

# 触覚・3D形状・圧力センシングを 可能にする医療用光ファイバセンサ

アンディ・ジルーリ

従来の光ファイバセンシングを乗り越え、センシングファイバの新タイプと構成により低侵襲手術に新機能を提供する。

医療産業は、光ファイバが初めて内視鏡に採用された1957年早期より様々な光ファイバ技術を使用してきた。それ以来、光ファイバを組み込んだ医療機器の範囲は比較的緩慢な技術成長のカーブを描いてきているが、業界の大半が重要視しているのは内視鏡と、切断、切除、アブレーション用に光パワーを送達する多様な方法である。これらの技術は、光ファイバの基本的メカニズム、光を一カ所から他所へ誘導する能力である。

しかし、光ファイバは温度、ひずみ、圧力に対するそれ固有の感度を利用することで非常に高度な機能を提供することができる。過去5年間で、医療産業は歴史的に重要である光ファイバセンシング方式の採用で大きく前進し、体内環境でそれが利用できるようになった。

ファイバセンサが医療産業に深く入り込む最近の技術進歩の主な領域は、低侵襲手術(MIS)である。このような手術は、侵襲性の高い外科手術に取って代わりつつある。例えば、心臓切開手術であれば、これは患者に長期の回復時間を強いることになり、大きな傷が残る。低侵襲手術後の短い回復時間により、病院のベッドの所要時間が短縮されたので、手術当たりの有効原価低減となり、同じ期間にさらに多くの手術が行えることになる。民間の医療センターでは、削減された時間とコストは、限られた予算内で高齢人口に対

する高いレベルのサービス維持に決定的に重要になる。

MISの利点は今では十分な根拠があり、新たなMIS手術開発、あるいは既存の方式のさらなる改善のために医療機器メーカーの投資を促進している。ここで取り上げる、最近開発された3件の素晴らしいMIS用光ファイバ技術は、触覚フィードバック、3次元(3D)形状センシングおよび圧力センシングである。

## 触覚フィードバック

MISは、体内に挿入する小型ツールの利用を必要とする。挿入は、手術のために作られた小さな入口あるいは自然の開口部を通して行われる。したがって医師の手は、処置が行われる場所に物理的に触れることはない。手術が遠隔操作の性格を持つとは、医師がツール端から最小限のフィードバック、あるいはまったくフィードバックを受けないことを意味する。

外科医を支援するために、処置に対するある程度のフィードバックが得られるように様々な可視化技術が利用されている。腹腔鏡手術(キーホール手術として知られている)やロボットアシスト手術は一般に光ファイバ内視鏡、小型デジタルカメラを使用してツールの先端で体内を直接見る。これによって医師は視覚的フィードバックは得られるが、触覚はないので、ハーネスと

様々な組織構造とを識別することは難しい。さらに、外科縫合で結び目を作るなどの単純な作業は、ヒトの手で行う場合と比べて、正確な、あるいは一貫性がある結果にはならない。こうした課題を克服するために、ファイバブラッググレーティング(FBG)が手術道具に進出してきている。これによって、ツールが受け取る力が、機械的な力のフィードバックあるいは可視化を通じて外科医に伝えることが可能になる。

光ファイバコアに描き込まれたFBGは長手方向のひずみに対して高い感度がある。光ファイバに沿ってひずみが増すので、FBGの中心波長の反射応答が長波長側へ直線的にシフトするためである(図1a)。

多数のFBGを利用する、あるいはFBG構造を操作することで、空間分布ひずみプロファイルが得られる(図1b)。そのようなFBGを外科ツールの長さに沿って適用すると、最も関心のある領域で触覚フィードバックが得られる。これの典型例は把持ツールに触覚センシングを付加することである。ここでは把持力と拡散力の両方を計測して医師にフィードバックし、どの程度強く把持しているか、組織をこじ開けるためにどの程度の力を加えているかを示すことができる(図1c)。

そのようなツールには微小化と滅菌が求められるので、標準光ファイバは、どちらかと言えば、そのようなアプリ

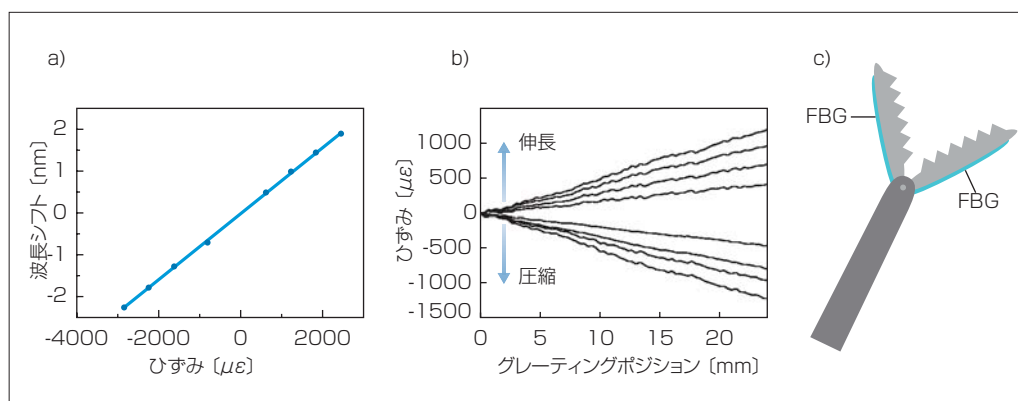


図1 FBGの中心波長シフトは直線的にひずみに反応しており、ひずみの関数としてプロットされている(a)。FBGの圧縮は負のひずみ領域で、伸長は正のひずみ領域で観察される。FBGの長さに沿ったひずみの空間的な分布が、FBG全体でひずみ勾配として示されている(b)。伸長と圧縮についてそれぞれ4回の計測が行われている。把持ツールのコンセプトは、ツールが観察するひずみを計測するFBGを含むものであり、これによって医師は力のフィードバックを得る(c)。

ケーションには適さない。英ファイバコア社のクラッド径縮小、ポリイミド被覆SM1500(5.3/80)Pファイバのような極めて低い曲げ損失、高温耐性被覆の、特殊光ファイバならFBGをファイバのコアに描き込める。

このタイプのファイバは、直径が標準通信用光ファイバの約半分であり、標準光ファイバなら機械的、光学的に問題が生ずるような展開状態にも耐えることができる。特殊ポリイミド被覆によってファイバは、性能劣化なく多くの加圧滅菌プロセスを乗り越え、ファイバは使い捨て医療器具、半使い捨て医療器具の両方で使用可能になる。

そのようなセンサのコスト低減と、機械的な信頼性改善を支援するために、ファイバコア社は、被覆を除去することなく、ファイバのコアにフェムト秒レーザでFBGを描き込んだFBGを提供してきた。これは、他のFBGメーカーの技術で必要とされるように、化学的エッチングで被覆を除去する必要がないので、ファイバの機械的強度が危険にさらされることはない。

### 3D形状センシング

ロボット外科手術や腹腔鏡手術では、ファイバ内視鏡や微小カメラを利用して手順の可視化が比較的容易であるが、そのような直接的可視化法の挿入

を可能にする空間がすべての医療処置で利用できるわけではない。その結果、血管インターベンショナルラジオロジー(VIR)が開発され、血管形成デリバリ・ステントおよびカテーテル・デリバリ・ステントの画像ベースの誘導が可能になった。これらの医療手術では一般に狭幅ゲージのカテーテルを脚の付け根当たりの大動脈にガイドワイヤを使って挿入し、動脈からカテーテルを心臓、首あるいは脳に誘導して、血栓症、頸動脈、脳の手術を行う(図2)。カテー

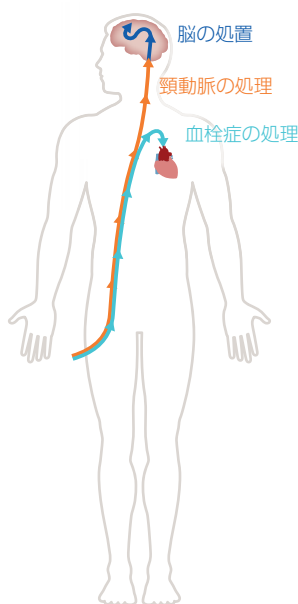


図2 概略図は、冠状動脈、頸動脈、大脳手術に使用されるカテーテルが人体を通るルートを示している。

テルが所望の個所に入ると、ステントあるいはバルーン留置などの処置が進展する。

現在、カテーテルの進行を可視化する主要な方法は、X線、CT、MRIもしくは超音波である。これらの機器のそれぞれに、かなりの欠点がある。放射線露光、重い保護服装着の必要性(X線)から手術中のMRI利用制限までである。

こうした問題への対処に、多くの商用グループがファイバオプティック3D形状センシングを開発したことで、可視化のための長期被曝の必要性を劇的に減らすことができた。光ファイバ自体が3Dトラッキングするので、カテーテル内に入っていれば、カテーテルの形状を再現することができるからである。この技術は、FBGとファイバ技術の結合に依存しており、ここでは極めて特殊なファイバがこのアプリケーション用に特別に開発された。このファイバはスパン・マルチコアファイバとして知られている(図3)。

各コアでFBG応答をモニタすることで、コア間の相対ひずみレベルが計測できる。曲げの内側のFBGは圧縮を経験し、外側のコアは拡張を経験する。ねじれが検出できるように、光ファイバは製造工程において回転されて外側コアが螺旋パスになっている。次に、スパン・マルチコアファイバをカテーテル

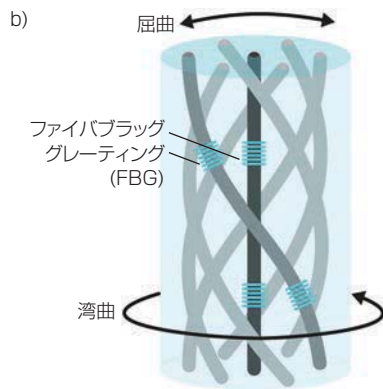
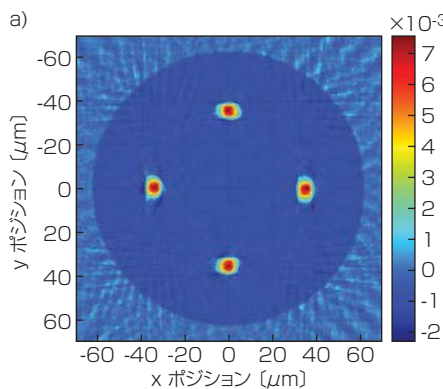


図3 ファイバコア社のスパン・マルチコアファイバ、SSM-7C 1500 (6.1/125;a)の端面と、ファイバ長が螺旋状になっているコアの模式図。各コアの長さに沿ってFBGが離散的に描き込まれている(b)。マルチコアファイバの端面画像は、IFA-100ファイバ屈折率プロファイラで計測した(提供:米インターファイバ・アナリシス社)。

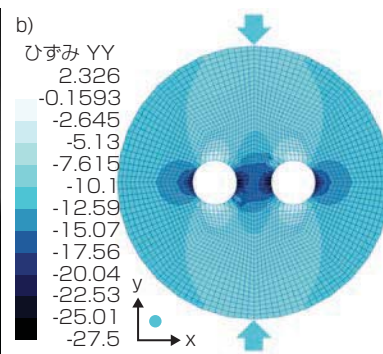
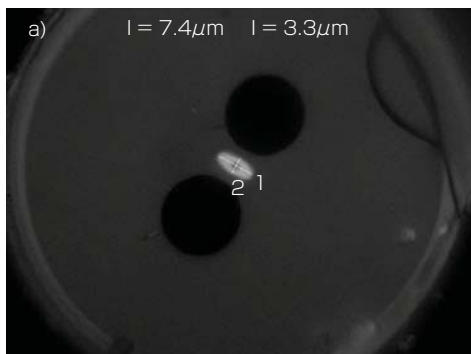


図4 写真は、THE1500 (5.5/80)Pファイバの端面を示している。これは生体内圧力センシング用に設計されている。有限要素解析(FEA)が、ツインホールファイバのy軸に流体圧によるひずみを明らかにしている(提供:ファイバコア社)。

に沿って進めることで生ずる温度と長手方向のひずみ変動を校正するために、中央のコアが校正点となる。中央のコアは曲げにも回転にも感度がないからである。

これらの要素の全てを組み合わせることで、光ファイバの形状を3Dで再現することができる。体内マップを得るために既存の可視化プロセスを使って患者の最初の画像を撮ると、今度は3D形状センサの計算された位置を身体マップに重ねることができる。カテーテルが誘導するので、VIRイメージング法のスイッチを切り、その位置に対する光ファイバのフィードバックのみに頼る。

### 圧力センシング

光ファイバは、体内で受ける流体圧に感度を持つように最適化することが

できる。ファイバコア社のTHE1500 (5.5/80)Pツインホールファイバは、楕円コアであり、クラッドコア径を縮小、ポリイミド被覆となっているので(図4a)、偏波のfast軸とslow軸でFBG反射のピーク位置の分離を表示するようにFBGが描き込める。

ファイバが流体圧を受けている時、ツインホールにファイバのコアを横断する非対称ひずみが生ずる。これは、fast軸とslow軸における微分応力光学系数となる(図4b)。これは同様にして複屈折を生じ、これがFBGピークの分離を強める(または弱める)主要な力となる。その結果、流体圧増によってピークは一層離れ、流体圧減によって、ピークは一層相互に接近する。

これによって、動脈内の圧力変動の正確な位置と計測など、様々な生体医療アプリケーションが広がる。動脈内の圧力変動は、冠動脈疾患(アステローム性動脈硬化)の指標となり得る。この疾患は、心臓発作の原因となり、脳卒中の原因となる頸動脈疾患につながる。

これらの新しいアプリケーションの展開は、経済的な要求と技術の進歩の結合がきっかけとなっている。特殊光ファイバメーカーは、医療機器メーカーが利用できるような新しいファイバ設計の開発を継続的に進めている。これによって医療機器製品のさらなる多様性が広がり、侵襲性の少ない、これまでの医療ではできなかったような新しい治療が切り開かれる。

#### 著者紹介

アンディ・ジルーリは、英ファイバコア社の技術事業開発役員。  
e-mail: andy.gillooly@fibercore.com URL: fibercore.com