

令和 6 年 4 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K15804

研究課題名（和文）即時適応放射線治療を目指した深層学習活用CBCT再構成法の開発

研究課題名（英文）Development of a Deep Learning-based extending the effective field of view in cone-beam CT

研究代表者

平島 英明 (Hideaki, Hirashima)

京都大学・医学研究科・特定助教

研究者番号：10848229

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：治療日毎の体内臓器変化に対応し治療計画を変更する即時適応放射線治療（即時ART）は、日々変化する腫瘍や危険臓器の状態を考慮した線量分布を投与可能である。しかし、汎用的な治療装置では腫瘍や危険臓器の画像取得時に体輪郭欠損や画質劣化といった大きな課題があり、即時ARTを実施する際の輪郭描出や治療計画の障壁となっている。そこで本研究では、汎用的な治療装置を用いて体輪郭欠損 cone-beamCT (CBCT) の体輪郭拡張を目指した画像再構成技術を開発することを目的とする。深層学習技術の一つである生成AIを基盤技術に用い、画像を直接用いた手法やサイノグラムに変換した手法を検討し有用性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、pCTを用いた深層学習に基づくサイノグラム補完を行うことで、CBCTの有効視野（FOV）拡張を目指した。サイノグラムを補完するモデルが、画像自体を補完するモデルよりも最大値、中央値、最小値の全てにおいてMAEとRMSEの値が小さく、SSIMの値が大きかった。サイノグラムを補完するモデルが画像自体を補完するモデルよりもFOVを拡張できていた理由は、サイノグラムの情報の連続性が深層学習の学習や予測において有利に働いたからだと考えられる。本研究結果により、狭いFOVを有するCBCTを利用した正確な線量分布の計算が可能になることが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study examines the application of cone-beam CT (CBCT) in radiation therapy, which contains up-to-date information about the patient's body and can be used to recalculate dose distributions for treatment planning and monitoring. However, the limited field of view (FOV) of CBCT results in a lack of body contours, which makes accurate dose calculation difficult. The aim of this study was to extend the CBCT FOV using deep learning to complete sinograms.

Three models were created using the pix2pix deep-learning algorithm: a sinogram-based model and a CT-based model, each using different image pairings. This study indicates that deep learning-based sinogram completion using CT-based models is a viable method for extending the FOV in CBCT with missing body contours.

研究分野：放射線治療

キーワード：放射線治療 医学物理 AI CBCT 適応放射線治療

## 1. 研究開始当初の背景

高精度放射線治療は、治療前の治療計画 CT で腫瘍や危険臓器を描出し、治療計画を立案後、1 か月以上にわたり連日治療を行うことが一般的である。そのため、治療期間中に体重減少や治療の効果による腫瘍の縮小が起きる場合があるため、最善な高精度放射線治療を提供するために、照射範囲などを再度検討し、治療計画を変更する事を適応放射線治療 (Adaptive Radiation Therapy ; ART) と呼ぶ。治療日の解剖学的構造を反映した治療計画が可能である、即時 ART の実用化が求められている。しかし、即時 ART を実施するためには、治療日の画像 (体輪郭や画質) が適切に取得されていることに加え、実臨床で実施する作業時間内で完了させる必要がある。具体的には、通常の放射線治療は 15 分程度で照射完了するため、即時 ART においても 15 分程度で全作業工程を完了させることが望まれる。

Cone-beam CT (CBCT) は、治療日間の腫瘍位置変動による誤差を最小限に抑制するために、一般的に撮像視野を狭める手法 (Spotlight CBCT 法: 体輪郭欠損 CBCT) を利用する。Spotlight CBCT は、通常 360 度方向から kV-X 線を照射し CT 再構成する手法と異なり、180 度 + $\alpha$  と角度を限定し撮像することで、治療日間の腫瘍位置変動による誤差を最小限にするための必要な情報 (腫瘍周囲の画像) を取得する。Spotlight CBCT には、撮像時間と被曝線量を低減させる利点があるが、体輪郭が欠損する欠点があり、撮像アーチファクトによる画質低下が確認される。この欠点から、線量計算時に水等価深や電子密度を正確に取得することが困難となる。即時 ART を見据えた場合、体輪郭の欠損がなく治療計画 CT 相当の電子密度に高速で変換する技術が必要である。

従来、アーチファクト低減の画像変換技術は研究されていたが、フィルタを演算し画像処理を行う古典的な手法では撮像アーチファクト低減は限定的であり、かつ、体輪郭欠損に対するアプローチは不可能であった。そのため、画像変換技術として深層学習が注目されている。深層学習は自動的に画像特徴量を抽出可能である特徴を有し、アーチファクトや体輪郭欠損を人間の目では測れない視点から認識し、画像変換することが期待される。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、汎用的な治療装置を用いた即時 ART を実現するために、深層学習技術を用いて、体輪郭欠損 CBCT の画質改善、及び、体輪郭復元のための画像再構成技術を開発することである。

## 3. 研究の方法

### (1) 体輪郭欠損 CBCT の画質改善

本研究では、計画用 CT(pCT) から蠕動運動に起因するアーチファクトを発生させた疑似 CBCT(sCBCT) を生成し、pCT-sCBCT をペア訓練データとした深層学習による CBCT アーチファクト低減 (AR) モデルを開発した。

膵臓癌 54 症例の pCT、CBCT データを使用した。pCT から撮影角度が 200° の回転撮影を想定した投影画像 (DRR) を得た。その際、様々な大きさや周期等の蠕動運動を pCT 上に疑似的に発生させた (Generative Motion Artifact Generation モデル)。そこで得られた DRR からアーチファクト付き sCBCT を三次元再構成した。16380 スライスの pCT-sCBCT をペア訓練データとして、pix2pix モデルを訓練した。モデルのバリデーションは、訓練データとは異なる 1300 スライスの AR 処理後の sCBCT と pCT の平均絶対誤差 (MAE) を算出することで行った。AR モデルが実臨床で得られた CBCT アーチファクトに対応できるかを評価するために、新たな 1300 スライスの CBCT を用いて、AR 処理前後の構造類似性 (SSIM) と MAE を算出した。

### (2) 体輪郭欠損 CBCT の体輪郭復元

本研究では、体輪郭欠損 CBCT に対して、深層学習を用いて体輪郭を復元する方法を開発した。腹部疾患に対して放射線治療を施行した 80 症例分の pCT と 3 症例分の CBCT を対象とした。3 名の CBCT はそれぞれ 5 回、5 回、10 回撮影されており、その 20 回全てを使用した。使用した pCT データと CBCT データは、全て 512×512 ピクセル、70 スライスとした。pCT データは FOV 復元モデル構築と評価のため、CBCT データはモデル評価のために使用した。

### ① 深層学習モデルの構築

敵対的生成ネットワーク (Generative Adversarial Network: GAN) の派生技術である pix2pix を用いた。80 名の pCT データを無作為に学習用 64 セットとテスト用 16 セットに分割した。3 つのモデル (Sinogram ベースモデル、CT ベースモデル、fCT ベースモデル) を構築し全て学習用セットで pix2pix を Pytorch の枠組みを使用し、最大 40 エポックまで学習した。各モデルのテスト用セットを用いて、学習モデルの精度を評価した。その後、実際の CBCT データにも適応可能か検討した。評価では、pCT 上の体輪郭が外接する直方体内における、横断面の中央から直径 26 cm 円外の体輪郭部分だけを対象とし、MAE と二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error: RMSE) と SSIM で評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 体輪郭欠損 CBCT の画質改善

図 1 に疑似アーチファクト生成モデルの概要およびアーチファクト低減モデルの定量評価を示す。蠕動運動を疑似アーチファクト生成モデルによる疑似 CT は定性的に CBCT と同等であった。AR 処理前の SSIM および MAE の平均値±標準偏差は  $0.409 \pm 0.076$  および  $78.1 \pm 20.4$  [HU] であった。pix2pix モデルにおける SSIM および MAE は  $0.431 \pm 0.060$  および  $64.1 \pm 14.8$  [HU] に有意 (t 検定:  $p < 0.05$ ) に改善した。

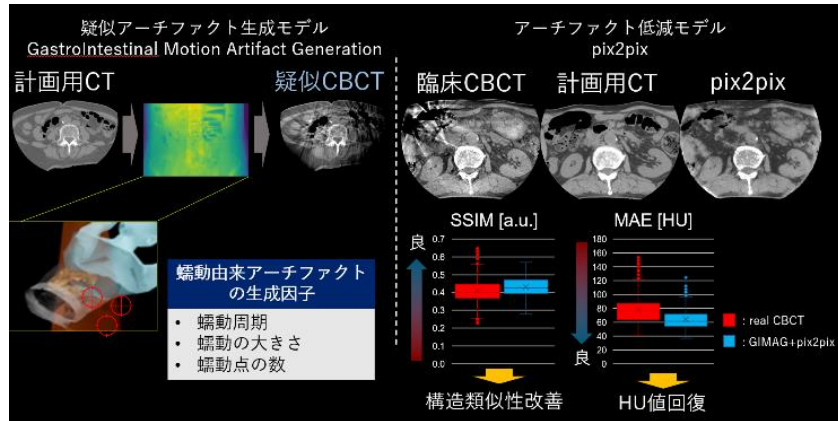


図 1. 疑似アーチファクト生成モデルの概要 (左) , および, アーチファクト低減モデル (右) の結果.

##### (2) 体輪郭欠損 CBCT の体輪郭復元

各モデルの SSIM の平均値が最も高いエポック数において, テスト用セットを用いて得られた予測画像と正解画像から算出した. MAE, RMSE, SSIM の中央値は (Sinogram ベースモデル, CT ベースモデル, fCT ベースモデル) でそれぞれ (16.91, 48.11, 101.73) HU, (23.19, 29.57, 39.26) HU, (0.91, 0.83, 0.83) であった.

図 2 にテスト用セットで予測した画像と対応する正解画像, 及びこれらの差分画像から作成したヒートマップの横断面を示す. ヒートマップで確認すると CT, fCT ベースモデルは, 体輪郭部の HU 値の差異が Sinogram ベースモデルに比べ大きかった. Sinogram ベースモデルは, 特に患者特有の凹凸を含む体輪郭を予測できていた (図 2 青矢印), また, どのモデルでも予測する骨の位置がずれており, 他の臓器に比べて HU 値の乖離が大きくなった (図 2 赤矢印).

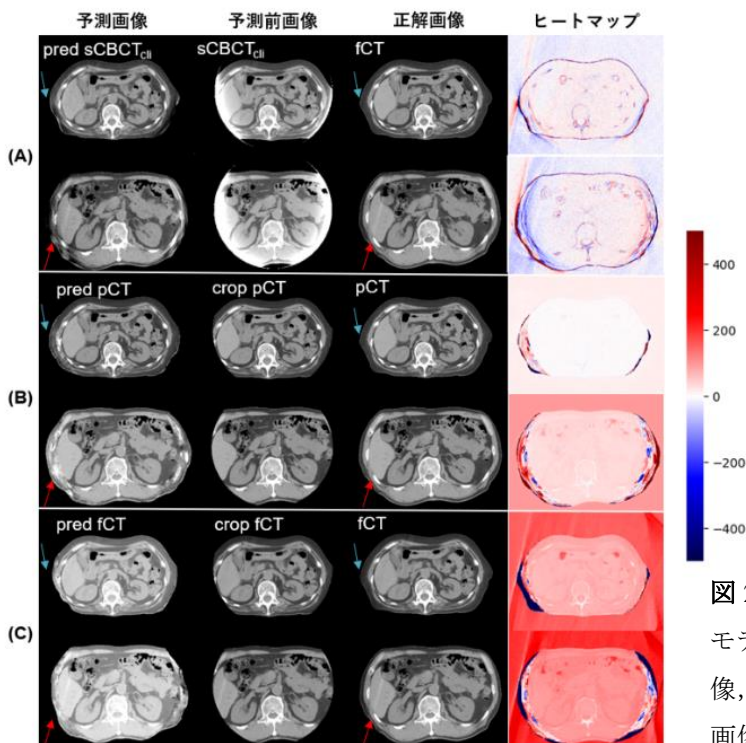


図 2. (A) Sinogram ベースモデル, (B) CT ベースモデル, (C) fCT ベースモデルにおける予測画像, 予測前画像 ((A) は FDK 後の画像), 正解画像, ヒートマップ (予測画像 - 正解画像).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Hirashima Hideaki, Nakamura Mitsuhiro, Nakamura Kiyonao, Matsuo Yukinori, Mizowaki Takashi	4. 巻 65
2. 論文標題 Dosimetric verification of four dose calculation algorithms for spine stereotactic body radiotherapy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Radiation Research	6. 最初と最後の頁 109 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jrr/rrad086	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 Hirashima Hideaki, Nakamura Mitsuhiro, Imanishi Keiho, Nakao Megumi, Mizowaki Takashi	4. 巻 e13912
2. 論文標題 Evaluation of generalization ability for deep learning based auto segmentation accuracy in limited field of view CBCT of male pelvic region	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Clinical Medical Physics	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/acm2.13912	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3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hirashima H, Nakamura M, Imanishi K, Nakao M, Mizowaki T.
2. 発表標題 Auto-Segmentation for Limited Field of View CBCT in Male Pelvic Region Using Deep Learning Method.
3. 学会等名 64th AAPM annual meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Arimoto K, Nakamura M, Hirashima H, Nakao M, Mizowaki T.
2. 発表標題 Restoration of Body Outside Field-Of-View On CT Images Using Cycle-Consistent Generative Adversarial Networks.
3. 学会等名 64th AAPM annual meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有本昂平, 中村光宏, 平島英明, 中尾恵, 吉村通央, 溝脇尚志
2. 発表標題 体輪郭欠損医用画像に対する深層学習による体輪郭復元法の開発
3. 学会等名 第36回高精度放射線外部照射部会学術大会
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
---------------------------	-----------------------	----

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