

臨床 CT 画像に適応可能な空間分解能評価法の考案

今井 國治[†] 遠地 志太[‡] 梁川 雅弘[#]名古屋大学大学院医学系研究科[†] 大阪大学医学部附属病院[‡] 大阪大学大学院医学研究科[#]

1. はじめに

近年、0.25mm 幅という極小検出器を持つ超高精細 CT 装置が登場したことによって、従来では検出不可能だった細かな生体情報が得られるようになった。このように、多様化、高精細化する CT 画像を医療現場でどのように活用できるかを把握することは必要であり、その画質特性を評価することは極めて重要である。

空間分解能をはじめ、CT 画像の画質評価では、ファントムなどの単純構造を基にした物理評価が主流である。そのため、視覚評価による結果と必ずしも一致しないことを経験している。このような問題点を解決するために、医用画像の画質評価では、臨床画像そのもの、もしくは可能な限り臨床状態を再現したファントムによる評価が必要である。しかし、臨床画像のような複雑な構造を基にした画質評価法は未だ確立されていない。本研究では、伸展固定肺における血管影、気管支影に対して対象 Toeplitz 行列を用いた新たな分解能評価法を考案した上で、超高精細画像と従来画像の分解能を評価し、提案法の臨床画像への適応可能性について検証した。

2. 解析対象および実験方法

解析対象には、術後肺から作成した伸展固定肺を使用した。伸展固定肺は、臨床画像と病理所見を対比し理解するための一つの基礎的解析法として利用されており、人間の生体構造を可能な限り忠実に再現することができる。これを超高精細 CT 装置 (Aquilion Precision : CANON) の撮影寝台上に配置した。この装置の撮影モードには、表 1 に示すような特徴を有しており、従来の分解能を持つ通常モード (NR) と、解像度を向上させた高分解能モード (HR、SHR) がある。そこで、三種類の撮影モードおよび小焦点 (SI: 0.6mm × 0.6mm) に設定の下、管電圧 120kVp、CTDI_{vol} 9mGy となる臨床相当の線量条件下で撮影した。その後、逐次近似応用再構成法

表 1 撮影モードによる検出器幅とチャンネル数

Scan Mode	列方向(Row)	面内方向(Channel)
NR	0.50 mm	896 ch
HR	0.50 mm	1792 ch
SHR	0.25 mm	1792 ch

(AIDR-3D、強度 : eMild) を用いて、再構成関数 FC04-H、スライス厚 0.5mm、DFOV 200mm、マトリックスサイズ 512-pixel の再構成条件で横断面画像を作成した。DICOM 形式で出力された画像から、後述する提案法を用いて撮影面内の分解能を評価し、撮影モードによる画質の差異を検討した。

3. 解析方法

従来から空間分解能評価法として広く用いられている MTF は、主に次の特徴を持っている。

- (1) 点像もしくは線像強度分布のような単純構造信号を用いた解析法である。
- (2) 前提条件として、評価対象となる画像系全体に線形性が成立する必要がある。
- (3) 解像度評価に非常に有用な「画像信号の周波数分解」を利用した方法であり、その手段としてフーリエ変換が使用されている。

しかし、MTF を臨床画像への適用を考えた場合、項目(1)では、基本的に人体内に単純構造信号が存在しないこと、項目(2)では、広く普及している逐次近似応用再構成画像は非線形的特性を有していること、項目(3)では、高速計算アルゴリズム上、サンプル数を 2^n 個にするという制約を受けることなどの問題点がある。これらの点を解決できるように本提案法では、対称 Toeplitz 行列による周波数分解を評価原理に組み込んだ。

一般に、実画像 $x(n)$ は、画像信号 $s(n)$ と平均零の加法性白色雑音 $\omega(n)$ を用いて、 $x(n) = s(n) + \omega(n)$ と表現され、この中の画像信号 $s(n)$ に対して解像度評価が行われている。しかし、CT 画像上に存在する画像ノイズは、厳密には白色雑音ではないため、容易に取り除くことは出来ない。また、視覚評価では、画像ノイズの影響を加味した実画像 $x(n)$ が用いられることが多い。これらを踏まえ、本提案法では、画像ノイズを含んだ実画像に対して解析を行った。この場合の対称 Toeplitz 行列 (自己相関行列) R を求めると、

Spatial Resolution Evaluation Method for Clinical Computed Tomography Images

[†]Kuniharu IMAI, [‡]Yukihiko ENCHI #Masahiro YANAGAWA

[†] Nagoya University, Graduate School of Medicine

[‡] Osaka University Hospital

[#] Osaka University, Graduate School of Medicine

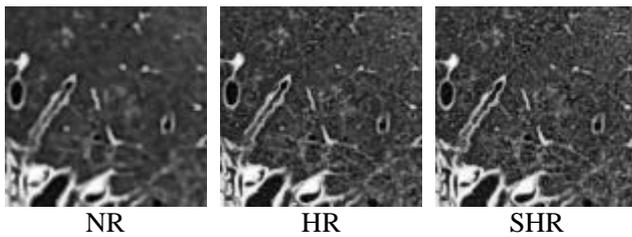


図1 伸展固定肺の横断面画像に対する解析領域

$$R = \begin{bmatrix} r_x(0) & r_x(1) & \dots & r_x(N-1) \\ r_x(1) & r_x(0) & \dots & r_x(N-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_x(N-1) & r_x(N-2) & \dots & r_x(0) \end{bmatrix}$$

... $r_x(\tau) = E\{x(n)x(n+\tau)\}$: $x(n)$ の自己相関関数

となり、ここから求まる固有値 $\lambda_i(R)$ は、各空間周波数におけるエネルギー密度を表している。

以上の基本原理に基づき、本提案法では、伸展固定肺から、図1に示すような任意の大きさの領域を対象に、 x 、 y 方向に標準化したCT値プロファイルから自己相関行列を求め、これを基に各空間周波数における肺血管部及び気管支部のエネルギー密度を算出した。

4. 解析結果および検討

図2は、横断面画像の x 方向（横方向）に対するエネルギー密度の周波数特性であり、スキャンモードが異なる場合を描出した。エネルギー密度は、NRモード撮影で、低次高調波領域ほど高くなっているのに対し、高次高調波領域では、高分解能モードの方が高くなった。一般的に、画像信号のエッジ成分は空間周波数の高い領域に含まれることが知られており、高分解能モードでは、検出器のチャンネル数が増加したことで、部分体積効果が抑制された鮮鋭度の高い画質が得られ、その結果、高次高調波領域への固有値寄与率が高くなったと考えられる。さらに、本提案法において、解析サンプル数によって固有値の総和が一定になることを考慮すると、高

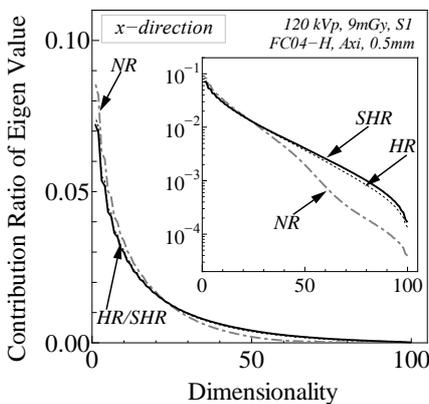


図2 エネルギー密度 (x方向)

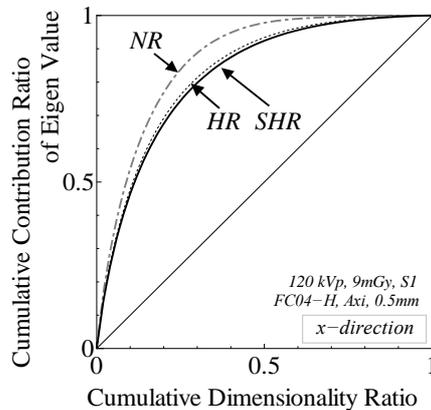


図3 ローレンツ曲線 (x方向)

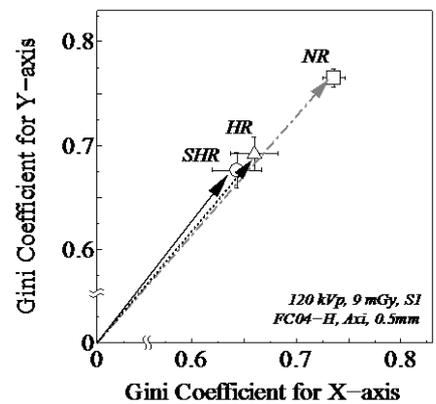


図4 ジニ係数による分解能評価

分解能モードでは、高次の領域への寄与率が高くなった分、低次の領域でNRモードより低くなっている。つまり、本提案法では、算出された固有値が、ある高調波領域に偏らず、全ての高調波領域に均等に分配されることが「分解能が高い」ことを意味する。そこで図3に、固有値の等分配性をローレンツ曲線によって調べた。通常モードと比較すると、高分解能モードでは、均等分布線と呼ばれる線分 $y=x$ に近くなっている。また、本提案法では、ローレンツ曲線と均等分布線で囲まれた面積から算出されるジニ係数を用いることで、定量指標による空間分解能評価が可能である。ここで、縦横方向の感度が高いという人間の視覚特性を考慮し、解析画像の y 方向（縦方向）にも同様の評価を行い、 x 、 y 方向のジニ係数の関係を検討した。図4のように、原点の近い側にプロットされた高分解能モードの方が高解像度であり、原点からの距離がほぼ等しいHRとSHRでは、ほぼ同等の解像度であることが定量的に示された。図1の解析対象画像を確認すると、高分解能モードの方が、血管及び気管支の辺縁が鮮鋭であり、さらに、HRとSHRを比較すると、注視しなければ、その違いを見つけることは出来ないことが分かった。このことから、エネルギー密度による空間分解能評価法は、適切に画像の鮮鋭度を反映していることが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では、伸展固定肺に対して、対称Toeplitz行列を用いた空間分解能評価法を考案し、超高精細CT画像の画質特性について検討を行った。その結果、三種類の撮影モードによる解像度の差異を定量的に評価することが可能となった。さらに、この評価結果は視覚による評価結果と類似することが明らかとなった。以上のことから、本提案法は、臨床画像にも適用可能な空間分解能評価法であることが示唆された。