

散乱媒質はイメージングの「敵」か「味方」か？

－「敵」を「味方」に変える相関イメージング－

Scattering Medium: Foe or Friend in Imaging? Correloscopy Turns Foe to Friend

宇都宮大 CORE ○武田 光夫

Utsunomiya Univ., CORE

E-mail: takeda@opt.utsunomiya-u.jp

屈折率ゆらぎ媒質を通したイメージング技術は天文学、生物学、医学など広い分野の共通基盤技術として重要性を増しつつある。これまで、揺らぎ媒質はイメージングを妨げる「敵」とみなされ、敵を封じることにより研究努力が傾注されてきた。補償光学はその典型である。発想を変えて「敵」を「味方」に転じることができないか？本講演では、補償光学による波面補正が困難な強い散乱性を持つ媒質（すりガラスなど）の背後に隠された物体を散乱光の相関情報から透視再現する相関イメージングと散乱媒質をレンズ代わりに利用する強度相関顕微鏡について紹介する。

1. 波面の乱れに不感な相関イメージング¹（「敵」を封じる）

物体面上の波動場 $u(\mathbf{r})$ と入射瞳面上の波動場はフーリエ変換 $U = \mathcal{F}[u]$ の関係がある。揺らぎ媒質があると瞳関数にランダムな位相 $\exp(i\phi_r)$ が付加され、射出瞳上の波動場は $U \exp(i\phi_r)$ となる。像分布は瞳関数のランダム位相により拡散されてスペックル状に広がった点像 $h(\mathbf{r}) = \mathcal{F}[\exp(i\phi_r)]$ とのコンボリューション $\hat{u}(\mathbf{r}) = \mathcal{F}[U \exp(i\phi_r)] = u(-\mathbf{r}) * h(\mathbf{r})$ になり、物体情報が失われる。そこで、波動場 u , $\hat{u}$ の代わりに波動場の相関関数（コヒーレンス関数）に着目すると、Wiener-Khinchin 定理により $\hat{I}(\Delta\mathbf{r}) = \hat{u} \otimes \hat{u} = \mathcal{F}[|U \exp(i\phi_r)|^2] = \mathcal{F}[|U|^2] = u \otimes u = \Gamma(\Delta\mathbf{r})$ の関係が成立する（ $\otimes$ は相関演算）。つまり、波動場は媒質の揺らぎや散乱の影響を強く受けるが、相関関数（コヒーレンス関数）は不感でその影響を全く受けないことがわかる。相関関数から物体情報を取り出す方法は2つある。【A.位相回復】パワースペクトル $|U|^2$ をもとに瞳面上の波動場 U の位相を Fienup 位相回復アルゴリズムで推定し、 $u = \mathcal{F}^{-1}[U]$ から物体像を求める。【B. ホログラフィー】物体近傍に参照点光源を置くと $[\hat{u}(\mathbf{r}) + \delta(\mathbf{r} - \mathbf{a})] \otimes [\hat{u}(\mathbf{r}) + \delta(\mathbf{r} - \mathbf{a})] = \hat{u}(\mathbf{r} - \mathbf{a}) + \hat{u}^*(\mathbf{r} + \mathbf{a}) + \hat{u}(\mathbf{r}) \otimes \hat{u}(\mathbf{r}) + \delta(\mathbf{r})$ となり、空間分離された第1項から物体像が得られる。相関関数はシアリング干渉計で検出することができる。

2. 散乱媒質を利用したスペックル強度相関レンズレス顕微鏡²（「敵」を「味方」に変える）

図のように準単色光で空間的にインコヒーレント照明された物体からの光は薄い散乱層で散乱されて観測面上に $|\hat{u}|^2 = |h|^2 * |u|^2$ のような強度分布を生じる。物体面上に点光源を置いて観測面上生じるスペックル状の点像強度分布 $|h|^2$ をあらかじめ記録しておき、観測強度との相互相関 $|h|^2 \otimes |\hat{u}|^2 = |h|^2 \otimes (|h|^2 * |u|^2) = (|h|^2 \otimes |h|^2) * |u|^2$ を求める。 $|h|^2 \otimes |h|^2 \approx \delta(\mathbf{r}) + (\text{定数})$ と近似すると $|h|^2 \otimes |\hat{u}|^2 \approx |u|^2 + (\text{定数})$ となり、物体像が再生される（スペックルの相関幅は回折限界の点像と同じなので回折限界像が得られる）。再生像の倍率は $m = -z/\hat{z}$ で与えられ、薄い光散乱板を対物レンズ代わりに利用した簡単で軽量かつ安価な無収差顕微鏡が実現できる。

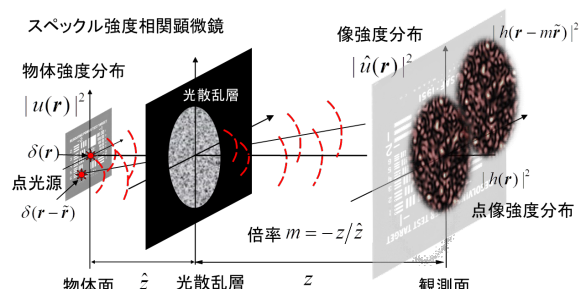


Fig.1: Lensless microscope based on speckle correlation.

1. M. Takeda, A. K. Singh, D. N. Naik, G. Pedrini, W. Osten, "Holographic correloscopy - unconventional holographic techniques for imaging a three-dimensional object through an opaque diffuser or via a scattering wall: A review," IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 12, No.4 (8, 2016) pp. 1631-1640. DOI: 10.1109/TII.2015.2503641
2. A. K. Singh, G. Pedrini, M. Takeda, W. Osten, "Scatter-plate microscope for lensless microscopy with diffraction limited resolution," Scientific Reports (September 2017) 7: 10687 | DOI:10.1038/s41598-017-10767-3