

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14753

研究課題名（和文）電子部材の非破壊精密検査を目的とした多軸コーンビームCTの開発

研究課題名（英文）Development of a multi-axis cone beam CT for accurate non-destructive testing of electronic equipment

研究代表者

加納 徹（Kano, Toru）

東京理科大学・工学部情報工学科・助教

研究者番号：40781620

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）：非破壊で物体の断層画像を取得可能なX線CTは、被写体の中に金属が含まれるとき、メタルアーチファクトと呼ばれる激しいノイズが発生する。本研究では、多軸回転機構を搭載したコーンビームX線CTを提案し、ハードウェア的アプローチとして透過強度分布に基づく回転軌道の最適化、ソフトウェア的アプローチとして新しい軌道補間計算を提案し、2つの視点からメタルアーチファクトの低減を試みた。樹脂、鉄、アルミニウムの物性を用いた数値ファントムに対するシミュレーション実験の結果、いずれのアプローチにおいても、定性的・定量的にアーチファクトが低減可能であることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

X線CTで金属を含む被写体を撮影するケースは多く、メタルアーチファクトは医療・産業現場で大きな問題となっている。本研究では、産業現場での利用を想定し、メタルアーチファクトを低減するための新しい多軸X線CTを提案した。本技術は、これまで困難であった、金属を含む工業製品が高精度非破壊検査の実現に繋がるものである。さらには、医療現場においても、診断精度の向上に寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：X-ray CT, which can acquire cross-sectional images of an object non-destructively, generates severe noise called metal artifact when metal is included in the object. In this study, we proposed a cone-beam X-ray CT equipped with a multi-axis rotation mechanism and attempted to reduce metal artifacts from two viewpoints: as a hardware approach, we optimized the rotation trajectory based on the X-ray transmitted intensity distribution; as a software approach, we proposed a new trajectory interpolation calculation. Simulation experiments on numerical phantoms with the physical properties of resin, iron, and aluminum confirmed that both approaches could reduce artifacts qualitatively and quantitatively.

研究分野：計測工学

キーワード：X線CT メタルアーチファクト 画像再構成

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) X線CTは、被写体の周囲方向からX線投影データを集め、断層画像を再構成する装置である。非破壊で物体の内部計測が可能な本技術は、医療・産業分野に多大な恩恵をもたらしてきた。特に、一度の撮影で三次元的な断層データを取得可能なコーンビームCT（コーンビームX線光源を用いたCT）の普及率は、増加の一途を辿っている。しかし、金属部品で構成された基板のように、被写体の中に金属が含まれるとき、メタルアーチファクトと呼ばれる激しい偽像（アーチファクト）が発生する。このとき、被写体の正確な断層画像が観察できないため、診断や検査の実施が不可能となる。

(2) X線CTにおけるメタルアーチファクトを低減すべく、国内外の研究者がさまざまなアプローチを試みてきたが、その多くは投影データの補間による擬似的なメタルアーチファクト低減や、硬組織や軽金属など限定的な対象にしか有効でない方法に留まっている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、多軸回転機構を用いた新しいX線CT撮影手法を確立することで、メタルアーチファクトを抑制し、これまで困難であった電子部材の非破壊精密検査を実現することである。

### 3. 研究の方法

本研究では、多軸X線CTによるアーチファクト低減を確立させるため、ハードウェア的アプローチとソフトウェア的アプローチの二つの視点から検討を行う。ハードウェア的アプローチとしては、透過強度分布に基づく回転軌道の最適化を行う。多軸機構によって、投影回転中における照射X線ライン上の金属の重畳を防ぐことで、十分なX線を検出可能とする。また、ソフトウェア的アプローチでは、段階的な軌道補間アルゴリズムを提案する。従来の軌道補間アルゴリズムでは十分な補間ができない領域に対し、周辺情報を考慮した異なる補間アルゴリズムを段階的に適用することで、処理が必要な領域を効率よく補間する。手法の有効性は、独自に開発したX線CTシミュレーションソフトウェア上で、樹脂、鉄、アルミニウムから成る電子デバイスを模擬した数値ファントムに対し、二次元的および三次元的に確認する。評価指標には、正解画像との距離を表すRMSE（Root Mean Squared Error）と、正解画像との構造的類似性を表すSSIM（Structural Similarity）を用いる。

### 4. 研究成果

(1) ハードウェア的アプローチとして、多軸X線CTの投影軌道の最適化について検討した。図1に示すように、通常のスレージの回転 $\theta$ に加え、スレージ上の回転 $\phi$ を考える。このとき、以下の手順で投影軌道を構築する。

- ①  $\theta$ による通常の一軸回転を行い、投影データを収集する
- ② 収集した各方向データの透過X線強度の総和が極大となる角度を探索する
- ③ ②で探索した角度において $\phi$ の回転を行い、透過X線強度分布の総和と標準偏差の積が最小となる $\phi$ を探索する
- ④ ②③で得た軌道制御点 $\theta$ 、 $\phi$ から、投影点群をスプライン補間によって滑らかに繋ぎ、投影軌道を構築する（図2）

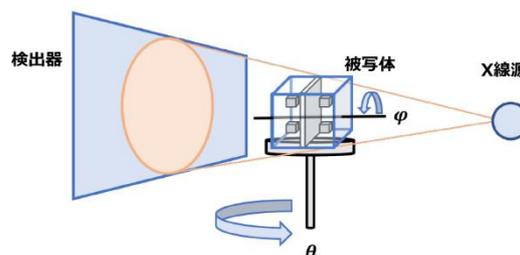


図1: 二軸投影機構の模式図

上記手順の③において、単に透過X線強度の総和を用いるのではなく、標準偏差を用いたのは、金属の重畳によって透過X線強度が極端に低くなる経路を強調し、除外するためである。

(2) 提案手法の有効性を確認するため、図3に示す数値ファントム（鉄と樹脂で構成）を用いてシミュレーション実験を行った。実験結果を図4に示す。

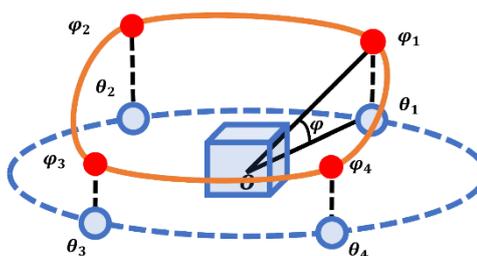


図2: 最適投影軌道の構築

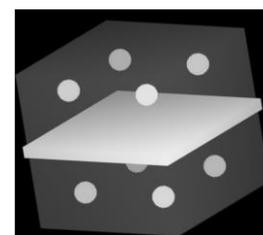


図3: 数値ファントム

回転軌道の最適化に「投影データ上の金属面積最大化」を用いた先行研究の結果では、 $z=87$  において  $RMSE=2770.3$ ,  $SSIM=0.62114$  であり、本手法では  $RMSE=2827.7$ ,  $SSIM=0.47040$  となった。定量的な数値は減少してしまったものの、先行研究の結果は樹脂領域全体が明るくなり、金属の形状も不明瞭になっている。一方で本手法では、画像の下半分における樹脂領域の明るさや金属形状の明瞭性において、定性的な改善が見られた。

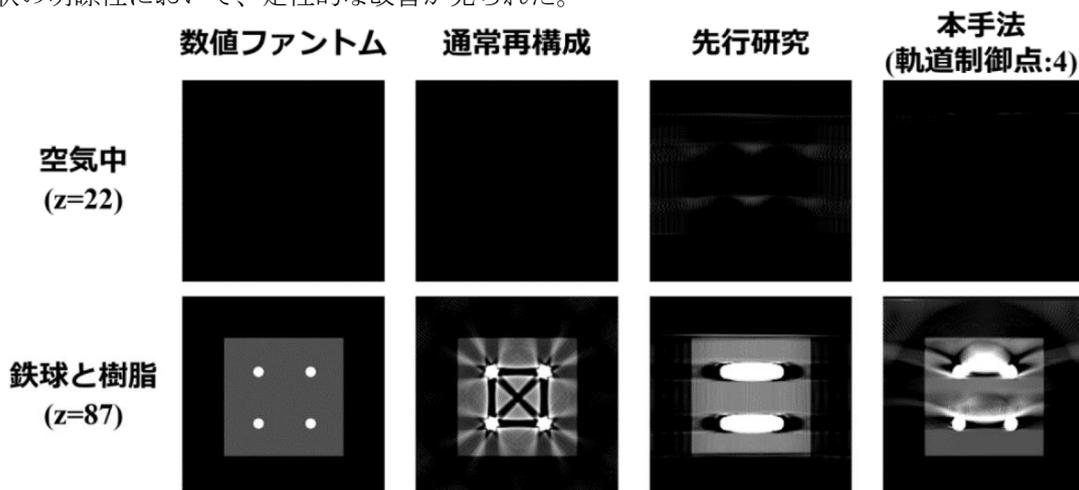


図 4: 投影軌道最適化によるメタルアーチファクト低減結果

(3) 次に、ソフトウェア的アプローチとして、サイノグラムの段階的軌道補間法を検討した。サイノグラムとは、被写体の周囲方向からの X 線投影データを一列に並べたデータである。回転投影の原理上、サイノグラムは被写体の位置座標ごとにサインカーブ軌道を持つことがわかる。サイノグラムの構造を保ちつつ金属領域を補間する手法として、サイノグラムのサインカーブ軌道を用いた補間があるが、利用可能なサインカーブ情報が少ないとき、補間が不完全となる問題があった。そこで本研究では、軌道補間を行う前段階として、サインカーブの分断距離が短くなるような矩形補間を行い、軌道補間によって完全なサイノグラムを得るフローを提案した (図 5)。樹脂と 2 種類の金属 (鉄、アルミニウム) で構成された数値ファントムに対し、提案手法を適用した結果を図 6 に示す。通常の再構成 ( $RMSE=818.83$ ,  $SSIM=0.54526$ )、および単純な軌道補間を行う従来手法 ( $RMSE=439.12$ ,  $SSIM=0.71292$ ) と比較し、本手法 ( $RMSE=184.77$ ,  $SSIM=0.88252$ ) は定性的にも定量的にもアーチファクトが低減されていることが確認された。

(4) 本研究では上述のとおり、多軸 X 線 CT を考案し、ハードウェアとソフトウェアの二つの視点から、メタルアーチファクト低減について検討した。シミュレーション実験の結果、それぞれのアプローチで従来手法よりも効果的なメタルアーチファクト低減が可能になることが示唆され、今後これら手法を組み合わせることで、さらなる精度向上に繋がることが期待される。

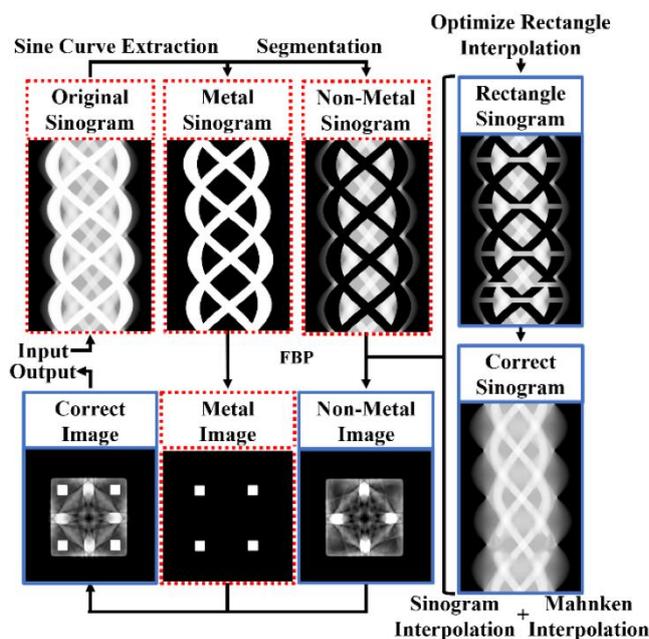


図 5: サイノグラムの段階的軌道補間

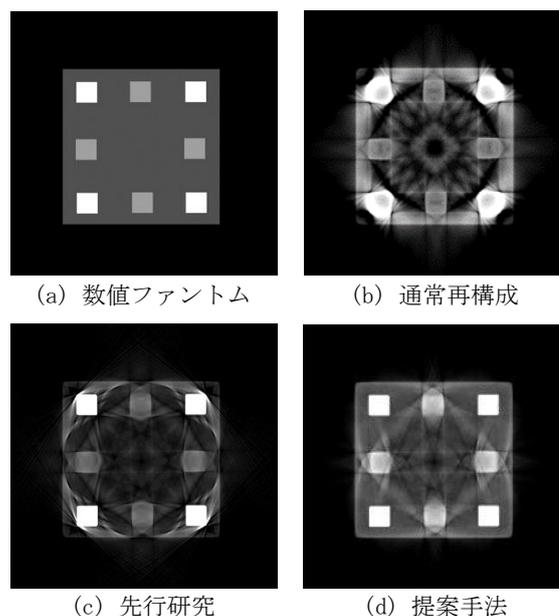


図 6: 段階的軌道補間によるメタルアーチファクト低減結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 加納 徹	4. 巻 59
2. 論文標題 《第21回》X線CTを用いた非破壊検査技術の高度化に向けて	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 619-620
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11499/sicejl.59.619	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 加納 徹	4. 巻 75
2. 論文標題 CT（知っておきたいキーワード）	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会誌	6. 最初と最後の頁 243-245
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮岡慧, 加納徹, 小関道彦, 赤倉貴子
2. 発表標題 X線CT画像におけるメタルアーチファクト低減のためのサイノグラム補間法
3. 学会等名 計測自動制御学会第38回センシングフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮岡慧, 加納徹, 小関道彦, 赤倉貴子
2. 発表標題 X線CT画像におけるメタルアーチファクト低減のためのサイノグラム構造に基づいた補間法と評価
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Kano's Page  
<https://kano.ac/>

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
---------	---------