

令和 3 年 10 月 21 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18001

研究課題名(和文)変位拡大機構一体型電磁アクチュエータの特性解析と制御システムの実現に関する研究

研究課題名(英文) Study on Analysis of Displacement-amplified Electromagnetic Actuator and Its Control System

研究代表者

難波江 裕之(Nabae, Hiroyuki)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：90757171

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：変位拡大機構一体型電磁アクチュエータに関して、単純なフルストロークでの駆動時間に注目し、変位拡大率による影響を解析し、試験装置による実証を行った。また、単純な質量だけでなく、弾性や粘性の影響についても検討を行った。さらには、制御システムを含むアプリケーションの例としてインチワームについての検討を行い、アクチュエータがギャップを有することによりせん断変形を許容することを考慮し、波状のレールでの実験を行い有用性を示した。以上により、変位拡大機構一体型電磁アクチュエータにおいて、駆動時間から見た特性を明らかにするとともに、制御システム及びアプリケーションにおける可能性を示すことができたものとする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本アクチュエータの応用先は、一般に広く普及している製品の製造やこれからの発展が期待される技術に関わるものであり、このようなフィールドにおいて、従来の周辺機器や構造に対して容易に代用可能な優れたアクチュエータの出現は、世の中に、広くインパクトを与える大きなイノベーションをもたらすことが期待できる。また、“電磁吸引力+変位拡大”という系の物理特性の解明は、機械力学や物理学といった基礎科学的見地からも有用な知見であるとする。

研究成果の概要(英文)：A displacement-amplified electromagnetic actuator was studied by focusing on actuation time for a simply full-stroke drive. The attempt revealed that the amplification contributes to a decrease in the actuation time of actuators using electromagnetic attractive force in some cases. Moreover, an inchworm mechanism using displacement-amplified electromagnetic actuators was studied as an application of displacement-amplified electromagnetic actuators including a control system. An experiment was conducted to show the applicability of this prototype to a rail that waves at the micrometer scale because the actuator allows shear deformation owing to the air gap. The experimental results implied that the flexibility of the actuator is useful for the motion of inchworm mechanisms on waving rails.

研究分野：アクチュエータ，メカトロニクス，ロボティクス

キーワード：アクチュエータ 電磁力 変位拡大 駆動時間

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、電子情報機器の普及が進むとともに、それらのデバイスの小型化・集積化の要望及びその技術が著しい発展を遂げている。小型化・集積化の技術発展により、これらのデバイスの使用用途及び使用される場は、ますます増えてきており、今後、より一層の発展が期待される。このような小型の電子情報機器の幅広い普及には、製造技術の進歩が欠かせないものとなっており、これからの更なる発展のキーポイントとなることと思われる。これらの製造過程における重要な要素として、電子部品の検査や組み立て等の作業において、サブミリメートル程度のストロークでの高速運動を行うアクチュエータが必要となることが多い。また、このようなアクチュエータを必要とする場合は非常に多く、電子機器の製造工程以外にも工業用編機選針装置やディーゼルエンジンのインジェクタ、さらには動的加振測定装置や触感デバイスといった用途にも使用される。

サブミリメートルストロークの高速駆動可能なアクチュエータとしては、そのエネルギー密度の高さから圧電素子や磁歪素子といった固体変位素子が注目を集めている。特に圧電素子を用いたアクチュエータは圧電素子の持つ高速応答性・高発生応力といった特徴を利用し、研究が盛んに行われてきている。しかしながら圧電素子には、高湿度・高電界下における銀イオンによるマイグレーションや脆性による衝撃への弱さといった課題が残されている。また、現在主流となっている電磁アクチュエータと比較して、電源等の周辺機器の整備が不十分なものとなっており、このことも圧電素子をはじめとした固体変位素子を用いたアクチュエータの普及が進まない要因の一つとなっている。

一方、電磁アクチュエータは一般的に、出力や動作範囲、制御性などの点で利点が多いものの、固体素子等と比較すると長ストロークを確保しやすい半面、出力が低くなる傾向がある。例えば、ソレノイドアクチュエータなどの電磁アクチュエータでは、磁場の発生部分とそれが作用する部分との間のギャップを広げることによってストロークを確保しており、電磁吸引力はギャップの増加に対して急激に減少するため、長ストロークにすると推力が大幅に下がってしまう。このことは、逆にいえば、ギャップが微小な際には、大きな電磁吸引力を発生することが可能であり、この微小ギャップにおける強力な吸引力を長ストロークでの動作において利用することによって、より効率的・機能的なアクチュエーションを実現できる可能性があるということを示唆している。そこで、微小な動作を大きな動作に変換する手法である変位拡大機構と電磁吸引力を組み合わせることで、微小ギャップでの高い電磁吸引力を長ストロークにて利用することにより、高効率・高速でのサブミリメートルオーダーの直動動作が可能な電磁アクチュエータ（以下変位拡大機構一体型アクチュエータ）の提案及び開発を行ってきた。

2. 研究の目的

変位拡大機構一体型電磁アクチュエータに関しては、その動作原理の検証及びサブミリメートルストロークでの高速往復運動での有用性の実証に成功しているものの、動的解析を元としたパラメータの最適化などの設計手法などの制御システムの確立は十分には行われていない状況である。そのため、未知の部分が多いその特性を解明し、設計や制御手法の確立を行うことで、そのポテンシャルを十分に発揮させる環境を整える必要がある。そこで、本研究では、理論解析及び数値シミュレーションにより電磁吸引力と変位拡大機構を組み合わせた系の解析を行いその特性を調べる。そして、その結果を実験的に検証することにより実証試験を行う。また、アプリケーションに関しても取り組み、実際の仕様に関した課題についても取り扱う。

3. 研究の方法

まず、単純な質量のみの負荷について、その特性を調べる。本研究では変位拡大後のフルストロークを一定とした際にそのフルストロークを移動するのに要する駆動時間を調べることで、特性を評価した。変位拡大率と拡大前のギャップの積が一定となるように保つことでフルストロークを一定とし、その際に変異拡大率と拡大前のギャップ長の割合の変化が駆動時間にどのような変化をもたらすかを簡易モデル及びそれをもとにしたシミュレーションによって検証した。またその結果を実験的に検証するため、試験装置を試作し、解析結果との比較検討を行った。次に、弾性による影響を検証した。まず弾性を考慮したモデルを構築し、シミュレーションによって検証を行った。また、シミュレーション結果を実験的に検証するため、試験装置を試作し、その実験的検証を行った。アプリケーション、制御システムに関してはインチワーム型移動機構を題材としてその検証を行った。

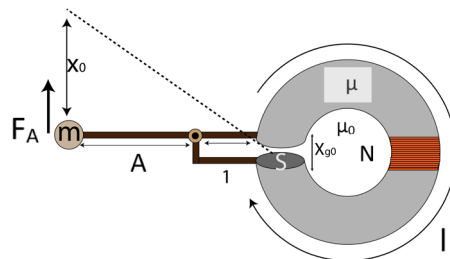


Fig. 1 Schematic figure of proposed principle

4. 研究成果

Fig. 1 に示すような透磁率 μ , 断面積 S , 磁路長 l のヨーク部分と長さ a のエアギャップからなる系 (真空の透磁率 μ_0) において, ヨーク部に N 巻きのコイルを設け, 電流 I を印加することにより磁束を発生させた際のギャップの端面間に働く電磁吸引力を直接利用した場合の推力 F 及びギャップの変位 xg を A 倍に拡大して利用した場合の推力 F_A を考える. なお, ヨーク部分が磁路長を変えずに変形することにより, エアギャップの長さ xg は可変となっており, このギャップ長の変化を利用するものとする. F, F_A は

$$F = \frac{\alpha I^2}{(x+x_\alpha)^2}, \quad F_A = \frac{\alpha A I^2}{(x+Ax_\alpha)^2}$$

と表される. 但し,

$$\alpha = \frac{N^2 \mu_0 S}{2}, \quad x_\alpha = \frac{\mu_0 l}{\mu}$$

である. この推力によるポテンシャルエネルギー U_A は

$$U_A = - \int_{\infty}^x \frac{-\alpha A I^2}{(x+A\bar{x})^2} dx = \frac{-q}{x+p}$$

となる. 但し,

$$p = A\bar{x}$$

$$q = \alpha A I^2$$

である. このとき, 初期位置と位置 x との間のポテンシャルエネルギーの差は

$$\Delta U_A = \frac{q}{x+p} - \frac{q}{x_0+p}$$

と表せられるため, 運動エネルギーを考慮すると初期位置から駆動した際の位置 x での速度との関係は

$$\frac{m\dot{x}}{2} = \frac{q}{x+p} - \frac{q}{x_0+p}$$

$$x+p = \frac{q}{m(\dot{x}^2 + Y^2)}$$

となる. 但し,

$$Y^2 = \frac{2q}{m(x_0+p)}$$

である. このことより, フルストロークでの速度は

$$\dot{x}_f = -\sqrt{\frac{2q}{mp} - Y^2}$$

と表せられる. また運動量の関係より

$$F_A dt = m d\dot{x}$$

$$dt = \frac{m d\dot{x}}{F_A}$$

となるため, 以下の式で駆動に要する時間を求めることができる.

$$T = m \int_0^{\dot{x}_f} -\frac{x+p}{q} d\dot{x}$$

これを整理すると次の式が得られる.

$$T = \frac{x_0 + A\bar{x}}{I} \sqrt{\frac{m}{2\alpha}} \left\{ \sqrt{\frac{\bar{x}x_0}{x_0 + A\bar{x}}} + \sqrt{\frac{x_0 + A\bar{x}}{A}} \tan^{-1} \left(\frac{x_0}{A\bar{x}} \right) \right\}$$

この式は A に関して下に凸の関数であり、変位拡大率の最適化により、駆動時間の最小化が可能なことを示している。

次に実験的に変位拡大率と駆動時間の関係を調べた。Fig. 2 に本実験で用いた実験システムの模式図と写真を示す。

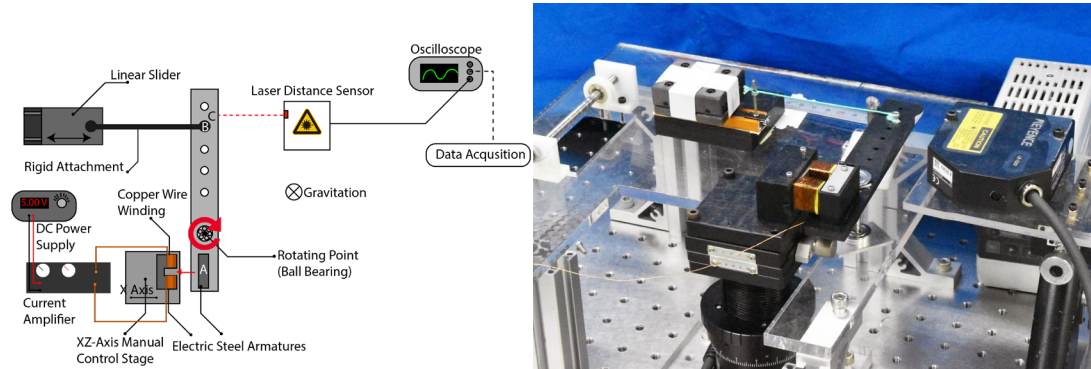


Fig. 2 The schematic layout of the experimental setup [5]

本実験システムは、主に電磁吸引力を発生させるコア（新日鉄製 50H270 を 20 枚積層、コイルは 2 箇所合計で 200 巻）と変位を拡大するためのポリアセタール製のレバー部、錘を載せたスライダ（THK 製）、また、変位測定のためのレーザ変位計（LKG32, Keyence 製）から成り、錘とレバーの間は高剛性化学繊維によって繋がれている。レバー部は駆動時の変形量が駆動距離に対して、また、その回転モーメントが錘に対して十分小さくなるよう設計されている。コイルへの電流はバイポーラ電源（BWS 120-2.5, 高砂製作所製）を電流制御モードとし、外部から電圧指令を与えることで印加し、電流プローブ（TCPA300, Tektronix）により測定した。拡大率および電磁吸引力発生部のギャップ間距離は適宜調整可能となっており、錘の移動距離が 0.39 mm の一定値となるようにし、電流のステップ幅 1.5 A 及び 2.0 A にて測定を行った。また、動作時間に関しては、電圧指令の立ち上がり時及び電流波形の立ち上がり時から規定のストロークへの到達時の時間の 2 通りを採用した。

3.2 実験結果

実験結果を Fig. 3 に示す。

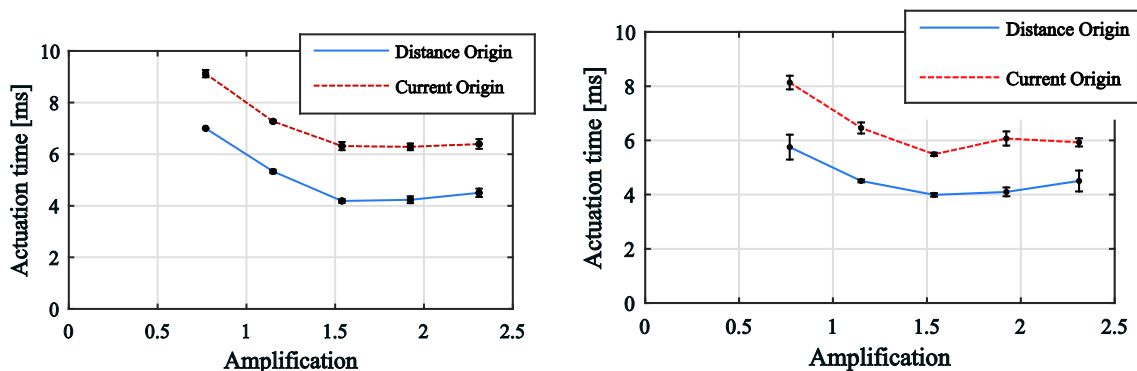


Fig. 3 Actuation time vs Amplification ratio [7]

Fig. 3 の結果から、各電流のステップ幅において、どちらの到達時間の定義においても変位拡大により、1.5 倍程度の拡大率まで動作時間の減少効果が確認された。しかしながら、それ以上の拡大率では、動作時間は増加に転じる結果となった。このことは、最適な拡大率の存在を示唆しているものと思われる。

次に、駆動時間への弾性要素の影響を調べるために、シミュレーションによる検討を行った。Fig. 4 が解析対象のモデルである。Fig. 5 にシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果から、バネ係数が高くなるほど駆動時間が長くなるとともに、駆動可能な拡大率の範囲が存在しその範囲が狭まっていくことがわかる。また、最適値周辺の変化量が大きくなっていくこともわかる。但し、バネによる戻り時間と電磁力による行きの駆動時間が同程度になるばね定数の範囲では、駆動時間の変化はごくわずかであり、

グラフ形状もほぼ変わらず，変位拡大率の設計に関しては，あまり考慮する必要がないと思われる。

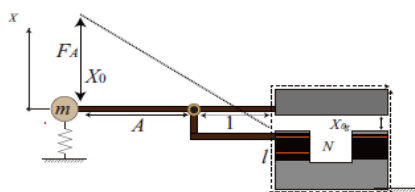


Fig. 4 Analytical model considering the spring effect. The spring is set to the mass load after the displacement amplification so that the spring effect on the mass is independent of changes in the amplification ratio. This is because backward motion driving only the spring can be easily designed. [3]

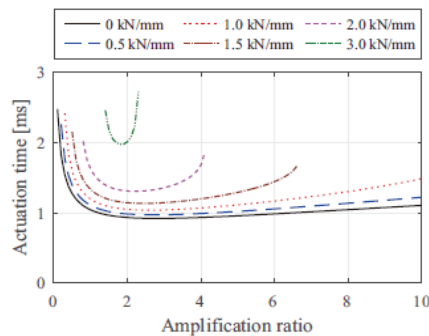


Fig. 5 Relationship between the amplification ratio and the actuation time with various spring constants. The spring constants are 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, and 3.0 kN/mm. [3]

さらにこのシミュレーション結果に対して実験を行った。実験装置は Fig. 2 を改良することによって用いた。実験結果及びシミュレーションとの比較を Fig. 6 に示す。

実験による検証においても，実用的なばね定数の範囲では，おおよそ同様の動作時間を示すことが確認された。変位拡大率の設計に関しては，あまり考慮する必要がないという仮設が実験からも支持されることとなった。

続いて，制御システムを含むアプリケーションの例としてインチワームについての検討を行った。本アクチュエータはインチワームに頻繁に用いられる圧電アクチュエータと比較して，

Fig. 7 の左図に示すとおり，ギャップの存在により，せん断方向への変形が容易になっている。そのため，カーブを伴うレール上での駆動に優位であると考えられる。尚，せん断方向のコンプライアンスの設計には Fig. 6 の右図の簡易モデルを用いた。

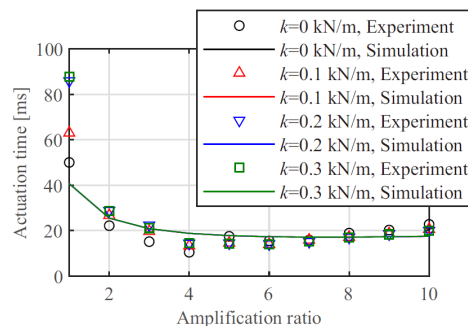


Fig. 6 Comparison of simulation and experimental results of actuation time according to amplification ratio and spring constant [1]

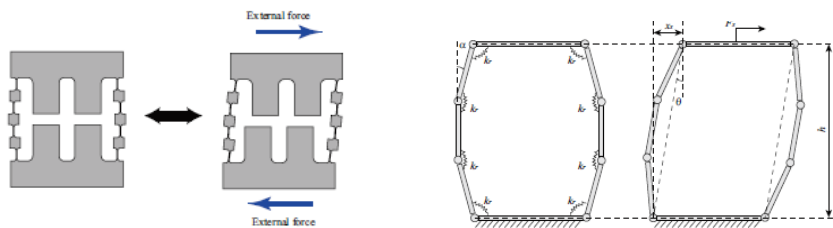


Fig. 7 Analytical model considering the spring effect. The spring is set to the mass load after the displacement amplification so that the spring effect on the mass is independent of changes in the amplification ratio. This is because backward motion driving only the spring can be easily designed. [2]

Fig. 8 の左図が試作したインチワームである。本試作機を用いて基準レール (Wide rail) に対して， $50 \mu\text{m}$ 狭いレールと $50 \mu\text{m}$ の振幅の波上の形状をしたレールでの動作の様子を比較した。幅の変化では動作に大きな影響を受けたものの波上のレール形状についてはその影響はほとんど見られず，有用な特性を有することを実証した。

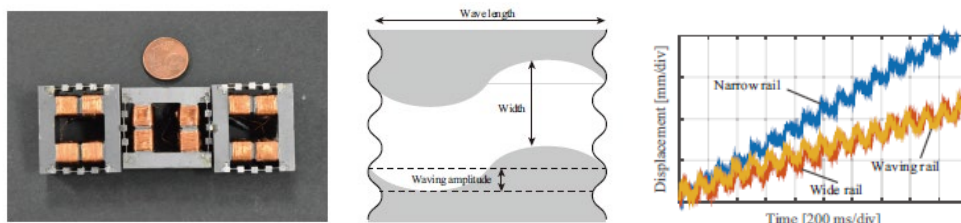


Fig. 8 Prototype of an inchworm mechanism using displacement-amplified electromagnetic actuators, schematic figure of the waving rail, and experimental results [2]

以上により、変位拡大機構一体型電磁アクチュエータにおいて、駆動時間から見た特性を明らかにするとともに、制御システム及びアプリケーションにおける可能性を示すことができたものとする。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- [1] Hiroyuki Nabae, Malte Springer, Tugay Alperen Karagüzel. Displacement amplification enhances rapid actuation of electromagnetic actuators: Drive with load of spring-mass-damper system, *Sensors and Actuators A: Physical*, May 2021. (査読あり)
- [2] Hiroyuki Nabae. Preliminary study on inchworm mechanism using displacement-amplified electromagnetic actuators, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 59, No. 2, pp. 505-511, Mar. 2019. (査読あり)

[学会発表] (計 5 件)

- [3] Hiroyuki Nabae. Simulation Approach to Effect of Elasticity on Actuation Time of Displacement-amplified Electromagnetic Actuator, *The 18th International Conference on Mechatronics, Proceedings of the 2018 18th International Conference on Mechatronics*, Dec. 2018. (査読あり)
- [4] Hiroyuki Nabae. Preliminary Study on Inchworm Mechanism Using Displacement-Amplified Electromagnetic Actuators, *the 2017 International Symposium on Electromagnetics and Mechanics*, Sep. 2017. (査読あり)
- [5] Hiroyuki Nabae, A. Tugay Karaguzel, Gen Endo, Koichi Suzumori. Analytical and Experimental Study on Actuation Time of Displacement Amplified Electromagnetic Actuator, *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Proc. IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 963-968, Aug. 2017. (査読あり)
- [6] Gerald Eaglin, Joshua Vaughan, Hiroyuki Nabae. Reduction of Residual Vibration in Displacement-Amplified Micro-Electromagnetic Actuators with Non-linear Dynamics Using Input Shaping, *The 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2018)*, Jul. 2018. (査読あり)
- [7] 難波江 裕之, A. Tugay Karaguzel, 遠藤 玄, 鈴森 康一. 電磁吸引力を用いたアクチュエータにおける変位拡大率と動作時間の関係の実験的検証, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 in Fukushima, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 講演論文集*, May. 2017. (査読なし)

[その他]

ホームページ等

<http://www.robotics.mech.e.titech.ac.jp/home.html>

6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。