

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700574

研究課題名(和文) ベイズ統計を用いた超解像CTアルゴリズムの研究

研究課題名(英文) Super resolution computed tomography based on Bayesian statistics

研究代表者

小塚 淳 (Jun, Kozuka)

独立行政法人理化学研究所・生命システム研究センター・研究員

研究者番号：10432501

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：計算機トモグラフィーは様々な角度から撮影した投影像を元に、計算処理によって観測物体の断層像を推定するアルゴリズムである。従来の再構成アルゴリズムでは、検出器由来のノイズや撮像と再構成時の回転軸のズレ、撮像時の回転軸位置や回転量のゆらぎ等の影響は考慮されず、再構成像に様々なアーチファクトが発生する事が知られている。そこで、本研究課題では、Radon変換を拡張した投影操作を生成系として持つような系を用いて、定式化を行い、この定式化にベイズ統計に基づいた確率的画像処理の考え方を適用し、計測の分解能以上の再構成像を推定する超解像トモグラフィーシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：The reconstruction of a high-quality three-dimensional image from a low-resolution sinogram, which is a visual representation of the two-dimensional projection data obtained from computed axial tomography, is an important problem which arises in fields such as microscope and medical imaging. It is known that several artifacts originated from the inverse Radon transformation arise during typical reconstruction approaches. We have developed a Bayesian treatment of the super-resolution computed tomography problem. This approach is rendered tractable through the introduction of Gaussian processes. Results indicate a significant improvement over techniques based on the filtered back projection.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学、医用システム

キーワード：CT ベイズ統計 超解像

1. 研究開始当初の背景

非侵襲的に観測物体の内部構造を計測する技術は、計算機トモグラフィー(Computed Tomography, CT)と呼ばれ、医療用 X 線断層撮影等の CT 計測は一般にも馴染みが深い。CT 装置は、観測物体を透過する放射線(電磁波や粒子線)をフォトマルや CCD アレイ等の撮像機器上へ投影した像を元にして断層像を再構成するシステムである。投影像は観測物体内の物理量分布を投影面方向に積分した像と考えられ、CT は様々な角度から撮影した投影像を元に、計算処理によって観測物体の断層像(物理量分布)を推定するアルゴリズムである。これらの画像再構成の問題は基本的に Radon 変換と呼ばれる投影変換を元に構成されている。現在最も普及している再構成アルゴリズムは、Filtered Back Projection (FBP)法である。FBP 法は、投影像にフィルタ処理を施した後、もともとの投影方向に逆投影という操作(逆 Radon 変換)を施すことで断層像を得る。投影像の生成されるプロセスの詳細がほぼわかっている場合には、その生成過程を順過程とみなし、逆過程を通して投影像を生成する断層像を推定するフィルタを設計するという戦略がとられる。たとえば、投影像のフーリエ変換は、観測物体を周波数空間における極座標系で表現したものと等価なので、離散的なサンプリング物からの真のフーリエスペクトルを得る空間フィルタ処理が用いられる。現在の CT では、このフィルタの設計が重要な技術となっている[1]。一般的な FBP 法のフィルタの設計では、検出器由来のノイズや撮像と再構成時の回転軸のズレ、撮像時の回転軸位置や回転量のゆらぎ等の影響は考慮されない。しかしながら、これらの要因を考慮した補正を行わなければ、再構成像に様々なアーチファクトが発生する事が知られている。また、逆投影操作には再構成像全体にわたる積分操作が伴うため、情報が欠損している場合に致命的なアーチファクトを発生させやすい。たとえば、電子顕微鏡 CT や一部の X 線 CT 装置では、構造的な制約のために起こる計測角度の制限がアーチファクト生成の原因となる。他にも、観測物体内部に放射線吸収率が大きく異なる物質が混在する場合、メタルアーチファクトと呼ばれる放射線状のノイズが発生する問題がある。一方、FBP 法以外で断層像を計算する方法として、断層像の計算をフィッティング問題と捉え、推定断層像から計算した投影像が実際の投影像に一致するように逐次的に断層像を修正する反復法という方法がある[2]。反復法は、FBP 法に比べ情報の欠損等に対して比較的頑強ではあるものの、アーチファクトの軽減に根本的な解決法を与えていない。また、反復法は FBP 法と比較して、計算処理に時間を要する。投影像の生成過程が複雑になり、再構成に対するユーザーの要求が厳しくなっている昨今、従来型の汎用的な再構成処理では

対応しきれない状況が徐々に増えてきている。

[1] G. N. Ramachandran et al., PNAS, vol.68, pp.2236-40 (1971). [2] P. Gilbert, J Theor Biol, vol.36, pp.105-17 (1972).

2. 研究の目的

近年、ユーザーの多様な要請に応える要素技術として、確率モデルを用いた推定が画像処理において欠かせない技術となっている。Tipping らは、未知の位置ズレ(シフト、回転)パラメータを持つ複数の画像から、ベイズ統計を用いて位置ズレパラメータを推定し、元画像より高解像な画像推定が可能であることを示した[3]。ただし、Tipping らの方法は高解像画像の事前分布として画像の滑らかさを期待する単純なガウス分布を用いており、ボケた高解像画像が得られやすいという問題点があった。Kanemura らは、画素間に生じるエッジを表現できる階層事前分布を導入し、明瞭なエッジや遮蔽物を持つ物体のよりよい高解像画像推定が可能であることを示した[4]。これらの先例研究は、ベイズ統計の利点である階層性を考慮することにより、様々な条件を任意に付加することで状況に応じて柔軟に動作する再構成アルゴリズムの構築が可能であることを示唆している。

そこで、本研究では、Radon 変換を拡張した投影操作を生成系として持つような系を用いて定式化を行い、この定式化にベイズ統計に基づいた確率的画像処理の考え方を適用する。そして適宜、適当な事前知識を用いて、様々なアーチファクトを根本的に解消する CT システムを構築する。

本研究の特徴は、これまでに撮影され蓄積された投影像や周辺情報を利用して、高解像再構成像を構築できる点にある。CT 技術は X 線断層撮影だけではなく、体内に注入された放射性同位体を放射線源としてその濃度分布を推定するポジトロン断層法(Projection Emission Tomography, PET)や単一光子放射断層撮影(Single photon emission computed tomography, SPECT)、核磁気共鳴画像法(magnetic resonance imaging, MRI)などにも適用されている。また、その用途は患者の診断画像撮影のみならず、汚染物質の濃度分布(大気汚染 CT 計測)や科学種の密度分布(燃焼・プラズマ CT 計測)、細胞内密度分布(顕微鏡 CT 計測)、屈折率分布(光ファイバ CT 計測)と多岐に渡る。本研究の結果を用いることで、広い分野でこれまで認識できなかった有用な情報を抽出することが可能になると期待される。

[3] M. E. Tipping et al., MIT Press, vol.15, pp.1279-1286 (2003). [4] A. Kanemura, et al., Neural Networks, vol. 22, pp. 1025-1034 (2009).

3. 研究の方法

本提案課題では以下の手順に従い、ベイズ統計による超解像 CT システムを構築した。

1) Radon 変換を拡張した投影操作を生成系として持つような系を用いて定式化を行い、2) この定式化にベイズ統計に基づいた確率的画像処理の考え方を適用する。3) そして適宜、適当な事前知識を用いて、様々なアーチファクトを根本的に解消する CT システムを構築する。

CT 再構成を投影像(データ: D)から観測物体の内部構造(パラメータ: x)を推定する問題と捉え、ベイズの定義を用いて簡潔に表現すると式(1)のように表現される。

$$P(x|D) \propto P(x)P(D|x) \quad \text{--- 式(1)}$$

右辺の $P(x)$ は事前確率といい、状況に応じて任意に変更することができる。 $P(D|x)$ は尤度関数といい、 D の生成過程を確率モデルを用いて表現したものである。ここで、投影変換行列 W により生成する WD と x との差をノイズ e とし、 e がある確率過程から発生すると考える。ノイズの発生確率を $P(e)$ とすると $P(e) = P(D|x)$ であるので、この式を用いると事後確率を求める事ができる。 W は平行移動、回転、縮小拡大行列等で構成させるアフィン変換と結像面での光の広がり表現する点像分布関数(Point spread function, PSF) を含んだ変換行列である。

1) 投影過程の定式化

CT は様々な角度からの投影像を用いて構成されるので、計測系の分解能以上の解像度で断層像を再構成するには適した系である。よって、観測物体推定像の画像サイズを任意に設定し、センサアレイへの投影変換行列を構築する。また、投影変換行列は Tipping らの方法をアフィン変換による同時座標系を用いて拡張することで作成する。アフィン変換を用いているので、3次元への拡張やコーンビーム等の特殊なビーム形状やヘリカルスキャン等の特殊な走査形態への拡張が容易に行える。

2) ノイズ生成過程の検討

観測過程で混入するノイズの分布を決める。解析の簡便化のために、ガウス分布を用いてモデル化を行う。

3) 事前確率の選定

最初は観測物体推定像の輝度値(物理量に相当する)は急激に変化しないものと仮定し、ガウス分布を事前確率として用いて再構成像を推定する。

4. 研究成果

市販の数値解析ソフトウェア Matlab(MathWorks)を用いて提案再構成アルゴリズムを実装し、評価実験を行った。事前分布 $P(x)$ 、ノイズの発生確率 $P(e)$ にはガウス分布を用いた。64x64 ピクセルのテスト画像(x)を基に 32x(8, 16, 32, 64)ピクセルの低解像度シノグラム(y)を作成し、逆ラドン変換により再構成像を作成した

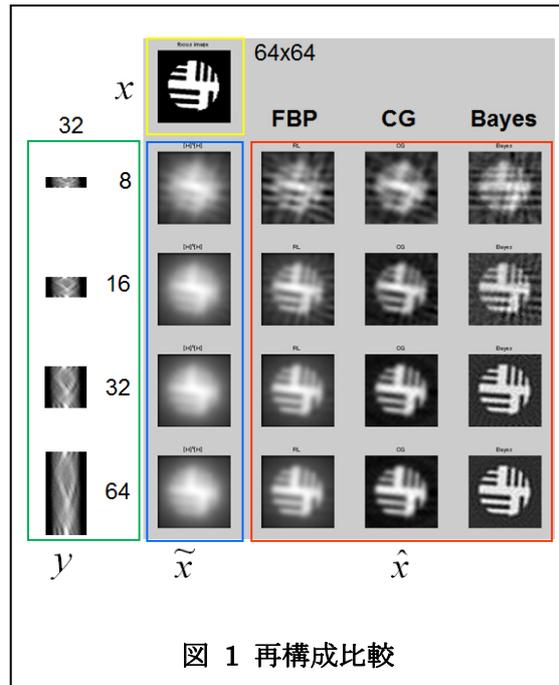


図 1 再構成比較

(\tilde{x})。また、 y より FBP, 反復法(CG), 提案手法(Bayes)を用いて再構成(\hat{x})を行い、SN 比における改善率(improvement of signal to noise ratio, ISNR)の式(式(2))を用いて像質改善率の評価を行った。

$$ISNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\|\hat{x} - x\|^2}{\|\tilde{x} - x\|^2} \right) \quad \text{--- 式(2)}$$

図 1 に再構成の結果を示す。同じ情報量のデータから出発しているにも関わらず、再構成像質の大幅な改善が確認できる。実際、ISNR による評価でも 2-3dB の像質改善が確認できた(図 2 上段)。しかしながら、

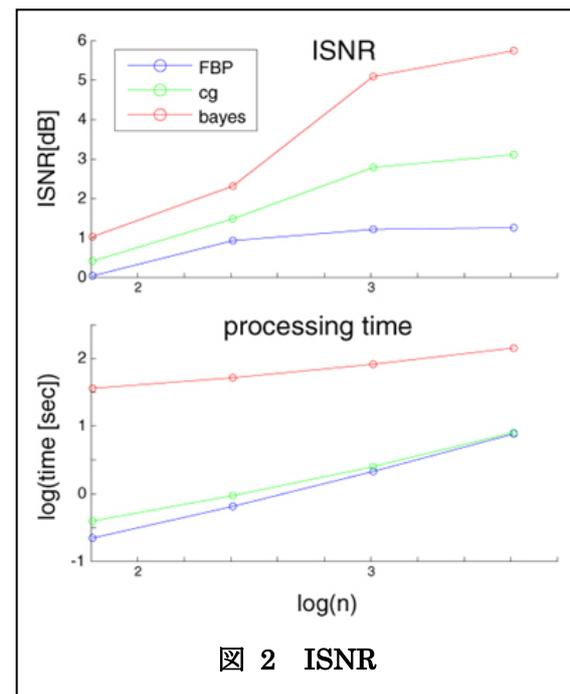


図 2 ISNR

処理時間に関しては1桁以上の上昇がみられる(図2下段)。計算に用いられる行列の大きさがその原因であるが、行列要素の大半は0なので、情報の圧縮により大幅な処理時間の短縮が期待できる。また、投影角度に制限のあるシノグラムを用いた再構成においても従来法(図3: (a)FBP, (b)CG)に比べ像質の向上が確認できた(図3: (c))。



(a) (b) (c)

図3 投影角度制限シノグラム再構成

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小塚 淳 (KOZUKA, Jun)

独立行政法人理化学研究所・生命システム

研究センター・研究員

研究者番号：10432501

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)

〔学会発表〕(計 2件)

- 1) Super resolution computed tomography based on Bayesian statistics,
J. Kozuka, T. Makino and H. Mizutani,
第51回日本生物物理学会年会, 国立京都国際会館, 京都市, 京都府, 日本, 2013年10月28日
- 2) Super resolution Computed Tomography based on Bayesian statistical method,
J. Kozuka, T. Makino and H. Mizutani,
日本顕微鏡学会第69回学術講演会, ホテル阪急エキスポパーク, 吹田市, 大阪府, 日本, 2013年5月21日

〔産業財産権〕

○出願状況(計 2件)

名称：画像再構成装置

発明者：小塚淳、牧野貴樹、水谷治央

権利者：東京大学

種類：特許

番号：PCT/JP2012/065592

出願年月日：2012年6月19日

国内外の別：PTC出願

名称：画像再構成装置及びプログラム

発明者：小塚淳、牧野貴樹、水谷治央

権利者：東京大学

種類：特許

番号：特願2011-138833

出願年月日：2011年6月22日

国内外の別：国内