

細管内走行マイクロアクチュエータの試作

Prototype Microactuator Movable in a Slim Pipe

矢口 博之

東北学院大学工学部, 多賀城市中央1丁目13-1 (〒985-8537)

H. Yaguchi

Tohoku Gakuin University, 13-1 Tagajo, Miyagi

This paper proposes a new microactuator that operates on the resonance energy of a system excited by electromagnetic force. Flexible materials are used as a means of transferring resonance energy. The actuator is moved by the difference in frictional force between forward and backward motion of flexible materials. The sizes of the prototype actuators were 8 mm and 4 mm in diameter. An experiment demonstrated the effects on propulsion performance of power supply and vibrational modes of the actuator. Experimental results show that the actuator can move at high speed in the vertical direction. This actuator has many possible applications for small pipe inspections, biomedical, and procedures long-distance movement.

Key words: resonance-drive, pipe inside mover, high-speed motion, frictional force, flexible material

1. はじめに

原子炉細管内検査用および医療やバイオテクノロジーなど種々の分野において探索ロボットの要求が高まってきている。これらのロボットは微細管など人間の手のおよばない個所に進入し、いかなる環境下においても管内を自由に移動できなければならない。この種の管内探索ロボットとしてはワイヤレス化の検討が行われ、光電変換素子を搭載し、供給された光エネルギーを電力に変換して走行するロボット¹⁾や、マイクロ波と光により動力源が外部から供給されるタイプのマイクロロボット²⁾あるいは磁気力を用いた新たな外部駆動法によるマイクロロボット^{3), 4)}の提案がなされている。

一方ケーブル型のロボットに関しても数多くの研究^{5)~7)}がなされてきた。ケーブル型の場合は構造が飛躍的に簡単化される利点を有するが、マイクロロボットのように形状がコンパクトなものはケーブルを引きずる際の摩

擦や自重の問題があり、長距離走行には限りがあるのも事実である。

本研究では配管内検査およびメンテナンス用ロボットの開発を最終目的として、そのための新たな管内走行アクチュエータを提案するものである。本アクチュエータは共振エネルギーを駆動源とし、柔軟材により推進する構造で高推進力発生と高速走行が可能である。よって本アクチュエータをケーブル型として適用しても十分な長距離走行が可能であるとも考えられる。実験においては内径 8mm および 4mm 用の走行モデルを試作し、その推進性能について調べた。これより従来提案されたモデルに比べ、極めて高い走行能力を有することが確かめられたのでここに報告する。

2. 共振駆動型マイクロアクチュエータ

2.1 アクチュエータの構造

Fig. 1(a) は本研究において最初に試作した内径 8mm の管内走行用アクチュエータの構造を示したものである。同一緒元を有する 2 個の永久磁石、並進ばねおよび 1 個の励磁用電磁石により構成される。用いた永久磁石は高さ方向に着磁された円筒型 NdFeB 磁石でその寸法は $\Phi 5 \times 3\text{mm}$ 、表面磁束密度は 380mT である。並進ばねとしては自由長さ 13mm、外形 5mm、ばね定数 $k=2250\text{N/m}$ の圧縮コイルばねを用いた。励磁用電磁石は長さ 24mm、直径 1mm の軟鋼材に直径 0.1mm の銅線を 500 回巻いたものである。これらばねおよび電磁石を外形 5mm、内径 3mm、厚さ 2mm のアルミニウム製中空円板に接着し、さらにばね上に永久磁石を接着した。また推進力をもたらす脚としては、長さ 10mm、幅 2.4mm、厚さ 0.5mm の柔軟な自然ゴム材が $\Phi 1\text{mm}$ のアルミニウム棒を介して永久磁石上に取付けられている。また本アクチュエータの断面と構成材の寸法を Fig. 1(b)に示す。静止時における鉄心と永久磁石との空隙は 2mm である。これより試作したアクチュエータの全長は 40mm、質量は 2.4g (自重 23.52mN) である。なお試作において使用した自然ゴム、永久磁石、圧縮コイルばねの物性をそれぞれ Table1 から Table 3 に示す。

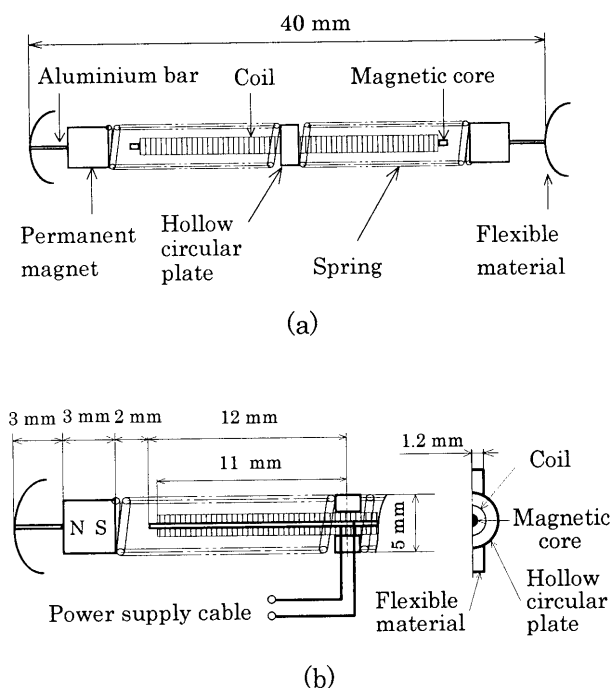


Fig. 1 Microactuator structure (Φ 8 mm).

Table 1 Material properties.

	Density (kg/m ³)	Young's modulus(N/m ²)
Natural Rubber	1248.87	1.026×10 ⁷

Table 2 Magnetic properties.

	Magnetic flux density (mT)	Dimensions (mm)
NdFeB	380	φ 5 × 3

Table 3 Properties of spring.

	Spring constant (N/m)	Allowable Load (N)
SUS304	2250	10.69

2. 2 動作原理

アクチュエータは、磁石、アルミニウム棒、ゴム材の総質量を m 、電磁石と中空円板の総質量を M として近似的に Fig. 2 に示す 3 自由度モデルとして表すことができる。いま各質点一質量の変位座標 X_i ($i=1,2,3$) を Fig. 2(a) のように定めると、各質点の並進運動における運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x}_1 + k(x_1 - x_2) &= 0 \\ M\ddot{x}_2 - k(x_1 - 2x_2 + x_3) &= 0 \\ m\ddot{x}_3 - k(x_2 - x_3) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

と表される。ここに、各質点の運動方程式において左辺第一項は慣性項、第二項は質量一ばね間の練成振動項である。

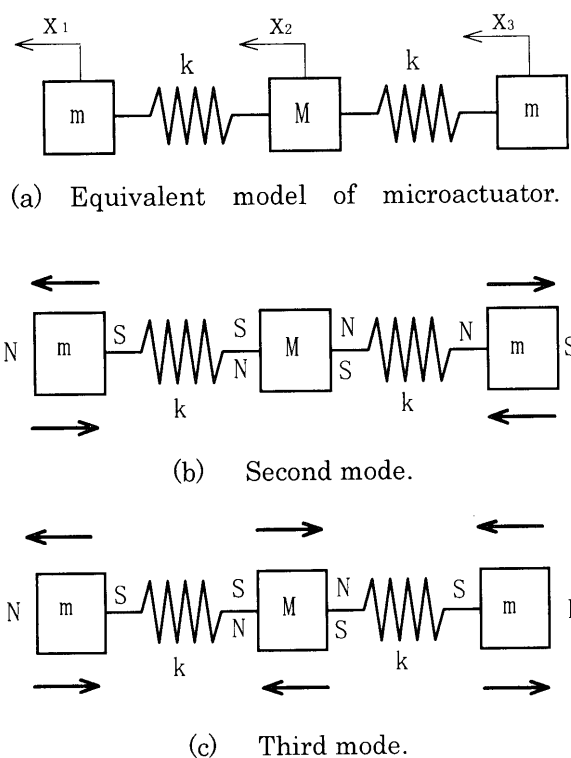


Fig. 2 Three-degree-of-freedom model.

式(1)において、本試作モデルにおける質量 $m=0.485\text{g}$ および $M=0.511\text{g}$ を用いると、本系の理論固有振動数は 1 次振動モードにおいて静止モードすなわち $f_1=0\text{Hz}$ 、2 次および 3 次振動モードにおいて $f_2=342.0\text{Hz}$ および $f_3=582.3\text{Hz}$ となる。2 次モードでは質量 M は静止し、Fig. 2(b) のように M を中心にして m のみが対称運動する。3 次モードでは Fig. 2(c) のように m と M が互いに逆方向に運動する。よって Fig. 2(b), (c) に示すように永久磁石の磁極を配置すると、本アクチュエータは異なる 2 つの振動モードで駆動することができる。

さて Fig. 3 に示すようにアクチュエータを管内に挿入して 2, 3 次モードで振動している場合を考える。なお静止状態におけるゴムと管内壁面との間の角度 $\theta=45^\circ$ である。質量 m が座標 x と同方向に振動している時、 m は Fig. 3(a) に示すように壁面からすべり摩擦による抵抗力を受ける。

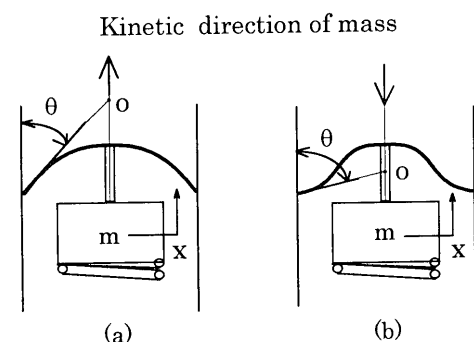


Fig. 3 Principle of movement.

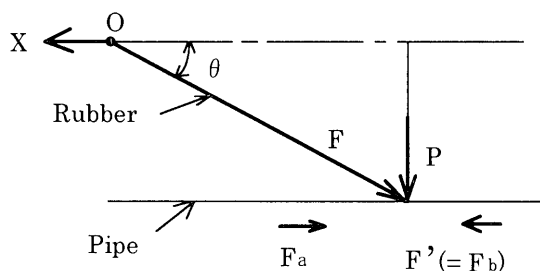


Fig. 4 Frictional force between rubber and pipe.

一方、 m が座標 x と反対方向に振動している時、ゴム先端部は壁面にロックし、自身の柔軟性からゴム材は Fig. 3(b) のように変形することが予想される。

いま Fig. 4 を用いて、ゴムとパイプとの間に作用する力を考える。ゴム材と壁面との間の静摩擦係数を μ 、ゴム材による押付力を P として、Fig. 3, Fig. 4 に示すように点 o を定める。点 o 回りのモーメントのつりあいを考えると、管内壁面に作用する摩擦力は

$$F' = \mu P / (1 + \mu \tan \theta) \quad (2)$$

と表される。いま次の変動摩擦係数 μ' を導入すると式(2) は次のように表される。

$$F' = \mu' P, \quad \mu' = \mu / (1 + \mu \tan \theta) \quad (3)$$

またゴムとパイプとの接点における水平および垂直方向の力のつり合いより

$$\tan \theta = 1/\mu \quad (4)$$

が得られる。式(4)において $\theta \geq \tan^{-1}(1/\mu)$ の範囲では、式(3) の変動摩擦係数 μ' は無限大となり、ゴム先端部はロータにロックしたまま滑ることができずに系の振動エネルギーを壁面に伝達する。アクチュエータの移動に伴い、ゴム先端部の角度 θ が $\tan^{-1}(1/\mu)$ より小さくなるとロックは解除され、すべり摩擦の抵抗を受けながら元の静的状態である $\theta = 45^\circ$ に戻る。アクチュエータの進行方向に作用する摩擦力を $F_b (= F')$ 、進行とは逆方向に作用する摩擦抵抗力を F_a とすると、常に $F_b > F_a$ が成立し、アクチュエータは座標 x 方向に移動することができる。本アクチュエータの推進力はこの摩擦力の差を利用するものである。

3. 実験装置の概略

Fig. 5 は実験装置の概略を示したものである。永久磁石の磁極を Fig. 2 のように配置して作製された 2 次および 3 次振動モード型アクチュエータを内径 8mm のアクリルパイプに挿入し、入力電力とアクチュエータに搭載する負荷を変化させて推進性能を測定する。測定では信号発生器により発生する正弦波をアンプにより増幅して、電磁石に電力

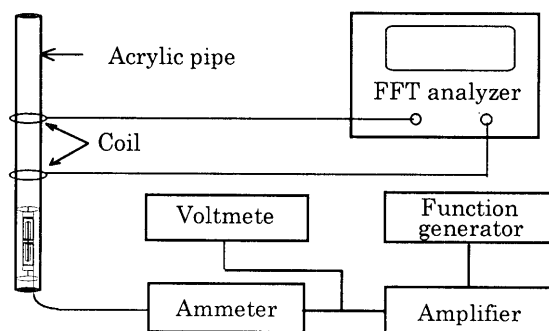


Fig. 5 Experimental apparatus.

を供給し、系を共振させる。その共振振動数は 2 次共振型において 342Hz、3 次共振型において 580Hz であり、それぞれ理論結果とほぼ一致する。またアクチュエータの移動速度は、管の外形に巻かれた 2 つのコイル間の時間差を FFT アナライザにより計測して求めた。

4. 実験結果および考察

本試作アクチュエータは自然ゴム材の圧着効果により、垂直上昇および下降移動が可能ではあるが、本研究では垂直上昇移動のみに限定して考察することにする。Fig. 6 は入力電力とアクチュエータの垂直上昇速度との関係を示したものである。図中○は 2 次、△は 3 次共振駆動した場合の結果である。3 次共振モードを利用した場合、1.71W (電圧実効値 $E = 4.8V$, 電流実効値 $I = 0.375A$, 力率 $\cos \phi = 0.95$) 入力時におけるその上昇速度は 100cm/s である。また 3.1W ($E = 6.6V$, $I = 0.5A$, $\cos \phi = 0.95$) 入力時において、その速度は 142cm/s を記録している。一方 2 次共振型は 3.1W 入力時においてもその速度は約 20cm/s に留まっている。これは駆動振動数が 3 次モードに比べ低いこともあるが、振動モードがより支配的であるためと考えられる。Fig. 7 は 3 次共振駆動型のアルミニウム円板部分に負荷を取付け、これ

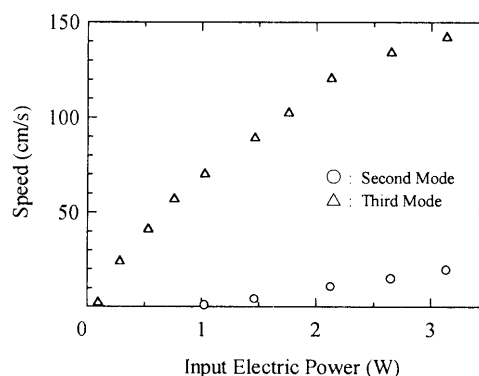


Fig. 6 Relationship between input power and velocity.

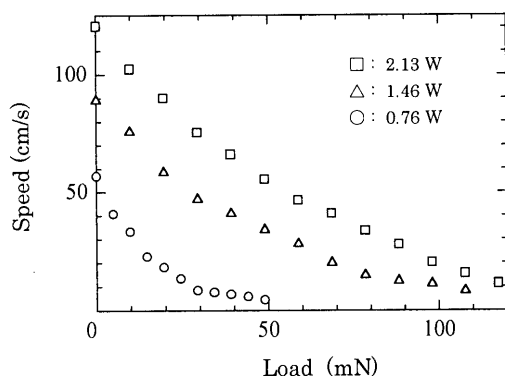


Fig. 7 Relationship between load and velocity.

ら負荷と上昇速度との関係を入力電力をパラメータとして示したものである。入力電力の増加に伴い、推進能力も高まり、2.13W ($E=5.6V$, $I=0.4A$, $\cos\phi=0.95$) 入力時には自重の5倍である 117.6mN の負荷を搭載しても、本試作アクチュエータは 11.25cm/s の速度で上昇していくのが観察された。

5. コンパクト化への検討

3次共振駆動型は優れた推進性能を発揮することから、Fig. 1 に示す構造の更なるコンパクト化を図り、内径 4mm 用の管内走行アクチュエータを作製した。用いた永久磁石は表面磁束密度 300mT の高さ方向に着磁された円筒型 NdFeB 磁石で、その寸法は $\Phi 3 \times 1.5\text{mm}$ である。ばねとしては自由長さ 3.4mm、外形 2.9mm、ばね定数 $k=2080\text{N/m}$ の圧縮コイルばねを用いた。励磁用電磁石は長さ 14mm、直径 1mm の軟鋼材に直径 0.1mm の銅線を 200 回巻いたものであり、推進力をもたらす自然ゴム材の寸法は長さ 5mm、幅 1.2mm、厚さ 0.5mm である。これよりアクチュエータの全長は 26mm、質量は 0.6g (自重 5.88mN) となる。Fig. 8 は入力電力を 0.77W ($E=2.3V$, $I=0.35A$, $\cos\phi=0.95$) に固定し、アクチュエータに搭載した負荷と垂直上昇速度との関係を示したものである。負荷の増加と共に上昇速度は次第に減少していくが、29.4mN 負荷時においても 4.42cm/s の速度で走行可能である。なお本アクチュエータに 1.62W ($E=3.4V$, $I=0.5A$, $\cos\phi=0.95$) 入力した場合、無負荷時の上昇速度は 40cm/s である。また自重の 12 倍である 70.56mN の負荷を搭載しても、2cm/s の速度で垂直上方に引上げる能力を有する。

6. まとめ

共振エネルギーを駆動源とし、柔軟材により推進する管

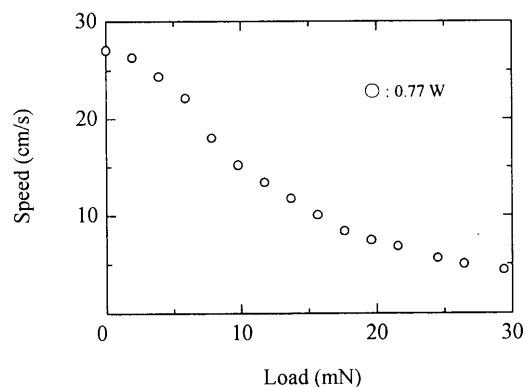


Fig. 8 Relationship between load and velocity.

内走行アクチュエータを提案し、試作モデルについての推進性能を調べた。内径 8mm の管内走行用アクチュエータを 3 次振動モードで駆動した場合、3.1W 入力時の無負荷上昇速度は 142cm/s を示した。また 2.13W 入力時には自重の 5 倍である 117.6mN の負荷を搭載しても、11.25cm/s の速度で上昇していくのが観察された。これらの結果から、本試作アクチュエータはケーブルの重量および摩擦抵抗を考慮しても、最低 30m 程度の走行は可能であると考えている。

さらに構造のコンパクト化を図った内径 4mm 用アクチュエータを試作した。本アクチュエータに電力 0.77W 入力時、自重の 5 倍の負荷を搭載しても 4.42cm/s の速度で垂直上昇することが確認された。また R80mm の曲管内走行も可能であり、十分実用に耐える性能を示していると考えられる。

さらなる形状のコンパクト化あるいは高性能化を図り、往復可能な機構に改良する予定である。

文献

- 1) N.Kawai : *Trans. IEICE Jpn.*, 77, 9 (1994).
- 2) K.Tsuruta, T.Shibata, N.Mitsumoto, T.Sasaya, M.Kawahara : *Trans. IEE Jpn.*, 122, 2(2002).
- 3) M.Sendoh, K.Ishiyama, K.I.Arai : *J.Magn.Soc.Jpn.*, 26, 4 (2002).
- 4) T.Fukuda, H.Hosigai : *Trans.J.Soc.Mec.Eng.*, 52, 477 (1986).
- 5) Y.Kondo, S.Yokota : *Trans.J.Soc.Mec.Eng.*, 64, 617 (1998).
- 6) S.Aoshima, T.Morimitsu, K.Tujimura : *Trans.J.Soc.Mec.Eng.*, 55, 516 (1989).
- 7) S.Yamamoto, K.Satou, K.Kikuchi, T.Matsu : *Trans.J.Soc.Mec.Eng.*, 57, 540 (1991).

2002 年 10 月 4 日受理, 2003 年 1 月 17 日採録