

解析的位相回復イメージング法による走査型顕微鏡 技術の研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 公開日: 2021-03-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 中島, 伸治 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/00028017

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05073

研究課題名(和文) 解析的位相回復イメージング法による走査型顕微鏡技術の研究

研究課題名(英文) Study of scanning microscopy techniques using a method of analytic phase-retrieval imaging

研究代表者

中島 伸治 (Nakajima, Nobuharu)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：20164189

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：近年、タイコグラフィ法とよばれる反復位相回復アルゴリズムによって、微小物体を透過した光波の振幅と位相を再生する走査顕微鏡の手法が、光・X線・電子線のイメージング分野で幅広く利用されている。一方、我々は、反復法よりも高速な解析的位相回復法による走査型イメージング法の理論を提案している。本研究では、この方法をより高分解能な物体再生法への改良を行い、さらに、この解析的位相回復法を、光の超短パルス波形再生、および、X線による3次元複素屈折率分布の断面再生へ応用し、その有効性を計算機シミュレーションで示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

位相回復法を用いた顕微鏡技術は、従来の結像レンズを使用するシステムとは異なり、高性能なレンズの作製が困難なX線や電子線による物体イメージングにおいて有効であり、X線や電子線を用いた材料・生物試料の原子・分子イメージングへの応用が期待されている。位相回復法では計算機アルゴリズムによる反復法が世界的な主流となっているが、アルゴリズムの収束性に問題がある。本研究は、収束性に問題がない解析的な位相回復法による顕微鏡システムの構築を目指したものであり、世界的に見て唯一のアプローチとしての学術的な意義と、材料工学や生命科学における新しい計測法として応用が期待できることから社会的意義があると考えている。

研究成果の概要(英文)：Recently, ptychography, in which the modulus and the phase of the transmitted wave through a small specimen are reconstructed from scanning illumination microscopic data by using an iterative algorithm, has been used explosively in the fields of object imaging with light waves, x-rays, and electron waves. Before now, we have also proposed another imaging method with scanning illumination, which is based on an analytic phase-retrieval method, of which the speed of the phase calculation is faster than that of the iterative algorithm. In this study, the resolution of our imaging method has been improved, and also the effectiveness of the analytic phase-retrieval method has been demonstrated by applying it to both the reconstruction of an unknown ultrashort light pulse and the tomographic reconstruction of three-dimensional complex refractive indices in x-ray imaging.

研究分野：光工学

キーワード：位相回復 X線レンズレスイメージング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

約 20 年前から、光・X 線・電子線を利用した顕微鏡やイメージングの分野において、結像レンズを用いないコヒーレント回折イメージング法(物体からの回折光強度から直接、光波の位相分布を回復して、その振幅と位相からなる波動関数を数値計算で逆伝搬させて物体像を再生する方法)の研究と応用が盛んに行われるようになった。この方法はレンズを用いないため、あらゆる波動を用いたイメージングにおいて、照明光の波長程度の分解能が原理的に得られる利点があり、さらに、ホログラフィーのように参照波による干渉計測を用いないため、レーザー光のような高いコヒーレンス(可干渉)性を必要としない利点がある。

この回折イメージング法の研究では、測定強度分布から位相分布を求めるため、物体の既知情報(広がり範囲等)を利用した計算機による反復アルゴリズムが用いられてきた。しかし、このアルゴリズムには、解の収束性に不安定性があり、必ずしも常に正しい解に収束するという数学的保証が無く、特に照明光に位相変化をもたらす物体再生の場合は、一般に正しい解へ収束しないという問題があった。これを解決する一つの手法として、2004 年にタイコグラフィー(Ptychography)法という反復アルゴリズムが提案された。これは、物体面上でコヒーレントな照明用プローブ光を一定間隔で走査しながらファーフールド(遠方回折)面で複数枚の強度分布を測定するシステムを用いる。その際に、プローブ光の物体の照明範囲が隣り合うビーム位置の間で約 50%以上重なるように調整して回折強度分布を測定し、それらの強度データと照明範囲が重なっているという既知条件を用いて、反復アルゴリズムによって位相分布を求める手法である。重なるという既知条件を入れることで、非常に安定した位相回復が可能となる利点があり、現在、光・X 線・電子線の様々な分野で利用され多くの論文が出ている。しかし、約 50%以上の重なりを必要とするので測定データ量が多くなり、かつ、反復アルゴリズムを数十~数百回繰り返す必要があるため時間がかかるという問題がある。また、安定した収束性を示すが、解の唯一性の数学的証明が無い問題が依然残っている。

現在、走査型位相回復法としては、タイコグラフィー法以外には有効な方法がないが、実は我々の研究室において 23 年前(1997 年)にガウス振幅ビームを用いた解析的な走査型位相回復の方法を提案している。これは、ガウス振幅フィルターによって振幅変調させた平面波をレンズで集光してできるプローブ光を、物体面上で走査させながら遠方回折面上の 2 点で強度を測定し、その変化から物体の振幅と位相を解析的に求める方法である。最近、この手法の実証実験を行い、2 次元物体の振幅と位相が従来よりも少ない測定データ量から短時間で再生できることを示した。しかし、再生分解能では、タイコグラフィー法に未だ及ばないため、さらに実験を行い改良する必要があった。

2. 研究の目的

近年、タイコグラフィー法とよばれる反復位相回復アルゴリズムを用いた新しい走査顕微技術が提案され、微小物体を透過した光波の振幅と位相変化を非干渉的に再生できる手法として光・X 線・電子線の分野で幅広く利用され、多くの論文が国内外で発表されている。しかし、この手法は反復アルゴリズムを用いているため、計算時間がかかることや収束解の唯一性の数学的証明が無いなどの問題がある。一方、我々は以前、解析的な解を用いた走査位相回復の理論を提案しており、最近、実証実験により有効性を示した。そこで、この解析的な走査位相回復法を、従来よりも高速で高分解能な手法に改良して、タイコグラフィー法とは異なる新しい顕微技術として確立することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究の目的である解析的位相回復法による新しい顕微鏡技術の確立のため、走査型位相回復システムと、その基礎となる解析的位相回復法の両方について、理論、計算機シミュレーション、及び実験による改良と、位相回復法の有効性を示すため、別の分野への応用を以下に行う。

- (1) 今までの走査型位相回復システムでは、物体を走査する光ビームの広がり度で再生物体の解像度が決定するので、これを改善する手法を考案し計算機シミュレーションで詳細に調べる。
- (2) 次に、従来、可視光の領域で成功していた解析的位相回復法を、より短波長の紫外光発光ダイオード(LED)を光源とした物体再生に適用することを試みる。
- (3) 実験とは別に、本研究室で開発した解析的位相回復法の応用として、光の超短パルスの振幅と位相を再生する問題に適用することも試みる。これは、位相回復法の時間領域への適用であり、計算機シミュレーションで詳細に検討する。
- (4) 実験で用いている位相回復法は、一回の測定から波面の振幅と位相の両方が再生可能であるという特徴をもっている。一方、最近 X 線イメージングの分野で活発に研究さ

れているコヒーレント X 線 3 次元断層再生 (X 線 3D-CT) システムで用いられている位相回復法は、一般的に波面の振幅と位相の再生に 2 回以上の測定が必要である。そこで、本方法をこの分野に応用することを検討する。

4. 研究成果

- (1) 研究の方法 (1) に沿って、走査型位相回復システムの再生物体の解像度を改善する手法を考案し計算機シミュレーションで詳細に調べた。その結果、物体の位相分布は解像度が増すが、振幅分布は数値誤差の影響により大きな乱れが生じることが明らかとなった。この再生振幅分布の乱れの改善は非常に難しく、その結果、当初予定していた走査型位相回復システムによる新しい顕微鏡の開発が行き詰ってしまった。そこで、以下に示すような、本方法の基礎となっている解析的位相回復法の改良と他分野への応用研究の方向へ切り替えた。
- (2) 研究の方法 (2) に沿って、解析的位相回復法による波長 260nm の LED を用いた実験を行ったが、十分な結果が得られなかった。LED はレーザーダイオードと異なり、光の干渉性が悪く、また光強度も弱いことが原因と考えられる。しかし、本方法は、将来的に一般の研究室で使用できる干渉性が良くない X 線源を用いた顕微鏡システムに利用されることを目標としているので、レーザーではなく干渉性が悪い光源を用いた場合でも物体再生に有効であることを示す必要がある。したがって、今後、光の干渉性を改善する方法の検討、及び光強度が弱いことによって測定データに生じる雑音の影響を取り除く画像処理法の検討などを行う必要があると考えている。
- (3) 本方法の時間領域への応用として、光の超短パルスの振幅と位相を再生する問題に適用することを検討し、計算機シミュレーションで詳細に検討した。その結果、従来の反復的アルゴリズムによる位相回復法を用いた場合と比べて少ないデータ量でパルス再生が行えることが確認できた。この結果は、「5. 主な発表論文等」の論文 (2019 年) として発表した。

下図 1 が再生例である。図 1 (a) が元の想定した 100fs 幅の光パルスの振幅 (下図) と位相分布 (上図) である。図 1 (b) が位相回復で用いるガウス型のゲートパルスであり、時間をわずかにずらした二つのパルスをそれぞれ元のパルスにかけてスペクトル振幅分布を分光器で測定する。結果が図 1 (c) の黒と赤の線で示した振幅分布である。

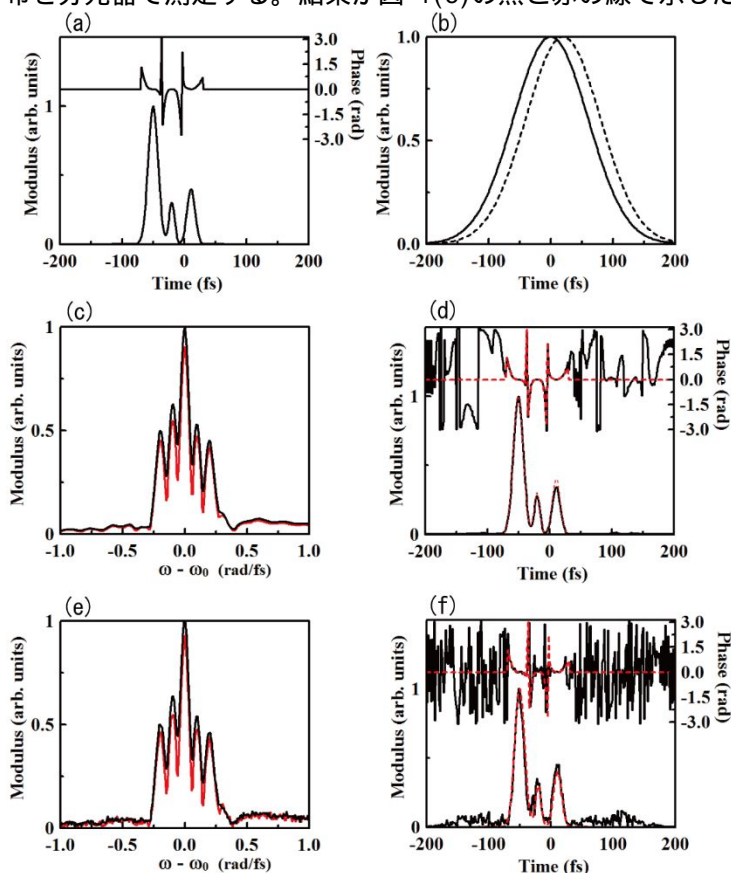


図 1 . 本方法の位相回復法による超短光パルスの振幅と位相再生シミュレーション結果

この二つの振幅のみから解析的な計算で求めた再生パルスが図 1(d)である。赤線で元のパルスの波形を重ねて示してある。ほぼ、元の波形が再生されていることが分かる。二つのスペクトル振幅のみからパルスの振幅と位相が再生できる方法は他にもなく、他の方法ではもっと多くのスペクトル振幅データを必要とする。

図 1(e)と(f)は雑音をのせた場合のスペクトル分布と再生パルスの一例である。雑音がかなりのった場合でも再生が安定していることを確認できた。

- (4) 本方法のコヒーレント X 線 3 次元断層再生 (X 線 3D-CT) への応用を検討した結果、下記の図 2 のようなシステムを考案した。図 2 では、左側からコヒーレント (干渉性が高い) X 線 (波長: 0.1nm) で物体を照明し、その透過光を既知の間隔 (40 μm) をもつスリット開口 (幅 7.5 μm) 列フィルターを通して距離 500mm 伝搬させ、その回折強度分布を観測面で観測する。物体を回転させながら複数枚の強度分布データから物体の 3 次元複素屈折率分布を再生することができる。従来用いられていた位相回復法では回転させる物体の各角度で複数枚の強度分布測定が必要であったが、本方法では物体の角度当たり一回の強度分布測定で再生できるため、測定時間の短縮および X 線による物体ダメージの低減が可能となる。今まで、角度当たり一回の強度測定から 3 次元再生する方法もあったが、それらの方法と比べて少ないデータ量で物体再生できることを理論的に示した。「5 . 主な発表論文等」の論文 (2020 年) として発表した。

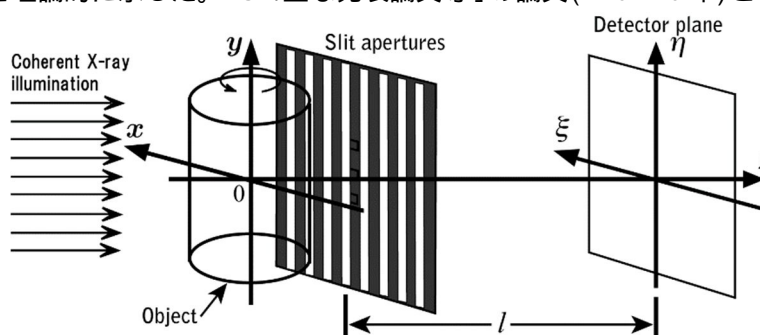


図 2 . スリット開口列を用いた位相回復法による 3 次元複素物体再生

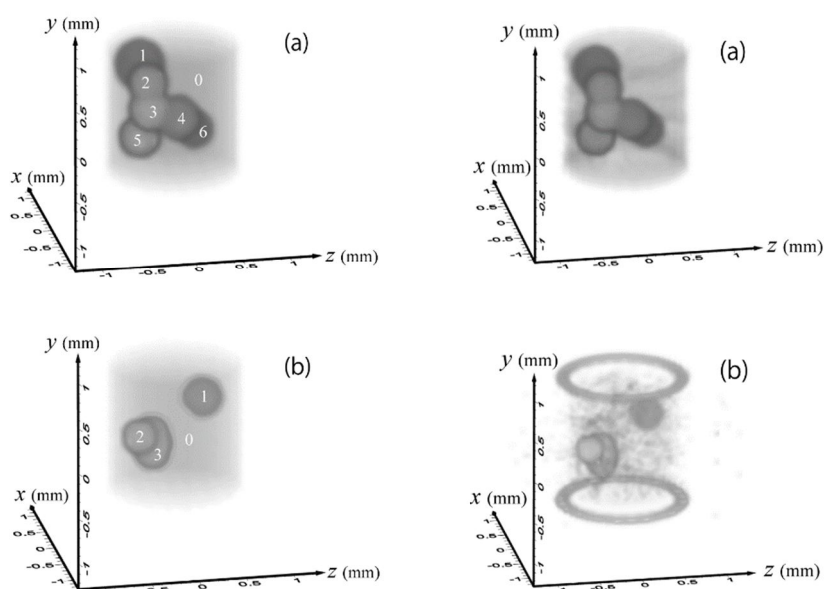


図 3 . 元の物体 : 複素屈折率の
(a)実部, (b)虚部

図 4 . 再生物体 : 複素屈折率の
(a)実部, (b)虚部

図 3 ~ 6 が計算機シミュレーションの一例である。図 3 (a)と(b)が想定した元の物体の 3 次元複素屈折率分布のそれぞれ実部と虚部であり、図の番号は屈折率の値

が異なる部分を示している。図4が物体を3度ずつ回転させながら60回測定した強度分布データから本方法で再生した3次元分布であり，(a)，(b)がそれぞれ複素屈折率分布の実部と虚部を表している。再生物体は元の物体をほぼ再現しているが，虚部に現れているリング状の誤差は円筒形物体の上下の端におけるX線の乱れが測定強度に影響を与えたためであり，これは想定内のアーチファクトとして後で除去することは可能である。

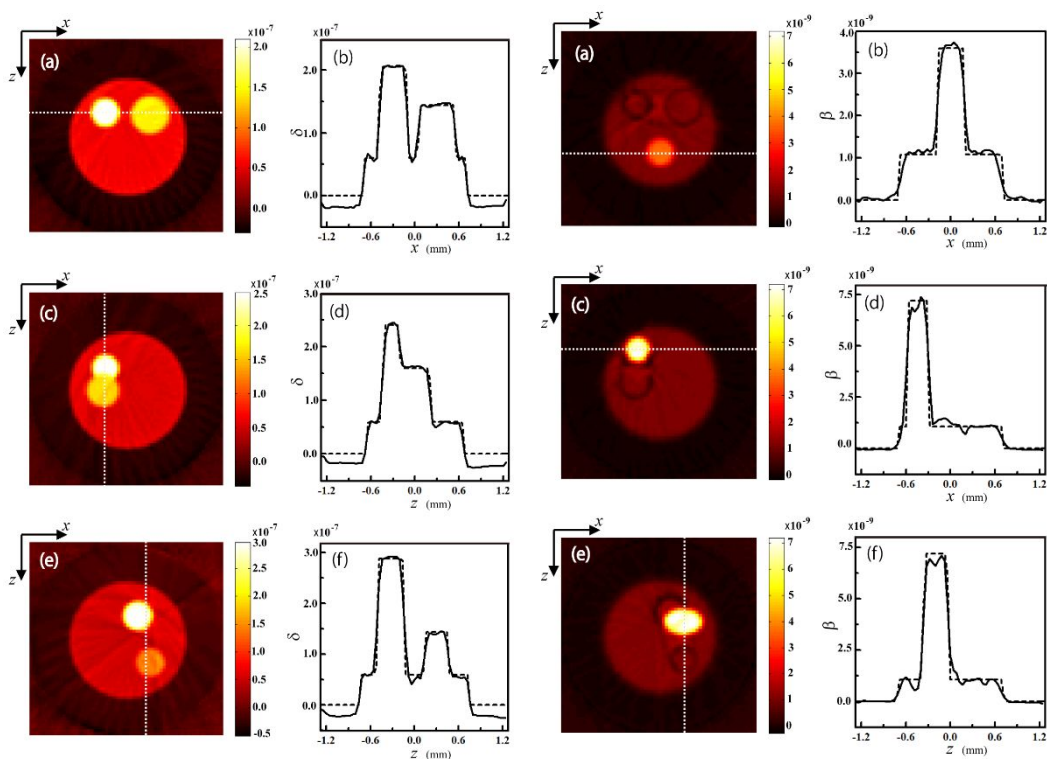


図5.再生した複素屈折率の実部の断面分布：(a) $y=0.36\text{mm}$ ，(c) $y=0.0$ ，(e) $y=-0.36\text{m}$ ，(b)，(d)，(f)の実線はそれぞれ(a)，(c)，(e)の点線に沿った値の変化を示し，破線は元の物体の変化を表す。

図6.再生した複素屈折率の虚部の断面分布：(a) $y=0.36\text{mm}$ ，(c) $y=0.0$ ，(e) $y=-0.36\text{m}$ ，(b)，(d)，(f)の実線はそれぞれ(a)，(c)，(e)の点線に沿った値の変化を示し，破線は元の物体の変化を表す。

図5，6はそれぞれ再生した複素屈折率の図4(a)実部，(b)虚部の断面分布である。図5，6の(a)，(c)，(e)はそれぞれ $y=0.36\text{mm}$ ， 0.0 ， $y=-0.36\text{mm}$ での2次元断面分布であり，(b)，(d)，(f)の実線は(a)，(c)，(e)の点線に沿った値の変化であり，破線は元の物体（複素屈折率）の同じ部分の値の変化を示したものである。実部と虚部の両方も元の物体の値とほぼ同じ値が再生されていることが分かる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nobuharu Nakajima	4. 巻 26
2. 論文標題 Ultrashort pulse reconstruction using a deterministic phase retrieval method with Gaussian-envelope gates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 77-84
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10043-018-0480-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobuharu Nakajima	4. 巻 458
2. 論文標題 Phase-contrast tomography from a series of single-shot measurements using a deterministic phase-retrieval method in X-ray imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 124834(1-10)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optcom.2019.124834	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中島伸治
2. 発表標題 熱光源を用いたレンズレス回折イメージング
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中島伸治
2. 発表標題 ガウス振幅ゲートを用いた超短パルス再生
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島伸治
2. 発表標題 解析的位相回復法を用いた位相コントラストトモグラフィ
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----