

超解像技術に基づく冠動脈 MRA（磁気共鳴血管画像）の高解像度化

Increase of Image Resolution in Whole Heart Coronary Magnetic Resonance
Angiography Using Super Resolution Technique

2041023



研究代表者

立命館大学 理工学部

准教授

中山 良 平

[研究の目的]

冠動脈 MRA（magnetic resonance angiography）は、放射線被曝や造影剤投与を行わずに冠動脈を非侵襲的に描出できる画期的な画像診断法である。しかし、その空間解像度の不足から冠動脈末梢部の描出が不鮮明な場合があり、解像度の向上（高解像度化）が望まれている。MR 装置の撮像センサーの画素サイズをハードウェア的に小型化することにより、冠動脈 MRA の高解像度化が可能であるが、装置の機構的な制約やコストの観点から容易ではない。

撮影された画像を後処理としてソフトウェア的に高解像度化する技術として、超解像技術がある。脳 MR 画像を対象とした超解像技術の研究開発は、これまでにいくつか論文報告があるが、冠動脈 MRA を対象としたものはない。超解像技術により、高解像度化した冠動脈 MRA を医師に提供することにより、末梢部の細い血管も詳細に評価することが可能となり、狭窄検出診断の正確度の向上が見込まれる。したがって、早期発見、早期治療を実現でき、患者のクオリティオブライフの向上や医療費削減につながる可能性がある。また、超解像技術の有用性を臨床の立場から実証したものはなく、本研究の観察者実験により有用性が示されれば、臨床現場における超解像技術の普及および多くのモダリティ画像への応用とその発展につながる

ると期待する。

そこで本研究では、冠動脈 MRA をソフトウェア的に高解像度化する超解像技術を開発し、その有用性を検証することを目的とする。

[研究の内容、成果]

超解像技術は再構成型と学習型の大きく二つの手法に分類される。再構成型は、わずかに位置ずれのある複数枚の画像から高解像度画像を推定する手法である。一方、学習型は、参照画像を用いて低解像度画像と高解像度画像の対応関係を学習し、その関係に基づき高解像度画像を推定する手法である（図 1 参照）。本研究で

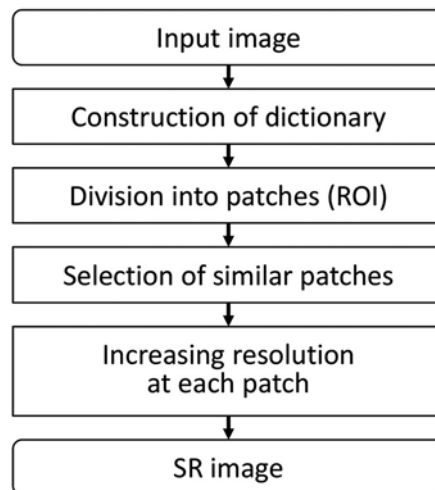


図 1 学習型超改造技術の処理手順

は、まず、どちらの手法がより忠実に冠動脈 MRA を高解像度化できるかを再構成型、学習型の 2 次元超解像技術を用いて比較した。ここでは、患者 35 名の冠動脈 MRA を対象に、1.5 T MR 装置で再構成された 512×512 画像をダウンサンプリングにより縮小し、 256×256 サイズの低解像度画像を生成した。次に、この低解像度画像を再構成型、学習型超解像技術を用いて 512×512 サイズの画像に復元し、元画像と各復元画像の Root Mean Squared Error (RMSE), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index (SSIM) により、その忠実度を比較した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_{k \in Q} |I - I'|^2}$$

$$PSNR = 20 * \log_{10} \left(\frac{MAX_I}{RMSE} \right)$$

$$SSIM = \frac{(2\mu_I\mu_{I'} + c_1)(2\sigma_{II'} + c_2)}{(\mu_I^2 + \mu_{I'}^2 + c_1)(\sigma_I^2 + \sigma_{I'}^2 + c_1)}$$

その結果、学習型超解像技術の RMSE, PSNR, SSIM の平均は 2.52, 22.2 dB, 0.989, 再構成型超解像技術は 2.87, 21.6 dB, 0.985 であり、各指標において学習型超解像技術が再構成型超解像技術より有意に復元の忠実性が高いことが明らかとなった ($P < .001$)。さらに通常、医用画像の拡大に用いられる双三次内挿法による拡大画像との比較も行った。その結果、双三次内挿法の RMSE, PSNR, SSIM は 3.08, 20.2 dB, 0.984 であり、学習型超解像技術の忠実度が有意に高い結果 ($P < .001$) が得られ、超解像度技術の有用性が示された。

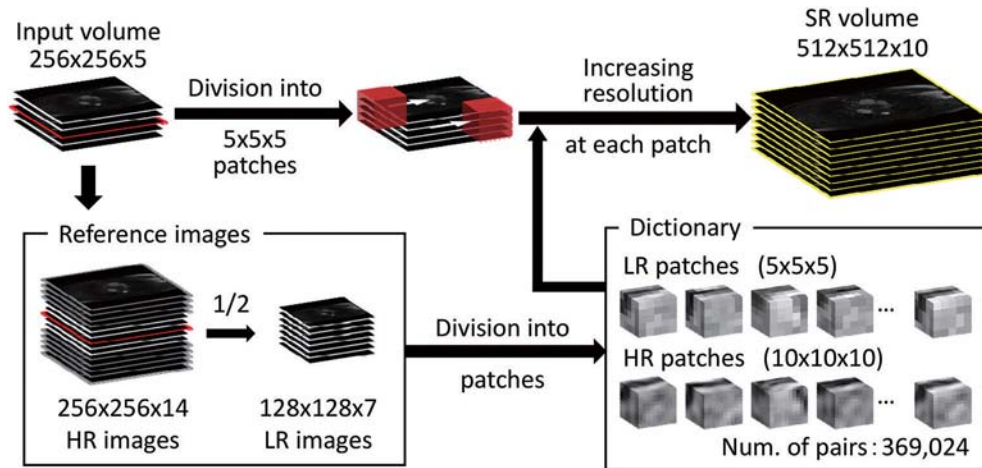


図2 3次元超解像技術の概略図

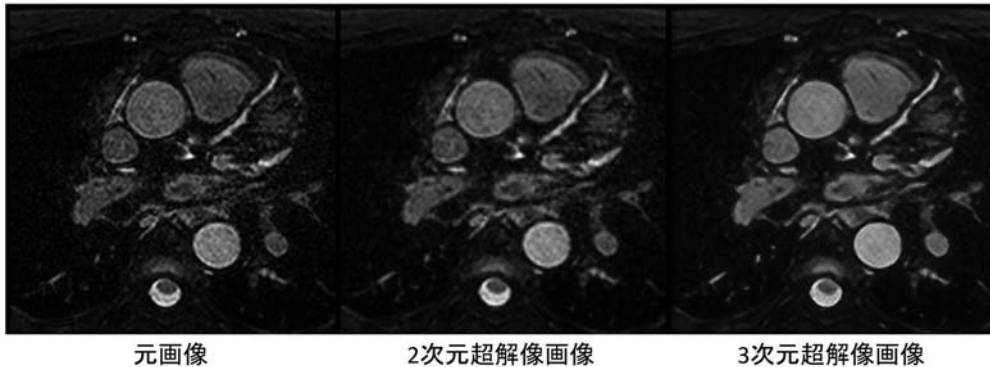


図3 元画像と超解像画像の比較

表1 忠実度の比較

n=46	2次元 超解像技術	3次元 超解像技術	P
RMSE	3.28	2.75	<.001
PSNR	21.4dB	23.6dB	<.001
SSIM	0.982	0.987	<.001

2次元超解像技術はスライス面に垂直な方向の解像度の向上が出来ない課題がある。そこで、学習型超解像技術を3次元に拡張し（図2参照）、冠動脈MRAの高解像度化に対する有用性を検討した。ここでは、患者46名の冠動脈MRAを対象に、1.5T MR装置で再構成された $512 \times 512 \times 150$ 画像をダウンサンプリングし、 $256 \times 256 \times 75$ （2次元超解像技術の場合、 $256 \times 256 \times 150$ ）の低解像度画像を生成した。この縮小画像を3次元および2次元学習型超解像技術を用いて、元画像サイズに復元したときの元画像に対する忠実度を比較した（図1参照）。3次元超解像技術のRMSE, PSNR, SSIMは2.75, 23.6 dB, 0.987で、2次元超解像技術（3.28, 21.4 dB, 0.982）より復元の忠実度が有意に高い結果が得られた（ $P < .001$ ）。さらに、画質評価の指標であるSignal-to-Noise Ratioは、3次元超解像技術が 66.7 ± 11.5 であったのに対し、2次元超解像技術が 61.7 ± 10.5 （ $P < .001$ ）で、画質においても3次元超解像技術の方が良好な画像が得られることが明らかとなった（図3参照）。

2次元超解像技術に比べ、演算量が飛躍的に増加する3次元超解像技術の演算時間は、患者データ1人分で約6時間と非常に長く、臨床で使用するのは困難である。そこで、マルチコアCPU（中央演算処理装置）のマルチスレッドプログラミングとGPGPU（グラフィックスプロセッシングユニット）のピクセルシェーダ機能を用いた並列処理により、3次元超解像技術の高速化を実施した。その結果、約1.5時間で患者データ1人分を処理することが可能となり、臨床で許容できる処理時間に抑えることができた。

[今後の研究の方向、課題]

今後の計画としては、以下の研究を順次進めていく予定である。

- ① 画質が低い低解像画像を入力した場合、超解像技術により高解像度化した画像も画質が低い課題がある。そこで、本超解像技術にAI（人工知能）を組み込み、低い画質を高画質に変換しながら高解像度化できるよう展開する。
- ② 超解像技術の有用性の実証、および厚労省の薬事申請のための試験として、大規模な評価実験を実施する。

[成果の発表、論文など]

- 1) 中山良平, 市川泰崇, 石田正樹, 宇野美緒, 後藤義崇, 永田幹紀, 北川覚也, 佐久間肇, “時空間超解像 (STSR: Space-Time Super Resolution) 技術によるシネMRIの時間分解能の向上,” 第79回日本心臓血管放射線研究会, 広島, July 2014.
- 2) 市川泰崇, 蟹井善統, 中山良平, 宇野美緒, 後藤義崇, 石田正樹, 北川覚也, 佐久間肇, “Targeted spatial frequency filtration 遅延造影CT (TSFF CTDE)における超解像度技術の応用,” 第79回日本心臓血管放射線研究会, 広島, July 2014.
- 3) 中山良平, 市川泰崇, 石田正樹, 宇野美緒, 後藤義崇, 永田幹紀, 北川覚也, 佐久間肇, “シネMRIにおける時空間分解能の向上のための時空間超解像技術,” 第42回日本磁気共鳴医学会大会, 京都, Sept. 2014.
- 4) Ryohei Nakayama, Masaki Ishida, Yasutaka Ichikawa, Mio Uno, Yoshitaka Goto, Motonori Nagata, Kakuya Kitagawa, Hajime Sakuma. “Three-dimensional super-resolution technique based on self-similarity: usefulness in whole heart coronary magnetic resonance angiography,” RSNA 2014, Chicago, Dec. 2014.
- 5) Masaki Ishida, Mio Uno, Ryohei Nakayama, Yoshitaka Goto, Tatsuro Ito, Motonori Nagata, Yasutaka Ichikawa, Kaoru Dohi, Kakuya Kitagawa, Hajime Sakuma. “Additive diagnostic value of coronary MRA in the stress cardiac MR protocol including stress myocardial perfusion MRI and late gadolinium enhanced MRI for the detection of coronary artery disease,” RSNA 2014, Chicago, Dec. 2014.

- 6) Ryohei Nakayama, Masaki Ishida, Yasutaka Ichikawa, Yoshitaka Goto, Motonori Nagata, Kakuya Kitagawa, Hajime Sakuma. "Three-dimensional Super-Resolution Technique for Whole-Heart Coronary MRA by Utilizing Graphical Processing Unit," ISMRM 23rd Annual Meeting & Exhibition, Toronto, June 2015.
- 7) Yoshinori Kanii, Yasutaka Ichikawa, Ryohei Nakayama, Masaki Ishida, Yoshitaka Goto, Motonori Nagata, Kakuya Kitagawa, Hajime Sakuma. "The usefulness of a dictionary learning post-processing technique for improving image quality of low-dose chest CT," RSNA 2015, Chicago, Dec. 2015.
- 8) Ryohei Nakayama, Yasutaka Ichikawa, Yoshinori Kanii, Masaki Ishida, Yoshitaka Goto, Motonori Nagata, Kakuya Kitagawa, Hajime Sakuma. "Improved image quality in low-dose chest CT using a new dictionary-based post-processing," European Congress of Radiology 2016, Vienna, March 2016.