

称号及び氏名	博士（工学） 岩元 新一郎
学位授与の日付	平成20年 3月31日
論文名	「X線CT投影データの非線形投影に起因する雑音 分布の統計的影響とその補正に関する研究」
論文審査委員	主査 汐崎 陽 副査 大松 繁 副査 黄瀬 浩一

## 論文要旨

臨床の画像診断に革命をもたらしたX線CT（X-Ray Computed Tomography）装置は、1971年に第1世代と呼ばれるペンシルビーム走査によるシングルスキャン方式のCT装置が臨床の現場に登場して以来、現在に至るまで急速な進化を遂げてきた。その性能は検出器の性能向上やデジタル技術の進化と相まってスキャン方式の改良、ヘリカルスキャンの開発、多列検出器型CT装置の開発へと劇的に進歩し、現在では第4世代と呼ばれる多列検出器によるマルチスライスCT装置が主流となってきている。今やX線CTの性能向上は1mm以下の高空間分解能画像の超高速連続撮像を容易にし、微細構造の観察が必要な心臓・脳血管系や末梢気管等の画像診断の精度を著しく向上させた。一方、X線CT装置では、電離放射線であるX線（光子）を人体に照射して人体断面の再構成画像を取得しているため、X線被ばくによる人体への影響のリスクは可能な限り最小限に抑えられなければならない。しかし現状では、高速高分解能CTの普及により、撮影件数或いはスキャン量は加速的に増加し、X線CTによる被検者被ばくの問題が大きくクローズアップされている。

X線CT画像は、人体の周りにX線管を回転させながらX線を照射することで、人体で吸収されずに透過してきた光子強度を測定し、その透過率の対数変換値を回転断面内の2次元人体組織情報として得ている。検出器で測定されたX線透過率（投影値）に対して対数変換を行い投影データを取得する。投影データの2次元データマップを逆ラドン変換により画像再構成することで、人体断面上の各組織のX線吸収の差違を2次元画像の画素値（CT値）としてマッピングしている。X線CTの画像再構成法を大別すると、解析的手法と統計的手法に分類されるが、臨床用X線CTでは空間分解能および画像再構成の迅速性の観点から主にフィルタ補正逆投影法（Filtered Back Projection method; FBP法）と呼ばれる手法が用いられている。しかしFBP法は、画像再構成の原理上雑音に対して非常にシビアなため、被ばくを考慮して撮影線量を少なくした場合、急激に雑音の影響が顕著に表れ、再構成画像の画質を著しく劣化させるという深刻な問題に直面する。

X線CTにおける雑音対策としては、過去に多くの研究が行われている。例えば、雑音を含む投影値（以下測定値と呼ぶ）または再構成画像に何らかの平滑化処理を行う方法は、雑音抑制の観点から非常に有効であるが、最大の課題は平滑化に伴う空間分解能の劣化である。この問題を

解決する手法として、測定値に応じて平滑化の程度を可変させる適応フィルタを用いる手法

(Adaptive Trimmed Mean filter; ATM 法) は、雑音によるアーチファクトの除去に有用で実用化されている。しかし、X 線被ばく軽減を目的としてさらなる線量低減を考えると、検出器で捕捉される光子数の少ない領域 (以下微小光子数領域と呼ぶ) で過度の平滑化が生じ、空間分解能が著しく劣化するという難点がある。従って、FBP 法におけるX 線CT 画像再構成を行う上で、撮影線量を現状の臨床用低線量CT よりさらに下げるためには、雑音と空間分解能のトレードオフ問題の解決という非常に困難な課題を抱えている。

一方で、X 線CT 投影データの取得においては対数変換操作が必要不可欠であるが、微小光子数領域では雑音の影響が対数変換により増幅され、さらにFBP 法に特徴的な高域強調フィルタの作用も相まって、再構成画像上に強烈なストリーク状のアーチファクト (以下SA と呼ぶ) を発生させる。この時、測定値の雑音分布は対数変換により非線形に投影され (以下非線形投影と呼ぶ) 、微小光子数領域ほどその影響が大きくなる。従って、非線形投影による雑音の影響を軽減させることは、再構成画像上に発生するSA の抑制に対して非常に有効であると考えられる。しかしX 線CT 投影データの非線形投影に関する統計的解析の研究は現在までに報告されていない。非線形投影の影響を統計的に補正することで、微小光子数領域での雑音が再構成画像におよぼす影響を軽減することが可能となり、現状より少ないX 線量で現状と同等レベルのX 線CT 画像が得られると考えられる。すなわちX 線CT における被ばく軽減に大きく寄与することになる。

本研究では、非線形投影の統計的性質を明らかにし、測定値の雑音分布が非線形投影により再構成画像に及ぼす影響を軽減する統計的補正法を提案した。さらに提案した補正法によりCT 値の精度を維持しつつ、現状より一桁程度少ない線量で現状と同等の再構成画像の画質が得られる可能性を示した。また連続スペクトルへの対応を検証することで、実機への適応可能性を確認した。

本論文の構成は以下の通りである。

第1 章では本研究の背景および目的を述べるとともに、研究の概要について述べている。

第2 章では、まずX 線CT における投影データの取得法およびFBP 法を用いた画像再構成法の基礎理論について簡単に述べ、投影データに含まれる雑音が再構成画像上においてSA を発生する原理について述べている。次に本研究の基礎理論として、測定値上の雑音分布が対数変換の操作により非線形投影される場合の統計的性質について理論的に解析している。測定値に含まれる雑音分布をガウス雑音と仮定し、線スペクトル光子束による雑音を含む投影データの理論式を誘導している。さらに雑音を含む投影データが非線形投影により過大評価されることを数値シミュレーションにより確認している。

第3 章では、雑音を含む投影データの過大評価を補正するための簡易法を提案している。第2 章で明らかにした雑音を含む投影データの理論式から、雑音を含まない投影データを解析的に推定することは非常に難しい。そこで、投影データ上における雑音分布から、雑音を含まない投影値を簡易的に統計推定する手法 (以下dx 法と呼ぶ) を考案している。さらに数値ファントムを用いた実験を行い、dx 法による補正が再構成画像におけるSA の影響を著しく改善することを示している。また、原理的には再構成画像のCT 値は、物体に入射したX 線量に非依存である。しかし、雑音を含む投影データによる再構成画像は、非線形投影の影響で線量依存性を示すようになり、CT 値の正確性が失われる。dx 法では非線形投影の影響を統計的性質に基づいて補正を行うため、CT 値の正確性が微小光子数領域まで大きく改善されることを、数値ファントムを用いたシミュレーションにより示している。

第4 章では、極端に光子数の少ない領域 (以下極微小光子数領域と呼ぶ) における雑音の影響をさらに軽減するために、極微小光子数領域に限定して平滑化処理を組み入れた統計的補正法 (以下ASSC (Adaptive Switching of Smoothing and Correction) 法と呼ぶ) を提案している。極微小光子数領域では、対数変換の非零非負制限のため、雑音信号が負値をとる場合には強制的に測定値を1 にして対数変換を行うクランプ処理が不可欠となる。このクランプ処理により、雑音を含む投影データは雑音を含まない投影データより過小評価されることになり、再構成画像の画質を劣化させる。そこで測定値に対する極微小光子数領域に限定した適応フィルタ処理により、極微小光子数領域の雑音が再構成画像におよぼす影響をさらに改善している。数値ファントムを用いたシミュレーション実験で再構成画像の画質の定量的評価を行い、空間分解能とピクセル雑

音のトレードオフの観点から、ASSC 法がdx 法やATM 法と比較して画質改善の点で優れていることを示している。

第5 章では、極微量光子数領域における測定値を統計的に補正する手法として、新たに非零非負制限領域における雑音を含む測定値から投影値を推定する手法（以下NNC (Non-zero/Non-negative Compensation) 法と呼ぶ）を提案している。また非線形投影の補正の精度を向上させるために、dx 法に代わり第2 章で導いた投影データの理論式から投影値を補間により推定する手法（以下INC (Interpolation-method of Nonlinear Correction) 法と呼ぶ）を取り入れている。さらに、極微量光子数領域における突発雑音を除去するためにメディアンフィルタを作用させ、測定値に応じてNNC 法とINC 法を排他的に切り替えて補正を行う手法（以下CTNM (Correction of Two Nonlinearities with Median) 法と呼ぶ）を用いて、数値ファントムを用いたシミュレーション実験を行い、CT 値精度の改善に優れている非線形投影の統計的補正の利点を維持しつつ、SA を抑制している。

第6 章では、CTNM 法が実際のX 線CT 装置で使用されている連続スペクトル光子束による投影データの補正に対しても有効であることを示している。X 線透過率は同一物質においても、透過光子エネルギーと物質厚に依存するため、連続スペクトル光子束が物質を透過する場合は、物質厚とともに単位長さ当たりのX 線透過率が大きくなる、ビームハードニング効果と呼ばれる現象が問題となる。ビームハードニング効果による投影データの正確性の欠如は、雑音の影響と同様に再構成画像にアーチファクトを発生させる。ビームハードニング効果の影響を受けた、雑音を含む測定値の補正に関しても、CTNM 法が有効であることを数値ファントムを用いた画質の定量的評価により示している。

最後に第7 章では、以上の本研究に関する総括を行い、今後の検討課題について述べている。

## 審査結果の要旨

本論文は、X線CT画像診断におけるX線被ばくによる人体への影響を軽減するために、X線撮影線量を可能な限り最小限に抑えつつ、診断に要求される画質を維持するための信号処理手法について研究したものであり、以下の成果を得ている。

(1) 測定値上の雑音分布が、画像再構成時における対数変換の操作により非線形投影される場合の統計的性質を理論的に解析し、線スペクトル光子束による雑音を含む投影データの理論式を誘導した。また、投影データに含まれる雑音が再構成画像上においてストリークアーチファクトを発生する原理を明らかにした。これらのことより、被ばくを考慮して撮影線量を少なくした場合、急激に雑音の影響が顕著に表れ、再構成画像の画質を著しく劣化させることが明らかになった。

(2) 誘導した投影データの理論式に基づき、雑音を含む投影データから真の投影データを推定する手法を提案した。計算機シミュレーションにより、極端に透過光子数の少ない領域（極微量光子数領域）においても雑音の影響を抑制できることが確認された。

(3) 極微量光子数領域では、対数変換の非零非負制限のため、雑音を含む測定値が負値をとる場合には強制的に測定値を1にしている。この処理により、雑音を含む投影データは雑音を含まない投影データより過小評価されることになり、再構成画像の画質を劣化させる。これによる再構成画像の画質劣化を抑制する方法として、負値をとった測定値から真の測定値を統計的に推定する手法を提案した。

(4) 提案した諸手法が、実際のX線CT装置で使用されている連続スペクトル光子束による投影データに対しても有効であることを計算機シミュレーションにより確認した。このことより、X線CTの画質を維持しつつ撮影線量を大幅に減少できる可能性が示された。

以上の諸成果は、X線CT装置における画像再構成に重要な知見を与えとともに、臨床面におけるX線CT画像診断技術の発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。本委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。