

修士学位論文要約（令和2年3月）

スペckル照明を利用した光ファイバイメージングの内視鏡への実装に関する研究

大久保 享一

指導教員：松浦 祐司

Study on implementation of optical fiber imaging using speckle illumination to endoscope

Takaichi Okubo

Supervisor: Yuji Matsuura

We fabricated A fiber probe to mount a fluorescence imaging method using excitation light with speckle structure for illumination on an endoscope. A fiber probe inserted into the forceps port of conventional endoscope is composed of multiple multi-mode fibers (MMFs), and an endoscope lens is attached at the tip, so that excitation light irradiation and fluorescence spectrum detection can be performed. A fluorescence image is reconstructed from the obtained data by compressed sensing. We confirmed the usefulness of the fabricated fiber probe by a demonstration experiment.

1. はじめに

次世代の内視鏡診断・治療技術として蛍光ナビゲーションが注目を集めている^[1]。蛍光ナビゲーションとは、腫瘍や血管等に蛍光物質を特異的に集積させることで、患部を発光させる技術である。蛍光物質ごとに観察部位が異なるため、多色識別やスクリーニングへの応用が期待されている。一方、蛍光内視鏡の開発においては、内視鏡先端部に蛍光像観察用の機器が密集することによる太径化が問題となり、十分な光路の確保が難しいことから分光能力には限界が見られる。また、微弱な蛍光を観察するためには、高感度なイメージセンサが必要となるが、サイズの制限を受けるため、開発は困難である。

先行研究では、ランダムなスペckル構造を有する励起レーザー光を利用した細径かつ高感度な蛍光内視鏡の実現可能性を確認した^[2]。本報告では、その原理について紹介するとともに、提案システムを内視鏡へ実装するに当たり、内視鏡レンズを用いたファイバプローブを作製し、その有効性を検証した。

2. イメージングの原理

図1に提案する内視鏡システムの構成を示す。通常の電子内視鏡へ、MMFの窓用に小さいチャンネルを設ける。励起レーザー光がMMFを介して試料面に照射される時、MMF内でのモード間干渉によってランダムなスペckル構造を有する照射パターンが発生する。この時、励起レーザー光の波長が内視鏡カメラの感度範囲内であればカメラで照射パターンを取得できる。また、試料面に蛍光物質がある場合、照射パターンの形状に応じた強度の蛍光が発生し、その一部はMMFを介して外部の分光計測器に検出される。照射パターンを変

更し、そのパターンと蛍光強度を同時に取得する。これを複数回行い、照射パターンと蛍光強度を基に蛍光像の濃度分布を算出する事で、下記の線形一次方程式が得られる。

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

ここで、行列 A は照射パターン、ベクトル b は蛍光強度、ベクトル x は求める試料面内の蛍光分布である。測定回数が画素数より少ない場合、(1)式は劣決定系となるが、下記の Total Variation 最小化問題を解くことにより蛍光分布 x を再構成することができる。

$$\hat{x} = \min_x \|x\|_{TV} \text{ subject to } \|Ax - b\|_2 \leq \epsilon \tag{2}$$

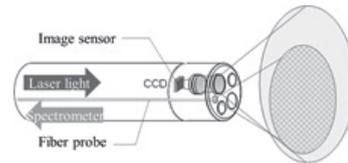


図1 撮像系の概略図

3. 単一ファイバプローブ

基礎実験によりファイバ素線では内視鏡視野面内よりもスペckル照射範囲が狭い事が判明したため、内視鏡用レンズユニット(住田光学ガラス社製)を使用し照射範囲拡大を図った。コア径の異なる2つのマルチモードファイバ(MMF)と中空光ファイバそれぞれを基礎とするファイバプローブを製作した。各プローブの構成を図2に示す。また、各プローブでの実験より得られた結果を表1にまとめた。プローブcは検出面積が広いものの、全反射では無い事から蛍光スペckトルが著しく減衰し、蛍光検出感度が低くなってしまった。この結

果比較から照射範囲拡大に加えて、MMFを基礎とするプローブにおいて高いスペックルコントラストと広い検出面積の確保が重要であると判明した。

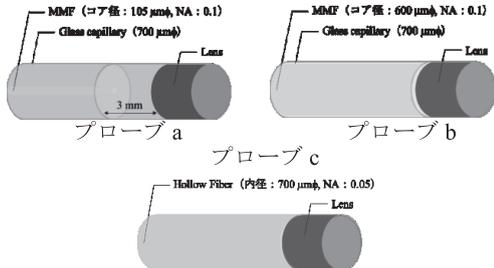


図2 MMF基礎プローブの構成

表1 単一ファイバプローブの比較

	背景光	スペックル コントラスト	蛍光検出 感度
MMF 105 μm	△	○	×
MMF 600 μm	△	×	○
中空	○	○	×

4. バンドル型ファイバプローブ

単一ファイバプローブでの検討をふまえて、励起用ファイバと検出用ファイバを分離した2つのバンドル型ファイバプローブを作製した。図3に各プローブの概略図を示す。プローブ右の画像は端面図である。プローブdでは励起光照射と蛍光検出を一本のプローブに集約しているため、細径に保つことが可能である。一方、プローブeでは励起用ファイバと検出用ファイバのそれぞれにレンズを配置したことで、低ノイズな特性が期待される。各プローブでの背景光を比較した結果、プローブdではレンズ端面で反射した光が検出用ファイバやその被覆を励起し、大きな背景光が検出された。一方プローブeでは目的の蛍光を高いSNで検出可能だった。この比較から以降の実験ではプローブeを実験に使用した。図4に実験系の概略図を示す。蛍光検出用MMFは分光器スリットで縦に並べて全てがスリット内に収まるように配置した。サンプルはすりガラスに蛍光波長540nmの量子ドットを塗布したものを使用した。

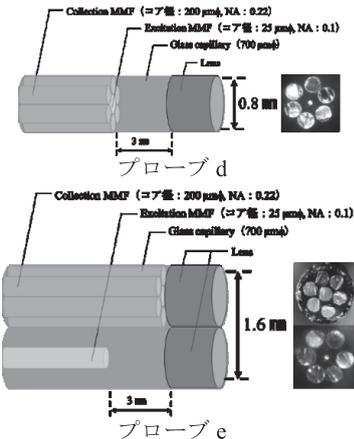


図3 各プローブの構成

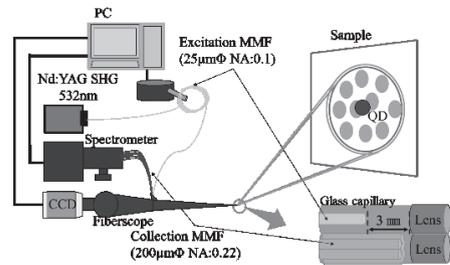
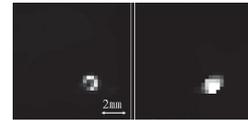
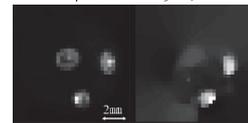


図4 実験系の概略図

単一スポットの測定対象は32回、3点スポットの測定対象は256回の測定により再構成した。図5に比較のため励起光を均一照射し、直接カメラで撮影した蛍光像と再構成した蛍光像を示す。図より内視鏡の視野内において蛍光の位置・大きさをおおよそ推定できていることを確認した。



単一スポット



3点スポット

図5 撮像対象(左), 再構成画像(右)

5. まとめ

本研究では、提案手法である蛍光イメージング法の内視鏡への実装に向けて、MMFと内視鏡レンズを基礎としたファイバプローブの製作し、実証実験を通して有用性を確認した。基礎実験で照射範囲拡大の必要があると判明したため、内視鏡レンズによって解決を図った。次に、単一ファイバプローブの実験から、高いスペックルコントラストと広い検出面積の両立が必要だと判明したため、バンドル化によって解決を図った。励起・検出が一体となったものと並列になったものの2つを製作した。各プローブの比較から、並列型を使用し再構成実験を行った。単一スポットと3点スポットの2つの測定対象に対してどちらも一・大きさを良く推定出来ており、今回製作したプローブの有用性が確認できた。今後は、推定精度の向上を目指したプローブの開発を目指す。

参考文献

- 1) Tetsuya Nakamura, Takeshi Oinuma, Hironori Masuyama, "Relationship Between High-Resolution Magnifying Electronic Endoscope and Photodynamic Diagnosis and Photodynamic Therapy for Gastric Cancer," JISLSM, 35, 87-93 (2014).
- 2) 中野 修平 他, レーザ学会学術講演会第37年次大会, I107aVII04 (2017).