

博士論文の内容の要旨

令和8年2月18日

研究審査委員会委員長 佐藤 哲大

審査委員 大崎 洋充

審査委員 佐藤 充

研究審査委員会外部審査委員

帝京大学医療技術学部 診療放射線学科

林 達也

研究課題名 「深層学習を用いた MR 画像上のアーチファクト除去に関する研究」

所属・氏名 診療放射線学研究科診療放射線学専攻 博士後期課程 相馬 朋子

Magnetic Resonance Imaging (MRI) は医療診断において欠かせない手段であるが、患者の体動、呼吸や拍動、磁場の不均一などにより多様なアーチファクトが発生する。アーチファクトは画像の質を低下させるばかりでなく、検査時間延長の原因にもなり得ることもあり、MRI 画像におけるアーチファクト除去は大きな課題である。これらに対して近年、深層学習を活用したアプローチが注目されている。複雑かつ多数の層で構成される新しい高精度ネットワークが報告される中、U-Net は、シンプルな層構造を維持しながら、依然としてセグメンテーションだけでなく画像補正に大きく貢献している。精度向上のために、Batch Normalization (BN, バッチ正規化) 層やドロップアウト層を追加することはよく選択される手段であるが、組み合わせ方によってはむしろ精度が低下することも報告されており、その影響については議論の余地がある。そこで、本研究の目的は、BN 層とドロップアウト層を組み合わせたアーチファクト除去用 U-Net ベースネットワークアーキテクチャを検討することと、そのネットワークを用いて血管拍動によるアーチファクト除去性能を検討することとした。

ネットワークアーキテクチャの検討において、拍動アーチファクトと同様に位相方向に周期的にあらわれるモーションアーチファクトを対象とした。ファントムを撮像し、アーチファクトが含まれる画像と含まれない画像を用いてデータセットを構築した。比較対象として Transformer ベースのネットワークと、U-Net の3種のバリエーション(①変更なし、②先行研究に基づき最大プーリング層後に BN 層とドロップアウト層を挿入、③デコーダーユニットの最終層に BN 層とドロップアウト層を挿入) を学習およびテストした。次に、成人ボランティアの下腿部 Short Tau Inversion Recovery (STIR) 画像を対象として、血管拍動によるアーチファクト除去性能評価を行った。アーチファクト発生条件下と抑制条件下で撮影した画像を用いてデータセットを作成し、最も精度が高かった U-Net ベースの

ネットワーク（③デコーダーユニットの最終層に BN 層とドロップアウト層を挿入）を用いてアーチファクト低減を試みた。

ネットワークアーキテクチャの検討において、BN 層とドロップアウト層を用いたネットワークは、モーションアーチファクト除去後の画像で Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)・Structural Similarity Index (SSIM) 共に大幅な改善が認められた。血管拍動アーチファクト除去の検討において、PSNR や SSIM に関してアーチファクト低減前後で有意な差は認められなかったものの、視覚評価においてはアーチファクト画像群と補正画像群の有意差が認められ ($p<0.05$)、一定のアーチファクト低減効果が示唆された。また、解像度に関する視覚評価において、アーチファクト画像群・基準画像群・補正画像群に有意差は認められなかった。

BN 層とドロップアウト層はどちらもシンプルでありながら強力なアプローチであり、使用に関して場所と組み合わせによっては精度低下を考慮する必要があることが報告されてきたが、本検討により、より汎用性の高いネットワークを作成するために役立つことが確認され、アーチファクト除去に有効に作用することが示唆された。ボランティア画像を使用した検討においても、限定的な条件下ではあるが、拍動アーチファクトの除去効果が示された。

本研究により、BN 層とドロップアウト層を適切に組み込んだ U-Net ベースのネットワークが、モーションアーチファクトおよび拍動アーチファクトの低減に寄与する可能性が示された。特に、簡便な変更でありながら、画像の質を向上させる効果が得られたことは、今後の医用画像解析分野において大きな展開が期待できる成果である。今後は、本手法をさらに拡張し、多様なアーチファクトや撮像条件に適応可能な汎用型ネットワークの開発を目指すことができる。さらに、臨床現場で即時に適用できる後処理ソフトウェアとしての応用や、リアルタイム補正機能の実装といった発展も視野に入る。本研究を礎として、深層学習技術を活用した医用画像の質向上が加速し、診断精度の向上や検査時間の短縮といった、患者および医療現場双方にとって大きな恩恵をもたらす未来が期待される。

博士論文の審査の要旨

令和8年2月18日

研究審査委員会委員長 佐藤 哲大
審査委員 大崎 洋充
審査委員 佐藤 充
研究審査委員会外部審査委員
帝京大学医療技術学部 診療放射線学科
林 達也

研究課題名 「深層学習を用いた MR 画像上のアーチファクト除去に関する研究」

所属・氏名 診療放射線学研究科診療放射線学専攻 博士後期課程 相馬 朋子

令和7年11月17日(月)の博士論文提出を受け、審査委員が個別に論文査読を行った。

令和7年12月25日(木)に第1回審査委員会を大学院演習室Cにおいて開催した。始めに本人によるプレゼンテーションを約30分間行い、その後、各審査委員による質疑応答を約50分間実施した。審査委員からは、論文の新規性及び研究の独創性、研究方法並びに研究結果に関する信頼性、技術的な裏付けと理論の展開に関して誤りがないかどうか等の確認と今後の展開についての質問がなされた。

主な指摘事項は次のようなものである。

なお、指摘に関する修正を令和8年1月13日(火)までに行い、審査委員に再提出をすることとされた。

1. ネットワーク調整手法の説明の補足

(指摘内容)

Batch Normalization および **Dropout** の作用機序について、読者が理解しやすいよう概念図等を用いて説明を補足すること。

(指摘事項への回答)

Batch Normalization による内部共変量シフトの抑制と学習安定化の概念図、および **Dropout** による過学習抑制と汎化性能向上の概念図が追加され、各手法の理論的背景と役割が明確に示された。

2. ファントム実験におけるアーチファクト生成および前処理方法の明確化

(指摘内容)

ファントム実験におけるアーチファクト生成方法および位置補正処理の実施方法について、具体的に記述すること。

(指摘事項への回答)

ファントムを手動でランダムに揺らすことによりアーチファクトを生成したこと、その振幅および揺らし方の詳細が追記された。また、位置補正処理が MRI 装置のソフトウェアではなく、MATLAB を用いて実装した後処理アルゴリズムによって行われたことが明記された。

3. ネットワーク構造およびパラメータ設定の根拠の明確化

(指摘内容)

Dropout 率の設定根拠および比較対象とした Transformer の種類について明確に記述すること。

(指摘事項への回答)

Dropout 率については、先行研究およびネットワーク構造上の役割を踏まえた設定理由が追記された。また、比較対象の Transformer として Vision Transformer を使用したことが明記された。

4. 評価結果の統計的指標の補足

(指摘内容)

定量評価結果の信頼性を示すため、標準偏差および統計的有意差の指標を記載すること。

(指摘事項への回答)

結果表に標準偏差が追加され、統計解析における p 値が追記されたことにより、評価結果の統計的信頼性が明確化された。

5. 過学習抑制に関する記述の適正化

(指摘内容)

過学習抑制効果について直接検証していない内容については、断定的表現を避け、適切な表現に修正すること。

(指摘事項への回答)

過学習抑制を直接証明する結果は得られていないため、該当する断定的記述が削除または修正され、結果に基づいた適切な表現に改められた。

6. 視覚評価の信頼性の補足

(指摘内容)

視覚評価結果の信頼性を担保するため、評価者間一致度の指標を用いて検証すること。

(指摘事項への回答)

評価者間一致度を Fleiss の κ 係数により評価し、その結果および解釈が方法および考察に追記された。これにより、本研究における視覚評価結果の信頼性が客観的に示された。

7. 総合討論における記述構成の整理

(指摘内容)

血管拍動アーチファクトに関する説明について、総合討論のみでなく前章においても記述し、研究構成の論理的整合性を明確にすること。

(指摘事項への回答)

血管拍動アーチファクトの説明が追加され、研究背景およびネットワーク適用の妥当性が明確に示された。

8. 深層学習技術の進展に関する研究の限界の明示

(指摘内容)

深層学習技術の進展を踏まえ、本研究手法の限界および今後の発展可能性について客観的に記述すること。

(指摘事項への回答)

U-Net と Transformer を組み合わせたハイブリッドネットワークなどの新たな手法について言及し、本研究の限界および将来的な研究課題が総合討論に追記された。

第2回審査委員会(最終試験)を2月13日(金)、公聴会終了後に第26演習室において開催した。審査時間は30分を目安とした。本論文の①新規性(独自性)、有用性を含めた本研究論文の意義、②本研究論文の信頼性(正当性)を確認するため研究審査委員から本論文について質疑応答を行い新規性(独自性)、有用性、信頼性を確認した。