

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24651162

研究課題名(和文)自己発電かつ自律推進する液中マイクロロボットの開発

研究課題名(英文) Study of in-liquid micro robot with self-energy harvesting and self-propulsion functions

研究代表者

淵脇 大海 (Fuchiwaki, Ohmi)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20377021

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：1年目はボルタ電池の原理でCombアクチュエータを駆動する案を検証した。力学・電気回路モデルを解析し、数千Vの電圧が必要である事が分かった。ボルタ電池の2Vでは不足するため、電気ウナギのように数千の電池の直接接続が必要である事を見出した。2年目は歯車と形状記憶合金を組み合わせたヒートエンジンを検討した。出力が最大となる歯数比を世界で初めて定式化し、小型化する程、駆動力が粘性力よりも大きくなる事を解明した。3年目は過酸化水素水の白金触媒反応により発生する酸素バブルによる駆動法を検討した。ガラスピペットを熱加工する新しい試作法を確立し、他と比べ、回転・直動モータの双方を試作できる柔軟性を見出した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have studied an in-liquid micro robot with self-energy harvesting and self-propulsion functions. In 1st year, we proposed the robot composed of a voltaic cell and comb actuator. We calculated the dynamic linear model. We also discuss that an electric eel like high voltage generating method to realize the robot. In 2nd year, we analyzed the shape-memory-alloy (SMA) heat engine. The engine is composed of 2 pulleys, 3 gears, and an SMA coil spring. We have firstly formulated an expression that optimizes the relationship among the parameters for the maximum power and the torque so far. We also discuss the miniaturization to actuate micro TAS devices. In 3rd year, we have developed 100μm-sized rockets propelled by O₂ bubbles generated by Pt-H₂O₂ chemical reaction. We weld Pt powder with 0.001mm diameter inside the needle with 0.025mm diameter and 0.14mm length. In experiments, we evaluate relationship between its size and thrust force for bio-medical application.

研究分野：機構、制御、マイクロメカニズム

キーワード：マイクロロボット ボルタ電池 Combアクチュエータ ヒートエンジン 形状記憶合金 過酸化水素水

1. 研究開始当初の背景

(1) 関連する研究の動向

現在のマイクロマニピュレーションの研究は、外部磁場・電場・光ピンセットによる外力駆動型の技術が主流である。磁場による遠隔操作では、大型コイルを周囲に設置する必要があり、操作対象は金属片に限定される。さらに複数の金属片を個別操作できない。光ピンセット法では、レーザー光源、顕微鏡等の外部装置を必要とする上、操作対象は透明体に限られる。図1に B. R. Donald らのワイヤレスで動作する 0.3mm の構造体を示す。

MEMS 技術により所望の形に整形した金属片を、床面に配置した電極から作用する静電気力で操作できる。しかし、自律運動は困難であり、複数台を同時に個別操作できない等の課題がある。

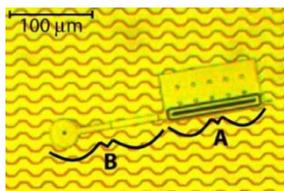


図1 床面からの静電気力で操作できる構造体

(2) 自律推進マイクロロボットの定義

本研究では、自律推進マイクロロボットを次のように定義する。「自律推進マイクロロボットとは、自分の機構内部、又は外部の環境からエネルギーを獲得し、外部の装置から受ける外力ではなく、機構内部で発生する内力によりアクチュエータを動作させ、個別かつ任意に動作を決定できる 1 mm³ 以下のワイヤレスの人工的ロボットであり、その構成要素に、エネルギー獲得部、アクチュエータ部、運動制御部、感覚部を含む。」

(3) 自律推進マイクロロボットの技術課題

エネルギー供給が最大の課題である。何故なら十分な電力量を発生できる 1 mm³ 以下の電池の実現が困難であり、給電線を取り付けると、配線の張力によりロボットが思うように動かなくなるからである。外部からエネルギーを得る代表例として太陽電池が挙げられる。構造が単純で周辺技術も豊富であるが、1 mm³ のロボットの表面全てを太陽電池に置き換えたとしても、6 mm² の面積しか得られないため、獲得できる電力量が不十分である。歩行型のロボットの場合は、特別な表面を用意しないと、静電気力、液架橋力により、ロボットが表面に付着して動けなくなる。これまでに、2で定義した自律推進マイクロロボットの成功例は皆無である。

2. 研究の目的

自然界に目を向けると、1 mm³ 以下の生物は、大気中ではなく、水中に存在している。図2に示す代表的な微生物であるミジンコ、プランクトンは水分無しでは生きられない。液体との相互作用によりエネルギーを得て自律推進する液中マイクロロボットという発想は斬新かつ盲点であり、その研究過程に

は未開拓の技術が豊富に内在している。本研究では、ボルタニック電池の原理でエネルギーを獲得し、液中を自律推進するマイクロロボットの研究開発に挑戦し、独創的新技术を獲得し、応用として光信号による群制御法を研究する事を目的とする。



図2 ミジンコ
体積約 1.0mm³

3. 研究の方法

平成24年度は、自己発電機能と静電アクチュエータの研究を行う。電極と電解質の様々な組み合わせにおける電気特性を定量評価し最適な組み合わせを決める。静電アクチュエータの力学モデルと電気回路モデルを連立し、電気エネルギーを運動エネルギーに変換するための原理モデル計算を行う。光トランジスタにより、アクチュエータの機械的共振と電氣的共振を同期させる回路設計は、横浜国立大学、電気情報学分野の、山梨特任助教を研究分担者に加え補強する。平成25年度、平成26年度は、平成24年度の解析結果を踏まえて、ボルタ電池+Combアクチュエータの機構が試作可能な場合は試作を行う。試作が難しい場合は、歯車と形状記憶合金により構成されるヒートエンジンにより駆動する機構、過酸化水素水の白金触媒反応による酸素バブルにより駆動する機構について検討を行う。

4. 研究成果

(1) ボルタ電池型マイクロロボット

① 駆動原理

電解質内に2種類の金属を挿入し、配線により電氣的に結合すると、金属のイオン化ポテンシャルの差だけ電位差 V が生じる。この時、図3のように二つの電極を櫛型にして對抗させることで、Comb型アクチュエータを形成することができる。Comb型アクチュエータの一つの歯には(1)式の静電気力が作用する。N個の歯がある場合はN倍の引力が作用する。この時、二つの電極の間にバネを設置すれば、弾性エネルギーを蓄えることができる。図4にエネルギー獲得とアクチュエータの連続駆動の原理を示す。始めに電位差 V によりコンデンサーを充電する。この時、静電気力によりバネが縮み弾性エネルギーが蓄

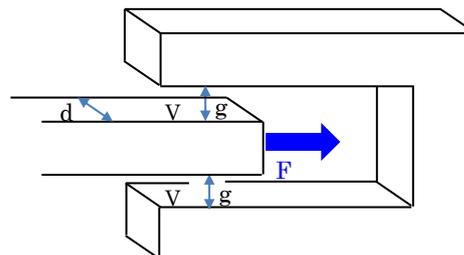


図3 Combアクチュエータ

えられる。損失が無い場合、コンデンサーとばねに蓄えられるエネルギーは等しくなる。光トランジスタまたは機械式スイッチにより、金属とコンデンサを電氣的に切り離し、図4(右)のように別回路を経由して電流を流し、電荷を0にする。この時、ばねの復元力で、コンデンサーに取り付けたフィンが1ストローク動作する。この手順を繰り返せば、負極金属が溶けてなくなるまで連続駆動できる。

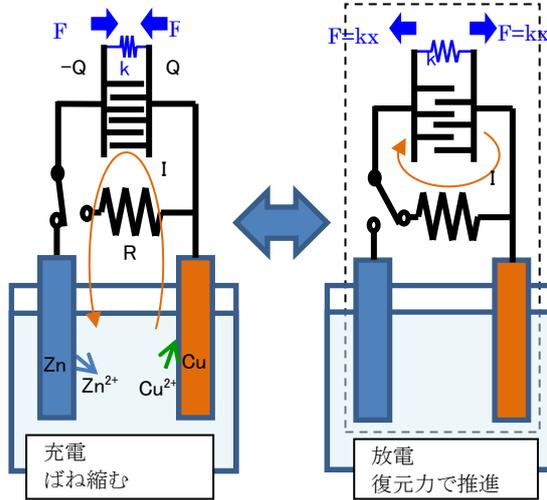


図4 エネルギー獲得と連続駆動

②群制御の方法

図5に、光による液中マイクロロボットの群制御手法を示す。各々のロボットは自分が感知できる波長の光源位置へ自律運動する。この際、再充電のための充電プラットフォームを液中に設置し、光によりロボットを自律誘導して、充電させるなどの応用実験を行う。

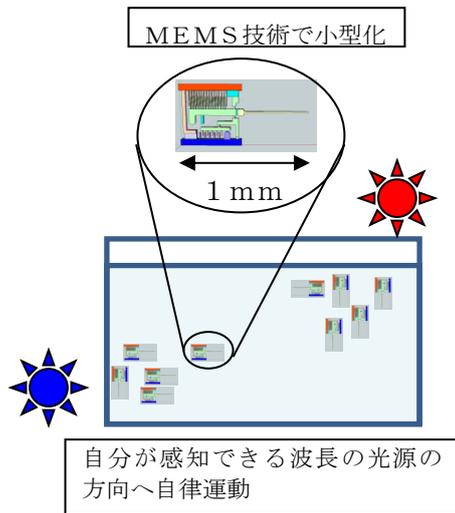


図5 光によるマイクロロボット群制御

③構成

図6に現在設計中の機械式スイッチ機構を有するマイクロロボットの設計例を示す。MEMS技術により作成された Comb 型静電アクチュエータとフィンシリコンの梁により結合し、梁のばね成分により、弾性エネルギーを蓄積する。

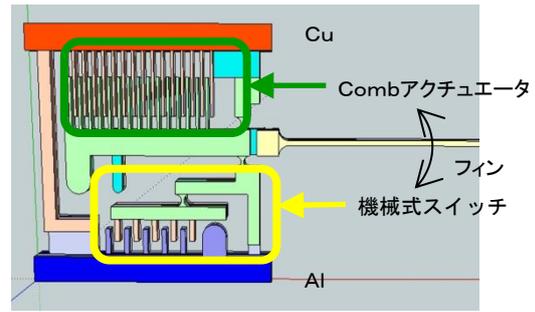


図6 設計中のマイクロロボットの構造

④力学モデル

図7のような力学モデルを解析した。その

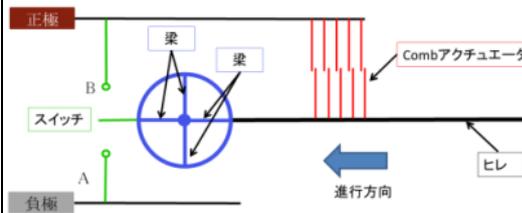


図7 設計中のマイクロロボットの構造

結果、数千倍の電圧が必要である事が分かった。多脚生物のように、数千のアクチュエータを使用するか、電気ウナギのように数千個の電池を直接接続する必要があることを見出した。詳細な解析は学会発表⑦、⑨に体系化した。今後は、100V以上の電圧を獲得できる別手法を探索するか、電圧が小さくても十分な発生力が得られるアクチュエータの提案が課題として挙げられる。

(2) ヒートエンジン型マイクロロボット

図8に本研究で小型化と解析を行った市販のヒートエンジン Dr. Johnson's Clean Heat Engine を示す。4個のプーリとSMAアクチュエータ、直径の異なる2つの歯車で構成されている。

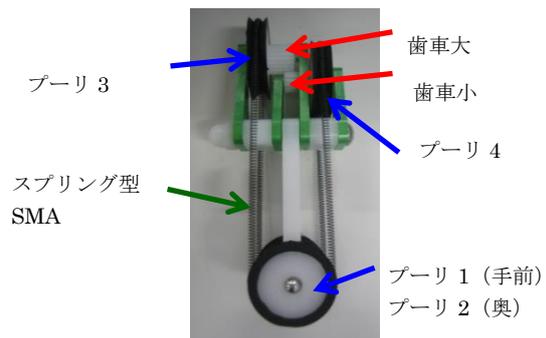


図8 ヒートエンジンの構造

図9の機構を提案して力学で解析した。

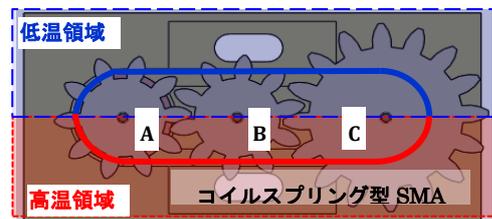


図9 機構モデル

その結果、図10のような出力 v s 歯数比の

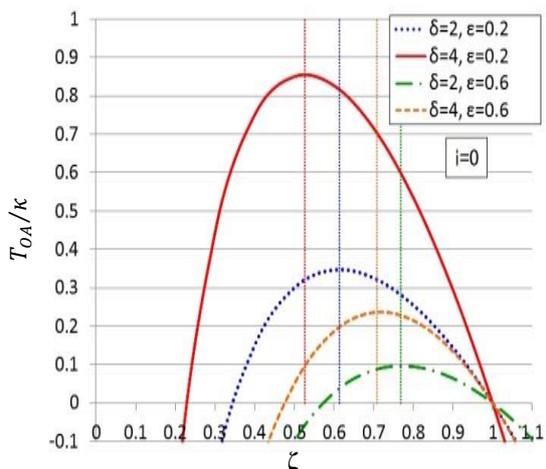


図10 出力 v s 歯数比

グラフを得る事が出来た。縦軸が出力に比例する物理量であり、横軸が歯車A, Cの歯数比である。詳細は割愛するが、出力を最大化する最適な歯数比 ζ_1 の定式化に成功した。詳細な解析は学会発表①、②、③、⑤、⑥、⑧に体系化した。

(3) バブル推進型マイクロロボット

図11に過酸化水素水の白金触媒反応により発生する酸素バブルを駆動源とするマイクロロボットを示す。従来研究とは異なり、本研究ではガラスピペットを先鋭化し、白金球を熱溶着する方法により試作した。熱でガラス管を屈曲させ、切断する事で、直線型だけでなく、回転型のマイクロモータの実現可能性も示した。図12に移動軌跡を示す。螺旋型の軌道を描いたため、再現性の高い運動が得られる事が分かった。図13のように力学的考察も加えた。学会発表④にて基本コンセプトを発表した。

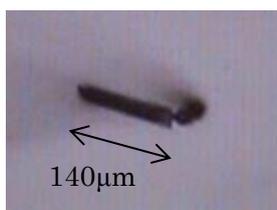


図11 バブルジェット型マイクロロボット

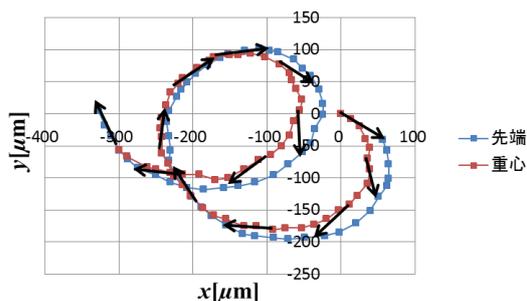


図12 移動軌跡

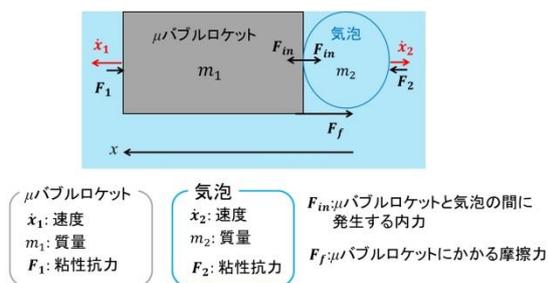


図13 力学モデル

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0件)

[学会発表] (計 9件)

- ① H. Aono, R. Imamura, O. Fuchiwaki, Y. Yamanashi, K. F. Böhringer; Formulation and optimization of pulley-gear-type SMA heat engine toward microfluidic MEMS motor, Proc. of IEEE Int'l. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), pp. 2839-2845, Chicago, Sep 14-18, 2014, Acceptance rate 47%
- ② H. Aono, R. Imamura, and O. Fuchiwaki, Y. Yamanashi, K. F. Böhringer; Modeling and analysis of a heat engine with coil-spring-shaped SMA for steady state performance and starting condition, Proc. of ASPE/ASPEN Summer Topical Meeting Manufacture and Metrology of Freeform and Off-Axis Aspheric Surfaces, Vol. 58, pp. 137-141, Hawaii, June 26-27, 2014
- ③ R. Imamura, H. Aono, O. Fuchiwaki, Y. Yamanashi, K. F. Böhringer; Design and development of a heat engine with SMA actuator as a proof of concept prototype of a propulsion device for an in-liquid micro robot, Proc. of ASPE/ASPEN Summer Topical Meeting Manufacture and Metrology of Freeform and Off-Axis Aspheric Surfaces, Vol. 58, pp. 147-152, Hawaii, June 26-27, 2014
- ④ 原山叶、青野弘幸、今村凌大、洸脇大海; バブルジェットによる液中マイクロモータの実現可能性の検討, 第6回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, くにびきメッセ, 20pm3-PM27, 島根, 2014
- ⑤ 今村凌大、青野弘幸、洸脇大海; 液中マイクロロボット実現のためのヒートエンジンの発生トルクの定式化と原理確認用試作機の開発, 2014年度ロボティクス・メカトロニクス講演会, 富山国際会議場, 3P2-T02, 富山, 2014
- ⑥ 青野弘幸、今村凌大、洸脇大海; 液中マイクロロボット実現のためのヒートエンジンの定常状態の運動解析と始動条件の定式化,

2014年度ロボティクス・メカトロニクス講演会，富山国際会議場，3P2-T01，富山，2014

- ⑦Hiroyuki Aono and Ohmi Fuchiwaki: Design and development of in-liquid micro robot with self-energy harvesting and self-propulsion functions -Study of coupled model of fluid dynamics and electro circuit and design of proof of concept prototype-, Proc. of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2013), #1126, Taipei, Nov., 2013, Best paper award
- ⑧青野弘幸、今村凌大、涸脇大海；液中マイクロロボット実現のための液中小型ヒートエンジンの基礎研究，第5回マイクロ・ナノ工学シンポジウム，仙台国際センター，5PM3-PMN-013，仙台，pp. 59-60，2013
- ⑨青野弘幸、涸脇大海；液中小型推進機構の力学・電気回路モデルによる連成解析とFEM解析による機構の設計，2013年度ロボティクス・メカトロニクス講演会，つくば国際会議場，2A1-M03，茨城，2013

〔図書〕（計 0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.fuchilab.ynu.ac.jp/index.htm>

1

6. 研究組織

(1) 研究代表者

涸脇 大海 (FUCHIWAKI, Ohmi)
横浜国立大学・工学研究院・准教授
研究者番号：20377021

(2) 研究分担者

山梨 祐希 (YAMANASHI, Yuki)
横浜国立大学・工学研究院・准教授
研究者番号：70467059