

VLICによる拡散テンソル場可視化法の検討

安藤 祥子 藤代 一成 村木 茂†

お茶の水女子大学 大学院 人間文化研究科

† (独) 産業技術総合研究所 ボリュームグラフィックス連携研究体

1 背景と目的

直接的には視ることができない体内や脳内部を可視化する画像診断は、医療現場において大きな役割を担っている。そのなかでもMRI(Magnetic Resonance Imaging: 核磁気共鳴撮影法)は、骨に遮られることなく脊髄や軟骨までも明確に可視化することができ、さまざまな病気の早期発見に貢献している。またMRIは撮影条件により強調される組織が異なり、多様な強調画像を作ることができる。これにより、特定の組織などの特徴をもった特性量を計測することができるようになった。

本研究ではMRIにより計測されたテンソルデータに注目する。MRテンソルデータを効果的に可視化することは、生理学や神経分析などさまざまな研究分野の発展促進につながると考えられる。しかしこれまでにスカラ場やベクトル場の効果的な可視化法は数多く提案されているが、テンソル場の可視化にはまだ課題が多い。

本稿では、2次元流れ場の効果的な可視化法として知られるLIC(Line Integral Convolution)[1]のボリューム版を用いて、拡散テンソル場を可視化する方法について予備的検討を行う。

2 テンソルとその可視化

2.1 テンソルデータ

テンソルとは、ベクトルや行列を一般化した数学的な概念であり、0階のテンソルはスカラ、1階のテンソルはベクトル、そして2階のテンソルは行列で表現することができる。

スカラ場やベクトル場のための有効な可視化法は数多く提案されている。しかし、2階以上のテンソル場においては、テンソルのもつ自由度が著しく増加するために、そのすべてを2次元のディスプレイ上に可視化するのは本来的に困難である。

2.2 拡散テンソルデータ

拡散テンソルはMRIより計測されるテンソルであり、方向性をもった水分子の拡散(不等方性拡散)を表す特性量である。一方、脳内における不等方性拡散は、神経方向に依存していることが知られている。その性質より、拡散の方向をたどることで特定の神経路が抽出される[2]。さまざまな神経路を正確に、また効果

的に可視化することは、神経分析や手術の計画、認知科学の発展促進につながる。

2.3 テンソル量可視化法

拡散テンソルは、一般的に 3×3 の2階テンソルで表現することができる。そのようなテンソルは物理学で扱われることが多く、代表的な表記法として楕円体表記法がある。まず、テンソルから3個の固有値とそれに対応する固有ベクトルを計算する。楕円体表記法では、固有ベクトルを楕円体の各主軸とし、固有値をその対応固有ベクトル方向の大きさとするることにより、単一のテンソル量を描く。

2.4 テンソル場可視化法

単一のテンソルをグリフで表現したテンソル量可視化法をテンソル場に適用すると、隣接するテンソル間が不連続となり、データの全体像の把握が困難となってしまう。また、ディスプレイの制約により一度に表示できるテンソル数が制限されてしまうため、サイズの大きなボリュームデータなどを可視化することは難しい。

一方、テンソル場をベクトル場やスカラ場に変換し、従来の可視化法を適用することも可能である。この方式ではテンソルデータに連続性を与えることができるが、次数の低いデータへ変換するために、表現されるテンソルの自由度が制限されるといった問題が存在する。

3 VLICの適用

3.1 LICによるテンソル場可視化の先行研究

2次元の流れ場を効果的に可視化する手法としてLICが提案されている[1]。LICは、ホワイトノイズテクスチャの各ピクセル値を局所流線にそってぼかすことにより2次元の流れ場を可視化する。そのためシードポイントを必要とせず、密な可視化が可能である。

LICを用いたテンソル場可視化の先行研究として、Hsu[3]は、最大固有値の対応固有ベクトルによるLIC画像と、2番目に大きい固有値の対応固有ベクトルによるLIC画像の合成を試みている。また、拡散テンソルの対角化は、平行ではあるが逆向きの固有ベクトルが多く生じることがあり、このベクトルによりLICの流線が途中で絶たれてしまうのを防ぐために固有ベクトルを修正している。二枚のLIC画像を合成することで、主固有ベクトルだけを用いたLIC画像に比べて心筋の構造をより詳細に可視化している。しかし、合成の際各テンソルにおける固有値間の割合は考慮していないため、テンソルにおいて重要な意味をもつ不等方性の度合いを表現することができない。また、断面に2次元LICを適用しているため、3次元での全体

Examination of VLIC for Visualizing Diffusion Tensor Fields
Shoko Ando, Issei Fujishiro and Shigeru Muraki†
Graduate School of Humanities and Sciences
Ochanomizu University

2-1-1 Otsuka, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-8610, Japan.

†Collaborative Research Team of Volume Graphics, AIST

的な構造を直観的に把握することが困難である。

3.2 VLIC

LIC を単純に 3 次元へ拡張することは、流線の濃淡値を奥行き方向に重ねてしまうため、あまり効果的ではないと考えられていた。我々は、3 次元流れ場データの構造から流体位相解析を行い、選択的にボリュームレンダリングを行うことで 3 次元 LIC のボリュームレンダリングを実現している [4]。これを VLIC (Volume LIC) とよぶ。竜巻データに VLIC を適用した可視化結果を図 1 に示す。



図 1: VLIC

オリジナルの 2 次元 LIC のアルゴリズムを 3 次元にそのまま拡張することで生成した 3 次元 LIC ソリッドテキストチャをボリュームレンダリングする。このときテキストチャの相殺効果を緩和するため、重要度マップを用いることで選択的にボリュームレンダリングを行う。重要度マップは、位置に依存する不透明度伝達関数を定義している。流れ場データにおいては、例えば流体位相解析を用いて流れ場の特徴的な領域を抽出し、重要度マップを構成する。

さらに我々は、高並列計算可視化システムであるボリュームグラフィックス (VG) クラスタを用いることにより位相シフトアニメーションを行い、視点位置や伝達関数の対話的な操作を可能とし、流れの 3 次元構造を効果的に可視化している [5]。

3.3 VLIC によるテンソル場可視化

テンソル場に VLIC を適用する際、テンソル場の特徴をいかに保持するかが、可視化の有効性を決める重要な要素となる。本稿では、主固有ベクトルからなるベクトル場に VLIC を適用する。ここで、脳内部のテンソルを対象とするため、最大固有値の絶対値が閾値より大きいテンソルだけを追跡する。また、拡散テンソルにおいて重要な意味をもつテンソルの不等方性を考慮に入れる。ここでは Kindlmann, 他が提案している線形不等方性 c_l を用いる。線形不等方性 c_l は、固有値 $\lambda_i (i=1,2,3)$ の分布より以下のように定義される [6]：

$$c_l = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$$

(ただし $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$)

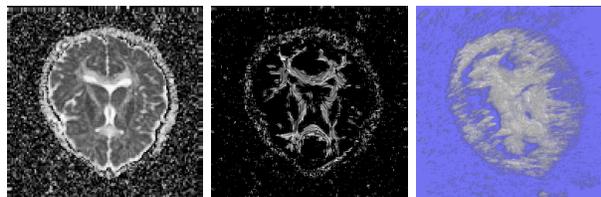
最大固有値の絶対値と線形不等方性が、各々閾値より大きいテンソルだけを選択し、その主固有ベクトル場に VLIC を適用する。

先行研究では 3 次元のテンソルデータの断面を切り出し、特定の 2 次元断面だけに LIC を適用していたのに対し、VLIC を適用することで 3 次元空間内での拡散の主方向を一度に視ることが出来る。また、テンソル場をスカラ場に変換しボリュームレンダリングしているものに比べ、主固有ベクトルの流れの方向まで表現することができる。

4 実験

VLIC による拡散テンソル場可視化の有効性を検証するために予備的実験を行った。対象データは解像度 $128 \times 128 \times 4$ の脳内拡散テンソルデータで、約 $1.8 \times 1.8 \times 5.0$ (mm) の間隔でサンプリングされている。まず前処理として、3 次元方向の追跡を効果的に行うため

にデータを補間した。今回は、 3×3 の行列で表現されたテンソルを各成分ごとに三重線形補間した。3.3 節で示した方法により生成された主固有ベクトル場を可視化した実験結果を図 2 に示す。図 2(a) に断面画像の最大固有値の画像を示し、その断面における主固有ベクトル場を LIC で追跡した結果を図 2(b) に示す。この選択された 3 次元主固有ベクトル場へ VLIC を適用した結果を図 2(c) に示す。



(a) 最大固有値 (b) LIC (c) VLIC

図 2: 脳内拡散テンソルデータの可視化結果

VLIC を適用することで、断面に 2 次元 LIC を適用しただけでは視ることができない、3 次元空間での拡散方向を追跡することが可能となり、全体的な拡散の様子を一度に視ることができた。

5 まとめと今後の課題

本稿では、VLIC によるテンソル場可視化の適用を検討し、その有効性を検証するための予備的実験を行った。

今後は、今回使わなかった情報を用いることで、テンソル場の特徴をより効果的に保持した可視化法を検討する。具体的には、主方向に畳み込み積分を行う前に、ノイズテキストチャに局所的な拡散効果をもたせる方針が有力である。また、今回の実験では重要度マップを作成しておらず、不透明度の設定はテンソル場の構造ではなくノイズテキストチャの値に依存していた。今後は、テンソル場における特徴領域を考慮した重要度マップの構成法も併せて検討する。

参考文献

- [1] B. Cabral, L. Leedom, "Imaging vector fields using line convolution," In *Computer Graphics Proc., Annual Conference Series*, ACM SIGGRAPH, Aug. 1993, pp.263-270.
- [2] 中田 力, 「MR Tractography - 拡散強調画像および最大値投影法を用いた神経路抽出 -」, 日本医学放射線学会, vol.53, no.2, 1993 年, pp.171-179
- [3] E. Hsu, "Generalized line integral convolution rendering of diffusion tensor fields," In *Proc. International Society for Magnetic Resonance in Medicine*, 9th Scientific Meeting and Exhibition, Glasgow, UK, 2001, p.790.
- [4] Y. Suzuki, I. Fujishiro, L.Chen, and H. Nakamura, "Hardware-accelerated selective volume rendering of 3D LIC textures," In *Proc. IEEE Visualization' 02*, Boston, Oct.-Nov. 2002, pp.485-488.
- [5] 村木 茂, 鈴木 靖子, 藤代 一成, 「ボリュームグラフィックス (VG) クラスタによる 3DLIC レンダリングの並列化」, 情報処理学会研究報告 2002-CG-108-12, 2002 年 8 月, pp.67-72
- [6] Gordon Kindlmann, D.Werinstain, and D. Hart, "Strategies for direct volume rendering of diffusion tensor fields," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol.6, no.2, pp.129-138, Apr.-Jun. 2000.