波長依存ファイバスペックル照明を用いた反射イメージ再構成

Reflective-image reconstruction using wavelength-dependent fiber speckle illumination

東北大工 [1]，東北大医工 [2]　○(M1)久保田 達也 [1]，片桐 崇史 [1]，松浦 祐司 [2]
Tohoku Univ. , Graduate School of Engineering[1], Graduate School of Biomedical Engineering[2]
°Tatsuya Kubota[1], Takashi Katagiri[1], Yuji Matsuura[2]
E-mail: tatsuya.kubota.r2@dc.tohoku.ac.jp

1.　はじめに

医療・生物学分野において低侵襲で細管内部の観察が可能な極細径内視鏡への需要が高まっている．従来，外径 1 mm 以下の内視鏡には光ファイババンドルが使用されてきたが，細径にするほど画質が劣化する問題があった．

我々の研究グループでは，これまで，一本の光ファイバを介して取得した線形観測データから画像を再構成するイメージング手法について検討してきた[1]．今回，全ファイバ光学系による外径 125 μm の内視鏡により反射像の概観を捉えることに成功したのでその結果について報告する．

2.　実験系と撮像原理

図 1 に実験系の概要を示す．照明用光源として近赤外波長可変レーザ（1510-1570 nm）を用いた．偏波保持ファイバ（PMF）を介して出力された照明光は，光減衰器で強度調整されたのち，ダブルクラッドファイバカプラ（DCFC）内をシングルモード伝搬し，マルチモードファイバ（MMF: 長さ 2 m，コア径 105 μm，NA 0.1）へ結合された．試料からの反射光は MMF を逆方向に伝搬し，DCFC により分岐され，光検出器（PD）により検出された．

撮像は， MMF の出射端近傍界分布（NFP）と PD における検出光強度の線形性を利用する．測定に先立ち，試料のない状態で波長を等間隔で掃引し，InGaAs カメラにより観測される各波長における NFP を行列 $\boldsymbol{A}$ に格納する．続いて MMF 端面を試料面に近接して各波長における反射光強度をベクトル $\boldsymbol{b}$ へ格納する．ここで，求める試料表面の反射光強度分布をベクトル $\boldsymbol{x}$ とすると，下記の線形一次方程式に帰着する．

$$\boldsymbol{Ax} = \boldsymbol{b} \tag{1}$$

(1)式は劣決定系であるが，許容誤差 ε を与え，下記の Total Variation 最小化問題を解くことにより，近似的に反射像を再構成することができる[2]．

$$\hat{\boldsymbol{x}} = \min_{\boldsymbol{x}} \|\boldsymbol{x}\|_{TV} \text{ subject to } \|\boldsymbol{Ax} - \boldsymbol{b}\|_2 \le \varepsilon \tag{2}$$

3.　反射像の再構成

波長 1510 nm から 0.6 nm 間隔で 100 回の測定を行い，行列 $\boldsymbol{A}$ を構成した．NFP の全波長間相互相関平均は 0.28 であり十分低い値であることを確認した．一方，ベクトル $\boldsymbol{b}$ の測定には NFP の測定に用いた InGaAs カメラを流用し，全画素の強度和を反射光強度とした．図 2 にテストターゲットを試料としたときの再構成像を示す．比較のため，波長 1510 nm における NFP と試料の透過像も示す．図 2 より，透過像に示す数字の「3」の概観を捉えたことを確認した．

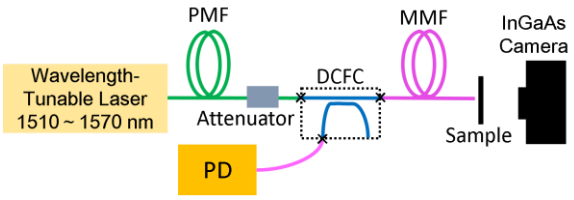

Figure 1. Schematic of measurement setup.

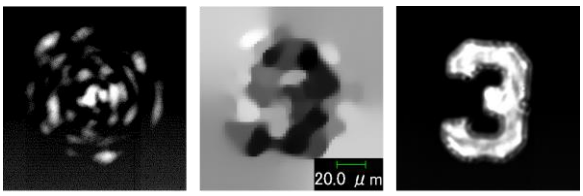

Figure 2. Example of NFP (left), reconstructed image (center), and transmission image (right).

4.　まとめ

全ファイバ光学系による測定システムを構築し，ファイバスペックル照明による反射像の再構成を実証した．本構成は，先端にレンズ系や走査系が不要であることから，100 μm 以下の超細径内視鏡への応用が期待される．一方，現時点のシステムは，MMF の曲げに対して脆弱であるという課題を有する．今後 MMF の短尺化の検討が必要である．

参考文献
[1] 久保田 達也 他，信学技報，vol. 118, No. 238, pp. 105-108 (2018).
[2] Antonin Chambolle, J. Math. Imaging Vis., vol. 20, No. 1, pp. 89-97 (2004).

© 2019年 応用物理学会