

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289025

研究課題名(和文)高パワー作業を行う狭隘空間内作業マイクロロボットの開発

研究課題名(英文)Development of a Microrobot Performing High-Power Needed Tasks in Narrow Space

研究代表者

吉田 和弘 (Yoshida, Kazuhiro)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：00220632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：災害現場の瓦礫内、化学プラントの細管内などの狭隘空間で高パワー作業を行うマイクロロボットのため、ER流体の電界による粘度変化でその往復流れを同期整流する多自由度ERマイクロフィンガシステムを発展させた。MEMS技術を用いて長さ1.6 mmのERマイクロフィンガを試作し、その動作を確認した。また、長さ1.9 mmの2自由度PDMSフィンガ部を試作し、空気圧でその動作を確認した。さらに、圧電バイモルフを用いた直径3.3 mmのマイクロ交流圧力源を試作し、200 Hzまでの動作を確認した。最後に、以上の構成要素を1チップ上に集積した2自由度ERマイクロフィンガシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：For a microrobot performing high-power needed tasks in narrow space in rubble at disaster sites, small diameter pipes in chemical plants, etc., a multiple ER microfinger system using an alternating pressure source was expanded, which rectifies alternating flow of electro-rheological (ER) fluid by its viscosity change due to the synchronously applied electric field. First, a 1.6 mm long ER microfinger was developed using MEMS technologies. Second, a 1.9 mm long two-DOF PDMS finger part was fabricated and characterized pneumatically. Third, a micro alternating pressure source with 3.3 mm in diameter was fabricated using piezoelectric bimorph and its bandwidth of 200 Hz was clarified. Finally, a two-DOF ER microfinger system was fabricated on a chip.

研究分野：機械工学

キーワード：マイクロマシン 先端機能デバイス マイクロロボット ER(電気粘性)流体 交流圧力 MEMS ソフトロボット アクチュエータ

### 1. 研究開始当初の背景

震災などによる建築物倒壊現場の瓦礫内の狭い空間で、障害物を押しよけ移動し行う被災者探索、原子炉や化学プラントに設置された細管内の広範囲の検査および補修などを行うために、図1のような高パワー作業を行う狭隘空間内作業マイクロロボットの開発が求められている。本ロボットは、高パワー密度、マイクロサイズ、多自由度、であることが必要である。

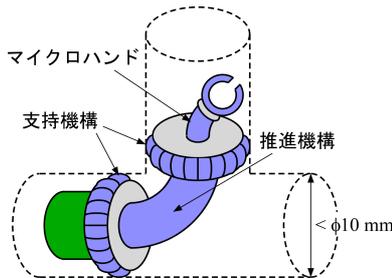


図1 狭隘空間内作業マイクロロボット

研究開発開始時点で、管内走行マイクロマシン、マイクロ歩行機械、マイクロハンド、マイクログリッパなどの構成要素の開発例は多数あったが、上記の要求を満たし、かつパワー源を含むすべてを装備したマイクロロボットは見当たらなかった。

研究代表者らは、液圧パワーが高パワー密度であることを示し(引用文献 参照)、上記の要求を満たす要素技術およびシステム技術の構築を行っていた。

- (1) マイクロ移動機構：管内走行マイクロメカニズムの提案および開発(引用文献)
- (2) マイクロ液圧制御要素：電界で粘度制御できる ER (電気粘性) 流体を作動流体とした ER マイクロバルブの提案および開発(引用文献)
- (3) マイクロ液圧パワー源：高出力圧電マイクロポンプの提案および開発(引用文献)
- (4) 多自由度マイクロシステム：交流圧力源を用いた多自由度 ER マイクロフィンガシステム(図2)の提案とラージモデルによる妥当性の実証(引用文献)

これらの技術を総合すれば、高パワー作業を行う狭隘空間内作業マイクロロボットを実現できると考えられる。

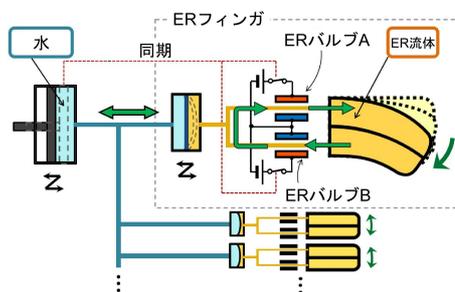


図2 交流圧力源を用いた多自由度 ER マイクロフィンガシステム

### 2. 研究の目的

震災などによる建築物倒壊現場の瓦礫内、原子炉や化学プラントの細管内などの狭隘空間において高パワー作業を行うマイクロロボットを、研究代表者らが提案、開発している交流圧力源を用いた多自由度 ER マイクロフィンガシステムを発展、応用して実現する。ER マイクロフィンガは、交流圧力による ER 流体の流れをゴム製フィンガ部に集積した ER マイクロバルブで整流し屈曲するもので、本ロボットに必要な高パワー密度、マイクロサイズ、多自由度化可能という特性を有している。まず、多自由度 ER マイクロフィンガシステムを試作し、現有の交流圧力源を用いて特性実験を行う。次に、高出力マイクロ交流圧力源を開発する。最後に、これらの要素を総合し、狭隘空間内作業マイクロロボットの実現を目指す。

### 3. 研究の方法

以下の手順で開発を行い、高パワー作業を行う狭隘空間内作業マイクロロボットの実現を図った。

- (1) 交流圧力源を用いた ER フィンガのマイクロ化の検討

長さ 16 mm のラージモデルにより原理確認が行われている、交流圧力源を用いた ER フィンガについて、MEMS 技術による製作プロセスを開発し、ミリメートルサイズのマイクロ化を実現する。

- (2) 多自由度 ER マイクロフィンガシステムの開発

(1)で試作した ER マイクロフィンガを複数搭載したシステムを開発する。また、2 自由度の屈曲が可能なフィンガ部を有するシステムの開発を行う。

- (3) マイクロ交流圧力源の開発

薄形で高応答で比較的大きな変位が得られる圧電バイモルフを用いた直径 5 mm 以下のマイクロ交流圧力源を MEMS 技術を用いて開発する。

- (4) 2 自由度 ER マイクロフィンガシステムの開発

狭隘空間内作業マイクロロボットの主要な構成要素となる 2 自由度 ER マイクロフィンガシステムを開発し、その特性を実験的に明らかにする。

### 4. 研究成果

- (1) ER フィンガシステムのマイクロ化

交流圧力を、印加電界で ER 流体の粘度を変化させ開閉する ER バルブにより整流し、ゴム製フィンガ部を駆動する ER フィンガのマイクロ化について検討した。ゴム製フィンガ部は、外面の凹凸形状を避けつつ径方向の膨張を抑えるため内側に強化壁を有する構造で、FEM 解析に基づき最適設計を行った。高アスペクト比を有するフィンガ部のため、フォトレジストの型による PDMS(シリコンゴム)の成型加工を用いた MEMS プロセス

ス提案、開発し、長さ 1.6 mm のフィンガ部の試作に成功した。また、研究代表者らの従来技術により ER パルプおよび圧力伝達用ダイヤフラムをシリコン基板上に製作した。さらに、3 組のフィンガ部と ER パルプおよび圧力伝達用ダイヤフラムを一体化し、図 3 に示すような 3 自由度の ER マイクロフィンガを実現した。



図 3 試作した ER マイクロフィンガ

(2) 高基底粘度 ER 流体の選定

本システムでは、ER 流体を長い配管に流す必要がないため、基底粘度（電界無印加時の粘度）が高い ER 流体を用いることができ、同一差圧を得るための ER パルプの流路長さを短縮することができる。そこで、異なる ER 流体に対し、弁制御特性を実験的に評価し、基底粘度が従来の 5 倍の高基底粘度 ER 流体を選定した。

(3) ER マイクロフィンガシステムの特性実験

(1)で試作した ER マイクロフィンガ、(2)で選定された ER 流体、および既存のボイスコイルモータを用いた交流圧力源を用いたシステムを構築し、特性実験を行った。その結果、図 4 に示すように、先端変位 1.1 mm を 1.1 s で動作可能であることなどを確認した。



図 4 ER マイクロフィンガの屈曲動作

(4) 多自由度マイクロフィンガ部の試作および特性実験

交流圧力源を用いた ER マイクロフィンガの多自由度化を実現するため、その主要要素である多自由度マイクロフィンガ部の試作研究を行った。本フィンガ部は、PDMS 製のチューブの断面を 4 個の液圧室に分割した構造で、各液圧室の内圧を制御することにより 2 方向の屈曲を実現する。まず、FEM 解析を行い長さ 1.6 mm のフィンガ部を設計し、その動作および特性について確認した。次に、(1)で開発したフォトレジストの型を用いた

マイクロモルディング技術を適用し、長さ 1.9 mm のフィンガ部の試作に成功した。空気圧を用いてその特性を測定した結果、図 5 に示すように、水平方向 0.7 mm、垂直方向 1.1 mm の先端変位が得られることなどを確認した。

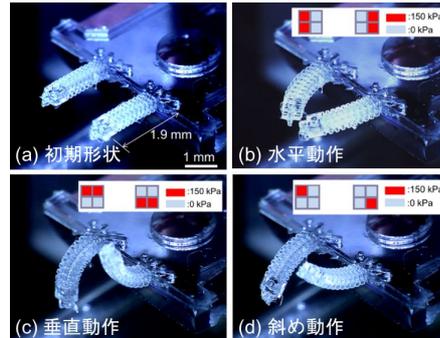


図 5 試作した 2 自由度マイクロフィンガ（空気圧動作）

(5) マイクロ交流圧力源の試作および特性実験

既存の交流圧力源ラージモデルのマイクロ化を図るため、圧電バイモルフでダイヤフラムを変形させ交流圧力を発生させるマイクロ交流圧力源の試作を行った。圧電バイモルフ駆動ダイヤフラムは、その弾性特性により、流量にほとんどよらず交流圧力を発生できることが研究代表者らの研究により明らかになっており（引用文献）センサなしの単純な構造で交流圧力源を実現できると考えられる。ここではその開発の第 1 段階として、直径 3.2 mm の圧電バイモルフを MEMS 技術により加工した直径 3.3 mm、厚さ 30 μm のシリコン製ダイヤフラムに接合した圧電バイモルフ駆動ダイヤフラムを試作し、その動作を実験的に確認した。試作デバイスの先に流路を介して直径 1.6 mm、厚さ 5 μm のダイヤフラムを接続し、その中心の変位をレーザ変位計で測定することで、図 6 に示すように、200Hz まで動作可能であることを確認した。

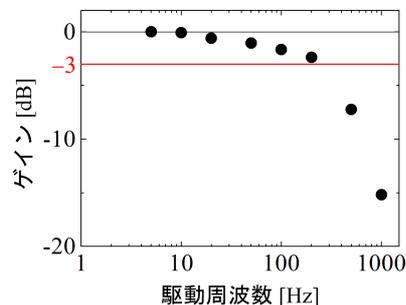


図 6 試作したマイクロ交流圧力源の周波数特性

(6) 2自由度 ER マイクロフィンガシステムの試作および特性実験

開発した構成要素を組み合わせ、2自由度 ER マイクロフィンガシステムを構築した。本システムは、図 7 に示すように、直径 3.2 mm の圧電バイモルフで直径 3.3 mm のシリコン製ダイアフラムをたわみ振動させるマイクロ交流圧力源、研究代表者らが開発した PDMS のマイクロモールディング技術を用いて製作した長さ 1.9 mm で 2 自由度の屈曲動作を行うマイクロフィンガ、幅 0.1 mm、高さ 0.04 mm、長さ 0.8 mm の流路の上下に電極を有し電圧印加による ER 流体の粘度変化でその圧力、流量を変化する複数の ER マイクロバルブを 1 チップ上に構成したものである。ただし、マイクロフィンガ部の製作プロセスは、再現性の向上とさらなるマイクロ化への対応のために改良を加えている。

まず、周波数 2 Hz でマイクロ交流圧力源を駆動させ、ER 流体のドメインに起因するパターンの運動を顕微鏡で観察し、ER 流体が往復運動していることを確認した。次に、2 自由度 ER マイクロフィンガシステムの駆動実験を行ったが、マイクロフィンガの屈曲変形を確認するには至らなかった。圧電バイモルフの変位が微小であるため流路のコンプライアンスに非常に敏感であり、今後、作動流体の充填やそのシール方法などを見直して実験系の再構築を検討する必要がある。

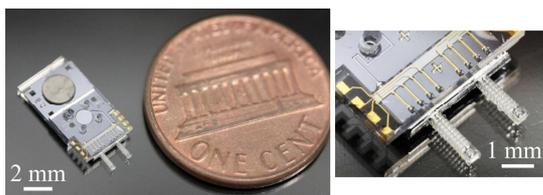


図 7 試作した 2 自由度 ER マイクロフィンガシステム

<引用文献>

吉田和弘、横田眞一、流体パワーを用いたマイクロアクチュエータに関する研究 (第 1 報 微小化に適したアクチュエータ方式の検討と管内走行機械への応用)、油圧と空気圧、Vol. 25、No. 2、pp. 281-288 (1994)

K. Yoshida, K. Takahashi, S. Yokota, An In-Pipe Mobile Micromachine Using Fluid Power (A Mechanism Adaptable to Pipe Diameters), JSME Int. J. (Ser. B), Vol. 43, No. 1, pp. 29-35 (2000)

M. De Volder, K. Yoshida, S. Yokota, D. Reynaerts, The Use of Liquid Crystals as Electrorheological Fluids in Microsystems: Model and Measurements, J. of Micromechanics and Microengineering, Vol. 16, No. 3, pp. 612-619 (2006)

K. Yoshida, T. Muto, J.-w. Kim, S. Yokota, An ER Microactuator with Built-in Pump and Valve, Int. J. of Automation Technology, Vol. 6, No. 4, pp. 468-475 (2012)

K. Yoshida, T. Miyoshi, S. I. Eom, S. Yokota, A Multi-DOF ER Microactuator System Using Alternating-Pressure Source, Proc. of 16th Int. Conf. on Mechatronics Technology (ICMT2012), pp. 1-5 (2012)

吉田和弘、横田眞一、アクチュエータシステム、特開 2013-160238 (2013)

K. Yoshida, S. Yamamoto, S. I. Eom, S. Yokota, A Multiple-Microactuator System Using a High-Frequency Pressure Source, Sensors and Materials, Vol. 27, No. 4, pp. 317-328 (2015)

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

T. Miyoshi, K. Yoshida, J.-w. Kim, S. I. Eom, S. Yokota, An MEMS-Based Multiple Electro-Rheological Bending Actuator System with an Alternating Pressure Source, Sensors and Actuators A, Vol. 245, pp. 68-75 (2016), 査読有, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2016.04.041>

T. Miyoshi, K. Yoshida, S. I. Eom, S. Yokota, Proposal of a Multiple ER Microactuator System Using an Alternating Pressure Source, Sensors and Actuators A, Vol. 222, pp. 167-175 (2014), 査読有, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2014.12.002>

[学会発表](計 7 件)

T. Miyoshi, K. Yoshida, J.-w. Kim, S. I. Eom, Development of a MEMS-Based Two-DOF ER Bending Actuator System Using an Alternating Pressure Source, Proc. of 10th JFPS Int. Symp. on Fluid Power, Fukuoka 2017 (Web Proc.), 1B16 (3pp) (2017)

T. Miyoshi, K. Yoshida, J.-w. Kim, S. I. Eom, A MEMS-Based Two-DOF PDMS Bending Actuator for Multiple ER Microactuator Systems, Proc. of 20th Int. Conf. on Mechatronics Technology (ICMT2016), pp. 86-87 (2016)

三好智也、吉田和弘、金俊完、巖祥仁、MEMS 技術を応用したマイクロ交流圧力源搭載形 2 自由度 ER アクチュエータシステムに関する研究、日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集 (DVD-ROM) J1110106、(2016)

三好智也、吉田和弘、金俊完、巖祥仁、MEMS 技術を応用した交流圧力システムのための 2 自由度ソフトアクチュエータ、日本機械学会第 16 回機素潤滑設計部門講演会講演論文集、pp. 63-64 (2016)

T. Miyoshi, K. Yoshida, J.-w. Kim, S. I. Eom, S. Yokota, Development of a MEMS-Based Electro-Rheological Microfinger System with an Alternating Pressure Source, Proc. of the 18th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2015)(USB), pp. 823-826 (2015)

T. Miyoshi, K. Yoshida, J.-w. Kim, S. I. Eom, S. Yokota, Fabrication of a MEMS-Based Electro-Rheological Microfinger System with an Alternating Pressure Source, Proc. of 6th Int. Conf. on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2015)(USB), pp. 476-477 (2015)

T. Miyoshi, K. Yoshida, J.-w. Kim, S. I. Eom, S. Yokota, Fabrication of a MEMS-Based ER Microgripper with Alternating-Pressure Source, Proc. of 9th JFPS Int. Symp. on Fluid Power, Matsue 2014 (USB), pp. 438-441 (2014)

〔その他〕

ホームページ等

<http://yoshida-www.pi.titech.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉田 和弘 (YOSHIDA, Kazuhiro)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：00220632

### (2) 研究分担者

横田 眞一 (YOKOTA, Shinichi)

(2014 年度)

東京工業大学・名誉教授

研究者番号：10092579

金 俊完 (KIM, Joon-wan)

東京工業大学・科学技術創成研究院

・准教授

研究者番号：40401517

巖 祥仁 (EOM, Sang In)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：20551576