

研究成果概要

1980年代後半から10年間、ATR「臨場感通信会議」プロジェクトにおいて、実時間3次元ビジュアルコミュニケーションの研究が推進された。その後、臨場感通信会議は、イリノイ・ブラウン大学によるTele-Immersionプロジェクト等、多くの研究を触発した。しかし、それらの臨場感は物体表面のみを3DサーフェスCGを駆使して視覚的に提示されるに留まっていた。

近年、医療ボリュームデータ等を送受信する臨場感通信の研究が始められたが、3次元医療画像列全体をストリームとして送受信しているため、実現には膨大な計算機資源と超高速通信を必要としており、何らかの抜本的な効率化が求められている。また最近では、メディカルロボティクスやバーチャルメディスンと呼ばれる新たな分野も誕生し、生体組織の内部を表すモデリングやシミュレーション技法の重要性が指摘されている。

本研究は、こうした技術課題をクリアし、遠隔多地点間で「**視て触れる**」ハプティックコミュニケーションの実現を目指すものであり、遠隔地点間で、ボリュームモデル化されたリアリティベース仮想環境シミュレータを共有し、最少パラメータ交信による**ボリュームベースの臨場感通信**を実現しようとする新たな試みである。

1. 研究目的

ハプティックコミュニケーションは、生体の弾力など対象に触ることで、初めて理解できる情報を実時間でやりとりすることが非常に新しい点である。遠隔地点間で同時に対象に触る感覚を共有するためには、コンピュータ上に作り出された仮想環境の対象物を中身を持ったボリュームモデルとして表現し、最少のパラメータ交信により、対象物の変形挙動を実世界に忠実にシミュレーションし視触覚情報として提示する必要がある。

ハプティックコミュニケーション実現の最重要課題としては、①効率よく対象の内部を表すモデリング法を構築し、②実世界の現象（例えば皮膚を指で押す際の凹みなど）を観察して、皮膚の弾力を表すような物理特性を自動獲得する方法を確立し、③実世界の現象を忠実に表すシミュレーションを構築し、④これらをリアルタイムで動かすため、最少パラメータ交信手法の確立が挙げられ、⑤これらを医療などの分野において確立することを目的とする。

2. 研究計画・方法

本研究は以下の5項目の研究課題から構成され、代表者及び分担者らにより並行して進めた（口絵資料1参照）：

- ①Adaptive Gridに基づくボリュームデータの適応的モデリングおよびレンダリングの研究
- ②内部計測に基づくリアリティベース・レオロジー物体モデリングの研究
- ③Deformable Adaptive Gridに基づくリアリティベース変形シミュレーションの研究
- ④交信パラメータ（接触・変形操作における手形状・把持物体・パターン）自動抽出の研究

⑤MR 医用ボリュームデータ応用の研究

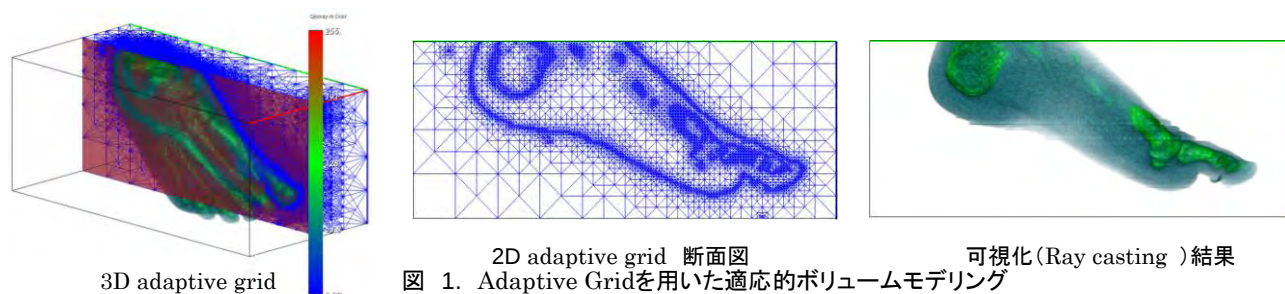
①Adaptive Gridに基づくボリュームデータの適応的モデリングおよびレンダリングの研究

・適応的多重解像度表現生成アルゴリズム (Adaptive Grid) の PC クラスタを用いる実装と評価 (島田・田中) : (口絵資料 2 参照)

分担者らが撮影した肝臓のMRボリュームデータに適用し、PC クラスタに実装した並列アルゴリズムの高速性を評価する。

医用断層画像などから得られるボリュームデータは膨大であり、効率的にタスクを行うために、特徴の変化に応じて適応的に入力ボリュームデータを圧縮し表現できる、多重解像度ボリューム表現法が必要とされる。我々が開発した規則四面体ベース Adaptive Grid は、規則格子を定義する同一のボクセル集合のみより、より高精度で高圧縮且つ連続的な近似精度(親子レベル間の近似精度の比が 1:2)を持つ多重度解像度表現を生成する並列アルゴリズムである。

1) ボリュームデータの一次および二次微分の変化に適応する四面体ベース Adaptive Grid アルゴリズムと、2) 各四面体格子要素を独立に分割する過程で発生する「クラック」と呼ばれる不整合を回避するための再帰的近傍探索アルゴリズム、を開発した。現有の PC クラスタに Adaptive Grid アルゴリズム実装し、並列アルゴリズムの高速性を評価した。図 1 に、可視化専用ハードウェア (Volume Pro) を用いて物体内部を可視



化した結果を示す。

・動的かつ適応的多重解像度ボリューム表現生成アルゴリズムの開発 : (田中・島田・Viet)

これまでのボリュームデータの「静的な」特徴変化に適応的な多重解像度の Adaptive Grid を拡張し、「動的な」特徴変化に適応的に二分割二統合を行う「オンライン リメッシュ モデル」Deformable Adaptive Gridを開発した。図 2(a) (b), (c)のそれぞれに、対象柔軟物体の変形(右端点の移動)に伴う、低解像度表現、高解像度表現、および、提案手法による動的かつ適応的多重解像度表現の精度比較を示す。

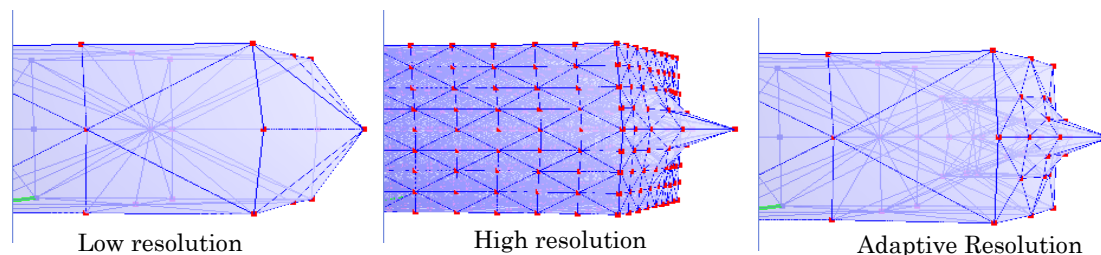


図 2. バイナリ オンラインリメッシュ モデルを用いた変形表現

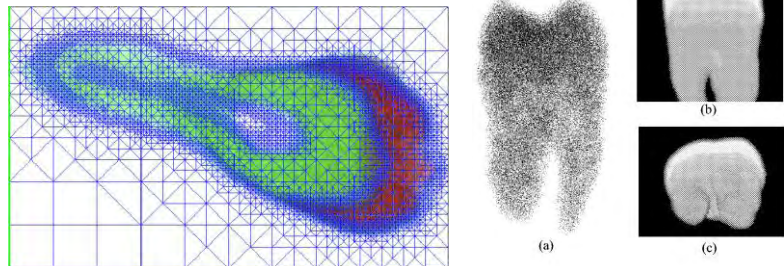
・ボリウムデータの適応的レンダリングの研究（田中覚）（口絵資料 3-1, 3-2 参照）：

Adaptive Grid では、密度値などの場の量が定義される格子点の分布が、空間的に非一様となる。特に物体を変形・切断した場合には、複雑な非一様分布となる。そのため、「非一様に分布した点の上で定義された場の量を適応的に非線形補間する技術」(Adaptive Nonlinear Interpolation)の開発を行った。

図 3 に示すように、この補間により連続的な場を 図 3. 非一様分布の点群上での色場の補間生成すれば、容易に正規格子(regular grid)を生成でき、専用ハードウェア (Volume Pro) で高速可視化できる。



また、(1) ボリウムデータの適応的非線形補間のための「Volume MPU (Multi-level Partition Implicits) 法」と、(2) 微細構造を詳細に可視化できる「Metropolis ボリウム・サンプリング法」を開発した。第 1 に、従来は曲面生成に用いられていた MPU 法を拡張し、ボクセルデータを補間して全空間で滑らかな連続スカラー場を生成する「Volume MPU 法」を開発し、ボリウムデータを高品位に可視化した。第 2 に、ボリウムデータの微細構造を詳細に可視化する「Metropolis ボリウム・サンプリング法」を開発した (IEEE Visualization 2006 で論文発表)。これは、モンテカルロ法を利用して、興味部分を集中的にサンプリング・可視化する手法であり、腫瘍部の微細構造の可視化等に有効である。図 4 に Adaptive Grid に適用した可視化結果を示す。図 4. 適応的 sampling (a) 可視化 (b, c)

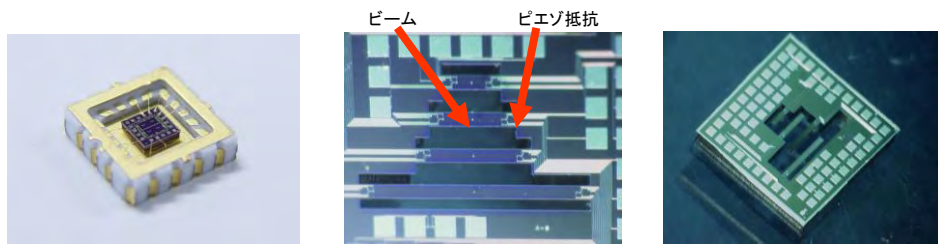


②内部観測に基づくリアリティベース・レオロジー物体モデリングの研究

・柔軟物体埋め込み用マイクロフォースセンサを用いる内部計測（平井・鳥山）

（口絵資料 4-1, 4-2 参照）：

生体などの柔軟物体内部の(レオロジー特性等の)力学量を計測するためには、マイクロセンサの導入が不可避である。そこでまず、図 5 に示す、半球型柔軟指に埋め込み、柔軟物内部の力・モーメント成分を計測することが可能な、第一次ピエゾ抵抗マイクロビーム型フォースセンサ(2mm 角)を設計し試作し、触覚デバイスとしての有用性を確認した。



セラミックパッケージしたフォースセンサの概観
図5. MEMSピエゾ抵抗型フォースセンサの試作
マイクロビーム部拡大図
チップサイズ: 2mm角

さらに, 定格荷重が十分ではなかったので, 図6に示すように第二次設計と試作を行い, 力成分は定格 5000mN で感度 0.2 mV/mN、モーメント成分は定格 800N μm で感度 2.83 mV/(N μm) を達成した. センサチップを埋め込んだ半球型柔軟指 (図7) において静的な接触実験を行い, 半球型柔軟指に加わる力とモーメントを計測できることを確認した.

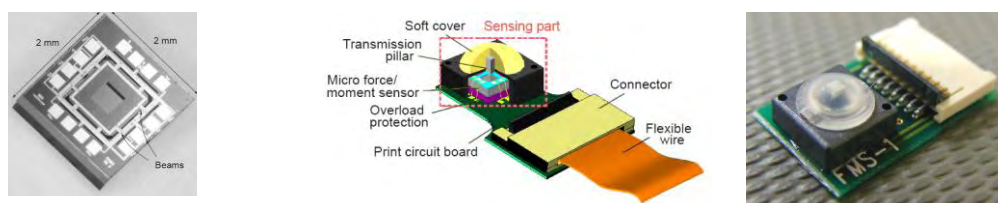
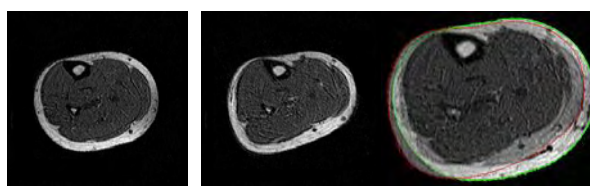


図6. センサチップの第二次試作
図7. 指先力センサ (a)センサの構造 (b) 実装

- MR 画像を用いた内部の変形挙動観測に基づくレオロジー物体モデリング (平井・森川):
(口絵資料4-3 参照)

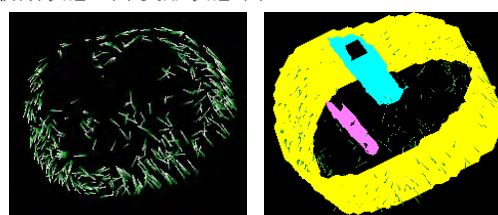
MR画像から生体組織の内部変形を求める手法を確立した. 生体組織の初期状態と変形状態をMR装置で撮像し, 撮像画像間のマッチングから生体組織の変形を計算した. マッチングにおいては, MR画像間の相互情報量と相



(a) 初期状態 (b) 変形状態 (c) レジストレーション

関値を用いた. 図8に, 人の下腿のMR画像から内部組織の変形を求めた例を示す. 初期状態 (図(a), 内部状態 (図(b)) のMR画像は, 組織内部の脛骨が一致するようにレジストレーションされ, 初期状態と変形状態間の剛体変換を取り除く (図(c)).

次に, 初期状態の組織内の各3次元小領域の移動を3次元ボリューム画像間のマッチングにより求め, 相互情報量と相関値を用いて, 各小領域の3次元移動ベクトルを抽出した (図(d), (e)).



(d) 変形の計算結果 (e) 変形の3次元表示

図8. 下腿の内部変形の計算結果

③Deformable Adaptive Gridに基づくリアリティベース変形シミュレーションの研究

- Adaptive Meshに基づく幾何&力学ベース適応的モデリング (田中・島田・平井):
(口絵資料5-1、5-2 参照)

レオロジー物体の3次元変形特性を表すために、幾何及び力学特性に適応的な柔軟物体の変形/切断シミュレーションモデルを構築した。図9に示すように、幾何形状に適応的なAdaptive MeshをDeformable Adaptive Meshに拡張し、変形及び切断に適応的なモデリング法を開発した。

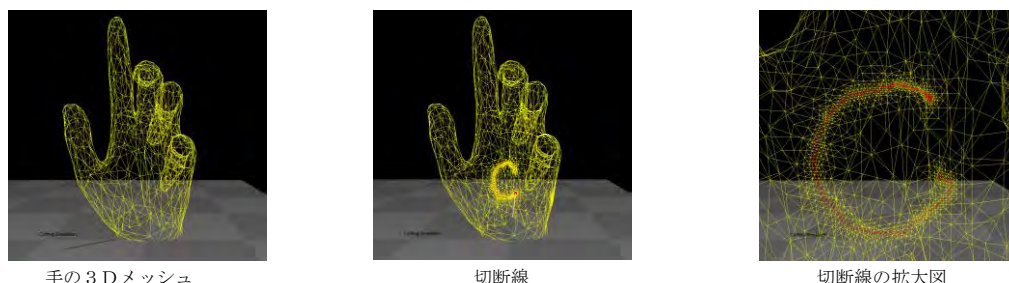


図9. Deformable Adaptive Mesh を用いた仮想切断作業

さらに、3次元の幾何形状に適応的な静的なAdaptive Gridを変形/切断に適応的に格子点を移動あるいは増減するDeformable Adaptive Grid(DAM)への拡張を進め、穿刺シミュレーション

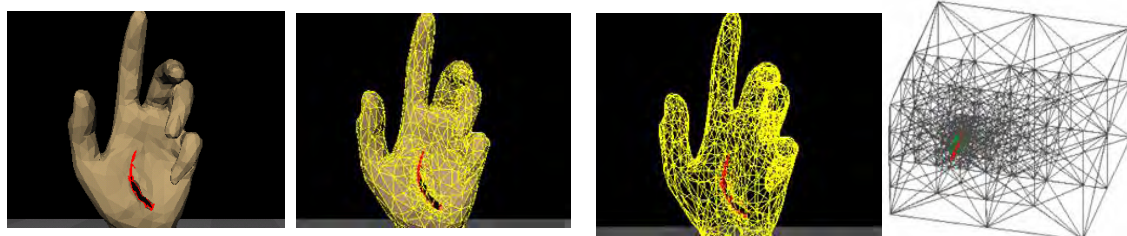


図10. 開口部を生成する適応的切断シミュレーション

図11. 適応的穿刺シミュレーション

に適用した。図10と図11に、開口部を生成する適応的切断シミュレーション結果と、適応的穿刺シミュレーション結果を示す。

④交信パラメータ(物体操作における手形状・把持物体・把持パターン)自動抽出の研究(島田)：

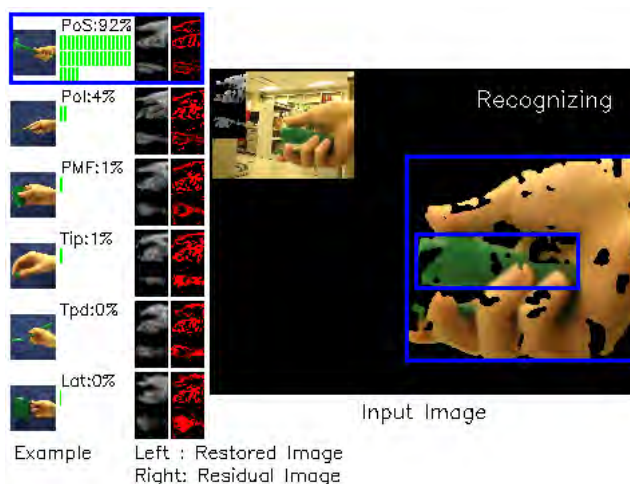
肌色を含む複雑な背景下での、手指ジェスチャならびに人体の姿勢を画像中から検出し認識する法について、1) 手輪郭の変形の学習に基づく方法、2) 遷移ネットワークを用いる方法を開発した。また、電子情報通信学会の研究会において、「動画像を用いた手指の3次元形状の推定」についての研究成果を招待講演として発表した。手指の移動速度が速いため、輪郭が不明瞭となる画像に対し、輪郭形状と位置と速度を特徴とするモデルと位置と速度のみを特徴とするモデルからなる遷移ネットワークを学習することで、形状追跡を可能とした(図12, 図13)。

本研究成果は、
電子情報通信
学会論文誌に
採録された。



図12. 手形状検出結果

図13. 手把持形状と物体認識結果(右図)



⑤ MRによる医用画像の応用

・独立形状を用いた non-rigid 位置あわせ法の開発 (陳, 森川, 来見) (口絵資料 6-1 参照):

低侵襲外科治療において、腫瘍を正確かつ安全に穿刺できるよう、術前に撮影された患部と術中に撮影された患部とを正確に対応をつけるレジストレーションの必要がある。本研究では、肝臓のような変形しやすい臓器の位置あわせのための、ボリュームの変形レジストレーション法を開発し Open MR 手術への実用を目指した。まず、1) 様々な最適化手法をレジストレーションに適用し比較し、2) MI (mutual information) と画像のエッジ情報を利用したハイブリッド評価関数を提案した。3) FFD (Free Form Deformable model)を用いた変形モデルを確立し、ボリュームデータの変形レジストレーションに適用した(口絵資料 6-2 参照)。

さらに、(1) semi-auto で位置あわせができる肝臓ボリュームデータの高速領域分割法(特許申請済)と、(2)少数の CT データから肝臓のボリュームデータを分割し位置あわせなどの正規化と主成分分析による効率的な統計的モデリング法を開発した。

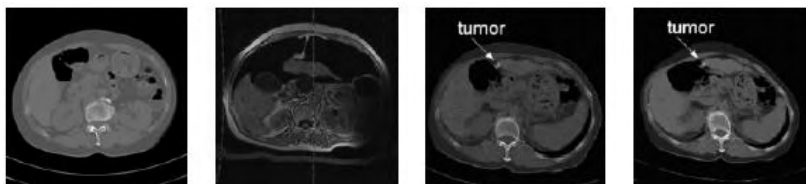


図 14. 位置合せ結果 (a)CT 画像 (b)MR 画像 (c)レジストレーション結果

・穿刺手術ナビゲーションシステムの構築 (山口・森川・来見) (口絵資料 7 参照)

臓器のような軟性組織に穿刺した際に針先端に生じる物理現象を解明し、術中あるいは術前に的確な穿刺軌道を提示可能な穿刺手術ナビゲーションシステムの構築を目指した。まず、穿刺軌道の曲がりの主因子を明らかにするために、OpenMR 装置を用いて非接触で穿刺中の針先端断面を実時間観測し、得られた MR 画像から針先端位置を計測し穿刺軌道の自動抽出法を開発した。まず、穿刺実験用のリニアアクチュエータを用いて、一定条件下(速度、方向)で穿刺実験を行い、針先端形状、直径、穿刺速度、または組織ファントムの硬さなどによる影響を検証し、穿刺軌道の曲がりの主因子を明らかにし、針先端形状を考慮した穿刺反力のモデリングを行い、6 軸力覚センサを用いて穿刺反力を計測、解析することにより定量的評価を行った。

⑥ ボリュームベース臨場感通信システム構築の研究 (口絵資料 8 参照)

(山口 哲, 島田 伸敬, 李 周浩, 才脇直樹, 田中 弘美)

図 15 に示すように、これらの研究成果を統合し、遠隔力覚共有システム構築用ツール(力覚通信用 SD システム「連」)と干渉計算ライブラリ(SmartCollision SDK 一式)を用いて、遠隔 2 及 3 地点間におけるボリュームデータの相触覚共有システムの実験に成功した。

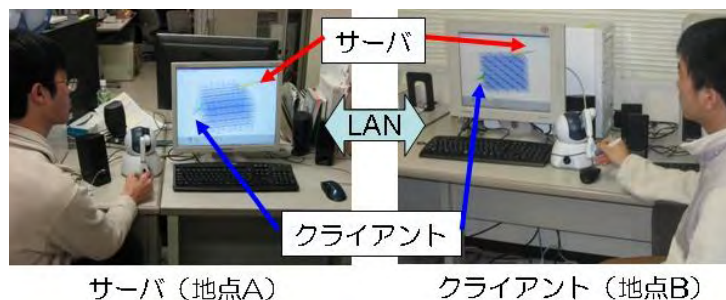


図 15 ボリュームベース臨場感通信実験基盤

3. 研究実施体制

研究開発の実施体制(各研究項目における研究内容と分担者)を以下に示す.

