強度輸送方程式に基づく位相イメージングにおけるパラメータ最適化

Parameter Optimization in Phase Imaging Based on Transport-of-Intensity Equation

株式会社 SCREEN ホールディングス　○大西 葵, 仁坂 健一, 加藤 佳祐, 北村 藤和
SCREEN Holdings Co., Ltd., ○Aoi Onishi, Kenichi Nisaka, Keisuke Kato, Fujikazu Kitamura
E-mail: a.onishi@screen.co.jp

1　はじめに

光を用いて透明物体の位相情報を取得する定量位相イメージング (QPI:Quantitative Phase Imaging) の一つに、簡易な光学系で実現可能な強度輸送方程式 (TIE:Transport of Intensity Equation) に基づく手法 [1](TIE 法) がある。TIE 法による高精度な位相計測の実現には位相計測対象に応じた計測パラメータの最適化が必要とされるが、それらパラメータの明確かつ体系的な最適化方法は確立されていない。本発表ではその方法について述べる。

2　TIE 法の原理

TIE は近軸のヘルムホルツ方程式から導かれ、

$$\nabla^2\phi_z(x,y) = -\frac{2\pi}{\lambda I_0}\frac{\delta I_z(x,y)}{\delta z} \tag{1}$$

とあらわされる。ここで、λ は光源の波長、$\phi_z(x,y)$ は位置 z における対象の位相分布であり、I_0 と $\delta I_z(x,y)/\delta z$ はそれぞれ位置 z における対象の強度値と伝搬方向 (z 方向) の強度の微分である。ここで式 (1) を $\phi_z(x,y)$ について解くと

$$\phi_z(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda I_0}\mathrm{IFT}\left[\frac{1}{4\pi^2(\mu^2+\nu^2)+\alpha}\mathrm{FT}\left[\frac{\delta I_z(x,y)}{\delta z}\right]\right] \tag{2}$$

のようにあらわされる。α は正則化パラメータ、μ、ν はそれぞれ x 方向、y 方向の空間周波数である。$\delta I_z(x,y)/\delta z$ の取得には

$$\frac{\delta I_z(x,y)}{\delta z} \approx \frac{I_{z+\Delta z}(x,y) - I_{z-\Delta z}(x,y)}{2\Delta z} \tag{3}$$

などの近似が用いられる。この時、Δz は位置 z からの距離 (デフォーカス距離) である。式 (2)(3) より、位置 $z \pm \Delta z$ における強度分布 $I_{z\pm\Delta z}(x,y)$ をそれぞれ取得することで、位置 z における位相分布 $\phi_z(x,y)$ の取得が可能であることがわかる。ここで、光強度分布に関わる情報 (I_0 や $I_{z\pm\Delta z}(x,y)$) は Δz を決定することで取得可能である一方、Δz や α は計測対象の情報に応じて計測者が一意に決定する必要があり、これらのパラメータが位相計測精度に大きく影響する。

3　TIE 法のパラメータ最適化

TIE 法における最適な Δz と α は、光学系や計測対象により異なるため、最適化方法は明確に確立されておらず、これらのパラメータは都度、結果や経験を基に最適化することが一般的であった。そこで、我々は任意の対象における最適な Δz と α が決定可能な方法を提案する。

本稿では Δz の決定方法について述べる。本方法では、Fig.1(a) に示すように計測対象において想定されるサイズ M、最大位相差 ϕ_{Max} を予め指定する。その後、指定したサイズに対応した周波数をもつ正弦波 (Fig.1(b)) についてシミュレーション上で TIE 法を実施し、Δz と取得される位相との関係を取得する。$M = 40[\mu\mathrm{m}]$、$\phi_{Max} = \pi/2[\mathrm{rad}]$、$\lambda = 633[\mathrm{nm}]$ として計算を実施した結果を Fig.1(c) に示す。Fig.1(c) より、Δz が小さい場合は取得される位相が不安定であり、Δz が大きい場合には減衰していることが確認できる。この結果より、本条件では誤差が小さい Δz =150[μm] 前後が最適な値と言える。このように、Δz と取得される位相との関係性を明らかにすることで、その情報を基に最適な Δz を決定することができる。講演においては、実験環境時のノイズや誤差の影響、さらにもう一方のパラメータである α の最適化方法についても議論する。

参考文献

[1] M. R. Teague, J. Opt. Soc. Am. **73**, 1434 (1983).

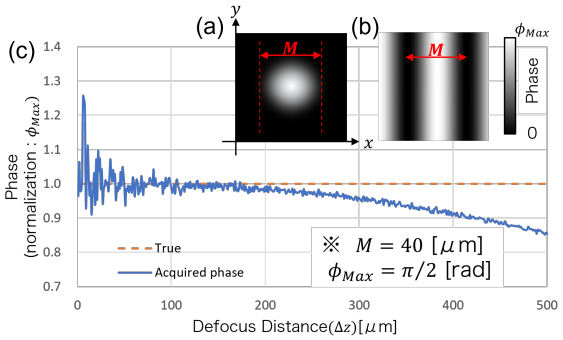

Fig. 1: (a) Assumed object, (b) A sine wave (frequency = M), (c) Relation between acquired ϕ_{Max} and Δz