

冠動脈 MRA (Magnetic Resonance Angiography) 画像を対象とした 超解像技術の高速化

Reduction of Processing Time in Super Resolution Technique for Whole Heart Coronary Magnetic Resonance Angiography

竹内 優太[†] 檜作 彰良[†] 高橋 正志郎[†] 中山 良平[†]
Yuta Takeuchi Akiyoshi Hizukuri Seishiro Takahashi Ryohei Nakayama

1. はじめに

MRI (magnetic resonance imaging) 検査は、CT 検査のような放射線被曝がなく、非侵襲的で、患者に優しい検査法である[1]。MRI 検査の中でも特に、冠動脈 MRA (magnetic resonance angiography) は、冠動脈狭窄の効果的な検査法として知られている。しかし、冠動脈 MRA は、冠動脈末梢部の狭窄を診断するには、ノイズが多く、空間分解能が十分でない問題がある[1]。

この問題を解決する技術の一つとして学習型超解像技術がある。学習型超解像技術は参照用の低解像画像とそれに対応する高解像画像を小領域 (パッチ) に分割し、それらをペアで辞書に格納する。そして、高解像度化対象の低解像画像の局所的な信号パターンを解析し、辞書から類似パターンを有するパッチを選択・置換することにより、高解像度化画像を生成する。この超解像技術は、撮影後の画像に後処理として、適用することが可能である[2-3]。

従来の 2 次元超解像技術では、体軸方向に垂直な撮影面 (xy 平面) に対する高解像度化は可能であったが、体軸方向への高解像度化は不可能であった。そこで、我々は超解像技術を 3 次元に拡張し、x, y, z の全ての方向に高解像度化できることを示した[4]。しかし、3 次元パッチの信号パターンの解析が必要となったことにより、演算量が増大し、臨床応用困難な処理時間となってしまう問題があった。そこで本研究では、3 次元学習型超解像技術における辞書の構成を変更することにより、演算量を減少し、処理時間を大幅に短縮することを目的とする。

2. 方法

2.1 3 次元学習型超解像技術

一般的な学習型超解像技術では、事前に、参照用の高解像画像とそれに対応する低解像画像を用意し、それらに対応する位置でパッチに分割し、それらペアを辞書に格納する。次に、高解像度化対象の低解像画像をパッチに分割し、各入力パッチと類似する低解像パッチを辞書から探索する。そして、入力パッチを類似低解像パッチに対応する高解像パッチで置き換えることにより、高解像画像を生成する。

3 次元学習型超解像技術では、まず、参照用高解像画像を $1/M$ に縮小した低解像画像を生成する。そして、高解像画像と低解像画像をそれぞれ $MN \times MN \times MN$ と $N \times N \times N$ のパッチで切り出し、対応する位置のパッチのペアを辞書とし

て格納する。ここでは、各低解像パッチにおけるノルムを求め、低解像パッチ、高解像パッチを各ノルムで割ることにより正規化する。

$$\text{Euclidean norm} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N (\text{low resolution patch}_{i,j,k})^2}$$

次に、入力低解像画像の高解像度化処理では、入力画像を 1 ボクセルずつ移動しながら $N \times N \times N$ の入力パッチに切り出す。入力パッチをノルムで正規化し、辞書の低解像パッチから類似パッチを探索する。そして、探索された類似パッチに対応する高解像パッチを辞書から取り出し、取り出した高解像パッチに入力パッチのノルムを掛け、入力パッチと置き換える。入力パッチと辞書の各低解像パッチの類似度はユークリッド距離で定義する。

Euclidean distance

$$= \sqrt{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N (\text{input patch}_{i,j,k} - \text{low resolution patch}_{i,j,k})^2}$$

全ての入力パッチに対し、同様の処理を繰り返すことにより、入力低解像画像の高解像度化画像を生成する。

2.2 辞書の木構造化

2 次元超解像技術の処理時間を短縮するため、Kmeans 法を用いることにより、辞書を木構造化する手法が提案されている[5]。本研究では、冠動脈 MRA 画像を高解像度化する 3 次元学習型超解像技術の辞書に Kmeans 法を適用し木構造化することにより、超解像技術の高速化を図る。

Kmeans 法は 1 つのデータ群を複数のクラスタに分割する手法である。本研究では、Kmeans 法により辞書を 2 つに分割し、各分割辞書をさらに分割することにより、辞書を 2 分木構造化する。2 分木の各ノードには、各階層での分割辞書の重心に位置する低解像パッチを与える。本研究では、任意の階層になるまで辞書の分割を繰り返し、画質評価と処理時間の観点から適切な 2 分木構造の階層を明らかにする。

入力パッチの類似パッチ探索処理では、2 分木の分岐ごとに 2 つの子ノードとのユークリッド距離を求め、ユークリッド距離が短い子ノードを選択する。これを葉に到達するまで繰り返し、類似パッチ探索で用いる最下層の分割辞書を選択する。そして、選択された分割辞書の中から入力パッチに対する類似パッチを選択する。

[†] 立命館大学理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

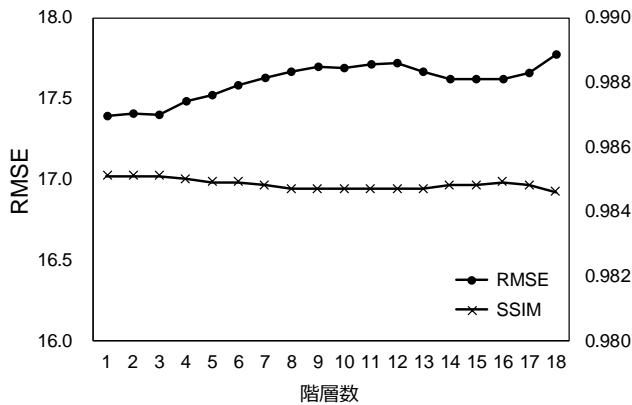


図1: 辞書分割の階層によるRMSE, SSIMの比較

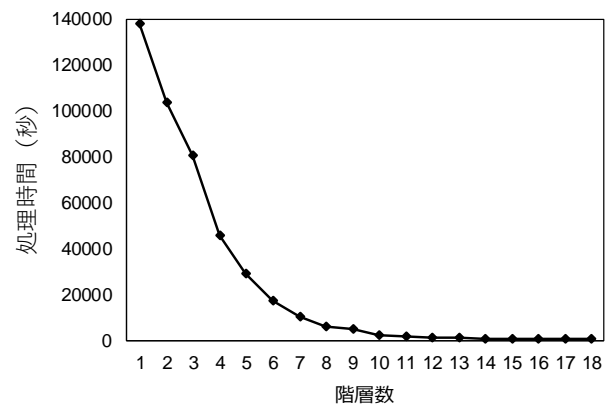


図2: 辞書分割の階層による処理時間の比較

2.3 実験

本実験では、三重大学医学部附属病院で撮影された冠動脈 MRA 画像 (512×512×150) を用いた。参照用、評価用ともに3患者の冠動脈 MRA 画像を用いた。

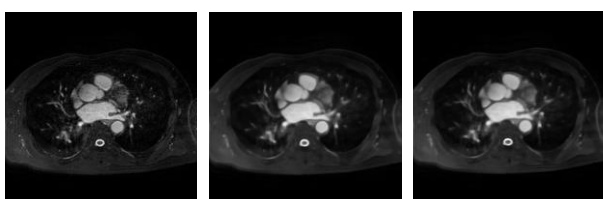
本研究では、冠動脈 MRA 画像を 1/2 のサイズにダウンサンプリングした低解像画像 (256×256×75) を生成し、低解像画像を 3次元学習型超解像技術により高解像度化したときの元画像に対する忠実度を評価する。ここで、忠実度の評価指標として、RMSE (Root Mean Square Error: 平均二乗誤差), PSNR (Peak Signal to Noise Ratio: ピーク信号対雑音比), SSIM (Structural Similarity: 構造的類似性) を用いた。

辞書を木構造化しない従来法、提案手法ともに辞書作成時のパッチ切り出しをストライド幅3画素、パッチサイズ5×5×5で行った。また、提案手法は、辞書分割を2階層から18階層まで変え、超解像処理を実施した。

3. 結果

図1に提案手法の辞書分割の階層数による高解像度化画像の元画像に対する平均 RMSE, SSIM の結果を示す。辞書分割の階層数が増えるにつれ、誤差が大きくなる傾向はあったが、18階層まで大きな違いは見られなかった。また、図2に提案手法の辞書分割の階層数による処理時間の比較を示す。辞書分割の階層数が増えるにつれ、処理時間は短縮し、分割なしの従来法と比べ、階層数14以上で処理時間を1/150以下まで短縮することができた。

図3に提案手法 (16階層) および従来法による高解像度化画像を示す。提案手法、従来法ともに高解像度化画像は、元画像に比べ、解像度が向上しただけでなく、ノイズが低減し、画質が向上していることが分かる。また、処理時間を大幅に短縮しながら、従来法と提案手法による高解像度化画像において、差異が無いことを確認できた。



冠動脈MRA画像 従来法 (階層1) による高解像度化画像 提案手法 (階層16) による高解像度化画像

図3: 提案手法と従来法による高解像度化画像の比較

4. まとめ

本研究では、冠動脈 MRA 画像に対する 3次元学習型超解像技術の処理時間を短縮するために、Kmeans 法により辞書の木構造化を行った。そして、辞書の木構造化により、高解像度化した際の画質を維持しながら、処理時間を1/150以下に短縮できることを示した。提案手法は臨床業務に支障のない処理時間が実現できていることから、早い段階での臨床応用が期待できる。

謝辞

本研究に際し、協力いただいた立命館大学先進医用画像解析処理研究室諸氏、並びに実験試料の提供および臨床的助言を頂いた三重大学医学部附属病院の医師の皆様に深謝する。

参考文献

- [1] 岡田 宗正, 松永 尚文 "CT(三次元再構成画像),MRI", 日本内科学会雑誌, 第102巻第2号, pp.325-334 (2013).
- [2] 陳延偉 "超解像技術:ソフトウェアによる知的画像処理", システム/制御/情報, 54巻10号, pp.373-377 (2010).
- [3] 小森秀樹 "超解像技術", 映像情報メディア学会誌, 63巻10号, pp.1400-1402 (2009).
- [4] 中山良平 "超解像技術に基づく冠動脈 MRA(磁気共鳴欠陥画像)の高解像度化", 立石科学技術振興財団 助成研究成果集, 第25号 (2016).
- [5] 橋本 明信, 中矢 知宏, 黒木 修隆, 廣瀬 哲也, 沼 昌弘 "学習型超解像のための二分木辞書", 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, 96(2), pp. 357-361 (2013).