

令和1（2019）－2（2020）年度援助 研究課題報告書

提出： 2021年 10月 31日

日本医学物理学会 御中

1. 研究課題名

日本語	深層学習を用いた治療用 cone-beam CT 画像における画質の改善と被ばくの低減
英語	Improvement of Image Quality and Exposure Reduction on Cone-beam CT Images Using Deep Learning

2. 研究代表者

(ふりがな)	あだち はやと	JSMP 会員番号	003854
氏名	安達 勇人		
所属機関	金沢大学附属病院		
部署	放射線部		
役職	診療放射線技師	E-mail	ha.adachi.712@gmail.com
所在地	〒920-8641 石川県金沢市宝町 13-1		
電話	076-265-2000	FAX	076-243-4311

3. 研究組織(研究代表者以外の参加者氏名・所属機関) 行追加可

氏名	所属機関
武村 哲浩	金沢大学 医薬保健研究域 保健学系
吉田 耕太郎	金沢大学附属病院 放射線科
高松 繁行	金沢大学附属病院 放射線治療科
上田 伸一	金沢大学附属病院 放射線部
高田 忠徳	金沢大学附属病院 放射線部
能登 公也	金沢大学附属病院 放射線部
小島 礼慎	金沢大学附属病院 放射線部

(以下、行追加可 4, 5, 7は図表挿入可)

#### 4. 研究目的、背景

放射線治療分野では画像誘導下で位置照合を行い、高精度な治療を実施しており、位置照合に用いられる画像としては、直線加速器に付帯した Cone Beam Computed Tomography (CBCT) 装置で撮像される断層像が主流となっている。CBCT 画像では臓器位置の再現性を確認しており、臓器を同定するために十分なコントラストが必要となる。エリアカバレッジの狭いファンビームで撮影された治療計画 CT と比較して CBCT は、カバレッジが広いコーンビームによる画像であるため、多くの散乱線を含含有しており、組織間コントラストが低く、位置照合に支障が生じることがある。そのため、CBCT の画質を担保するために高い照射線量を必要とするが、放射線治療は毎日実施されるものであり、都度撮像される位置照合撮影による被ばくが問題となる。

被ばく線量の低減方法として、当院においてもこれまで照射線量を低減する方法の検討を行ってきたが、コントラストとのトレードオフ関係があるため、照射条件の検討では被ばく線量低減に限度があった。低線量でもコントラストを担保する方法として、1つの画素あたりの検出器の数を増やすことで、X 線の利用効率を上げる手法(図1)も存在するが、解像度の低下を伴うため、有効な手法ではない。

また、工藤らにより、照射線量以外の被ばく低減手法として sparse-view による再構成も報告されている。これは画像再構成に必要な投影データ(view)の数を少なくすることで、被ばくの総線量を低減する手法である。デジタルファントムを用いて、事前実験した結果を図2に示す。上段は全投影角度(1° ごと)を用いて再構成したものであり、中段は投影角度を 2° ごとに削減し、再構成したものである。拡大画像から分かる通り、疎な view による再構成画像はノイズの増加や輪郭情報の欠損を生じ、画質を劣化する。骨構造をランドマークとする位置照合においてこの劣化は無視できない。

近年の機械学習技術の発達により、人が規則として認識できない規則も訓練データが大量にあれば、予測できるようになってきており、学習の層が特に多い深層学習ではより高い精度の予測が期待されている。そこで本研究では、深層学習の中でも低分解能画像から高分解能画像への変換する超解像技術や連続した時系列データから次のデータを予測する Long Short Term Memory (LSTM) を応用して被ばく線量の低減を目的とする。

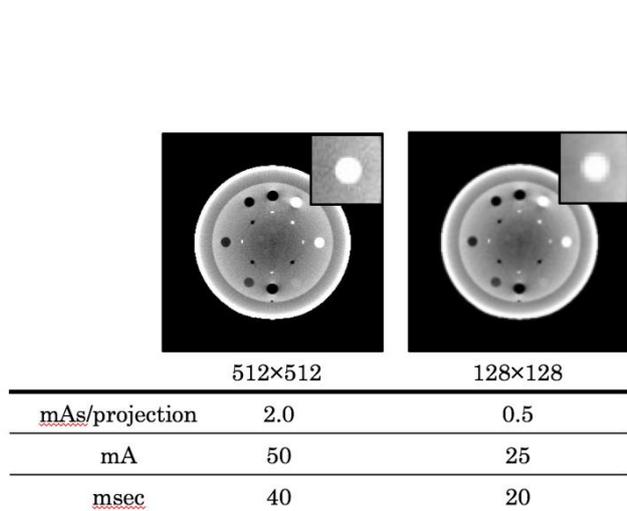


図1: 低解像度撮影の Catphan CT ファントム

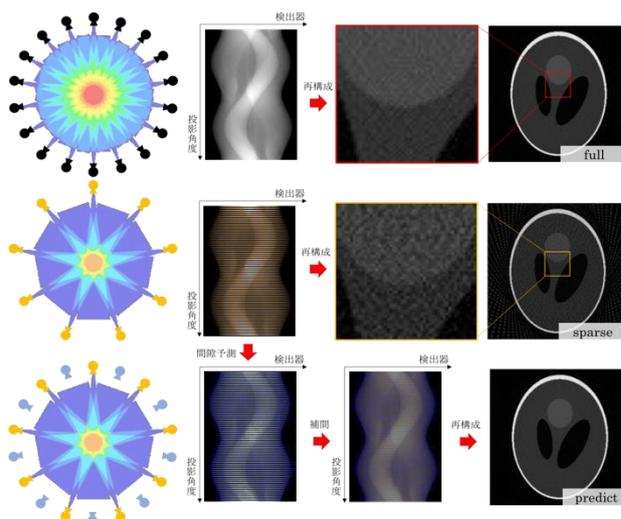


図2: デジタルファントムを用いた事前実験

## 5. 研究成果概要

### 5.1 超解像技術

#### 5.1.1 データ前処理・学習モデル

XVI(Elekta 社)にて撮影された前立腺治療患者における 30 人分の CBCT 画像の view データ(512×512)を Bicubic の平均化処理にて低解像度化することで低線量にて撮影した画像を擬似的に再現した。低解像度化した画像を入力データ、view データを教師データとして、それぞれのデータを 64×64 ピクセルに分割し、超解像モデルに学習させた。超解像モデルには Super-Resolution Convolutional Neural Network (SRCNN)を用いた。

#### 5.1.2 評価方法

学習済モデルに未学習の 10 症例を入力し、得られた画像を用いて XVI 内で CBCT 画像を再構成した。512×512 データにおける再構成画像を基準として、低解像度の度合い(64×64、128×128、256×256)を変化させて、治療計画 CT 画像との骨条件による自動位置照合の精度と視覚評価で評価した。また、疑似画像と同程度の画質を得られる撮影条件を Signal Difference to Noise Ratio (SDNR)により算出した。SDNR の 2 乗は線量に比例することが知られており、SDNR から同程度の画質を得ることができる撮影条件を予測することができる。SDNR は XVI の管球が真上に来るようにガントリーを 270 度にして、図 3 のようにファントムをシングルショットで撮影し、撮影された画像からコントラストと SNR を算出して、SDNR を求めた。予測された撮影条件における CBCT 撮影 1 回の被ばく線量を IMRT ファントムとファーマ型線量計で実測し、線量の低減率を評価した。測定点はファントム中心で、図 4 のように算出した。以下に再構成した画像(図 5)と位置照合精度(図 6)、SDNR とその撮影条件(図 7)、被ばく線量のグラフ(図 8)を示す。

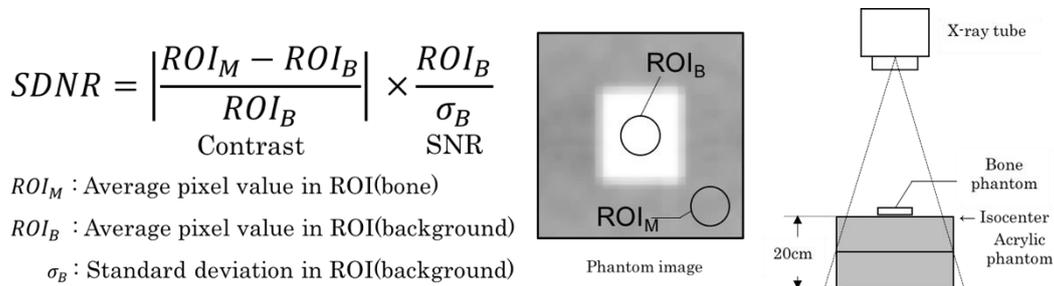
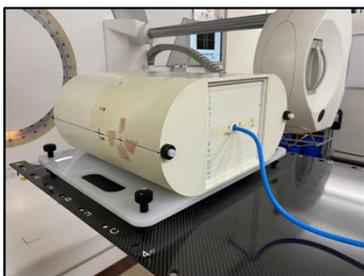


図3:SDNR の算出

$$D_W^{kV} = N_{D,W}^{60Co} \cdot M_{phant} \cdot k_{phant} \cdot k_{60Co}^{kV}$$



$D_W^{kV}$  : Water absorbed dose(mGy)  
 $N_{D,W}^{60Co}$  : Water absorption dose conversion coefficient(C/kg/C)  
 $M_{phant}$  : Electric charge in phantom(C)  
 $k_{phant}$  : Phantom correction factor  
 $D_{Co}^{kV}$  : Beam quality conversion factor( $k_Q$ )  
 $N_{D,W}^{60Co} = 0.05412$      $k_{phant} = 1.007$      $D_{Co}^{kV} = 0.88$

図4:被ばく線量の実測

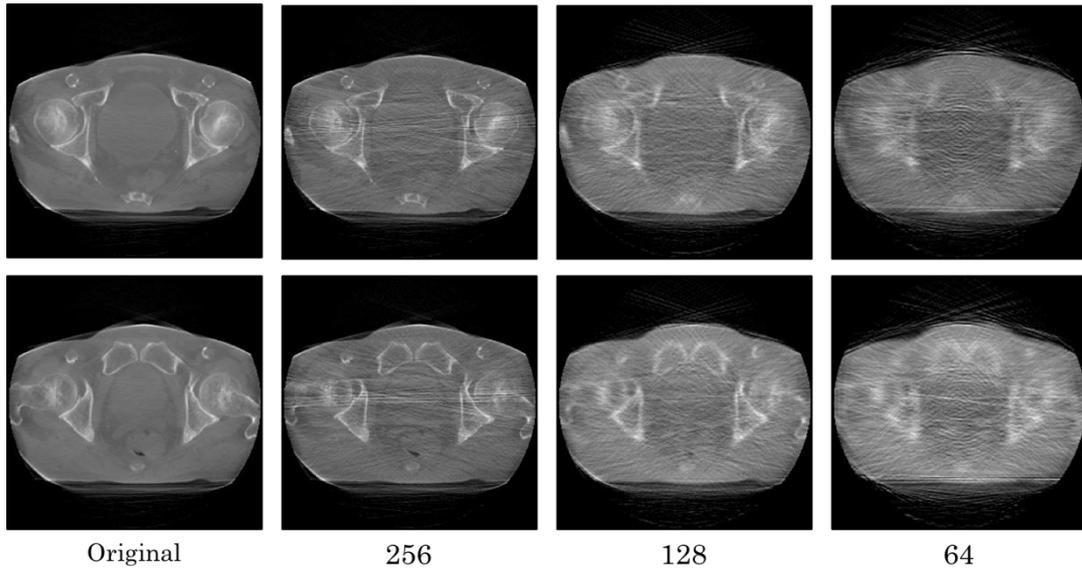


図5:超解像 view 再構成画像

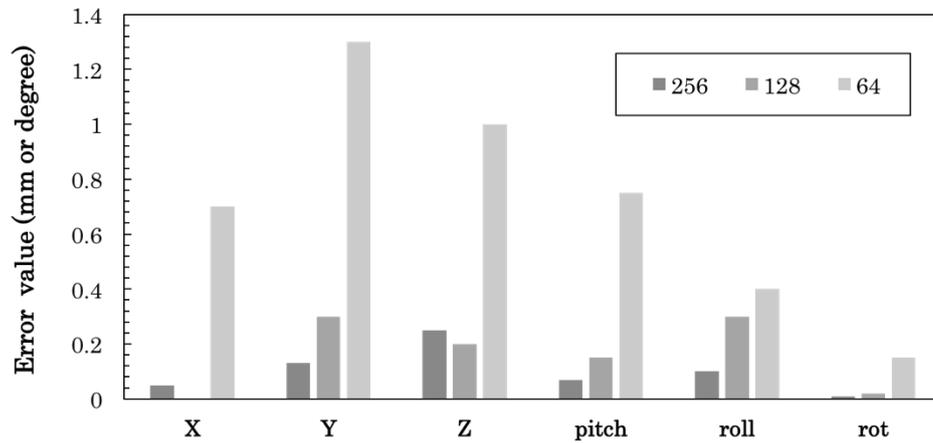
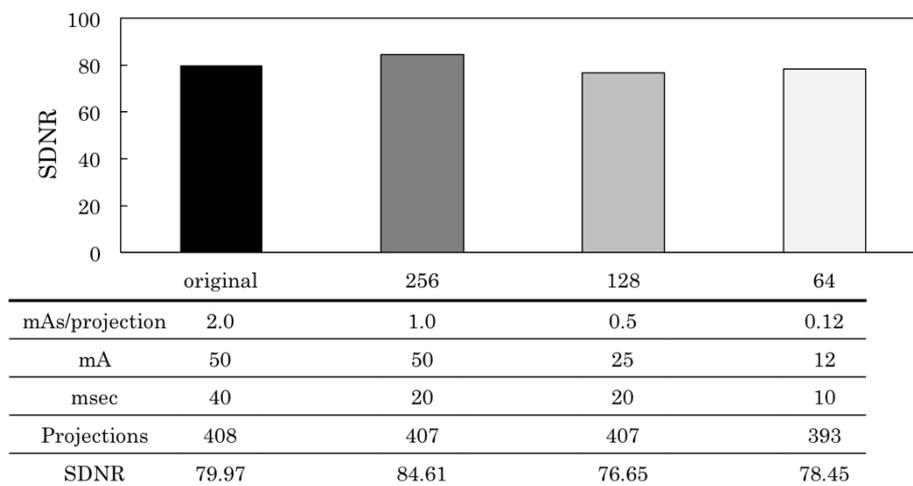


図6:超解像 view 再構成画像の位置照合精度



	original	256	128	64
mAs/projection	2.0	1.0	0.5	0.12
mA	50	50	25	12
msec	40	20	20	10
Projections	408	407	407	393
SDNR	79.97	84.61	76.65	78.45

図7:SDNR とその撮影条件

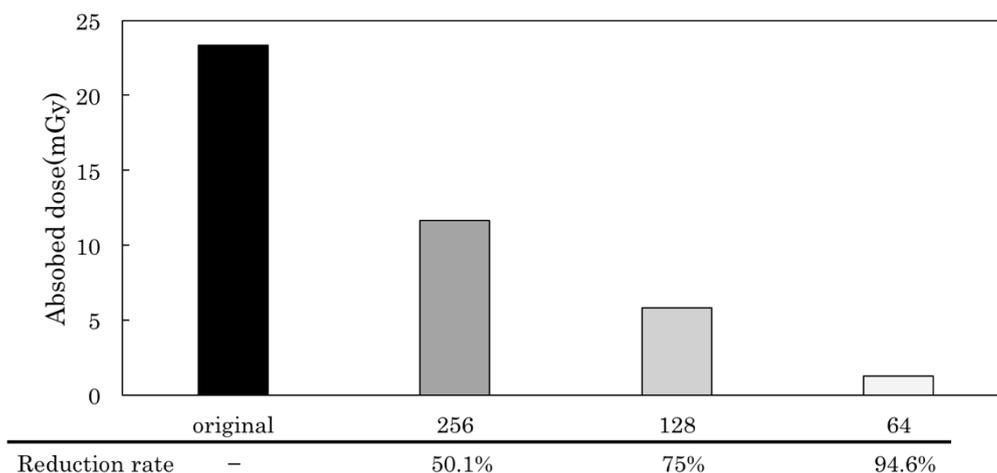


図8:被ばく線量

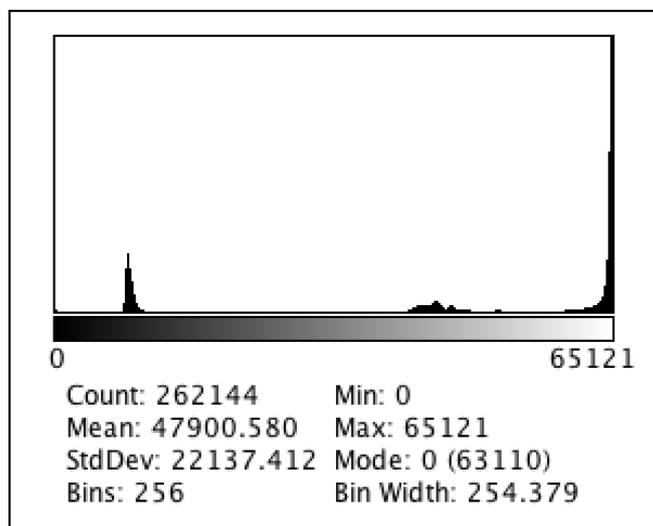


図9:512×512view1枚におけるヒストグラム

### 5.1.3 結果・考察

解像度が低下するにつれて再構成画像におけるストリークアーチファクトが増加したが、256×256 から再構成した画像であれば軟部組織の輪郭も視認することが可能であった。位置照合の定量評価でも、解像度が低下するにつれて誤差量の増加が確認されたが、組織輪郭の視認性の悪さに比べて128×128の誤差は小さかった。

模擬低解像度画像を再現するための撮影条件とその条件におけるSDNRでは、各条件ともSDNRが80前後であり、良好に同程度の画質を再現していることが確認された。線量の低減率については理論通り検出器の個数(1ピクセルあたりの面積)の根号に比例して、解像度が小さくなるほど大きくなった。最も位置照合の精度が高い256×256の撮像条件で低減率は約50%であった。

再構成画像のストリークアーチファクトは、図9のヒストグラムに示すようにviewデータのコントラストが非常に低く、超解像モデルの軽微な予測誤差でも大きな影響を与えてしまうことが原因と考えられる。ストリークアーチファクトにより軟部組織の視認性は悪くなるものの、骨構造に対する位置照合精度は非常に高く、本手法は骨盤部の骨構造に対する照射の位置照合において有用であると考えられる。

## 5.2 LSTM

### 5.2.1 データ前処理・学習モデル

XVI(Elekta 社)にて撮影された前立腺治療患者における 30 人分の CBCT 画像の view を、複数枚の連続した view を入力データ、入力データ直後1枚の view を教師データとして分割し、畳込み LSTM モデルに学習させた。

### 5.2.2 評価方法

学習済モデルに未学習の 3 症例を入力し、得られた画像を用いて XVI 内で CBCT 画像を再構成した。オリジナルデータにおける再構成画像を基準として、入力データに用いる枚数(2、4、9、14)を変化させて、治療計画 CT 画像との骨条件による自動位置照合の精度と視覚評価で評価した。また、各学習モデルにおける被ばく線量の低減率を全体の view の数に対する予測した view の数の割合で算出し、評価した。

### 5.2.3 結果・考察

以下に再構成した画像(図10)と位置照合精度(図11)、被ばく低減率のグラフ(図12)を示す。位置照合の定量評価では、どの学習モデルにおいても距離の誤差は無視できるほど小さく、角度の誤差も微小なものであった。入力画像2枚のモデルにおける誤差が最大であり、視覚評価でも入力画像2枚の再構成画像においてストリークアーチファクトや辺縁のトランケーションアーチファクトが顕著であったが、軟部組織の輪郭は視認可能であった。

被ばく線量の低減率は入力画像2枚のモデルにおいて最大であり、33.3%であった。また、誤差の最も少ない入力画像9枚のモデルでは 9.8%であった。

入力画像2枚のモデルで誤差が大きくなった要因として、ガントリー角度ごとのたわみが原因と考えられる。XVI では Flex map と呼ばれるガントリー角度ごとのオフセット関数で各 view の中心を揃えてから再構成を行っているため、各 view にはガントリー角度ごとのたわみが誤差として含有している。本手法における学習は Flex map を考慮しておらず、予測された画像は中心にズレが生じている可能性がある。入力画像2枚のモデルでは予測される画像の枚数が多くなるため、他のモデルに比べて誤差がより大きくなったものと考えられる。

骨構造に対する位置照合精度は非常に高く、また、軟部組織の視認性も良好であるため、本手法は前立腺を含む骨盤部に対する照射の位置照合において有用であると考えられる。

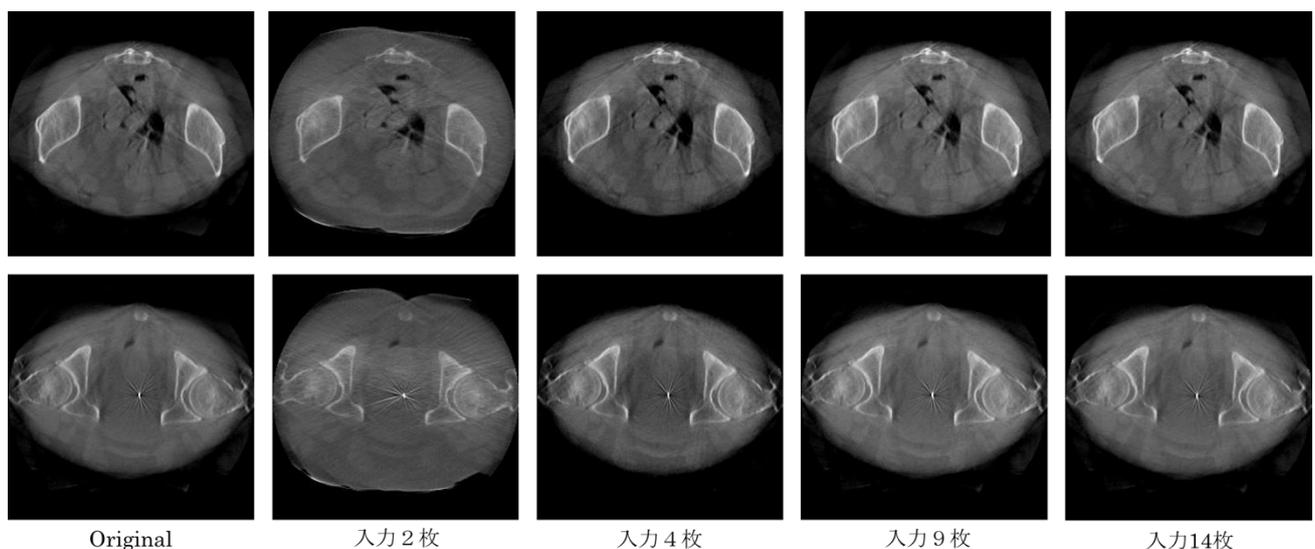


図10:畳込み LSTM view 再構成画像

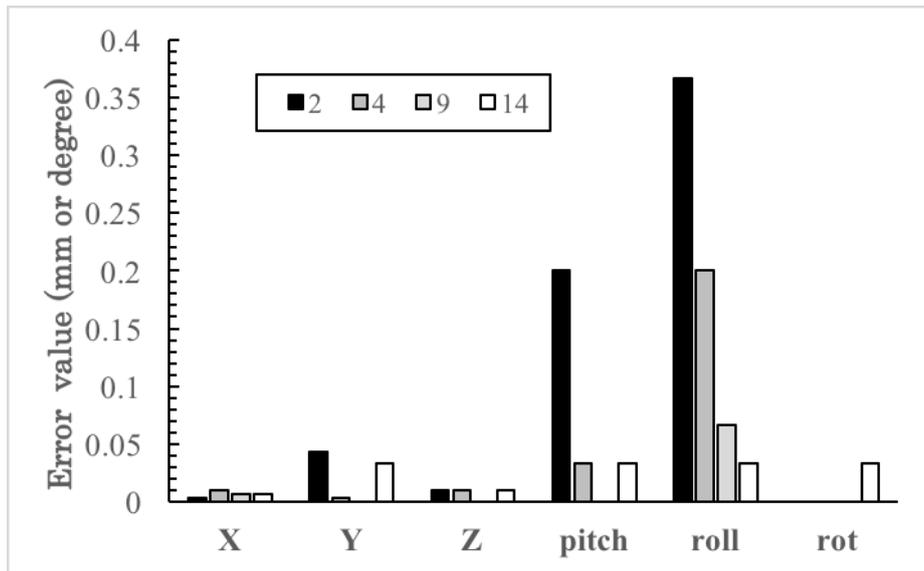


図11: 畳込み LSTM view 再構成画像の位置照合精度

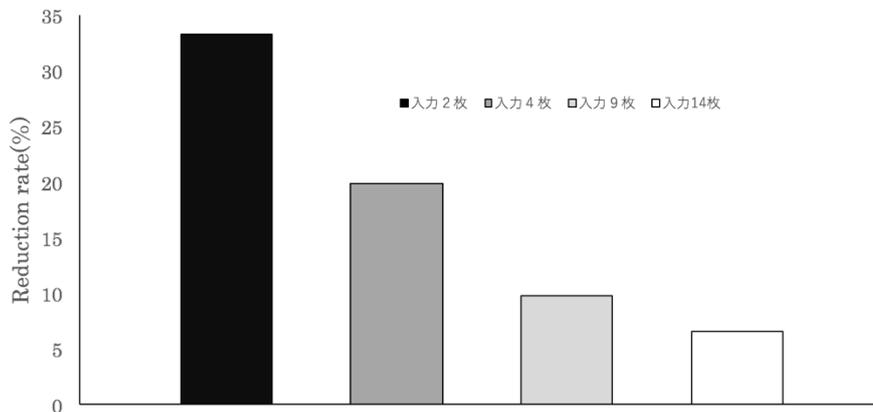


図12: 被ばく線量の低減率

## 6. 発表等(発表演題も含め詳細に記載 予定された発表も含む)

- ・日本放射線腫瘍学会第33回高精度放射線外部照射部会学術大会 口述→Web 開催 2020/5/8～5/14  
RAISR による超解像処理を用いた治療用 CBCT の被ばく低減技術の検討-投影画像ベースの初期的検討-
- ・The 119th Scientific Meeting of the Japan Society of Medical Physics 英口述→Web 開催 2020/5/15～6/14  
The dose reduction of CBCT for image registration based on projections using super-resolution

## 7. 今後の課題と展開

本研究の超解像モデルでは比較的層の浅い SRCNN を使用したため、予測精度が悪く、誤差を生じていたため、より精度の高い予測モデルを構築することが今後の課題である。畳込み LSTM モデルでは、予測精度は高いものの複数枚の view から1枚のみしか画像を生成していないため、被ばく線量の低減率が低い。そこで今後は、複数の view を予測するモデルや超解像モデルと組み合わせることでさらなる被ばく線量の低減を検討していきたいと考えている。また、学習モデルをそれぞれの患者の治療前半の view を用いて患者個人に対してファインチューニングすることで、後半の治療における予測精度を向上できる可能性がある。

## 8. 研究費の使途（内容と金額を照応するように記載 表貼付可）

令和1年度

Deep Learning 用 WS TEGARA 443300 円

ハードディスク バッファロー HD-GD8.0 45870 円

ハードディスク 東芝 HDTB420FK3AA-D 10830 円

計 500000 円

令和2年度

ネットワーク HDD Sybology Diskstation DS220j 94800 円

ヘッドフォン Apple AirPodsPro MWP22J/A 30580 円

トラックパッド Apple MagicTrackpad2 MRMF2J/A 15800 円

マウス Apple MagicMouse2 MRME2J/A 10800 円

ノートパソコン Apple MacBookProCorei7 32GB 2TB 316580 円

外付け SSD バッファロー SSD-PUT1.OU3-BKA 15380 円

キーボード ロジクール K860 16060 円

計 500000 円

## 9. 特記事項

事務手続きの不備等により、研究期間を令和3年10月末まで延長を実施していただきました。