マルチフィジックスシミュレーションのための可視化インタフェース

人間環境学専攻 2007/03 修了
56786　榛葉　都
指導教員　広田　光一　助教授

Abstract: Visualization systems offer several advantages, such as the ability to perceive 3D data structures in a natural way. In this paper, we focus on the 'interactivity' which allows the user to intuitively control the object and explore the data in real-time. Now, in medicine, image-guided diagnosis is widely used. Going one step further involves methods that allow physicians to further improve their diagnosis and to plan therapy or surgery by computer simulation. For this kind of medicine, we add interactivity to the visualization system, which allows users' intention interactively in selecting visualization methods, scaling an arbitrary part of the object, changing viewpoint and setting seed points. Furthermore, we explore the interactive visualization method and it make possible for user to take experimental approach for understanding of 3D flow.
Keywords: *interactive visualization, multi-physics simulator, flow visualization*

1．緒　言

近年の医用画像の高精細化により,生体シミュレーションは,従来の理想化されたモデリングによる一般論的な現象解明から,患者個別情報を用いたシミュレーションベースト診断や手術予測を可能にするマルチスケール・マルチフィジックスの研究へと移行しつつある．新たな解析モデルが次々と提案される一方で,その解析結果を直感的に理解する手法が求められている．生体現象の理解を困難とさせている原因は

・異なる要素の相互作用
・3 次元構造 (特に血液の流れ)

である．

本研究では,生理学的に研究が進んでいる心臓を対象にし,その生体現象を直感的に理解するためのインタラクティブ 3 次元可視化インタフェースを提案する．インタラクティブ性により,ユーザは 3 次元対象を自由に操作し,探索し,また,実験的アプローチを繰り返すことでそのデータセットに隠された特性や相互作用を発見することが可能となる．インタラクティブな可視化であるためには,描画速度とユーザからの入力に応じて出力するまでの反応時間が重要なポイントとなる[1]．しかし，インタラクティブかつリアルタイムに描画を行うためには，様々な技術的困難が存在する．本報告では,それらの困難をいかに克服し,ユーザの操作に反応してデータを取得,再描画するシステムの構築を図ったかを述べる．

2．背景と提案フレームワーク

2.1　背景

医用シミュレーションにおいて,インタラクティブ性を備えた仮想内視鏡や頭蓋骨形成手術シミュレーションなどがすでに実用レベルの成功を収めている．しかし,それらは変形を伴わず,リアルタイム性を必要としない．心臓のように,生理現象,構造変形,流体が密接に関連し,空間 3 次元と時間 1 次元の 4 次元系に対して,インタラクティブシステムの構築は試みられていない[3]．

また,理解の難しい流れの表現は可視化の分野においてかねてから議論されているが[2],Bryson らが提案した Virtual Wind Tunnel[1]をはじめとして,3 次元の流れ場構造の直感的理解のためにインタラクティブ性を重視した可視化システムが最近では数多く見られる．

2.2　提案フレームワーク

構造連成を伴う生体現象はインタラクティブ描画が難しく,未だその方法論が確立されていないこと,一方で流れ場の可視化ではその直感的理解のためにインタラクティブ性が重要視されている背景を受け,本研究では Fig.1 のシステムを提案する．データ空間とユーザ空間を結んだ双方向データフローに基づくシステムである．データ特性に対し,可視化手法の適用可能性を検討し,流速データにおいては様々な可視化手法をユーザが選択できるように設計した．対話的システムであるために,実装レベルでは以下に述べるように様々な工夫を要する．

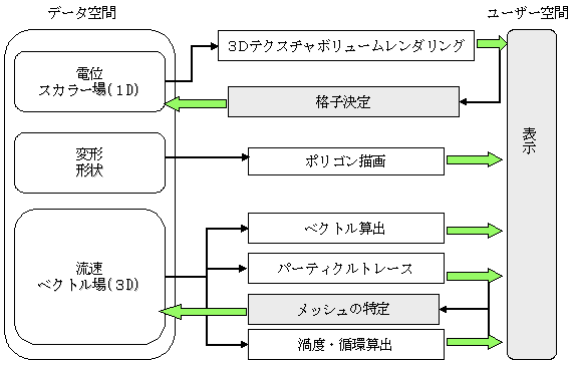

Fig.1　Proposed system process

3．実装

3.1　実装環境とシステム構成

本研究では OS は Windows XP, グラフィクス API は OpenGL, GPU は NVIDIA 社製 GeForce 7800 (256MB) を用い,CPU は PentiumD 3.00GHz (3.12GB)を用い,キーボードによって可視化手法の切り替えを行う．また,物体の操作と計算開始点設定を行うデバイスとして PHANToM を利用した(Fig.2).

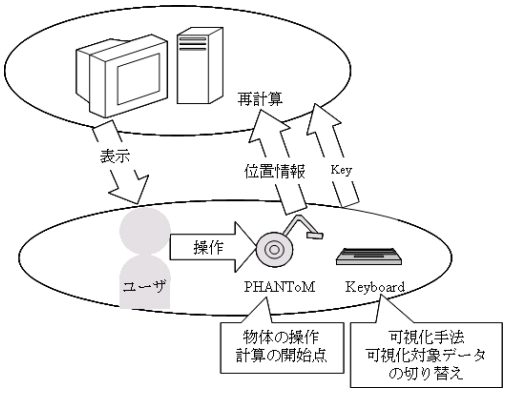

Fig.2　Interactive visualization system

3.2　手法

A. 活動電位データ

(128_128_120)_200stepの正規格子点のサンプル値(ボクセルデータ)で与えられたスカラ場である．汎用グラフィクスカードにより高速処理が可能なテクスチャマッピングを利用したボリュームレンダリングによる描画を検討した. 3次元データを視線に垂直な面でスライスし,その断面画像をポリゴンにマッピングして視点に遠い面から混合処理を行って描画する[2].ユーザが物体を動かす度に物体座標内での視点位置が変更するため,その度に各ポリゴンへのテクスチャ座標を決定させねばならない.

B. 構造データ

三角形要素で与えられているので,そのまま形状を表すポリゴンを描画して表示した.

C. 流速データ

節点数：61575（要素数：325427）で定義された3次元ベクトル場である.

C.1 ベクトル算出

・クリップ面

描画結果が重なってしまう問題を解消するために,クリッピング面を設け,その背後,または近傍だけを描くようにした. PHANToM で操作し内部構造を自由に切り取れる断面図プローブの役割も果たす.

・カラーリング

ベクトル方向性の直感的理解のために色分けを検討した．視点位置からの色分けと,ユーザである医療従事者が見慣れているカラードプラを模しての色分けを設けた(Fig.3).カラードプラに模した色分けでは,先のクリップ面に探触子にあたる点を設置した.

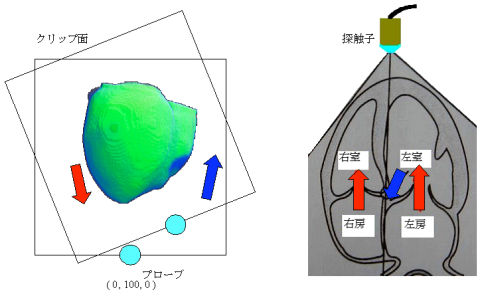

Fig.3　Color coding similar to Color Doppler

・正規格子データ

非構造格子に定義されたベクトルをそのまま描画すれば,その分布は格子密度に左右される．したがって,正規格子データへ変換する．世界座標でサンプルされた速度点の座標からこれが含まれる各四面体の局所座標を求める際,どの四面体に含まれるか総当り的に計算することは効率が悪い．そこで,空間を等間隔の格子に区切り,四面体と格子を対応させた．この処理により,速度点が与えられた際,まずはどの格子に入っているか判定し,その格子に登録されている四面体だけと内包判定を行えばよい.

格子に含まれる四面体を選択する処理は,簡略化のため四面体 4 頂点の最大・最小座標で構成される境界箱と正規格子の交差を調べる．また,点の要素への内包判定では,隣接する四面体間で計算誤差による隙間ができる可能性があるため,四面体外にマージンを設け,その範囲内なら四面体の内部とみなす．その際,要素内部において体積座標を用いてデータ補間を行う．

C.2 パーティクルトレース

インタラクティブな粒子追跡として,ポインタ先端から粒子が飛ばせるように設計する．つまり,粒子をばらまいて全体の流れを観察する,ある点から連続的に液滴を流してその様子を観察するという二つの表現を可能とした．しかし,ポインタと粒子がどの要素に入っているか,全四面体を逐一調べる方法では,格子探索にかかる計算量が要素数に比例して増える．また,構造格子ではないためインデックスを求めるのも容易ではなく,何らかの格子探索法が必要となる．そこで,追跡用メッシュを面同士が接する四面体と,点・辺・面で接する四面体に分ける．

粒子は要素四頂点から内挿された速度によって四面体間を移動するため,どの四面体から速度を内挿するかを,局所座標で面と面を伝って追跡し判断する．そのための追跡メッシュが面同士で接する四面体である．一方,ポインタ位置は世界座標系で与えられ,粒子と異なり,四面体外に出てしまう可能性がある．そのために,点・辺・面で接する四面体において,ポインタ位置に最も近い四面体を探索する手法を併用した．

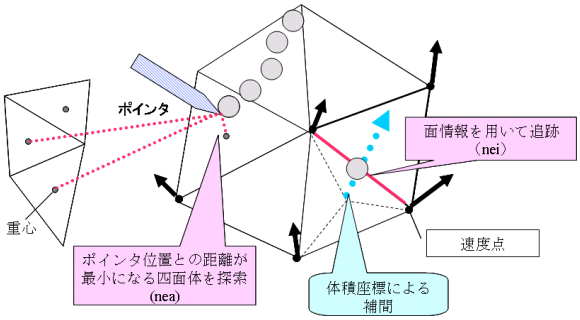

Fig.4 Particle trace

微小時間後の粒子の位置を求めるために,最も単純なオイラー法を用いた．

$$\vec{x}_{i+1} = \vec{x}_i + \vec{V}_i dt$$

要素内の補間には四面体一次要素を用いた．

また,パーティクルの軌跡を描くことで粒子の移動が直感的にわかりやすくなると考え,粒子に履歴を一定値分持たせて粒子の尻尾を表示する．

C.3 渦の表示

・渦度

渦度分布から渦のスケールを観察できないかと考えた．四面体一次要素による補間関数を用いて,各要素の渦度ベクトルを計算し描画する．

・循環

循環 Γ は流れの中の任意の閉曲線 C に沿って一巡する,その曲線方向の速度成分 vs の積分である．渦の可視化にあたって,循環の概念を用いユーザが渦領域を検索できる手法を提案する．

非構造格子であると循環の値が最大になる方向を見つけるための探索は計算量が大きくなる恐れがあるため,正規格子に変換することによってその手間を省く．

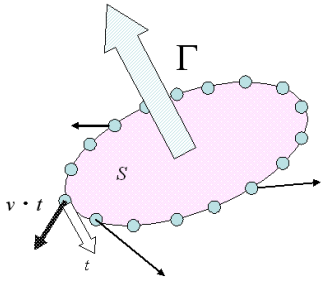

Fig. 5 Calculation of Circulation Γ

循環を求める処理は以下の手順を踏む．

1. 円の位置姿勢を回転 R と並進 t の行列で定める.(PHANToM の動きに対応)
2. 円周を 36 分割し,その離散点 dl

$$dl = \frac{2\pi r}{36} \quad (r \text{ ：円の半径})$$

について,局所座標での位置と単位接線ベクトルを求める．

3. グローバル座標に変換し,その位置から,正規格子速度ベクトルを参照する．
4. 正規格子速度ベクトルとグローバル座標での単位接線ベクトルの内積を求め,それを円周に沿って積分する．

更に,ジオデシックドームによる 20 面体分割を用い,循環の最大値の方向を見つけ,その循環の大きさを表示する．

4．結果と考察

4.1　統合表示結果

カラードプラに模した色分けによる定性評価を行う(Fig.6). 左心室における可視化結果である. 活動電位のピーク時に,大動脈への流出とその後の心室への流入がカラードプラ計測とほぼ同じであり本手法の妥当性が定性的に示された.

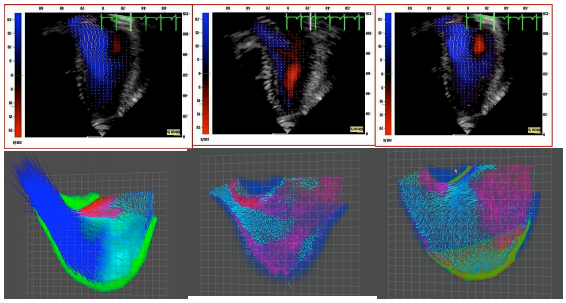

Fig.6　Parallel between Color Doppler and result

インタラクティブ性により実験的アプローチが可能となった(Fig.7). 速度ベクトル表示で赤と青が交差する渦領域候補を発見し,粒子追跡に切り替え粒子の軌跡が螺旋を描いていることを確認する. 更に,ポインタから粒子を流してみる. インタラクティブ性によって,流れの把握が直感的に可能となった例である.

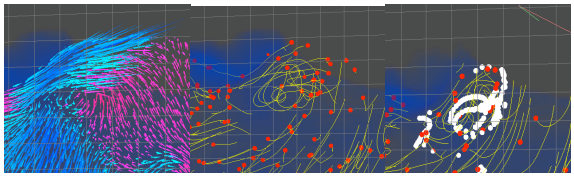

Fig.7　Visual exploration

渦の表示は,渦度の可視化においては描画速度の遅さ,大局的な構造がつかめないという問題が生じた(Fig.8.a). 循環の表示においては,統合表示には辿り着けなかったが,インタラクティブに渦を探索可能とするプロトタイプを作成できた(Fig.8.b).

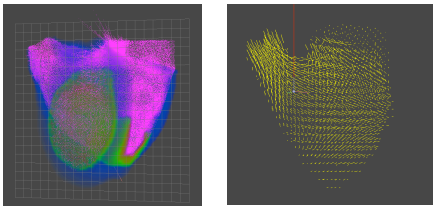

Fig.8　Vorticity (a) and Circulation (b)

4.2　インタラクティブ性の検証

統合表示における描画速度は最低でも 12fps であり,反応速度においても物体を違和感なく操作可能であった.

4.3　今後の課題と展望

ユーザとシステム間の意志疎通を更に容易にするため,メモリ分散等による描画速度の向上が挙げられる. また,可視化手法がユーザの目的とするものを表現するのに適しているかどうか,医療従事者らの意見を取り入れつつデザインをブラッシュアップすることが求められる. また,心理学の知見も取り込むことでユーザフレンドリーなシステムとなる. また,可視化の枠組みに捉われない VR 環境を創出することで,更なる直感的理解が得られる可能性がある.

5. 結論

生体現象の複雑な 3 次元構造を直感的に理解するために,インタラクティブ性を備えた可視化枠組みとシステムを設計した. インタラクティブ性を備えた本システムは,実際の計測との比較によりその妥当性が評価されると共に,計算機内でドプラ計測などのシミュレーションベースト診断が行える可能性を示した. また,3 次元の流れに対し,インタラクティブ性が可能とした実験的アプローチによって直感的な理解を得ることができた. 今後,ユーザの要求を更に盛り込み,インタラクティブ性がもたらす効果を追求していくことが挙げられる. 本研究がマルチフィジックス・マルチスケールシミュレータの発展に貢献すること,そして,そのシミュレータが実用化され,医療の分野において革新的な治療方法が確立されることを確信している.

文　献

1) C.D. Hanson, C R, Johnson : “The Visualization Handbook” pp413, Elsevier Inc. 2005.
2) 中嶋正之, 藤代一成 :「コンピュータビジュアリゼーション」pp43 共立出版, 2000
3) 村木茂,喜多泰代,‘3 次元画像解析とグラフィックス技術の医学応用に関するサーベイ’ 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J87 - D2,No.10,pp1887-1920,2004