

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20232

研究課題名（和文）次世代CTのスペクトル歪み補正方法の開発

研究課題名（英文）Spectral distortion correction for a photon-counting CT system

研究代表者

村田 一心（Murata, Kazumi）

国立天文台・ハワイ観測所・特任研究員

研究者番号：90770040

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、次世代のX線CTとして注目されているスペクトルCTにおける最大の課題であるスペクトル歪みに関する研究を推進した。スペクトルCTの最大の利点は、スペクトルを取得し、媒質分離を行うことで、全く新しい応用分野が広がることにある。しかし、特にパルス・パイルアップ効果と呼ばれる現象によりスペクトルが歪められてしまうと、媒質分離の精度は著しく劣化してしまう。そこで本研究では、近年特に注目されている「全変動正則化」「テンソル分解による低ランク近似」を適用し、精度よく歪みを補正する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スペクトルCTの最大の利点は、スペクトルを取得し、媒質分離を行うことである。媒質分離を行うことで、被写体の断層画像を媒質ごとに取得でき、複数の造影剤を同時に使用可能にするなど、従来のCTでは不可能であった幅広い応用が期待されている。しかし、特にパルス・パイルアップ効果と呼ばれる現象によりスペクトルが歪められてしまうと、媒質分離の精度は著しく劣化してしまう。そのため、高精度で歪みを補正する技術を開発することで、X線CTの応用可能性を大きく広げることになる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted research on the spectral distortion, which is the biggest challenge in spectral CT, a next-generation X-ray CT technology. The greatest advantage of spectral CT is the ability to acquire spectral information and perform material decomposition, which leads new application fields. However, the accuracy of material decomposition is significantly degraded when the spectrum is distorted, particularly due to a phenomenon called pulse pile-up effect. We developed a technique to accurately correct the distortion by applying methods such as "total variation regularization" and "low-rank approximation by tensor decomposition."

研究分野：天文学，画像工学

キーワード：フォトンカウンティングCT スペクトル歪み補正 圧縮センシング 媒質分離

## 1. 研究開始当初の背景

X線CTの技術的進歩は著しく、種々の臓器の微細な3次元構造など多彩な医学的情報を提供するだけでなく、多くの物性研究にも幅広く用いられている。しかし、従来のCTではX線の強度だけしか測定できないため、対象物を構成する原子の詳細な情報は失われてしまう。現在、この問題を解決するため2つのエネルギーを用いたCT(dual energy CT)が用いられているが、2つのエネルギーだけでは限界がある。それに対しフォトンカウンティング型検出器を用いたCT(以下スペクトルCT)では、X線のエネルギーごとの強度、つまりスペクトル情報を取得できる。これにより、医学的・産業的に全く新しい応用分野が広がる。すなわち、患者の臓器機能の可視化、被ばく量を抑えたCT画像の撮影、重粒子線治療の精度向上、さらには危険物の同定によるテロ対策にも応用ができる。このような応用ができるのは、スペクトル情報から対象物の媒質分離(=媒質ごとの密度の定量)が可能になるためである。

しかし現在の技術では、スペクトルCTは広く実用されるには至っていない。その主な要因として、「検出したスペクトルが歪んでしまい、高精度な媒質分離ができない」ことが挙げられる。申請者のシミュレーションによると、検出器特性の改善だけでスペクトルの歪みを十分低減させるには、検出器の不感時間を極めて短くする必要があり、極めて困難である。そこで本研究では、検出したスペクトルが歪んでしまうこと自体は許容し、検出後にスペクトルを補正する手法を開発する。

## 2. 研究の目的

では、どうすればスペクトルの歪みを精度よく補正できるのか? 本研究では、スペクトルの歪みの主要因となっている「パルス・パイルアップ効果」に着目する。これは検出器に複数の光子が同時に入射することでスペクトルの歪みを引き起こす現象である。パイルアップ効果によるスペクトルの歪みの程度を理解し、観測スペクトルからパイルアップが起きる前のスペクトルを推定することで、スペクトルの歪みを大幅に改善できると期待される。

本研究の目的は、スペクトルCTで取得できるスペクトルの歪み補正方法を確立することである。特に、スペクトルの歪みの主要因であるパイルアップ効果を補正する。ここで特に問題になるのは、スペクトルの歪み補正が逆問題になることである。

この問題に対し本研究では、圧縮センシングを適用する。圧縮センシングは、情報不足で解けない問題に対し、先見情報を与えて解く手法である。この手法は、ノイズレベルが高くなる低線量CTの画質改善などに頻繁に使われている。この手法を適用することで、パイルアップ効果で情報が失われ、歪んでしまったスペクトル形状を復元できると考えられる。申請者は圧縮センシングを使った画像のぼけ補正やスペクトルCTの画像再構成などを行ってきた。本研究では申請者が培ってきた技術を活用する。

## 3. 研究の方法

研究はシミュレーション、および実際の装置を用いた実験の両面から行なった。基本的な流れは、シミュレーション上で技術開発を行い、その手法を実機でも適用可能なことを検証する、というものである。

まず、圧縮センシングの手法をより確立させるため、圧縮センシングを用いたリングアーチファクト除去手法を開発した。リングアーチファクトはスペクトルCTにおける検出器特性のばらつきに由来するものである。本研究では、検出器の特性、データの収集方法、画像の再構成過程に着目し、それに適した目的関数を設定することで、リングアーチファクト除去における圧縮センシングを用いた手法を確立させた。その際、簡単なファントムを用いたシミュレーション、実際の画像を用いたシミュレーション、実機を用いた検証を行った。

次に、スペクトルの歪みが最も大きく影響するのが被写体の媒質分離にあることに着目し、スペクトルの歪みと媒質分離の精度の関係を調査した。続いて、スペクトルの歪みを補正することでどれほど媒質分離の精度が改善されるかを調べるため、シミュレーション上で簡

単な条件を設定し、最小二乗法ベースの手法で調査した。

これらの予備調査を踏まえ、スペクトルの歪みを補正する手法を開発した。圧縮センシングをベースにした手法に加え、近年流行している機械学習ベースの手法も開発した。機械学習ベースの手法では、関連研究として媒質分離を瞬時に行うコードも開発し、機械学習を用いた時の振る舞いを調査した。圧縮センシングを用いた手法では、「全変動正則化」「テンソル分解による低ランク近似」を用いた目的関数を設定し、従来の最小二乗法による手法と比較した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 圧縮センシングを用いたリングアーチファクト除去手法の開発

スペクトルCTにおける検出器の感度ムラなどによってスペクトルを正しく測定できない場合に特に発生する、リングアーチファクトを除去する手法を開発した。圧縮センシングを適用し、検出器のデータ取得過程に沿った目的関数を設定することで、従来の手法よりもはるかに高い精度でアーチファクトを除去することに成功し、高い画質が得られるようになった。本手法は、シミュレーションに加え、実際の検出器で取得した画像にも有効であることを確認した。その結果は査読付き論文として発表した[1]。

##### (2) スペクトルの歪みと媒質分離精度との関係を調査

スペクトルが歪んでしまっている時、スペクトルCTの最大の利点である「媒質分離」の精度がどれほど悪化するのか、シミュレーションで調査した結果、微小な領域の媒質分離を行う場合、わずか数%のスペクトルの歪みが致命的な悪影響を及ぼすことがわかった。すなわち、媒質分離を高精度で行うためには、スペクトルの歪みを補正する手法の開発が必須であることが、改めて示された。ただし、理想的な条件では最小二乗法を元に簡易的に歪みを補正可能であることも同時に示すことができたため、その内容を国際会議で発表した[2]。

##### (3) スペクトルの歪み補正方法の開発

圧縮センシングを用いたスペクトルの歪み補正方法を開発した。その有効性をシミュレーションにて検証したところ、従来の最小二乗法をベースとした手法ではノイズが増幅されてしまうのに対し、目的関数を改良した本手法では、より高い精度で歪みを補正できることが確認された。

さらに、機械学習をベースにした手法も開発した。こちらは主に媒質分離に対する影響に着目し、従来法と比べ、ノイズの影響を受けにくく、高精度かつ高速で媒質分離を行うことができることを示した。[6]

これらの成果は国内外の学会で発表した。[3, 4, 5]

#### <引用文献>

- [1] “Ring-artifact correction with total-variation regularization for material images in photon-counting CT”, Murata Kazumi, Ogawa Koichi, IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences, 2020
- [2] “Influence of pulse pile-up effects on material decomposition with photon-counting CT”, Kazumi Murata, Koichi Ogawa, 2020 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC) (国際学会), 2020
- [3] “Material decomposition of photon-counting CT spectra with machine learning”, Kazumi Murata, Koichi Ogawa, 120th Scientific Meeting of Japan Society of Medical Physics (JSMP) (国際学会), 2020
- [4] “Spectral distortion correction caused by pulse-pileup effects with a machine learning technique for a photon counting x-ray detector”, Kohei Koyama, Kazumi Murata, Koichi Ogawa, 120th Scientific Meeting of Japan Society of Medical Physics (JSMP) (国際学会), 2020
- [5] “Spectral distortion correction of photon-counting CT with machine learning”, Kazumi Murata, Koichi Ogawa, 2021 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical

Imaging Conference (NSS/MIC) (国際学会) , 2021

- [6] “Regularization-based restoration of distorted spectral images for photon-counting CT” , K. Murata, K.Ogawa, 2022 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会) , 2022

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Murata Kazumi, Ogawa Koichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Ring-artifact correction with total-variation regularization for material images in photon-counting CT	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TRPMS.2020.3022864	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kazumi Murata, Koichi Ogawa
2. 発表標題 Spectral distortion correction of photon-counting CT with machine learning
3. 学会等名 2021 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazumi Murata, Koichi Ogawa
2. 発表標題 Material decomposition of photon-counting CT spectra with machine learning
3. 学会等名 120th Scientific Meeting of Japan Society of Medical Physics (JSMP)（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohei Koyama, Kazumi Murata, Koichi Ogawa
2. 発表標題 Spectral distortion correction caused by pulse-pileup effects with a machine learning technique for a photon counting x-ray detector
3. 学会等名 120th Scientific Meeting of Japan Society of Medical Physics (JSMP)（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazumi Murata, Koichi Ogawa
2. 発表標題 Influence of pulse pile-up effects on material decomposition with photon-counting CT
3. 学会等名 2020 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC) (国際学会)
4. 発表年 2020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