



Title	2.5次元超解像畳み込みニューラルネットワークを用いた18F-FDG PET画像画質改善手法の開発
Author(s)	遠藤, 大輝
Description	配架番号 : 2978
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(医学)
Dissertation Number	甲第16885号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16885
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99730
Type	doctoral thesis
File Information	ENDO_Hiroki_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（医 学） 氏 名 遠藤 大輝

学 位 論 文 題 名

2.5 次元超解像畳み込みニューラルネットワークを用いた ^{18}F -FDG PET 画像画質改善手法の開発
(Development and validation of a 2.5D super-resolution convolutional neural network for ^{18}F -FDG-PET images)

【全体の背景】陽電子放出断層撮影（positron emission tomography : PET）は、がんや神経疾患、心疾患などにおける代謝機能の評価に広く用いられている。特に ^{18}F -fluorodeoxyglucose (FDG) PET は、糖代謝を画像化し、腫瘍検出や治療効果判定において臨床的に重要な役割を果たしている。一方で、形態情報を提供する Computed Tomography (CT) や Magnetic Resonance Imaging (MRI) に対し空間分解能が低いという課題がある。このため PET は、微小病変の検出や、生理的集積近傍の腫瘍の検出、隣接臓器への浸潤評価などにおいて十分な精度を持つとは言えない。一方、近年のがん治療の飛躍的な進歩に伴い 1 人が生涯に受ける PET 検査数が増加し、医療被ばく量の増大が問題となっている。被ばく低減を目指した低投与量での検査に注目が集まっているが、統計ノイズの増加による画質劣化が課題である。

これらの課題を解決するため、本研究では AI 技術による全身 PET 画像に適用可能な画質改善手法を開発した。軽量な超解像深層学習モデルである Super-Resolution Convolutional Neural Network

(SRCNN) を基盤とし、2D 学習モデルの利点を生かしつつ断層画像の 3D 情報を取り入れる 2.5D 学習を導入した 2.5D-SRCNN を採用した。さらに、膀胱などの生理的高集積が学習に与える影響を抑えるため、PET 画素値を対数変換する前処理を提案した。これらの手法を適用した 2.5D-LOG-SRCNN を用いて、第一章では PET 画像の超解像を、第二章では低カウント PET 画像の画質改善をテーマに、提案モデルをデノイズモデルに応用し、臨床において標準的な定量評価指標 Standardized Uptake Value (SUV) の定量性を維持した画質改善に有効であるか検証した。

○第一章

【背景と目的】半導体検出器技術の進歩により高解像度 PET 装置が実用化され、PET 画像の空間分解能が改善されつつある。一方でこれらのハードウェア依存型装置は高価で導入施設は限られており、ソフトウェアによる画質改善手法は依然として重要である。本研究では、全身 PET 画像に適用可能な超解像モデルの構築を目的とし、2.5D 学習と画素値の対数変換を導入した 2.5D-LOG-SRCNN を提案した。低解像度画像（low resolution : LR 画像）から高解像度画像（high resolution : HR 画像）を生成する AI モデルを構築し、提案手法が SUV の定量性を維持しつつ画質指標を改善できるかどうかを検証した。

【対象と方法】高解像度半導体検出器をもつ PET/CT 装置（Vereos, Philips）で撮影された連続 90 症例の全身 ^{18}F -FDG PET/CT 検査データを用いた。同一スキャンから、4mm 画素の LR 画像および 2mm 画素の HR 画像を得た。LR 画像 1 枚と HR 画像 1 枚を組として 2D-SRCNN モデルを構築し、ベースラインとした。2D-SRCNN と同様の 3 層構造を持ち、連続する LR 画像 9 枚を入力、中央の画像に対応する HR 画像 2 枚を出力とする 2.5D-SRCNN を構築した。これら 2 モデルそれぞれに対数変換を前処置として加えた 2D-LOG-SRCNN、2.5D-LOG-SRCNN を構築した。HR 画像を基準画像として、ピーク信号対雑音比 (PSNR) を算出し、誤差評価を行った。NEMA ファントムの 6 つの腫瘍球の SUV が 8 となるよう FDG を封入し、撮影されたファントム画像および予測画像の各球の SUV_{max} を算出し、定量

性を評価した。

【結果】20 症例のテストデータ (9,710 枚) において、HR 画像と、対応する LR 画像から各モデルが予測した超解像画像の PSNR を比較した。PSNR (dB) は、LR (36.73 ± 3.22) に対し 2D-SRCNN (38.87 ± 3.71 , $p < 0.0001$) と有意に画質を改善した ($p < 0.0001$)。2.5D を適用した 2.5D-SRCNN では 40.28 ± 4.20 と、2D-SRCNN に対して有意に改善した ($p < 0.0001$)。さらに、対数変換を適用した 2.5D-LOG-SRCNN は 40.54 ± 4.10 と 2.5D-SRCNN に対して有意に改善した ($p < 0.0001$)。腫瘍ファントムによる評価では、超解像モデルにより LR 画像で低下していた腫瘍球の SUV_{max} が改善し、10mm 球の SUV_{max} は 2.5D-LOG-SRCNN で最も改善した。また、虚像の描出も認められなかった。

【考察】2.5D 学習と対数変換の両方を適用したモデルで、PSNR において最も誤差が改善し、定量性評価において小径球体の SUV_{max} を最も改善した。定量性と画質改善を両立できる手法であることが示唆された。

第二章

【背景と目的】PET 検査は放射性薬剤の投与に伴い、患者の被ばく線量を低減することが重要な課題である。そのため、低線量データから標準線量相当の PET 画像を再構成する技術の開発が求められている。第 1 章で提案した 2.5D-LOG-SRCNN が SUV 定量性を維持した PET 画像の超解像に有効であることが示された。第二章では、提案モデルをデノイズモデルとして扱い、低投与量を仮定した低カウント PET 画像 (Low-count : LC 画像) を入力し標準カウント PET 画像 (Full-count : FC 画像) を予測する画質改善モデルを構築した。提案手法がノイズ低減目的においても、SUV の定量性維持と画質指標改善の両立が可能か検証した。

【対象と方法】第一章と同一の PET/CT 装置 (Vereos, Philips) で撮影された 265 症例の全身 18F-FDG PET/CT 検査データを用いた。画素サイズを 4mm とし、同一スキャンより、90 秒収集データから再構成した全身 PET 画像を FC 画像、低投与量を模擬するためリストモードから 9 秒収集相当に間引いたデータから再構成した画像を LC 画像とした。LC 画像 1 枚と対応する FC 画像 1 枚を組として、2D-SRCNN モデルを構築しベースラインとした。連続する LC 画像 9 枚を入力、中央の画像に対応する FC 画像 1 枚を出力とする 2.5D-SRCNN を構築した。5 分割交差検証で実験を行った。第一章と同様に 2D-SRCNN、2.5D-SRCNN、2D-LOG-SRCNN、2.5D-LOG-SRCNN を構築した。検証では PSNR の比較に加え、自動臓器セグメンテーションツール TotalSegmentator を用いて、肝臓、脳、膀胱、右大殿筋、大動脈の region of interest (ROI) を自動生成した。ROI の手動修正は行わず、不適切な ROI を除外し、ROI 内の SUV_{mean} を評価した。

【結果】各分割の test データを合わせた重複の無い 265 症例について FC 画像に対する PSNR (dB) は、LC (30.80 ± 5.59) に対し 2D-SRCNN (33.74 ± 4.59) は有意に改善した ($p < 0.0001$)。2.5D を適用した 2.5D-SRCNN (34.41 ± 4.52) は 2D-SRCNN に対して有意に改善した ($p < 0.0001$)。加えて、対数変換を適用した 2.5D-LOG-SRCNN (34.64 ± 4.11) は 2.5D-SRCNN に対し有意に改善した ($p < 0.0001$)。臓器の定量性評価では、SUV_{mean} の精度において提案モデルが非劣勢であることを確認した。

【考察】提案手法が低カウント PET 画像における画質改善と定量性維持に有効であることが示唆された。TotalSegmentator は高精度で臓器 ROI の自動生成を行ったが、一部不正確な ROI を生成した。

【全体の結論】2.5D 学習および画素値を対数変換する前処理が、全身 PET 画像の画質改善に有効であることが示唆された。将来の展望として、より複雑なモデルへの応用や病変部の定量性評価、診断能評価を行う。本研究の有用性は、より多くの医療機関での高解像度 PET 画像の利用、放射性薬剤投与量の低減による被ばくの軽減および医療費の削減など多岐にわたる。さらに、提案手法はモデルの消費メモリを抑えつつ精度を向上できるため、将来的には小メモリ・省電力が求められるエッジデバイスへの応用が期待できる。