

血管内超音波神経観察のための二自由度アクチュエータの開発

Two Degrees of Freedom Actuator for Nerve Observation using Intravascular Ultrasounds

2031017



研究代表者

豊橋技術科学大学
エレクトロニクス先端融合研究所テニユアトラック
助 教

真 下 智 昭

[研究の目的]

心臓病の治療などを目的として、カテーテルを用いて血管の中から神経を焼灼するアブレーション治療が注目を集めているが、血管の中からでは神経の位置や形状を特定することは難しいのが問題である。血管の中から神経を観察するの最も現実的な方法は、トランスデューサの素子自体を小さくできる超音波発振素子を用いることが一つの有力な方法である。超音波は、神経ブロックなどで知られるように経皮的に神経を観察することが可能であり、超音波そのものも胎児の診断でも使われるほどに安全なものである。その超音波発振素子を二方向に駆動しスキャンして神経を観察できるようなアクチュエータがあれば良いが、カテーテルの内径は大きくても3mmほどしかなく実用的なアクチュエータはこれまでにない。もし、このサイズのカテーテルに入れられる二自由度のアクチュエータを開発できれば、血管内での超音波による神経観察が現実的なものとなる。そこで、本研究では、「カテーテルに入る小型性」と「高速スキャンを実施できる高応答性」を実現できる二自由度アクチュエータの開発を目指して研究に取り組んだ。

[研究の内容、成果]

1. ステータの試作

図1に示すように、試作したステータの金属部は一辺1mmの立方体であり、金属部中心には、ロータを通すために直径0.7mmの貫通穴が開けてある。加工方法は、フライス盤に取り付けた金属材料から、1mm角の角柱を切り出し、一般的なエンドミルで0.7mmの穴を開ける。1ミリ立方メートルのサイズになるようにカットし、微小バリの除去や表面の研磨などを行う。金属部の材料に用いたりん青銅は、減衰率が小さく（振動が熱に変わりにくい）、加工性の良い材料である。ステータ周囲の側面には圧電素子が貼り付けられている。圧電素子は両面分極であり、そのサイズは1mm×0.8mm×厚さ0.2mmである。金属部材と圧電素子の接着には銀ペーストの混ざった導電性接着剤を用

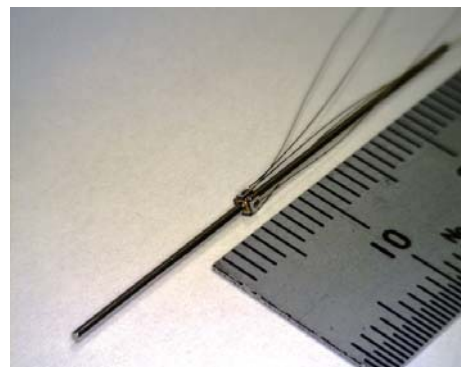


図1 試作したマイクロモータ

いている。圧電素子に接続される電線の直径は約 0.1 mm であり、圧電素子と電線の接合も導電性接着剤で行った。4 枚の圧電素子を駆動するためには、ステータの金属部は、電氣的に GND に接続される。したがって金属部に GND 線を取り付けるため、ステータの中心穴の横に、直径 0.12 mm、深さ 0.3 mm の穴が開け、ここに 0.1 mm の GND 用電線を通した。さらに抜け防止のために導電性接着剤で固定している。ロータには、穴の直径を測定するために使われる器具であるピンゲージを用いる。これは鉄鋼の軸材料を焼入れ硬化した後、研磨することによって、サブミクロン精度の直径を得ることができるものである。実験では、直径 0.700 mm、長さ 40 mm のロータを用いた。したがって、ステータの穴径は約直径 0.7 mm であるから、試作機における軸と穴の隙間は約 10 μm である。穴の内周面にバリなど局所的に摩擦の大きい部分があると性能に影響を及ぼすため、余裕を見て隙間を設定している。

2. 振動測定

ステータのインピーダンス特性を測定することで、印加電圧の周波数に対して、どれほど振動するのかを調べることが可能である。そこで圧電素子 PZT1 と PZT2 に接続される 2 本の電線と、GND の電線との間のインピーダンスを、インピーダンスアナライザを用いて測定した。その結果を図 2 に示す。結果を見てみると、900~950 kHz 付近で、インピーダンスの値は 2.2 kHz であり、位相は 90 度から 87 度まで変化することがわかった。モード解析において、

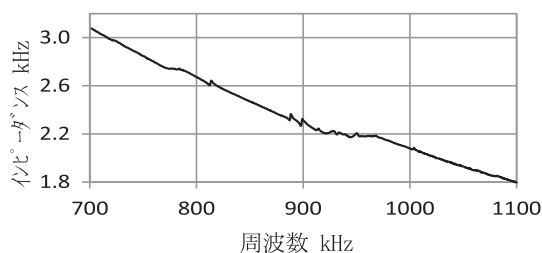


図2 マイクロモータのインピーダンス特性

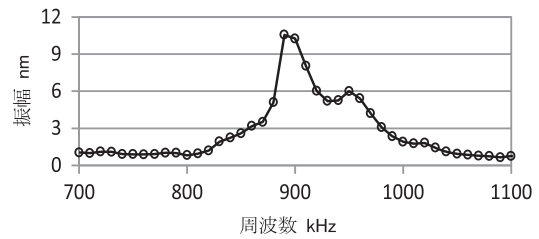


図3 レーザで測定した振動振幅

駆動原理である 3 波モードが励起されるのは 953 kHz であるから、誤差はあるものの、この周波数が 3 波モードの周波数と考えられる。また誤差の理由は、材料物性値や試作機の寸法精度などが影響していると考えられる。

ステータが発生する振動の大きさは、レーザードップラ振動計で測定することができる。振動振幅を測定する箇所はステータの内周面が望ましいが、穴の直径は 0.7 mm であり、この中にミラーを設置して反射光を読み取るのは難しい。そこで、レーザードップラ振動計からのレーザを、ステータの外面に貼られた圧電素子の銀電極部に照射し、その反射をみることで振動振幅を測定することとした。したがって圧電素子表面の振動を測定している。周波数を変えた場合の振動振幅の変化を図 3 に示す。電圧周波数が約 900 kHz の時に振幅は最大になり、その時の振幅の大きさは約 10 nm であった。実際には、圧電素子は二枚で、一つの振動モードが駆動されるため、実際の振動振幅は 20 nm 程度になると考えられる。

3. 性能評価

試作したマイクロ超音波モータの駆動テストを行う。波形発生器で発生した二種類の電圧を高周波アンプを用いて増幅する。増幅されて、モータに印加される電圧の振幅は 70 Vp-p としている。印加電圧の周波数は 930 kHz とする。これは最もモータがよく回転する周波数となるようにあらかじめ調整した値である。さらに、トルクの改善を目指して、ステータとロータの間に与圧を与える機構を付け加えている。

回転数を測定するためには、ロータの回転をビデオカメラで撮影し、フレームごとの角度変位から計算する。実験で得られた回転数の時刻歴応答を、図4に示す。回転の開始から100ミリ秒以内に定常状態になり、このとき最大回転数は約1000 rpmである。定常時のばらつきが観察されるが、これは、ステータとロータの表面状態および摩擦が影響していると考えられる。またその角加速度と慣性モーメントからトルクを算出すると、最大トルクは約 $0.6 \mu\text{Nm}$ であることがわかる。これは時計の中に入っているような針や歯車などの部品であれば駆動できるトルクであり、トルクの目標値をおおむね達成することができている。

出力を向上させるための取り組みとして、ステータとロータの間にはたらく与圧を変えた場合のトルクと回転数を測定した。トルクは角加速度から計算している。その結果を図5に示す。与圧の大きさを変えるごとに、3回の実験を行っている。実験では、与圧が大きくなるにつれ、回転数は減少した。これはステータロータ間に働く摩擦が上昇し、減衰係数もまた上昇したことで説明ができる。また与圧が大きくなるにつれ、トルクが上昇することが明らかになった。これはステータとロータ間に働く摩擦力が

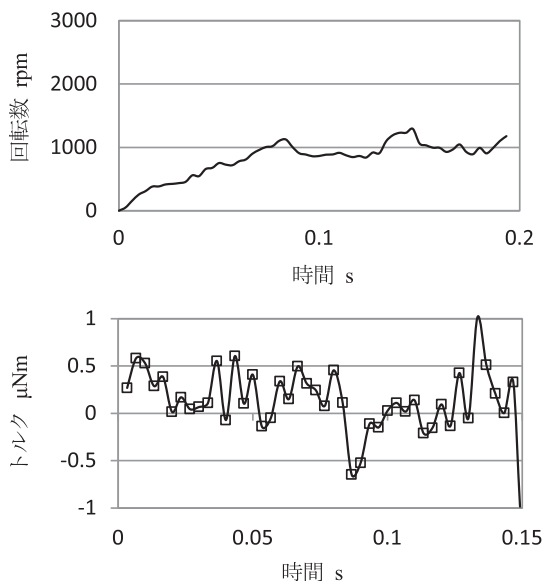


図4 マイクロモータの過渡応答

向上するためである。

モータの重要な特性の一つは、定常回転時における最大出力の安定性である。一般に電磁モータというコギング、トルクリップルなどと同様の現象が、マイクロモータの定常回転においても発生する。発生する理由は、ロータの真円度や、接触面における局所的な摩擦の変化の影響が大きい。そこで、与圧を変えたときの、定常状態の回転の安定性を調査した。その結果を図6に示す。図の縦軸である安定性は、最大回転数と平均回転数の差を表したものであり、数値が小さい方が安定していることを意味する。結果からは、与圧が大きくなるにつれ、回転が安定することがわかる。

また、二自由度を達成するリンク機構の検証を行うために、一桁大きいサイズでは約10

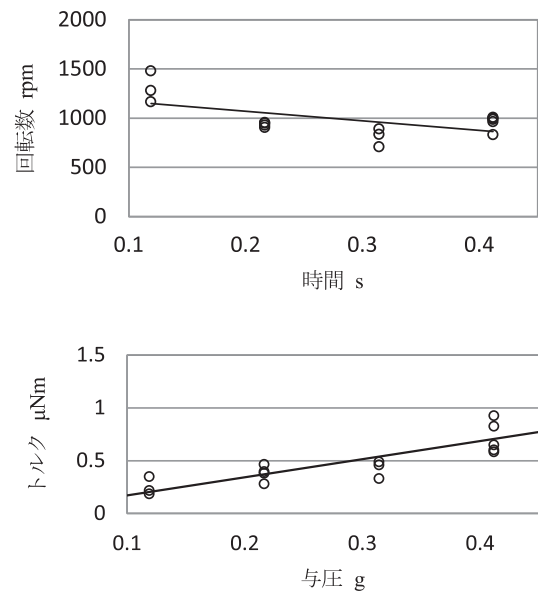


図5 与圧によるトルクと回転数の変化

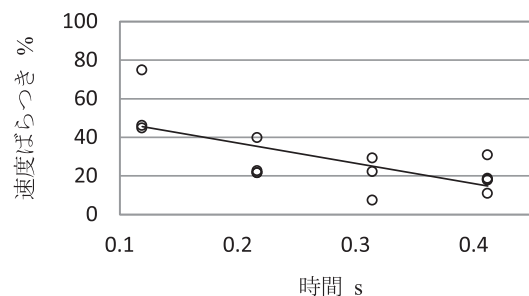


図6 定常回転時の不安定性

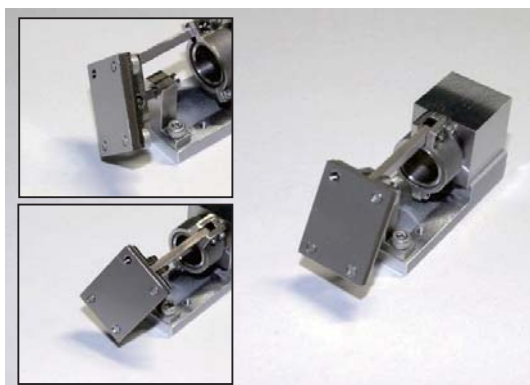


図7 二自由度のリンク機構の試作

mm のステータを用いて、リンク機構を設計し試作した（図7）。マイクロモータが発生した駆動力をこの機構を用いることにより、二自由度の方向に自由に駆動することが可能であることを確認した。小型化、評価、実装のプロセスは今後になる。

[今後の研究の方向，課題]

マイクロ超音波モータの試作方法，実験方法および性能評価について説明した。ステータのサイズは約1ミリ立方メートルであり，これは実用的な範囲においては，世界的に見ても最も小さいモータの一つである。マイクロ超音波モータに与圧機構を組み合わせることで，最大

で $0.9\mu\text{Nm}$ 程度のトルクを得ることに成功した。腕時計に使われるモータのトルクが $1\sim 2\mu\text{Nm}$ であることを考えれば，実験で得られたモータのトルクは概ね十分な性能を得ることができている。

しかし，目的の実現に向けてまだ改善すべきことも多い。今後，圧電素子の選択によるインピーダンス特性の改善，ステータとロータの隙間および接触状態の最適化などを行うことによって性能の向上を図る。リンク機構は，MEMS などのプロセスで加工を行うことにより，小型化し実装する必要がある。1 mm 程度の大きさの部品になると，加工が困難であるだけでなく，それらの部品をどのようにハンドリングするか，また組み立てするかも研究課題である。これらを開発したのちに，目標性能，安定性，耐環境試験などを達成し，臨床試験を目指した装置開発に取り組む予定である。

[成果の発表，論文等]

- 1) 真下智昭，1ミリ立方メートルのステータを用いた小型超音波モータの試作，精密工学会学術講演会，2014
- 2) T. Mashimo, "Performance of Micro Ultrasonic Motor using One Cubic Millimeter Stator," IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS2014), Chicago, 2014