

拡散光トモグラフィによる異常部位診断を大幅に高速化する AI モデルを開発

拡散光トモグラフィは、近赤外線を用いて生体内部の異常部位を非侵襲的に診断する新しい医療技術です。この診断を高精度に行うための光輸送シミュレーションを、従来の 100 万倍以上の速さ（約 2 ミリ秒）で実行する AI（人工知能）モデルの開発に成功し、リアルタイム診断への道を切り拓きました。

近赤外線を使った「拡散光トモグラフィ」は、脳出血や悪性腫瘍などの疾患において、生体内部の異常部位を発見する診断技術として近年用いられています。この手法では、体を傷つけたり放射線を使うことなく、光を生体組織に照射して体内の異常を検出することができます。しかし、高精度な診断を行うには、光の伝わり方を記述する「光輸送方程式」を数値シミュレーションで解く必要があり、1 回のシミュレーションに数時間を要するため、リアルタイム診断への応用は困難でした。

本研究では、この数値シミュレーションを超高速に代替する、ニューラルネットワークを用いた機械学習モデルを開発しました。大量のシミュレーション結果を学習させたこのモデルは、異常部位の位置やサイズを入力すると、検出器で得られる時間変化の光シグナルを瞬時に出力します。学習に使われていないデータに対しても少ない誤差でシグナルが得られることも確認されました。このモデルでは約 2 ミリ秒という極めて短時間でシグナルが得られ、従来の数値シミュレーションの 100 万倍以上の高速化を達成しました。これにより、診断において考慮すべき大量のパラメータ探索が現実的になります。

さらに、このモデルを統計的なサンプリング手法と組み合わせることで、観測された光シグナルから異常部位の位置や大きさを推定することにも成功しました。本研究の成果は、脳出血や腫瘍のリアルタイム診断に向けた基盤技術になると期待されます。

研究代表者

筑波大学計算科学研究センター

堀江 秀 研究員

矢島 秀伸 教授

研究の背景

脳出血や悪性腫瘍は世界的に主要な死因の一つであり、治療成績の向上には体内の異常部位の早期発見が不可欠です。そのための診断技術の一つである近赤外線を用いた「拡散光トモグラフィ^{注1}」は、光を生体組織に照射して内部の異常を検知するもので、体を傷つけず放射線も使わないことから、近年、世界中で研究が進んでいます。しかしながら、この手法で高精度な診断を行うためには、光の生体内での複雑な伝わり方を記述する「光輸送方程式^{注2}」を数値シミュレーションにより解く必要があり、スーパーコンピュータを用いても1回のシミュレーションには数時間がかかります。さらに、異常部位の位置、大きさ、形状など、考慮すべきパラメータは膨大であり、あらゆるパターンを網羅したシミュレーションを行うことは現実的には不可能でした。このため、実際の医療現場でのリアルタイム診断への応用は非常に困難な課題となっていました。

研究内容と成果

本研究では、光シグナルの時間変化に着目した拡散光トモグラフィにおける数値シミュレーションを超高速度に代替する、ニューラルネットワークを用いた機械学習モデルを開発しました（図1）。まず、異常部位の位置やサイズのパラメータについて、数百通りの組み合わせで光輸送（光の伝播）の数値シミュレーションを実施しました。このシミュレーションでは、星や銀河の形成を研究する宇宙物理学の分野で培われた光輸送の知見と数値計算技術を応用しました。このようにして得られた数値シミュレーション結果、すなわち各パラメータの組み合わせに対応する検出器での光シグナルの時間変化を、ニューラルネットワークに学習させました。

学習済みのモデルは、異常部位の位置やサイズを入力として与えると、各検出器で得られる時間変化の光シグナルを出力します。その予測時間は約2ミリ秒であり、従来の数値シミュレーションでは計算に数時間を要するのに対し、100万倍以上の高速化を達成しました。また、出力されるシグナルの誤差はシミュレーション結果と比べて十分に小さく、高い精度で再現できることが確認されました（図2）。この大幅な高速化により、これまで計算コストの観点から困難だった大量のパラメータ探索が現実的になります。

さらに、このモデルをマルコフ連鎖モンテカルロ法^{注3}という統計的なサンプリング手法と組み合わせることで、実際に観測された光シグナルをもとにした異常部位の位置や大きさの推定にも成功しました（図3）。

今後の展開

本研究では、拡散光トモグラフィにおいて、数値シミュレーションの範囲内で、機械学習により異常部位の位置や大きさを少ない誤差で高精度に推定できることを示しました。現在は、数値シミュレーションに基づく検証段階にありますが、今後、臨床データを用いた応用を進め、より実用的な診断技術の開発を進めます。将来的には臨床現場における脳出血や腫瘍のリアルタイム診断への応用が期待されます。

参考図

生体組織を模したシミュレーション

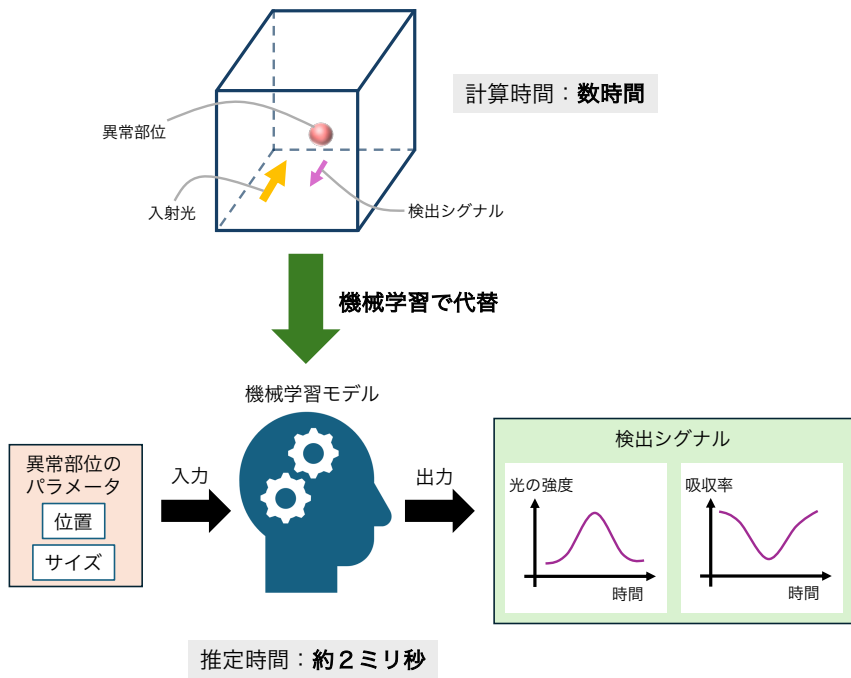


図1 本研究の概要図

生体組織を模した光輸送シミュレーションでは、近赤外線を入射し、検出器で得られるシグナルが異常部位の位置やサイズのパラメータを反映する。本研究では 640 通りの異常部位パラメータの組み合わせについて数値シミュレーションを実施し、得られた異常部位パラメータと検出シグナルの対応関係を教師データとして機械学習モデルに学習させた。学習済みモデルが出力する検出シグナルは、シミュレーション結果と比べて誤差が十分に小さく、高い精度で再現できることが確認された。また、シミュレーションの計算時間が数時間に及ぶのに対し、機械学習モデルでは約 2 ミリ秒という極めて短時間で推定できる。

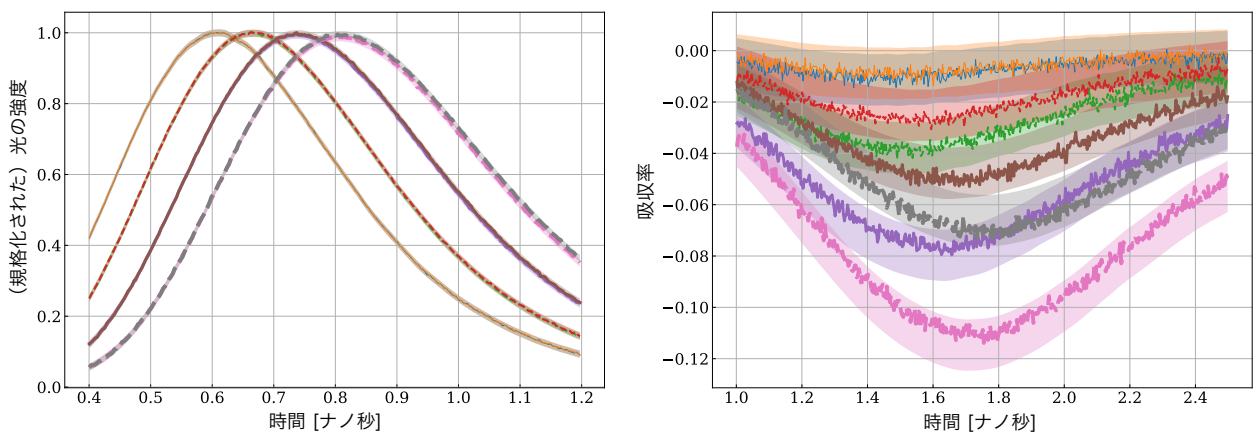


図2 機械学習で予測された光シグナル

8箇所に配置された検出器で得られる規格化された光の強度（左）と吸収量（右）。実線と破線はそれぞれ機械学習モデルで予測されたシグナルを示し、影は真のシグナル（数値シミュレーションで得られたシグナル）に学習時に付与したノイズの範囲を表している。予測されたシグナルはノイズの範囲内に収まっており、高い精度で再現されていることが確認できる。

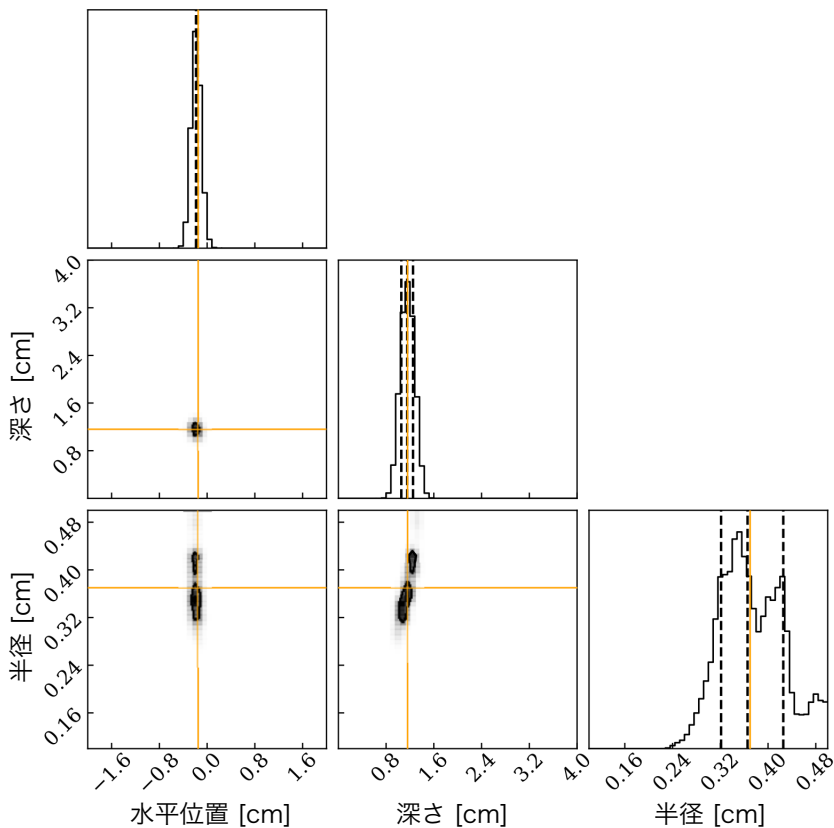


図 3 機械学習モデルと統計的サンプリングを組み合わせ推定した異常部位のパラメータの確率密度分布

機械学習モデルとマルコフ連鎖モンテカルロ法を組み合わせ、異常部位の水平位置・深さ・半径を同時に推定した。図の2次元プロットでは、色が濃い（黒い）ほどその値である可能性が高いことを示す。1次元プロットの実線は確率密度関数を表し、破線はデータのばらつきの範囲とその中心的な値を示している。中央の線が中央値、左右の線がそのばらつきを幅を表す。オレンジ色の線は真の値を表しており、推定結果がこれとよく一致していることから、本手法により異常部位の位置や大きさを高い精度で推定できると考えられる。

用語解説

注1) 拡散光トモグラフィ

生体組織に近赤外線を照射して、体内で散乱や吸収を繰り返した光を生体表面で検出し、その内部構造を推定する方法。近赤外線は血液（ヘモグロビン）に吸収されやすいため、検出光は出血や腫瘍などの異常部位の影響を反映する。この特性により、生体内部の異常部位の位置や大きさを推定できる。

注2) 光輸送方程式

媒質中での光の伝播を記述する方程式。時間（1次元）、空間（3次元）、伝播方向（2次元）の合計6次元の方程式で、散乱を考慮すると積分微分方程式となるため、解析的に解くことはできない。数値的に解くには、スーパーコンピュータを用いても非常に計算コストが高い。

注3) マルコフ連鎖モンテカルロ法

観測データをもとに、未知のパラメータの確率分布をランダムサンプリングによって推定する統計的手法。本研究では、観測された光シグナルに対して異常部位の位置や大きさのパラメータがどれだけ整合するかを評価しながら大量のサンプリングを繰り返し、異常部位のパラメータを推定した。

研究資金

本研究は、科研費による研究プロジェクト（21H04489）と創発的研究支援事業による研究プロジェクト（JPMJFR202Z）の一環として実施されました。

掲載論文

- 【題名】 Development of a neural network predicting signals for time-domain diffuse optical tomography
(時間領域拡散光トモグラフィのためのシグナルを予測するニューラルネットワークの開発)
- 【著者名】 S. Horie, H. Yajima, M. Abe, and M. Umemura
- 【掲載誌】 *Biomedical Engineering Letters*
- 【掲載日】 2026年4月18日
- 【DOI】 10.1007/s13534-026-00578-9

問合わせ先

【研究に関すること】

堀江 秀 (ほりえ しゅう)
筑波大学 計算科学研究センター 研究員
URL: <https://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/home/ja/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学 計算科学研究センター 広報・戦略室
TEL: 029-853-6260
E-mail: pr@ccs.tsukuba.ac.jp