

4次元超曲面曲率に基づく FDG-PET 画像上のがん陰影の特徴解析 Characteristic Analysis of Cancer Shadows on FDG-PET Images Based on Curvature of Four Dimensional Hypersurface Curvature

朝戸 天翔¹⁾ 戸崎 哲也²⁾ 千田 道雄³⁾
Sho Asato Tetsuya Tozaki Michio Senda

1 はじめに

PET による画像診断は、被験者に放射性核種を用いた薬剤を投与し、その放射性核種の集積の組織・臓器分布を画像化することで行われる。PET の中でも、薬剤に ^{18}F -FDG を用いるものは FDG-PET と呼ばれ、FDG が悪性腫瘍に集積しやすいことを利用してがんの診断に広く用いられている。しかし、FDG は悪性腫瘍のみでなく、グルコース代謝の高い正常な臓器にもよく集積するため、FDG-PET による画像診断では、画像中の陰影が腫瘍への集積なのか、正常な組織への集積なのかを見極めることが重要である。

PET 画像は、体内に投与された薬品がどの組織に取り込まれるかを表す機能画像である。しかし、取り込まれると言っても、血管なら流れるように、膀胱なら滞留するように、がん細胞なら一点に集中するというように、体内の各組織によって薬品の取り込まれ方が異なっていると考えられる。本研究では、曲率の固有ベクトルに着目し、投与された FDG が体内でどのように動き、組織に取り込まれるかという観点から病変部位の特徴解析を行い、腫瘍への集積とそれ以外の組織への集積を判別するプロセスとして活用することを目指す。

2 研究内容

2.1 4次元超曲面曲率の算出

まず、FDG-PET 画像に対して、ノイズ除去のため式 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。

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

次に、平滑化を行った FDG-PET 画像から、4次元超曲面曲率を算出する。本研究で用いる 4次元超曲面曲率は、文献 [1] によるものである。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り、式 4 に示す行列 W の固有値として与えられる。

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

- 1) 神戸市立工業高等専門学校 電気電子工学専攻
- 2) 神戸市立工業高等専門学校 電子工学科
- 3) 先端医療センター

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

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

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

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 画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。今、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 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ 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 [2]、曲率に対応する固有ベクトルを曲率ベクトルと呼ぶ。

2.2 曲率ベクトルによる特徴解析

FDG-PET 画像から各画素における 4次元超曲面曲率を算出した後、曲率の大きさを濃度値とした特徴画像を作成した。回盲部がんの FDG-PET 画像について、作成した特徴画像を図 1 に示す。本研究では、第 2 曲率の特徴画像中の注目画素に対して、注目画素周囲の曲率ベクトルの方向を可視化し、図 2 に示すように特徴画像中に重ねて表示させることで、注目画素に対応する体内の各組織の特徴を調査した。

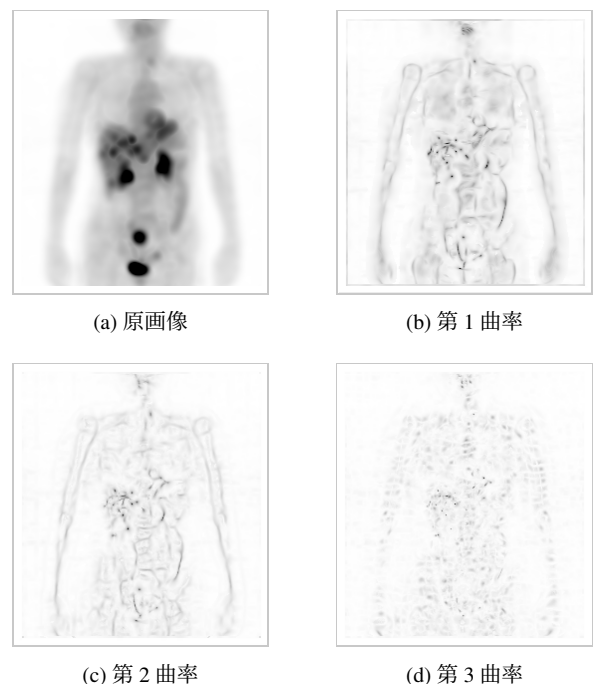


図 1: FDG-PET 画像および作成した特徴画像

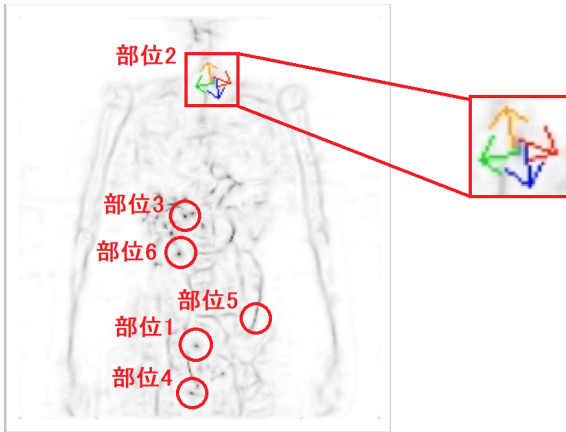


図2: 注目画素周囲の曲率ベクトル。部位1は回盲部, 部位2は甲状腺, 部位3は肝臓, 部位4は膀胱, 部位5は下行結腸, 部位6は腎臓に該当する部分である。

3 研究結果

表1において, 注目画素周囲の縦横方向, 斜め方向に位置する画素に対応した固有ベクトルの方向を表し, それぞれ coronal 方向, sagittal 方向から見た様子を表している。各部位の体内での位置は図2に示す通りである。

表1: 各部位周囲の曲率ベクトル

部位	縦横方向		斜め方向	
	coronal	sagittal	coronal	sagittal
部位1				
部位2				
部位3				
部位4				
部位5				
部位6				

4 考察

部位1~3は, 通常では生理的な集積が見られない部分に集積が見られており, 異常な組織である可能性が高

いと考えられる。実際に, 部位1の回盲部はがんの診断が下されている。しかし, 部位1~3の曲率ベクトルは場所によって異なる方向を向いており, 部位間に共通する特徴は見られなかった。

部位2は, 曲率ベクトルを逆方向から見ると, 放射状に集積しているという特徴が見られた。また, 部位3では水平方向に向かうベクトルが多く, 水平面で放射状に集積しているという特徴が見られた。このことから, 部位2と3の集積のされ方は, 生理的な特徴とは全く異なる特徴を示していると考えられる。

部位4~6は, 通常でも生理的な集積が見られる組織である。これも各部位ごとに異なった特徴が見られ, 特に部位5は線状の陰影に沿うベクトルが多く, ベクトルを逆方向から見ると, 下行結腸に沿って下方向に向かって集積していることが見て, 下行結腸の生理的な特徴をよく表現していると考えられる。

また, 部位4では, ベクトルを逆方向から見ると, 上方向から集積し, 水平方向に集積したり広がっていく特徴があると考えられる。このことから, 部位4の周囲の曲率ベクトルは, 尿管を通った尿が膀胱で滞留している様子を示している可能性があると考えられる。

一方で, 部位6では, coronal 方向に大きな成分を持つベクトルが少なく, coronal 方向から見ると, 上方向を除く様々な方向から集積していると考えられる。特に, coronal 方向から見た縦横方向のベクトルでは右方向に向かうベクトルが多く, ベクトルを逆方向から見ると, 腹部大動脈からの集積を示していると考えられる。

5 まとめ

病変部位周囲の曲率ベクトルの大きさや方向を調査することにより, 部位4~6の生理的に集積が見られる器官では, 生理的な特徴をベクトルが向いている方向で表現できる可能性を示したが, 部位1~3の異常な組織である可能性が高い部位では, ベクトルが様々な方向を向いており, 生理的な特徴とは関係性がない特徴を示すという違いがあることを確認できた。

今後は, 回盲部がん以外の症例の FDG-PET 画像について同様の調査を行い, 通常でも生理的な集積が見られる膀胱などの周辺の固有ベクトルが同じ特徴を示すのか精査する必要がある。また, その他のがんと診断された箇所についても曲率ベクトルから特徴を調べ, 全体的に病変組織がどのような特徴を示すのか精査し, 曲率に対応する固有ベクトルに基づいて腫瘍集積とそれ以外の集積を判別できるか検討する必要がある。

参考文献

- [1] O. monga, S. benayoun: "Using partial derivatives on 3D images to extract typical surface features", Computer Vision and Image Understanding, Vol.61, No.2 pp.172-189, 1995.
- [2] S.Takamuro, T.Tozaki, M.Senda: "Three-dimensional feature understanding based on curvature information of FDG-PET 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC)", Sydney, Australia, pp.1-4, 2018.