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_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　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

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情報の定量的解析は容易ではない. 生体断層イメージングに関しては, その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, 精度, 画像品質等に課題が残されており, 現段階では決定的な手法が確立されていない.

本研究では, 人や実験動物の体表下 1-2 cm のマクロスコピックな三次元吸光構造イメージングの実現に向け, 吸光度分布が不均一な構造を対象とした空間分解計測による断層イメージング手法の開発を行った. この手法では, 生体のような拡散性散乱体に連続光を入射し後方散乱光の空間分布を計測して, 散乱体内部の深さ方向吸収係数分布を推定する. 実用性の高い手法実現のためには, 後方散乱光の空間分解波形から, 逆問題の演算により短時間で不均一構造の断層像を得ることが望ましい. しかし, 吸収係数と光減衰の対数値には線形関係が成り立っていても, 散乱体内部の光伝搬経路のばらつきにより, この逆問題はそのままでは非線形問題とならざるを得ない. そこで本研究では, 実用性を考慮した繰り返し演算により非線形な逆問題を解いて吸光度空間分布を求める手法を新たに考案した. さらにシミュレーションと実験により断層イメージングに対する有効性を検証し, 本手法の特徴を明らかにした.

第一に, 後方散乱光の空間分解測定値から一次元深さ方向の吸収係数分布を高確度に推定するため, 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数式モデルを構築した. このモデルにより, 目的とする吸収係数分布は非線形逆問題の解として求められる. 提案手法ではこの非線形問題を, 繰り返し演算により初期値を順次補正し収束させることにより解く. なおこの繰り返し演算に, 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ず, 実用的な計算負荷で非線形解を得ることができる. 例えば, 単純な連立方程式の解として得られる線形解を初期値とすることにより, 数十回程度の繰り返し回数で, 安定解に一意に収束する. この手法は, 時間分解測定や周波数変調などで使われる高速な光源や複雑な光検出系を必要とせず. 安価な連続波光源と低速フォトダイオードおよび簡易な受光システムで実現可能である. また, 後方散乱光を測定するため, 光が透過しない厚い組織にも適用可能である. さらに提案手法では, 反復収束計算を使用して非線形逆問題を解くことにより. 大きな吸収係数変動を伴う不均一性の強い媒質においても吸収係数分布の推定を可能としている. 加えて逆問題の解法は, 光子の入出射間距離を変数とする積分計算に基づいており, 時空間的なランダムノイズに対して高い耐性が期待できる.

次に, モンテカルロ法による光伝搬シミュレーションを行い, 提案手法の妥当性を確認するとともに, 特徴を分析した. その結果, 提案された技術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た. 散乱係数の変動に対する吸収係数分布推定の依存性を調べた結果, 吸収係数の推定誤差が散乱係数の変動と同じレベルにとどまることも明らかとなり. 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が確認できた. これを受けて生体組織を模擬するモデルファントムを用いた実験を行い, これらシミュレーションの妥当性を確認するとともに, 提案手法の有用性をも検証した. このように, シミュレーションと実験を通し, 提案手法の可能性と限界を明らかにした.

第二に, 上記で提案した層状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へと拡張した. 二次元へ拡張するためには, 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. しかしながらそれでは, 未知数の増大により安定した収束解を求めることは難しくなる. そこで本研究では, 計測系の走査等により推定断層を二次元化するとともに, 推定ピクセル数を大幅に低減化する工夫を加えた再構成手法を新たに考案した. なお本手法は, 光源と検出器のペアを対象散乱体表面で二次元走査することにより, さらに三次元イメージングへの拡張も容易である.

まず提案手法の最適化のため, 逆問題解法における光子の入出射間距離の積分範囲について検討を行い, 抽出するピクセルの深さに応じた適切な積分範囲を求めた. 次に, 最適化した提案手法の有効性をモンテカルロシミュレーションにより検証した. その結果, 提案手法を用いた断層イメージングの実現可能性が確認された. 推定画像の分析から, 次の点を示した. 吸収係数の推定誤差と空間分解能については, 浅い領域では良好な結果が得られるが, どちらも推定対象の深さとともに劣化する. ただし, その劣化には一貫性があり, 適切なデコンボリューションやキャリブレーションにより修正できる可能性がある. 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影響は少なく, 複数吸収体による再構成画像の歪みも小さい. これらの検討より断層像再構成法としては, 定量化について課題は残るものの, 安定した断層イメージングを行えることを明らかにした.

以上, 高確度な生体内吸収分布再構成法を新たに考案するとともに, それを実現する手法を開発した. さらにシミュレーションや実験を通して基礎的検討を行い, その有効性と実用可能性を実証した. これにより, これまで臨床応用が困難であった光によるマクロスコピックな生体内部構造イメージングに対し, 安全安心な近赤外光を用いた実用性の高い無侵襲断層イメージングの新手法を提供できるものと考えられる.