

平成 28 年 6 月 11 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25709017

研究課題名(和文) マイクロ圧電アクチュエータ群を搭載したカプセル型治療ロボットの開発

研究課題名(英文) Capsule Medical Robot Using Micro Piezoelectric Actuators

研究代表者

真下 智昭 (Mashimo, Tomoaki)

豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・准教授

研究者番号：20600654

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,100,000円

研究成果の概要(和文)：カプセルサイズの機器への実装を目指して開発した1mm角のマイクロ超音波モータでは、10マイクロNmというトルクを達成したが、これは同様のサイズの先行研究が発表した結果と比べると、数百倍大きいものである。モータの性能を評価するための力学モデルを作り、実験結果を理論的に評価した。ステータ、ロータ、予圧機構を含めたモータ機構の小型化設計を行い、直径約0.8mmのマイクロコイルを用いた予圧機構を開発し、モータを全体で約2mmまで小型化することに成功した。さらに小さい0.5mm角の世界最小超音波モータの駆動に成功し、複数個のモータの同期制御を実現するためのモータドライバ回路の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of realizing a capsule medical robot, we build micro ultrasonic motors using new stators with an approximately one cubic millimeter. To evaluate its representative performance values, we built an experimental setup and operated the prototype motor by varying experimental conditions, such as the preload between the stator and rotor and the amplitude of voltages applied to motor. We designed a miniature preload mechanism using a micro coil spring to provide force between the stator and rotor along the radial direction of the rotor. Output torque obtained in experiments is much larger than comparable-sized ultrasonic motors. In addition, the prototype stator is miniaturized to the smallest size, a metallic cube with a side length of 0.5 mm. This proposed ultrasonic motor is the smallest and most powerful and suited for medical applications such as capsule robots.

研究分野：アクチュエータ

キーワード：マイクロモータ 超音波モータ 圧電アクチュエータ マイクロロボット

## 1. 研究開始当初の背景

消化器疾患などの患者への負担が少ない診断や治療を目的として、数ミリの目と手を持ったカプセル型ロボット(直径 10mm, 長さ 20mm 程度)が期待されている。患者がカプセルを飲み込み、胃・小腸・大腸の中で移動し、医師がモニターを見ながらロボットを操作する。病変が疑われる部位にカメラを向けて詳しく観察し、腫瘍が見つければその場で組織を採取し、薬液を投与することもできる。このような機能を小型ロボットで実現するためには、以下のようなアクチュエーション技術が求められる。

- (A) 患部を診察するために小型カメラ(約 3mm の大きさ)の方向を自由に操作できるようにする回転二自由度の駆動技術。
- (B) カプセルの中から直径 1mm 以下の針を直進で送り出し、穿刺後、回転して腫瘍組織を切り取り、再びカプセルに格納する回転と直動の駆動技術。
- (C) がん細胞を死滅させる抗がん剤や腫瘍を光らせる蛍光試薬などの薬液を、カプセルの中から患部に投与できるようにする液体の駆動技術。

しかしながら、限られたカプセル内のスペースで、このように複雑な駆動を実現するのは従来の技術では困難である。

研究代表者はこれまでに圧電駆動を原理とした超音波モータである、「回転直動式超音波モータ」を提案し、開発を行ってきた。このモータは、シンプルな構造で、トルク密度が高く、回転と直動を自由に生み出すことができる。また固体軸だけでなく粉体や液体を駆動させることもできる。これまでに、3.5mm 角の立方体形状ステータを試作し、モータの駆動原理や設計手法を明らかにし、性能評価を実施してきた。近年では、小型化に取り組み、1mm 角ステータを試作し、トルクは小さいものの駆動することに成功していた。

## 2. 研究の目的

本研究では、その回転直動モータの駆動原理に基づいて、上述の(A)-(C)の駆動を実現できるようなマイクロ圧電アクチュエータ群の開発を行うことを目的とする。また、これらを駆動させるドライバ回路を小型化し、アクチュエータ群とドライバを統合したロボットシステムとして評価を実施する。

カメラの二自由度方向の回転を実現できるマイクロ球面モータを開発するためには、回転直動モータに、微小リンク機構(パンチルト機構、ジンバル機構)を組み込むことで可能になる。穿刺および組織採取を実現するためには、マイクロ回転直動モータの駆動力をさらに向上させることで可能になる。薬液投与を実施するためには、回転直動モータに進行波を発生させることで、進行波と同じ方向に液体の流れを生み出す音響流を用いることが有力なアイデアである。これまでに

10mm 以上のサイズでは音響流の生成に成功している。この現象を応用して液体を直進で送り出すマイクロポンプを開発し評価する。また音響流でのポンプに対し、回転直動モータにフィンを取り付けた場合の液体駆動手法を比較評価する。

これらのアクチュエーション技術を実現するためのキーテクノロジーは回転直動モータに基づいて開発する「マイクロ超音波モータ」であり、その超小型化と性能向上は本研究目的の達成のために極めて重要な課題である。研究開始時までに、1mm 角のステータを用いたマイクロ超音波モータの試作および駆動実験に成功していたものの、性能向上に関しては十分に研究されておらず、出力トルクは、 $0.1\mu\text{Nm}$  と非常に小さいものであった。マイクロ球面モータや、穿刺用直動モータ、液体駆動を実現するために必要な、マイクロ超音波モータの目標サイズと目標トルクは、約 1mm の大きさで、 $10\mu\text{Nm}$  (半径 1mm で 1g の力)である。この目標を達成できれば、カプセル型ロボットの実現可能性が高まる。

マイクロ超音波モータの性能を向上するためには、その駆動原理を十分に理解することが必要である。そのためにステータが発生する楕円運動や摩擦とモータ出力の関係を、有限要素法を用いた動力学解析や実験的調査によって明らかにし、モータ出力をモデル化する。モデルに基づいて、開発するマイクロ圧電アクチュエータの、構成材料、形状、出力軸や液体との接触状態などをアクチュエータごとに最適設計し、目標サイズと目標出力の実現を目指して開発を進める。一般に超音波モータのトルク向上のためには、ステータとロータの間に予圧を与えるための機構(予圧機構)が重要であり、その開発に取り組み。応用を考えた場合には、予圧機構を含むモータ全体をユニット化する必要がある。モータ、ロータ、連結部品、予圧機構など全体の大きさが 2-3mm になるようなモータユニットの設計開発を行う。

エレクトロニクス関連では、カプセル型ロボットの実現に向けて、LSI 技術を用いてアクチュエータを駆動するドライバ回路を開発することが目的である。しかし、マイクロ超音波モータの駆動には、約 1MHz 程度の高周波で約  $100V_{p-p}$  の高振幅の電圧が必要になる。したがって、電氣的に安定性の高いモータドライバ回路を試作し、電氣的特性を調査した上でマイクロ超音波モータの駆動実験を実施し、駆動システムとしての実現可能性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### 3.1 試作方法

1mm 角のステータを用いたマイクロ超音波モータの性能向上のために、ステータの形状や材料など最適設計手法を研究する。約 1mm のサイズでは、表面粗さやばりなどの機

械加工の影響が大きくなる．そこで，切削加工，レーザー加工，ワイヤ放電加工などを組み合わせて，加工方法を最適化することで，

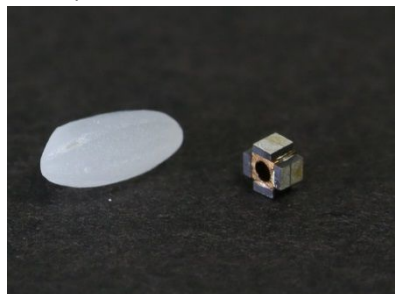


図1 マイクロ超音波モータのステータ

安定した性能を発揮できるようステータを試作した(図1)。

1mm程度の大きさのモータを開発するには，試作可能なデザインであることが重要である．つまりステータを構成する金属部材と圧電材料は加工が可能であること，またそれらの部品を把持して組立できることが必須である．試作したステータを図1に示す．金属部は一辺1mmの立方体であり，その中心には，ロータを通すために直径0.7mmの貫通穴が開いている．金属部材料には，加工性が良いリン青銅を用いている．ステータの側面には4枚の圧電素子が接着されている．圧電素子は両面分極であり，圧電薄板からダイシング加工等で切り出して作ることができる．金属部材と圧電素子の接着には，エポキシ系接着剤を用いている．このように，提案するマイクロ超音波モータは，特殊な材料や加工技術を使わなくても試作することが可能である．試作した微小部品をどのように把持するか，組み立てるかもまた重要な課題である．一般に，手に持ったピンセットで微小部品を把持する場合，手のわずかな振動がピンセットの先に伝わり作業性が悪い．部品を把持できたとしても表面張力の影響で部品がピンセットから離れないなどの問題があった．そこで，1mm以下の部品であっても把持・組立を容易にするマイクロマニピュレータを開発し，モータの試作を容易にできるようにした(図2)。

### 3.2 評価方法

一般にモータの評価では，ロータリーエンコーダを用いて回転数を計測することが多い．しかし，マイクロ超音波モータの場合には，ロータリーエンコーダにおける一般には無視される程度の粘性摩擦や慣性モーメントは相対的に大きいものとなり，モータの評価に影響する．そこでロータの回転をハイスピードカメラを用いて非接触で撮影する方法を開発した．約0.7mmのロータの先端にマーカを取り付け，高倍率レンズで拡大してロータの角度を認識できるようにした．回転時のマーカの動きを画像処理で追跡し，画像ごとに得られる角度変位から回転数を算出することで評価できるよ

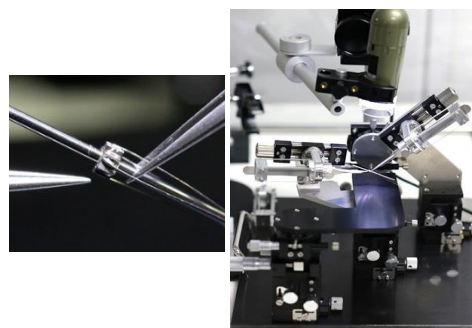


図2 マイクロマニピュレータ

うにした．またトルクは，その角加速度と慣性モーメントの大きさから計算できるようにした．

### 3.3 マイクロ超音波モータの開発

一般に超音波モータの駆動原理である楕円運動は高速かつ微小であるため観察が難しかったが，研究代表者は高速度カメラに高倍率レンズを取り付けた装置を用いて楕円運動を実測しモデル化を行ってきた．その出力モデルに基づいて，マイクロ超音波モータの楕円運動をモデル化し，トルク，回転数，効率を計算可能にした．マイクロ超音波モータの楕円運動はナノオーダーであり，レーザードップラー振動計を用いることにより楕円運動の観察できるようにした．楕円運動や摩擦などのパラメータが，どのようにモータ出力に影響するかを実験的に調べてモデルに取り込んだ．また，エネルギー効率の観点から，入出力とエネルギー損失(主に摩擦と発熱)を調べられるようにした．

マイクロ超音波モータの高トルク化と回転数の安定化のためには，予圧の値を管理することが重要である．そこで，予圧の大きさを自由に変えることにより，予圧の大きさとモータ出力の関係を調査するための実験装置の開発を行った．この実験に基づいて得られる予圧の最適値を，数mmの大きさのユニット内で発生することができるようなマイクロ予圧機構およびモータユニットの開発に取り組んだ．

## 4. 研究成果

### 4.1 マイクロ超音波モータの高出力化

マイクロ超音波モータの試作において，ステータを精度良く加工することが重要である．そこで機械加工時における，ステータとロータにおける表面粗さやばりなどを調査し，加工手法を実験的に明らかにした．

駆動原理である楕円運動に基づいて，マイクロ超音波モータの出力特性をモデル化し，試作したマイクロ超音波モータを用いた実験で評価することにより，モデルと実験結果の比較検証を行った．その結果，モデルと実験を非常に良く一致することが確認できた．

ステータとロータの間隙はモータ性能に影響するため，ロータの外径を研磨することで隙間の量を管理し，モータの性能を向

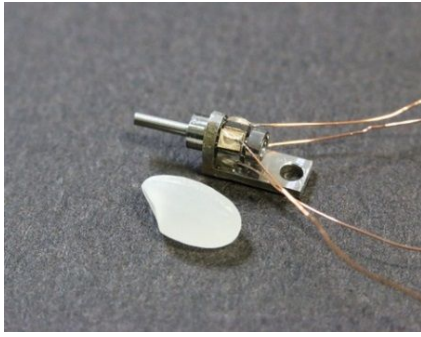


図3 マイクロ超音波モータユニット

上できることを明らかにした．また隙間に関係なく安定した出力を得るために，隙間がある程度あったとしても一定の大きさの予圧を与える構造に設計し，実験的に接触状態を最適化した．ステータとロータの間に与える予圧の大きさを調整できる実験装置を開発し，それを用いて，マイクロ超音波モータの出力の計測を行った．結果では，約 5g 以上の予圧を与えたときに， $10\mu\text{Nm}$  以上のトルクを達成できることがわかった．さらに予圧を上げるとトルクは高まり，10g 程度で最大  $20\mu\text{Nm}$  のトルクが得られる場合もあった．研究開始時までには得られていたトルクの大きさは約  $0.1\mu\text{Nm}$  であったが，研究の結果，100 倍となる  $10\mu\text{Nm}$  のトルクを達成することができており，これは，このサイズのモータが出せるトルクとしては世界的にもケタ違いに大きいものである．例えば，海外で研究開発されたものには約 2mm の小型超音波モータがあるが，そのトルクが  $47\text{nNm}$  であるから，その 200 倍以上のトルクが達成できたことになる．

4.2 マイクロ超音波モータのユニット化  
カプセルサイズのロボットへの実装を目指すには，ステータ，ロータ，予圧機構を含めたモータユニットを小型化することが必須である．そこで直径約 0.8mm のマイクロコイルを用いて約 10g の予圧を発生できる予圧機構を設計した．図 3 はその試作機である．取り付けを考慮したフランジ部やねじ部があるため 3mm 以上のサイズだが，フランジ部やねじ部を除けば，2mm 以下のサイズでユニットを作ることが可能である．このモータを用いて，ステップ応答を測定したものが，図 4 である．約 30ms で定常状態に達し，その後安定した回転を達成していることがわかる．定常回転数を基準とした回転数のばらつきは，5%程度であった．連続駆動時間の調査を行ったところ，最大で約 5 分間くらいであれば，問題なく回転し続けられることが実験で明らかになった．発熱などの影響を受けて回転数は若干変動していたが，システムによる制御が可能な範囲である．

#### 4.3 0.5mm 角超音波モータの開発

開発してきたマイクロ超音波モータのノウハウを活用して，さらに小さい 0.5mm 角の超音波モータの開発に取り組んだ．0.5mm 角

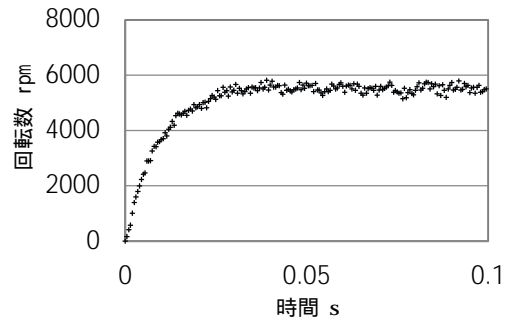


図4 マイクロ超音波モータのステップ応答

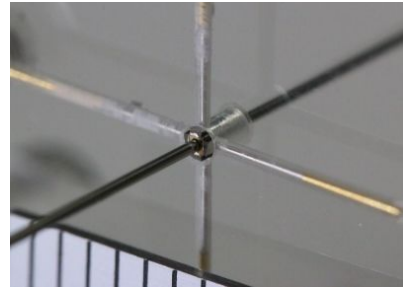


図5 0.5mm 角マイクロ超音波モータ

の部品では，1mm 角の部品と比べ加工性や把持性などが著しく悪くなる．加工した部品は変形を生じ，バリは相対的に大きくなる問題がある．そこで，ステータを切削やワイヤ放電などで加工する場合に生じるバリと変形の原因を，顕微鏡を用いて調査し，ステータの試作方法を 0.5mm 角モータ用に改善した．変形やバリの発生を最も抑えられる方法としてワイヤ放電および研磨を採用した．加工した部品を把持して組立するために，図 2 のマイクロマニピュレータに基づいて，約 0.5mm（またはそれ以下）のマイクロ部品を顕微鏡下で正確に扱えるマニピュレータを開発した．0.5mm 角超音波モータを試作し，実験装置に組み込んで駆動実験を行い，トルク，回転数，効率の評価に成功した（図 5）．これは現時点で発表されている超音波モータと比べて世界最小サイズのものである．このモータのトルクは約  $0.1\mu\text{Nm}$  と小さいが，MEMS などの技術を用いて開発された同様のサイズの静電モータのトルクと比べる大きい値が得られている．

またこの実験結果と併せて，サイズが小さくなるにつれて出力トルクや回転数がどのように変化するかを示すスケール効果を，解析と実験で調査した．その結果，解析によると，トルクは代表的長さの 3 乗，回転数は 1 乗で変化することがわかり，実験結果も概ねこの法則に則ることが確認された．これは，マイクロマシンなどにマイクロ超音波モータの採用を検討する場合に指標となる成果である．

#### 4.4 マイクロポンプの開発

マイクロポンプの開発では，ステータから生み出される流れを，CFD 解析でシミュレー





図 6 開発したモータドライバ回路

ションし、ポンプの形状を設計した。実験で発生するステータの振動振幅と、実際の流量の関係調べて、ステータの設計指針を明らかにした。音響流により液体に流れを生み出すことに成功したものの、その場合の体積あたりの発熱が大きいことが問題となり、マイクロ超音波モータにフィンなどを装着して液体を駆動する手法の方が有利であるという知見が得られた。

#### 4.5 モータドライバの開発

また、マイクロ超音波モータをはじめとするアクチュエータ群を駆動するためのドライバ回路の開発を行った(図6)。ステータのサイズによっては駆動周波数が異なるため、トランスなどの最小限の部品交換で周波数を自由に変更できるように設計した。モータドライバ回路を試作し、正弦波状の電圧をマイクロ超音波モータに与えることによって、モータを駆動することに成功した。また、外気温度や湿度などの変化に対する耐環境性の調査を行うために、温度と湿度を調整できる実験装置を試作し、その中で実験を行い、出力を計測した。高湿度では、モータの性能の低下や、一時的に起動しないなどの不具合も観察された。今後、マイクロ超音波モータ駆動システムの安定化に向けて、いかなる環境下においても安定して駆動することのできるモータドライバ回路および制御手法の開発が課題となる。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- (1) T. Mashimo, "Micro Ultrasonic Motor using a One Cubic Millimeter Stator," Sensors and Actuators A: Physical, Vol.213 pp. 102-107, 2014.
- (2) T. Mashimo, K. Terashima, "Experimental Verification of Elliptical Motion Model in Travelling Wave Ultrasonic Motors," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 20, No. 6, pp. 2699-2707, 2015.
- (3) T. Mashimo, "Micro Ultrasonic Motor using a Cube with a Side Length of 0.5 mm," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 21, No. 2, pp. 1189-1192, 2016.

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) T. Mashimo, "Performance of Micro Ultrasonic Motor using One Cubic Millimeter

Stator," IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS2014), Chicago, pp. 866-869, 2014.

(2) T. Mashimo, Study on Micro Ultrasonic Motor using a Preload Mechanism, IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS2015), pp. 1-4, Taipei, 2015.

(3) A. Kanada, T. Mashimo, T. Minami, K. Terashima, High Response Master-Slave Control Eye Robot System, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2015), pp. 937-943, Hamburg, 2015.

〔図書〕(計 1 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 超音波アクチュエータ

発明者: 真下智昭

権利者: 豊橋技術科学大学

種類: 特許

番号: 特願 2015-076300

出願年月日: 2015 年 4 月

国内外の別: 国内

〔その他〕

豊橋技術科学大学 真下智昭ホームページ

<http://www.eiiris.tut.ac.jp/mashimo/index.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

真下 智昭 (MASHIMO, Tomoaki)

豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端

融合研究所・准教授

研究者番号: 20600654