



細胞又は組織の電気特性を活かしたがんの早期診断技術の開発へ前進

—生体組織電気特性分布の高精度推定を可能とする磁気共鳴電気特性トモグラフィ—

■研究の概要

千葉大学フロンティア医工学センターの兪文偉教授、大学院博士後期課程研究員 Adan J. Garcia Inda、及び Singapore University of Technology and Design の Prof. Huang Shaoying、国立研究開発法人産業技術総合研究所 デジタルアーキテクチャ研究センターの Nevrez Imamoglu 主任研究員らの研究チームは、磁気共鳴電気特性トモグラフィ (Magnetic Resonance Electrical Property Tomography: MREPT) と機械学習 (AI) を用いたモデルの統合により、高いノイズ耐性と精度で人体の組織が持つ電気特性(誘電率・導電率の分布など)を推定する技術を開発しました。

物理解析モデルと機械学習の融合により、これまで観察や経験、試行錯誤の必要性が障壁となっていた MREPT の課題を解決し、医療応用に向けた大きな前進となりました。

今後、がん化組織と非がん化組織間の電気特性のコントラストを用いた医療診断が可能となれば、がんの早期診断の実現に貢献できることが期待されます。

本研究成果は、2022年5月9日に、学術誌 IEEE Transactions on Image Processing, Vol.31 で公開されました。

■研究の背景：

ヒトの細胞または組織は電気特性 (図1) を持ち、それらががん化すると、初期段階から電気特性が変化します。したがって、体内生体組織の電気特性の検査は、がん組織の早期診断に役に立つ可能性があり、がんのバイオマーカー (疾患の有無や進行状態を示す指標) として期待されています。

磁気共鳴電気特性トモグラフィ (Magnetic Resonance Electrical Property Tomography: MREPT) は、MRI 検査にもよく使われる磁気共鳴画像システムの計測結果を用いて計算することにより、電気特性を推定する方法です (図2) 注1)。既存の体内組織電気特性推定法注2) と比べて高い空間分解能注3) が得られるため、MR 撮像システムだけでも非常に小さな特徴まで認識できるのが一番の特長です。

ほとんどの MREPT 方法は、物理解析モデルにおける仮説の不十分さや、数値計算エラーによる推定結果の歪み(アーティファクト)の克服が課題となります。これらのアーティファクトを軽減するために必要とされる安定化項注4) の係数値の選択は、観察と経験に大きく依存する上に、サンプルごとの試行錯誤が必要なため、MREPT の医療診断応用にとって、大きな障壁となっていました。

また近年、マクスウェル方程式を利用せずダイレクトに B1 マップから電気特性分布を推定させる、エンドツーエンド (end-to-end) 注5) のニューラルネットワーク注6) による MREPT (NN-MREPT) も提案されましたが、未学習のサンプルを正確に推測することが困難で、汎用性に欠けるという問題がありました。

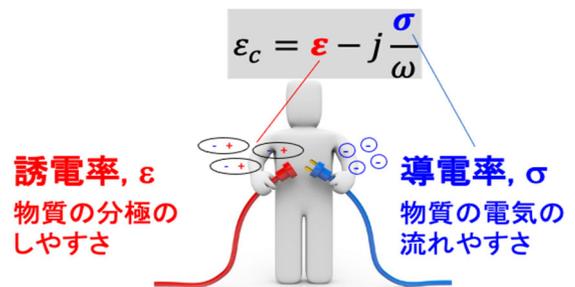


図1 生体組織の電気特性

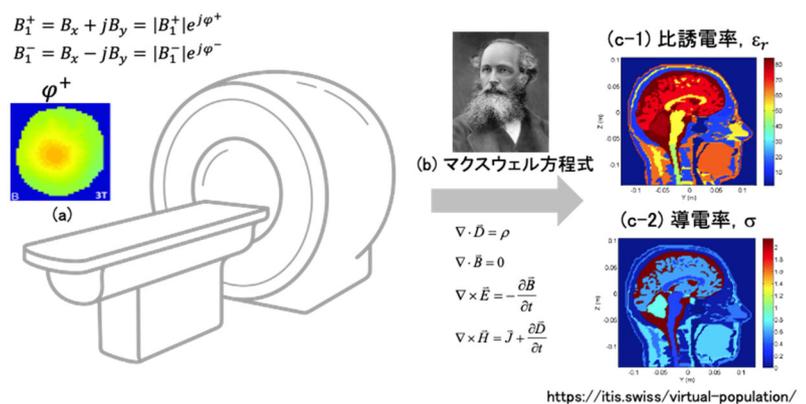


図2 MREPT の概略図: (a) MRI から測定した推定用データ、(b)マクスウェル方程式に基づく物理解析モデル、(c)推定された電気特性の分布図

■ 研究の成果：

本研究のポイントは、この2つの課題を解決するため、物理解析モデルにおける仮説の不完全性とアーティファクトを補正するための係数マップを機械学習手法であるニューラルネットワークにより更新したことです。研究チームは、この更新された係数マップを用いた物理解析モデルで細胞や生体組織の持つ電気特性を推定し、サンプルデータとの誤差を用いてニューラルネットワークをさらに更新していくという、物理結合神経回路網 MREPT (Physics Coupled Neural Network-MREPT) (図3) を提案しました。

この手法により物理解析モデルとニューラルネットワークを結合することで、脳のデジタルファントム^{注7)}を含むサンプルデータを用いた数値実験を行うことが可能となりました。それにより、それぞれ単独では解決できなかった問題を克服できるようになったため、この研究分野における既存の代表的な解析方法よりも高い精度での画像の取得を達成することができました。さらに、NN-MREPT よりも未学習サンプルデータに対し高い汎化性を示すことができました。本研究は MREPT の主要課題を解決し、がんの早期診断への大きな前進につながったと考えられます。

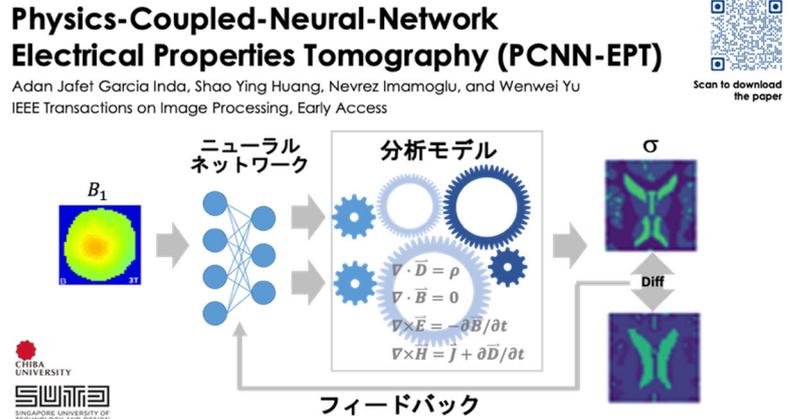


図3 物理結合神経回路網 MREPT (PCNN-MREPT) のフローチャート

■ 今後の展望

今後は、診療に携わる医療従事者との緊密な連携にて、患者様の磁気共鳴ラジオ周波数場データを用いた生体組織の電気特性の推定および検証実験を行い、MREPT の更なる課題を明らかにしたうえで解決し、MREPT の臨床応用の早期実現を目指します。

■ 用語解説

注1) 磁気共鳴電気特性トモグラフィ: ラジオ周波数の電流によって発生する電磁場を用いて、電磁気学の基本を記述する支配方程式であるマクスウェル方程式に基づいた物理解析モデル(時間、空間等の値および値の関係の規定する一連の数学方程式)を数値的に解くことで電気特性を推定する。

注2) 体内組織電気特性推定法: 生体内の生体組織を体外で計測し、推定する手法。例として、Electrical impedance tomography (EIT)、Magnetic induction tomography (MIT)、Magnetic resonance electrical impedance tomography (MREIT)、Magnetoacoustic tomography with magnetic induction (MAT-MI) などがあります。

注3) 空間分解能: 空間または物体内で識別可能な2点間の距離のこと

注4) 安定化項: 方程式の不安定解(振動やアーティファクト)を抑えるためにその方程式に導入される補正項

注5) エンドツーエンド (end-to-end): 入力データが与えられてから結果を出力するまで多段の処理過程

注6) ニューラルネットワーク: 脳内の神経細胞(ニューロン)のネットワーク構造を模した数学モデル。データから学習できるという特徴を持っている。

注7) デジタルファントム: 評価中の部位と同等な特性分布を持つイメージデータ

■論文情報

タイトル : Physics-Coupled Neural Network Magnetic Resonance Electrical Property Tomography (MREPT) for Conductivity Reconstruction

著者 : Adan Jafet Garcia Inda, Shao Ying Huang, Nevrez İmamoğlu, Wenwei Yu

雑誌名 : IEEE Transactions on Image Processing, Vol.31

DOI : 10.1109/tip.2022.3172220

本件に関するお問い合わせ

〈研究内容について〉

千葉大学フロンティア医工学センター・俞 文偉

TEL: 043-290-3231 メール : yuwill@faculty.chiba-u.jp

〈報道担当〉

千葉大学企画部渉外企画課広報室

TEL: 043-290-2018 メール : koho-press@chiba-u.jp