

デジタルホログラフィック断層イメージング手法の開発

野村孝徳

和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科
〒640-8510 和歌山市栄谷 930

Tomographic Imaging by Use of Digital Holography

Takanori Nomura

Department of Opto-Mechatronics, Faculty of Systems Engineering, Wakayama University
930 Sakaedani, Wakayama, 640-8510, Japan
E-mail: nom@sys.wakayama-u.ac.jp

概要

デジタルホログラフィを用いた断層イメージングのための光波伝搬を用いた再構成法を提案する。測定試料の屈折率遅延量が無視できないほど大きい場合やミリメートルオーダーの試料の場合には極めて有効な手法である。提案手法によってこれまで用いられている逆投影法で生じた測定誤差を減少することができる。ロッドレンズを測定試料として用いた計算機シミュレーションによりその有用性を示す。

1 はじめに

工業分野における透明部品の内部欠陥検出、医学分野における細胞や微生物の内部構造の立体観察などの場面で3次元屈折率構造の画像化技術が求められている。屈折率分布計測手法のひとつとして、光波の位相情報を計測するデジタルホログラフィがある。この技術は透明物体の透過光の位相分布を解析することによって透明物体の2次元屈折率分布を計測する¹⁾。この技術に逆投影法によるトモグラフィを導入し、3次元屈折率計測を可能にしたデジタルホログラフィックトモグラフィが報告されている²⁾。しかしこの手法は逆投影法を用いるため、屈折を無視できるほど位相遅延量の小さい物体である必要がある。そのため、細胞のような微小物体に限るなど、計測対象が制限されてしまう。そこで、本研究ではデジタルホログラフィの深い被写界深度を活用した大型物体計測可能なデジタルホログラフィックトモグラフィを提案する³⁻⁵⁾。

本研究ではミリメートルオーダーの大型物体計測デジタルホログラフィックトモグラフィのための屈折を考慮した断層再構成計算手法を提案す

る。例として、直径5mmのロッドレンズを対象としたシミュレーションをおこない、提案手法と従来手法の再構成精度を比較し、提案手法の有用性を示す。

2 逆伝搬を用いた断層再構成計算手法

デジタルホログラフィックトモグラフィは計測物体を回転させ、複数の方向へ透過した各光波の位相遅延量をデジタルホログラフィによって取得する。得られた複数の位相遅延量に対し、断層再構成計算をおこなうことにより計測物体の屈折率断層画像を再構成する。これまで、再構成に用いる断層再構成計算手法には一般的なX線CTに採用されている逆投影法が用いられてきた²⁾。しかし逆投影法には、計測物体による屈折は無視できるほど位相遅延量が小さくなければならないという条件がある。したがって、計測物体の寸法あるいは屈折率変化が大きい場合、計測物体と周囲の媒質との屈折率差が大きい場合など、位相遅延量が大きく屈折が無視できないケースでは逆投影法は大きな計測誤差を生じさせてしまうことになる。

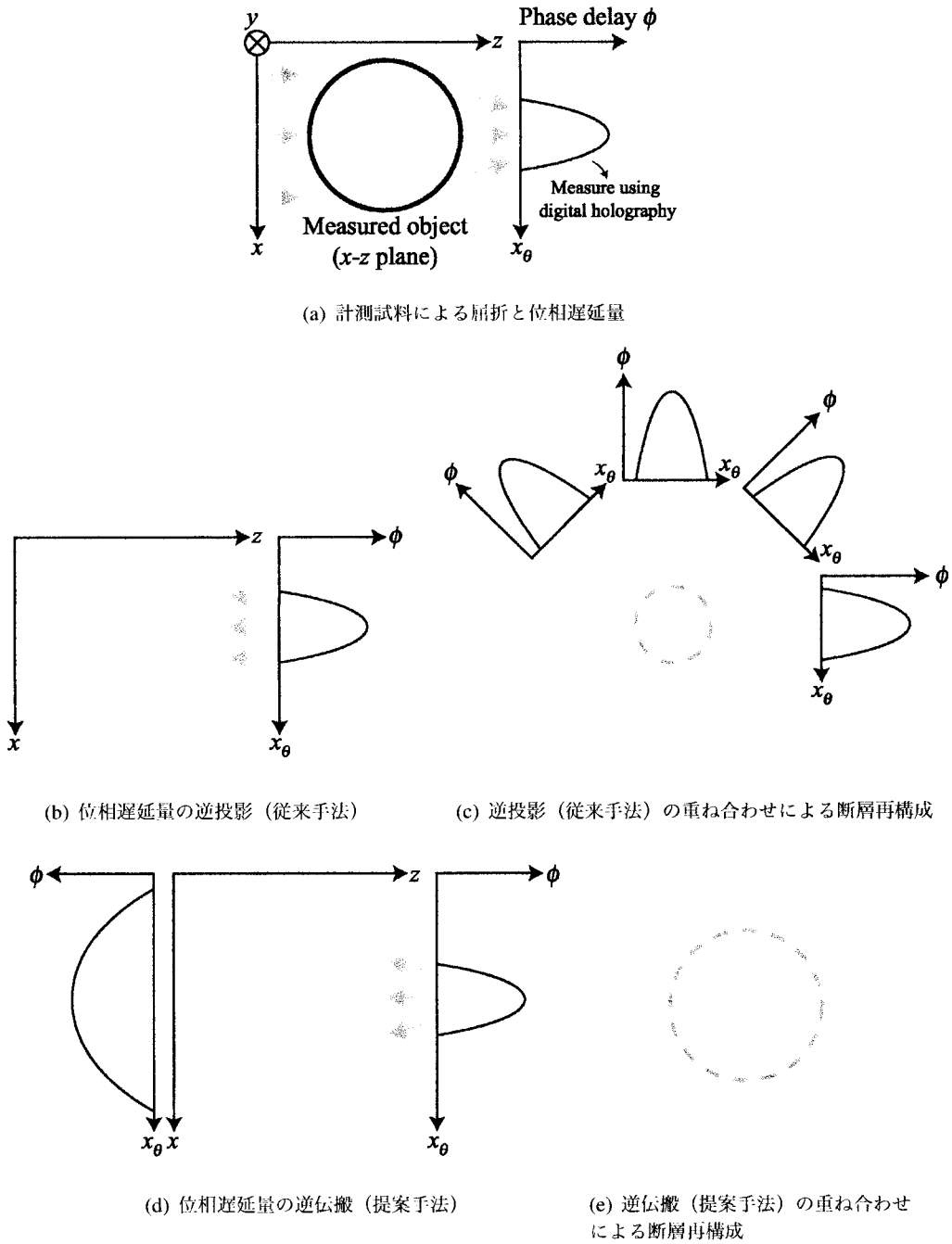


Fig. 1 デジタルホログラフィック断層イメージング手法の概念図

この問題点について、具体例を挙げて詳しく述べる。円柱状の計測物体に平面波を入射させる場合を考える。円柱状物体の軸方向を y 軸、 y 軸と平行な波面をもつ平面波の光軸を z 軸、 y 軸と z 軸それぞれに直交する軸を x 軸とし、以降は簡単化のため x - z 平面のみについて考える。入射光が屈折し、透過光に位相遅延が生じるようすを Fig. 1(a) に示す。Fig. 1(a) に示される透過光の位相遅延量をデジタルホログラフィによって取得する。次

に、得られた位相遅延量を z 軸の負方向へ直線的に反映する逆投影のようすを Fig. 1(b) に示す。最後に、入射光の入射角を変化させ、各角度の逆投影を重ね合わせるにより断層再構成を達成する。円柱状物体の従来手法による断層再構成のようすを Fig. 1(c) に示す。Fig. 1(c) の円形の破線が再構成された円柱状物体の断層を示す。Fig. 1(c) の再構成された円柱状物体の直径は、Fig. 1(a) の直径よりも小さくなり誤差が大きいがわかる。

そこで、本研究では逆投影ではなく光波伝搬計算を用いた断層再構成計算手法を提案する。Fig. 1(a) に示される透過光の位相遅延量の取得過程は従来と同様である。従来手法では得られた位相遅延量分布をじゅうぶんに活用していたとはいえなかった。提案手法では得られた位相遅延量分布が光波の伝搬情報を含んでいることに着目する。すなわち、位相遅延量を z 軸の負方向へ光波伝搬計算をする逆伝搬をおこなうことにより、試料を透過してきた光波を再現する。このようすを Fig. 1(d) に示す。逆伝搬を用いて光路を負方向へ辿ることにより、実際の屈折した光路とのずれを低減する。その後は従来手法と同様に、各角度の逆伝搬の重ね合わせによる断層再構成をおこなうようすを Fig. 1(e) に示す。Fig. 1(a) と (c), (a) と (e) をそれぞれ比較すると、円柱状物体の直径の誤差は従来手法と比べ提案手法の方が低減できることが期待される。

3 シミュレーション

提案手法の有用性を示すためシミュレーションをおこなった。Fig. 2 に示すような実験光学系を想定している。撮像素子は 2592 画素、画素サイズ $2.2\mu\text{m}$ とし、回転角度は 0.2 度とした。ロッドレンズの透過光と参照光を干渉させ、位相シフトデジタルホログラフィで計測物体による位相遅延量を計測し、提案手法と従来手法の断層再構成計算をおこなった。なお、計算の簡略化のため試料は y 方向には構造をもたないものとした。そのため撮像素子の画素や画素サイズは 1 次元で示している。

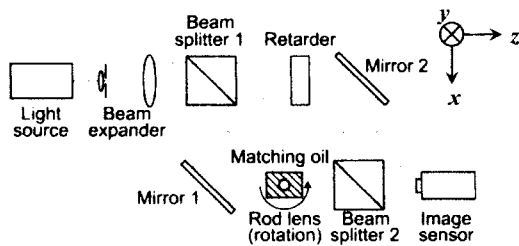


Fig. 2 シミュレーションで想定した光学系

4 一様な屈折率をもつロッドレンズの断層再構成

計測物体は直径 5mm、屈折率 1.4570 で一様なロッドレンズを想定した。ロッドレンズの周囲の媒質は屈折率整合液とした。屈折率整合液の屈折率はロッドレンズより低く、その屈折率差は 0.0015, 0.0070, 0.0120, 0.0170, 0.0220, 0.0270 の 6 通りでおこなった。これは、屈折率差を変えることによりロッドレンズの透過光の屈折の度合いを変え、屈折が断層再構成に与える影響を比較するためである。

まず、屈折率差が 0.0015 の場合の屈折率断層画像を Fig. 3 に示す。従来手法、提案手法でロッドレンズの直径に顕著な違いは見られない。これは光波がほとんど屈折しないためである。

次に、屈折率差が 0.0170 の場合の屈折率断層画像を Fig. 4 に示す。提案手法と従来手法でロッドレンズの直径に違いがあることがわかる。これは屈折率差が大きく光波の屈折を考慮する必要があるからであり、提案手法の有用性を示している。

提案手法の有用性を定量的に示すためにロッドレンズの直径を評価した。ロッドレンズ中心を通る直線の屈折率プロファイルを取り、その半値全幅を直径とした。ロッドレンズの直径の計測誤差を縦軸に、ロッドレンズと屈折率整合液の屈折率差を横軸にとり、提案手法と従来手法の再構成結

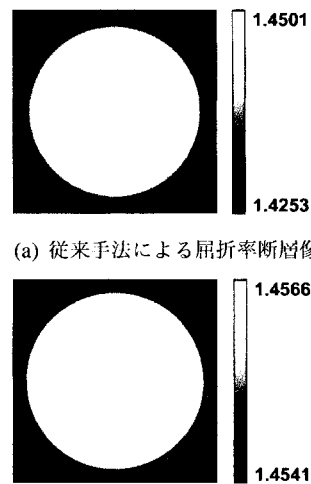
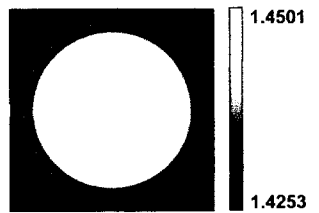
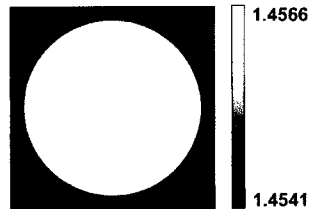


Fig. 3 屈折率断層画像の比較 (屈折率差が 0.0015 の場合)



(a) 従来手法による屈折率断層像



(b) 提案手法による屈折率断層像

Fig. 4 屈折率断層画像の比較（屈折率差が0.0170の場合）

果をプロットしたグラフを Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、屈折率差が大きくなり屈折の影響が強くなるにつれ、再構成された直径の誤差が増大していくことがわかる。提案手法の誤差は従来手法の誤差と比べ、最大で0.559mm 低減させることに成功した。このことは、計測の際の屈折率整合液の選択の幅が広がることを意味している。

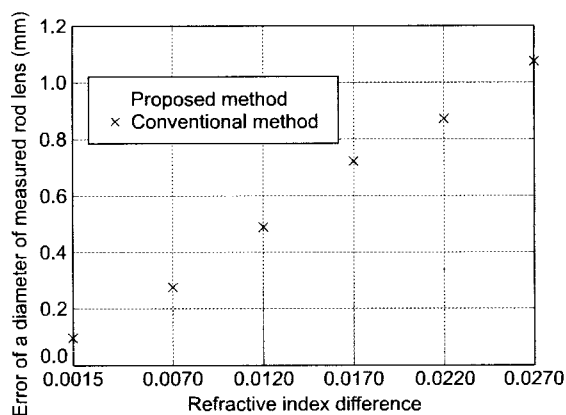


Fig. 5 試料（ロッドレンズ）と屈折率整合液との屈折率差とロッドレンズの直径の誤差の関係

4.1 内部欠陥を含むロッドレンズの断層再構成

提案手法は計測物体の屈折率分布が一様でない場合も適用可能であることを示すため、内部欠陥を含むロッドレンズの再構成シミュレーションを

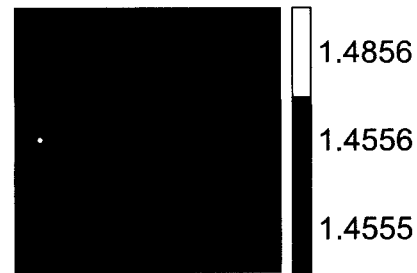


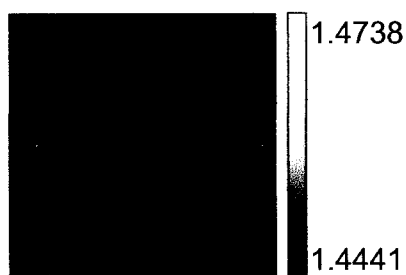
Fig. 6 内部欠陥を含むロッドレンズの屈折率分布

おこなった。計測物体である内部欠陥を含むロッドレンズの屈折率分布を Fig. 6 に示す。ロッドレンズは直径 5mm, 屈折率 1.4556 とし、内部の球状欠陥は直径 125 μ m, 屈折率 1.4856 とした。ロッドレンズの周囲の屈折率整合液は屈折率 1.4555 とした。

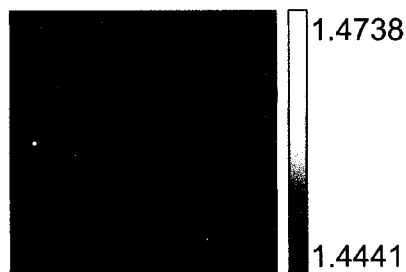
得られた屈折率断層像を Fig. 7 に、内部欠陥部分を拡大した屈折率断層像を Fig. 8 に示す。この球状欠陥の直径を半値全幅により評価したところ、提案手法により再構成された直径は 92.4 μ m であった。一方、従来手法の球状欠陥の屈折率分布は有意なピークをもたず、半値全幅による評価ができなかった。この結果から、提案手法を用いることによって、球状欠陥の断層形状の再構成が可能となったといえる。

5 まとめ

屈折の影響が強い物体を対象としたデジタルホログラフィックトモグラフィ計測において誤差を低減する断層再構成計算手法を提案し、直径 5mm のロッドレンズの計測シミュレーションをおこない、直径の計測誤差を低減させることに成功した。また、内部欠陥をもつロッドレンズの計測シミュレーションにおいても提案手法の有用性を示すことに成功した。提案手法を用いることにより、従来手法では計測することのできなかった大型物体や屈折率変化の大きい物体などの計測が可能となることが期待できる。現在は光学実験をおこない、提案手法の有用性を実験的に示すことを試みている。

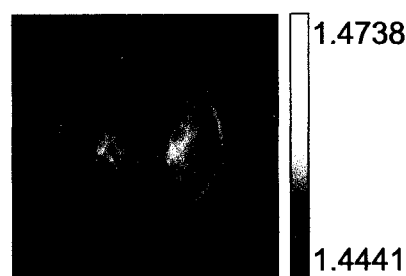


(a) 従来手法による屈折率断層像

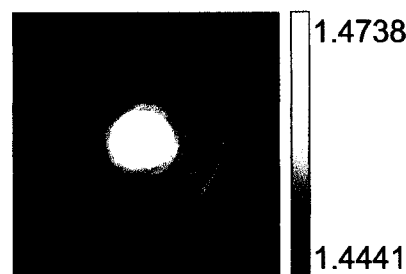


(b) 提案手法による屈折率断層像

Fig. 7 内部欠陥を含むロッドレンズの屈折率断層画像の比較



(a) 従来手法による屈折率断層像の内部欠陥部分



(b) 提案手法による屈折率断層像の内部欠陥部分

Fig. 8 内部欠陥を拡大した屈折率断層画像の比較

謝辞

本研究の遂行にあたり、公益財団法人 高柳記念財団の助成を受けました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Wataru Watanabe, Hidenobu Arimoto, Kazuyoshi Masaki, and Takashi Fukuda., "Measurement of light-induced refractive index change in photopolymer with quantitative phase microscopy," in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper DTuC39 (2011).
- 2) F. Charrière, Anca Marian, Frédéric Montfort, Jonas Kuehn, Tristan Colomb, Etienne Cuche, Pierre Marquet, and Christian Depeursinge., "Cell refractive index tomography by digital holographic microscopy," *Opt. Lett.*, **31**, pp. 178–180 (2006).
- 3) 北澤貴宏, 野村孝徳, "デジタルホログラフィックトモグラフィによる3次元振幅透過率分布再構成実験," 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2011 講演予稿集, P13 (2011).
- 4) 北澤貴宏, 野村孝徳, "デジタルホログラフィックトモグラフィによる屈折率断層計測のための光波伝搬を用いた断層再構成計算手法," 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2012 講演予稿集, 23pD3 (2012).
- 5) Takahiro Kitazawa and Takanori Nomura, "Refractive index measurement of internal defects by digital holographic tomography using reconstruction calculation method with lightwave propagation," *The Second Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics Technical Digest*, C014 (2012).