

令和 5 年 11 月 1 日現在

機関番号：33708  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2017～2022  
課題番号：17K10455  
研究課題名（和文）人工知能技術を利用した核医学画像における多元的画質改善システムの構築

研究課題名（英文）Improvement of image quality in nuclear medicine based on artificial intelligence approach

研究代表者  
片渕 哲朗（KATAFUCHI, TETSURO）  
岐阜医療科学大学・保健科学部・教授

研究者番号：00393231  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：核医学画像は、臓器の機能情報を取得する能力があるが、臓器の詳細な構造を抽出する際には制約があった。本研究では、深層学習を用いた超解像技術と独自のデータセットを用いて、空間分解能の低い核医学画像の画質向上に関する手法について検討した。その結果、超解像技術により核医学検査の診断において定量情報を提供し、診断能力の向上に寄与する可能性が示された。また、画像生成プロセスを多角的に捉えることで、ソフトウェアのみで画像の改善が実現される点に特徴があった。以上より、本研究によって、人工知能技術の新たな可能性が示され、核医学画像の定量化ソフトウェア開発の基盤となる可能性が開かれた。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

画像生成プロセスを多角的に捉えることで、ソフトウェアのみで画質が改善できる点に意義があり、本手法で提案したデータセット作成法は、容易に入手可能であり、医用画像データセットの拡充に有用性があった。また、本研究においては、「低解像度コリメータの画像」から「高解像度コリメータの画像」を生成する手段をファントム実験によって明らかにし、空間分解能の低い核医学画像の画質改善が可能になり学術的にも寄与できた。

研究成果の概要（英文）：Nuclear medicine images have the ability to acquire functional information of organs, but have limitations when extracting detailed structures of organs. In this study, we investigated the improvement of image quality in nuclear medicine images with low spatial resolution using deep learning-based super-resolution techniques and a custom dataset that we created, focusing on the recently highlighted field of research. The results demonstrated the potential of super-resolution techniques to provide quantitative information for the diagnosis of nuclear medicine examinations and contribute to improving diagnostic capabilities. Additionally, the significance lies in achieving image enhancement solely through software by capturing the multi-faceted process of image generation. This study has identified new possibilities for artificial intelligence technology and laid the foundation for the development of quantitative software in nuclear medicine image analysis.

研究分野：放射線科学 核医学

キーワード：深層学習 核医学画像 ペーパーファントム ガンマカメラ

## 1. 研究開始当初の背景

核医学画像、特に、シンチグラム/SPECT 像の画質向上に関する研究は幅広く行われており、その学術的意義については言うまでもない。その中で実現された画質向上に関する手段は、体動補正などのアルゴリズムとして数多く実装されている。

現在、画質向上に関する研究は、ピンホールコリメータから得られるポイントスプレッドファンクションを利用して補正する手法、モンテカルロ法に基づいて推定する方法、スパースコーディングを用いて辞書型の高解像度化を行う方法などが行なわれている。この他にも、超解像処理、体動補正、アップサンプリング処理などとしてソフトウェアのみで処理する高解像度を行う方法は数多く提案されている。すなわち、後処理として高解像度化が期待できるため、この分野の画像処理において重要な課題である。

統計ノイズの影響を低減させるためには、平滑化フィルタを適用することが多い。しかし、平滑化フィルタの適用により、高周波数帯域の情報の欠落が引き起こされる。また、平滑化フィルタに用いる最適パラメータ値は、適用するタスクや統計ノイズの影響の大きさにより変化し、決定することが困難である。

旧来のアップサンプリング処理に用いられてきた最近傍補間法(Nearest neighbor Interpolation)や、双一次補間法(Bi-linear Interpolation)、双三次補間法(Bi-cubic Interpolation)が代表される線形補間処理では、辺縁にボケやジャギーなどのアーチファクトが存在してしまう問題点がある。また、他のアップサンプリング手法として、学習型超解像と呼ばれる手法[2]が提案されている。学習型超解像とは、低解像度パッチ画像と高解像度パッチ画像のペアを保存した辞書を事前に作成し、低解像な入力パッチ画像に対して最適なパッチペアを辞書から取得し置き換える処理を行う。これにより、アーチファクトの少ない高解像度画像の再構築が可能となる。しかし、高い復元性能を得るために多様なパッチ画像を辞書に保存しておく必要があり、辞書サイズが大きくなる問題がある。また、低解像度な入力画像の全てのパッチ画像に対して、辞書の探索が全数探索で行われることによる処理時間の問題も存在する。

## 2. 研究目的

以上の背景を元に本研究では、近年着目されている深層学習に基づく核医学画像の画質改善手法の検討を行う。

第 1 の目的として低被曝・高感度・高解像度を実現するために、画像劣化のモデルを解析し、そのモデルに基づいて様々な画像をペーパーファントム実験によって生成する。そして、モデルとその解法の適切さを明らかにする。また、それら画像の劣化や画像生成の過程を「時間軸」「空間軸」「エネルギー軸(核種)」「コリメータ軸」の4つに多元化し、同時に、吸収/散乱の程度を加え、同一のペーパーファントムを用いて多面的に検証を行い、高解像度化の可能性を明らかにする。それらの結果を辞書データとして生成し、例えば「低解像度コリメータの画像」から「高解像度コリメータの画像」を生成する手段を、ファントム実験によって明らかにする。そして、その臨床応用の可能性を示す。

第 2 は、インテリジェントなシンチグラム/SPECT 画像生成システムを構成する上で必要となる画像収集法などを明らかにし、物理実験で得た画像やプリンターの出力用データを必要に応じて研究者に提供することを目的にしている。

## 3. 研究の方法

### (1) データセットの作成

深層学習の辞書データの生成は、インクジェットプリンターを利用したデータセットの作成を行った。具体的には以下のとおりである。

はじめに、CT や MRI など撮影された医用画像や自然画像を収集し、これらを教師データとする。次に、放射性薬剤をインクに混ぜたプリンターで教師データを印刷する。印刷された紙のインクから放出される放射線をガンマカメラで撮影することで核医学画像を取得し、これを学習データとする。こうして、低解像度な核医学画像を学習データとし、それに対応した教師データのペアを作成した(図 1)。

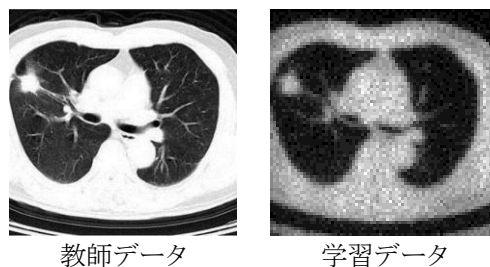


図 1 教師データと学習データ

核医学画像の画素値は、検出した放射線から算出されるカウント値を示す。そのため、画質改善においても、カウント値の情報を保持することは重要となっている。しかし、教師データに核医学画像ではない画像を用いるため、出力画

像からカウント値の情報が消えてしまう。そこで、教師データを学習データの画素値に近付けることで、カウント値情報の付与を試みた。両データの同位置画素値の対応から Lookup Table(LUT)を作成し、教師データに適用した。LUTを適用後、わずかなずれを修正するため、学習データの平均値と標準偏差に合わせる処理を行う。この画素値合わせ手法により、学習データの画素値に近付けた教師データを取得した(図 2)。

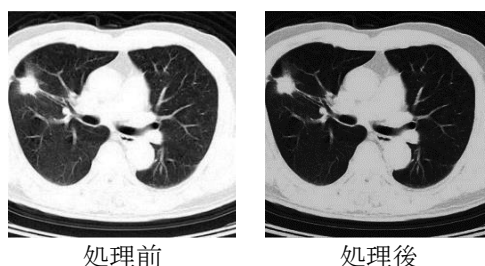


図 2 画素値合わせ処理結果

### (2) ネットワーク

本研究は、SRResNet[4]をベースとしてネットワークを作成し、LR 画像に適用する。作成したネットワークの構成を図 3 に示す。入力 $64 \times 64$ [pixels]、出力 $256 \times 256$ [pixels]とした。

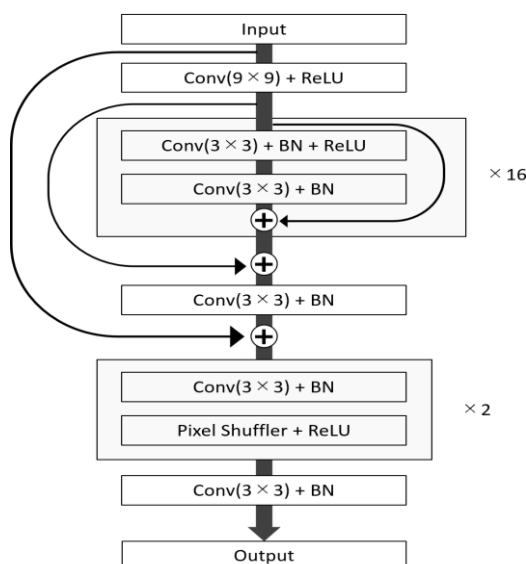


図 3 使用ネットワークの構造

### (3) ガンマカメラによる撮像

インクジェットプリンターを用いてオリジナル画像から入力画像を作成した。黒インクと Tc-99m 製剤を混ぜた液体をインクカートリッジに注入し、モノクロコピーで印刷を行った。インクの配合比は RI:黒インク=1:2とした。

印刷した画像は e-cam(Siemens 社)を用いて収集を行った。収集条件はマトリクスサイズ  $512 \times 512$ 、拡大率 1.78 倍 (0.67mm/pixel)、収集時間は最大カウントが 25counts/pixel 以上となる時間として 10 分から始め、時間経過ごとに延長させた。AI が学習するためには、位置の再現性が重要で、収集時には位置がずれないように自作の固定具を作成し撮像した。

### (4) 深層学習

核医学画像を Bi-cubic によって  $128 \times 128$  から  $256 \times 256$  にアップスケーリングさせた後、SRResNet によって学習させた。90 度、180 度、270 度の回転画像を追加して学習させることで学習枚数を 4 倍とした。学習した AI に未知のデータを入力し、出力された AI 画像の評価を行った。評価方法は視覚評価に PSNR(peak signal-to-noise ratio)と SSIM(structural similarity)を加えることで、数値評価も行った。

### (4) 学習の損失関数と評価

超解像の学習における損失関数として、一般的に平均二乗誤差(Mean Squared Error:MSE)が用いられる。しかし、MSE が小さいほど結果が良いとは限らない。1 ピクセルだけ平行移動した画像と元の画像を比較した場合、MSE には大きく影響があらわれるのに対し、人間の目には全く同じであるように見える。このことから、MSE を用いるだけでは人間

が感じる見やすさを学習させるには不十分であると考え、Structural Similarity(SSIM)を加えた式を定義し、学習に用いる損失関数とした。本手法で用いる損失関数を式(1)に示す。

$$\text{Loss} = \text{MSE} + (1 - \text{SSIM}) \quad (1)$$

一方、画質の評価には Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) と SSIM の 2 つを用いる。一般的に PSNR は高い値の方が高画質であり、SSIM は 1 に近いほど高画質であることを示す。

#### 4. 研究成果

##### (1) 視覚的評価

図4の風景画像では矢印に示す部位が核医学画像では不鮮明であるが、AI 画像では抽出されており、オリジナル画像に近づいている。同様に図5のCTによる医療画像においても、濃度が低く不鮮明になっている部位の構造が抽出されている(矢印)。

AI 画像は核医学画像において面積が小さい集積部分の表示ができておりオリジナル画像に近づいていることが分かった。また、回転画像を追加することで学習枚数は 4 倍となりボケを低減することが可能であった。今回の学習データには風景画像と比較して医療画像を多く用いた。深層学習は学習データによって学習の方向性が変わってくる。そのため臨床的に用いるためには医療画像を学習データに使用することが有用であると示唆された。

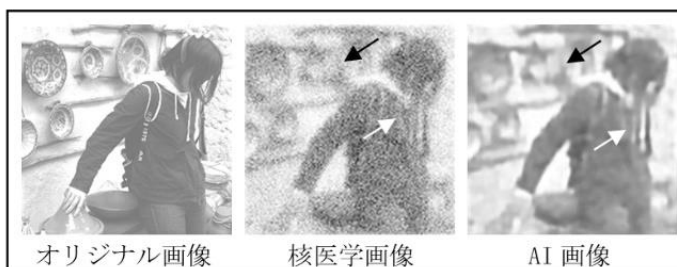


図4 風景画像

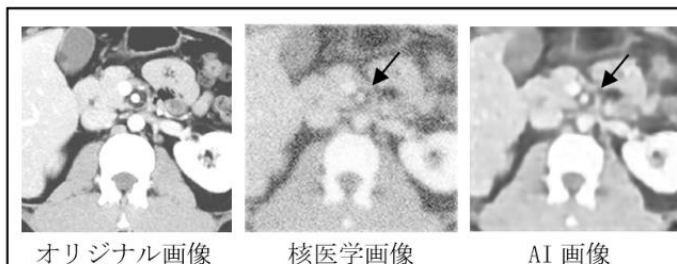


図5 医療画像

##### (2) 定量評価

数値の定量評価では表 1 に示すように、入力核医学画像と比較して、深層学習した出力画像では、PSNR 4.53、SSIM 0.143 の向上が見られた。PSNR の数値が高くなっており、SSIM の数値が 1 に近付いていた。これらのことから核医学画像と比較して AI 画像の画質が向上したと考えられる。

表 1. 数値評価

	PSNR[dB]	SSIM
入力信号	12.67	0.316
出力信号	17.20	0.453

画像上では、境界の明瞭化などの改善が見られたが、教師データと学習データ間の平均画素値の差が大きいことにより、出力画像と学習データ間でも大きな差が見られる。そのため、カウント値の再現を目的とした画素値合わせ手法の改善が必要であり、それにより、カウント値の再現性の向上が期待される。

本研究では、深層学習を用いた核医学画像の画質改善手法の検討を行った。他の手法との比較では、数値評価と主観評価ともに良好な成果があった。また、本手法で提案したデータセット作成法では、容易に入手可能な自然画像の追加が可能であり、医用画像データセットの拡充に有用性があった。本研究の手法は、「低解像度コリメータの画像」

から「高解像度コリメータの画像」を生成する手段を，ファントム実験によって明らかにし空間分解能の低い核医学画像の画質改善に寄与できた。

<引用文献>

- [1] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli, “Image quality assessment: From error visibility to structural similarity”, IEEE Transactions on Image Processing, vol.13, no.4, pp.600-612, 2004.
- [2] K. He, X. Zhang, S. Ren, et al., “Deep Residual Learning for Image Recognition”, In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.770-778, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 広瀬香澄, 原 武史, 田中悠貴, 村松千左子, 片渚哲朗, 松迫正樹, 藤田広志	4. 巻 J101-D (1)
2. 論文標題 Dynamic Scintigraphyにおける3層人工ニューラルネットワークを利用した腋窩静脈からの肺動脈時間放射能曲線の推定法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 40-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 長原朋香, 片渚哲朗
2. 発表標題 2次元画像からの3次元断層像の構築 ~ペーパーファントムを用いた検討~
3. 学会等名 第42回核医学技術学会総会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片渚哲朗
2. 発表標題 核医学画像における人工知能を利用した画質改善システム
3. 学会等名 岐阜テックプラントー2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 初内政哉, 原武史, 片渚哲朗, 松迫正樹, 藤田広志
2. 発表標題 深層学習を用いた核医学画像の画質改善手法の検討
3. 学会等名 医用画像研究会メディカルイメージング連合フォーラム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎映里, 片淵哲朗, 初内政弥, 原武史
2. 発表標題 核医学画像における人工知能を利用した画質改善システムの構築～フードプリンタを用いたAI学習についての検討～
3. 学会等名 第39回日本核医学技術学会総会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川喜多ゆう, 片淵哲朗
2. 発表標題 核医学画像における人工知能を利用した画質改善システムの構築～ペーパーファントムを用いた検討～
3. 学会等名 第10回 Seminar on Advancement in Nuclear Medicine Technology and Growing Education
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 初内政哉, 原 武史, 川喜多ゆう, 片淵哲朗, 藤田広志
2. 発表標題 modified SRCNNを用いたガンマカメラのプランナー画像における超解像画像生成
3. 学会等名 第37回日本医用画像工学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高林知美, 片淵哲朗, 初内政哉, 原 武史
2. 発表標題 医用画像における人工知能を利用した画像改善システムの構築～Static画像による検討～
3. 学会等名 第10回中部放射線医療技術学術大会
4. 発表年 2017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
研究 分担 者	原 武史  (HARA TAKESHI)  (10283285)	岐阜大学・工学部・教授    (13701)	

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