

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Federated Learning for Medical Image Analysis
著者(和文)	DengZhipeng
Author(English)	Zhipeng Deng
出典(和文)	学位:博士(学術), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第380号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:一色 剛,山口 雅浩,小尾 高史,SLAVAKIS KONSTANTINOS,西尾 理志
Citation(English)	Degree:Doctor (Academic), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第380号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	Deng Zhipeng		
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	一色 剛	教授	審査員	西尾 理志	准教授
	審査員	山口 雅浩	教授			
		小尾 高史	教授			
Slavakis Konstantinos		教授				

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、Federated Learning for Medical Image Analysis (医療画像分析のための連合学習) と題し、英文 6 章から構成されている。

第一章 Introduction (緒言) では、機械学習を用いた画像分析手法が医療を含めた幅広い分野で急速に普及する中、同手法を医療分野で実現するために必要となる大規模な医療画像データセットにおいて、個人情報保護に関する法律や規則が大きな障害となっており、そのための有効な解決手段として、個別の医療機関で管理される医療画像データセットを共有せずに、個別データセットによるローカル学習モデル生成と、これらを集約したグローバル学習モデル生成を行う Federated Learning (連合学習) が着目されているとしている。一方で、ラベル付き医療画像データの不足、個別データセットのラベル不一致や画像特性の不一致 (ドメインシフト)、及び、個人情報保護対策 (特定データサンプルを学習モデル生成工程から削除する機構) を実現するための膨大な再学習計算コストが、医療分野において機械学習を適用するための技術課題であると指摘している。このような背景の下で、本論文は、医療画像分析のための Federated Learning において、前記の技術課題を解決するための手法を新たに提案し、既存手法との比較実験により、提案手法の優位性を実証することが本論文の目的であると述べている。

第二章 Federated Active Learning Framework (連合アクティブラーニング基盤) では、医療画像データのアンノテーション作業を連合学習基盤で効率化するための新たな手法を提案している。その中では、ローカルモデルとグローバルモデルからなるアンサンブル上でデータセットのエントロピーによって、最も学習精度向上に寄与するラベルなし画像サンプルを推定する手法を新たに導入することで、アンノテーション作業の効率化と学習精度の向上を実現している。皮膚病変の画像データセットにおける既存手法との分類精度に関する比較実験では、提案手法の明確な優位性が示されており、また、50%の画像サンプルによって提案手法で生成した連合学習モデルが、100%の画像サンプルで生成した連合学習モデルに匹敵する分類精度を達成したことが示されている。

第三章 Domain-generalized Federated Semi-supervised Learning (ドメイン汎用化による半教師あり連合学習) では、ラベルなし画像データを「教師あり」連合学習に活用する「半教師あり」連合学習において、分散管理されている各データセットのドメインシフト (画像特性の偏り) の影響を抑制するドメイン汎用化に関する新たな手法を提案している。その中では、ドメイン汎用化ギャップ推定に基づくグローバルモデル集約化手法 (Generalization-Aware Aggregation)、2 重教師モデルによる適応型疑似ラベル信頼性向上手法 (Dual-Teacher Adaptive Pseudo Label Refinement)、及び、特徴量摂動に対する疑似ラベル出力安定化手法 (Perturbation-Invariant Alignment) を新たに導入することで、ラベルなしデータを多く含む連合学習の学習精度の向上と、ドメインシフトの影響抑制を達成している。3 種類の MRI 画像データセットにおいてドメインシフトを疑似的に再現 (一つのデータセットを学習時に除外した連合学習モデルに対し、除外したデータセットで分類精度を計測) した既存手法との比較実験では、いずれのデータセットにおいても提案手法の明確な優位性が示されている。

第四章 Federated Learning for Label Set Mismatch (ラベルセット不整合における連合学習) では、分散管理されている各データセットのラベルが一致しない (ラベル名不一致、分類クラスの欠落など) 場合でも高精度の分類精度を達成するための新たな手法を提案している。その中では、各データサンプルのエントロピーによる信頼性推定手法 (Uncertainty Estimation)、ラベルなしデータの疑似ラベル生成手法、及び、各ドメインのラベル分布に基づくグローバルモデル適応型集約化手法 (Adaptive Weighted Proxy Aggregation) を新たに導入することで、ラベルセット不整合の状況における連合学習の学習精度の向上を実現している。胸部 X 線検査画像データセットと皮膚病変画像データセットにおいて、ラベルセット不整合を疑似的に再現した既存手法との比較実験では、いずれのデータセットにおいても提案手法の明確

な優位性が示されている。

第五章 Federated Client Unlearning (連合クライアントアンラーニング) では、欧州の一般データ保護規則 (GDPR) などの対策として必要となる、特定のデータサンプルを学習用データセットから削除する機能の実装に関する新たな手法を提案している。その中では、対照学習手法 (Contrastive Learning) を応用した対照アンラーニング手法 (Model-Contrastive Unlearning) と、対照アンラーニング手法によって生成されたローカルモデルの局所的学習特性とグローバルモデルの大局的学習特性を効率的に融合するための周波数変換型モデル統合手法 (Frequency-Guided Memory Preservation) を新たに導入することで、少ない連合学習の繰り返し数で、削除するデータサンプルの影響をグローバルモデルから排除しながら、グローバルモデルの大局的学習性能の保持を実現している。頭蓋内出血画像データセットと皮膚病変画像データセットにおける既存手法との大局的分類精度、アンラーニング処理に要する計算コスト、及びアンラーニング効果 (対象データサンプルを排除して再学習したグローバルモデルにおける削除データサンプルの分類精度との近接性) に関する既存手法との比較実験では、いずれのデータセットにおいても提案手法の明確な優位性が示されている。

第六章 Conclusion (結言) では、本論文で得られた結果をまとめ、残された課題を述べている。

以上を要するに、本論文は、医療分野における機械学習による画像分析手法において、ラベル付き医療画像データの不足、個別データセットのラベル不一致や画像特性の不一致、及び個人情報保護対策機能の実現の技術課題に対し、連合アクティブラーニング手法によるデータアノテーション作業の効率化、半教師あり連合学習におけるドメイン汎用化手法、ラベルセット不整合における連合学習精度向上手法、並びに、連合学習基盤における効率的なアンラーニング手法を新たに提案し、医療画像分類精度とアンラーニング効果を、様々な医療画像データセットにおける実験を通じてその優位性を実証したものであり、工学上および学術上貢献することが大きい。よって、我々は本論文が博士 (学術) の学位論文として十分価値があるものと認める。

注意: 「論文審査の要旨及び審査員」は、東京科学大学リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

#### **Journal Papers :**

1. Deng, Zhipeng, Yang, Yuqiao, and Suzuki, Kenji, “Federated Active Learning Framework for Efficient Annotation Strategy in Skin-lesion Classification,” *Journal of Investigative Dermatology*, May. 2024.
2. Deng, Zhipeng, Zhe, Xu, Tsuyoshi Isshiki, and Yefeng, Zheng, “FedSemiDG: Domain Generalized Federated Semi-supervised Medical Image segmentation,” *Medical Image Analysis*, Submitted Jan. 22, 2025. Under review.

#### **International Conference Papers :**

3. Deng, Zhipeng, Yang, Yuqiao, Suzuki, Kenji and Jin, Ze, “FedAL: An Federated Active Learning Framework for Efficient Labeling in Skin Lesion Analysis,” 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Prague, Czech Republic, Oct. 2022.
4. Deng, Zhipeng, Luo, Luyang and Chen, Hao, “Scale Federated Learning for Label Set Mismatch in Medical Image Classification,” *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, Vancouver, Canada, Oct. 2023.
5. Deng, Zhipeng, Luo, Luyang and Chen, Hao, “Enable the Right to be Forgotten with Federated Client Unlearning in Medical Imaging,” *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, (MICCAI) Marrakech, Morocco, Oct. 2024.*