

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K08093

研究課題名（和文）深層学習と逐次近似法を組み合わせたハイブリッド画像再構成法の開発

研究課題名（英文）Hybrid method for iterative CT reconstruction and deep learning

研究代表者

尾崎 翔 (Ozaki, Sho)

弘前大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60615326

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、逐次近似画像再構成法と深層学習を組み合わせた新しい画像再構成法を開発し、その手法を画像誘導放射線治療(IGRT)で用いられている位置照合用CTの画質改善に適用した。GeneratorとDiscriminatorを構成する深層ニューラルネットの事前学習のため、CycleGANを使ったMega-voltage CT(MVCT)の画質改善を行なった。構造保存を課すための制約条件を導入し、変形を抑制した画質改善が可能となった。さらに、逐次近似画像再構成法にGeneratorを組み込んだハイブリッド画像再構成法を開発してMVCTの画質改善を行い、改善された画像の画質は既存手法を上回った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MVCTやCone-beam CTなどの位置照合用CTは、高精度の画像誘導放射線治療を行う上で必須の装置である。しかしながら一般にこれらのCTの画質は低く、これは治療の精度に関わる問題である。本研究で開発した深層学習モデルやハイブリッド画像再構成法は、位置照合用CTの画質を大幅に改善した。この成果は、画像誘導放射線治療の際の位置照合の精度を高め、より高精度の放射線治療を実現できると期待される。

研究成果の概要（英文）：We develop a hybrid method of iterative CT reconstruction and deep learning. For the pre-training of generator and discriminator, we train CycleGAN model to improve Mega-voltage CT (MVCT). We introduce several loss functions, which impose structure preservation of the input image. Our deep learning model nicely improve image quality of MVCT with reducing the structure changes. Then, we incorporate the generator into the iterative CT reconstruction. This hybrid CT reconstruction method exceeds the previous reconstruction methods such as iterative reconstruction and deep image prior reconstruction in terms of SSIM and PSNR.

研究分野：医学物理学

キーワード：画像再構成 深層学習 CT 画像誘導放射線治療

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人工知能分野では、機械学習の一分野である深層学習が近年目覚ましい発展を遂げている。深層学習は、人間の脳の神経回路を模したニューラルネットを多層化させる事で、大量のデータからその背後に潜む知識を自発的に獲得する強力な手法である。現在、深層学習は人工知能分野のみならず様々な分野に応用されているが、その中でも医用画像への応用は深層学習が最も成功している領域の一つである。例えば医用画像の画質改善や、画像診断支援、MRI と CT など異なるモダリティ間の画像変換など幅広く応用・研究がなされている。深層学習による低画質画像から高画質画像への画質改善は学習型超解像技術と呼ばれ、両者の対応を学習する事で高画質画像の学習データから情報を補い、未知の低画質画像の高画質化を実現している。さらに最近では、深層学習を使って投影データから直接画像を生成する研究が行われており、医用画像研究の新たな潮流になりつつある。深層学習による超解像技術は、放射線科学分野においても画像診断や放射線治療などでその有用性が期待される。

放射線治療では、治療前の計画用 CT や治療時の位置照合用 CT など様々な場面で医用画像が用いられている。特に、位置照合用 CT は高精度の画像誘導放射線治療(image guided radiation therapy: IGRT)を行う上で不可欠な装置である。IGRT による位置照合の精度が高いほど、腫瘍の計画標的体積(PTV)マージンを減少させる事が可能となり、正常組織への線量を低減できる。しかしながら、従来の放射線治療装置に搭載された位置照合用の Cone-Beam CT (CBCT)や、Mega-Voltage CT (MVCT)は、治療計画用の kilo-Voltage CT(kVCT)に比べて大きく画質が劣る。これらの位置照合用 CT の画質改善は、より高精度の放射線治療を実現する上で重要な研究課題である。これまで CBCT や MVCT のように、散乱線などの影響で劣化した投影データや情報が不足した疎な投影データからの画像再構成に対して、逐次近似法がよく用いられて研究されてきた。逐次近似法は、光子の検出器における統計的な性質、CT の幾何学的な構造、隣接する画素間についての事前情報など、人間が持つ様々な知識を予めアルゴリズムに組み込む事が可能であり、これらの知識によって不足した情報を補いながら再構成画像の画質を向上させる手法である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで CT の画質改善に用いられてきた逐次近似画像再構成法と深層学習を組み合わせたハイブリッド画像再構成法を開発し、その手法を IGRT で用いられている位置照合様 CT の画質改善に応用することである。

3. 研究の方法

[1] データ収集と深層ニューラルネットの事前学習

東大病院で強度変調放射線治療を行なった頭頸部がんの 137 人の患者から 2745 枚の MVCT 画像を収集し、PlanCT は 98 人の患者から 2824 枚収集した。これらの画像データと、CycleGAN を用いて、Generator 及び Discriminator を構成する深層ニューラルネットの事前学習を行った。CycleGAN に含まれる Cycle consistency loss だけでは十分に画像の変形を抑制できないため、組織や体表の構造を保存するための独自の損失関数を複数導入した。また、ここでは、学習データ数と出力画像の画質との関係を調べ、適切な学習データ数を探った。得られた Generator と Discriminator を以下のハイブリッド画像再構成法に適用する。

[2] 深層ニューラルネットと逐次近似法によるハイブリッド画像再構成法の開発

逐次近似法は、逐次的に画像を更新するプロセスの中で、コスト関数や正則化項に人間の知識に基づく様々な事前情報を予め組み込む事が可能である。本研究では、多層化したニューラルネットを画像を生成する Generator として用い、出力画像から得られた投影データと、実際に観測された投影データとの差分をコスト関数にすることによって、画像再構成を行う。投影を計算する際のシステム行列には、CT のジオメトリに関する情報が含まれている。通常、逐次近似画像再構成法は C 言語や C++ のような高速計算可能な言語を使ってコードを作成するが、この研究では python ベースの Chainer と呼ばれる深層学習用のフレームワークを用いてソースコードを作成し、GPU で再構成計算ができるようにした。

[3] ハイブリッド画像再構成法の位置照合用 CT への応用

上記[2]で開発したハイブリッド画像再構成法を、放射線治療装置 Tomotherapy に内蔵された MVCT の画質改善に応用した。東大病院における放射線治療で撮影された MVCT の投影データを用いて画像再構成を行った。画質評価のための指標を使って、我々の提案手法と、既存の逐次近似法や Deep Image Prior を用いた CT 画像再構成法との画質の比較を定量的に行った。

4 . 研究成果

1) 深層学習を用いた MVCT の画質改善

まず、画像生成を行う Generator と最適化の正則化項として導入する Discriminator の事前学習のため、CycleGAN を用いた画質改善を行なった。東大病院で収集した 2745 枚(137 患者)の MVCT 画像と、2824 枚 (98 患者) の PlanCT 画像を使ってモデルの学習を行なった。CycleGAN は CT の画質改善でよく用いられるモデルだが、自然画像処理を主眼に開発されたモデルであり、改善前の画像の形を必ずしも尊重しない。そのため、体型や組織の構造をでっち上げたり、変形させる問題が指摘されており、臨床適用において大きな障害となっている。学習中に構造保存に対する適切な制約条件を課す事によって、構造を保存しつつ画質改善を行うことが可能となった。図.1 は、我々の深層学習モデルによる画質改善の例である。

MVCT 画像



深層学習を用いた高画質化

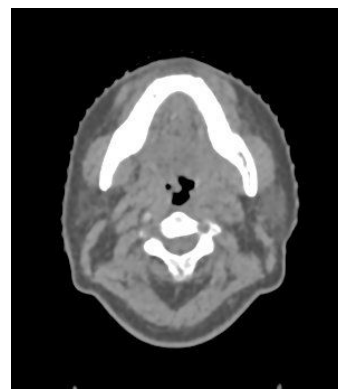


図.1 深層学習を用いた MVCT の画質改善

2) 深層学習を用いた画質改善における適切な学習画像数の検討

深層学習を用いた CT の画質改善において、学習で用いた画像データ数と出力画像の変形との関係を調べ、さらに学習時に導入した構造を保存するためのコスト関数によって少ないデータ数で学習できることを示した。結果を図.2 に示す。この図において、縦軸は画像の勾配の差 (difference in gradient: DIG) であり、組織や体表の変形度を表す。

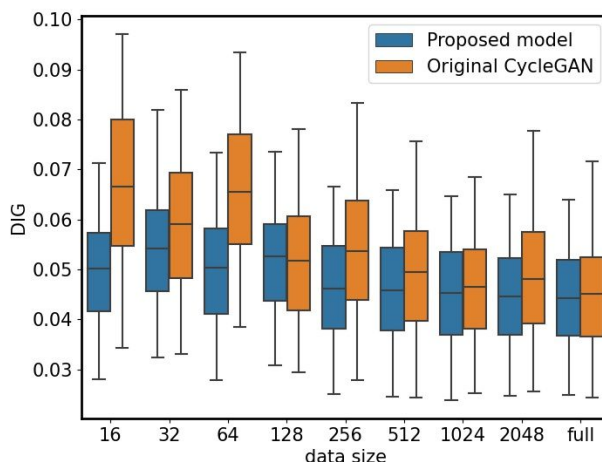


図.2 深層学習における適切な学習画像数の検討

一方横軸は、学習で用いた画像の枚数である。オリジナルの CycleGAN は

画像枚数が増えるに従って変形度も小さくなっていくが、我々のモデル(Proposed model)も同様の傾向を示しているものの 256 枚程度でほぼ変形度の低い値に収束した。低画質な MVCT から高画質な kVCT(PlanCT)への画像変換において、数百枚程度という従来の深層学習モデルよりも少ないデータ数で画質改善が可能である手法を提案し、かつ臨床的な有用性を示した。

3) 逐次近似画像再構成法と深層ニューラルネットのハイブリッド再構成

逐次近似法と深層ニューラルネットワークを組み合わせたハイブリッド画像再構成法の開発を行なった。最適化を安定化させるため、Generator の解像度を徐々に上げていきながら、最適化を行なった。この方法は ProgressiveGAN において高解像度の画像で学習する際に学習を安定化させる効果が示されている。提案手法の画質を評価するため、MVCT の投影データを 1/10 に間引いたデータで、1)逐次近似法、2)逐次近似法+Total variation, 3)Deep

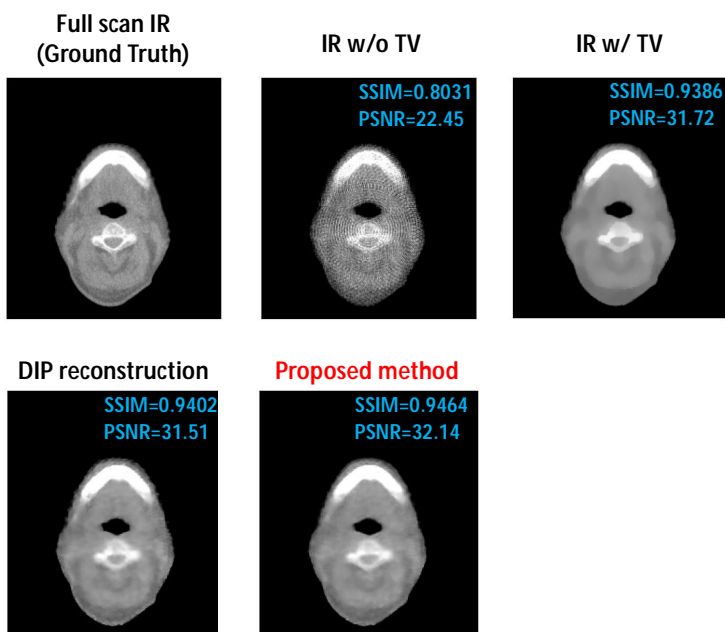


図.3 ハイブリッド画像再構成法と既存手法との画質比較

Image Prior を使った CT 再構成法、そして 4)提案手法で比較を行なった。異なる手法で得られた画像の比較は、間引く前の投影データで再構成した画像を正解とした SSIM や PSNR で定量的に行なった。結果を図.3 に示す。提案手法は SSIM 及び PSNR の値が共に既存手法を上回った。Total variation を含んだ逐次近似法は、ノイズを低減するものの、組織などのエッジがボケてしまう。これに対して提案手法は、コントラストを保ちつつ、ノイズやアーチファクトの低減を実現した。一方で、正則化項として、Discriminator を含んだ敵対的なロス関数を導入した場合、学習が安定しないという問題があった。今後この問題を解決し、ハイブリッド画像再構成法によ

るさらなる画質改善を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 S. Ozaki, S. Kaji, K. Nawa, T. Imae, A. Aoki, T. Nakamoto, T. Ohta, Y. Nozawa, H. Yamashita, A. Haga and K. Nakagawa	4. 巻 10
2. 論文標題 Training of deep cross-modality conversion models with a small data set, and their application in megavoltage CT to kilovoltage CT conversion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Medical Physics	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/mp.15626	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 S. Ozaki, S. Kaji, K. Nawa, T. Imae, A. Aoki, T. Nakamoto, T. Ohta, Y. Nozawa, A. Haga and K. Nakagawa	4. 巻 161
2. 論文標題 Training modality conversion models with small data and its application to MVCT to kVCT conversion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Radiotherapy and Oncology	6. 最初と最後の頁 586-587
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/S0167-8140(21)07034-1	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 S. Ozaki, A. Haga, E. Chao, C. Maurer, K. Nawa, T. Ohta, T. Nakamoto, Y. Nozawa, T. Magome, M. Nakano, K. Nakagawa	4. 巻 67
2. 論文標題 Fast Statistical Iterative Reconstruction for Mega-voltage Computed Tomography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Medical Investigation	6. 最初と最後の頁 30-39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2152/jmi.67.30	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 該当する
1. 著者名 S. Kida, S. Kaji, K. Nawa, T. Imae, T. Nakamoto, S. Ozaki, T. Ohta, Y. Nozawa, K. Nakagawa	4. 巻 47
2. 論文標題 Visual enhancement of Cone-beam CT by use of Cycle GAN	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Medical Physics	6. 最初と最後の頁 998-1010
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/mp.13963	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 2件）

1. 発表者名 Sho Ozaki
2. 発表標題 Training modality conversion models with small data and its application to MVCT to kVCT conversion
3. 学会等名 ESTRO 2021 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾崎翔
2. 発表標題 Denoising and Contrast Enhancement of MVCT Using Deep Learning-based Methods
3. 学会等名 第121回日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾崎翔
2. 発表標題 Denoising and Contrast Enhancement of MVCT Using Deep Learning-based methods
3. 学会等名 第121回日本医学物理学会学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sho Ozaki
2. 発表標題 Image quality enhancement of medical images by use of deep learning with a small amount of training data
3. 学会等名 Interdisciplinary Science Conference in Okinawa (ISCO 2023) -Physics and mathematics meet Medical Science- (国際学会)
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
---------	---------