

近赤外線医療診断のための輻射輸送計算とサロゲートモデルの構築

Constructing surrogate models and radiative transfer calculations for near-infrared medical diagnosis

矢島 秀伸

筑波大学 計算科学研究センター

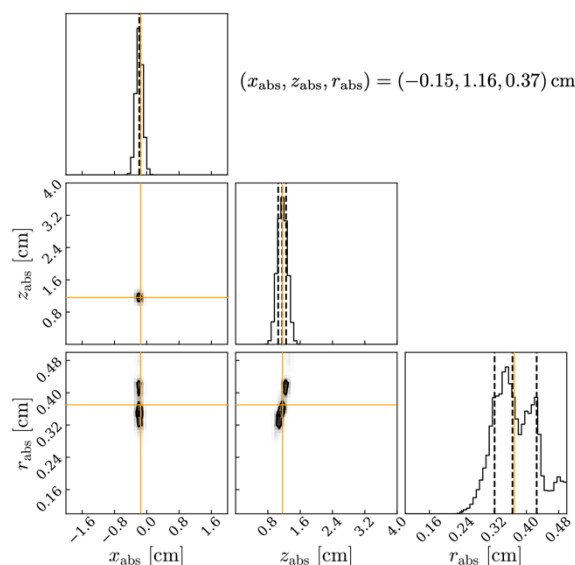
1. 研究目的

本プロジェクトは、頭部外傷による脳出血・脳浮腫、および甲状腺癌・胃癌の早期発見・継続的モニタリングを実現するため、近赤外線拡散光トモグラフィーを用いた非侵襲的診断システムの構築を目的とする。現状、脳出血の診断には X 線 CT や MRI が用いられているが、装置の大型性や被曝・造影剤リスクから高頻度での使用が困難であり、高リスク患者の常時モニタリングには適していない。また、癌においても自覚症状が現れた時点で既に進行しているケースが多く、早期発見の手段が求められている。これらの課題に対し、本研究では波長 700~1100nm の近赤外線パルスを用いた小型・非侵襲の計測装置により、ベッドサイドおよびウェアラブル環境でのスクリーニング診断、常時モニタリングを可能にする。スーパーコンピュータによる大規模並列計算で高精度な輻射輸送計算を実施し、得られた時間分解波形データを教師データとして機械学習モデルを構築する。さらに、AI サロゲートモデルとマルコフチェーンモンテカルロ法を組み合わせることで、1 分以内の高速画像再構成と異常検知、および診断精度の確率的評価を行うシステム構築を目指す。

2. 研究成果の内容

本研究では、時間分解拡散光トモグラフィー (TD-DOT) における数値シミュレーションの高速化を目的として、ニューラルネットワークを用いた AI サロゲートの開発に取り組んだ。TD-DOT は脳出血や腫瘍など生体組織内の異常を診断する有力な手法であるが、診断に必要な数値シミュレーションでは膨大なパラメータの組み合わせを探索する必要があり、多大な計算資源を要するという課題があった。この課題を解決するため、ray-tracing 法に基づく輻射輸送シミュレーションを活用し、640 種類の異なる吸収体パラメータの組み合わせに対して高品質な教師データを生成した。このデータをもとに、任意のパラメータに対する時間分解波形シグナルを高速に推定できる AI サロゲートモデルを構築した。学習においては、ガウスノイズを付加したデータセットと付加しないデータセットの 2 種類を用いて比較検討を行った。その結果、ノイズを付加したデータで学習したモデルが優れた性能を示した。学習に使用していない未知のパラメータに対しても時間分解シグナルを高精度に再現し、その誤差は教師デ

ータのノイズレベルと同程度に抑えられた。これは、モデルが高いロバスト性と汎化性能を有することを示している。さらに、1 回の推定にかかる計算時間は約 0.002 秒であり、輻射輸送方程式を直接解く従来のシミュレーションと比較して 100 万倍以上の高速化を達成した。この飛躍的な計算速度の向上により、逆問題解析の効率化が期待されるとともに、リアルタイムでの臨床診断への応用可能性が示された。右図は、このサロゲートモデルを用いたマルコフチェーンモンテカルロ法によるパラメータ推定である。高精度かつ高速に異常部位を判定し、エラーも小さいことを示した。



3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

高精度な輻射輸送計算を 640 種類以上の大量のパラメータの組み合わせに対して実施するには膨大な計算量が必要であり、個別の研究環境では実現困難であった。本プログラムの支援により GPU クラスタを用いた大規模並列計算が可能となり、多数のパラメータに対する計算を効率的に実施することで、質の高い教師データを十分な量にわたって準備することができた。これが高精度なニューラルネットワークエミュレータの構築に直結しており、本プログラムの利用が成果を得る上で必要不可欠であった。

4. 今後の展望

本研究では高速かつ高精度なニューラルネットワークエミュレータの構築に成功したが、今後はさらなる診断精度の向上に向けて以下の取り組みを進める。まず、現在のモデルでは限られたパラメータ範囲での学習にとどまっているため、出血の形状・大きさ・位置など、より多様なパラメータを網羅した輻射輸送計算を実施し、教師データの拡充を図る。これにより、実際の臨床で想定される多様な症例に対応可能な汎用的な診断モデルの構築を目指す。次に、実用化に向けた課題として、毛髪や皮膚による光の散乱・吸収の影響を適切にモデル化し、その寄与を除去する手法の開発に取り組む。個人差による頭皮や頭蓋骨の厚みの違いなどに起因するシグナルのばらつきに対しても安定した解析手法を確立することで、出血判定を安定的かつ高精度に行えるシステムの実現を目指す。これらの取り組みにより、リアルタイム臨床診断への実装を推進する。

5. 成果発表

学際共同利用成果リストとして別途提出の通り

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	10080		
Miyabi-G	○	22680		
Miyabi-C	○	7200		
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				