マイクロロボット用アクチュエータの開発 ——流体マイクロアクチュエータを例として——

解説

キーワード

アクチュエータ、マイクロマシン、微小化特性、
マイクロポンプ、マイクロバルブ

吉田 和 弘

横田 眞 一

東京工業大学精密工学研究所

1. まえがき

ロボットおよびアミューズメント機器を開発する際、その駆動源となるアクチュエータは、システムの性能を決定する重要な機能要素である。本稿では、マイクロロボット用アクチュエータの開発手順について、著者らが開発をすすめている流体マイクロアクチュエータを例として紹介する。

マイクロロボット、マイクロマシンは、従来の機械では侵入できないような狭い空間で作業をおこなえる、半導体プロセス技術の特性を利用して大量のデバイスを短時間、低コストで製造できる、電子回路も同時に製作できるためインテリジェント化が容易に図れる、などの特長を有し、活発に開発がすすめられているが、これまで開発されたデバイスは、1mm以下のサイズで、電気信号や光信号の制御、微量量の液体の搬送など、軽負荷のものがほとんどである¹⁾。しかし、たとえば発電プラントの内径10mm以下の冷却用細管の中で、センサ、駆動系、および制御回路を含む自重を支え、広い範囲にわたり検査・補修をおこなうマシンを実現するためには、ミリメートルサイズで高負荷を駆動できるマイクロアクチュエータが必要となる。そこで著者らは、このような従来と異なる要求性能を有するマイクロアクチュエータとして流体マイクロアクチュエータに着目し、その開発をすすめている。以下、その開発手順について具体的に説明する。

2. マイクロアクチュエータ方式の選定²⁾

要求性能を満たすためには、最大出力パワーが高いアクチュエータ方式を選定する必要がある。そこで、マイクロアクチュエータとして利用できる各種アクチュエータを簡単なモデルで表し、その最大発生力および最大出力エネルギーの微小化特性を理論的に解析し、評価する。

2. 1 各種アクチュエータのモデル

マイクロアクチュエータとしては、1)容積分形流体アク

チュエータ、2)タービン形流体アクチュエータ、3)せん断応力媒介流体アクチュエータ、4)静電アクチュエータ、5)電磁アクチュエータ、6)圧電アクチュエータ、7)SMA (Shape Memory Alloy, 形状記憶合金) アクチュエータ、および8)超磁歪アクチュエータを取り上げ、それぞれの発生力および出力エネルギーの微小化特性を理論的に求める。アクチュエータは直動形とし、その外形を一辺の長さ L の立方体とする。 L を減少させたとき、その他の部分の長さも相似的に減少させるものとする。

容積分形アクチュエータは、図1(a)に示す液圧シリンダである。流体アクチュエータについては、後述するタービン形およびせん断応力媒介流体を含め、管路まで含めた性能を評価する。ただし管路長 L_c は大きさによらず一定(解析例では0.5m)とする。また位置決め性能およびエネルギー損失の点から管内流れが層流となるように制御する

Fig. 1 Analyzed models of several kinds of actuators

Development of Actuators for Microrobots—Examples of Fluid Microactuators—

By Kazuhiro Yoshida and Shinichi Yokota, Non-members (Tokyo Institute of Technology).

ものとし、Hagen-Poiseuilleの法則を仮定する。作動流体は水または作動油（密度 870kg/m^3 、粘度 $31\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）を想定し、非圧縮性を仮定する。最大印加圧力 $P_{\max}$ は、内径 d 、肉厚 t の薄肉円筒の許容圧力が円周応力の許容値 σ_{im} により

$$P_{\max} = 2(t/d)\sigma_{im} \quad (1)$$

と表され、 σ_{im} および (t/d) が不変であることから、 L によらず一定（解析例では 1.2MPa ）とする。

タービン形流体アクチュエータは図1(b)に示す構造である。作動流体の流れが羽根により偏向されるとき運動量変化を利用し動力を取り出すものである。

せん断応力媒介形アクチュエータは図1(c)に示す構造で、流れと平行に配置された平面に作用するせん断応力を利用するものである。マイクロサイズでは面積に比例する粘性力が体積に比例する慣性力に比べ相対的に大きくなるため、このような高精度を要する摺動部のないアクチュエータでも使用できる可能性がある。

静電アクチュエータは図1(d)に示す構造で、左側の極板の数を10とし、Paschenの法則に基づき放電が生じない限界の 300V の一定電圧を加えるものとする。

電磁アクチュエータは図1(e)に示すプランジャで、ジュール熱による発熱が 250°C 以下となるように供給電力を定める。

圧電アクチュエータは電界印加でひずみを生じるもので、PZTの物性値を用い、許容電界強度 1.5kV/mm を印加するものとする。

SMAアクチュエータは低温時に加えられたひずみを高温時に回復するもので、図1(f)に示す特性³⁾を有するものとする。

超磁歪アクチュエータは磁界印加でひずみを生じるもので、物性値は文献⁹⁾の値を用いる。

2. 2 各種アクチュエータの微小化特性の評価

2.1節で述べた各種アクチュエータに対し、発生力と出力エネルギーを算出し評価する。ただしそれぞれの値はアクチュエータサイズで正規化するため、発生応力 $\sigma_{\max}$ および出力エネルギー体積密度 $E_{\max}$ を用いる。

結果を図2に示す。図2(a)が $\sigma_{\max}$ 、図2(b)が $E_{\max}$ である。

図2(b)より、容積分流体アクチュエータはSMAアクチュエータの次に $E_{\max}$ が大きく、他のアクチュエータと比較して優れた特性を有することがわかる。SMAアクチュエータは図2(a)に示すように $\sigma_{\max}$ も大きく優れているが、本体の加熱をおこなうため、エネルギー効率、廃熱などの重要な課題が残されていると思われる。

マイクロアクチュエータに適すると言われている静電アクチュエータは、確かに微小化とともに性能が向上するが、通常の大きさにおける絶対値が小さいため、その能力を発揮するのは $L \leq 5\mu\text{m}$ と考えられる。

圧電アクチュエータは、 $\sigma_{\max}$ は大きい最大ひずみが小さいため、 $E_{\max}$ はそれほど大きくない。超磁歪アクチュエータも同様である。

Fig. 2 Analyzed results of miniaturization characteristics

またせん断応力媒介形流体アクチュエータは、微小化に対する特性変化は比較的小さいが、絶対値はかなり小さい結果となった。

以上より、本稿では、 $L=10\mu\text{m}\sim 10\text{mm}$ において良好な性能を有するアクチュエータ方式として、容積分流体アクチュエータを選定する。なお、流体アクチュエータは、液体を媒介しているため柔軟性の高い駆動系を実現可能であり、人間と接触する機会の多いアミューズメント機器、福祉機器などへの応用にも適すると考えられる。

2. 3 容積分流体マイクロアクチュエータの実現

2.2節で選定した容積分流体マイクロアクチュエータを実現するため、液圧シリンダをそのまま微小化しようとすると、相対的に大きくなる機械加工誤差によりピストン、シリンダ間の摺動部で漏れや摩擦の問題が生じると考えられる。そこで著者らは、ベローズ形マイクロアクチュエータおよびコイルばね拘束形ゴムアクチュエータを提案している。

(1) ベローズ形マイクロアクチュエータ

ベローズは、その製作方法により成形ベローズ、溶接ベローズおよび電着ベローズに分類され、電着ベローズは外径 1.5mm まで製作可能である³⁾。ベローズは、摺動部がなく構造が単純、密閉構造で漏れない、弾性により復元力が得られる、などの特長を有し、容積分流体マイクロアクチュエータに適していると考えられる。

(b) Examples of static characteristics
(Coil spring: spring constant=0.56kN/m, initial tension=1.6N)

Fig. 3 Rubber-tube actuator constrained with coil-spring

(2) コイルばね拘束形ゴムアクチュエータ⁶⁾

提案するアクチュエータは、図3(a)に示すように、ゴムチューブをコイルばねに通した構造である。コイルばねにより、内圧によるゴムチューブの径方向への膨張が拘束されるとともに、収縮力が与えられる。ミリメートルサイズの直径のアクチュエータを簡便、安価に構成可能であり、またコイルばねのばね定数、初張力などの選択によりアクチュエータの設計範囲が広いという特長を有する。

図3(b)の実線は、外径2mmのシリコンゴムチューブと外径3mmのコイルばねを用い試作した直径3mm、全長20mm(伸縮部10mm)のアクチュエータに対し、水を作動流体としておこなった静特性実験の結果の例である。実験の結果、ばね定数が大きく座屈を生じないときは安定した振幅変位を発生できる、ゴムの弾性特性によりヒステリシスがあり、コイルばねのばね定数が小さいとより大きくなる、ばね定数が小さい場合、負荷力が大きくなると座屈が生じる、などのことを確認している。また、図3(b)の破線で示す数学モデルの構築もおこなっている。

3. マイクロポンプおよびマイクロバルブ

流体マイクロアクチュエータにはマシン外部から流体パワーを供給することも可能であるが、広い範囲を移動するマイクロマシンには、マイクロポンプおよびマイクロバルブを搭載することが必要である。そこで著者らはそれらマイクロ機能要素の開発を試みている。

3.1 共振駆動形圧電マイクロポンプ⁷⁾⁸⁾

高出力マイクロポンプを実現するため、著者らは図4(a)に示す圧電マイクロポンプを提案している。これは、ポンプ室となるベローズと慣性質量からなる振動系を圧電アクチュエータにより共振周波数で加振することで圧電アクチュエータの微小な出力変位を拡大し、生じた大きな容積変化を吸入側および吐出側に取りつけた二つの逆止弁で整流し、高流量を得るものである。直径9mm、高さ10mmのマイクロポンプを試作し、水を作動流体とした場合の特性実験の結果、最大吐出流量80mm³/s、最大吐出圧力

(b) Frequency characteristics of maximum flowrate and maximum pressure with homogeneous ER fluids

Fig. 4 Resonantly-driven piezoelectric micropump

0.32MPaを実現している。また、後述する均一系ER流体(基底粘度68.8mPa·s(20°C))などの比較的粘度が高い作動流体をポンピングする場合について検討し、キャビテーションにより生じる性能低下がブースト圧力印加により改善できることを示し、図4(b)に示すように、最大吐出流量15mm³/s、最大吐出圧力0.20MPaを実現している。

3.2 マイクロERバルブ⁹⁾

通常の制御弁をマイクロ化しようとする、機械加工誤差が本体サイズと比較して相対的に大きくなるため、漏れなどの影響が大きい問題がある。そこで著者らは、電界印加で粘度が増加するER流体を作動流体とし、固定電極からなる単純構造のマイクロERバルブの開発をすすめている。とくに液晶に代表される均一系ER流体を用いれば、分散粒子を含まないため電極間隔を小さくでき、流路のマイクロ化や低電圧化が可能である。

図5(a)にマイクロERバルブの電極の例を示す。吸入ポートから制御ポートまでが一对の電極、制御ポートから排出ポートまでが他の一对の電極となる3ポート形であり、印加電圧で制御ポートの圧力、流量を制御する。図5(b)には静特性を示す。なお、本バルブは単純構造であるため、半導体プロセスを用いた試作もおこなっている。

4. 流体マイクロアクチュエータの応用

4.1 管内走行マイクロマシン⁹⁾

マシン外部からチューブにより流体パワーを供給する図6(b)に示すような管内走行マイクロマシンを試作している。本マシンは、前後に保持機構を設け、その間隔を伸縮させることでインチworm式に走行するものである。コイルばね拘束形ゴムアクチュエータを用い、作動流体

Fig. 5 3-port micro ER valve

を水とし、外部のポンプで方形波状の往復流量を与える。保持機構は管径に適応でき小形で大きな保持力を得られる図6(a)に示すトグル式であり、前進用、後進用をSMAアクチュエータにより切替える。内径4mmおよび5mmの管内の走行実験により、速度7mm/sで前進、後進できることを確認している。

4. 2 マイクロ流体制御システム⁹⁾

3章で試作した共振駆動形圧電マイクロポンプおよびマイクロERバルブを用い、図7(a)に示すように一つのベローズ形マイクロアクチュエータを位置制御するシステムを構成し、静特性実験をおこなっている。結果の一例を図7(b)に示す。まだ性能は十分ではないが、その動作を確認している。

5. あとがき

本稿では、マイクロロボット用アクチュエータの開発について、著者がすすめている流体マイクロアクチュエータを例として紹介した。本アクチュエータは、人工昆虫、人工魚などのアミューズメント機器への応用も可能であると思われる。読者の参考になれば幸である。

(平成13年3月28日受付)

文 献

- 1)たとえば, Proc. MEMS 2001, (2001).
- 2)吉田・横田, 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), 油圧と空気圧, 25-2 (1994), 281-288.
- 3)本間, 形状記憶合金アクチュエータ, 油空圧学会'90ウィンターセミナー資料, (1990), 7-12.
- 4)森・鈴木, 超磁歪ポンプ, 油空圧技術, 31-13 (1992), 42-45.
- 5)イーグル工業(株)精密ベローズカタログ, (1991).

(a) Toggle-type supporting mechanism

Fig. 6 In-pipe mobile micromachine adaptable to pipe diameters

(a) Structure

(b) Static characteristics

Fig. 7 Micro fluid control system

- 6)吉田・高橋・横田, 流体パワーを用いた管内走行マイクロマシン(管径に適応できるメカニズム), 機論(B), 65-629 (1999), 217-222.
- 7)J.-H.Park, K.Yoshida, and S.Yokota, Resonantly Driven Piezoelectric Micropump -Fabrication of a Micropump Having High Power Density-, Mechatronics, 9-7 (1999), 687-702.
- 8)朴・吉田・横田, 均一系ER流体を用いたマイクロ流体制御システム, 機論(C), 66-648 (2000), pp.2700-2706.
- 9)K.Yoshida, M.Kikuchi, J.-H.Park, and S.Yokota, A Micro ER Valve Fabricated by Micromachining, Proc. MEMS 2001, (2001), 467-470.

吉 田 和 弘（非会員） 1962 年 2 月 2 日生。1989 年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程制御工学専攻修了。同年同大学精密工学研究所助手、1996 年同研究所助教授、現在に至る。流体マイクロマシン、流体制御システム、機能性流体応用に関する研究に従事。日本油空圧学会、日本機械学会、日本ロボット学会、IEEE 会員。工学博士。

横 田 眞 一（非会員） 1949 年 8 月 22 日生。1975 年東京工業大学大学院修士課程機械物理工学専攻修了、同年同大学精密工学研究所助手、1986 年研究所助教授、1995 年同研究所教授、現在に至る。流体制御、油圧サーボ、非定常流量計測、マイクロマシンの研究に従事。日本油空圧学会、日本機械学会、計測自動制御学会会員。工学博士。