

令和元年6月12日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06075

研究課題名(和文) マイクロ超音波モータを用いた生検ロボットの開発

研究課題名(英文) Study on a Biopsy Robot using Micro Ultrasonic Motors

研究代表者

真下 智昭 (Mashimo, Tomoaki)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20600654

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,700,000円

研究成果の概要(和文)：これまでの研究で開発した1mm角のマイクロ超音波モータは、 $10\mu\text{Nm}$ というトルクを発生でき、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。本研究では、このマイクロ超音波モータの性能向上に取り組み、マイクロギアを取り付けて、従来と比べて約100倍となる、最大 $1\text{mNm}$ のトルクを実現した。さらに、マイクロ超音波モータを用いて、パンチルト機構、リンク機構などのマイクロロボットの開発を行い、機構を評価するための力学モデルを構築し、実験的に検証および評価を行った。その他にも、マイクロリニア超音波モータの開発や、小型化したときの性能を予想するスケール則の導出に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロ超音波モータに関する設計、試作、制御、評価までの方法論の研究を行ったが、各手法の実現可能性を示したことは、今後のマイクロロボット開発の参考になるものであり重要な学術的意義がある。今後、マイクロ超音波モータの開発が進むことで新しい医工学の展開が期待される。循環器内科、脳外科、消化器内科など広い範囲で、マイクロモータを用いた新技術が期待されており、マイクロモータとして最も有力なマイクロ超音波モータに関する研究の社会的意義は高い。

研究成果の概要(英文)：We developed the micro ultrasonic motor with a one cubic millimeter stator that can generate over  $10\mu\text{Nm}$  and studied its application technologies for a medical microrobot. We attempted to improve the motor characteristics such as the motor output and stability, and coupled a new micro gear unit to the micro ultrasonic motor. The resulting torque shows  $100\text{mNm}$ , which is 100 times larger than that without a gear. The micro ultrasonic motor-driven pan-tilt mechanism and linkage mechanisms are studied: the dynamics of the mechanisms are modeled and verified by experiments. There are two other achievements in this study: (1) We built a micro linear ultrasonic motor with 2mm stator, which is one of the smallest linear motor. (2) We derived the scaling law that shows how the micro ultrasonic motor behaves at smaller scale.

研究分野：アクチュエータ

キーワード：アクチュエータ マイクロモータ マイクロロボット 超音波モータ

### 1. 研究開始当初の背景

人体内での診断や治療を目的として、低侵襲に体内の組織を採取する生検鉗子型のロボットが期待されている。例えば、超小型のカメラとアームを持つロボットが、医師の操作によって患者の体内を曲がりながら進み、がん組織へアプローチする。患部付近で、カメラを動かしてがんを探し、見つければアームを使って組織を切り取る。このような生検ロボットを、直径ミリスケールで実現するには、従来の技術では難しく、新しいマイクロモータに基づいたカメラとアームに関する高度な設計と制御の技術が求められる。

医療などへの応用を目指し、小型モータ開発は世界中で行われてきた。しかし、十分なモータはまだ実現されていない。一般的によく用いられる電磁モータは、永久磁石、コイル、軸受けなど構造が複雑なため小型化が難しい。静電モータは MEMS 技術で小型化できるもののトルクが小さい。他にも、形状記憶合金、機能性流体、磁歪効果などを駆動原理として用いたマイクロモータが提案されているが、いずれも実用的なトルク密度は得られていない。

圧電効果で駆動する超音波モータは、シンプルな構造で、体積あたりに発生できるトルクが大きく、マイクロモータとして適していると考えられてきた。これまでにいくつかの小型超音波モータが報告されているが、概ね直径 1.5mm、長さ 5mm 程度の細長い円筒形状のものが多く、その理由は、駆動原理に曲げの振動モードを用いているからである。ステータが細長い場合には大きな振幅を発生して大きな出力を得ることができる。しかし、ステータを短くすると振幅が小さくなり、出力も減少するため、さらに小型化するのは難しい。過去には 1mm 程度の大きさの超音波モータも報告されているが、トルクは非常に小さい。

研究代表者は、1mm 角のステータを用いてマイクロ超音波モータの開発を行ってきた（図 1）。マイクロ超音波モータが、従来の小型超音波モータと異なる点は、駆動原理として、穴の内周に沿って 3 波を発生する振動モードを用いる点である。この振動モードは奥行き方向（穴の軸方向）の寸法に関係なく振動を発生できるため、小さくしてもある程度の駆動力を得ることができる。マイクロ超音波モータは、約 1mm のサイズで、 $10\mu\text{Nm}$  以上の実用的なトルク（ロータ先端で数グラムの力が発生できるトルク）を発生することに成功している。電圧を上げれば数倍のトルクを出せる。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桁違いに大きい。

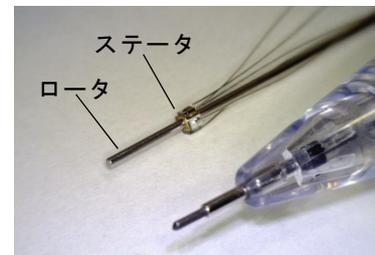


図 1 マイクロ超音波モータ

### 2. 研究の目的

本研究では、このマイクロ超音波モータに関係する技術をさらに発展させ、ミリスケールでカメラとアームを駆動することが可能な生検ロボットの技術を開発し評価することが目的である。これまでのマイクロ超音波モータに関する取り組みで、トルクは  $10\mu\text{Nm}$  まで上がったが、モータ効率の改善に関する研究は充分でなく、現在の効率は約 1% とまだ低い。ステータとロータの接触状態や材料などを見直して効率を改善する。一般的な超音波モータと同様の効率 20%、トルク  $100\mu\text{Nm}$  を目指す。さらにロボットを小型化するには、モータの小型化の可能性を研究することも重要である。1mm 角サイズと比べて体積比 8 分の 1 となる 0.5mm 角ステータを用いて小型化の可能性について研究する。

近年の CMOS 画像センサの小型高性能化は著しく、最近では 1mm 角の画像センサが購入できるようになった。この画像センサに 2 個のマイクロ超音波モータを取り付けて、自由に方向を変えることのできるマイクロパンチルトカメラを世界最小サイズで開発する。またカメラをオートフォーカスするには、レンズの直進機構が必要になる。そこで、約 2mm のリニア超音波モータを開発する。実用的な出力を発生できる世界最小級リニアモータの開発を行う。

マイクロ超音波モータで 2 個のリンクを駆動するマイクロアームの開発を行う。アーム全長を約 5mm まで小型化し、アーム先端には組織採取用のエンドエフェクタを取り付ける。エンドエフェクタでは減速機構を用いて最大 50g を発生できるように設計する。ジョイント部をサブミリまで小型化すると、摩擦などの影響が大きくなり、従来の機構学ではマイクロアームの運動を解析できない。そこで、サブミリサイズの力学を考慮してアームを動力学的にモデル化する。

### 3. 研究の方法

サブミリサイズのモータを開発し評価するには、試作可能なデザインであることが重要である。試作した 3 種類のステータを図 2 に示す。金属部は一辺 0.5, 1, 2mm の立方体であり、その中心には、ロータを通すために、一辺の長さに対して 70% の直径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おり、切削加工、ワイヤ放電加工などを組み合わせて、加工方法を最適化している。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。サイズに関係なく試作方法を同じにするようにしている。このような微小のものづくりでは、加工が容易な形状にし、マニピュレータを用いて部品把持して組立できるように部品設計することが重要である。0.5mmのステータを開発するには、例えば圧電素子のサイズは0.5mm以下であり、扱うのが困難である。(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先端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る)。そこで把持・組立を容易にする専用のマイクロマニピュレータを開発し、モータの試作を可能にした。

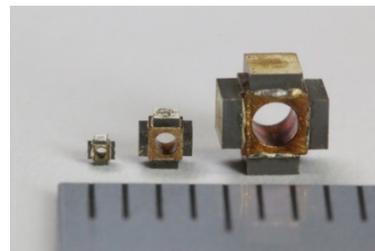


図2 サイズの異なるステータ (左から0.5mm, 1mm, 2mm)

また、マイクロ超音波モータが十分に性能を発揮するためには、ステータとロータの予圧を管理することが重要である。これまでに、予圧を変えた場合の性能を実験的に明らかにしており、その知見に基づき、直径1mm以下のマイクロコイルを用いた予圧機構を採用することとした。

試作したマイクロ超音波モータ、パンチルト機構、およびリンク機構の評価には、ハイスピードカメラを用いる。一般にモータや機構の運動を評価するには、モータや機構に直接取り付けられたセンサ(光センサ、磁気センサなど)を用いることが多い。しかし、センサを取り付けたことによる摩擦や慣性などがモータや機構の評価に影響する。したがって、モータや機構の運動を、ハイスピードカメラで非接触に撮影する方法を用いて、画像処理的に評価を行うこととした。モータおよび機構にマーカを取り付け、マクロレンズで拡大して変位と角度を認識できるようにした。マーカの動きを画像処理で追跡し、画像ごとに得られる変位から運動を算出することで評価できるようなシステムを開発した。

## 4. 研究成果

### 4.1 マイクロ超音波モータを用いた超小型パンチルト機構

試作したパンチルトカメラを図3上に示す。マイクロカメラの下部と右部にマイクロ超音波モータが位置し、それぞれパンモータおよびチルトモータと呼ぶ。カメラはセンサが1mm角で、4個のLEDが付いて直径2.4mmの大きさである。パンモータが、カメラやチルトモータを含むユニットを水平方向に回す。チルトモータとカメラは直接取り付けられており、チルトモータがカメラを垂直方向に回す。この構造の問題点は、二つのモータが回そうとする慣性モーメントが異なることと、カメラやモータの電線が運動に影響することである。したがって負荷を正しく計算できず、制御することが難しい。そこで、予め二つのモータの回転数を測定しておき、目標速度に合わせて印可電圧のOnとOffを適切に繰り返すパルス波制御を用いる。これは直流電磁モータで言うところのPWM制御と似ているが、超音波モータの場合、印可される電圧は交流電圧であり、そのOnとOffを繰り返すものは、パルス波と呼ばれる。パルス波の振幅とデューティ比を変えることによって、マイクロ超音波モータの回転数を制御することが可能になる。実験で、八角形目標軌道を与えた場合に、オープンループで

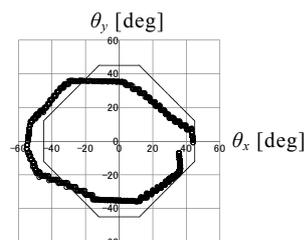
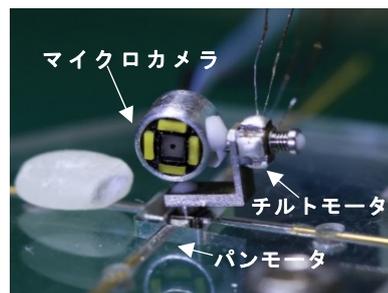


図3 パンチルトカメラ機構

二つのマイクロ超音波モータを動かした軌跡を図3下に示す。軌跡はハイスピードカメラで計測している。誤差はまだ残るが、目標軌道に沿った動きを実現できている。誤差は約10°であるが、これを移動距離で表すと0.2mm以下であり十分に小さい。

### 4.2 扁平型マイクロ超音波モータを用いた超小型2リンク機構

マイクロ超音波モータで使用している3波のモードは、穴の軸方向の寸法に依存しない。すなわち、ステータを軸方向に短い扁平形状にしたとしても、ある程度の大きさの振動振幅とモータ出力を発生することができる。この特徴を生かして、マイクロ超音波モータを扁平にしたものが、扁平型マイクロ超音波モータで、図4上はそのステータである。試作機の金属部は高さおよび幅が2mm、奥行きが1mmである。1mm角のマイクロ超音波モータと比べると、高さおよび幅が2倍に大きい。高さおよび幅が大きい分、大きなトルクを発生することが可能であり、80V<sub>p-p</sub>の電圧印加で、40μNm以上のトルクを出すことができる。

ロボット工学において、2リンク機構は基本であり、どれほどの小さい2リンク機構が作れるかは、マイクロロボット研究における興味の一つである。そこで、扁平型マイクロ超音波モータを用いて、直接リンクを駆動する2リンク機構の開発を行った。このような技術は、顕微鏡下で作業するマイクロマニピュレーションなどへの応用が期待できる。図4下は、扁平型マイクロ超音波モータを用いて試作した2リンク機構である。2リンクの長さは、伸びた場合に約10mmとなるように設計している。モータで直接駆動する2リンク機構としては、世界最小のものである。2リンク機構の先端を右方向に真っ直ぐに動くように制御した場合の例を示している。これもオープンループでパルス波制御を使用した動作である。電線などの影響も受けて誤差は生じるものの、軌跡はおおむね直線的に進んでいる。

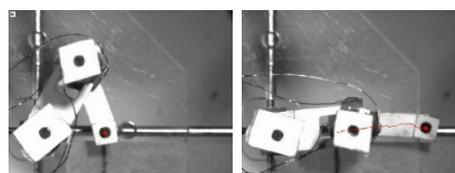
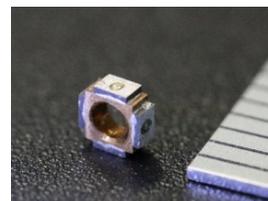


図4 扁平型マイクロ超音波モータのステータと2リンク機構の駆動時の様子

#### 4.3 マイクロ遊星歯車を用いたマイクロギアードモータ

大きなモータトルクを得る方法として、ステータを複数個使う、ステータの内径を大きくする、減速機を組込む、などの方法が考えられる。モータが数ミリのサイズで、目標の50gという大きな力を発生するには、減速機を用いることが最も確実な方法である。しかし、マイクロ超音波モータに合うようなサイズの減速機を作るには、歯車の設計のみならず、材料から製造プロセスまで開発する必要があり、大学の研究として取り扱うことは難しい。そこで、超小型減速機の開発実績のある企業の協力を得て、マイクロギアードモータの開発を行った。



図5 マイクロ遊星歯車を取り付けたマイクロギアードモータ

図5は、マイクロ超音波モータに超小型遊星歯車を取り付けたマイクロギアードモータである。遊星歯車では、太陽歯車、遊星歯車、内歯車から構成される段の数を増やすことで、大きなトルクを得ることができる。遊星歯車は、実際に多くのロボット用アクチュエータとして用いられている。遊星歯車を取り付ける分、全体のサイズは長くなるが、歯車の段数で、出力トルクを選ぶことができることが利点である。試作したマイクロギアードモータのトルクを測定するためには、減速機の出力軸に糸を用いて錘をぶら下げて、その錘を巻き上げる方法を採用した。減速機では、出力軸の角加速度からトルクを求めることはできないからである。実験では、80V<sub>p-p</sub>の電圧印加で、0.4mNmのトルクを安定して発生することに成功している。このとき出力軸は直径0.6mmなので、出力軸先端で133グラムの力を発生していることになる。減速機の方、サイズは大きくなるが、このサイズのモータとしては、従来の技術では成し得なかったトルクを達成できている。

#### 4.4 マイクロリニア超音波モータ

超音波モータの原理として、直進運動を発生するために、異なる二つの振動モードを組み合わせる方法が知られている。この原理を応用したマイクロリニア超音波モータの開発を行った。このモータの特長は中空構造であり、モータ内部に小型部品を搭載し駆動することや、円筒状のスライダを準備し、中にケーブルなどを通すことができる。大きさは約2mmであり、リニアモータとしては世界最小級のサイズになるように設計した図6右上。圧電解析を用いて、ステータの寸法を調整し、二つの振動モードが一つの固有振動数で励起できるようにステータを設計した。外部から予圧を与える実験装置を製作し、予圧を最適に調整できるようにした。実験を行い、100mm/s以上、約20mNの性能を得ることができている。これはレンズなどの小型部品を駆動するのであれば実用的な性能である。さらに、このリニアモータによって駆動するマイクロリンク機構の開発も行った。マイクロリニア超音波モータでマイクロハンドを直接駆動させることで、より小型で高精度のハンドを実現できる。図6下が試作したマイクロハンドであり、大きさは約10mmで、人の指の開閉に近い動作を行うことができるように設計している。

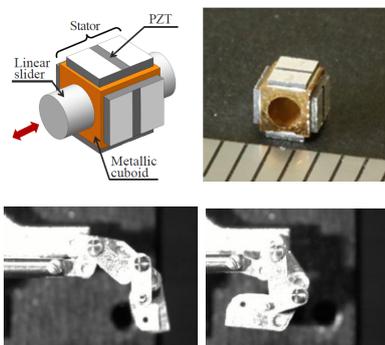


図6 マイクロリニア超音波モータを用いたマイクロフィンガ機構

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

1. A. Kanada, F. Giardina, T. Howison, T. Mashimo, F. Iida, Reachability Improvement of a Climbing Robot based on Large Deformations induced by Tri-Tube Soft Actuators, *Soft Robotics*, 2019. doi: 10.1089/soro.2018.0115. (査読有)
2. K. Miyoshi, T. Mashimo, Micro-Flat Ultrasonic Motor for a Miniature Direct-Drive Two-Link, *Advanced Robotics*, Vol. 32, No. 20, pp. 1102-1120, 2018. (査読有)
3. S. Iduhara, T. Mashimo, Design and Evaluation of Micro Linear Ultrasonic Motor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 278, No. 1, pp. 60-66, 2018. (査読有)
4. T. Mashimo, T. Urakubo, Y. Shimizu, Micro Geared Ultrasonic Motor, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 23, No. 2, pp. 781-787, 2018. (査読有)
5. T. Mashimo, "Scaling Law of Piezoelectric Ultrasonic Motors at Submillimeter Range," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 22, No. 3, pp. 1238-1246, 2017. (査読有)
6. T. Mashimo, "Miniature Preload Mechanisms for a Micro Ultrasonic Motor," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 257, pp. 106-112, 2017. (査読有)

〔学会発表〕(計 20 件)

1. S. Izuhara, T. Mashimo, Miniature Robot Finger Using a Micro Linear Ultrasonic Motor and a Closed-Loop Linkage, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2018)*, Madrid, pp.4908-4913, 2018.
2. A. Kanada, T. Mashimo, Mobile Continuum Robot with Unlimited Extensible Sections, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2018)*, Madrid, pp. 7117-7122, 2018.
3. K. Mihara, T. Mashimo, Design of Flapping Wing Micro Air Vehicle Using an Ultrasonic Motor, *International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA2018)*, Kobe, 2018.
4. S. Izuhara, T. Mashimo, Micro Linear Ultrasonic Motor, *International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA2018)*, Kobe, 2018.
5. S. Izuhara, T. Mashimo, Micro Linear Motor with a Cuboid Stator with a Length of 2.2 mm, *16th International conference on Actuator (ACTUATOR2018)*, Bremen, 2018.
6. A. Kanada, T. Mashimo, K. Terashima, Flexible Ultrasonic Motor using an Output Coil Spring", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5616-5621, 2017.
7. K. Miyoshi, T. Mashimo, Micro Flat Ultrasonic Motor with a Micro Coil Preload Mechanism, *International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA2017)*, A-45, 2017.
8. T. Mashimo, Micro ultrasonic motor with a one cubic millimeter stator, *International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA2017)* (招待講演)
9. T. Mashimo, Micro Ultrasonic Motor Using One Cubic Millimeter Stator, *IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2017)* (招待講演)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称：可塑性索状駆動装置

発明者：金田礼人, 真下智昭

権利者：豊橋技術科学大学

種類：特許

番号：特願 2018-041600

出願年：2018 年

国内外の別：国内

〔その他〕

豊橋技術科学大学 真下研究室ホームページ

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

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし