Considerations on Improvement of Moving Properties of Cable-less Magnetic Micro-actuator

H. Yaguchi and H. Suzuki*

Tohoku Gakuin University, 1-13-1 Tagajo, Miyagi, Japan

*Furukawa NDK Corporation, 16-1, Shintakayachi, Sakuranome, Osaki, Miyagi, Japan

This paper proposes a new cable-less magnetic micro-actuator that operates on the inertia force of a one-degree-of-freedom model by using electromagnetic force. It has optimal design for the inclination angle of the one-degree-of-freedom model and an appropriate selection of suction force at the actuator support. The mechanical dc-ac inverter incorporates a cantilever beam and the one-degree-of-freedom model that switches under electromagnetic force. The volume of the prototype cable-less micro-actuator with three dry cells was about 1.5 cm³. Our experimental results revealed that the actuator could move vertically at 18.8 mm/s when the duty ratio of the produced voltage was 46.2%. The operating time for a duty ratio of 26.5% was 36 min, providing a total operating range of 26 m for horizontal travel or 15.5 m for vertical travel. The actuator has many possible applications in small pipe inspections, repairs, and machining because it can move on magnetic substances.

Key words: magnetic micro actuator, cable-less, long-distance movement, optimal design, mechanical dc-ac inverter

ケーブルレス型磁気マイクロアクチュエータの走行特性改善に関する考察

矢口 博之・鈴木 裕之*

東北学院大学工学部, 多賀城市中央 1 丁目 13-1 (〒985-8537)

*古川 NDK 株式会社, 大崎市桜ノ目字新高谷地 16-1 (〒989-6233)

1. はじめに

産業分野においては、人間の手の届かない微小領域や環境の劣悪な状況下での点検や作業、医療分野においては、体内での検査や治療を行うマイクロロボットの出現が望まれている。近年、様々な原理により動作するマイクロロボットに関する研究^{1)~3)}が行われ、原子炉管内を探索するマイクロロボット⁴⁾や、部品の精密測定あるいは微細加工等を行う作業用マイクロロボット^{5), 6)}などが提案されている。筆者も前報⁷⁾において、電源部を含み約 1.5cm³程度の容積で、自走可能なケーブルレス型磁気マイクロアクチュエータを提案し、動作原理および走行特性を明らかにした。本アクチュエータは、搭載された機械式DC-ACインバータにより振動体を共振させ、発生する慣性力を利用して走行するもので、高い推進性能を発揮する。

本研究では、前報⁷⁾で提案したアクチュエータの更なる高出力化および長距離走行化を図ることを目的としている。アクチュエータ走行上における適切なパラメータの選定および振動体の傾き角に関しての最適設計の結果を踏まえて、アクチュエータを試作し、その走行特性を調べた。さらに長距離走行させるために、機械式DC-ACインバータで生成される方形波電圧のDuty比を小さくして、ボタン電池の発生電流をなるべく抑えて走行させる手法を示した。これより前報⁷⁾に比べ、走行速度を低下させることなく、移動距離を約3倍増加させている。

本アクチュエータは、磁性体の走行レールを設定すると、

制御装置を搭載すること無く、任意形状のレールに沿って自在に移動可能であるという特徴を有する。本報告において得られた動作時間および走行距離を考慮すると、管内を走行して検査するマイクロロボットや、磁性体の天井などに貼りついて走行する、観賞用アミューズメントマシンなどへの拡張が考えられる。

2. ケーブルレス型磁気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), (b)に、本研究で試作されたケーブルレス型磁気マイクロアクチュエータの構造を示す。本アクチュエータは、振動体を構成する1個の並進ばねおよび永久磁石、励磁用電磁石、アクチュエータ支持部に接着された永久磁石、先端部に銅電極を有する片持はり、3個のボタン型酸化銀電池により構成される。用いた並進ばねは、自由長さ6mm、

Fig. 1 Structure of micro-actuator.

Table 1 Properties of spring.

Material	Spring constant (N/m)	Diameter of wire (mm)
SUS304	880	0.5

Table 2 Magnetic properties.

Material	Magnetic flux density (mT)	Dimensions (mm)
NdFeB	380	φ5 × 3

Table 3 Properties of electromagnet.

Material of yoke	Number of turns	Electric resistance (Ω)
Mild steel	1000	47

外径 5mm のステンレス鋼製圧縮コイルばねである。永久磁石としては円柱形で、厚さ方向に着磁された NdFeB 磁石を用いた。励磁用電磁石は長さ 5.2mm、直径 1.5mm の軟鋼材に直径 0.07mm の銅線を巻いて作製した。圧縮コイルばね、永久磁石、電磁石の緒元をそれぞれ Table 1 から Table 3 に示す。また永久磁石は、外径 5.5mm、内径 5mm、厚さ 3mm の鋼製円筒材で磁気的にシールドされ、電池への吸引力を低減している。この電磁石をばね-永久磁石により構成される 1 自由度振動モデル内に挿入した。永久磁石と電磁石の鉄心との空隙は 1.2mm である。振動体は、アクチュエータ支持部の水平面から角度 $\alpha = 47^\circ$ で傾けて固定してある。また支持部には直径 6mm、厚さ 0.6mm で、厚さ方向に着磁された、表面磁束密度 150mT の SmCo₅ 磁石が接着されている。用いた片持はり材はアクリル製で、はり先端部に接着された銅電極と、永久磁石上に取付けられた銅電極との間には初期接触力が加えられている。なお、アクリルはり支持部のフレームを折り曲げることにより、両振動体間の初期接触力を可変することができる。

2.2 アクチュエータの推進速度および数値計算例

Fig.2(a)に示す振動体は、圧縮コイルばねのばね定数を k 、ばね材の粘性減衰係数を C 、永久磁石の質量を m として、Fig.2(b)に示す 1 自由度振動モデルに置換えることができる。電磁石により質量 m が強制調和加振力 $R \sin \omega t$ を受

(a) Vibration body (b) Equivalent model

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

けると、モデルの運動方程式は次のように表される。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + kx = R \sin \omega t \quad (1)$$

式(1)の解は、 A を変位振幅、 θ を位相とすると次式となる。

$$\left. \begin{aligned} x &= A \sin(\omega t - \theta), \quad p = \sqrt{k/m}, \quad \theta = \frac{2\zeta(\omega/p)}{p^2 - \omega^2} \\ A &= \frac{R/k}{\sqrt{(1 - \omega^2/p^2)^2 + (2\zeta\omega/p^2)^2}}, \quad \zeta = \frac{C}{2mp} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

本アクチュエータを磁性体上に置くと、支持部永久磁石によりアクチュエータの支持台は吸引力 F を受ける。質量 m が変位 x で調和振動するとき、アクチュエータの支持台に作用する力振幅 F_m およびその実効値 F_l は

$$\left. \begin{aligned} kx + C \frac{dx}{dt} &= -m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_m \sin(\omega t - \theta + \phi) \\ F_m &= A \sqrt{k^2 + (C\omega)^2}, \quad \tan \phi = c\omega/k, \quad F_l = F_m / \sqrt{2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Fig.2 に示すように、 P を牽引力、 α を振動体と走行レールとのなす角度、 β をアクチュエータ走行時におけるレールと水平面との角度、 W をアクチュエータの自重、 μ をアクチュエータのフレームと支持台との間の動摩擦係数とする。1 自由度振動体を傾かせた方向、すなわち前方方向へアクチュエータがすべりはじめるときの、水平方向の力のつりあいより次式が得られる。

$$F_l \cos \alpha = \mu(F - F_l \sin \alpha + W \cos \beta) + W \sin \beta + P \quad (4)$$

一方、後方方向へすべりはじめるときの力のつりあいより次式が得られる。

$$F_l \cos \alpha = \mu(F + F_l \sin \alpha + W \cos \beta) - W \sin \beta - P \quad (5)$$

いま 1 自由度振動体において発生する弾性エネルギーの実効値を U とし、式(4)、(5)より 1 自由度振動体が 1 サイクル間に移動する変位を求める。振動体が座標 x 方向に振動し、支持台に作用する引張力により生じる変位を前方推進変位 δ_f 、振動体が座標 x とは逆方向に振動し、支持台に作用する圧縮力により生じる変位を後方推進変位 δ_b とすると、これらは次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \delta_f &= \frac{(\bar{U}) \cos \alpha}{\mu(1 - \bar{F}_l \sin \alpha + \bar{W} \cos \beta) + \bar{W} \sin \beta + \bar{P}} \\ \delta_b &= \frac{(\bar{U}) \cos \alpha}{\mu(1 + \bar{F}_l \sin \alpha + \bar{W} \cos \beta) - \bar{W} \sin \beta - \bar{P}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\bar{F}_l = \frac{F_l}{F}, \quad \bar{P} = \frac{P}{F}, \quad \bar{U} = \frac{U}{F}, \quad \bar{W} = \frac{W}{F}, \quad U = \left(\frac{1}{2} k A^2 \right) / \sqrt{2}$$

アクチュエータにおける、真の前方推進変位 δ は

$$\delta = (\delta_f - \delta_b) \quad (7)$$

となる。式(7)で算出された変位 δ に、アクチュエータの駆動振動数をかけると、1 秒当たりの移動変位すなわち速度を求めることができる。またアクチュエータに作用させる

牽引力を無視し、水平面上を走行させる場合、振動体の最適角度 α_{opt} は、 $d\delta/d\alpha=0$ として次式から算出される。

$$\alpha_{opt} = \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{1 + 2\bar{W} + \bar{W}^2}{2(1 + 2\bar{W} + \bar{W}^2) - \bar{F}_1^2}} \right) \quad (8)$$

さて数値計算例について考える。Fig.3 は動摩擦係数 $\mu = 0.2$ 、振動体の傾き角度 $\alpha = 60^\circ$ 、 $\bar{U} = 0.1 \text{ mm}$ に取り、 $\bar{W} = 0$ および $\beta = 0$ 、すなわちアクチュエータの自重を0として水平面を走行させた場合、無次元負荷荷重 $\bar{P}$ とアクチ

Fig. 3 Relationship between $\bar{P}$ and displacement per cycle.

Fig. 4 Relationship between angle and displacement per cycle.

Fig. 5 Relationship between $\bar{F}_1$ and optimal angle.

ュエータ 1 サイクル当りの移動変位 δ との関係を、力比 $\bar{F}_1$ をパラメータとして示したものである。 $\bar{F}_1$ が大、すなわち振動体で発生する力 F_I が大、あるいは支持部吸引力 F を小とする程、走行速度は大となる。図より $\bar{F}_1$ の値は、アクチュエータの走行特性におよぼす影響が極めて大きいことから、アクチュエータを設計する上で、吸引力 F の選定は最も重要なものの一つと考えられる。Fig.4 は $\mu = 0.2$ 、 $\beta = 0$ 、 $\bar{W} = 0$ 、 $\bar{P} = 0$ 、 $\bar{U} = 0.1 \text{ mm}$ に取り、 α と δ との関係を、各種の $\bar{F}_1$ に対して示したものである。図より各 $\bar{F}_1$ に対して、アクチュエータの走行速度を極大にする最適な振動体の傾き角度 α_{opt} が存在するのが分かる。Fig.5 は $\mu = 0.2$ 、 $\beta = 0$ 、 $\bar{P} = 0$ 、 $\bar{U} = 0.1 \text{ mm}$ に取り、 $\bar{F}_1$ と α_{opt} との関係を、各 $\bar{W}$ について示したものである。 α_{opt} は $\bar{F}_1$ が増加するに従い大となる。またFig.4 およびFig.5 の結果より、 $\bar{W}$ および $\bar{F}_1$ の各種パラメータを変化させても、振動体の最適傾き角 α_{opt} は、ほぼ $45^\circ \sim 60^\circ$ の範囲内にあることが分かる。

2.3 1 自由度振動体の走行特性

ケーブルレス型アクチュエータ試作の前に、1 自由度振動体の走行特性を、Fig.6 に示すように発信器およびアンプを用い、外部よりケーブル駆動して測定した。1 自由度振動体は、Fig.1 に示す振動体と同じ緒元で、永久磁石部のシールド材が無い構造である。また振動体の傾き角 $\alpha = 60^\circ$ とし、共振振動数 $f = 180 \text{ Hz}$ 、モデルの質量は 1.2 g である。この振動体を Fig.6 に示すように、幅 8 mm 、厚さ 10 mm

Fig. 6 Experimental apparatus.

Fig. 7 Relationship between pulling force and speed ($F = 0.377 \text{ N}$, $\beta = 0$).

のまっすぐな軟鋼材レール上に設置し、振動体支持部の吸引力 F 、振動体支持台に作用する力 F_1 、アクチュエータに牽引させる荷重 P を変化させ、その走行速度を測定した。支持台とアクリル材との間の動摩擦係数 $\mu = 0.23$ である。Fig.7は、 $F = 0.377\text{N}$ に取り、 F_1 をパラメータとして、負荷荷重と水平面上での走行速度との関係を示したものである。支持台に作用する力振幅の実効値 F_1 については、レーザ変位計とFFTアナライザを用いて、走行中の振動体永久磁石の振動振幅 A を計測し、ばね材の減衰の影響は小として無視し、 $F_1 = kA/\sqrt{2}$ より算出している。また自重の影響を考慮し、式(7)より算出された理論的な移動速度を実線で示す。計算値と実験値は、概ね一致しているのが分かる。

3. ケーブルレス型マイクロアクチュエータの走行特性

本マイクロアクチュエータに搭載する電源はボタン電池などの直流電源であるため、これを交流電源に変換する必要がある。前報⁷⁾において、2つの振動体の接触動作を利用した機械式DC-ACインバータを提案し、その動作振動数帯域および両振動体間の初期接触力による生成交流電圧の変化について考察した。本報告においても、前報において得られた結果を踏まえ、Fig.1に示すように、1自由度振動体と振動体上部に取付けられた銅電極および先端部に銅電極を有する片持りによりDC-ACインバータを構成し、ケーブルレス型アクチュエータを試作した。用いたのはアクリル製で、寸法は長さ9mm、幅3mm、厚さ0.1mmである。さらに片持り先端部には、長さ2mm、幅3mm、厚さ0.2mmの銅製電極が取付けられており、系の固有振動数は95Hzである。これらアクリルはりの寸法をFig.8に示す。アクチュエータを駆動する電池としては、マクセル社製SR920Wボタン型酸化銀電池を3個用いた。その緒元は、外形9.5mm、厚さ2.05mm、質量0.6g、公称電圧1.55V、電池容量39mAhであり、これらの電池は電池ボックスに取付けられている。これよりアクチュエータの寸法は、全長12mm、全高12mm、全幅10.5mmで、総容積は1.5cm³、総質量は3gとなる。

さて先の数値計算例にも示したように、アクチュエータ

Fig. 8 Dimensions of cantilever beam.

の走行特性は、支持部吸引力 F によって大きく左右される。本報告では、自重が大きくても垂直上昇走行が可能で、かつ水平面上においても適度な速度で走行が可能であると想定して $F = 0.85\text{N}$ に、振動体の傾き角度は $\alpha = 47^\circ$ に、アクチュエータと磁性体面との動摩擦係数 $\mu = 0.3$ に設定した。なお自重の影響を考慮して $\bar{W} = 0.035$ 、 $\mu = 0.3$ とし、 $\bar{F}_1 = 0.35$ と仮定して水平面上を走行させる場合、理論的な振動体の最適傾き角度 $\alpha_{opt} \approx 47^\circ$ となる。

試作したアクチュエータにおいて、はり支持部のフレームを折り曲げて、両振動体間の初期接触力を変化させ、走行速度を測定する。測定では試作されたアクチュエータを幅8mm、厚さ10mmのまっすぐな軟鋼レール上に置き、コイルを用いて、1自由度振動体の固有振動数 $f = 135\text{Hz}$ に同調した調和加振力を加えて振動体を起動し、アクチュエータを走行させた。Fig.9は両振動体間の初期接触力 T 、すなわち生成方形波電圧のDuty比を変化させた場合の、レールの傾き角度 β と移動速度との関係を示したものである。また初期接触力を変化させて測定した、生成方形波電

Fig. 9 Relationship between angle of rail and speed ($\alpha = 47^\circ$).

Fig. 10 Displacement of m-k model and produced voltage.

Table 4 Duration and distance of motion.

Duty ratio (%)	Motion time (min)	Horizontal (m)	Vertical (m)
26.5	36	25.9	15.5
32	20	18.5	14.4
46.2	11	15.9	12.4

圧と振動体永久磁石部の振動変位を Fig.10 に示す。Fig.9 においてDuty比が大のほど、走行速度は増加し、Duty比が 46.2%の場合、その水平移動速度は 24.1mm/s、垂直上昇速度は 18.8mm/sであり、かなりの高速走行が可能となる。前報⁷⁾において、 $\alpha = 50^\circ$ 、生成方形波電圧のDuty比を約 50%、 $F = 0.65\text{N}$ とした場合、ボタン電池 2 個搭載したモデルの結果を、●印を用いて示す。Table4 は、生成方形波電圧の各Duty比における連続動作時間を示したものである。生成方形波電圧のDuty比が減少するに従い、連続動作時間は急激に増大するのが分かる。Duty比が 26.5%の場合、その動作時間は約 36 分である。水平移動速度が 11.97mm/s、垂直上昇速度が 7.17mm/sであるため、水平方向には 25.9m、垂直方向には 15.5m移動可能となる。これは前報⁷⁾に比べ、連続動作時間を約 2.3 倍、走行距離を約 3 倍増加させたことになる。なお測定された振動変位を用いて $\bar{F}_1 = 0.35$ とし、式(7)より算出された理論的な走行速度は、Duty比が 26.5%の場合、水平方向において 13.6mm/s、垂直方向において 7.8mm/sとなる。

4. まとめ

機械式 DC-AC インバータを有するケーブルレス型磁気マイクロアクチュエータを試作し、生成方形波電圧の Duty 比を変化させ、その走行特性を調べた。

数値計算の結果より、アクチュエータを設計する上において、吸引力 F の選定は最も重要な項目の一つであること

を示し、ケーブル型アクチュエータの走行実験により数値解の妥当性を検証した。適切な吸引力の選定を行い、試作されたアクチュエータにおいて、Duty 比が 46.2%の場合、水平移動速度は 24.1mm/s、垂直上昇速度は 18.8mm/s で、かなりの高速走行が可能であることを示した。一方、長距離走行させるために、発生電圧のDuty比を小さくしてボタン電池の発生電流をなるべく抑え、比較的低速度にて走行させる手法を示した。Duty比を 26.5%に選定すると、連続動作時間は約 36 分で、水平移動速度は 11.97mm/s、垂直上昇速度は 7.17mm/sである。これより水平方向には約 26m、垂直方向には 15.5m走行可能となる。前報⁷⁾で得られた類似の実験結果に比べ、速度を低下させることなく連続動作時間を約 2.3 倍、走行距離を約 3 倍増加させることを示した。以上の結果より、本アクチュエータは、磁性体のレールを設置すると、垂直面および天井面の移動が可能であるため、工学分野のみならず磁性体の天井や垂直面に貼りついて、ゆっくり走行する観賞用アミューズメントマシンなどへの拡張も考えられる。

References

- 1) T.Fukuda, N.Mitsumoto, F.Arai, H.Matsuura : *Trans.J.Soc.Mec.Eng.*, **56**, 562 (1993).
- 2) K.Yamamoto, H.Otaki, Y.Ishikawa : *Trans.J.Soc.Mec. Eng.*, **57**, 538 (1991).
- 3) T.Higuchi, Y.Yamagata : *J.Jpn.Soc.Prec.Eng.*, **58**, 10 (1992).
- 4) K.Tsuruta, T.Shibata, N.Mitsumoto, T.Sasaya, M.Kawahara : *Trans. IEE Jpn.*, **122**, 2 (2002).
- 5) M.Suzuki, Y.Yamada, N.Tsuchida, K.Imai : *J.Jpn.Soc.Prec.Eng.*, **60**, 1 (1994).
- 6) H.Aoyama, H.Kato : *J.Jpn.Soc.Prec.Eng.*, **64**, 12 (1998).
- 7) H. Yaguch: *Trans. Magn. Soc. Jpn.*, **30**, 2 (2006).

2006 年 10 月 21 日受理, 2007 年 1 月 23 日採録