A110 カラー Doppler 像を用いた流れの 3 次元可視化法

井村 誠孝○, 黒田 知宏, 大城 理, 千原 國宏 (奈良先端科学技術大学院大学)

3-D Flow Visualization from Color Doppler Images

Masataka IMURA, Tomohiro KURODA,
Osamu OSHIRO and Kunihiro CHIHARA

ABSTRACT

The color Doppler method, which can measure velocity of a flow in realtime using the Doppler effect of ultrasound, is suitable for observation of a blood flow and has contributed to diagnosis of circulatory illness. However, the result of measurement is represented as a 2-D image, which is not useful for understanding a state of a complex flow. This paper presents 3-D visualization methods of a blood flow from color Doppler images. For diagnosis and investigation, the visualization of a blood flow must fulfill the following features: (1) objectivity (2) interactivity and (3) multi-aspect. The proposed system meets the above requirements by providing realtime visualization methods and intuitive interfaces. Moreover, an experiment with a phantom channel shows that the proposed system enables observers to recognize a state of an entire flow, such as occurrence of turbulence and an area of regurgitant jets.

Keywords: Ultrasound Diagnosis, Color Doppler Image, Blood Flow, 3-D Visualization, Interactivity

1 序論

超音波 Doppler 法による血流の計測は循環器系疾患の診断に際して多大な効力を発揮している [1]. 一般的な超音波診断装置では, 計測結果は流速を色相で表現した 2 次元画像として出力される (Fig.1). そのため, 弁の周囲で生起する 3 次元の複雑な流れを把握するには, 各医師が複数の 2 次元カラー Doppler 像を頭の中で 3 次元再構成する必要があり, 医師は診断以外の負担を強いられることになる.

Fig.1 2-D Color Doppler Image

この問題を解決するためには, 取得した速度場を 3 次元可視化することが必須である. 3 次元可視化により流れ全体を直感的に把握することができる. また, 客観的な立体像が提示されることで, 複数の医師間に共通認識が確立されるため, 病状に関する議論をより円滑に行える. さらには, 詳細な流れの構造を認識するこ

とによって心臓の血流モデルを構築することが可能となる [2]. モデルの適用により, 少数回の測定から心臓全体における血流の様相が推測でき, 診察時の患者の負担が軽減される.

このように, 超音波診断装置の出力画像が 3 次元化されることは医療現場に大きな利益をもたらすと考えられる. しかし, カラー Doppler 画像に基づく血流の 3 次元可視化に関してこれまでになされてきた研究 [3, 4] では, 流れの様々な側面を直感的に把握できる可視化法を提供するには至っていない.

本研究では, 現状のカラー Doppler 画像および 3 次元可視化の欠点を補う可視化手法と, それらをインタラクティブに制御するユーザインタフェースを提案する. 提案する可視化手法により, 2 次元カラー Doppler 画像を 3 次元再構成・可視化する際に一般的に要求される血流動態の把握, すなわち流れの状態の分別や逆流領域の形状認識が可能となる. また, 血管を模した流路内の流れを計測し, その可視化像に対する医用工学および医学関係者の評価を仰ぐことで, 提案システムの有用性を検証する.

2 カラー Doppler 3 次元可視化手法

研究および診断での使用に耐え得る血流の 3 次元可視化手法は, 以下の条件を満たさねばならないと考える.

- 客観的であること
- インタラクティブであること
- 複数の手法で観察できること

2.1 座標変換

一般的に普及しているセクタ走査型の超音波探触子を用いると、血流の速度分布は極座標系で得られる (Fig.2). 極座標系では、断面の取得等の可視化手法を適用する際に複雑な計算が必要となりインタラクティブ性が損われるため、扱いの容易な直交座標系ボクセルへの座標変換をあらかじめ施しておく。

Fig.2 Coordinates of Measurement

2.2 可視化手法

3次元流体可視化においては、オクルージョンの発生が不可避であり、また提示情報も高次元になることから、万能の手法は存在しない [5, 6]. 本研究では、注目する事象に応じた複数の手法を提供し、各手法が相互に補いあうことにより情報の欠落を防止する。

- 点の色相による表現
- 各点の色によって速さを表現する。オクルージョンが最も少ないため、全体を俯瞰して異常箇所を発見する際に最適である。
- 半透明立方体の色相による表現
- 各立方体の色によって速さを表現する。隣接するボクセル間の位置関係が明確であるため、注目する領域の形態を把握することが容易である。
- 矢印による描画
- 各点の速度を矢印で表現する。矢印の大きさと向きが流体の速度と直接対応しているため、直感的に流れの様相を把握できる。

- 仮想粒子の投入
- 速度場に従って運動する仮想粒子の軌跡により流れを表現する。速度場よりも観察者のイメージする流れに近い流体要素の動きを見て取ることができる。

2.3 ユーザインタフェース

インタラクティブに可視化手法の適用環境を変更できる機能を用意することで、流れの状態を把握することがより容易になると考えられる。本システムでは、

- 任意視点からの観測
- 任意断面の取得
- 関心領域の直感的な選択

といった操作を導入する。これにより、従来手法のように描画条件の変更による動画の再生成を待つことなく、研究や診断が円滑に遂行される。

3 生体を模した流路を用いた実験

提案手法が、医用工学および医学の領域において従来の2次元カラードブラ像と比較してどのような利点を持っているかを、生体を模した流路から得られた速度場を用いて専門的な角度から検証した。

3.1 データ取得環境

血管および弁を模した流路を作成し、その中に生成された周期的な流れをセクタ走査型の探触子を用いて測定した。

評価用データは共同研究を行っているスウェーデン Linköping 大学の生医学工学講座で取得されたものである [2]. 流路の設計図を Fig.3 に示す.

Fig.3 Phantom Channel

流速場は以下の手順により取得した.

Table 2 Performance

マシン	ボリューム		描画密度	手法		
	大きさ	フレーム数		点	立方体	矢印
O2	32×32×48	30	1/4	13.6 fps	7.7 fps	6.0 fps
Onyx2	32×32×48	30	1/2	40.5 fps	13.0 fps	9.4 fps
Onyx2	64×64×96	30	1/4	7.5 fps	5.5 fps	4.8 fps

1. パイプの中央に豚の僧帽弁を配置する (Fig.3 中太線部).
2. パルスポンプを用いてコーンスターチを含む水を周期的に Fig.3 の矢印に沿って送り込み, 生体内での弁周囲の流れを擬似的に作り出す.
3. セクタ走査型探触子は Fig.3 の上部に設置される.
4. 図中に網掛で示された測定領域を走査し, B モード像 (組織像) とカラードプラ像を得る.
5. 探触子を自身の長軸を中心として一定の角度刻みで回転させ, 4-5 を繰り返す.

データ取得環境の諸元は Table 1 の通りである.

Table 1 Properties of the Data Acquisition

流量	16.3 ml/s
超音波の中心周波数	6.18 MHz
全フレーム数	53 フレーム
フレームレート	26.6 fps
角度刻み	3 deg
速度分解能	0.0268 m/s
1 走査面あたりのビーム本数	30 本
ビーム角度の分解能	0.66 deg
1 ビームあたりのサンプル点数	164 点
サンプリング点の間隔	0.308 mm
計測領域の最大直径	36.2 mm
計測領域の奥行き	50.5 mm

セクタ走査型の探触子で同時に取得できるのは一平面上の流速だけである. そこで, 流れが周期的であることを利用して, 異なる時刻であっても同じ位相で計測した流速は同じ時刻の流速であると仮定する. このようにして空間に分布した流れ場の同時測定を擬似的に実現している.

3.2 実装環境

全ての可視化手法は SGI 社製ワークステーション O2 および Onyx2 で動作するように実装された. プログラミング言語には C 言語 (ANSI 準拠) を, グラフィックス表示には OpenGL を用いた.

O2 と Onyx2 の諸元は以下の通りである.

● SGI O2

CPU: MIPS R5000 180MHz

Memory: 96Mbytes

● SGI Onyx2

CPU: MIPS R10000 195MHz 16 processors

Memory: 3Gbytes

Graphics Engine: InfiniteReality2 × 3

3.3 画像生成速度の検証

実装されたシステムにおける, 画像生成速度の測定結果を Table 2 に示す.

一般的に, 人間とのインタラクションを持つシステムがインタラクティブと呼べるためには, 入力から 0.5 秒以内に何らかの入力検知を知らせる反応があり, 2 秒以内に出力があることが必要とされている. 測定結果から, 本システムの実装はインタラクティブ性を有すると言える.

3.4 結果

3.4.1 可視化結果

Fig.4 に各手法の典型的な可視化像を示す.

3.4.2 専門家の評価

医用工学の見地からは, 点による直接描画が流体内で生じている現象を全てありのままに提示しているため, 流体の挙動を把握するのに最も適しているという意見を得た. 一方で, 3 次元化により中央部分の流れが視認できないという問題が生じた. これに対してはリアルタイムに断面像を生成することで対処した (Fig.5). しかし, 色相で表現された各点の速度は断面上の速度成分 (Fig.6 点線矢印) ではなく, あくまでもビーム方向の成分 (実線矢印) を表しているにすぎない. したがって, 断面が提示されていても, その断面上で本来描かれるべき情報が提示されていないという欠点がある. これは現在のドプラ法ではビーム方向成分しか計測できな

Fig.4 Examples of Visualized Images

いという限界に起因する面が大きく, 速度の全成分を取得できるドプラ法 [7] が実用化されれば解消される。

Fig.5 Cross Section

Fig.6 Velocity on Slice Plane

医学関係者の評価でも同様に, 全現象が同時に提示されているという理由から, 点による描画が有用であるという意見を得た。一方で, 応力が高い領域や乱流が生じている領域といった意味のある部位を抽出する方が好ましい, あるいは角ばった立方体といった現実との整合性が取れないものではなくもっと滑らかな表現をしてほしい, といった意見もあった。

以上のように, 工学的な視点からは客観性が評価されたのに対して, 医学的な視点からは診断に必要な要素を抽出して, それらしく提示する方向が望ましいとされた。このように目的によって望ましい提示方

法が異なるものであるため, 本研究で提案した複数の可視化手法を用意するというアプローチは妥当なものであったと言える。

4 結論

本稿では, 超音波ドプラ法により得られる速度場から血流を 3 次元可視化する手法を提案し, システム構築を行った。

提案手法を用いることで, 従来は主観的に行わざるを得なかった 3 次元の血流の把握がより客観的な形で困難なく行えるようになり, 循環器系疾患に対する診断精度の向上が図れると考えられる。

参考文献

- [1] Routh, H. F. : Doppler Ultrasound; The Ability to Measure and Image Blood Flow, IEEE Eng. Med. Biol., Vol.15, No.6 (1996) pp. 31-40.
- [2] Brandberg, J., et al. : Increased Accuracy of Echocardiographic Measurement of Flow Using Automated Spherical Integration of Multiple Plane Velocity Vectors, Ultrasound Med. Biol., Vol.25, No.2 (1999) pp. 249-257.
- [3] Belohlavek, M., et al. : Three-Dimensional Reconstruction of Color Doppler Jets in the Human Heart, J. Am. Soc. Echocardiogr., Vol. 7, No. 6 (1994) pp. 553-560.
- [4] Guo, Z., et al. : Quantitative Investigation of *In Vitro* Flow using Three-dimensional Colour Doppler Ultrasound, Ultrasound Med. Biol., Vol.21, No.6 (1995) pp. 807-816.
- [5] Nielson, G. M., et al. (eds.) : Scientific Visualization, IEEE Computer Society (1997).
- [6] Fuhrmann, A. and Groller, E. : Real-Time Techniques for 3D Flow Visualization, Proc. Vis. (1998) pp. 305-312.
- [7] Hein, I. A. : Triple-Beam Lens Transducers for Three-Dimensional Ultrasonic Fluid Flow Estimation, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control, Vol. 42, No. 5 (1995) pp.854-869.