

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02055

研究課題名(和文)大型アセンブリ品の大規模X線CTデータからの高精度部品抽出

研究課題名(英文)Accurate component extraction from X-ray CT data of large assembled objects

研究代表者

長井 超慧(Nagai, Yukie)

東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：20586002

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：アセンブリ品の大規模X線CTデータ処理に必須の以下の手法を開発し、研究期間を通じて、英語論文誌への採択3件、国際学会での発表7件、国内学会での発表6件の成果発表を行った。開発した手法は以下のとおりである。(1)メタルアーチファクト減少法(2)高精度表面抽出法(3)CADデータとCTデータ(投影画像またはCTボリューム)の位置合わせ(4)部品群の対応付け(5)アセンブリ品の形状検査手法(6)CTボリュームのセグメンテーション法(7)可動部分の検査手法(8)高画質4次元CTデータの生成法。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アセンブリ品の実スキャンデータの処理に必要な各種手法の構築により、理論と実用の橋渡しである「現物ベース形状モデリング」分野に貢献した。本成果で実現した技術は主として、(1)アセンブリ品で顕著な物体表面の不確定性を克服した高精度形状取得、(2)アセンブリ品のCTデータで生じがちな大規模なデータの処理、の2点である。

これらにより、アセンブリ品のCTボリュームから高精度な3次元形状データを得、観察・検査・設計等に活用することが可能になったため、産業用X線CTスキャナーの製造業における利活用の促進が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We developed the following algorithms, which are essential for large-scale X-ray CT data processing of assemblies. The results have been published as three publications in international journals, seven reviewed presentations at international conferences, and six presentations at domestic conferences. The developed algorithms are for (1) metal artifact reductions, (2) high accuracy surface extractions, (3) alignments of CAD data and CT data (projection images or CT volumes), (4) determination of parts correspondence between sets of assembly parts, (5) shape inspection for assemblies, (6) segmentation for CT volumes, (7) inspection for movable parts of assemblies, and (8) quality improvement of 4DCT (in-situ) volumes.

研究分野：形状モデリング

キーワード：X線CTスキャン CTボリューム 投影画像 アセンブリ 高精度 形状抽出 大規模データ

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

高品質で省エネルギーなものづくりのためには、試作品・製品など、実際に加工された状態の品(現物)の高精度な3次元形状データを取得し状態を確認することが有効である。それには非破壊で3次元形状の取得が可能なX線CTスキャンが必須である。しかし、CTスキャンで得られるCTボリューム(3次元画像)の画素値であるCT値は計測物の密度に比例し部品境界で緩やかに変化するため、密度の近い部品間の正確な境界決定が困難である。また、計測物や計測条件によってアーチファクト(偽像)が存在すること、精度の不足、データ量が膨大といった、解決せねば実用化ができない様々な課題があった。

## 2. 研究の目的

1.に記載の背景をふまえ、本研究開発では大規模X線CTデータの実用化に求められる「アセンブリ品の大規模X線CTデータからの高速省メモリで高精度な形状抽出」を可能にするための要素技術の開発を目指した。具体的には、ボクセル精度を超える高精度表面抽出法、部品間の境界特定が困難になりがちなアセンブリ品の処理法、数百ギガバイトのデータも処理可能な大規模データへの対応法などを開発することを目標とした。

## 3. 研究の方法

開発目標とする各要素技術(【】内項目)を特定し、それらを以下の方法にて実現した。

### 【計測条件の特定】

- ・複数素材からなるアセンブリ品をCT計測することで、計測条件を特定し、精度評価を行った。
- ・金属部品を含む計測物について、金属によるアーチファクトを最小とする計測時の姿勢を算出する手法を提案した。中型計測物について実験によりその効果を検証した。

### 【アセンブリ品のCTボリュームの画質向上】

- ・アセンブリ品を含む工業製品の素材として一般的な金属素材によりCTボリューム上に生じるメタルアーチファクト低減技術を開発した。また、手法の性能評価を行った。
- ・計測物の形状がCTボリュームよりも鮮明にとらえられるため、X線CTスキャンの一次データであるX線投影像を用い、これとCADモデルを組み合わせることとした。

### 【CADデータとCTデータ(投影像またはCTボリューム)の位置合わせ】

- ・大域的最適化によるアルゴリズムの開発と、実スキャンデータを用いた実験による検証を行った。さらに、CADデータとCTデータ上の形状に差異がある場合についての有効性を確認した。
- ・部品の局所的変形にも対応可能とする手法の開発を行った。CADデータとCTデータ上の形状は異なるため、両者を比較するような通常の誤差の評価ができない。そのため、独自の評価手法を開発した。

### 【高精度形状抽出法】

- ・従来用いられてきたCTボリューム上の表面位置決定式を拡張した。その効果を検証するため、抽出表面の精度を従来法によるものと比較した。
- ・計測中に変形・変位する計測物に対し、計測中の動きに頑健にCT再構成するアルゴリズムの開発と検証を行った。
- ・板金等のシート状素材から成る物体に対し、CTボリューム上のセグメンテーション法を開発した。

### 【アセンブリ品への対応】

- ・形状データとして最も多く用いられる表面メッシュを入力とした。アセンブリ品の部品群2つ(部品の位置・姿勢は異なるとする)に対し、各部品の形状特徴抽出と、部品群間での部品対の決定法を開発した。CAD由来表面メッシュ・CTボリュームから抽出した表面メッシュなど、異なる特徴をもった複数のデータに対し、有効性を検証した。
- ・アセンブリ品の稼働部品の検査を可能にするために、可動部の位置を決定する手法を開発した。

## 4. 研究成果

上記3.の研究を通じ、英文論文誌への採択3件、国際学会発表7件、国内学会発表6件の成果を得た。

### (1) メタルアーチファクト減少法

・異なる条件下において同一計測物を複数回計測し得られたスキャンデータを組み合わせることにより、メタルアーチファクトを低減する手法を開発した。本手法は国際会議 (ICPE2020) で発表し、賞を授与された。

・金属によるアーチファクトを最小とする計測時の姿勢を算出する手法を提案・中型計測物について実験により検証し、成果を英文論文1編により発表した (図1)。

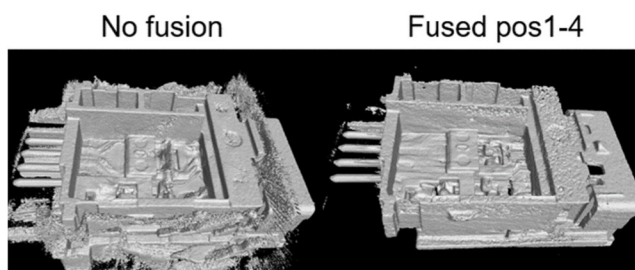


図1 CT ボリュームから抽出した表面の比較。左：アーチファクト低減なし、右：提案法 [Tan 2022]

#### [英文雑誌論文]

・ Yingqi Tan, Yutaka Ohtake, Hiromasa Suzuki, Scan angle selection and volume fusion for reducing metal artifacts by multiple X-ray CT scanning, Precision Engineering, Vol. 74, pp. 384-395, Mar. 2022.

#### [国際学会発表]

・ Yingqi Tan, Yutaka Ohtake, Hiromasa Suzuki, Scanning Angle Selection Methods for Multiple X-ray Computed Tomography to Reduce Metal Artifacts, In Proceedings of the 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE2020), Japan, Nov. 2020.

【Young Researcher Award 受賞】

### (2) 高精度表面抽出法

CT 値の2階微分値を用いた新たな表面定義を提案し、従来法を上回る精度で表面抽出可能なことを実験により確認した。従来法では図2 (a), (b) のように円筒形状からのずれやボクセルによる離散アーチファクトが生じていたが、それらが軽減されたことが分かる。

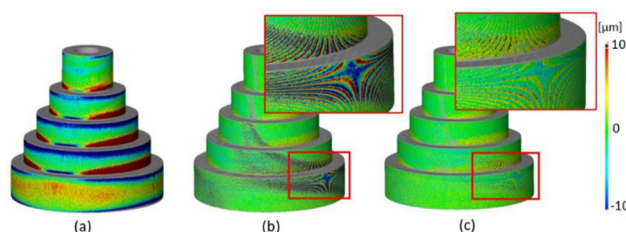


図2 抽出表面のベストフィット円筒からの偏差カラーマップ。左から、等値面、勾配ノルム極大曲面、提案法 [Ota 2022]

#### [国際学会発表]

・ Tomoya Ota, Yukie Nagai, Yutaka Ohtake, Akira Monkawa, Yuka Miura, Tomoko Gessei, High-accuracy Surface Extraction Using High-order Differentiation of X-ray CT value, In Proceedings of the 11th Conference on Industrial Computed Tomography, online, Feb. 2022 (poster with presentation).

#### [国内学会発表]

・ 太田智也, 長井超慧, 大竹豊, 紋川亮, 三浦由佳, 月精智子, X線CT値の勾配ノルムの勾配方向微分値による高精度表面抽出法の提案, 2021年度精密工学会秋季大会, オンライン, 9月2021年.

### (3) CADデータとCTデータ (投影像またはCTボリューム) の位置合わせ

・ CADデータ・CTボリューム上の計測物表面上の頂点座標と法線・勾配ベクトル (局所的な幾何特徴量) を用い、設計データ (CADデータ) と現物 (CTデータ) の差異にも適用できるように、大域的最適化を行った。実スキャンデータを用いた実験により、CADデータとCTデータ上の形状に差異がある場合にも良好に位置合わせできることが確認された。

#### [国際学会発表]

・ Mahiro Endo and Yukie Nagai, High accuracy alignment of X-ray CT volume with CAD

data using feature vectors, In Proceedings of the 9th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2022), OR-05-0288, Singapore, Nov. 2022.

[国内学会発表]

- ・遠藤 真拓, 長井 超慧, 現物の X 線 CT スキャンデータと CAD データの幾何情報による高精度位置合わせ, 日本機械学会第 31 回設計工学・システム部門講演会, オンライン, 9 月 2021 年.
- ・遠藤 真拓, 長井 超慧, X 線 CT スキャンデータと CAD データの特徴量ベクトルを用いた高精度位置合わせ, 精密工学会春季大会, E98, 東京, 3 月 2023 年.

#### (4) 部品群の対応付け

アセンブリ品の部品群に対し、異なる位置・姿勢であっても同一の部品を対応付ける手法を構築した(図3)。部品ごとに局所的に形状特徴を評価し、その結果を用いた大域的最適化により部品の対応付けを行う。

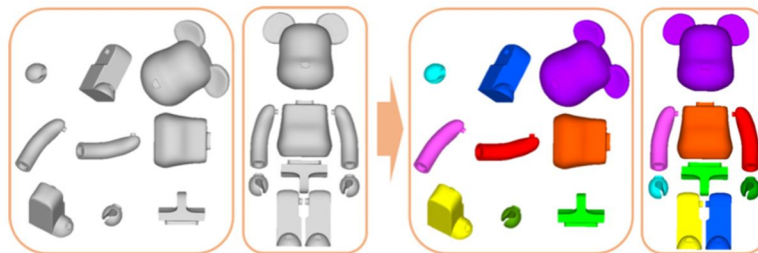


図3 部品の対応付けの結果例。入力(左)に対する対応付けの結果を色で示す(右)  
[Shibuya 2023]

[英文雑誌論文]

・Hayata Shibuya and Yukie Nagai, Automatic Parts Correspondence Determination for Transforming Assemblies via Local and Global Geometry Processing, International Journal of Automation Technology, Vol. 17, No. 2, pp. 176-182, 2023.

[国際学会発表]

・Hayata Shibuya and Yukie Nagai, Many-to-many Matching based on Geometric Descriptors for Designing Mutually Deformable Assemblies, In Proceedings of the 19th International Conference on Precision Engineering (ICPE2022), C012, Japan, Nov. 2022.

#### (5) アセンブリ品の形状検査手法

X 線 CT スキャンは非破壊で内部まで 3 次元形状取得できる唯一の手法であるが、金属等に由来するアーチファクトにより、正しい形状が抽出できないことがある。そこで、アーチファクトの影響が少ない投影像を用い、CAD データと投影像を位置合わせすることで形状検査する新たな手法を開発した(図4)。

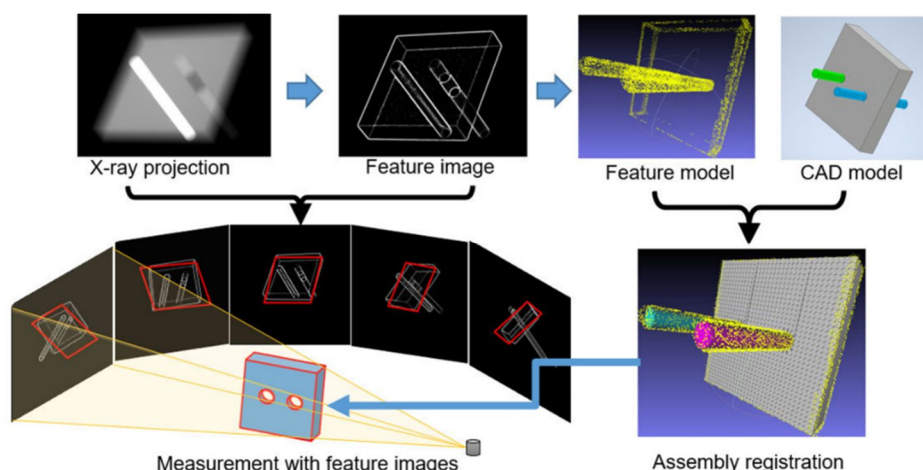


図4 CAD データと投影像の位置合わせの概要 [Tan 2022]

[国際学会発表]

・Yingqi Tan, Yutaka Ohtake, Tatsuya Yatagawa, Hiromasa Suzuki, Matching of CAD model projections and X-ray projection images for shape inspection of metal assemblies,

In Proceedings of the 11th Conference on Industrial Computed Tomography, online, Feb. 2022.

[国内学会発表]

・譚 英麒, 大竹 豊, 鈴木 宏正, X 線投影像と CAD を利用したアセンブリ品の形状検査手法, 2021 年度精密工学会秋季大会, 9 月 2021 年. 【Best Presentation 賞受賞】

#### ( 6 ) 大型アセンブリ品のセグメンテーション法

薄板からなる計測物を対象とした。CT 値の変化から各点における板厚を推定する。板材の中心面を抽出し、厚みに応じて中心面をセグメンテーションする。

[国際学会発表]

・ Yutaka Ohtake, Tatsuya Yatagawa, Hiromawa Suzuki, Satoru Kubo, Sou Suzuki, Thickness-Driven Sheet Metal Segmentation of CT-Scanned Body-in-White, In Proceedings of the 12th Conference on Industrial Computed Tomography, Germany, Feb. 2023.

#### ( 7 ) 可動部分の検査手法

CAD データを初期状態に位置合わせし、アセンブリの拘束条件に従って移動させることで、仮想的に任意時刻の投影像を生成することができる。これを、実際の CT 計測で得た投影像と重ね合わせることで可動部の位置を決定する。

[英文雑誌論文]

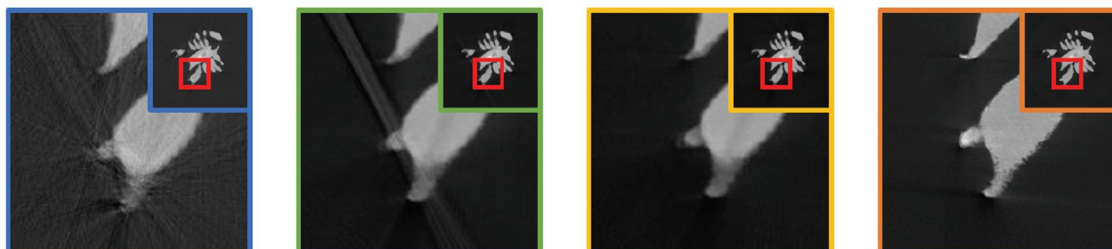
・ Yingqi Tan, Yutaka Ohtake and Hiromasa Suzuki, Feature shape inspection of metal parts by matching X-ray projection images with CAD model projections, Precision Engineering, Vol. 81, pp. 221-231, May 2023.

[国内学会発表]

・譚 英麒, 大竹 豊, 鈴木 宏正, X 線透過像と CAD を用いたアセンブリ品の可動部品の検査, 2023 年度精密工学会春季大会, E91, 3 月 2023 年.

#### ( 8 ) 高画質 4 次元 CT データの生成法

変形を伴う計測物の動的観察を可能にする 4 次元 CT スキャンで得られたデータに対し、変形に伴うブレを軽減し、高画質化する手法を開発した。Optical flow を用いて各点における変形の有無を推定し、補間により任意時刻における投影像を生成することで、任意時刻の高画質な CT ボリュームの生成が可能である ( 図 5 )。



(a) Lucas-Kanade 法 (b) Horn-Shunck 法 (c) 提案手法 (d) リファレンス

図 5 4 次元 CT ボリュームの断面の比較。既存の補間法 (a), (b) でみられるアーチファクトが提案法 (c) では解消されている。(d) は正解画像 [小宮 2022]

[国際学会発表]

・ Tomoki Komiya, Yukie Nagai, Yutaka Ohtake, Akira Monkawa, Yuka Miura and Tomoko Gessei, Projection Image Interpolation for 4DCT Data using Optical Flow, In Proceedings of the 11th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT 2022), online, Feb. 2021 (poster).

[国内学会発表]

・小宮友希, 長井超慧, 大竹豊, 紋川亮, 三浦由佳, 月精智子, 4 次元 X 線 CT スキャンデータの勾配ベクトルを用いた投影像補間, 精密工学会春季大会, オンライン, 3 月 2022 年.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yingqi Tan, Yutaka Ohtake, Hiromasa Suzuki	4. 巻 74
2. 論文標題 Scan angle selection and volume fusion for reducing metal artifacts by multiple X-ray CT scanning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 384, 395
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.precisioneng.2021.07.020	査読の有無 有
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 Tan Yingqi, Ohtake Yutaka, Yatagawa Tatsuya, Suzuki Hiromasa	4. 巻 81
2. 論文標題 Feature shape inspection of metal parts by matching X-ray projection images with CAD model projections	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 221, 231
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.precisioneng.2023.01.003	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 -

1. 著者名 Shibuya Hayata, Nagai Yukie	4. 巻 17
2. 論文標題 Automatic Parts Correspondence Determination for Transforming Assemblies via Local and Global Geometry Processing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 176, 182
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2023.p0176	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13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 小宮友希, 長井超慧, 大竹豊, 紋川亮, 三浦由佳, 月精智子
2. 発表標題 4次元X線CTスキャンデータの勾配ベクトルを用いた投影像補間
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤 真拓, 長井 超慧
2. 発表標題 現物のX線CTスキャンデータとCADデータの幾何情報による高精度位置合わせ
3. 学会等名 第31回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoya Ota, Yukie Nagai, Yutaka Ohtake, Akira Monkawa, Yuka Miura, Tomoko Gessei
2. 発表標題 High-accuracy Surface Extraction Using High-order Differentiation of X-ray CT value
3. 学会等名 11th Conference on Industrial Computed Tomography (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 太田智也, 長井超慧, 大竹豊, 紋川亮, 三浦由佳, 月精智子
2. 発表標題 X線CT値の勾配ノルムの勾配方向微分値による高精度表面抽出法の提案
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoki Komiya, Yukie Nagai, Yutaka Ohtake, Akira Monkawa, Yuka Miura and Tomoko Gessei
2. 発表標題 Projection Image Interpolation for 4DCT Data using Optical Flow
3. 学会等名 11th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yingqi Tan, Yutaka Ohtake, Tatsuya Yatagawa, Hiromasa Suzuki
2. 発表標題 Matching of CAD model projections and X-ray projection images for shape inspection of metal assemblies
3. 学会等名 11th Conference on Industrial Computed Tomography (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 譚英麒, 大竹豊, 鈴木宏正, 谷田川達也
2. 発表標題 X線投影像とCADを利用したアセンブリ品の形状検査手法
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yingqi Tan, Yutaka Ohtake, Hiromasa Suzuki
2. 発表標題 Scanning Angle Selection Methods for Multiple X-ray Computed Tomography to Reduce Metal Artifacts
3. 学会等名 The 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mahiro Endo and Yukie Nagai
2. 発表標題 High accuracy alignment of X-ray CT volume with CAD data using feature vectors
3. 学会等名 the 9th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 遠藤 真拓, 長井 超慧
2. 発表標題 X線CTスキャンデータとCADデータの特徴量ベクトルを用いた高精度位置合わせ
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hayata Shibuya and Yukie Nagai
2. 発表標題 Many-to-many Matching based on Geometric Descriptors for Designing Mutually Deformable Assemblies
3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering (ICPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Ohtake, Tatsuya Yatagawa, Hiromawa Suzuki, Satoru Kubo, Sou Suzuki
2. 発表標題 Thickness-Driven Sheet Metal Segmentation of CT-Scanned Body-in-White
3. 学会等名 the 12th Conference on Industrial Computed Tomography (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 譚 英麒, 大竹 豊, 鈴木 宏正
2. 発表標題 X線透過像とCADを用いたアセンブリ品の可動部品の検査
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2023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
研究 分担 者	大竹 豊  (Ohtake Yutaka)  (50425617)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授    (12601)	

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