

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K15210

研究課題名(和文) 吸収X線と位相X線の情報を統合した反復型CTアルゴリズムの開発

研究課題名(英文) Development of X-ray CT algorithm that integrates information of absorption-contrast and phase-contrast X-ray

研究代表者

前田 新一 (Shin-ichi, Maeda)

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：20379530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：位相X線イメージングは、X線の位相を用いて物質固有の屈折率を可視化する技術であり、吸収率を可視化する吸収X線イメージングでは判別困難な軟組織や微小组織の可視化が行えることが期待されている。しかし、X線の位相を用いた投影法が実用化に進む中、位相X線CT法はスキャン時間が長く、観測ノイズ・数値誤差に対して脆弱なため実用化の目処が立っていない。本研究では、臨床で一般的に用いられるX線源でイメージングのできるエッジ照射型位相X線法を対象とし、その確率的なノイズを含む観測の物理過程を模擬した確率モデルを構築し、統計推定を行うことで脆弱性の問題点を克服した位相X線CT法の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Phase-contrast X-ray imaging is a technique that visualizes the refractive indexes of materials, and is expected to visualize soft tissues or small tissues those are hard to visualize by a conventional absorption-contrast X-ray imaging that visualizes the absorption coefficients of materials. Although the phase-contrast X-ray projection imaging progresses aiming for clinical application, phase-contrast X-ray computed tomography is struggle for practical realization due to the vulnerability to the observation noise or numerical error as well as the long scanning time. In this project, we develop a novel algorithm for the phase-contrast X-ray computed tomography that suppresses the above-mentioned problems by constructing a statistical model that bases on the physical observation process of the edge-illumination phase-contrast X-ray imaging and by developing a statistical algorithm for estimating the hidden signals in the noisy observations.

研究分野：統計的推定

キーワード：位相X線 Computed Tomography 隠れ変数推定 屈折率

1. 研究開始当初の背景

従来の吸収 X 線では透過する物質の距離とその物質の吸収率に応じた X 線減衰量を検出するのに対し、位相 X 線は屈折率の異なる物質間の境界で生じる屈折による角度変化量や位相変化量を検出する。そのため、吸収 X 線には軟骨などの軟組織や微細組織の可視化を十分なコントラストで画像化できない問題があったが、位相 X 線はそれらの問題を克服可能な技術として注目されている。特にこんとらす

すでに、エッジ照射型位相 X 線によるレントゲン撮影(単純 X 線)のような投影像は従来の 3 分の 1 の被曝量で同等以上の高コントラストな画質を実現(Olivo, et al., Med Phys., 2013)しており、臨床応用に向けた開発が進んでいる。しかし位相 X 線イメージングの CT による断層像再構成は、高コントラストであっても従来の吸収 X 線の CT 再構成よりスキャン時間が長く被曝量が増大したり、ボケが発生したりする問題がある。本研究は、新奇な CT アルゴリズムの開発により、位相 X 線 CT のポテンシャルを引き出すことを目指す。

2. 研究の目的

位相 X 線イメージングは、X 線の位相を用いて物質固有の屈折率を可視化する技術であり、吸収率を可視化する吸収 X 線イメージングでは判別困難な軟組織や微細組織の可視化が行える。しかし、X 線の位相を用いた投影法が実用化に進む中、位相 X 線 CT 法はスキャン時間が長く、観測ノイズ・数値誤差に対して脆弱なため実用化の目処が立っていない。本研究の目的は、これらの問題点を克服し、臨床応用が可能でかつ位相 X 線法の長所を最大限に発揮する CT アルゴリズムの開発にある。

3. 研究の方法

位相 X 線イメージングには複数の手法が提案されているが、その中でも臨床で用いられる X 線源でイメージングが可能でかつ物理過程が単純で統計モデルとして定式化しやすいエッジ照射型位相 X 線イメージングを対象に統計モデルを構築する。エッジ照射型位相 X 線イメージングでは、検出器の前に X 線の透過を強く妨げる金属のマスクを二カ所に配置する(図 1)。一つ目は、撮影対象の試料の前に配置することで X 線を多数の帯状の光線に分割するためのものである。もう一方は、試料の後でかつ、検出器の直前に配置するもので、これは透過した X 線の受光領域を適切に規定するためのものである。試料を配置して X 線を透過させた場合、空気と試料の屈折率の違いや試料内での屈折率の違いで生じる屈折によって帯状の X 線は曲がり、検出面に到達する X 線の強度が変化する。検出器に

よって検出される X 線の強度は、屈折だけではなく試料内での減衰によっても変化することになる。

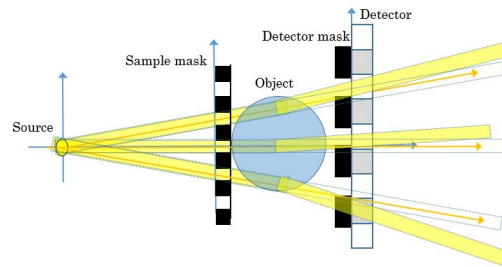


図 1: エッジ照射型位相 X 線による投影像撮影

そこで検出器で観測される X 線の強度信号から位相 X 線の信号と吸収 X 線の信号を分離する信号分離のアルゴリズムの開発を行った。この問題は、解の不良設定性が生じるため、適切な解が得られるように解がスパースであるという統計的性質を利用した統計的な信号分離アルゴリズムの構築を行った。

また、従来、エッジ照射型位相 X 線の観測モデルには、吸収 X 線の CT アルゴリズムに使用されるのと同様の計算原理が用いて計算が行われてきた。すなわち、投影に伴う屈折の変化が線積分で記述され、これを周波数空間での計算に置き換えるフィルタ付き逆投影法が用いられてきた。しかし、フィルタ付き逆投影法では、観測される量と推定する量との間に決定論的な変換を挟むものの線積分の関係を仮定するため、1. 実空間での確率的な観測ノイズの効果が考慮されない、2. 物体内での屈折の効果が無視される、3. 物質の屈折率や吸収率の X 線エネルギー依存性が無視される、といった問題があった。そこで、これらの問題を解決するために、実空間での計算方法を提案した。

4. 研究成果

エッジ照射型位相 X 線法で観測される X 線の強度信号は、屈折と減衰の両方の現象の影響を受け、さらに確率的なノイズが加わったものとなる。この観測に至る物理過程を模擬した統計モデルの構築を行った。

具体的には、複数のマスク配置によって得られる複数の観測信号から、位相 X 線由来の情報と吸収 X 線由来の情報に分離する信号抽出のアルゴリズムの開発と、位相 X 線由来の情報をスパース行列による線形観測モデルに確率的な信号が重畳されたものとして表現し、統計推定によって屈折率を推定するアルゴリズムの開発を行った。線形観測モデルを用いることで、フィルタ付き逆投影法を使わずとも計算量の問題を相当程度、克服することを可能とした。この線形観測モデルを用いた位相 X 線 CT 法については特許申請の準備中である。

上記のように得られる観測信号は、位相 X 線の情報と吸収 X 線の情報が混じった信号に確

率的なノイズが足されたものとして表現される。元の信号は直接観測できないため、元の信号を復元するためには統計モデルに基づいて隠れ変数を推定するアルゴリズムが必要となる。この隠れ変数の推定アルゴリズムのためにスパースなベイズ線形回帰を開発し、研究発表を行った。

スパースなベイズ線形回帰は、位相 X 線 CT の問題だけでなく、スパースな特徴量による線形回帰問題全般に利用することができる。問題設定として、N次元の観測ベクトル y が、K次元のスパースな特徴量 β と $N \times K$ の観測行列 X と N次元の観測ノイズ ϵ によって以下のように表現される式(1)の状況を考える。

$$y = X\beta + \epsilon \quad (1)$$

ここで特徴量 β は、ゼロを値にもつ要素が多いという統計的なスパース性が仮定された確率変数である。

このような問題は、従来、特徴量 β のスパース性を L1 正則化で表現した Lasso(R.Tibshirani, Journal of Royal Statistical Society, Series B, 1994)や、Automatic Relevance Determination (ARD) prior を用いた ARD regression(D. Mackay, Models of Neural Networks III, 1994)によって解かれることが多かった。しかし、いずれの手法も特徴量 β に少数の非ゼロ要素が存在することを二乗誤差最小の解で得られる β をゼロに近づけることで表現しており、必ずしも β がゼロとなるわけではなかった。そのため、非ゼロ要素が実際より多く見積もられる問題がしばしば生じる(図2)。

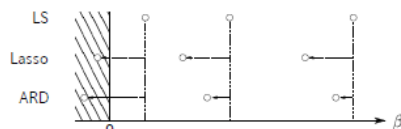


図 2 : 最小二乗誤差(LS)、Lasso、ARD によって得られる解 β の違いを現わした模式図

そこで、非ゼロ要素とゼロ要素を明確に分離するために、各要素に 0 もしくは 1 をとる $N \times K$ のマスク行列 Z を導入した定式化を行った。

$$y = (X \cdot Z)\beta + \epsilon \quad (2)$$

ここで、 $(X \cdot Z)$ は行列 X と行列 Z の要素ごとの積を現わす。このモデルに β と Z の事前分布を導入し、 β, Z に関して周辺化した周辺尤度の下限の最大化を行うアルゴリズムの導出を行った。下限は FIC(K.Hayashi & R.Fujimaki, NIPS, 2013, K.Hayashi et al., ICML 2015)によって求めた。

FICの最大化は、EM アルゴリズムと同様の反復アルゴリズムである FAB-EM アルゴリズム(K.Hayashi et al., ICML 2015)によって行うことができる。しかし、FAB-EM アルゴリズムの最適化は、観測ノイズが小さい場合、しばしば遅滞してしまう。これを防ぐために、新たに FAB-EG アルゴリズムを併用したアル

ゴリズムを開発した。これは、M ステップで解析解を求めていた部分を単純に勾配法に置き換えるものである。EM アルゴリズムによる解析解は、あくまでも下界の最大化であるため、周辺尤度の最大化の観点からは必ずしも解析解が最善とはいえない。そればかりか、観測ノイズが小さい状況ではこの下界の最大化ではほとんど解が変更されない状況が生じる。そのため、EM アルゴリズムによる解析解は最初の 5 回程度にとどめ、その後は勾配法に切り替えることとした (Hybrid FAB-EM-EM アルゴリズム)。計算機実験の結果、このアルゴリズムは期待したとおり、4, 5 倍程度の高速化をもたらした(図 3 参照)。

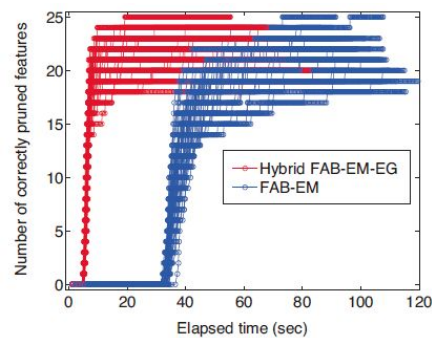


図 3 : FAB-EM アルゴリズムと Hybrid FAB-EM-EG アルゴリズムの学習曲線の比較

この手法を、人工データセットと、実データである Boston Housing データセットに適用し、適切に非ゼロ要素を決定できるかどうかを Precision, Recall, F-score を計算して評価したところ良好な結果を得ることができた。この反復アルゴリズムは、高次元デー

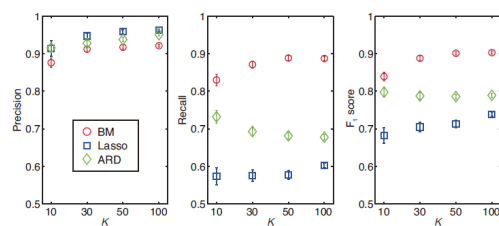


図 4 : 人工データでの実験結果

(BM が提案手法, Lasso, ARD が従来法)

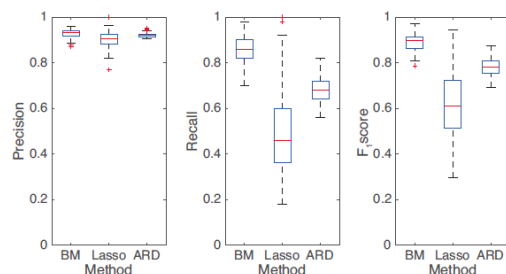


図 5 : Boston Housing データでの実験結果

(BM が提案手法, Lasso, ARD が従来法)

タに対してもスケールするアルゴリズムとなる。位相 X 線 CT アルゴリズムは、三次元画像という高次元データとなるので、こういったこういった高次元データの最適化にも有用と考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

"Sparse Bayesian linear regression with latent masking variables."

Yohei Kondo, Kohei Hayashi, and Shin-ichi Maeda.

Neurocomputing, 2017

"ビッグデータを対象としたデータマイニングの概要と基礎."

前田新一.

プラズマ核融合学会誌, 92(5), 334-341, (2016).

[学会発表](計 3 件)

"Bayesian Masking: Sparse Bayesian Estimation with Weaker Shrinkage Bias."

Yohei Kondo, Kohei Hayashi and Shin-ichi Maeda.

Asian Conference on Machine Learning (ACML), JMLR Workshop and Conference Proceedings, 45, 49-64, (2015).

"Rebuilding Factorized Information Criterion: Asymptotically Accurate Marginal Likelihood."

Kohei Hayashi, Shin-ichi Maeda and Ryohei Fujimaki.

International Conference on Machine Learning (ICML), JMLR Workshop and Conference Proceedings, 37, 1358-1366, (2015).

"ベイズ推定の医用 線 CT への活用."

前田新一.

線ナノ集光技術研究会 2015, 東京大学, (2015).

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 新一 (Shin-ichi Maeda)

京都大学・情報学研究所・助教

研究者番号: 20379530

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

Alessandro Olivo

University College London,

Applied Physics, Professor