

令和元年6月24日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K11065

研究課題名(和文)統計的画像処理法と圧縮センシングによるコーンビーム型X線CT画像の高画質な再構成

研究課題名(英文)High-quality cone-beam CT image reconstruction using statistical reconstruction and compressed sensing

研究代表者

早川 吉彦 (HAYAKAWA, Yoshihiko)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70164928

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：不完全な投影データの使用や投影データの削減はX線CT画像再構成に影響するか、さらに、統計的再構成法アルゴリズム(ART法とML-EM法)と圧縮センシング法(TV正則化)で画質が維持されるか検討した。ART法を従来法であるFBP法と比較し、さらに、スパースモデリングによる圧縮センシングを利用して、TV正則化によって投影データ量を削減可能な処理法を開発した。

そして、顎顔面領域のCT画像に対して実行し、360度ないし180度の投影データに対しART法とTV正則化を組み合わせたところ、計算負荷は増大するがCT画像再構成に用いるプロジェクションデータを約10分の1まで減らせることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医療用X線撮影における「患者の被ばく線量を減らす」という社会的ニーズと、相反するニーズ「画質を劣化させないこと」を同時に実現するために、統計的画像再構成法とスパース(疎性)・モデリングを基にした圧縮センシング法を応用した。特に被ばく線量が問題となるX線CTに応用し、顎口腔領域の画像で検証した。360度ないし180度の投影データに対しART法とTV正則化を組み合わせて実行した。

計算負荷の増大という問題は多少あるが、プロジェクションデータ量で10分の1のX線量でCT画像を再構成できる可能性を示した。また、金属アーチファクトの削減効果もあった。医療におけるX線CT画像の使い方を変える可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The aim is to examine the effect of incomplete, or total elimination of, projection data on computed tomography images subjected to statistical reconstruction (SR) and/or compressed sensing (CS) algorithms. The algebraic reconstruction technique (ART) and the maximum likelihood-expectation maximization (ML-EM) method were compared with filtered back-projection. Effects were studied when the projection data of 360 deg. (360 projections) were decreased to 180 or 90 projections by reducing the collection angle or thinning the image data.

The total variation (TV) regularization method was applied to images processed by the ART. Both ART and ML-EM resulted in high quality at a spread of 90 projections over 180 deg. rotation. TV regularization made it possible to use only 36 projections while still achieving acceptable image quality. Despite heavier computational calculation loading, incomplete projection data made it possible to reduce the radiation dose with SR and CS algorithms.

研究分野：歯学，医用画像工学，医学物理学，画像認識，画像解析，医療情報，放射線技術学

キーワード：X線CT画像 統計的画像再構成法 逐次近似法 圧縮センシング 歯顎顔面画像診断 被ばく軽減 全変動正則化 スパースモデリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 歯顎顔面領域の X 線 CT 画像には、口腔内歯列に存在する非可撤性義歯等の存在によって著しい金属アーチファクトが存在するのが常である。これまでに MDCT 画像に統計的画像再構成法である逐次近似法を応用して、このようなアーチファクトの大幅な軽減を図れることを示してきた。コーンビーム CT (CBCT) 画像についても取り組んでいる。

(2) その過程で、線量が少なかったり、投影データが少なかったりする場合において、CT 画像再構成を高画質で行うことに有効な圧縮センシングも試みていた。この方法の実用性の実証を当初の目的とした。

2. 研究の目的

(1) 不完全な投影データを用いたり、投影データの削減を行ったりした場合、X 線 CT 画像再構成にどのように影響するか、あるいは統計的再構成法アルゴリズムで画質が維持されるか検討した。投影データを間引いて削減したり、投影角度を制限すると、患者の被ばく線量が格段に下がったり、撮影装置のコンパクト化も可能になる。

(2) 統計的画像処理法である ART (Algebraic Reconstruction Technique) 法あるいは ML-EM (Maximum Likelihood-Expectation Maximization) 法について、フィルタ補正逆投影法 (Filtered Back-Projection, FBP 法という) と比較して示すことを目的とした。さらに、疎性 (スパース) モデリングによる圧縮センシング (Compressed Sensing) を利用して、全変動 (total variation) 正則化をキー技術として、投影データ量を削減可能な処理法の開発を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に示すように、臨床で使われた画像 (左端の 2 画像で、上顎洞レベルと上顎歯列レベルの X 線 CT 像である。) に対して、様々なプロジェクション・データ (a~e) を用意した。これはサイノグラム (Sinogram) とも呼ぶ。サンプリング範囲 (度)、サンプリング間隔 (度)、投影データ数の組み合わせは、a が 360, 1, 360, b が 360, 2, 180, c が 360, 4, 90, d が 180, 1, 180, e が 180, 2, 90 である。

条件 a ならば、いくらでも原画像を再現できる。今回の研究に先立つ、これまでの研究では、その条件 (360 方向からのプロジェクション・データ) で行ってきた。条件 e では、プロジェクション・データの量が 4 分の 1 になる。さらに、この研究では、ここに示す以上、10 分の 1 まで削減した。

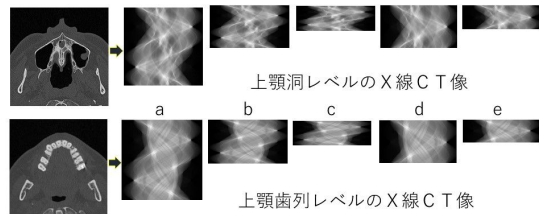


図 1 臨床で使われた画像 (左端) とそのプロジェクション・データ (a~e) である。サイノグラム (Sinogram) とも呼ぶ。サンプリング範囲 (度)、サンプリング間隔 (度)、投影データ数の組み合わせは、a が 360, 1, 360, b が 360, 2, 180, c が 360, 4, 90, d が 180, 1, 180, e が 180, 2, 90 である。条件 a ならば、原画像を再現できる。条件 e は、4 分の 1 になる。さらに、この研究では、10 分の 1 まで減らした。

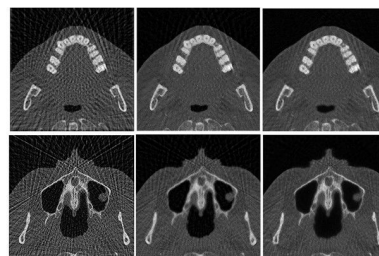
(2) 360 度ないし 180 度の投影データに対し、X 線 CT 画像再構成に用いるプロジェクション・データを約 10 分の 1 まで減らした。実は、360 度回転しなくても 180 度以上回転すれば断面画像は作れる。通常画質は低下する。360 度回転する間に強度分布データをサンプリングしている回数は、臨床機では明らかでないが、以下のデータでは 360 回と仮定している。

(2) 「360 度を 180 度にまで減らす」と「サンプリング回数を減らす」、これが、本研究の「患者の被ばく線量を減らす」ための手段である。そのときの画質維持に役立つのが「統計的画像再構成法 (ML-EM 法や ART 法)」と「疎性モデリングをもとにした圧縮センシング法 (TV 正則化)」である。ML-EM 法は Maximum Likelihood-Expectation Maximization, ART 法は Algebraic Reconstruction Technique, TV 正則化は Total Variation Regularization (または、minimization) である。

4. 研究成果

(1) 図 2 に示す画像は、90° ~ 360° の範囲内で、4° の間隔において均等にサンプリングし、90 方向のデータを取得して画像を再構成したものである。FBP, ML-EM, ART のどの画像再構成法でも、ストリーク・アーチファクトが出た。しかし、ART と ML-EM では弱くなった。

図 2



左: FBP 中: ART 右: ML-EM

0° ~ 360° の範囲内で、4° の間隔において均等にサンプリングし、90 方向のデータを取得して画像を再構成した。

どの画像再構成法でも、ストリーク・アーチファクトが出た。しかし、ART と ML-EM では弱くなった。プロジェクション・データ量は、360 から 90, 4 分の 1 に減らした。

プロジェクション・データ量は、360 方向から 90 方向、すなわち 4 分の 1 に減らしたものである。

(2) 図 3 に示す画像は、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の範囲内で、 2° の間隔をおいて均等にサンプリングし、90 方向のデータを取得して画像を再構成したものである。図 2 のケースと同様に 90 方向のデータの取得でも、間隔を狭くして（半分にして） 0° から 180° の範囲から収集すると、ストリーク・アーチファクトは弱くなった。

(3) 図 2 と図 3 の結果において、ART 法と ML-EM 法には差があり、ここでは ART 法を採用した。計算負荷は、ML-EM 法より ART 法の方が高く、計算時間は 15~30 倍かかる。FBP 法は、はるかに短時間で計算が済んでしまう。

(4) 図 4 に示す画像は、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の範囲内で、 4° または 5° の間隔をおいて均等にサンプリングし、45 方向ないし 36 方向のデータを取得して画像を再構成したものである。ART 法に TV 正則化法を組み合わせると、プロジェクション・データを 360 方向から 36 方向に減らしても、元画像の画質を再現できた。

(5) 顎顔面領域の CT 画像（上顎洞レベルと上顎歯列レベルの 2 画像、骨モード）に対して実行したところ、ART 法と TV 正則化を組み合わせると、投影データの削減（最大で 10 分の 1）の実現可能性を示した。

(6) また、従来の FBP 法との違いや ART 法と TV 正則化の組合せの有効性も明らかにした。この研究は、2018 年 9 月に学術雑誌に掲載された。しかも、最速降下法による TV 正則化は、L2 ノルム正則化の工夫により計算負荷の増大を示さなかった。さらに、研究を進め、先験的画像制約付きの加重 TV を与えた場合も、スパースな投影データに対し画質劣化のない画像再構成が可能となることがわかってきている。

(7) 統計的再構成アルゴリズムを用いたときは FBP 法よりも画質劣化が起きていなかったと言える。したがって、X 線 CT 画像の再構成において投影データを 10 分の 1 に減らせる可能性を示したことになる。ART 法と組み合わせた TV 正則化は計算負荷も顕著に増加させないため、臨床応用可能な新知見を得たと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Bing-Yu Sun, Yoshihiko Hayakawa. Impact of statistical reconstruction and compressed sensing algorithms on projection data elimination during X-ray CT image reconstruction. Oral Radiology (アジア顎顔面放射線医学学会誌 & 日本歯科放射線学会欧文誌), Sep. 2018, Vol.34, Issue 3, pp237-244. Epub ahead, 6 Dec. 2017. Received: 9 Aug. 2017/Accepted: 9 Nov. 2017 <https://doi.org/10.1007/s11282-017-0308-6>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11282-017-0308-6>

SUN BINGYU(孫氷玉), Impact of statistical reconstruction and compressed sensing algorithms on projection data elimination during medical X-ray computed tomography image reconstruction (X 線 CT 画像再構成における投影データの削減に対する統計的再構成法および圧縮センシングアルゴリズムの影響), 北見工業大学大学院医療工学専攻・学位論文(PhD), 2018-03-16. <http://id.nii.ac.jp/1450/00008618/>

〔学会発表〕(計 8 件)

早川吉彦, 小山天佑, 荒関雄登, 水上京介, 頭蓋・顎骨モデルをオブジェクトにしたハイクオリティ 3D モデリングの実験, 日本歯科放射線学会総会第 59 回総会・学術大会, 5 月 25~27 日, 神奈川歯科大学, 2018

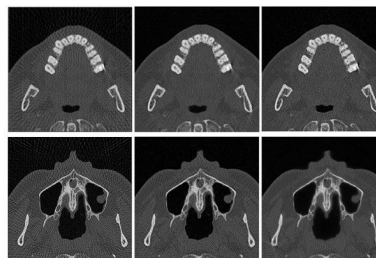


図 3

左: FBP 中: ART 右: ML-EM

$0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の範囲内で、 2° の間隔をおいて均等にサンプリングし、90 方向のデータを取得して画像を再構成した。

同様に 90 方向のデータの取得でも、間隔を狭くして 0° から 180° の範囲から収集すると、ストリーク・アーチファクトは弱くなった。

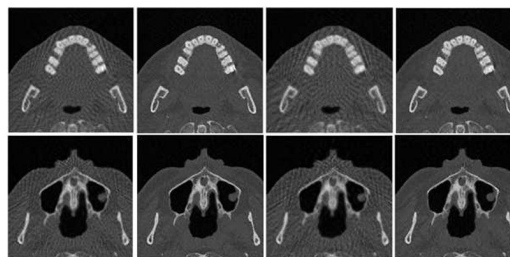


図 4

ART ART-TV ART ART-TV
左の 2 列: 4° , 45 方向 右の 2 列: 5° , 36 方向

$0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の範囲内で、 4° または 5° の間隔をおいて均等にサンプリングし、45 方向ないし 36 方向のデータを取得して画像を再構成した。ART 法に TV 正則化法を組み合わせると、プロジェクション・データを 360 方向から 36 方向に減らしても、元画像の画質を再現できた。

K. Mizukami, T. Koyama, Y. Araseki, Y. Komaki, Y. Hayakawa Virtual reality system development for masticatory motion analysis: 3D modeling and motion simulation. The 32nd International Congress of Computer Assisted Radiology and Surgery (コンピュータ支援放射線医学外科学会議, CARS2018) at Berlin, Germany, June, 2018
<https://www.cars-int.org/>

Y. Hayakawa, B.-Y. Sun, M. Hirose, Effect of projection data elimination on X-ray CT image reconstruction using statistical reconstruction algorithm. The 11th Asian Congress of Oral and Maxillofacial Radiology (第11回アジア歯顎顔面放射線医学会議), Chiang Mai, Thailand, Nov., 2016

孫氷玉, 廣瀬明依, 早川吉彦. X線CT画像再構成における投影データの削減に対する統計的再構成アルゴリズムの影響 (Effects of projection data elimination and statistical reconstruction algorithm in X-ray CT image reconstruction), 第35回日本医用画像工学会大会 (JAMIT Annual Meeting 2016), 7月21-23日, 千葉大学, 2016

Yoshihiko Hayakawa, Tutorial on CMI. Innovative techniques in image processing and recognition in CMI. The 30th International Congress of Computer Assisted Radiology and Surgery (コンピュータ支援放射線医学外科学会議, CARS2016) at Heidelberg, Germany, June 21-25, 2016

Y. Hayakawa, B.-Y. Sun, M. Hirose, Effect of projection data elimination in image reconstruction of x-ray CT using algebraic reconstruction technique, The 30th International Congress of Computer Assisted Radiology and Surgery (コンピュータ支援放射線医学外科学会議, CARS2016) at Heidelberg, Germany, June 21-25, 2016

早川吉彦, 孫氷玉, 廣瀬明依. X線CT画像再構成における投影データの削減に対する統計的再構成アルゴリズムの影響, 第57回日本歯科放射線学会・学術大会 6月18~19日, 大阪国際会議場, 2016

孫氷玉 (Sun Bing-Yu), 廣瀬明依, 早川吉彦, スパース投影方向データを用いた逐次近似法によるコーンビーム型X線CT画像の再構成情報処理学会北海道支部 (情報処理北海道シンポジウム2015), 10月3日, 江別 (北海道情報大学), 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:
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:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

研究室のホームページ: <http://dip.cs.kitami-it.ac.jp/>

北見工業大学・研究者総覧 <http://hanadasearch.office.kitami-it.ac.jp/searchja/show/id/1189>

北見工業大学・リポジトリ <https://goo.gl/pb1TMg>

ORCID IDへのリンク <https://orcid.org/0000-0002-7006-235X>

Scopusへのリンク <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7201356054>

researchmapへのリンク <https://researchmap.jp/read0194262>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：なし

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：コーネリア・コバー

ローマ字氏名：Cornelia Kober, Faculty of Life Sciences, Hamburg University of Applied Sciences, Hamburg, Germany: Prof. i.R.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。