

心臓シミュレーションのためのインタラクティブな可視化

66796 佐々木 英剛

指導教員 広田 光一 准教授

This paper describes the visualization of heart simulation. The proposed visualization system in this paper is designed for both doctors and simulation engineers as observers. To achieve the purpose, we emulated the color Doppler method which measures the velocity of a flowing fluid from the ultrasound Doppler shift. To visualize more precise fluid field, we used particle tracing method. We used the data given from a numerical whole heart simulation with valves. We visualized the heart in real time and interactive way. We visualized characteristics of blood flow in left ventricle, near valves, and aortic blood flow. These are important information for doctors. In conclusion, the color Doppler method and particle trace in the interactive system is easily understandable for doctors and simulation engineers to visualize the result of heart simulation.

Key words : Flow Visualization, Heart Simulation, Interactivity, Color Doppler, Blood Flow

1. 緒言

近年の計算機技術の発達はシミュレーション分野の発展をもたらし、シミュレーションは大規模なものとなり、またその適用範囲を拡大させた。例えばマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションの技術は生体の数値的解析を可能にし、とくに心臓血管系の血流シミュレーションは、臨床への応用も実現可能な技術として期待されている¹⁾。

その一方で、可視化の分野の研究は計算機能力の向上による発達の度合いが少ない。さらにシミュレーション結果のデータは大規模・複雑化しているため、相対的に研究が遅れている。可視化の研究は発達の著しいシミュレーション技術に対応して発展しなければならない。

本研究は新たな可視化技術を開発し、それを利用することで医学的に有用性のある可視化システムを提案するものである。

2. 背景と目的

計算機性能の向上により、全心臓シミュレーションが可能となってきた。心臓シミュレーションの結果を検証するには、医学的な観点からの評価が求められる。そのためには医療従事者がインタラクティブに操作して医学的情報を得ることができる可視化システムが必要である。

それを実現するには実際の診療と同様の可視化手法が適切であろう。またそれを医学的現象の解明に適用し、医学的に有用な情報を取得できることが望ましい。医学的に重要な情報として、心臓弁周辺の渦、大動脈の血流、心駆出率といったものが挙げられる。このような情報を可視化することで、医学的に有用性のある可視化システムを構築する。

3. 可視化手法の開発

3.1 開発環境

本研究で構築したシステムは、PC(OS: Windows XP)、PHANTOM Omni(SensAble社)で構成されている。CPUはIntel社製Pentium4 3.40GHzを用いた。物理メモリは2.00GBである。また、GPUにはNVIDIA社製GeForce 8800GTXを使用した。

開発にはC++を使用した。また描画ライブラリとしてOpenGLを、GPUプログラム言語としてCgを使用した。

3.2 システムの詳細

Table 1に示すデータを使用する。これは久田研究室より提供された心臓弁を含む全心臓流体構造連成解析の結果データである。データサイズは合計で約1.1GBであり、このデータをあらかじめ物理メモリに入れておくことはできない。なぜならOS側の処理やプログラム自体

の大きさによって、1GB以上のメモリが最初から消費されているからである。本研究で用いた2.00GBのメモリ容量を超えてしまうものである。よって流速データと構造データについては1ステップごとに読み込むことにした。この場合、データ転送速度の向上はキャッシュを利用して達成することになる。キャッシュは基本的に制御できないが、物理メモリの残量を多くすることによってキャッシュの使用を促すことができる。よって毎ステップ読み込むデータを流速データのみに限定し、構造データについては必要に応じて読み込むことにした。そうすることでキャッシュを利用し、リアルタイムでの動作が可能となった。

Table 1: Data of Heart Simulation

	Torso	Fluid	Structure	Valve
Nodes	-	142427	198045	1913
Elements	726304	684663	878275	3374
Shape	Triangle	Tetrahedron	Tetrahedron	Triangle
Size(MB)	35.465	648.0	452.0	4.48

3.3 システム構成

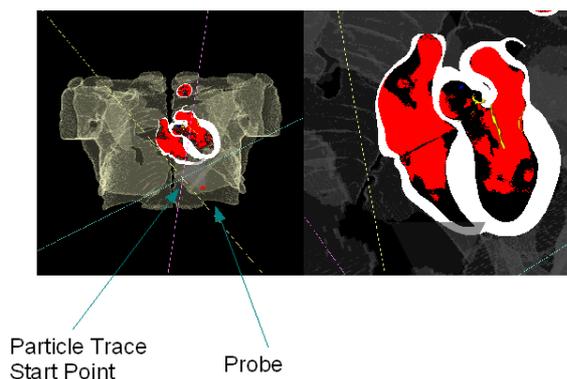


Fig 1: Visualization System

可視化のためのシステムは、Fig 1のようになる。画面左側には胸郭と心臓を固定した図を表示し、右側にはカラー Doppler の探触子によって切り取られた平面を表示する。これは実際の診療現場を模倣したものである。まずユーザは

画面左側を見て探触子を操作する。これをインタラクティブに操作することによってユーザは興味のある領域を重点的に探索することができる。さらに詳細に流れ場を観察したい場合、粒子を任意の点から放出することができる。これらは PHANTOM で直感的に操作可能であるが、マウスやキーボードを用いても操作することができる。

3.4 カラー Doppler 法

カラー Doppler 法とは、医療現場において頻繁に使用されている血流の測定方法である。2次元画像の血流分布をマッピングすることができる。Fig 2に示すように、プローブに近づく流れを赤く、遠ざかる流れを青く表示する。また血流が速いほど明るく表示される。

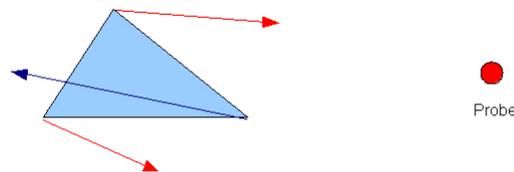


Fig 2: Color Doppler Method

プローブの位置ベクトルを \mathbf{x}_p , 流速の位置ベクトルを \mathbf{x}_v , 流速ベクトルを \mathbf{v}_v とおくと、位置 \mathbf{x}_v における色は、 $(\mathbf{x}_v - \mathbf{x}_p) \cdot \mathbf{v}_v > 0$ のとき青となり、 $(\mathbf{x}_v - \mathbf{x}_p) \cdot \mathbf{v}_v < 0$ のとき赤となる。この色づけの計算は、流速の節点数が142427個と大きなものであるため、CPUで計算するとリアルタイム性を失ってしまう。そこでこの計算をGPUで行うことにした。GPUで計算を行うには、それが並列処理できるものでなくてはならない。このカラー Doppler の色の計算においては、どの頂点も順番を気にせず処理することができるため、GPUに計算を任せるのに適している。

3.5 粒子追跡法

粒子追跡法は流れ場を理解するうえで大切な手法である。とくに流体力学に詳しくなくても直感的に理解できるという点で、その他の可視化法よりも優れている。この粒子の履歴を線で結ぶとそれは流跡線となり、ある1点から連続して粒子を放出し、その粒子を線で結ぶとそれは流脈線となる。

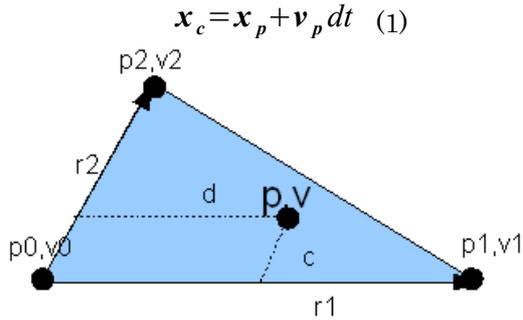


Fig 3: Interpolation

ここで \mathbf{x}_c は現在の粒子位置、 \mathbf{x}_p は1ステップ前の粒子位置、 \mathbf{v}_p は1ステップ前の粒子の速度である。また、 dt は1ステップ分の時間スケール、この場合は1秒間を200ステップに分けているので、1/200秒つまり0.005秒となる。速度については速度データから補間して1ステップごとに更新している。

補間の方法は Fig 3 のように、 $\mathbf{r}_1 = \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0$ と $\mathbf{r}_2 = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_0$ を置くと、この三角形の内部の点 \mathbf{p} は、

$$\mathbf{p} = c\mathbf{r}_1 + d\mathbf{r}_2 (c > 0, d > 0, c + d < 1) \quad (2)$$

と表される。三角形内部の補間は c , d を求めればよい。すなわち求める補間点 \mathbf{v}_c の値は、このとき三角形内部の点 \mathbf{p} におけるデータ \mathbf{v} は、

$$\mathbf{v} = c(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_0) + d(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_0) + \mathbf{v}_0 \quad (3)$$

と補間される。これを自然に3次元に拡張し、

$$\mathbf{v} = c(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_0) + d(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_0) + e(\mathbf{v}_3 - \mathbf{v}_0) + \mathbf{v}_0 (c > 0, d > 0, e > 0, c + d + e < 1) \quad (4)$$

となる。これが四面体頂点の値から内部の点を補間したときの値である。

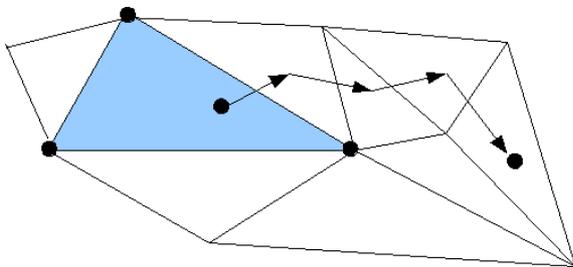


Fig 4: Neighbor elements

つぎに隣接要素情報について述べる。隣接要素情報は有限要素法などによって生成される不規則格子において、所属する要素番号を取得する場合に必要な情報である。

Fig 4 に示すのは要素隣接情報を用いた粒子

位置の決定方法である。本研究で用いた速度データは四面体データである。粒子の位置を高速に知るために用いられる方法は一般的に2種類ある。1つは格子状のデータに変換する方法であり、もう1つは四面体データのまま隣接要素情報を作成して要素位置を知る方法である。格子状のデータに変換する方法の利点は、その格子の座標系における位置情報からその点が所属する要素番号を決定することができることである。欠点は格子点への補間の際に誤差が入り込むことであろう。四面体データのまま使うことにすると、アクセスに手間がかかる代わりに、元データそのままの値を使える分だけ正確であるということになる。本研究では可視化という視点から正確さがより重要であると考え、四面体データをそのまま使うことにした。

隣接要素情報には要素番号をインデックスとしてアクセスでき、データとしてその要素に隣接する要素番号が保存されている。また、目標位置と現在位置の関係から、現在の要素よりも目標位置に近い位置にある要素番号を取得できるようになっている。取得した要素番号をインデックスとして再び隣接要素情報にアクセスすれば、より目標位置に近い要素番号を取得できる。

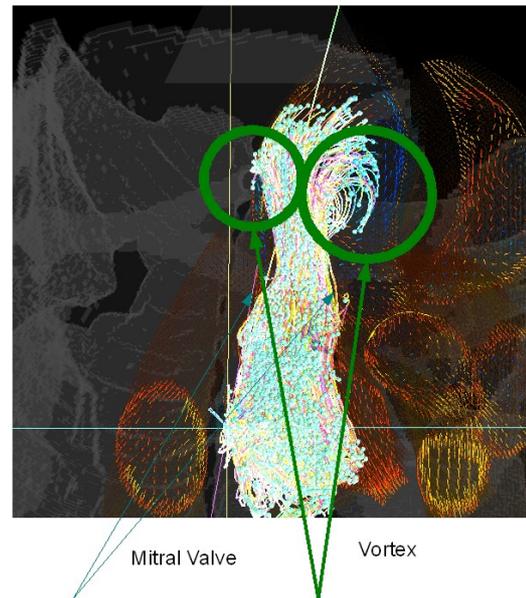


Fig 5: Blood flow near the mitral valve

このような処理を反復的に繰り返すことにより、目標位置の要素番号を取得できる。隣接要素情報はステップごとには変わらないが、頂点位置はステップごとには変わる。そのため、要素番号と局所座標から取得される世界座標の値は毎ステップ違ったものになる。粒子が保存すべき

は世界座標での位置である。

4. 結果と考察

4.1 僧帽弁付近の渦

心臓の血液は左心房から僧帽弁をとおり、左心室へ流れる。このとき僧帽弁付近には渦が発生し、僧帽弁の裏側へ回り込もうとする現象があることが知られている。

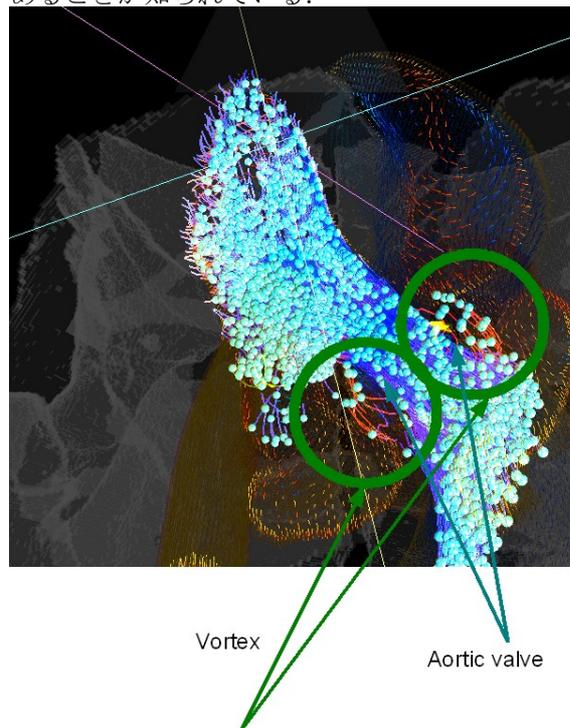


Fig 6: Blood flow near the aortic valve

同様に大動脈弁の付近にも渦が発生する。このような現象により心臓弁が閉じるのを手助けしているのではないかという医学的な仮説がある。Fig 5, Fig 6ではこのような現象が確認できている。本研究ではこのような医学的知見を得ることのできる可視化システムを提示できた。

4.2 大動脈内のらせん軌道

Fig 7 は大動脈を通過していったある1つの粒子の軌跡を可視化したものである。図の1, 2, 3の区間は拍出期に相当し、このときある一定の角度でねじれていることがわかる。また、拍出期以外は大動脈の進行方向に対して停滞し、その場でおよそ1回転することがわかる。医学的価値のある発見である。

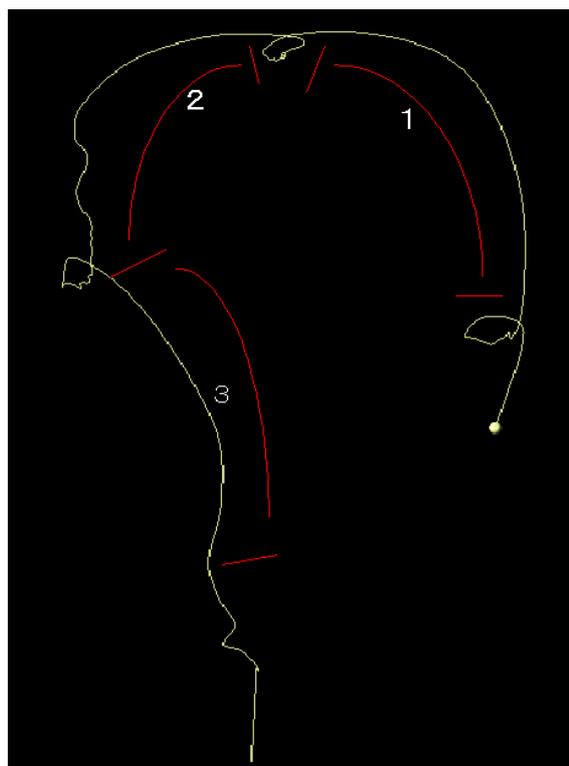


Fig 7: Aortic flow visualized by particle trace

5. 結言

本研究では新たな可視化手法を開発し、それを活用することで医療従事者の立場から有用な医学的知見が得られる可視化システムを提案した。これにより医学・工学双方の理解が進み、医学工学の連携分野の研究がさらに発展することを期待する。

文献

- 1) 劉浩, 山口隆美, 姫野龍太郎: 心臓血管系の血流シミュレーション, *Meg Imag Tech* **20** (6): 615-621, 2002.
- 2) 小野謙二: 可視化研究の動向と次世代可視化システム, 第12回ビジュアルリゼーションカンファレンス (2006).
- 3) 榛葉都: 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, 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 修士論文, 2007