HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	後方散乱光空間分解計測を用いた高確度な生体内層状吸収分布再構成アルゴリズムの開発と二次元イメージングへの応用［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	西田, 和弘
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第15087号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85554
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kazuhiro_Nishida_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (情報科学)　　氏名　西田　和弘

審査担当者　主　査　准教授　工藤 信樹
副　査　教　授　平田 拓
副　査　教　授　橋本 守

学位論文題名

後方散乱光空間分解計測を用いた高確度な生体内層状吸収分布再構成アルゴリズムの開発と二次元イメージングへの応用
（Development of highly accurate reconstruction algorithm of layered absorption distribution in living body using spatially resolved measurement of backscattered light and its application to two-dimensional imaging）

近年, 高齢化の問題や健康志向の高まりにより, 医療の進化に向けた取り組みが絶え間無く進められている. 生体透過性の高い近赤外光を用いて生体の内部情報を取得する研究もそのひとつである. しかし, 生体は強い散乱特性を持つため内部のイメージングや吸収分布の定量的解析は難しい. 生体の断層イメージングについては, 原理的可能性が示されてきたものの, これまでに提案された数々の手法には装置規模, 演算時間, 確度, 精度, 画像品質など臨床応用に向けた課題が残されており, これらを克服する決定的な手法は確立されていない.

本研究では, ヒトや動物の体表下 1〜2 cm の領域にある二次元もしくは三次元のマクロスコピックな吸光構造のイメージングの実現を目標に, 後方散乱光の空間分解計測により不均一に分布する吸収体分布を可視化する断層イメージングの手法を開発している. 実用性の高い装置の実現には, 安価で簡便に実現できる連続光計測装置で拡散性散乱体である生体からの後方散乱光を空間分解計測し, 逆問題を解くことにより吸収分布の断層像を得る手法が適している. しかし, 吸収係数と透過光量の対数値には線形な関係が成り立っていても散乱体内部を伝搬する光の経路にはばらつきがあるため, この逆問題はそのままでは非線形問題となる. そこで本研究では, 繰り返し演算により非線形な逆問題を解く新たな手法を提案している.

第一に, 後方散乱光の空間分解測定結果から, 層状吸収体の一次元吸収係数分布を高確度に推定する手法を開発している. まず, 生体を散乱体内部における光子伝搬経路のばらつきを考慮した非線形モデルとして定式化し, このモデルに基づいて, 非線形問題を繰り返し演算により各層の吸収係数の推定値を順次更新し収束させることにより解く手法を採用している. 繰り返し演算には, モンテカルロ法など計算時間のかかる順方向モデルの計算は含まれておらず, 軽い計算負荷で非線形解を安定に得ることができる. さらに, 開発手法は吸収係数の不均一性が強い媒質であっても有効であることを確認している.

次に, モンテカルロ法を用いた光伝搬シミュレーションにより提案手法から得られる解の特徴を分析し, 提案法が様々なノイズに対して十分な耐性を持つことを確かめている. また, 吸収係数分布推定結果の散乱係数依存性を調べ, 一般的な生体組織の散乱係数の範囲であれば, 提案法が実用的なロバスト性を持つことを確認している. さらに, 生体組織を模擬したモデルファントムを用いて得ら

れた実測結果から吸収係数分布を推定する実験も行っており, シミュレーションと実験の両面から提案手法の可能性と限界を検証している.

第二に, 上記で提案した層状吸収体の一次元吸収係数分布推定法を, 二次元断層イメージング法へ拡張する手法を検討している. 二次元への拡張では, 単純に未知数を層状構造からピクセル構造に展開し, そのまま提案原理を適用することも可能である. しかしその方法では未知数が大幅に増大するため, 安定した収束解を求めることは難しい. そこで本研究では, 空間分解計測素子を走査することで多次元化する方法を提案している. さらに, 深部のいくつかのピクセルを一つにまとめて一旦大まかな吸収係数分布を推定し, その後表層のピクセルから順次詳細な吸収係数を決定していくことで未知数を大幅に低減化する新たな再構成手法を提案している, 最後にこれらを組み合わせた二次元断層イメージングの結果を報告している.

まず, 提案手法を用いた二次元断層イメージングの実現可能性をモンテカルロシミュレーションにより確認している. 多数の推定画像の分析から, 吸収係数の推定誤差と空間分解能は, 浅い領域では良好な結果が得られるものの, 推定対象が深くなるとともに劣化する傾向にあることを明らかにした. 他方, 劣化の程度には一貫性があり, 適切な画像処理により修正できる可能性があることも指摘している. また, 複数の吸収体に対して再構成を行った場合, 逆問題解法における吸収体同士の相互干渉は少なく, 再構成画像の歪みも小さいことも確認している. これらの検討より提案手法は, 断層像再構成法としては定量化の点で改善の余地は残るものの, 簡便な装置で安定した断層イメージングを実現できることを明らかにしている.

これを要するに, 本論文を通じて筆者は高確度な生体内吸収分布再構成法を新たに開発し, その有効性を一次元の層状吸収体を用いたシミュレーションや実験を通して検証している. さらに, 空間分解計測素子の走査により再構成法を二次元に拡張し, その有効性と実用性を実証している. これらの知見は, 安全安心な近赤外光を用いたマクロスコピックな生体内部構造イメージングの臨床応用実現に向けて貢献するところ大なるものがある. よって著者は, 北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める.