

CT ボリューム上の特徴線描画による直観的表現

Intuitive expression on CT volumes by drawing feature lines

○楠原健太 (東京都立大学)¹ 長井超慧 (東京都立大学)¹

¹ Kenta Kusuhara, ¹ Yukie Nagai, Tokyo Metropolitan University

キーワード: X線 CT スキャン, ボリュームレンダリング, 可視化, 特徴線

1. 序 論

近年のものづくりでは、設計や検査において産業用 X 線 CT スキャンが使用されることが多くなってきた。産業用 X 線 CT スキャンは物体を透過する X 線を利用して物体を測定するため、非破壊で物体の内部構造を観察することができる。X 線 CT スキャンを行うことで、計測物の密度に比例する CT 値付きの直方体 (ボクセル) の 3 次元配列である CT ボリュームを得る。得られた CT ボリュームをディスプレイ上で立体的に表示し観察する方法の 1 つにボリュームレンダリングがある。ボリュームレンダリングは、CT ボリュームを透過表示することで物体の内部構造と外形を同時に観察できる点で合理的であるが、内部の構造が何重にも重なって表示されるため、物体の形状を直観的に把握することが困難である (図 1)。本研究では、物体の形状を直観的に把握するために、ボリュームレンダリング上で物体の形状を表す特徴線を描画する手法を提案する。図 2 にそのイメージ図を示す。

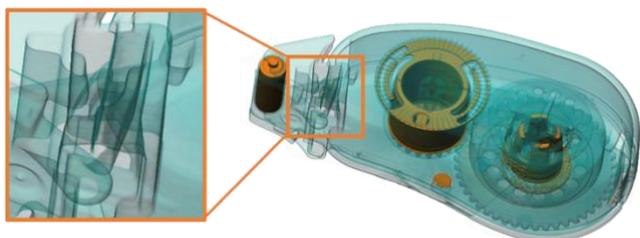


Fig.1 Issue of volume rendering

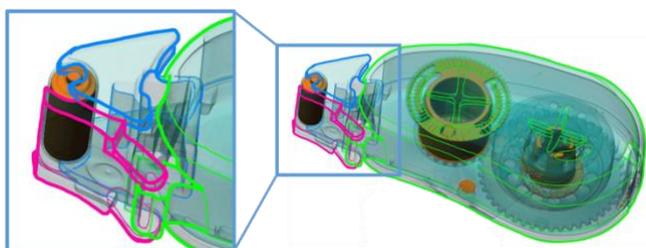


Fig.2 Goals of our work

1.1. 産業用 X 線 CT スキャン

X 線 CT 装置では、X 線源と X 線検出器とが計測物を挟んで対向して配置される (図 3)。計測物が乗った回転台を連続的に回転させながら、観察したい断面を横切る X 線ビームを 360 度方向から照射する。計測物を透過し減衰した X 線の線量分布を検出器で計測して投影データを得る。こ

して得られた 360 度分の投影データを回転角 θ に応じて並べたものを投影像列 (サイノグラム) と呼ぶ。この投影像列に対して CT 再構成演算処理を行うことで CT ボリュームが得られ、これは CT 値付きの直方体 (ボクセル) の 3 次元配列で、断面画像の積層となっている。また、CT 値は計測箇所における物質の密度に比例する。

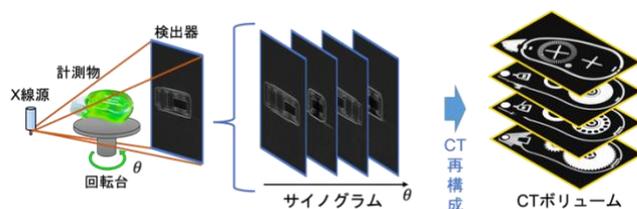


Fig.3 X-ray CT scan flow

1.2. ボリュームレンダリング

CT 再構成により得られた CT ボリュームに対して、3 次元空間をボクセルの集合として表現し、2 次元ディスプレイ上に表示することにより物体を可視化できるようにする手法をボリュームレンダリングと呼ぶ。ボリュームレンダリングは、各ボクセルに対して CT 値に応じた透明度を与えることで物体を透過表示することが可能である。また、閾値処理を行うことで素材ごとに異なる色で表示することも可能である。そのため、物体の内部構造とその周囲、あるいは物体表面との位置関係を直観的に把握しやすくなる。しかし、透過表示することで内部の構造が何重にも重なって表示されるため、物体の形状や奥行きを直観的に把握することが困難である。

2. 提案手法

2.1. 提案手法の概要

本手法では、3 次元の物体におけるエッジを特徴線として抽出し、ボリュームレンダリング上に表示することを目指とする。エッジとは物体の角の部分に相当する。本研究における提案手法は、CT ボリュームを入力とし、CT ボリューム内のボクセルのうちエッジとなるボクセルを抽出し出力とする。図 4 に本手法の流れのイメージ図を示す。エッジは必ず物体の表面に存在するため、エッジを検出する際に物体の表面に相当するボクセルのみを探索することで計算コストを削減する。

エッジ検出の指標としては、CT 値の勾配ベクトルを用いる。CT 値の勾配ベクトルの方向は、CT 値が最も急激に

増大する方向を示し、隣接するボクセルを用いた CT 値の中心差分で求まる。また、物体の表面は空気と接しているため、CT 値の勾配ベクトルの大きさ（勾配ノルム）が極端に大きい。そのため、適切な閾値処理により物体の表面に相当するボクセルを検出できる。

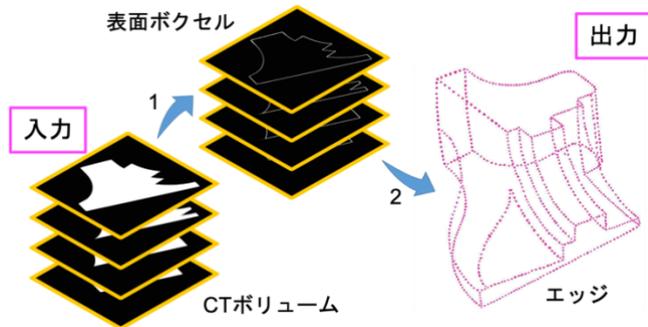


Fig.4 Proposal method flow

2.2. エッジ検出

エッジ検出は、エッジ付近で勾配ベクトル方向が極端に変わるという特徴を利用する。注目ボクセルの近傍における勾配ベクトル方向の様子を統計的に表すために主成分分析を用いる。まず、注目ボクセルの近傍のボクセルにおける勾配ベクトルの x, y, z 成分の分散共分散行列 C を生成する。分散共分散行列は式(1)のように表される。ただし、 N は近傍ボクセルの個数、 \mathbf{n}_i は i 番目のボクセルにおける勾配ベクトル、 $\bar{\mathbf{n}}$ は勾配ベクトルの平均を表す。

$$C = \frac{1}{N} \sum_i^N (\mathbf{n}_i - \bar{\mathbf{n}})(\mathbf{n}_i - \bar{\mathbf{n}})^T \quad (1)$$

生成した分散共分散行列に対して固有値解析を行い、固有値を求める。得られた三つの固有値 ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$) の比により、注目ボクセルが平面・曲面・エッジのいずれに相当するかを判定する。物体の形状における勾配ベクトルの様子を図5に示す。平面と曲面は周囲の勾配ベクトル方向がほぼ一定であり、一つの固有値のみが極端に大きい値を示す。一方、エッジ付近では周囲の勾配ベクトル方向が極端に変化し、二つの固有値が極端に大きい値を示す。固有値比 (λ_2/λ_1) の閾値処理を行うことでエッジ付近のボクセルのみを検出する。固有値による平面・曲面・エッジの分類をまとめると表1のようになる。

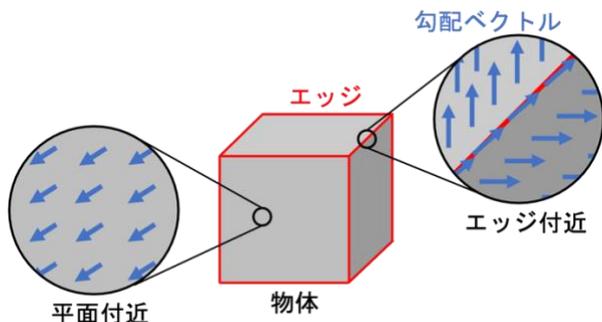


Fig 5. Gradient vectors on a plane and on an edge

Table.1 Patterns of eigenvalues

平面	$\lambda_1 \gg \lambda_2, \lambda_3 \approx 0$
曲面	$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$
エッジ	$\lambda_1 \cong \lambda_2 \gg \lambda_3$

3. 結果と考察

本研究では、実際に X 線 CT 装置で計測したデータを用いて実験を行なった。計測物としては、曲面や様々な角度のエッジが存在するブロックを用いた (図6 (a))。得られた CT ボリューム (図6 (b)) を入力とし、ボリュームレンダリングで表示したものと提案手法を用いてエッジ検出を行い、検出されたボクセルをボリュームレンダリング上に表示したものを図7に示す。

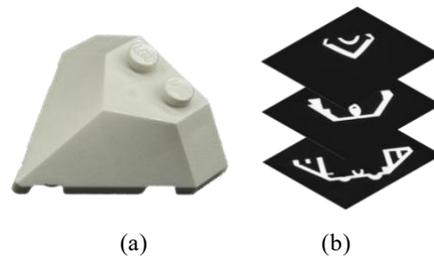


Fig.6 (a) Real object and (b) CT volume

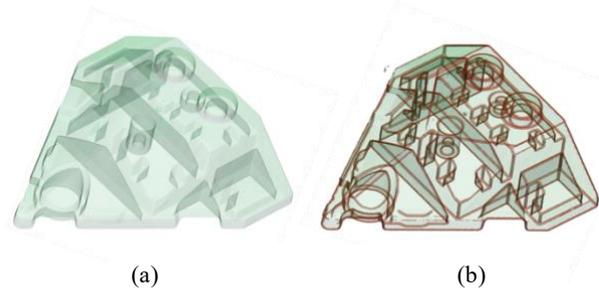


Fig.7 (a) Volume rendering and (b) result of our work

また、固有値比 (λ_2/λ_1) の閾値 τ を0.2, 0.1, 0.03としてエッジ検出した結果を図8に示す。図8の上段は近傍ボクセルの個数を $3 \times 3 \times 3$ として実装した結果を示し、下段は $5 \times 5 \times 5$ として実装した結果を示している。図8のピンク枠で示している通り、近傍ボクセルを増やし分散共分散行列で計算する勾配ベクトルを増やすことでより多くのエッジを検出できる。また、図8のオレンジ枠で示している通り、閾値を小さくすることでより浅いエッジを検出できる。しかし、図8の青枠で示している通り、筒状の細かい箇所のような本来エッジではない箇所も検出してしまう。そのため最適な閾値設定が必要である。

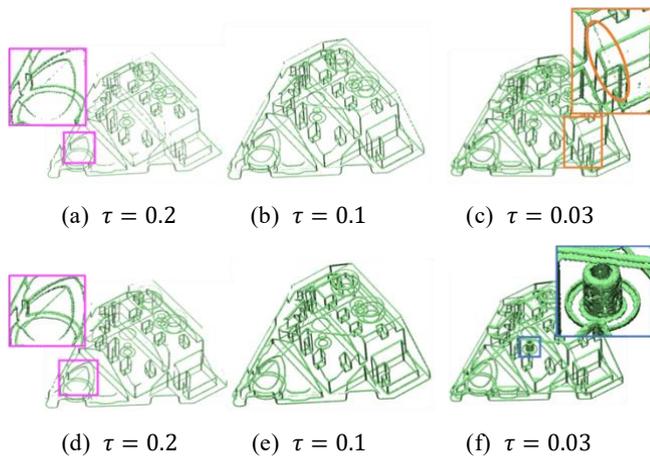


Fig.8 Results with various eigenvalue ratio thresholds and number of vicinity voxels

4. まとめと今後の展望

本研究では、産業用 X 線 CT 装置でスキャンして得られた CT ボリュームを入力とし、CT ボリューム内のボクセルのうち特徴線となるエッジを抽出する手法を提案した。今後は、エッジ検出により抽出したボクセルを点群とみなし、特徴線を生成する手法を開発する予定である。また、形状の特徴や特徴線の位置に応じて線の太さや色を変更することで認識のしやすさの向上を目指す。さらに、マルチマテリアルへの適用を目指し、材質の違う境界部分を表す特徴線の描画法を構築する。

参考文献

- (1) Michael Burns et al. Line Drawings from Volume Data., ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH) vol. 24, No.3, pp. 512-518, August 2005.
- (2) Doug DeCarlo et al. Suggestive Contours for Conveying Shape., ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH) vol.22, No3, pp. 845-855, July 2003.
- (3) 戸田祐介, X 線 CT -産業・理工学でのトモグラフィー実践活用- 初版, 共立出版株式会社, 2019.
- (4) 日本医用画像工学ハンドブック編集委員会, 医用画像工学ハンドブック, 日本医用画像工学会, 2012.