

同軸配置 SLM を用いた透過行列測定による 散乱体を通したスポット形成

全 香 玉*

Focusing through Scattering Media by Transmission Matrix Measurement Using Co-axial Configuration of SLM

Xiangyu QUAN*

Transmission matrix is one of the methods to focus light through scattering media. To measure complex transmission matrix, four-step phase shifting is often used. Here we propose co-axial configuration method to derive phase distribution of output field. In the proposed method, ordinary and extraordinary polarization states are used as a reference wave and an object wave. This method utilizes the maximum projection area of a spatial light modulator, hence, improves the focusing power.

1. 研究背景と提案手法

光散乱は、生体組織、濁った大気、雲などの複雑な媒質における基本的な光学現象である。光を物質に入射させた時、これを吸収すると同時に光を四方八方に放出する。そのため、可視光から近赤外光に対して強い散乱体として働く生体では、外部から光を入射したとしても散乱により内部からの情報が埋もれてしまう。散乱体の向こう側にある物体の散乱透視イメージングや散乱体越しの集光などの光波操作を実現する手法の一つに透過行列を用いる[1]。本研究では、位相型空間光変調器の複屈折特性を用いて、入射光と出力光の偏向を制御することで変調素子がつ領域を最大に利用できる方法を提案する。提案手法は従来手法に比べて透過行列に用いられる空間変調モードが多くなり、より高度な集光効果が期待できる。

透過行列 \mathbf{T} は、散乱体に入射する光場 \mathbf{I} と散乱体を透過した後の光場 \mathbf{O} を用いて、 $\mathbf{O}=\mathbf{TI}$ の線形式を満足する。透過行列に用いる出力光 \mathbf{O} は複素振幅であるため、干渉系と 4 ステップ位相シフト法を用いて位相分布を計測する[1]。4 ステップ位相シフト法では参照光の位相をそれぞれ $0, 45, 90, 135$ 度にして 4 枚撮影してから、下の式で物体光の複素振幅を求める。

$$o = \frac{I_0 - I_{90}}{4} + i \frac{I_{135} - I_{45}}{4}$$

干渉系の構成として、図1(a)のように物体光と参照光を空間光変調器 (SLM) の異なる領域に分割する方法が一般的に使われている[3]。しかし、物体光の変調領域が狭くなり、変調効果が低下する。本研究では、位相型空間光変調器の複屈折特性を用いて、入力光の偏向方向を SLM の変調方向に対して 45 度を設定する[2, 3]。入射光は垂直と水平のベクトル成分に分解できるため、参照光成分となる通常光線と物体光成分となる異常光線の成分を同時に持つ。さらに出力に 45 度の偏光板を置いて物体光と参照光の偏向がそろい、干渉縞を計測する。

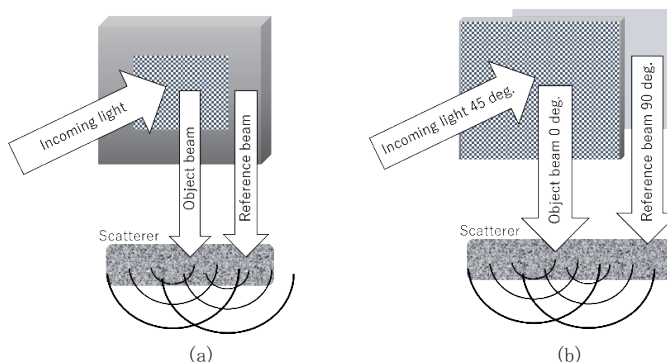


図 1 空間光の領域分割方法と偏向分割方法（提案手法）の比較。

2. 実験による検証

図2に示す実験系について説明する。レーザーには波長532nmを用いる。レーザーを偏光板1に向けて照射すると、45度の斜め偏光成分のみが通過する。SLMで横方向成分の異常光線のみが変調され、レンズ1の方向に反射する。同時に、垂直偏向成分を持つ通常光線はSLMの作用を受けず、反射してレンズ1に向かう。レンズ1を通過したレーザー光は散乱体を通じたあと、対物レンズ、レンズ2を通り、再び45度の偏光板を通ることで常光線と異常光線の干渉を撮影する。散乱体にはディフューザーを用いた。また、SLMの入力パターンは 32×32 ピクセルとし、それをSLMの実際のピクセル数 (600×800 ピクセル) に合わせて15倍に拡大して表示した。観察面ではより大きい領域を計算に含むために 128×128 または 256×256 ピクセルの領域を1/4倍に縮小して 64×64 ピクセルにし、透過行列を求めた。

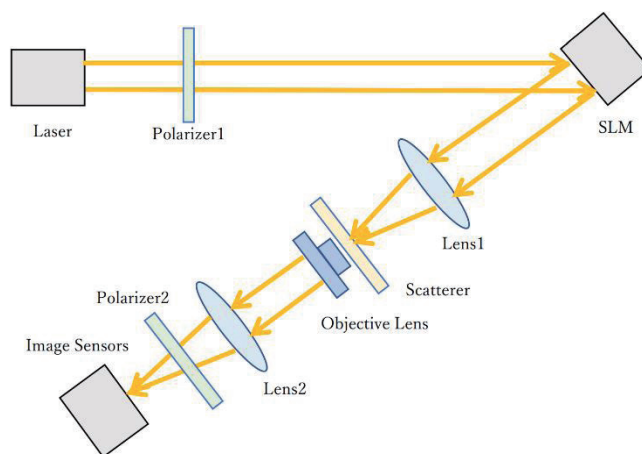


図2 実験系の光路図.

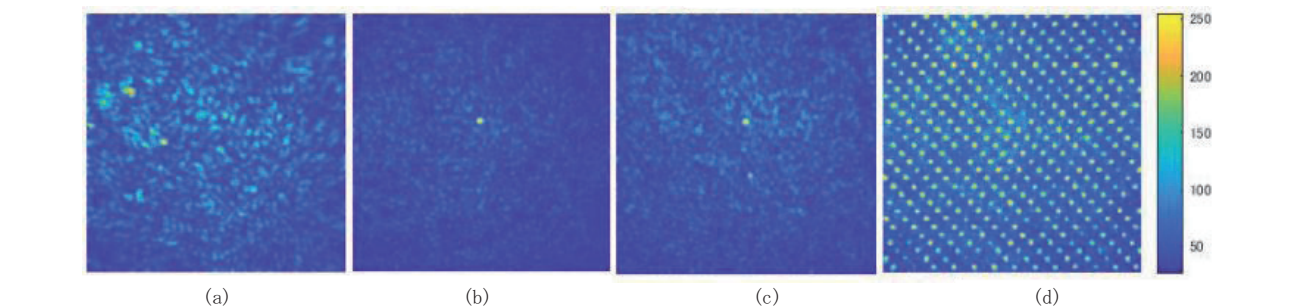


図3 集光の比較, (a) 無変調光をSLMに表示した際の画像, (b) 提案手法を使って透過行列を求め、一点に集光した結果, (c) 従来手法で同じ位置に集光させた結果, (d) 提案手法で全画面に一点ずつ集光させた画像を合成した結果.

まず、散乱体の直前で1点に集光する点画像を作成し、求めた透過行列の随伴行列をかけることで入力光の複素振幅を求めた。結果から位相情報のみをSLMに表示し、変調された光波を散乱体に通すことで集光特性がどのように変化するかを確かめた。また、従来の方法との比較も行った。図3(a)に集光画像とSLMでの変調なしのときの画像を示す。図3(b)と(c)は提案手法と従来手法で同じ位置に集光させたときの画像を示す。最後に集光スポットが場所によって変化するかを確かめるため、10ピクセルずつスポットをずらし、それらを重ね合わせたものを図3(d)に示す。図から変調パターンを変えることで、異なるスポットに集光でき、強度は場所によって異なることが確認できた。

3. まとめ

本研究では同軸型で、変調素子の空間領域をフルで活用できる方法として、偏向分割方法を提案した。提案手法では、通常光線は無変調光を使った定数とみなし、異常光線のみランダムパターンと4ステップ位相シフトパターンを表示しながら透過行列を求めた。結果から計測面のすべての場所に集光できることを確認した。

謝辞

本研究は公益財団法人豊田理化学研究所の豊田理研スカラー助成によって行われたものであり、ご支援いただきました公益財団法人豊田理化学研究所にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

REFERENCES

- 1) S. Popoff, *et al.*, *Nature communications*, **1,1** (2010) 81.
- 2) 岡田英介, 全 香玉, 的場 修, *OPJ2022*, (2022) 49.
- 3) E. Okada, X. Quan, K. Ohta, N. Yoneda and O. Matoba, *OPIC2024* で発表予定.