

パーシステントホモロジーを用いた腹膜播種結節の自動判別手法の特性評価

日大生産工(学部) 村上翔梧
日大・医学 萩原謙日大生産工 佐々木真
自治医科大 山下裕玄

1. 背景

近年、胃癌診断や病期(ステージ)分類において、内視鏡画像や CT 画像などを用いた画像診断が一般的となっている。これらの画像情報は、病変の大きさ・形状・境界の明瞭さなどから腫瘍の進展度を評価し、治療方針の決定や予後予測に重要な役割を果たしている。しかし現状では、病変の評価やステージ分類は検査医の主観に大きく依存しており、同一の画像に対しても医師間、あるいは同一医師内で評価のばらつきが生じることが指摘されている¹⁾。このような主観的評価の差は、治療の一貫性や患者間比較の公平性を損ねる要因となる。

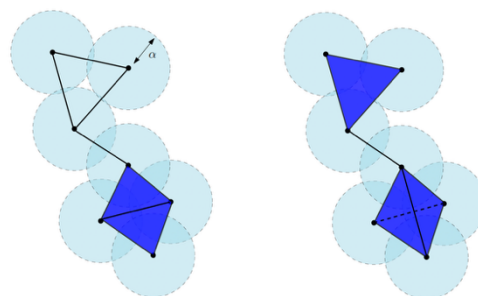
腹膜播種転移は、胃癌の予後を規定する重要な転移形式の一つであり、近年、腹膜癌指数(Peritoneal Cancer Index : PCI)が腹膜播種転移の進展度を定量的に示し、予後と相関する重要な指標となる可能性が示唆されている。PCI は腹膜播種結節の分布と大きさに基づき算出され、治療方針の選択や予後予測に直結する極めて重要な臨床指標である。しかし、PCI の算出は術者や検査医の主観に大きく依存しており、客観的で再現性の高い評価法の確立が求められている。

そこで本研究では、医用画像に含まれる腫瘍や腹膜播種結節の形態学的特徴を数値化し、自動的に識別・定量化する手法の開発を目的とする。特に、従来の画素値や単純な形状統計では捉えにくい構造的複雑性や局所的パターンの違いを抽出することで、主観に依存しない高精度な腹膜播種結節の判別および PCI 評価の自動化への応用を目指す。

2. 手法 : Topological Data Analysis

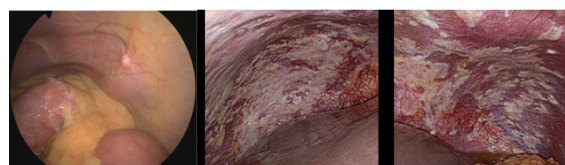
Topological Data Analysis (TDA : トポロジカルデータ解析) は、データの形状や構造的特徴に注目して解析を行う手法であり、通常の統計量では捉えにくい連結性、穴の存在、形の入り組み具合といった情報を数理的に表現できる点に特徴がある。代表的手法である Persistent Homology では、データに対してスケールを連続的に変化させながら、構造がどの段階で現れ、どの段階で消え

るかを解析する。これによりノイズのように短時間で消える構造と、長く存在する本質的な構造を区別することができる³⁾。

Fig.1 TDA と Persistent Homology の概念図²⁾

黒い点はデータ点を示し、水色の円はそれぞれの点の近傍範囲を表す。円が重なって線や三角形ができることで、データのつながりや穴の構造が表現される。スケールを変化させながら、これらの構造が現れたり消えたりする様子。

本研究では、この TDA を腫瘍画像に適用し、腫瘍領域および腹膜播種結節領域の形状的複雑性、内部の不均一性、境界の入り組み具合を定量的に評価することを目的とした。解析対象となる腫瘍画像を Fig.2 に示す。

Fig.2 TDA 解析に用いた腹膜播種結節画像の例
白色に変色した孤立領域が腫瘍である。

本画像は Peritoneal Cancer Index の Region 1 および Region 3 領域における腹膜播種結節であり、左から軽度・中等度・重度の典型例を示している。白色に変色した孤立領域が腫瘍であり、この領域を自動検出して総面積を評価することを最終的な目標とした。

これらの腹膜播種結節画像は、明度や輝度分布が不均一であり、局所的な明暗差が小さい場合も

Performance Evaluation of an Automated Detection Method for Peritoneal
Dissemination Nodules Using Persistent Homology

Shogo MURAKAMI, Makoto SASAKI, Ken Hagiwara and Hiroharu YAMASITA

多く、従来の画素値ベースの手法では領域の抽出や分類が困難となることがある。そこで画像の位相的構造に着目し、腫瘍の形態的特徴を数理的に表現する手法として TDA を導入した。本手法は、従来の明度や質感（テクスチャ）解析に比べて、局所構造の連結性や形の乱れ、境界の複雑性をより高感度に捉えることができる点に特徴がある。

3. 結果

本研究で開発した TDA を用いた画像解析手法により、様々な症例において腹膜播種結節の検出を行った。検出結果の例を Fig. 3 に示す。図中の白い斑点は腹膜播種結節、赤枠は本手法で検出された領域を示す。

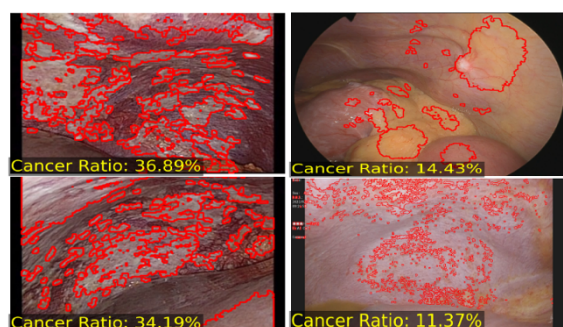


Fig. 3 TDA を用いた腹膜播種結節の検出例
(左：成功例、右：失敗例) 図中の数値(Cancer Ratio)は画像全体に対する結節領域の割合を示す。

左の成功例では、結節の境界形状や分布が正確に抽出されており、実際の腫瘍領域と良好に一致している。一方、右側の失敗例では、照明ムラや背景反射の影響により、一部で過検出や検出漏れが生じている。図中の数値 (Cancer Ratio) は、画像全体に対する結節領域の割合を示しており、病変の広がりや密度を定量的に把握する指標として利用できる。従来の画素の明度や質感に基づく解析では照明条件やノイズによって検出結果が変動することがあったが、本手法では画像の位相的特徴を用いることで結節の形態的特徴をより的確に抽出することができた⁴⁾。明度やコントラストが異なる複数の腹膜画像に対しても、同一のパラメータ設定で一貫した結果が得られ、症例間での高い再現性と汎用性が確認された。また、RGB およびグレースケール画像を統合的に解析することで、結節境界の不整形や内部構造の不均一性といった特徴を高感度に抽出することができた。さらに、検出された腹膜播種結節の割合を自動算出し、画像上に赤枠および数値で可視化する機能を実装した。こ

れにより、結節の分布や広がりやを直感的かつ定量的に評価でき、治療前後の変化や経時的追跡にも応用可能であることが示唆された。

4. まとめ

本研究では TDA を応用した画像解析手法を開発し、複数の医用画像に対して腹膜播種結節の自動検出を行った。その結果、症例や撮影条件が異なる場合でも、同一の解析条件下で安定した検出が可能であり、従来の主観的評価に依存しない客観的かつ再現性の高い手法としての有用性が示唆された。また、本手法は 1 枚あたり約 3~5 秒で解析を完了し、検出された腹膜播種結節の割合を数値および赤枠で可視化することで、病変の広がりや密度を視覚的・定量的に評価できた。

一方で、微小な腹膜播種結節やコントラストの低い領域では検出が不十分な場合があり、感度向上が今後の課題である。また、画像取得条件の違いに対する適応性の強化も重要な検討項目である。

こうした課題を踏まえて、今後はより臨床応用に直結する方向へ拡張を図る。第一に、臨床的に頻用される PCI のなかでも解剖的ランドマークが多い Region1 (右上腹部) および Region3 (左上腹部) に焦点を当て、これらの局所領域で本手法の検出精度を定量的に評価する。これにより、得られた TDA 出力を直接的に PCI スコア算出に結びつける基盤を構築したい。さらに、本手法を静止画から動画データへ対応させることで、時間的変化を含む動態情報を解析し、病変進展のモニタリングを可能としたい。加えて、TDA による腫瘍構造の複雑性指標を活用し、予後推定や治療反応の予測へと応用することで臨床支援の拡張を目指す。

参考文献

- 1) 清松 知充, 日本消化器外科学会雑誌 53(12), 1016-1025, (2020)
- 2) G. Carlsson, Bulletin of the American Mathematical Society, 55, 211-261, (2018)
- 3) H. Edelsbrunner, European Mathematical Society Magazine, 87, 14-38, (2012)
- 4) R. Reiazi et al., Computers in Biology and Medicine, 133, 104400, (2021)