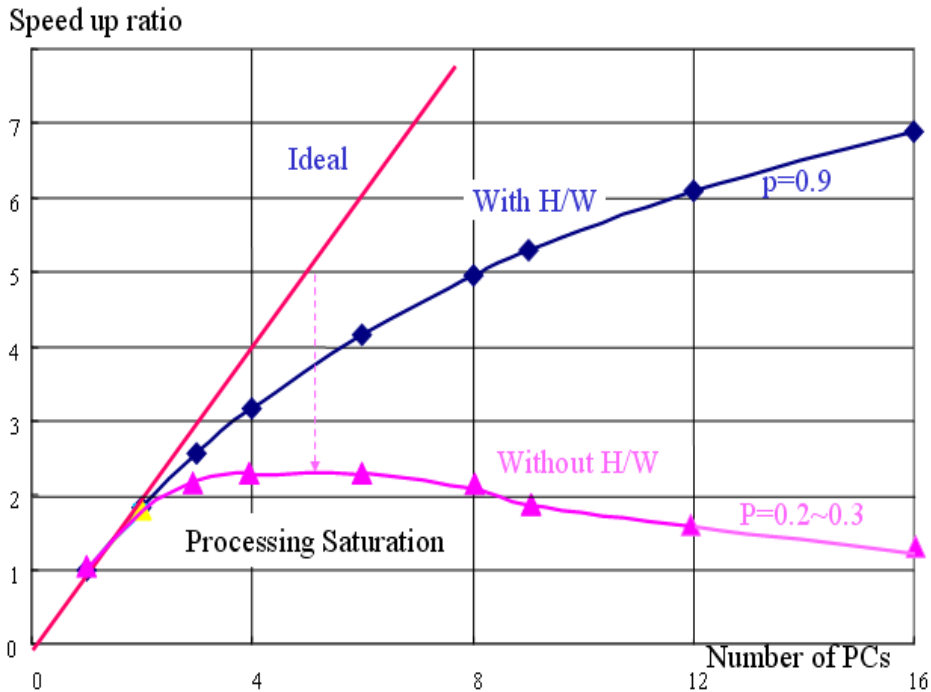


図 4-1 並列処理数の処理速度の関係

図 4-1 は、プロセッサ数を増やした場合の、スピードアップ率とプロセッサ数の関係を示した実験結果である。専用画像合成装置を用いた場合と汎用ネットワークによる画像合成の場合の効率を比較している。汎用ネットワークによる場合は等価的な並列化可能率が 0.2-0.3 であるが、専用画像合成装置を用いた場合は、等価的に並列化率が 0.9 と改善されている。

[開発 (システム構築) ]

2 台のサーバ計算機と 8 台の計算ホスト計算機 (CPU : Xeon) からなる PC クラスタシステムと弊社独自開発の「マージ装置」を組み合わせた、「VG クラスタシステム」を製作した。OS は LINUX を採用し、PC クラスタコンソーシアムで開発されたクラスタシステムソフトウェア SCore を実装した。また、各計算ホスト間のデータ転送には、高速転送が可能な「ミリネット」を採用した。図 4-2 に VG クラスタシステムのシステムブロック図を示す。また、図 4-3-1 に今回新規に構築した VG クラスタシステムの外観を、図 4-3-2 に既存の VG クラスタシステムの外観を示す。

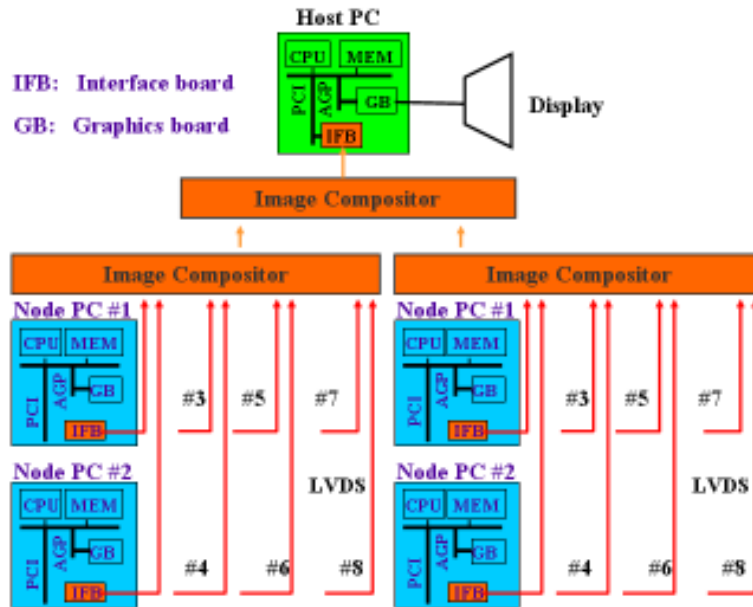


図 4-2 VG クラスタシステムブロック図



図 4-3-1 新規 VG クラスタシステム外観



図 4-3-2 既存 VG クラスタシステム外観



### 4-1-3 まとめ・今後の課題

#### [全体]

CT、MRI などによって取得された生体ボリュームデータを表現する手法として、「ボリュームデータ」が使われている。しかし、実用化されているものはどれも小規模なデータを対象としており、大量のデータを処理・表示することは困難であった。特に手術シミュレータにおいては、大規模データのリアルタイム可視化が重要であり、また、力学シミュレーションに対応した形状の変形に対応した実時間表示も必要である。このため、本研究では、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、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基盤としようとしている。このとき、並列シミュレーションに伴う計算およびレンダリングに必須なデータ通信の影響から PC の台数効果が得にくい。今年度の基礎実験により、「画像合成装」がこの悪影響を緩和して台数効果を得ることが可能であることを確認した。 今後は、サブテーマ 2 での高速演算装置との連携により、シミュレーションに伴う通信の影響の削減を考慮する必要がある。また、本研究の大きな目標であるポリゴンとボリュームの表示を実施する。

#### [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しようとしている。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。このとき、並列シミュレーションに伴う計算およびレンダリングに必須なデータ通信の影響から PC の台数効果が得にくい。「画像合成装」がこの悪影響を緩和して台数効果を得ることが可能であることが実験より確認できた。

また、ボリュームグラフィック表示と従来のポリゴン表示を組み合わせた手法の研究を実施中であり、ボリュームから等値面 (ポリゴンにより近似) をオンザフライで抽出する方法は確立した。 次年度から、ボリュームの GPU での表示、ポリゴンとの混在と発展させる。

#### [開発 (システム構築) ]

新しい「VG クラスタシステム」を構築することで、これまで製作したシステムと、リースをしているシステムをあわせ 3 台の「VG クラスタシステム」が整い、各グループ毎に 1 台ずつのシステムを整備することが出来た。また、3 台のシステムを統合して、より並列度の高い「VG クラスタシステム (24 並列)」を構築することが可能となり、様々な実験・評価が出来るようになり、次年度以降の研究開発に役立つものと考ええる。

## 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。

本年度の研究テーマ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) Electronic Design and Solution Fair 2005

高速演算処理装置 (FPGA) に関する技術動向調査・技術習得

##### (a) 大規模数値計算のための、ASIC による専用計算機の作成

大規模数値計算が必要な分野は、例えば、素粒子物理学、天体物理学、物性物理学、構造解析などがあり、大規模計算を処理するために、計算方法を工夫して高速化する、あるいは最適な超高速計算機を作ることが考えられる。

##### (b) FPGA ベースの専用計算機 (Reconfigurable System)

FPGA ベースでの専用計算機のアーキテクチャ上の得失についての報告。

FPGA にする理由は、専用計算機に実装するアルゴリズムの専門家は、計算機の専門家でないためである。このような仕組みで専用計算機を作る研究が広がりつつある。

#### (2) MPI 並列処理プログラミング講習会

並列処理ライブラリに関する技術講習

MPI は並列プログラミングの標準言語規格であり、C または Fortran 用にライブラリとして提供されている。

分散メモリ型並列コンピュータにおいて、それぞれの PC 間で必要な情報をメッセージとして送受信するライブラリを提供する。これを使うことによって実装する機器に依存しない、並列計算アルゴリズムの実現が可能である。

#### (3) Super Computing 2004

高速表示手法・高速演算処理装置に関する技術動向調査・技術習得

(4) 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。今後も本件に関して、協力体制を維持していく予定である。

(5) 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。

(6) 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

(7) Electronic Imaging2005

手術シミュレータ、および医用画像を中心とした 3 次元データ計測技術 (特に医用 3 次元画像再構築手法等) の動向調査を実施した。

CT、MRI、PET などのデータから、画像を再構成する手法に関する発表であった。取得したデータの帯域に応じて効率よく処理する手法や、データに含まれているノイズを軽減する手法として、「ウェーブレット変換」を用いた方法の提案が多い。

(8) 医療画像シンポジウム (Future CAD)

医療診断を目的とした、医療画像処理・3 次元画像再構築手法等の調査  
特定領域研究「多次元医用画像の知的診断支援」の国際公開シンポジウムで、多次元画像からの複数臓器同時抽出手法など、最新の研究内容が発表された。

(9) 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。

[研究]

(1) セグメンテーション

現在、実用化されている画像認識法を評価した。半自動での処理が主流であり、二次元画像間で、領域分離を行い、これをスライス方向に積層、接続して 3 次元に構築していく手法が主流である。この領域分離を行う方法に SNAKE 法などが広く用いられている。最近は、この領域分離に遺伝的アルゴリズム等の適用が研究されている。以上の調査を基に、各種手法の特出を調査した。血管等の複雑な部位の抽出には、SNAKE 法に代表される方法は十分でなく、遺伝的アルゴリズム等が良好な成績を上げている。これらを基に、次年度、評価システムを開発する。

(2) 高速演算処理装置

予備評価により、実時間力学シミュレーションには、従来の VG クラスタを 3 桁

高速にする必要があることが判明している。このために、専用計算機を開発する必要があると判断している。この、アーキテクチャの概略構成を設計した。基本アイデアは、大規模な連立方程式  $AX=F$  を解くとき、この A における要素の対角位置への偏在を利用したものである。このとき、上記計算を行方向（複数の行）に並列化して計算し、隣接する行間のデータ転送はシフトで行う、対角から離れたものは、その頻度の少なさからブロードキャスト通信により行うことを基本として、通信コストを削減する。この概略設計を確認するために、GPU による検討を実施した。また、GPU への実装を一部行った。

#### [開発（システム構築）]

VG クラスタに実装しているグラフィックスボードの GPU に、連立方程式の実装の仕組みを構築した。これで、全ての VG クラスタの GPU を統合して、計算に使用可能である。次年度より、高速演算処理装置の設計および確認に活用できる体制を整えた。

### 4-2-3 まとめ・今後の課題

#### [全体]

CT、MRI によって取得されたデータは、一般に「DICOM 形式」で提供される。このデータから、画像を再構成し、さらに特定の臓器を切り出す（セグメンテーション）ための方式の検討を行っている。セグメンテーションに関してはまだ多くの課題が残っている。

但し、サブテーマ 3 とも関連して、実時間シミュレーションには現システムでは性能が不十分であることを確認し、専用の「高速演算処理装置」の研究に着手し、次年度以降の研究開発の道筋を作ることが出来た。本、高速演算処理装置の開発は、テーマ 3 とも強く関係する。

#### [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。特に FPGA と GPU を用いた高速演算処理装置に関する技術習得・情報収集が出来たことは大きな成果である。

#### [研究]

高速演算処理装置として研究が進んでいる FPGA (Field Programable Gate Array) と GPU (Graphic Processor Unit) の比較検討を行い、FPGA を用いた処理手法の研究とアーキテクチャの設計を開始した。これにより次年度以降の研究開発の道筋を作ることが出来た。

#### [開発（システム構築）]

VG クラスタに実装しているグラフィックスボードの GPU に、連立方程式の実装の仕組みを構築した。次年度より、高速演算処理装置の設計および確認に活用できる体制を整えた。

## 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

本サブテーマも、サブテーマ1および2と同様に、非常に大量なボリュームデータを用いて、リアルタイム性を維持しながら、その変形・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、一般的に力覚の生成には、計算更新レートが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とされている。ハードウェアに関しては、サブテーマ2で主に扱うこととし、本研究では、ソフトウェア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る。

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。

### 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) バイオメカニズム学会

生体の力学、医療用ハプティックデバイスに関する技術動向調査・技術習得

#### (2) 計測自動制御学会 SI2004

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

##### (a) 「医療におけるスキルサイエンス」セッション

「有限要素法に基づく軟組織変形破断モデルによる剥離表現の評価」、「医療手技訓練VRシミュレータの現状と展望」は役に立つものであった。

##### (b) 「ソフトアクチュエータとその応用」セッション

イオン導電性高分子を用いた人工筋アクチュエータなどに関する発表が多くあり、今後の可能性を感じさせた。新しいタイプのハプティックデバイスへの適用も考えられ、注視して行きたい。

##### (c) 「力触覚とVR」セッション

「FPGAによる仮想レオロジー物体のリアルタイム変形計算」は、手術シミュレータの構築で目指しているものと類似しており、今後も注意していく必要がある。

#### (3) 千葉大学フロンティアメディカルシンポジウム

最新治療機器、医療教育、手術シミュレータ当に関する技術動向調査

##### (a) 医療側による開発ニーズ発表

「手術訓練用シミュレータの教育応用」では、今後バーチャルリアリティ技術を用いた医療トレーニングが急速に進展していく必要があるとの話があった。

##### (b) 発表者と参加者との意見交換

医療機器においては、大学・研究所で開発された技術を事業化するためには、薬事法、医療承認などの壁のために、非常に難しい所があり、今後その壁を破る規制緩和や、連携が重要であるとの話が出た。

(4) VR ラボシンポジウム

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・技術講習

(5) IEEE VR 2005、World Haptic 2005

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)、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

(a) 「GPU Accelerated Surgical Simulators for Complex Morphology」

外科手術シミュレータでは、複雑な形態をシミュレートする必要が高まっており、汎用 GPU を用いて、変形計算を高速に処理することを提案している。対象となる生体の力学モデルは、バネ質点モデルであり、これの差分法による解法は MPC 技術と同等であった。さらに、対象表面の表示は、マーチングキューブ法で再構成している。

ただ、質点の配列は MPC では正方格子であり、1つの格子点が6つの隣接する格子点を持つのに対し、当論文では、1つの質点が18点の格子と接続されるように配置されている。

また、これらの計算は、GPU のバーテックスシェイダー、ピクセルシェイダーにより高速に計算される。結果的に、GPU を使うことで、CPU に比較して 10~30 倍の高速化が示されている。

(6) 京都大学附属病院医療情報部

手術シミュレータ(必要なシステムや、シナリオ等)、粘弾性物体の変形と切断に関する手法等に関する技術習得・情報収集

手術シミュレータ、特にリアルタイム変形手法と触覚提示手法に関する研究を長年行っており、MVL(Medical Virtual reality Library)と言う、臓器間の力学的相互作用を記述するライブラリを公開している。これにより汎用 PC 上で高精度かつ対話的な手術手技シミュレーションが可能となっている。この手法や手術シミュレータに必要な機能・性能に関し、情報交換を行った。今後もリアルタイム変形手法と触覚提示手法高速演算処理装置の研究開発で協力体制を維持していく予定である。

(7) 東工大精密工学研究所

ハプティックデバイスに関する技術動向調査・技術習得。特に USB インターフェースを用いた高速制御ユニットに関する技術習得・情報収集

(8) 三菱電機米国研究所

複数の計算機とプロジェクタを用いた表示手法や、ひざ手術シミュレータの研究開発を行ってきた。表示手法や変形手法の研究開発の情報交換を行った。今後も、研究者と良好な協力関係を維持して行く予定である。

[研究]

上記の調査を元に、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)、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検討を行った。特に、粘弾性物体の変形において用いられている、幾何学的手法(デフォーマブルモデル)、質点-バネモデル、有限要素法による手法に関し、その適用範囲、特徴などの比較検討を行い、今年度作成した簡易ハプ

ティックデバイスにより検証実験をおこなった。

検証実験として、格子状にメッシュを切った四角形モデルに対し、各手法により、変形をさせた時の格子の各接点の変形後の位置計算に掛かる処理時間を比較検討した。その結果を図 4-4-1 から図 4-4-3 に示す。

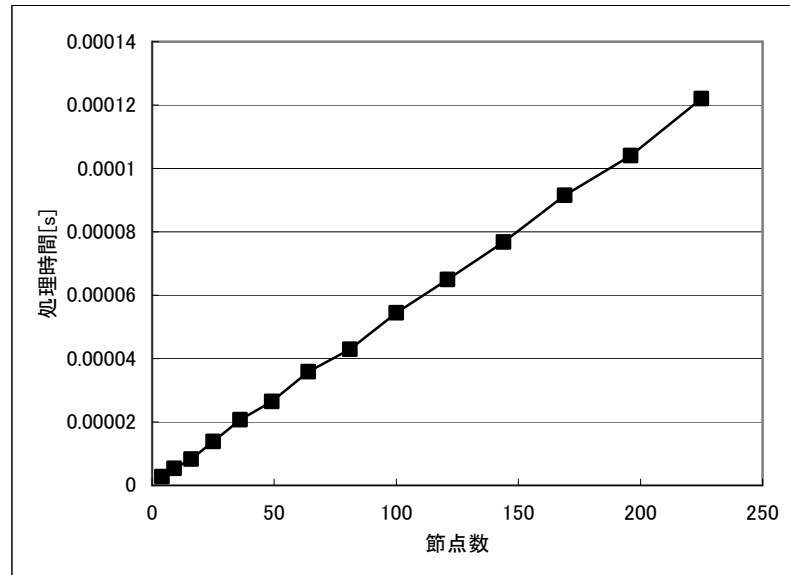


図 4-4-1 幾何学的手法

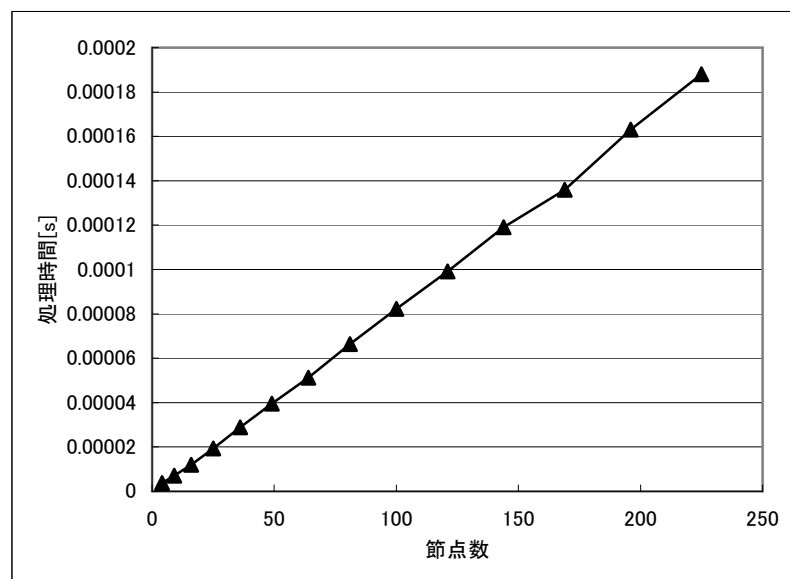


図 4-4-2 質点-バネモデル

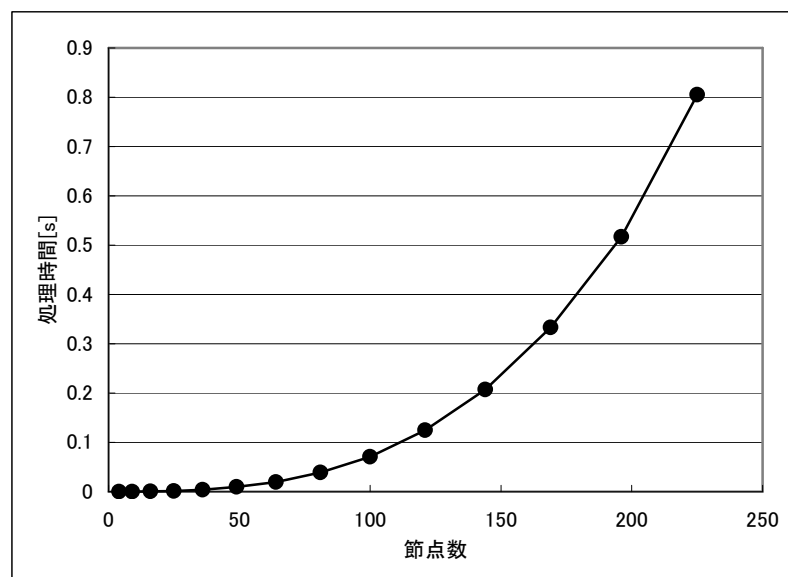


図 4-4-3 有限要素法

[開発 (システム構築) ]

簡易ハプティックデバイス (2自由度タイプ) の製作を行い、上記の検証実験を行った。簡易ハプティックデバイスの諸性能を表 4-1 に示す。また、東工大にて開発された USB インターフェースを用いた高速制御ユニット (基板のみ) を購入した (検証実験は次年度に予定)。

表 4-1 簡易ハプティックデバイス性能

項目	性能
1. 可動範囲	たて : 240mm よこ : 400mm
2. 発生力	最大 30N (可動範囲中央にて)
3. 位置分解能	0.005mm (可動範囲中央にて)
4. インタフェース	USB1.2
5. 更新レート	500Hz

4-3-3 まとめ・今後の課題

[全体]

変形手法として、一般に用いられている手法に関する調査を行い、各手法の特徴・問題点を比較検討した、その結果、目標とするボリュームデータを実時間で処理するためには、現在の計算機能力では不十分であり、1000 倍から 4000 倍の処理能力が必要となることが分かった。

このため、本研究では以下の 2つのアプローチでこの問題の解決を図ることを検討中である。

a. ハードウェア化に適合したモデル手法 (「高速演算装置」に載せるモデル)

計算対象に応じて、フレキシブルな構成が可能な、FPGA を用いて演算を行う方式



であり、この方式に適合したモデルの検討を行った。 詳細設計は来年度実施予定。  
(高速演算装置の研究はサブテーマ2で実施)

b. ソフトウェアによる手法

接触点から離れた位置にある計算要素を削減する手法や、計算時間が長くなっても計算が破綻しない手法が検討されており、本システムにあった手法を検討中である。

また、一般に、変形の計算では、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、そのためにはまず、物体の表面（境界）を確定（定義）する必要がある。これに対し、ボリュームに基づく触覚提示手法は、この「境界」の定義を行わない手法であり、前処理時間の短縮や、切断に伴う再構成などを削減する手法である。いくつかの手法が提案されていることが分かったが、本システムに適用するにはまだ難しい状況であることを確認した。

[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、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・研究動向等を調査することが出来た。その結果、変形手法として、

- a. 幾何学的手法
- b. 質点-バネモデル
- c. 有限要素法

などが提案されており、これらの手法はうえから順に処理時間は長くなる一方、変形と力の計算精度は高くなることがわかった。さらに訓練用シミュレータに十分な性能を求めると、cまたはbによる手法が適しているが、目標とするボリュームデータを実時間で処理するためには、現在の計算機能力では不十分であることが分かった。

[研究]

粘弾性物体の変形において用いられている、幾何学的手法（デフォーマブルモデル）、質点-バネモデル、有限要素法による手法に関し、その適用範囲、特徴などの比較検討を行い、今年度作成した簡易ハプティックデバイスにより検証実験をおこない、処理速度の検証を行うことが出来、次年度以降の研究開発の目処が立った。

[開発（システム構築）]

簡易ハプティックデバイス（2自由度タイプ）を用いて、各手法による力各を提示しながらの比較検討が行えるようになった。

#### 4-4 総括

本年度の大きな目標であった、実験設備の構築は概ね完了し、H16年度研究計画に対して大きな問題はなく順調に推移している。また、H16年度の研究を通して、各サブテーマ間での重複および欠落研究テーマが明確になった。相互に重複する技術に関しては、積極的にこの重複を活用し、テーマ毎の軸足を明確にして関係サブテーマ間で技術の補強を図る。技術の補強（討論等を実施）に当たっては、研究情報の共有を図り、人的リソースの無駄を省きたい。

欠落していた、高速演算処理装置の開発は、実時間でのシミュレーションを可能とするための必須の研究であり、テーマ3に強く関係する（テーマ1、2にも関係あり）。この開発は、アーキテクチャに強い研究者がいるテーマ2のグループが行うこととした。

上述のように、本年度の研究を経て、研究課題が具体的および明確になった。技術的に強い部分は独力での研究開発をおこない、弱い部分に関しては、他組織との共同研究により、人的リソースの欠落を補い、全体として研究の進捗を図る。次年度は、この観点から、生体データ取得/セグメンテーション技術に関して、理化学研究所（和光）と共同研究を行う予定である。

## 5 参考資料・参考文献

### 5-1 研究発表・講演等一覧

- ・研究発表（査読付、国際学会）

ACM, SIGGRAPH2005

「A Real-Time Distributed Display System with Distortion Correction for Multiple Projectors on Quadric Surface Screen」

緒方正人、和田博之、梶原景範（以上、三菱プレシジョン（株））、  
Jeroen van Baar（三菱電機米国研究所）