

氏名（本籍）	橋本 純一（茨城県）
学位の種類	博士（保健医療科学）
学位記番号	博甲第25号
学位授与年月日	平成31年3月15日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	保健医療科学研究科
学位論文題目	CT 画像における信号雑音比に基づく新たな指標の提案と低コントラスト検出能への応用

## 学位審査委員

主査	茨城県立医療大学教授	博士（工学）	門間正彦
	茨城県立医療大学准教授	博士（保健学）	對間博之
	茨城県立医療大学准教授	博士（学術）	萬代 望
	北里大学准教授	博士（理学）	村石 浩

## 論文の内容の要旨

X線CT検査は、他のX線検査と比較して被ばく線量が高いことが知られているが、被ばく線量を低減させるためには、管電圧や管電流などの撮影線量を低下させることで達成されるものの、その代償として画像ノイズが増加する。画像ノイズの増加はCTにおいて必要とされる低コントラスト検出能の低下を招くことが知られている。撮影線量の最適化の方法としてCTにおける画像再構成法は、従来のフィルタ補正逆投影 (filtered back projection: FBP)法に加えて、逐次近似を応用した画像再構成 (iterative reconstruction: IR)法を搭載したCT装置が、コンピュータ技術や性能の進歩もあり全国的に普及しつつあるが、IR法は非線形性なアルゴリズムに基づくため、その再構成画像は被写体のコントラストや形状により解像力特性やノイズ特性が変化することが指摘されており、新しい簡易的画像評価法の提案が急務であった。本博士論文は、信号検出モデルから近似的に求めた信号雑音比 (signal to noise ratio: SNR)に基づく新たな指標を提案し、従来法との相関について調べ、新手法の有用性について検討したものである。

本研究では、円柱信号を仮定し、統計的決定理論モデルとマッチドフィルタモデルに基づく信号雑音比の近似式で定義される新たな指標 approximate SNR ( $SNR_A$ )を提案し、その結果、 $SNR_A$ は統計的決定理論モデル (statistical decision theory model)に基づくSNR ( $SNR_{S,D}$ )やマッチドフィルタモデル (matched-filter model)に基づくSNR ( $SNR_M$ )との相関に優れた簡便な指標であり、コントラスト雑音比 (contrast to noise ratio: CNR)や low-contrast object specific CNR ( $CNR_{LO}$ )に比べ信号径の変化に対する振る

舞いにおいても優れていることが示された。さらに、球信号に対する SNR が近似的に  $SNR_A$  に比例することから、新たな指標は球信号に対しても適用できる。したがって、 $SNR_A$  は NPS の測定のみで算出できる簡便な指標であり、 $SNR_{S,D}$  や  $SNR_M$  と同様に信号径の変化に敏感であり、近似の精度も高く、また対象とする被写体は円柱だけでなく球にも適応できることから、有用性の高い指標であると言える。

本論文の要旨は以下のとおりである。

研究の目的は、X 線 CT 画像の低コントラスト検出能の指標として有効な新手法を提案し、逐次近似を応用した非線形な IR 法であっても、適用可能とすることである。一般に SNR の算出には、システムの線形性に基づく変調伝達関数 (MTF) やノイズパワースペクトル (NPS) の測定が必要となるが、逐次近似を応用した IR 法は非線形な画像再構成法であるため、これらの方法をそのまま適用することは困難である。

そこで、これらの課題を解決するための具体的な研究内容は、 $SNR_{S,D}$  および  $SNR_M$  から近似的に得られる SNR に基づいた新たな指標  $SNR_A$  を提案し、IR 法において CNR に比べ優れた視覚評価との相関が報告されている  $CNR_{LO}$  に対して、明らかな信号径の依存性を有する優れた指標となることを示すこと、さらに、 $SNR_A$  と CNR,  $CNR_{LO}$ ,  $SNR_{S,D}$ ,  $SNR_M$  の相関について調べ、 $SNR_A$  の有用性について検討することである。

方法については、(1) 新たな指標の提案として、低空間周波数領域にパワースペクトルのピークを有する円柱信号を仮定して、 $SNR_{S,D}$  および  $SNR_M$  の近似式  $A\_SNR_{S,D}$  と  $A\_SNR_M$  を導出し、これらの近似式は定数倍の違いだけであることから、この定数倍を除いた共通部分を新たな指標  $SNR_A$  として提案している。次に、(2) MTF と NPS の測定として、ABS 樹脂を用いて、腹部領域を想定したコントラストとなる MTF 評価ファントム、低コントラスト検出能評価ファントムを作成し、MTF や NPS の測定、低コントラストファントム画像の取得を行っている。最後に、(3) 低コントラスト検出能の算出と  $SNR_A$  の検討として、MTF, NPS および信号のコントラストやパワースペクトルを用いて各指標の算出を行い、FBP 法と IR 法において、 $SNR_A$  と CNR,  $CNR_{LO}$ ,  $SNR_{S,D}$ ,  $SNR_M$  を低コントラスト検出能に適用しそれらの相関について調べている。

結果および考察として、径が 5 mm 以上の円柱信号において近似的に求めた  $A\_SNR_{S,D}$  と  $A\_SNR_M$  は、数値積分により求めた  $SNR_{S,D}$  および  $SNR_M$  に近い値となったことから、良い近似を与えていることを示している。また、 $SNR_A$  が  $CNR_{LO}$  に対して信号径に明らかに依存する指標であり、 $SNR_{S,D}$  および  $SNR_M$  と同様の信号径に対する依存性も示している。したがって、コントラストの異なる信号だけでなく、径の異なる信号同士に対する検出能の比較においても視覚評価との優れた相関を示す指標となることが示唆されたと報告している。

臨床画像では、腫瘍のように体軸方向にも構造を有する場合もあるため、数学的な取扱いが容易な球信号における  $A\_SNR_{S,D}$  を導出し検討したところ、球信号においても定数倍の違いを除くと円柱信号の結果に等しくなることから、 $SNR_A$  は臨床における X 線 CT 画像の低コントラスト検出能を評価する簡便で有用な指標と考えることができると述べている。

今後の課題としては、CT装置の種類や画像再構成法、再構成関数の違いによって解像力特性やノイズ特性は大きく異なるため、本研究と同様の結果が得られない可能性があり、さらに、ファントムサイズおよび再構成視野サイズの影響も考えられる。

本研究は、IR法に対し、いくつかの前提条件を付加することで、低コントラスト検出能で視覚的評価との高い相関を示す新たな指標である  $SNR_A$  を独自の視点で算出しようとしたものであり、 $SNR_{S,D}$  や  $SNR_M$  との相関に優れた簡便な指標であり、 $CNR$  や  $CNR_{LO}$  に比べ信号径の変化に対する振る舞いにおいても優れており、有用な指標となり得ることが示された。

### 審査の結果の要旨

平成31年2月4日、主査ならびに副査2名、外部審査員1名の計4名の審査委員全員出席のもと、提出された論文に対し公開で研究発表と質疑応答を行い審査した。審査は、本研究科の指針に従い、創造性・新規性、論理性、信頼性・妥当性、専門領域の関連性、論文の表現力、倫理的配慮の観点から協議された。以下にその内容を示す。

近年、X線CTの画像再構成法として、従来のフィルタ補正逆投影法 (filtered back projection : FBP) に加えて逐次近似法 (iterative reconstruction : IR) が用いられるようになってきた。線形なアルゴリズムを用いたFBP法に対し、非線形な処理が含まれるIR法は、被写体のコントラストや形状によって解像力特性やノイズ特性が変化することが指摘されている。軟部組織の病変の検出に重要な画質特性の一つに低コントラスト検出能の評価があるが、この評価のために用いられるコントラスト雑音比 (contrast noise ratio : CNR) は画像の周波数特性を考慮しない指標であるため視覚評価との乖離が生じることが指摘されている。中でも  $CNR_{LO}$  は比較的簡便に求めることができるが、その指標の物理的意味が明らかではなく、主観的評価との良い相関を与えるとは限らないという問題がある。一方、信号と画像ノイズの周波数特性に基づく信号雑音比 (signal to noise ratio : SNR) は様々なモデルが提案され統計的決定理論モデルに基づく  $SNR_{S,D}$  とマッチドフィルタモデルに基づく  $SNR_M$  があるが、タスクに基づいた空間分解能 (task-based modulation transfer function :  $MTF_{Task}$ ) の測定が必須である。

本研究は、IR法に対し、いくつかの前提条件を付加することで、低コントラスト検出能で視覚的評価との高い相関を示す信号雑音比 (approximate SNR :  $SNR_A$ ) を独自の視点で算出しようとしたものであり、簡便かつ容易に算出することを可能とした点において、本研究の新規性は高い。

逐次近似法は従来のフィルター逆投影法とは異なり解析解がなく非線形手法であることから、新しい簡易的画像評価法の提案が急務であった。煩雑な被写体の形状やコントラストに応じた空間分解能 (modulation transfer function: MTF) の測定が不要であり、測定が簡便かつ容易にできる点は臨床現場において非常に有用である。そのため、臨床

において大変重要な課題であり、放射線技術科学領域では価値ある知見であるとして高く評価された。

論理性に関しては、従来の統計決定理論モデル、及びマッチトフィルタモデルにおいて、低コントラスト評価のための条件を課すことにより、両者が同一の式になることを数学的に導くことに成功しており、また従来法（ $CNR_{L0}$ ）は数学的根拠がなく客観性に乏しいことが問題視されてきたが、新手法は従来法を数学的に証明することにも同時に成功しており、優れた内容である。

信頼性・妥当性に関しては、新手法による指標が従来法と同様の値になる傾向にあることを示していることから評価できる。今後、各指標に対し視覚評価との相関を調べることで、さらなる信頼性と妥当性が得られるような研究遂行が期待される。また、本指標の位置依存性の検証に一部不足な点はあるが、今後の研究で明らかにされるものと考ええる。

論文の表現力については、比較対象となる個々の指標についての説明が多く丁寧ではあるが、それらの指標の問題点と、本研究の意義や課題、目的が分かりづらい点があった。

倫理的配慮については、本研究はファントムを用いた基礎研究であるため、倫理面の配慮を問う必要はなく、倫理的な問題は指摘されなかった。

以上より、本研究は近年普及してきた IR 法に対して、いくつかの前提条件を付加することで、低コントラスト検出能を独自の視点で算出しようとしたものであり、簡便かつ容易に測定可能とした点において評価できる。今後の発展性も期待できる研究であると評価され、審査員全員の合意のもとに、博士論文として十分な内容であり、合格に相当すると判断した。