

生体透視イメージングのための光散乱抑制法の開発

学位論文内容の要旨

近赤外光は、水およびヘモグロビンによる吸収が比較的小さいため生体透過性が高い。この近赤外光を用いて無侵襲的に生体内情報を取得する試みがなされている。その中でも、近赤外光を用いた2次元透視イメージングは、実験用小動物の無侵襲計測や静脈像を利用したバイオメトリクス認証等の応用分野において非常に有用なツールとなる。しかしながら、近赤外光を用いた生体透視イメージングでは、生体組織における光散乱が大きな問題となっている。生体組織のもつ強い散乱特性のため、生体内を透過してくる光は大きく拡散し、得られる透視像は著しく劣化したものとなる。そのため上記応用分野においては、実用的な光散乱抑制手法の開発が望まれている。本研究では、上記背景を踏まえ、2次元透視イメージングのためのより実用的な光散乱抑制手法の開発を目的とした。

まず本研究では、近赤外光が生体組織において強い前方散乱性を有することに着目した。つまり生体組織にビーム光を入射した場合、その透過光には前方散乱を繰り返しながら入射光軸に沿って伝搬してくる近軸散乱光が存在する。この近軸散乱光は、入射光軸近傍の情報を含みつつ、直進光よりもはるかに大きな光量で光軸上に出射してくる。よって散乱の影響を受けた透過光のうち、近軸散乱光を抽出することができれば、劣化透視像を大きく改善することができる。しかし近軸散乱光の直接検出は容易ではない。これまで本研究室において、差分原理による近軸散乱光抽出法が考案されてきた。しかしこの方法には、近軸散乱光抽出能を大きく左右する差分重み係数を経験的に決定しなければならない、または実測から決定できるものの超短パルスレーザやストリークカメラのような大掛かりな装置を必要とするといった問題があった。また2次元透視像を得るためには、2次元面内を走査する必要があった。そこでこれらの問題の解決をめざし、新たな手法の考案を行った。

本手法では、イメージング対象の散乱性を変化させる。イメージング対象の散乱性が増した場合、拡散光に比べ近軸散乱光は大きく減衰する。よって、散乱性変化前後の透過光量を重み付け差分することにより、近軸散乱光を抽出することができる。差分重み係数は、直進光および近軸散乱光が含まれていない、入射光軸外の光強度比により決定することができる。提案原理の有効性を確認するため、まずイメージング対象自体の散乱性を変化させ、実験を行った。その結果、提案原理が有効に働くことを確認した。しかし実用において、イメージング対象自体の散乱性を変化させることは必ずしも容易ではない。特に生体組織の場合、それは不可能である。そこで、散乱性不可変な対象への提案原理の適用を可能にするため、拡散板の利用を考えた。イメージング対象の光入射側に拡散板を付加することにより、生体のような散乱性不可変な媒質であっても、見かけ上、散乱性を変化させることができる。これにより、散乱性不可変な対象に対しても、提案原理を適用できると考えられる。実験的検討をとおり、上記手法の有効性および特性を明らかにした。さらに、入射ビーム径を大きくした場合に上記手法を適用することにより、近軸散乱光による無走査2次元透視イメージングが可能になることを示した。

走査することなく 2 次元透視像を取得できれば、計測系の簡素化・計測時間の短縮が可能となり、実用上非常に大きなメリットとなる。無走査 2 次元透視イメージングを行う場合、入射ビーム径を最小でも、捉えたい対象より大きくする必要がある。ところが、散乱体透視イメージングにおいては、入射ビーム径が大きいほど、透視イメージング性能が低下する。よって、上記無走査 2 次元透視イメージング手法は、比較的散乱性の弱い対象に適用できるものである。そこで次に、2 次元透視像取得には走査を必要とするが、より高い近軸散乱光抽出能が期待できる手法の考案を行った。その手法では、イメージング対象出射側のレンズ、およびその焦点位置に置かれたピンホールによりコリメート成分を検出する。さらに計測には 2 種類の光入射条件を用いる。1 つは平行ビーム光入射（以下、条件 1）、もう 1 つは対象物体の散乱がない場合に出射側レンズにより発散するような光入射（以下、条件 2）である。近軸散乱光は前方散乱を繰り返しながら入射光軸に沿って伝搬してくるため、直進光に近い特性を有している。よって条件 1 では、近軸散乱光の大部分が検出されるが、条件 2 では、大部分がピンホールによってはじかれ、ほとんど検出されない。一方、拡散光成分は指向性が失われているため、両条件とも検出される。したがって、条件 1,2 の透過光量を重み付け差分することにより、近軸散乱光を抽出することができる。差分重み係数は、前述の手法と同様、入射光軸外の光強度比により決定することができる。実験的検討をとおり、この手法の有効性を確認した。

本研究では、さらなる透視イメージング性能の向上を図るべく、上記手法の改良を行った。散乱体透視イメージングでは、次の 2 点が重要となる。1 つ目は、透過光に含まれる拡散光の推定精度である。2 つ目は、入射光軸上での受光強度に占める近軸散乱光の比率である。前者については、条件 2 により精度よく拡散光を推定できることを確認している。よって、イメージング性能をさらに向上させるには、入射光軸上での受光強度に占める近軸散乱光の比率を大きくする必要がある。そこで条件 1 の代わりに、対象物体の散乱がない場合に受光面上で収束する光入射条件（以下、条件 3）を用いた。上述したように、近軸散乱光は直進光に近い特性を有している。したがって条件 3 の場合、近軸散乱光は受光面上で収束し、受光強度に占める近軸散乱光の比率が大きくなると考えられる。実験的検討をとおり、本改良手法の有効性を確認した。また、散乱体内部の吸光度を真値に近い値で計測できることを明らかにした。さらに、生体組織厚約 15mm に相当する散乱減衰度まで、近軸散乱光を抽出可能なことを示した。

近軸散乱光を利用した手法は、高い空間分解能を得られるものの、適用できる対象の厚みはごく薄いものに限られる。そこで、散乱の影響を抑制しつつも、比較的厚い対象の透視像を取得する手法を新たに考案した。この手法では、拡散光を利用する。拡散光には比較的拡散性の弱い成分から拡散性の強い成分まで連続的に含まれていると考えられる。よって、比較的拡散性の弱い成分を抽出できれば、散乱の影響を抑制することができると考えられる。ここでは、前述の拡散板を利用した近軸散乱光抽出法と類似した方法により、弱拡散光成分を抽出する。実験的検討をとおり、本手法の有効性および「光入射面に近いほど散乱抑制効果が高い」という特性を明らかにした。さらに本手法の特性を利用することにより、散乱体の光学特性が既知で、その中に独立した吸収物体がある場合、その深さを推定することができることを確認した。これらにより、これまで不可能とされてきた拡散光による透視イメージングの可能性が示された。

以上、本研究では、生体透視イメージングのためのより実用的な光散乱抑制手法の開発を行い、その有効性を示すとともに新たな知見を得た。これにより、光による生体透視イメージングのさらなる発展の可能性が示された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 清 水 孝 一
副 査 教 授 山 本 克 之
副 査 准教授 岡 嶋 孝 治

学 位 論 文 題 名

生体透視イメージングのための光散乱抑制法の開発

近赤外光は、水およびヘモグロビンによる吸収が比較的小さいため生体透過性が高い。この近赤外光を用いて無侵襲的に生体内情報を取得する試みがなされている。その中でも、近赤外光を用いた2次元透視イメージングは、実験用小動物の無侵襲計測や静脈像を利用したバイオメトリクス認証等の応用分野において有用なツールとなる。しかし、近赤外光を用いた生体透視イメージングでは、生体組織における光散乱が大きな問題となっている。生体組織のもつ強い散乱特性のため、生体内を透過してくる光は大きく拡散し、得られる透視像は著しく劣化したものとなる。そのため上記応用分野においては、実用的な光散乱抑制手法の開発が望まれている。本研究は、このような光による透視イメージングのための、より実用的な光散乱抑制手法の開発を目的としている。

まず本研究では、近赤外光が生体組織において強い前方散乱性を有することに着目した。つまり生体組織にビーム光を入射した場合、その透過光には前方散乱を繰り返しながら入射光軸に沿って伝搬してくる近軸散乱光が存在する。この近軸散乱光は、入射光軸近傍の情報を含みつつ、無散乱の直進光よりもはるかに大きな光量で光軸上に出射してくる。よって散乱の影響を受けた透過光のうち、近軸散乱光を抽出することができれば、劣化透視像を大きく改善することができる。しかし、近軸散乱光の直接検出は容易ではない。これまで、差分原理による近軸散乱光抽出法が考案されている。しかしこの方法には、差分重み係数を経験的に決定しなければならないという問題、実測では大掛かりな装置を要するといった問題があった。また2次元透視像を得るためには、2次元面内を走査する必要があった。本研究では、これらの問題を解決する新たな手法を考案した。

考案手法では、イメージング対象を含む光学系の散乱性を変化させる。例えば、イメージング対象の散乱性が増した場合、拡散光に比べ近軸散乱光は大きく減衰する。よって、散乱性変化前後の透過光量を重み付け差分することにより、近軸散乱光を抽出することができる。差分重み係数は、直進光や近軸散乱光が含まれていない位置、つまり入射光軸外の位置の光強度比により決定することができる。生体への適用を考え、光入射側に散乱板を加えることにより、この散乱性を変えることとした。また、入射ビーム径を大きくすることにより、近軸散乱光による無走査2次元透視イメージングも

可能となる。実験的検討をとおし、これら提案手法の有効性およびその特性を調べた。その結果、生体組織厚み約 15mm に相当する散乱減衰度まで、近軸散乱光の抽出が可能であることを示した。また、本手法の散乱抑制能により、散乱体内部の拡散光伝搬領域が、拡散広がりの約 0.3 パーセント断面積まで光軸周辺に限定されることも明らかとなった。さらに、本手法により直進経路に沿って伝搬した光成分を検出できることから、従来正確な計測が困難であった散乱体内部の吸光度計測が可能となる。実験的検討をとおし、この可能性を実証した。

近軸散乱光を利用した手法は、高い空間分解能が得られるものの、適用できる対象の厚みは薄いものに限られる。そこで、散乱の影響を抑制しつつ、かつ比較的厚い対象の透視像を取得する手法を新たに考案した。この手法では、拡散光を利用する。拡散光には、比較的拡散性の弱い成分から拡散性の強い成分まで連続的に含まれている。よって、比較的拡散性の弱い成分を選択的に抽出できれば、散乱の影響を抑制することができると考えられる。具体的には、前述の拡散板を利用した近軸散乱光抽出法と類似した方法により、弱拡散光成分を抽出することができる。実験的検討をとおし、提案手法により厚さ 40mm の生体組織の光透視が可能になることを明らかにした。またこの検討の中で、「光入射面に近いほど散乱抑制効果が高い」という提案手法の特性が明らかになった。この特性を利用すれば、散乱体の光学特性が既知で、その中に独立した吸収物体がある場合、散乱体中の吸収物体の深さ推定も可能となる。

これを要するに、著者は、生体透視イメージングにおいて深刻な問題である光散乱を抑制する実用的手法を新たに開発した。また、その効果を有効に引き出す諸条件を明確にした。さらに、生体透視模擬実験をとおし、実用におけるそれぞれの有効性を実証した。これらの成果は、光による生体イメージングのさらなる発展に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(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。