

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13853

研究課題名(和文) 小型化・高推力化に適した高性能熱磁気サーボアクチュエータの基礎研究

研究課題名(英文) Basic research on high performance thermomagnetic servo actuator suitable for downsizing and high thrust

研究代表者

佐藤 海二 (Sato, Kaiji)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00215766

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、小型化、高推力化に適したアクチュエータの研究として、次のことを行った。(1)感温磁性体と永久磁石、ペルチェ素子を用いたコイルを用いない小型高推力アクチュエータを提案し、その基本特性を調べ、大きな一定推力を低消費電力で発生できることを実証した。(2)上記(1)の小型高推力アクチュエータに適した制御方法を提示し、誤差0.02 mm以下の精密位置決めが可能であることを実証した。(3)従来の電磁力アクチュエータと感温磁性体を組み合わせた新たなアクチュエータを提案し、大きな一定推力を超低消費電力で発生する方法を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research subject, as the research of actuators suitable for miniaturization and high thrust, the following was done. (1) A compact high-thrust actuator including temperature-sensitive magnetic material parts, permanent magnet and Peltier element without coils has been proposed. The proposed actuator demonstrated to be able to generate large constant thrust with low power consumption. (2) A control method suitable for the proposed actuator explained in (1) was presented. The experimental result shows that the combination of the actuator and the control method provides the error less than or equal to 0.02 mm. (3) A new actuator combining a conventional electromagnetic force actuator and a temperature sensitive magnetic material part has been proposed. The experimental results indicate that the actuator can generate large constant thrust with ultra low power consumption.

研究分野：精密メカトロニクス, 精密制御, アクチュエータ

キーワード：機能要素 熱磁気アクチュエータ 感温磁性体 ハイブリッド 電磁力

1. 研究開始当初の背景

電磁力アクチュエータは、高い制御性をもち、大推力を発生することが可能、といった利点を持つ、広く利用されているアクチュエータである。しかし長時間連続して大推力を発生すると、発生熱の増大、温度上昇が顕著になる。そのため、大推力を連続的に発生する用途には適していない。また、推力が体積に依存する電磁石コイルの特性上、永久磁石の大きな保持力を、十分生かすことができない。

磁気特性が温度で変化する感温磁性体と永久磁石、加熱デバイスからなる熱磁気アクチュエータは、磁力を温度で制御するため、コイルに起因する問題を原理的に解決できる特徴を持つ。そのため、連続動作に適した小型高推力なアクチュエータを実現できる可能性を秘めている。しかし感温磁性体には、(i)珪素鋼板など広く利用されているコア材料と比較して磁気特性が低い、(ii)低い温度応答性が制御性を顕著に劣化する、といった課題があり、従来のコア材料と同様の使い方では、十分な特性が得られない。実際これまでの報告例では、推力・応答性ともに十分な結果が示されていない。

2. 研究の目的

コイルなしで磁力制御ができる感温磁性体を持つ特徴を活用し、制御性のよい小型化、高推力化に適したアクチュエータを提案し、その有効性を実証することが本研究の目的である。そのために以下の課題の達成することが本課題の目的である。

- (1)提案するコイルを用いない小型高推力アクチュエータの基本特性を調べ、その特徴を活かすための条件、適した駆動方法を明らかにする。
- (2)提案する小型高推力アクチュエータに適した制御方法を提示し、有効性を明らかにする。
- (3)従来の電磁力アクチュエータの高い応答性と感温磁性体と永久磁石を組み合わせて実現できる高効率な連続高出力を両立できる新たなアクチュエータを提案し、その有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)コイルを用いない小型高推力アクチュエータ 図1に本アクチュエータの駆動原理を示す。固定子は感温磁性体とペルチェ素子からなるペアを2組、可動子は鉄製ヨークと複数の永久磁石により構成される。永久磁石が発生した磁束は、感温磁性体やヨークを経由し隣接する永久磁石に到達する。

ペルチェ素子により感温磁性体の温度が変化すると、その飽和磁束密度が変化し、2枚の感温磁性体の磁気的なアンバランスが生じ、推力が発生する。感温磁性体内を通る磁束の流れ方は、可動子変位によらず、発生推力は全可動範囲でほぼ一様となる。

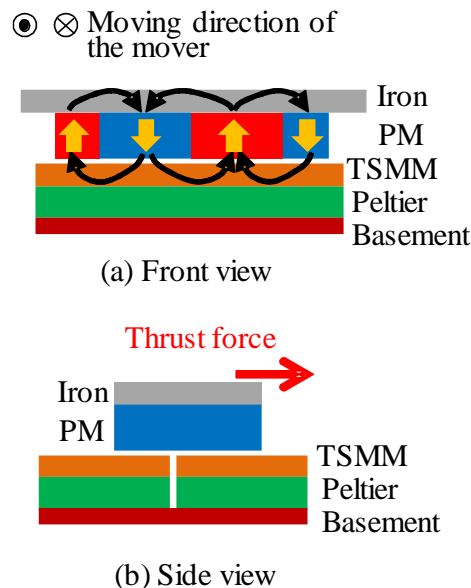


図1 提案する小型高推力アクチュエータの駆動原理

本アクチュエータの基本特性を明らかにするために、駆動部を表現する磁気モデルを構築し、磁場解析により発生推力を計算するとともに、装置を試作して実験により妥当性を検証する。また感温磁性体の温度応答特性は、本アクチュエータの応答性を決定する重要な特性であり、これを調査する。

(2)小型高推力アクチュエータに適した制御方法と有効性 運動制御を行う場合、感温磁性体の温度を観測する必要があるが、構造上温度センサを組み込むのが難しく、温度センサなしで温度が推定可能であることが望まれる。そのため、ペルチェ素子に通電する電流に対する温度応答特性を表す温度モデルを導出する。そのモデルを推定器として、アクチュエータの推力を調整可能とし、その推力調整能力を内包する位置決め制御系を構成し、制御性能を調べ、有効性を明らかにする。

(3)高効率な連続高出力と高い応答性を両立できる新たなアクチュエータの提案と有効性検証 感温磁性体を用いた駆動要素がもつ連続高出力を高効率に発生できる利点と、電磁力駆動要素の高い応答性を両立できる新しいハイブリッドアクチュエータの構成を提案する。提案するアクチュエータは、前者が静推力発生を担う可変バイアス要素、後者が高い応答性を担う高応答要素として扱われ、両要素間で磁気回路構成要素を共有し、高応答要素を駆動するコイルの発熱を可変バイアス要素の感温磁性体に伝達・利用できる構造を採用し、構造の小型化、駆動回路を含むシステムの簡素化を可能とする。

次に、ハイブリッドアクチュエータの詳細設計と試作を行い、その基本的性能を実験的

に明らかにする。その後、本ハイブリッドアクチュエータの応用を想定して位置・制振制御系を構成し、その制御性能を実験的に明らかにする。

4. 研究成果

(1) コイルを必要としない小型高推力アクチュエータの試作と特性評価 提案アクチュエータを、第3章(1)で説明した方針に沿って設計・試作し、その特性を調査した。図2は、試作した提案アクチュエータの写真である。図に示すように、試作アクチュエータの長さは20 mm、幅は72 mm、厚さは30 mmで、放熱用アルミブロックの上に設置されている。

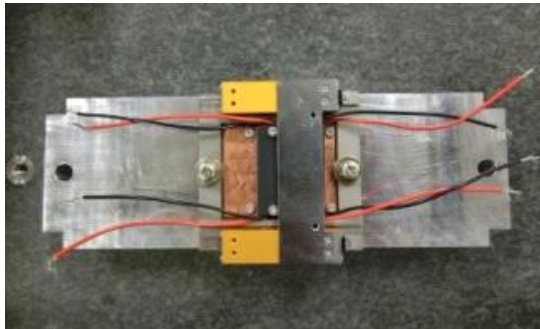


図2 試作した提案アクチュエータ

感温磁性体の温度応答特性は、本アクチュエータの応答性を決定する重要な特性であり、これを調査した。温度変化率は、印加電流とともに増加し、最大電流6Aを通電した場合、7秒以内に80℃に到達している。第3章で述べた通り、2枚の感温磁性体の温度がそれぞれ最低温度と最高温度になる条件での推力を、最大推力と定義する。最大推力の測定結果は4.6Nであった。磁場解析により求めた推力は5.2Nであり、理論値よりも0.6N低い値となった。また、その際の消費電力は8.2Wであった。なお本実験は、力センサを含む力制御系を用いて一定の力を発生させた状態でやっている。

本アクチュエータの場合、最大推力は感温磁性体の温度を維持するだけで、連続的に発生させることができ、それを連続定格推力と捉えることができる。引用文献①に記載されている市販の電磁リニアモータSGTMM01-030AM20Aの連続定格推力は3.5Nであり、4.6N発生時の消費電力は13.3Wである。したがって、提案アクチュエータは一定の力を連続的に発生する場合において優位性を有するといえる。

(2) 小型高推力アクチュエータに適した制御方法と有効性 制御性能を検証するために、位置決め制御系を構成し、位置決め実験を行った。温度応答により決定される本アクチュエータの推力応答は緩慢であるため、運動の安定性が低く、本アクチュエータをその

まま利用した場合、位置決めが困難である。そこで、可動子・固定子間に0.402 N/mmの引張ばねを、可動子を挟み込むように2本対称に接続し、安定性の向上を図った。

決定した位置決め制御系を図3に示す。位置決め制御においては2組のペルチェ素子両方を1個のセンサ信号に基づいて駆動するため、双方の感温磁性体温度に関する拘束条件が必要になる。そこで温度応答モデルを導出し、推定器として用いることにした。2枚の感温磁性体の平均温度が40℃となるように、PI制御により温度制御した。

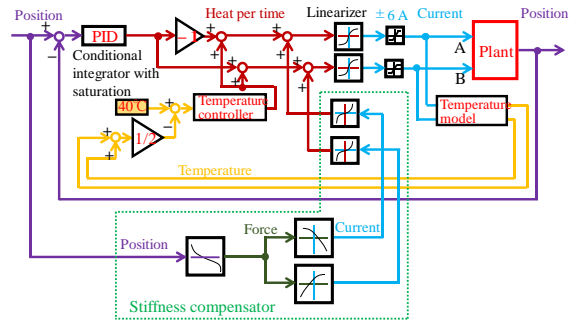


図3 位置決め制御系

本位置決め制御系は、PID制御を基本としており、熱流量と電流の非線形性を補償する線形化補償器と、ばね剛性により生じる偏差を補償するための剛性補償器を含んでいる。PID制御の積分器として、積分ワインドアップ防止の観点から、目標値近傍0.1 mm以内でのみ作動する条件付き積分器を採用している。また、 ± 1.0 Wの範囲で動作を許容する飽和要素を設けている。PID制御器の出力は、ペルチェ素子が素子上面に発生させる熱流量を示すため、これを制御入力である電流に変換する必要がある。そのためにペルチェ素子のカタログ値に基づいて構成した線形化補償器を使用している。また、安定性向上のために設置したばねの復元力により、可動範囲の中央に向けて位置決め誤差が発生する。この影響を補償するために、必要な発生力の大きさを各目標値に対して実験的に求め、定常状態において必要となる熱流量に換算した上で、制御入力に加算する剛性補償器を設置している。

図4に位置決め結果を示す。10秒間で7 mmの変位を発生させる変位指令に対して可動子が追従し、位置決め時の定常誤差は20 μ m以下となっている。

(3) 高効率な連続高出力と高い応答性を両立できる新たなアクチュエータの提案と有効性検証 可変バイアス要素と高応答要素の体積配分や、永久磁石の熱減磁の影響、コイルの定数、重要部品の強度を考慮して、ハイブリッドアクチュエータの詳細設計を行った。そしてアクチュエータを試作し、その

基本性能を実験的に調べ、次の特性を確認している。

- ①推力測定の結果、可変バイアス力の最大値 42 N が得られ、可動子変位に依存しない特性が得られた。
- ②電流の通電により、電磁力が可変バイアス力に重畳して発生することを確認した。
- ③可変バイアス力を一定に保つのに必要な電力である定常消費電力を測定し、アクチュエータを真空環境下におくことで、これの大幅な削減に成功した。真空中の定常消費電力は、ある同一推力を発生した時の大気中での消費電力の約 1/10 に低減できた。
- ④実現容易な消費電力低減方法として、常圧の断熱ガスを封入する方法とその効果を検討した。アクチュエータをキセノン雰囲気下におく実験では、真空雰囲気下での実験と比べて定常消費電力は大きくなったものの、大気中での実験に比べて大幅な定常消費電力の削減が実現できた。大気中と比較し 1/3 以下であった。
- ⑤定格推力と定常消費電力の両者において、ハイブリッドアクチュエータは、既存の同体格の電磁アクチュエータに対して優位性を有し、高推力の連続的発生に有効であることを確認した。
- ⑥温度応答実験を行い、電流の通電と熱回路を機構的に切り替えることに対する温度応答特性を調べ、熱回路切り替え部の有効性を明らかにした。

次に位置制御性能を明らかにするために、位置制御系を構成し、位置制御実験を行った。結果として、1 kg の荷重を搭載した状態において、サブミクロンオーダーの精度での位置決めが実現されている。その後、ハイブリッドアクチュエータを鉛直制振メカニズムへ応用することを想定し、制振制御系を構成した。スカイフック制御系を適用した結果、高周波領域で振動減衰性能が理論値に比べて劣化したものの、アクティブ鉛直メカニズムとして有効に機能することを確認している。

<引用文献>

- ① 安川電機, AC サーボドライブ Σ -V シリーズ 総合カタログ (2014), 282-289.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Tadashi Hama and Kaiji Sato : Novel and compact thermomagnetic actuator using temperature-sensitive magnetic materials, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol.18, No.12, (2017) pp. 1833-1840.

[学会発表] (計 5 件)

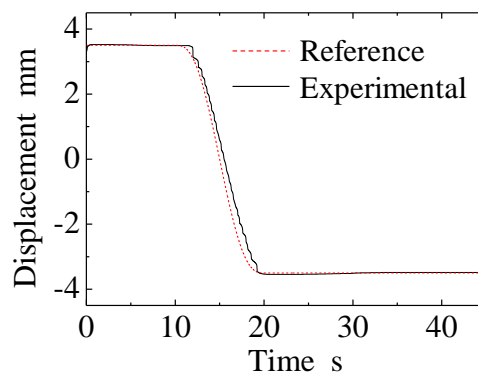


図4 位置決め結果

- ① Tadashi Hama, Kaiji Sato : Basic Structure and Characteristics of a New Compact Actuator Using Temperature Sensitive Magnetic Materials, Proceedings of the 19th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT2015), (2015.11) C12-Paper89.pdf
- ② 浜 維志, 佐藤海二 : 感温磁性体を用いた小型アクチュエータの駆動原理と基本特性, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, (2016).
- ③ 浜維志, 佐藤海二 : 感温磁性体を用いた小形アクチュエータの制御性能, 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2016) pp. 711-712
- ④ Tadashi Hama and Kaiji Sato : Positioning Characteristics of the Novel and Compact Actuator Using Temperature Sensitive Magnetic Materials, Proc. of ICPT2016, (2016.11) P-17 ICPT16036_P17.pdf
- ⑤ Tadashi Hama and Kaiji Sato : Basic Characteristics of Novel Hybrid Actuator Integrating a Thermal Bias Element and an Electromagnetic Driving Element, Proc. of ASPE2017, (2017.10) pp. 456-461.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称 : アクチュエータおよび防振システム

発明者 : 佐藤海二, 浜維志

権利者 : 東京工業大学

種類 : 特許

番号 : 特願 2017-027971

出願年月日 : 2017.2.17

国内外の別 : 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 海二 (SATO Kaiji)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 : 00215766