

4次元超曲面曲率を用いた FDG 吸収傾向の可視化と定量化 Visualization and Quantification of FDG Absorption Tendency Using 4D Hypersurface Curvature

柳田 直也¹⁾ 戸崎 哲也¹⁾ 千田 道雄²⁾
Naoya Yanagida Tetsuya Tozaki Michio Senda

1. はじめに

PET によるがん診断はグルコースに類似した構造を持つ薬剤である FDG を用いる FDG-PET が広く用いられる。これは、FDG 集積分布を画像化することで行われる。がん組織は他の組織と比べて FDG の集積が顕著であり、FDG-PET 像上に異常な陰影として現れる。一方、生理的集積がみられる組織や臓器にも FDG が集積し、異常を疑う陰影が表れる。そのため、FDG-PET 像上の陰影ががん腫瘍を示しているのか、正常組織への集積を示しているのかを判断することが難しい。この問題を解決するために PET 画像が機能画像であることに着目し、どのように FDG が取り込まれるかという情報を得られると考えた。本研究では、4次元超曲面曲率を用いて組織や臓器ごとの FDG 吸収傾向を視覚的、定量的に評価することでがん診断を支援することを目的とする。

2. 4次元超曲面曲率

FDG-PET 像上の組織の機能を表現する手段として 4次元超曲面曲率^[2]を用いる。4次元超曲面曲率は 3次元濃淡画像の x 軸、 y 軸、 z 軸に加え、濃淡値を第 4 軸にとり、3次元濃淡画像を 4次元超曲面と考えたときの法曲率である。まず、FDG-PET 像に対して、式(1)に示す 3次元ガウス関数を用いて平滑化を行う。式(1)において、 x, y, z は 3次元画像における注目画素の座標、 $f(x, y, z)$ はその座標における重みを示す。次に、平滑化を行った FDG-PET 像から 4次元超曲面曲率を算出する。4次元超曲面曲率は、式(4)に示す行列 W の固有値として与えられる。ここで、式(2)および式(3)における f は式(1)の $f(x, y, z)$ の導関数であり、FDG-PET 像と連続関数である 3次元ガウス関数との畳み込みによって計算する。行列 W の 3つの固有値を $|\lambda_1| \geq |\lambda_2| \geq |\lambda_3|$ とすると、固有値に対応する固有ベクトル e_1, e_2, e_3 は互いに直交し、その方向は各固有値から得られる曲率に対応する輝度変化の方向と一致する。ここでは、固有値の絶対値の大きい順に第 1 曲率、第 2 曲率、第 3 曲率と定め、曲率に対応する固有ベクトルを曲率ベクトルと呼ぶ。

$$f(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^3 \sigma^3} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$F_1 = \begin{pmatrix} 1 + f_x^2 & f_x f_y & f_x f_z \\ f_y f_x & 1 + f_y^2 & f_y f_z \\ f_z f_x & f_z f_y & 1 + f_z^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$F_2 = -\frac{1}{D} \begin{pmatrix} f_{xx} & f_{xy} & f_{xz} \\ f_{yx} & f_{yy} & f_{yz} \\ f_{zx} & f_{zy} & f_{zz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$W = F_1^{-1} F_2 \quad (4)$$

$$\text{ただし、} D = \sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}$$

3. 研究結果

3.1 曲率ベクトルの可視化

図 1 に示すようながんの原発部である直腸と生理的な FDG の集積が見られる膀胱における陰影に対して曲率ベクトルを算出し、可視化した結果を図 2~5 に示す。なお、曲率ベクトルの大きさは曲率の大きさによって変化させている。



図 1 直腸がん患者の FDG-PET データ MIP 画像

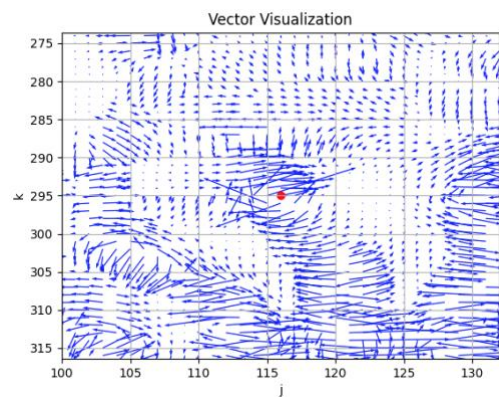


図 2 直腸がん陰影の第 1 曲率ベクトル (coronal)

- 1) 神戸市立工業高等専門学校 Kobe City College of Technology
- 2) 神戸市立医療センター中央市民病院 Kobe City Medical Center General Hospital

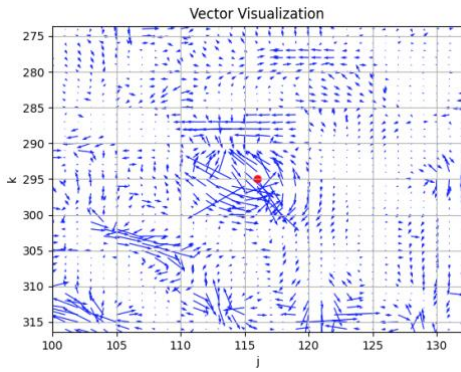


図 3 直腸がん陰影の第 2 曲率ベクトル(coronal)

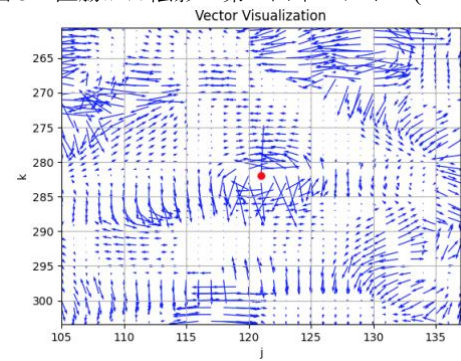


図 4 膀胱陰影の第 1 曲率ベクトル(coronal)

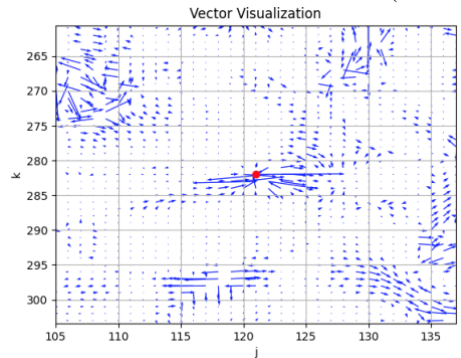


図 5 膀胱陰影の第 2 曲率ベクトル(coronal)

図 2, 3 に示すように第 1, 2 曲率共に直腸がん陰影の中心を表す赤点の周りを周回するような流れが見られた。また、図 4 に示すように膀胱の陰影では、直腸がん陰影と同様に中心を周回する流れが見られた。しかし、第 2 曲率では中心を横切るような水平方向の流れが見られた。

3.2 渦度の算出

3.1 節に示すように、曲率ベクトルは陰影の中心を周回するような流れが見られたため、回転強度を比較するために渦度を算出した。直腸がん、膀胱の陰影から算出した渦度の内、中心付近で絶対値が最大となった値を表 1, 2 に示す。直腸がんと膀胱付近の曲率ベクトルから算出した渦度を比較すると、直腸がんの渦度が大きくなる傾向があった。しかし、sagittal 方向に見た膀胱の渦度のみ、他の値よりも高くなった。第 3 曲率は、直腸がんも膀胱のどちらも他の曲率の渦度と比較して値が小さくなっており、周回するような流れが見られないことがわかった。

表 1 直腸がん陰影付近における曲率ベクトルの渦度

曲率番号	方向	
	coronal	sagittal
1	8.001	5.811
2	8.196	9.439
3	1.890	2.791

表 2 膀胱陰影における曲率ベクトルの渦度

曲率番号	方向	
	coronal	sagittal
1	5.612	15.706
2	4.480	6.021
3	1.016	2.573

4. 考察

曲率ベクトルを可視化した結果、陰影の中心付近ではベクトルの絶対値が大きくなっており、流れが強くなっていることがわかった。これは、FDG ががん吸収されていることを表現している可能性がある。生理的な集積を示す膀胱付近の第 2 曲率では、水平方向の動きが見られたが、これは FDG の滞留を表現している可能性がある。また、曲率ベクトルの渦度を算出した結果、直腸がんと比較して膀胱の渦度は小さい傾向にあるため周回とは別の流れがあると考えられる。

5. まとめ

本研究では、FDG-PET 像における直腸がんも膀胱の曲率ベクトルと渦度を解析した。その結果、直腸がん陰影では第 1, 2 曲率共に中心を周回するような流れが見られた。一方、膀胱陰影では直腸がん陰影と同様な中心を周回する流れに加え、第 2 曲率では中心を横切るような水平方向の流れも見られた。また、曲率ベクトルから算出した渦度解析では、直腸がんの方が膀胱よりも大きくなる傾向があった。今後の課題として、症例数を増やして同様の解析を行い、FDG の流れの違いを評価したい。また、本研究では曲率ベクトルを平面に投影して流れを評価したが、3 次元の可視化による評価も試みる。

参考文献

- [1] 朝戸天翔, 戸崎哲也, 千田道雄: 組織の機能に基づく FDG-PET 像の解析, FIT2022 (第 21 回情報科学技術フォーラム), 第 2 分冊, pp.531-532 (2022)
- [2] O.monga,S.benayoun,“Usingpartialderivativeson3Dimages to extract typical surface features”, Computer Vision and Image Understanding, Vol.61, No.2 pp.172-189, 1995.