

DESIGN AND FABRICATION OF AN ULTRA-THIN ACTUATOR BASED ON MEMS PROCESS FOR SINGLE OPTICAL FIBER SCANNER

孙, 滨

<https://doi.org/10.15017/1543933>

出版情報：九州大学, 2015, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済

氏 名	孫 浜
論 文 名	DESIGN AND FABRICATION OF AN ULTRA-THIN ACTUATOR BASED ON MEMS PROCESS FOR SINGLE OPTICAL FIBER SCANNER (MEMS 製造技術による光ファイバースキャナ駆動用微 細アクチュエータの研究)
論文調査委員	主 査 九州大学 教授 澤田 廉士 副 査 九州大学 教授 澤江 義則 (工学府) 副 査 九州大学 准教授 池田 哲夫 (九州大学病院 先端医工学診療部)

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

内臓の病巣と損傷のイメージを取得する方法には、広い分解能空間（ミリメートル）を目的とした CT や MRI 検査、狭い空間分解能（マイクロメートル）を目的として内視鏡検査がある。特に直接人体の内臓における病巣の表面を視覚化する用途においては、空間分解能の高い内視鏡検査が有効である。しかし内視鏡検査は直接人体に挿入するため、患者に苦痛を与える。病巣や損傷が明瞭に観察できるほどの高分解能が必要であるとともに、患者の組織精神的な外傷と鎮静薬物を減らすために、小型で柔軟な内視鏡が求められる。

現在使用されている内視鏡は主に 2 タイプである。一つはイメージセンサ内視鏡、もう一つは光ファイババンドル内視鏡である。イメージセンサ内視鏡は内視鏡先端に CCD や CMOS イメージセンサを有している。画像の分解能はこれらのイメージセンサの性能に依存しており、広範囲測定と高分解能化を両立させながら、小型化を行うことは困難である。一方、光ファイババンドル型は、複数の光ファイバを結束した構造となっており、ファイバ束の一本が一つの画像ピクセルに相当した画像を得ることができる。極細の光ファイバ束を用いた内視鏡が開発されているが、3 mm 以下の内視鏡直径では高品質イメージを得るのは難しく、1024 本の線で高品質イメージを得るには、3 mm 以上の内視鏡直径が必要である。

この問題を解決する方法として、本研究では 1 本のファイバを振動させ、光を走査させる光ファイバースキャナ型内視鏡を提案した。1 本の光ファイバのみで構成されているため、非常に小型で、その光ファイバを走査させることにより、広範囲でかつ高分解能の画像生成が期待される。

本研究では新規な光ファイバースキャナ内視鏡用微細アクチュエータの設計・作製・測定を行った。本研究で作製した微細アクチュエータは一本の光ファイバ、集光レンズ、中空円筒形磁石と 2 本の微小コイルで構成されている。直径 0.125mm の光ファイバの先端に集光レンズを装着し、ファイバの中間には外径 0.6 mm、内径が約 0.125 mm の中空円筒形磁石（コバルトニッケル）を挿入することにより、集光レンズと中空円筒形磁石の 2 つの重りからなる、2 軸 - 2 質量の 2 自由度の可動光ファイバの振動系を構成する。この可動光ファイバを 2 本のコイルが巻き付けられたチューブの中心付近に挿入し、電氣的に独立した 2 本のコイルに交流電流を印加することにより、中空円筒形磁石が電磁力により振動し、結果的に光ファイバの先端が大きな走査角度で振動する。印可電圧の周波数と光ファイバと磁石の共振周波数が一致したとき、最大の走査角を得ることができる。この研究において、微細アクチュエータの設計は 2 つ視点から行った。一つは電磁気学的

な視点、もう一つは機械力学的視点である。

微小アクチュエータの新規な設計は、以下の3つの要素により実現された。

- (1) 低磁場下でも電磁力の影響を受けやすい微小コイルの形状・位置の最適化
- (2) 質量 m_1 の集光レンズをファイバー先端に取り付け、ファイバー可動部の中間付近に質量 m_2 の中空円筒型磁石を装着した2軸-2質量からなる2自由度の可動ファイバーの構成
- (3) 3D リソグラフィシステムを用いたフォトリソ技術によるポリイミドチューブ側面へのコイル形成、あるいは3Dプリンターと手巻きコイルによるエポキシ樹脂チューブ側面へのコイル形成

まず、本研究ではマクスウェルの方程式を用いて、振動ファイバーを挿入するチューブのコイル半径、傾斜角、ピッチ、ターンを最適化した。コイルが発生する磁場は、小コイル半径、大傾斜角、小ピッチのときに大きく発生することが明らかであるが、プロセス作製技術を考慮し、コイル半径 0.5mm, コイル傾斜角度 60° 、コイルピッチ $80\mu\text{m}$ とした。

次に、この光ファイバーの共振周波数を調べるため、振動シミュレーションを行った。一般的な光ファイバーの走査では片持ち梁の1次共振周波数が用いられているが、本研究では、1次共振周波数と比較して大きな走査角が得られる2次共振周波数を用いた。シミュレーションの結果、通常の片持ち梁の1次共振周波数での走査角度が 0.25° であるのに対して、2次共振周波数における 4.0° の最大走査角を得た。

中空円筒型磁石を装着した光ファイバーを挿入する側面にコイルを有するチューブの作製には、3Dプリンターを用いる方法と3Dリソグラフィ技術を用いる2つの方法を適用した。3Dプリンターを用いる方法は材料にエポキシ樹脂を用い、外径 1.2mm に $80\mu\text{m}$ ピッチで切り欠きを入れ、その切り欠きに導線を斜めに手巻きすることにより作製した。導線は $75\mu\text{m}$ の銅線を使用し、 60° の傾斜で巻き付けた。

3Dリソグラフィ技術を用いた方法では、径 1mm のポリイミドチューブにUV硬化樹脂を塗布し、チューブ側面に 60° の傾斜を付けて、3Dプリンターを用いた方法と同じ $80\mu\text{m}$ のピッチで手巻きではなくコイルパターンを形成した。

3Dプリンターとコイルの手巻きで作製したチューブの中に挿入した、2軸-2質量 (m_1 と m_2 の質量) からなる2自由度系の可動ファイバーの振動特性を、ハイスピードカメラによる観察ならびに共振時の光ファイバー先端の変位を測定することにより、走査角ならびに周波数を測定した。コイルに 1Vpp の AC を印可した時、1次共振周波数での走査で、ファイバー先端の変位が $85.7\mu\text{m}$ 、2次共振周波数での走査で $125.3\mu\text{m}$ の先端変位量を得た。この変位から走査角を算出し、振動シミュレーション結果とほぼ一致した 4° の走査角を得た。

また、3Dリソグラフィシステムでフォトリソ技術によりコイルパターンを形成した、径 1.0mm のチューブを用いたものでは、コイルパターンの一部がショートしていたため振動実験ができなかったが、フォトリソグラフィ技術により、径 1.0mm のチューブにピッチ $80\mu\text{m}$ で側面に斜めのコイルパターンを立体的に形成することにより、究極の小型化を実現できる可能性を示唆したことは注目に値する。

以上のように、3Dプリンターを利用することによりコイルの斜め巻きを実現したポリイミドチューブの中に挿入した2軸-2質量からなる2自由度の可動ファイバー振動系の振動特性を利用し、大きな走査角の光ファイバースキャナを実現し、小型で柔軟で、かつ広範囲において高分解能な画像を得る可能性がある微小アクチュエータを提案するとともにその実現可能性を示した。以上の結果は、小型で高分解能のイメージを広い領域の画像を取得可能とする内視鏡の実現に資するもので、生命工学の分野において価値ある業績と認められる。

よって、本研究者は博士(工学)の学位に値すると認める。

