拍動型血液ポンプを対象とした同時多粒子追跡による3次元可視化システムの開発

Development of the three-dimensional visualization system

by the simultaneous multi-particle tracing for pulsatile blood pump

○伊藤洋平、福長一義*、住倉博仁、大沼健太郎、舟久保昭夫、福井康裕

東京電機大学大学院理工学研究科、*東京電機大学フロンティア共同研究センター

Youhei Itou, *Kazuyoshi Fukunaga, Hirohito Sumikura, Kentarou Oonuma, Akio Funakubo, Yasuhiro Fukui

Graduate school of Science and Engineering, Tokyo Denki University

* Frontier R & D Center, Tokyo Denki University

1. はじめに

拍動型人工心臓の開発において、血栓の形成を抑止することは重要な課題である。拍動流の場合、血流停滞により血栓が形成されてしまう。そこでポンプ内部の流れを可視化することによる評価、改良が行われている。流れの可視化においては、超高速ビデオカメラを用いて血液ポンプを撮影し、その画像からコンピュータ処理により流れ場の定量化を行う手法が主流となっている。本研究ではプッシュプレート の往復動により起こる複雑な流れを、3次元的に定量化可能な3次元可視化システムの開発を行ってきた。3次元可視化システムは、透明なポンプ、その周囲に配置した傾斜鏡、高速度カメラで構成した。工程として、作動流体に粒子を混入してポンプ内の流れ場を撮影し、粒子流速の3成分を得ることによって流れの可視化を行ってきた。従来のシステムでは、単一粒子の追跡しかできず流れの評価として不十分であった。そこで今回は、同時に多粒子の追跡が可能な粒子認識・追跡システムの開発を行ったので報告する。

2. 方法

2.1 3次元可視化手法

3次元可視化手法は、鏡を用いることによってポンプの高さ情報を映し出し、撮影された2次元画像から3次元座標の抽出を可能とする。高速度ビデオカメラ1台、側面を映し出す鏡、透明なポンプで構成されるため、ビデオカメラを2台以上用いるステレオ法と比較して、極めて安価で容易に、3次元での計測を行うことが可能である。この可視化手法に、追跡子(トレーサ)を流れ場に注入し、トレーサを検出することにより流れを観察する注入トレーサ法を組み合わせることで、ポンプ内の3次元可視化を実現している(Fig.1)。

Fig.1 3-dimensional visualization method

2.2 従来の粒子追跡システム

従来の粒子追跡システムでは、撮影画像にフィルタ処理を施し、粒子を鮮明化させた画像に対してラベリング処理を行い、各粒子の重心を求めることで粒子座標を算出していた。しかしフィルタ処理中の雑音混入や粒子画像の消失により、粒子の認識に支障をきたしていた。また、複数粒子の同時追跡を可能とせず、追跡効率の悪いシステムであった。

2.3 多粒子追跡システムの概要

今回提案する粒子追跡システムとして、同時に多粒子の追跡が可能な粒子追跡プログラムを開発した。本プログラムでは、粒子の認識および追跡に相互相関法と多時刻法を使用した。相互相関法は、撮影した2枚の連続な可視化画像を用い、1枚目の画像中における検査領域の輝度値パターンが、2枚目の画像中のどの位置に移動したかを、相関関数を用いて検出する方法である。多時刻法とは、連続画像の粒子位置を元に、粒子の移動距離、移動方向の変化が最も少ない軌跡を同一粒子とし、流速を推定する方法である。この2つのアルゴリズムを追跡に用いることで、多粒子の同時追跡を可能とした。本プログラムでは、以上の方法にて可視化画像から粒子を追跡し、座標(x, y 軸座標)を記録した。また、鏡に映し出された粒子は、粒子の高さ情報(z 軸座標)として処理した。

2.4 粒子追跡の流れ

本プログラムの粒子追跡の流れについて説明する(Fig.2)。単一粒子画像を第1画像から検査領域として選択した。検査領域中の平均輝度値を算出し、平均値より小さい輝度値を持つ部位を粒子像として処理した。取得した粒子像から重心を算出し、粒子座標を求め、粒子座標が画像の中心となるよう検査領域を更新した。更新された画像を元に、第2画像中から相互相関の値が最も高い位置を検索し決定した。以上の処理を繰り返すことにより、連続した粒子追跡を可能とした。

Fig.2 Process of particle coordinates recognition

3. 実験

3.1 可視化実験

実験装置は、可視化用ポンプ、ポンプ側面を映し出す鏡、高速度ビデオカメラ (MotionScope PCI 8000S)、および撮影画像を保存するコンピュータで構成した (Fig.3)。ポンプは光の屈折を抑えるために、立方体 (122[mm]×115[mm]×32[mm]) のアクリル樹脂からポンプ形状を切削加工にて形成した。ポンプ周囲に配置した鏡は、カメラで撮影した際にポンプ側面を直角に映し出すように調整した。本実験では、注入トレーサ法を使用し、トレーサ粒子として黒色粒子 (炭素粒子、直径 0.4mm) を使用した。また模擬循環回路を用いて左心循環を模擬し、作動流体には、アクリルと屈折率を同等としたヨウ化ナトリウム水溶液 (25℃、65.0wt%) を使用した。ポンプの流入側から複数の粒子を混入させ、撮影を行った。このときの撮影条件は 250frame/sec で 2.048 秒間 (合計 512 フレーム)、白黒 256 階調、512×512pixel とした。

3.2 多数粒子追跡システムの評価

粒子追跡システムの性能評価のために、撮影画像を 1 フレーム毎に切り出したビットマップ画像を使用して、複数粒子の追跡を行った。

粒子の認識と追跡に深い関係のある検査領域のサイズを変化させたときの追跡性能の比較を行った。検査領域のサイズを 4×4 - 16×16pixel まで 1pixel ずつ変化させ、流れの速い画像を 2 種類と遅い画像を 2 種類、それぞれに対してサイズ毎に単一粒子の追跡を行った。このとき、追跡に使用した画像枚数は 100 枚とし、開始画像から追跡停止、もしくは誤認識になるまで追跡を行った。同様に、従来の追跡システムによる処理を行い、性能比較を行った。

4. 結果・考察

同時多粒子追跡プログラムの実行結果を Fig4 に示した。これはポンプ内の 2 個の粒子と、鏡上に映し出されたそれぞれの粒子像を同時に追跡した結果であり、追跡した粒子座標を可視化画像にプロットして示した。このように、本システムで複数個粒子の同時追跡が可能となった。

Fig.3 Experiment equipment

Fig.5 に検査領域のサイズを変化させたときの追跡結果を示した。図より、流速の違いにより各サイズにおける追跡性能の違いが表れた。4×4 - 7×7pixel の小さいサイズや 14×14 - 16×16pixel の大きいサイズでは、速い流れは追跡できていないが、12×12pixel においてはどの流れも 90 枚以上追跡可能であった。このことから、追跡に最適な検査領域サイズが 12×12pixel であることが推察できた。また、従来のシステムを用いた追跡では、全ての流れにおいて、平均 20 枚目で追跡が停止した。よって、開発した追跡システムの優位性が確認された。

5. まとめ

粒子追跡システムとして、新たに多粒子同時追跡プログラムを構築し、性能評価を行った。Fig4 より、複数の粒子が追跡可能なことを確認した。このことより、多粒子同時追跡が、3 次元可視化解析システムの効率化につながることを示唆された。

検査領域のサイズ変化による追跡性能の比較では、サイズの大きさや流れの種類により追跡性能が異なることが確認された。これは、粒子の移動速度が速い場合、撮影時のシャッター間隔 (1/250[sec]) では、露光時間中に粒子が移動してしまい、粒子像が楕円状に変形してしまうことと関係していると思われる。

現段階において本システムは、ポンプ縁の部位に粒子が進入すると追跡を停止してしまう。これは、粒子の輝度値とポンプ縁の部位の輝度値がほぼ同一であり、輝度値を用いた認識方法では追跡が困難になってしまったことが原因であると思われる。今後は、ポンプ縁の部位で発生した追跡の停止に対応するため、撮影方法を改善し、検討を行う予定である。

Fig.4 Image of multi-particle tracing

Fig.5 Comparison of the performance test