

輻射輸送と機械学習によるヒト頭部の近赤外線診断

Radiative transfer simulations and machine learning for near-infrared imaging of the human head

矢島 秀伸

筑波大学 計算科学研究センター

1. 研究目的

現在先進国を中心に高齢化が進んでいる。そのような状況において、病気の予防や初期の診断は健康な社会を維持する上で極めて重要となっている。特に頭部の血管疾患は日本でも毎年 10 万人が死亡する上位の死因の一つである。本研究では頭部の血管疾患に着目し、大規模数値シミュレーションによって診断システムを開発するのが目的である。また、甲状腺癌や乳癌も視野に入れて計算コードの開発を行う。本申請では、これまで申請グループが学際共同利用のプロジェクトで培ってきた計算コードの開発、解析方法をフルに生かし、Cygnus、Wisteria のスーパーコンピュータを活用する事で膨大なパラメータスペースでの輻射輸送計算、そして機械学習による診断システムの構築を目指す。

2. 研究成果の内容

a) 頭部をモデルにした輻射輸送計算と光音響波計算

計算設定としては頭部を頭蓋骨とそれ以外に分けて脳内を一様媒質とした。その中で 2 次元グリッドを考え、血管（強い吸収体）を配置し、光パルス照射に対する反応を調べた。まず、輻射輸送計算によって、頭部の光吸収マップを作成し、音響波の発生に関して分布を得た。その後、CIP 法による波動方程式の計算により、音波の伝播について計算を行った。結果として、音波は頭蓋骨で反射・屈折をしながら、一部の音波は頭皮まで伝わり検出可能である事が分かった。そして、その音波の時間分解シグナルから機械学習を行い、血管位置の解析モデルを作成した。結果として、複数の血管、異なる大きさの血管に関しても、多くの表層位置において 90%以上の確率で判定可能である事を示した。輻射輸送計算、音波計算を高精度に頭部に適用した計算例はこれまで無い。したがって、我々の結果は光音響が頭部血管イメージングに適応可能である事を示した重要な例である。

b) 球面 wavelet を用いた輻射輸送計算コードの開発

我々が開発した輻射輸送計算コード TRINITY を改良し、球面 wavelet を用いて自動的に角度分解能を調整出来るようにした。輻射輸送計算においては、散乱過程において角度に関するループ計算がボトルネックとなる。しかしながら、光イメージングに

においては、入射光が細いレーザーパルス光であることと、強い前方散乱を伴う非等方散乱が起きるため高い角度分解能が求められる。一方で、深部にいくにつれ輻射場は等方に近づいていき高い角度分解能は必要となくなっていく。そこで、球面 wavelet を用いて、各グリッド点における輻射場の非等方性の度合いにより角度分解能のレベルを自動的に変化させる計算コードを開発した。これにより、計算精度を落とさずに計算速度を3倍以上速める事に成功した。

c) 機械学習による生体模擬物質での吸収体判定モデルの作成

生体模擬物質ファントムに対する光パルス照射実験を想定した数値シミュレーションを行い、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作成した。チューニングの結果、異なる大きさ、複数の吸収体位置に関して精度良く判定出来る解析モデルを作成する事に成功した。また、同じセッティングによる拡散近似の輻射輸送計算、逐次的な逆問題解析を用いた先行研究と比較を行った。先行研究では、吸収体の位置がシャープに捉えられず、人工的になだらかに広がる。一方で、我々の計算手法ではシャープに吸収体位置を捉える事に成功した。これにより、高精度な輻射輸送計算と機械学習による逆問題解析が、異常部位の判定精度を大きく向上させている事を示す事が出来た。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

学際共同利用によって大規模な並列計算が可能となり、光イメージングで要求される空間分解能を達成する事が出来た。また、可能な並列コア数も数百以上をスムーズに使う事が出来たため、上記のシミュレーションやコード開発を現実的なタイムスケールで実行する事が可能であった。また、Cygnus の GPU 並列計算を用いて計算コードの開発を行う事が出来た。計算コードはほぼ完成しつつあり、テスト計算においては、CPU 計算の結果を再現しつつ計算速度を数倍程度加速させる事が出来ている。このような大規模計算、GPU 計算高速化にチャレンジ出来る環境が得られた事は本プロジェクトの課題を進める上で非常に有用であった。

4. 今後の展望

上記の研究により、臨床応用に向けて土台となる計算コードの開発やテスト計算を実行する事が出来た。今後の展望としては、頭部外傷による脳出血に着目し、数値モデルを作成していく。具体的には頭部の表層付近 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ を 1 mm の空間分解能で輻射輸送計算を行う。脳出血部位の大きさ、位置を変えて頭皮での近赤外線シグナルを計算し、機械学習により解析モデルを作成する。そして、近赤外線イメージングによって、どの程度の出血や位置に関して高精度に判定出来るのか明らかにする。

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	追加配分
Cygnus	○	11,340	0
Wisteria/BDEC-01	○	187,000	0

※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。