

超高速体感型シミュレーションシステムの研究

Real-Time Sensable Simulation Systems

富田 眞治 (Tomita Shinji)

京都大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

本研究では、人間がシミュレーションサイクルの中に入り視覚，触覚を通して相互作用を行い，シミュレーションのモデル変更やパラメータ変更を行い，その結果を実時間で体験することのできる超高速シミュレーションシステムの実現にむけた基盤技術の開発と，その典型的な応用問題としての手術シミュレーションシステムの開発を行った。

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：計算機システム・ネットワーク

キーワード：スーパーコンピュータ，仮想現実感，手術シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

従来のスーパーコンピュータを用いた数値シミュレーションでは実時間応答性に関しては殆んど関心が向けられていない。シミュレーションの途中経過の可視化によるモニタリング技術がようやく可能になりつつある段階であり，ましてや，人間がシミュレーション系の中に入り，五感を通して相互作用をし，系自体のモデル変更や境界値などのパラメータ変更を伴うシミュレーションを実時間で実現するシステムは皆無であった。

2. 研究の目的

実行中のシミュレーションに対して人間が対話的に介入可能な実時間性と計算の正確性の両立が求められる領域の問題に対して，実時間性と人間の五感における知覚の分解能のレベルでの計算精度の両立を可能にする仮想体感型シミュレーションシステムの構築と，その典型的な応用分野として期待される手術シミュレーションシステムの実現に向けた基盤技術の開発および実証システムを構築することが目的である。

3. 研究の方法

「超高速体感型シミュレーション環境」の実現に向けて，1)超高速シミュレーション・サーバ・アーキテクチャ，2)実時間触覚フィードバックと実時間可視化を伴うシミュレーション結果提示システム，3)マルチスケールシミュレーション技術を応用した遅延隠蔽手法，の研究を行い，医療分野な

どで期待される次世代シミュレーション環境の実現に向けた基礎研究を進める。

研究環境として，体感型シミュレーション・サーバのプロトタイプシステムを設計・開発し研究拠点の京都大学に導入した。力覚提示装置，手袋型センサ等も購入し力覚提示を伴うシミュレーションシステムの構築に利用した。

4. 研究の主な成果

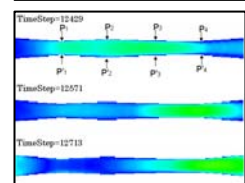
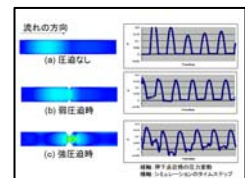
(1) 体感型シミュレーションサーバの構築

2004年の段階で国内最大級のGPUクラスタ・システムを開発し，GPUベースのアクセラレーション技術の先鞭を着けた。また，数値計算と計算結果の可視化処理をネットワーク上での通信競合を抑えて同時並行処理可能なネットワークトポロジを提案した。



(2) 構造・流体連成シミュレータの構築

CPUとGPUの機能分散，ならびに，GPUをベクトルプロセッサと見なした計算アクセラレーションにより，対話性を確保する構造・流体連成シミュレータを構築した。これにより，拍動流に伴う壁の構造変化や，外力（あるいは狭窄など



の病変)による壁の変形が拍動流に与える影響等、流体・構造連成計算の結果が対話的に観測可能となった。

(3) 遠隔インタラクティブ流体攪拌シミュレータ

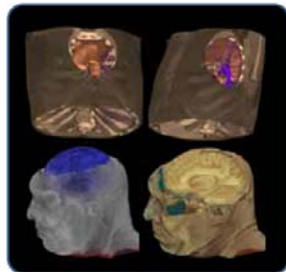
遠隔地の大規模サーバ上のシミュレーションに対して手元の操作端末から実時間インタラクティブを行い操作者が実行中のシミュレーションを体感できる遠隔シミュレーションフレームワークの構築を行った。この際、遠隔地のサーバと操作端末との間の通信遅延を隠蔽するため、操作端末側にも小規模なローカルサーバを設け、両サーバ間に弱い連携を持たせることで、計算精度の確保と通信遅延の隠蔽を行うシミュレーション・キャッシングと呼ぶシミュレーションモデルを実装し、流体攪拌シミュレーションを用いてその有効性を検証した。

(4) 手術手技の連続性を考慮した投機計算モデル

直接法では実時間性が保証できず、反復法でも並列化効果が期待できない問題サイズの構造変形シミュレーションに対して、並列計算機を用いて実時間性を確保するための計算モデルとして、操作の連続性を仮定したパターン予測と、予測された複数のパターンに対して投機的に計算を行う投機計算手法を確立するとともに、負の投機効果を抑制する投機アルゴリズムを開発した。

(5) ボリューム像の実時間対話操作手法

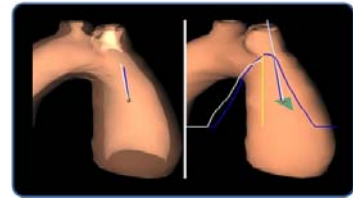
手術時に想定される軟組織の物理的な変化をシミュレートし、インタラクティブにボリューム像上に描出する方法論を開発した。体表に対する切開と開創、触診や圧排などによる臓器変形を有限要素法に基づいてシミュレートできる。開発システムに患者実測 CT データを適用し、外科医と共に術前計画を想定した実験を行った結果、数例の術式に対する手術時の視野をシミュレートすることができた。



(6) 直腸指診を対象とした熟練医の運指評価と医学生に対する教示

三次元再構成された直腸形状モデルを用いて直腸指診を対象とした熟練医の動作を記録・再生するシステムを開発した。触診時の臓器変形と反力の提示をおこないつつ、操作を記録できる。また、記録した動作に基づき、実際にはみることのできない指診時の熟練医の運指を触覚を通じて訓練医に教示するシステムを開発した。運指の特徴量を抽出して動作の補助としてアノテーションをつけて教示する。医学生を対象とし

た触診訓練を行い、動作教示において、三次元的な運指だけでなく特徴量を伝える



力覚アノテーションを用いた運指の教示
(左:反力、右:速度)

ことで、学習のスピードと持続性を向上させることができることを示した。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

体感型シミュレーションシステムとしての日本最大級の GPU クラスタの構築(2004)、力覚提示を伴う実時間流体攪拌シミュレータ等のシステムレベルの先駆的な実証研究をはじめ、循環器系での血液と組織の両方に渡るシミュレーションを可能にする構造・流体連成シミュレーションなど大きく医療シミュレーションの実現範囲を広げた。また、シミュレーションキャッシング・投機的シミュレーション実行・シミュレーション詳細度制御技術などの開発により、これまで実時間実現が困難であった複雑で大規模な生体シミュレーションを可能とした。

6. 主な発表論文

1. 依藤逸, 野田裕介, 糸直人, 嶋田創, 中尾恵, 森眞一郎, 中島浩, 富田眞治: 操作の連続性を考慮した投機計算を利用するインタラクティブシミュレータ, 先進的計算基盤シンポジウム SACSIS 2009.
2. 橋本健介, 手塚俊作, 森眞一郎, 富田眞治: シミュレーションキャッシングと遠隔インタラクティブ流体シミュレーションへの応用, 先進的計算基盤シンポジウム 2009.
3. M. Nakao, T. Kuroda, M. Komori, H. Oyama, K. Minato and T. Takahashi, "Transferring Bioelasticity Knowledge through Haptic Interaction", IEEE Multimedia, Vol. 13, No. 3, pp.50-60, Jul. 2006.
4. 糸直人, ミッコ・リッサネン, 黒田嘉宏, 中尾恵, 竹村匡正, 吉原博幸, 黒田知宏, 森眞一郎, 富田眞治, 吉村耕治, "力覚に関する注釈付きのVRシミュレータを用いた直腸触診の教示効果の評価," VR医学, Vol.7, No.1, pp.24-36, 2009年3月.
5. M. Nakao, K. Minato, N. Kume, S. Mori and S. Tomita, "Vertex-preserving Cutting of Elastic Objects", IEEE Virtual Reality, p. 377-378, Mar. 2008

ホームページ等

<http://www.lab3.kuis.kyoto-u.ac.jp/project/Sensable/>