

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：81404

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K15854

研究課題名（和文）デュアルエネルギーCTと深層学習を用いた非侵襲的腰椎ミエログラフィーの試み

研究課題名（英文）Non-invasive lumbar myelography using dual-energy CT and deep learning

研究代表者

篠原 祐樹（Shinohara, Yuki）

秋田県立循環器・脳脊髄センター（研究所）・放射線医学研究部・主任研究員

研究者番号：60462470

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：腰椎非造影デュアルエネルギーCT(DECT)における硬膜管と周辺構造のコントラストは、仮想単色X線画像よりも逐次近似再構成(ADMIRE5)併用混合画像で良好な結果となった。この混合画像より作成した非造影CTミエログラフィー(NC-CTM)における画像所見は術中所見と概ね一致しており、NC-CTMでは金属アーチファクト低減技術の併用により脊椎インプラントがある症例での金属アーチファクトによる画質劣化を抑えることができた。またNC-CTMを教師画像として3D U-Netによる学習と交差検証を行った結果、学習済み3D U-Netモデルより生成されるNC-CTMは教師画像と高い類似度を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では非造影DECTと深層学習による腰椎硬膜管/神経根画像(NC-CTM)作成の可能性を示した。腰椎低侵襲除圧術の術前画像作成にはMRMとCTの両者を用いることが多いが、MRI検査の長い撮像時間や体内金属・閉所恐怖症等による撮影不可、MRMとCTとの画像融合時の位置ずれなどの課題がある。造影剤を用いずに通常の腰椎CTとほぼ同等の被曝線量で、かつ一回の短時間DECT撮影でNC-CTMを作成できれば、患者に与えるリスクや負担も減らすことができる。また深層学習の応用によりNC-CTMを自動生成する技術が発展すれば、作成者による完成画像の精度の違い、即ち再現性の問題の解決にも繋がる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to create lumbar spine surgery-assisted image from non-contrast dual-energy CT (DECT). In virtual monochromatic imaging (Mono+, Siemens), the best contrast between dural canal and ligamentum flavum or dural canal and intervertebral disc was 100 keV and 190 keV images, respectively. However, these contrasts in 100 kV/Sn140 kV mixed images were higher than those in Mono+ images and improved as the strength of advanced modeled iterative reconstruction (ADMIRE, Siemens) was increased (3<4<5). The imaging findings of the dural canal and nerve roots in non-contrast CT myelography (NC-CTM) generated from mixed images with ADMIRE5 were consistent with the intraoperative findings. In NC-CTM, favorable image quality was obtained by using dedicated metal artifact reduction software (iMAR, Siemens). As a result of training and cross-validation using 3D U-Net, the NC-CTM generated from the trained 3D U-Net model showed high similarity with the training images.

研究分野：放射線医学

キーワード：腰椎ミエログラフィー デュアルエネルギーCT 逐次近似画像再構成 仮想単色X線画像 金属アーチファクト低減技術 手術支援画像 腰部脊柱管狭窄症 腰椎椎間板ヘルニア

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。

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

腰部脊柱管狭窄症や腰椎椎間板ヘルニアに対する低侵襲除圧術の手術支援画像として、腰椎の単純 CT と MR myelography (MRM) を重ね合わせた 3D 画像を作成することが多い¹⁻³⁾。しかし、CT と MRI との体位の違いによる位置ずれ、体内金属や閉所恐怖症などによる MRI 施行困難例、長時間の静止困難による MRI の画質劣化等により、正確な 3D 画像を提供できないこともある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、デュアルエネルギー CT (dual-energy CT; DECT) と深層学習 (deep learning; DL) を用いて、腰椎単純 CT のみから脊髄腔画像 (non-contrast CT myelography; NC-CTM) を作成し、手術支援 3D 画像作成を試みることである。

3. 研究の方法

(1) 腰椎 DECT による NC-CTM の作成

腰椎術前 3D 画像作成時に重要な解剖学的構造となる、硬膜管 (dural canal; DC)、黄色靭帯 (ligamentum flavum; LF)、椎間板 (intervertebral disc; IVD) の描出能について、DECT の至適撮像条件を決定するために手術所見との対比を行った。

対象は、3T MRI を用いた MRM と腰椎単純 DECT を同日あるいは術前日に施行し、単椎間の椎弓切除術が施行された 50 例 (男性 26 例、女性 24 例、平均年齢 67 ± 12 歳) である。撮像装置は、MRI は MAGNETOM Skyra 3T (Siemens Healthineers)、CT はデュアルソース CT 装置の SOMATOM Drive (Siemens Healthineers) である。

逐次近似画像再構成の強度による違い

50 例中、前半の 25 例 (男性 12 例、女性 13 例、平均年齢 65 ± 16 歳) では、逐次近似画像再構成法 (Advanced Modeled Iterative Reconstruction [ADMIRE], Siemens Healthineers) の強度の違いによる、DC と LF および DC と IVD のコントラストを比較・検討した。ADMIRE = 3, 4, 5 の各画像における DC, LF, IVD にそれぞれ関心領域 (region of interest; ROI) を設置して平均 CT 値 (Hounsfield unit; HU) と標準偏差 (standard deviation; SD) を計測し、各画像の contrast-to-noise ratio ($CNR = |HU_{DC} - HU_{LF} \text{ or } IVD| / SD_{LF} \text{ or } IVD$) を算出した。統計解析として Wilcoxon の符号付き順位検定を行い、 $P < 0.05$ を有意とした。ROI 解析は Analyze 14.0 (AnalyzeDirect Inc., Overland Park, KS, USA)、統計解析は SPSS version 28.0.1 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) を使用した。

仮想単色 X 線画像の keV 値による違い

50 例中、後半の 25 例 (男性 14 例、女性 11 例、平均年齢 66 ± 9 歳) では、仮想単色 X 線画像 (monoenergetic plus; Mono+, Siemens Healthineers) の keV 値の違いによる、DC と LF および DC と IVD のコントラストを比較・検討した。120 kVp 相当の 100 kV/Sn140 kV mixed image と Mono+ (40 keV, 70 keV, 100 keV, 130 keV, 160 keV, 190 keV) の各画像における、DC, LF, IVD に ROI を設置し、検討 1 と同様に各画像の CNR を求めた。統計解析として Wilcoxon の符号付き順位検定を行い、 $P < 0.05$ を有意とした。ROI 解析は Ziostation2 (Ziosoft Inc., Tokyo, Japan)、統計解析は SPSS version 28.0.1 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) を使用した。

NC-CTM を用いた手術支援 3D 画像と術中所見との比較

DC と LF, DC と IVD の CNR が最も良かった条件の画像から、NC-CTM を用いた 3D 画像と MRM を用いた 3D 画像をそれぞれ作成し、術中所見との比較・検討を行った。執刀医である脊髄脊椎外科医 1 名により、神経根や DC の圧排の所見が術中所見と 3D 画像とで合っていたかどうかについて、評価した。

(2) DL を用いた NC-CTM の作成

腰椎単純 DECT と深層畳み込みニューラルネットワークの一つである 3D U-Net⁴⁾ (図 1) を用いて脊髄腔画像を作成し、その性能評価を行った。

対象は単椎間の腰椎椎弓切除術前に腰椎単純 DECT (SOMATOM Drive , Siemens Healthineers) 撮影を行った 25 例 (男性 12 例 , 女性 13 例 , 平均 65 歳) である . 得られた逐次近似画像再構成 (ADMIRE = 5) 併用 100 kVp / Sn140 kVp mixed image 横断像から , 1 例につき手術対象椎間と正常椎間の 2 個 , 合計 50 個の 3D データを準備し , このうち 40 個で 5-fold cross validation を , 残りの 10 個でテストを行った . 画像の左右反転によるデータ拡張と 3D U-Net による学習を行った後 , 学習済み 3D U-Net モデルから自動生成される腰椎脊髄腔画像の精度評価を行った .

図 1. 3D U-Net architecture



4 . 研究成果

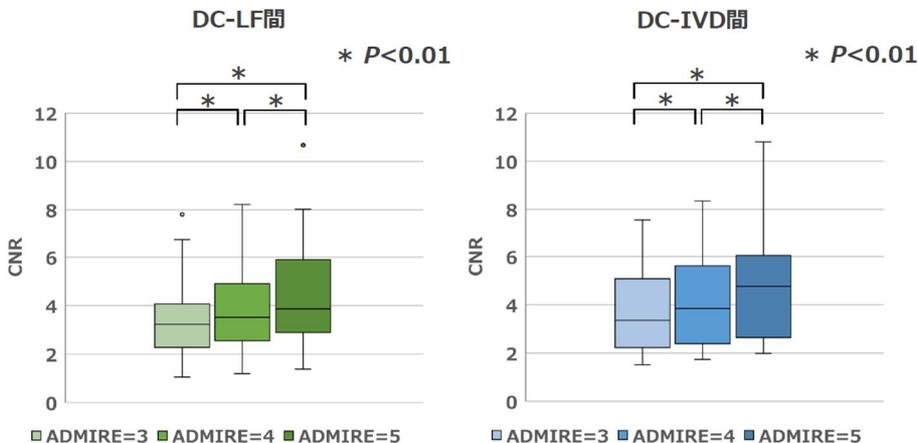
(1) 腰椎 DECT による NC-CTM の作成

ADMIRE の強度による違い

DC-LF 間の CNR 中央値は , ADMIRE = 3 で 3.23 , ADMIRE = 4 で 3.52 , ADMIRE = 5 で 3.87 となり , ADMIRE = 4 は ADMIRE = 3 より , ADMIRE = 5 は ADMIRE = 3 および ADMIRE = 4 より有意に高値であった (それぞれ $P < 0.01$) (図 2) .

DC-IVD 間の CNR 中央値は , ADMIRE = 3 で 3.76 , ADMIRE = 4 で 3.85 , ADMIRE = 5 で 4.77 となり , ADMIRE = 4 は ADMIRE = 3 より , ADMIRE = 5 は ADMIRE = 3 および ADMIRE = 4 より有意に高値であった (それぞれ $P < 0.01$) (図 2) .

図 2. ADMIRE の強度による違い

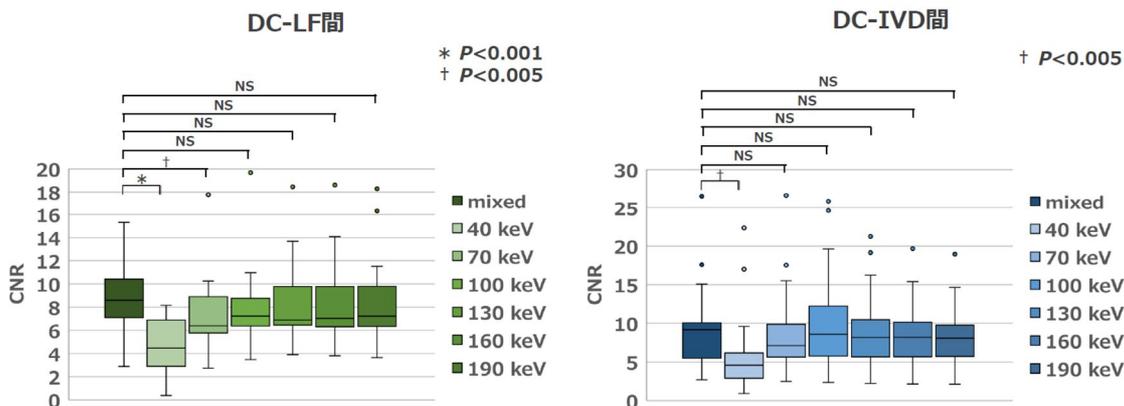


Mono+の keV 値による違い

DC-LF 間の CNR 中央値は, mixed image で 8.59, 40 keV で 4.45, 70 keV で 6.40, 100 keV で 7.23, 130 keV で 6.89, 160 keV で 7.04, 190 keV で 7.23 となった (図 3). CNR 中央値は mixed image で最も高く, 40 keV と 70 keV との間には有意差を認められた (それぞれ $P < 0.001$, $P = 0.019$) が, それ以外の keV 値との間には有意差を認めなかった ($P = 0.098 - 0.397$) (図 3).

DC-IVD 間の CNR 中央値は, mixed image で 9.17, 40 keV で 4.60, 70 keV で 7.12, 100 keV で 8.59, 130 keV で 8.15, 160 keV で 8.19, 190 keV で 8.07 となった (図 3). CNR 中央値は mixed image で最も高く, 40 keV との間には有意差を認められた ($P = 0.002$) が, それ以外の keV 値との間には有意差を認めなかった ($P = 0.109 - 0.819$) (図 3).

図 3. Mixed image と Mono+各 keV 画像との比較 (ADMIRE = 5 併用)



NC-CTM を用いた手術支援 3D 画像と術中所見との比較

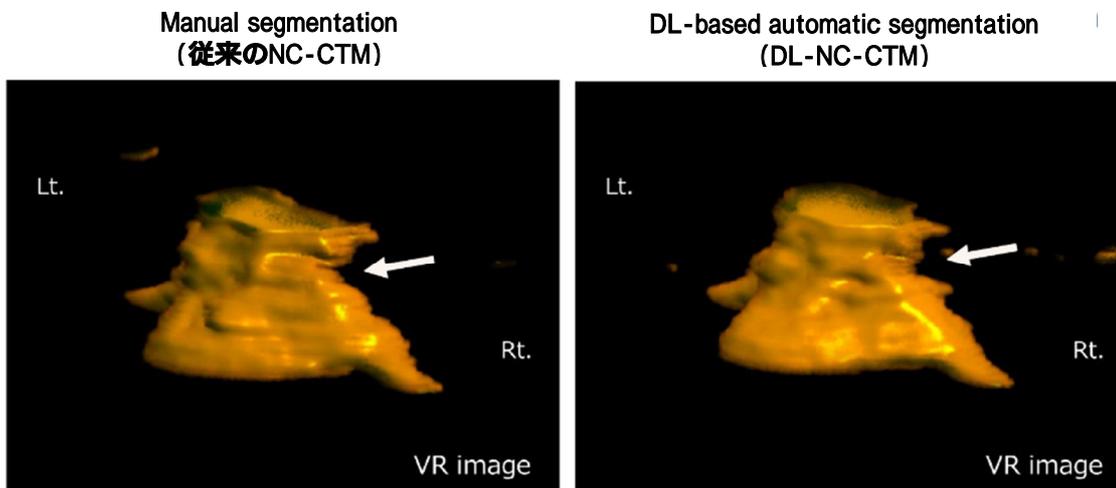
上記検討結果より, ADMIRE = 5 の mixed image における DC のコントラストが最も良かったことから, の 25 例について, ADMIRE = 5 の mixed image から抽出した DC (NC-CTM), LF, IVD, および椎骨を融合した手術支援 3D 画像と, ADMIRE = 5 の mixed image から抽出した LF, IVD, および椎骨と MRM とを融合した手術支援 3D 画像を作成し, それぞれ術中所見と比較した.

その結果, NC-CTM を用いた画像と MRM を用いた画像とで術中所見との一致が同程度であった症例は 25 例中 12 例, NC-CTM の方が MRM よりも一致していた症例は 25 例中 5 例, MRM の方が NC-CTM よりも一致していた症例は 25 例中 8 例であった.

(2) DL を用いた NC-CTM の作成

学習済み 3D U-Net モデルより生成される腰椎単純 DECT の脊髓腔画像は, 教師画像と比較して高い類似度を示した (適合率 = 0.917, 再現率 = 0.917, Jaccard 係数 = 0.846, Dice 係数 = 0.917). 代表症例を図 4 に示す

図 4. 60代・女性 L4/5右後外側型椎間板ヘルニア + 脊柱管狭窄



Precision=0.811, Recall=0.896, IoU=0.883, Dice係数=0.908

(3) 成果の要約と位置づけ、今後の展望

以上より、デュアルソース CT による 1 回の腰椎単純 DECT 撮影から、最大強度の逐次近似画像再構成 (ADMIRE = 5) を適用した 100 kV/Sn140 kV mixed image を作成し、NC-CTM、LF、IVD、および椎骨を抽出・融合することによって、高精度の腰椎術前 3D 画像を作成することができた。通常の腰椎 CT とほぼ同等の被曝線量で、造影剤を用いず、一回かつ短時間の DECT 撮影によって NC-CTM を作成できる今回の手法は、患者に与えるリスクや負担を大幅に減らすことができる。

また DECT と 3D U-Net を用いることにより、腰椎の NC-CTM を自動生成できる可能性を示した。過去には、神経根ブロック術前画像の作成を目的として、3D U-Net を用いて、腰椎単純 CT から椎間孔外神経根の自動抽出を試みた報告はある⁵⁾。しかし腰椎低侵襲除圧術の術前画像作成を目的として、DL の技術を用いて硬膜管と脊柱管内神経根の自動抽出を試みた報告はこれまでなく、調べ得る限りでは本検討が初めてである。DL を応用して NC-CTM を自動生成する技術が発展すれば、煩雑な画像処理の負担軽減、作成画像の再現性の問題の解決にも繋がる可能性がある。

一方、椎間板ヘルニアや高度椎間板変性の症例の中には、IVD や LF などの支持組織と DC や神経根が広く接すると、これらの構造の分離・抽出の難易度が増し、DL による自動抽出精度も落ちる傾向にあった。DECT 画像そのものの画質改善、特に DC + 神経根と周囲支持組織とのコントラストをより向上される撮像条件の追求が必要と考えられた。DL の応用に関しては今回、DC + 神経根 (NC-CTM) の自動抽出のみを試みたが、今後は椎骨、LF、IVD の自動抽出も同時に行う DL モデルの作成についても検討の余地があると考えられた。

<引用文献>

- 1) 東山巨樹, 遠藤拓朗, 菅原 卓. 腰部脊柱管狭窄症に対する低侵襲除圧術. 脊髄外科 2019;33:205-207.
- 2) Yamanaka Y, Kamogawa J, Katagi R, et al. 3-D MRI/CT fusion imaging of the lumbar spine. Skeletal Radiol. 2010;39:285-288.
- 3) 山屋誠司, 菅野晴夫, 中村 聡, 高橋伸光, 佐藤貴晃. 内視鏡下脊椎手術における 3D Fusion Imaging による術前計画の有用性 椎骨, 硬膜管, 神経根, 椎間板, 黄色靭帯の 3次元可視化. J. Spine Res. 2015;6:1305-1311.
- 4) Çiçek Ö, Abdulkadir A, Lienkamp SS, et al. 3D U-Net: learning dense volumetric segmentation from sparse annotation. 2016. <https://arxiv.org/abs/1606.06650>
- 5) Fan G, Liu H, Wu Z, et al. Deep learning-based automatic segmentation of lumbosacral nerves on CT for spinal intervention: a translational study. AJNR Am J Neuroradiol. 2019;40:1074-1081.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 篠原祐樹
2. 発表標題 神経放射線領域におけるAI研究の取り組み
3. 学会等名 第78回秋田脳神経画像研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 篠原祐樹、中泉航哉、大村知己、菅原 卓、佐々木文昭、高橋規之、木下俊文
2. 発表標題 腰椎単純dual-energy CTによる顕微鏡下手術支援画像の評価
3. 学会等名 第46回日本脳神経CI学会総会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 篠原祐樹、高橋規之、中泉航哉、大村知己、菅原 卓、木下俊文
2. 発表標題 腰椎非造影dual-energy CTと深層学習を用いた脊髓腔画像作成の試み
3. 学会等名 第52回日本神経放射線学会
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
---------	---------