

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15476

研究課題名（和文）最適化数学の手法を用いた、直線軌道投影からのX線CT再構成の実証研究

研究課題名（英文）Demonstration of translated X-ray CT using reconstruction algorithm based on mathematical optimization method

研究代表者

三津谷 有貴（Mitsuya, Yuki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：70784825

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、直線的な軌道から投影したCTの結果を再構成する手法についての研究をおこなった。直線的な軌道からの投影では、X線源の拡がり角度を利用して視差のある画像を得る。しかしながらこの場合、従来の回転軌道投影に比べて、角度情報が不足する。このため、従来の再構成アルゴリズムでは完全な再構成を行うことができない。本研究では、圧縮センシング型CTの再構成アルゴリズムを用いて、直線軌道CTを実証した。本研究では全変動正則化に加えて、指向性差分正則化という概念を新たに用いて、これによって直線軌道からの再構成アルゴリズムを構築した。実際に実験体系を構築し、CT撮像を行い、実証実験に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

回転軌道での撮像ではなく、直線的な軌道での投影からCTを行うことができれば、大型構造物に対しても断層撮像を行うことができるため、望ましい。この直線軌道CTでは、コーンビームやファンビームのX線が発散する角度をうまく利用して、視差のあるX線画像を取得して、そこから断面画像の再構成を行うというコンセプトである。直線軌道CTは広範囲な大型構造物、移動が困難な物体に対しても適用できると考えられるため、新しいCT技術として産業や公益面で大きなインパクトがあると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a method for reconstructing CT results projected from a translational trajectory was investigated. Linear orbit projection uses the spread angle of the X-ray source to obtain a parallax image. However, in this case, the angular information is insufficient compared to the conventional rotational orbit projection. Therefore, the conventional reconstruction algorithm cannot provide a perfect reconstruction result. In this study, we demonstrated translational CT using the reconstruction algorithm of compressed sensing-based CT. In addition to total variation regularization, we used a new concept of directional difference regularization method, and constructed a reconstruction algorithm. An experimental system was actually constructed and CT demonstration was successfully performed.

研究分野：放射線計測

キーワード：CT 圧縮センシング 非破壊検査 最適化数学

### 1. 研究開始当初の背景

現在、高度経済成長期に建造された多くのコンクリート構造物（橋梁等）の老朽化に伴い、これらの維持管理が課題となっている。維持管理の最適化には、構造物の内部劣化、つまりは鋼材の腐食の程度などを知り、それに基づく耐荷力評価を行うのが望ましい。そこで現在、コンクリートの内部劣化を定量的に評価する技術の研究開発が進んでいる。

そのうち、特に X 線を用いた分析は有望と考えられている。しかしながら、単純 X 線透過撮像（レントゲン）では、物体の透過像が画像上で重なり合うため、鋼材の腐食度合いを定量的に評価することが難しい。一方で、X 線 CT を適用することができれば、断層撮像によって三次元的に構造を観察することができるので、内部鋼材の腐食度合いの定量的な評価も可能になると考えられる。しかしながら、橋梁のような大型構造物では、従来の回転軌道 CT が困難であることは想像に難くない。

回転軌道での撮像ではなく、直線的な軌道での投影から CT を行うことができれば、大型構造物に対しても断層撮像を行うことができるため、望ましい。この直線軌道 CT では、コーンビームやファンビームの X 線が発散する角度をうまく利用して、視差のある X 線画像を取得して、そこから断面画像の再構成を行うというコンセプトである。直線軌道 CT は広範囲な大型構造物、移動が困難な物体に対しても適用できると考えられるため、新しい CT 技術として産業や公益面で大きなインパクトがあると考えられる。

一方で、直線軌道での投影で CT を行おうとすると、従来の回転軌道に比較して、角度情報がかなり制限されるため、従来の再構成手法では正しく再構成することができない。このため、直線軌道 CT を可能にするような新しい再構成手法と、それを用いた直線軌道 CT の実証が望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究では、最適化数学手法に基づいた CT 再構成によって、直線軌道 CT を数値的に検証する。また小型の実験システムによって、実験的に実証することを目的とする。

直線軌道 CT では根本的に角度情報が不足するため、従来の再構成手法では正確な再構成が行えないことが問題であった。これを解決するために、圧縮センシング型 CT で用いられている再構成手法を適用することを提案する。圧縮センシングとは、少ない観測データからもとの高次元のデータを復元する信号処理技術である。復元したいデータにゼロ値が多く含まれる（疎である）場合に、その非ゼロ値を最小化するように目的関数を設定して最適化問題を解くことによって、もとのデータを復元することができる。角度情報が不足した直線軌道投影の CT において、少ない観測データから復元できる圧縮センシング型の再構成は最適であると考えられる。

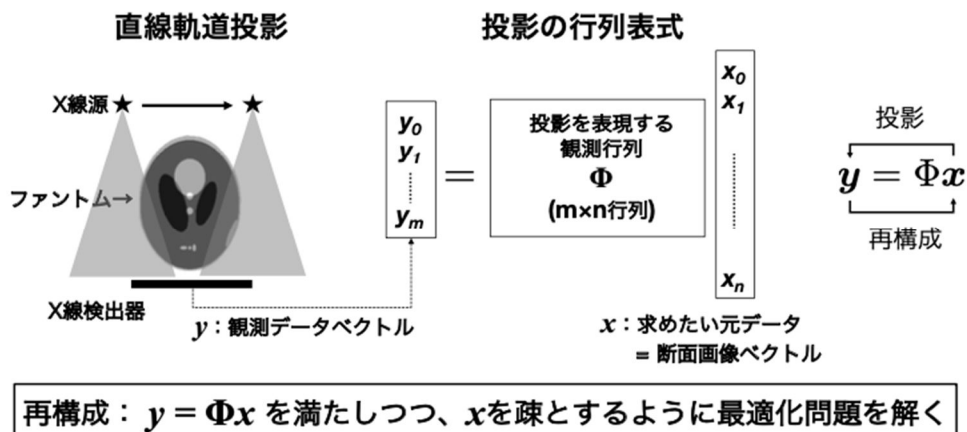


図 1. 直線軌道 CT のための再構成手法の概要

### 3. 研究の方法

本研究では、直線軌道の CT を数値計算による再構成アルゴリズムの開発と、小型のシステムを用いた実験によって実証する。研究期間 3 年間で、以下のことを明らかにする。

#### [1] 数値計算・シミュレーションを用いた再構成手法の開発

画像再構成のための最適化問題を定式化し、その解法・アルゴリズムを開発する。開発した再構成アルゴリズムは、数値計算やモンテカルロ・シミュレーションによって検証する。特に X 線源の拡がり角度や投影回数、ノイズレベルによって再構成が正しく行われるかどうか、パラメータスタディを実行し、定量的な評価を行う。

[2] 直線軌道撮像システムの開発と実験による実証

直線軌道投影とデータ取得を行う体系を構築する。実証用の X 線検出器としてはシンチレータとフォトダイオードのアレイからなる検出器を用いる。これを精密自動ステージ上に搭載し、直線軌道投影を行う体系を構築する。このシステムを用いて実際に直線軌道投影での撮像を行い、画像再構成を行って、直線軌道 CT を実証する。

4 . 研究成果

[1] 数値計算・シミュレーションを用いた再構成手法の開発

直線軌道 CT の再構成手法の精度を向上するための新しい数学的定式化手法として、軌道方向を考慮した差分と重み付けを行う正則化手法を新たに提案し、その実証を行った。これを指向性差分正則化法と名付けた。

従来の回転軌道投影における圧縮センシング型再構成では、再構成領域全体で一様に微分勾配をとる正則化手法(全変動正則化)が取られていた。CT の対象物の断層像は線源弱係数値が連続している領域が多いため、微分勾配をとることによって、断層像のほとんどをゼロ値とすることができるようになり、スパースな画像をつくることができる。このため、圧縮センシング型再構成が適用できた。

しかしながら、直線軌道 CT では投影が常に一方向からとなるため、角度情報に不均衡が生じる。このため、従来の回転軌道投影で用いられるこの全変動正則化手法では、画像の場所によっては必要以上に大きな重み付けがされてしまい、再構成が適切に行われれないという問題があった。

そこで、本研究では、従来の全変動正則化の項に加えて、投影軌道に応じて画素間の差分をとり、この重みを調整するような正則化項を組み合わせることを考案した(指向性差分正則化)。本手法のイメージを図 2 に示す。

全変動正則化に指向性差分正則化を加えた最適化式は以下ようになる。

$$\operatorname{argmin}_x \frac{1}{2} \|y - \Phi x\|_2^2 + \lambda_1 \|x\|_{TV} + \lambda_2 \|Hx\|_1 + \lambda_3 \|Vx\|_1$$

ここで、 $\Phi$  は投影を表現する係数行列、 $y$  は投影値ベクトル、 $x$  は原画像ベクトルを示す。また第二項は TV 正則化項である。H は画素の横方向に差分を取る行列、V は画素の縦方向に差分を取る行列である。

数値ファントムを用いて、従来のフィルタ補正逆投影法(FBP)、逐次近似再構成(ART)、従来の正則化手法(全変動正則化)そして本研究で提案の正則化手法を比較した結果を図 3 に示す。提案の正則化手法ではほぼ完全にもとの断層像を再構成することが出来ており、また、従来の正則化手法に比べてエッジ部分の表現も再現することができている結果となっている。

数値計算を用いて、X 線の拡がり角度および投影回数を変化させたときの再構成精度について、パラメータスタディを実施した。その結果を図 4 に示す。この結果では、ノイズのある状況下では、投影回数を増加させること、X 線の拡がり角度を増加させることが再構成精度の向上につながることを確認できた。

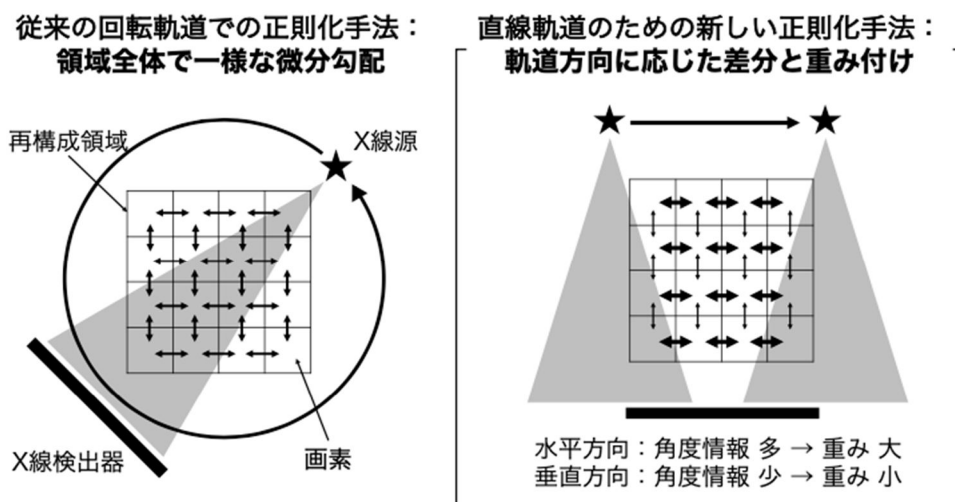


図 2. 新しい正則化手法の考案

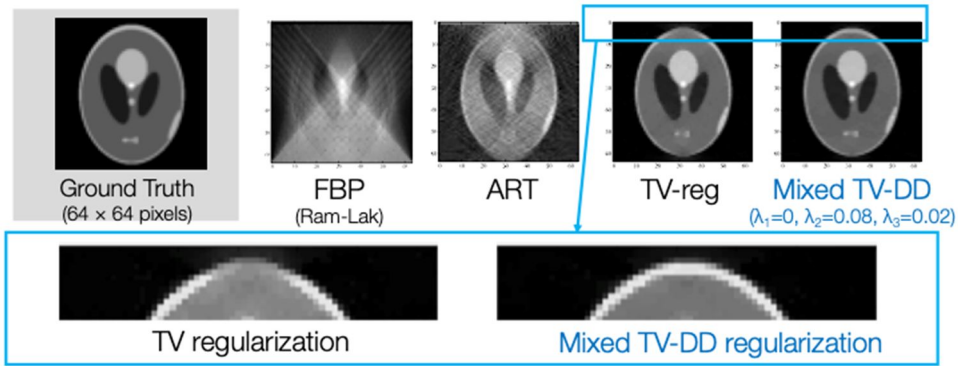


図 3. 再構成手法の比較

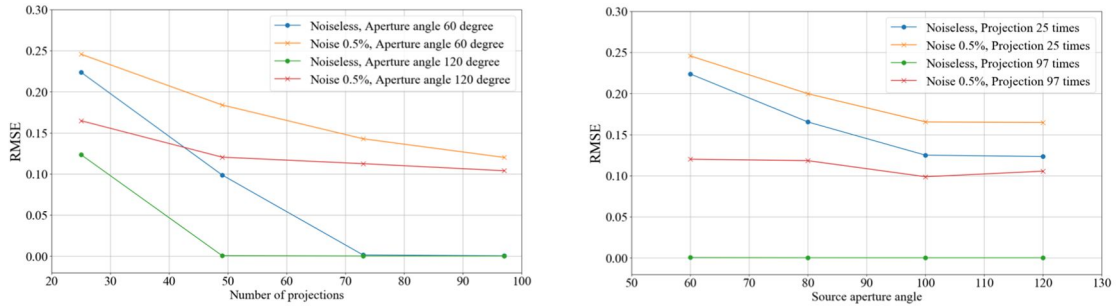


図 4. 投影回数と X 線拡がり角度による再構成精度の変化

## [2] 直線軌道撮像システムの開発と実験による実証

本研究では、小型の直線軌道投影システムを実際に開発し、これを用いた実証実験を行った。X 線検出器には、蛍光体とフォトダイオードアレイからなるラインセンサ型 X 線検出器を用いた。X 線源は 50 kV のコーンビーム型 X 線源を用いた。検出器および物体を精密自動ステージによって直線移動させることによって視差のある画像を取得した。図 5 に実験体系の概要図とその写真を示す。本実験ではプラスチックの六角形の長ナットを測定物に用いた。その投影結果（サイノグラム）と、開発した再構成アルゴリズムによって再構成した結果を図 6 に示す。再構成結果では、もとのオブジェクトと比較して一部の欠損が見られるが、概ねもとの物体に近い再構成結果を得ることができた。これによって、直線軌道 CT を実験的に実証することができた。

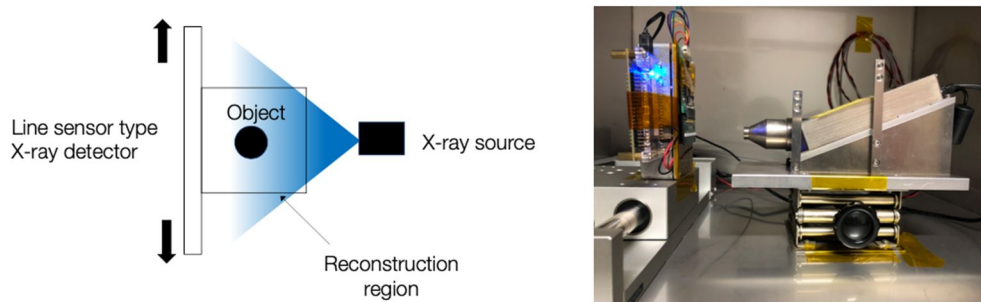


図 5. 実験体系の概要図、およびその写真

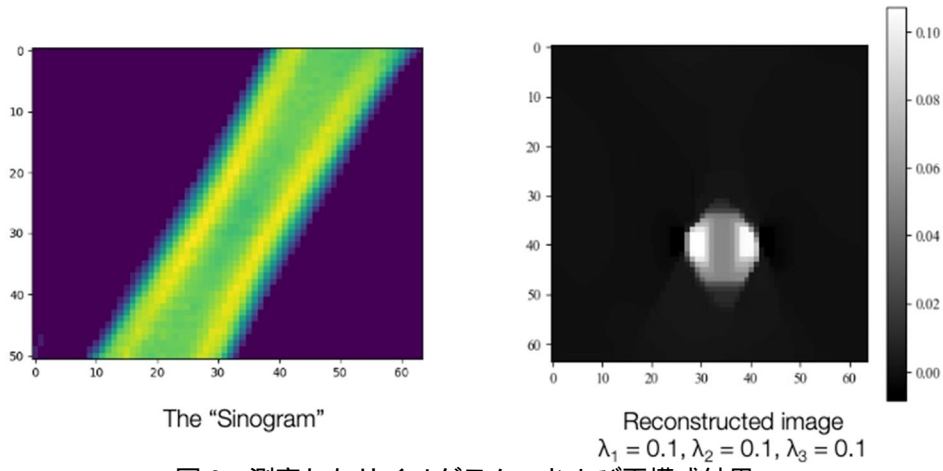


図 6. 測定したサイノグラム、および再構成結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yuki Mitsuya, Mitsuru Uesaka, Hiroyuki Takahashi
2. 発表標題 Study on reconstruction accuracy of compressed sensing-based algorithm for translational trajectory CT
3. 学会等名 2020 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Mitsuya, Mitsuru Uesaka, Hiroyuki Takahashi
2. 発表標題 Compressed sensing-based reconstruction for computed tomography with translational trajectory
3. 学会等名 2019 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Mitsuya, Hiroyuki Takahashi
2. 発表標題 X-ray CT using translational trajectory and its reconstruction based on compressed sensing
3. 学会等名 2021 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------