

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360071

研究課題名 (和文) 高推力密度で製造・分解の容易な永久磁石なし多層型超精密高速平面モータ

研究課題名 (英文) High precision multilayer-planar motor without permanent magnets characterized by high thrust to mover mass ratio, easy-fabrication and easy-disassembly

研究代表者 佐藤 海二 (Sato Kaiji)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授

研究者番号：00215766

研究成果の概要 (和文)：

永久磁石を用いず、多層構造により高い推力-可動部質量比を有する精密・高速平面モータを実現することを目的に、まず基本となるアクチュエータ構造の課題を調べ、次にその結果を基礎に2種類の新たなアクチュエータ構造を提案し、その有効性を検証した。その結果、摩擦力低減の課題はあるが、それらが高い推力-可動部質量比を有する平面モータ用電磁アクチュエータや、簡易で応用範囲の広いアクチュエータとして利用できることがわかった。

研究成果の概要 (英文)：

For high precision multilayer planar motors which have high thrust-to-mover mass ratio without permanent magnets, suitable actuator structures and planar configuration with the actuators have been studied. In the study, two actuator structures were proposed and their characteristics were examined analytically and experimentally. The results show that one of the actuator structures provides the high thrust-to-mover mass ratio and the other is very simple and useful for a wide application range.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 5,000,000  | 1,500,000 | 6,500,000  |
| 2010年度 | 4,400,000  | 1,320,000 | 5,720,000  |
| 2011年度 | 5,300,000  | 1,590,000 | 6,890,000  |
| 年度     |            |           | 0          |
| 年度     |            |           | 0          |
| 総計     | 14,700,000 | 4,410,000 | 19,110,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機能要素・平面モータ

## 1. 研究開始当初の背景

産業機械は一般に多自由度機構で、複数の1軸機構を積み上げた構造(スタック形)をもつ。そのため本質的に次の欠点をもつ。

- 下段に設置される機構に大きな負荷が加わり、軸方向によって特性が変わる。

- 総合的な機構剛性が低下するため、最終的なサーボ剛性が制限される。
- 各軸機構の厚みは、薄形タイプでも20mm近くあり、結果として重心が高くなる。このような欠点をもたないサーボ機構として、永久磁石を利用した平面モータの研究が

長年進められている。しかし従来の平面モータには、次の課題が存在する。

- **低い加速性能** 市販のリニアモータの最大加速度は40Gに達するが、平面モータは、試作研究を含めても2G程度しかない。
- **発熱問題** 可動テーブルあるいはその下部にコイルが配置されており、その発熱が問題となる。VCM形平面モータはこの問題を回避できるが、可動範囲が大きく限定される。

さらに、永久磁石を用いたリニアモータや平面モータに共通して、次の課題が存在する。

- **組み立て調整や多層化が困難** 永久磁石と磁性体コアの利用は、推力向上に効果的であり、高推力リニアモータで採用されている。しかしその間の強い吸引力が、組み立て・調整作業を困難にする。また低発熱で推力・可動部質量比を向上するには、固定子・可動子の多層化が望ましいが、組み立ての困難さのため、実用上1層に制限されている。平面モータでは、本研究課題を除き、研究レベルでも多層化の例は見受けられない。
- **レアアースの供給不安** 高性能永久磁石に不可欠であるレアアースは、地球上に偏在し、近年供給国の資源外交が日本の先端産業の脅威となっている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、リニアモータに利用可能な以下の特徴をもつ電磁アクチュエータユニットを利用した精密・高速平面モータを実現することにある。

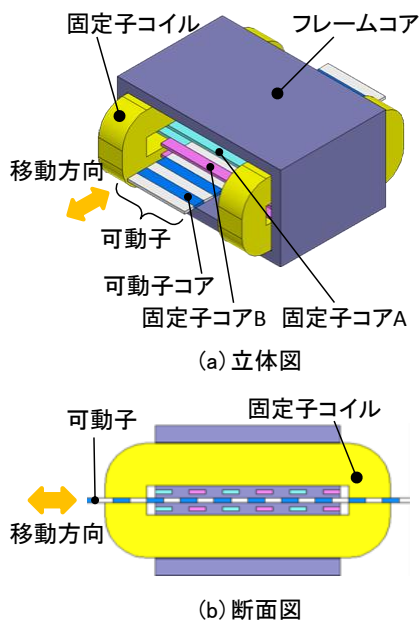


図1 申請時に提案した電磁アクチュエータユニット

現することにある。

- 1) 永久磁石を含まないため、材料の入手が容易で、組み立て・調整が簡単である。
- 2) 簡単な構造をもつ薄い部品からなる多層構造を有し、その寸法の最適化により、従来の平面モータよりも高い推力・可動部質量比を実現し、高速運動が可能である。
- 3) 構造上、可動範囲が可動テーブルサイズに制限されず、広い可能範囲を持つことが可能。
- 4) 冷却容易なように、熱源となるコイルを可動テーブルから離してまとめて配置し、冷却容易とするとともに、推力あたりの消費電力の少ない形状をもつ。

## 3. 研究の方法

### (1) 申請時のアクチュエータの基礎評価

研究代表者は本研究課題の申請時に、平面モータに利用可能な電磁アクチュエータユニットを提案しており、その概要図が図1である。このユニットは、可動層と固定子層が交互に配置される構造をもち、層数のみを増すことにより、推力を増大させることができる。図1のユニットは、固定子2層、可動子1層をもつ構成例となっている。同様のアクチュエータユニットを3個以上組み合わせることで、往復運動可能なリニアモータとして機能し、そのようなリニアモータを2組用いることで、平面モータとして機能できるようになる。このような構造をもつ電磁アクチュエータユニットを含むリニアモータを設計・試作し、試作機を用いた駆動実験を行って、課題を検討した。

### (2) 製作容易性を向上させた改良型アクチュエータの提案と評価

図1の電磁アクチュエータユニットを用いたリニアモータの試作と特性評価により得られた知見を基礎に、次の改良を行った。

- 可動子コアは、多数の部品から構成されるが、これを一体化し固定するために、

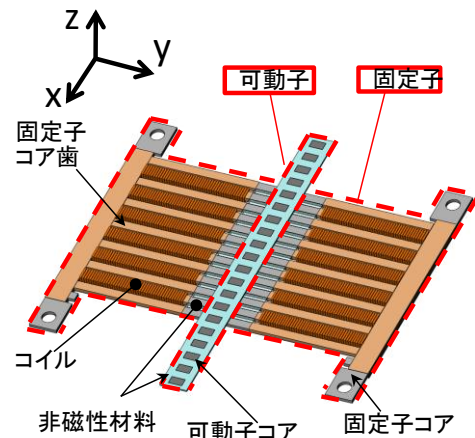
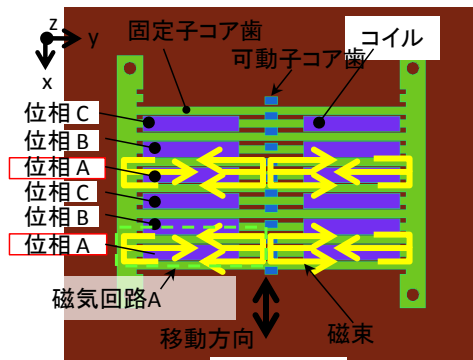
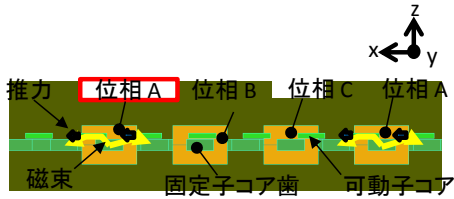


図2 改良型アクチュエータの基本構成



(a) 上面図



(b) 断面図

図3 A相コイルに電流を印加した場合の磁束の流れと発生推力

薄膜フィルムに替えて樹脂を利用して封入し、可動子の変形を抑制して固定子との接触面を滑らかにする。そのために専用の治具を製作して使用する。

- 同一の大きさでも高い推力が得られ、製作が容易な固定子構造を提案した。また可動子と同様に樹脂で固め、滑り案内として利用しやすいように、滑らかな固定子表面を実現する。

図2は、改良型アクチュエータの基本構成を示している。この改良型アクチュエータはシンプルな固定子と可動子から構成される。固定子は複数のスリットを持つ1個のコアと、コア歯に巻かれる複数のコイルからなる。コイルは固定子コアの両側に対称的に並び、向かい合う1組のコイルが対向するように固定子コア歯に巻かれている。固定子コアは多数のスリットをもつが、そのスリットは非磁性材料で埋められ、全体として1枚の板構造となっている。

可動子は、これまでと同様に複数の等間隔で並んだ磁性体片を非磁性材料で固定した構造を持つ。可動子、固定子ともに滑らかな平面構造を作成しやすいように、製作方法や構造を改良しており、それらの対向面はすべり案内面として利用される。またこのアクチュエータを2個以上利用することにより、平面モータとして利用することも原理上可能である。

このアクチュエータは、図1の場合と同様に、可動子と対向する面から離れてまとめて配置される基本構造をもっている。またコイル数を図1と同様に少なくすることも可能であるが、ここではコイルを個別に巻き、こ

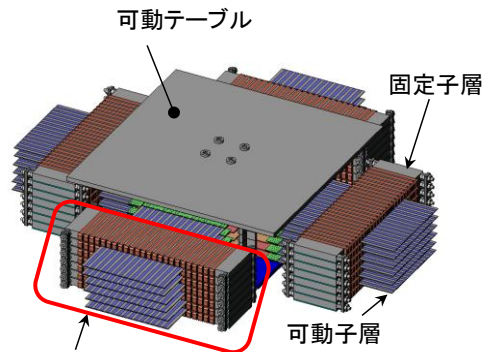


図4 提案する平面モータの構成

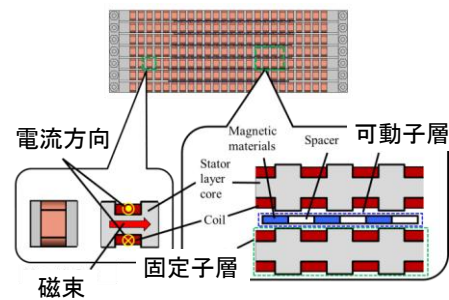


図5 提案する平面モータ用リニアアクチュエータの構成

のユニットだけで、3相の駆動信号を用いて可動子の往復運動が可能となるようにしている。

図3は、A, B, Cの3相のうちA相コイルに電流が印加されている状態を示している。A相に電流を印加すると、対向している2個のA相コイルに起磁力が発生し、磁束は固定子中央に向かって固定子コア歯中を流れる。1個のコア歯の両端にコイルが配置されているため、固定子コア歯の磁束密度の大きさと可動子を通る磁束との比を大きくでき、磁気飽和の影響を受けにくくなっている。固定子コア歯中央に集まった磁束は、そのコア歯から最も近い可動子の磁性体片内を通過し、隣の固定子コア歯に流れてゆく。この時、磁気抵抗が減少する方向に推力が発生し、可動子が駆動される。磁気抵抗が最小になった時にその相での平衡状態となり、B相、C相に電流を切り替える事で、可動子は連続的に駆動される。

今回は、可動子1層に対し、固定子1層と2層の2種類のリニアモータを試作し、その製作容易性と推力特性、運動特性を評価した。

### (3) 新しい平面モータ構造の提案と設計・試作

これまで検討している電磁アクチュエー

タユニットは、可動子のピッチよりも、可動子・固定子間ギャップを小さくして性能向上を図るのに向けた性質があり、その実現は適した製造方法の利用の有無に大きく左右される。そこで、これまでのアクチュエータユニットよりも、高い推力・可動子質量比が得られる新ユニットを設計するとともに、それを利用した平面モータの具体的な設計も行った。新ユニットは多層構造をもち、各層の部品構造は単純であるが、層構造部品を正確に組み立てることが重要となる。そこで特別な治具を用いなくても、容易に組立可能な可動子構造を提案した。

図4は、新しい平面モータの構成を示している。本平面モータは、可動テーブルと4個のリニアアクチュエータから構成されており、平行に配置された2個のリニアアクチュエータを1組とする駆動要素により、可動テーブルが1軸方向へ駆動される。

図5は、1個のリニアアクチュエータの構成を示している。図中のアクチュエータは、7個の固定子層と6個の可動子層より構成されている。基本的に3相の駆動信号を利用するが、構成の都合上、別途1信号を追加して駆動することとした。可動子層は各相2個ずつである。固定子層は多数のコイルを含んでおり、各コイルへの印加電流信号の組み合わせにより、磁束の流れが異なる2種類の駆動方法を実現可能としている。その駆動方法を適切に組み合わせることにより、推力リップルを抑制し、平均推力を増加させることができる。

この平面モータの基本特性と課題を明らかにするために、磁場解析を利用して詳細設計を行い、平面モータを試作した。そして試作平面モータを用いて基本的な推力特性を、実験的に調べた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 申請時のアクチュエータの基礎評価結果

このアクチュエータ構造の特性は、これまで磁場解析により理論的に評価されてきたが、今回は試作と実験により、製作上の課題を中心に、基礎的な評価を行った。

図6が試作したリニアモータである。リニ

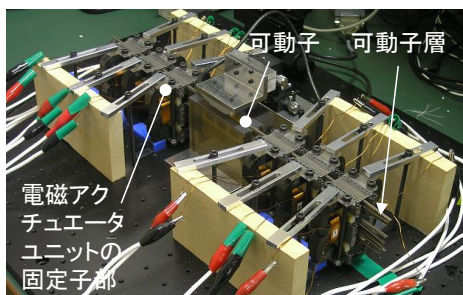
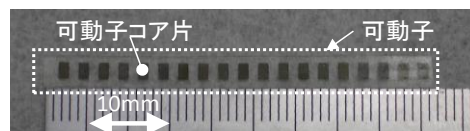
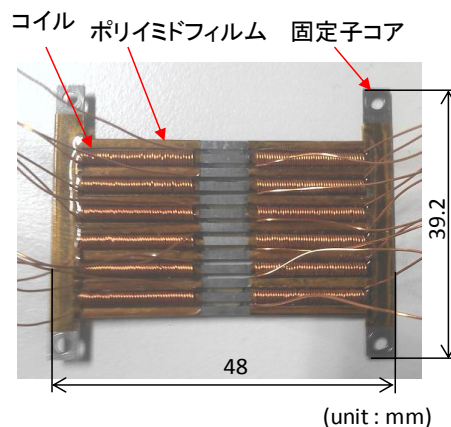


図6 試作リニアモータ1号機



(a) 可動子層



(b) 固定子層

図7 試作した改良型リニアモータ (可動子1層、固定子1層)

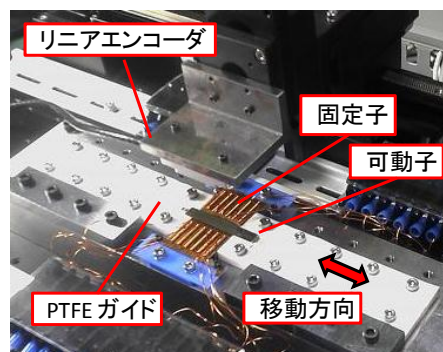


図8 改良型リニアモータの評価装置

アモータは、固定子部分を6個、可動子層を複数もっている。可動子層と固定子層の表面には、製作容易かつ低摩擦化を図るために薄膜フィルムを貼り付けている。この製作過程や得られた特性を検討した結果、可動子と固定子との対向面が十分平坦にならないため、大きな摩擦力が生じ、推力低下の要因となること、また可動子コアの厚さと剛性に対してフィルムが弱いため、製作時に推力低下を招く大きな変形が生じること、がわかった。これらの問題は、精密な組み立て・加工装置を利用すれば解決可能であるが、構造を改良することで、製造容易性を高めて解決することがより望ましい。そこでそれに適したアクチュエータ構造と製作方法を明らかにすることを、次の課題とした。

(2) 製作容易性を向上させた改良型アクチュエータの評価結果

上記(1)での成果を基礎に、課題を解決するために提案した改良型アクチュエータを試作した。図7は、試作した可動子1層、固定子1層の写真である。固定子コアは、0.5mmの電磁鋼板から切り出され、コア歯の両端にコイルが巻かれている。中央は樹脂で平坦に固められている。固定子コアは一体で、組み立てが不要であるため、樹脂により容易に平坦な面が作成されている。可動子は、厚さ0.23mmの珪素鋼板から切り出して作成した金属片を、樹脂で一定間隔を保つように固め、製作されている。可動子と固定子の対向面は案内面として利用され、すべり案内を構成している。固定子、可動子の厚さは、それぞれ2.4mm、0.27mmである。図8は、試作アクチュエータの特性を評価するための装置の概要を示している。変位センサには、小型のリニアエンコーダを採用した。

この試作リニアモータは、推力は小さいものの、多くのリニアモータと同程度の応答性(速度280mm/s以上、加速度 $3m/s^2$ 以上)を示した。また多層化により、高い性能向上が可能であることを確認した。さらに、その製作容易性と薄い構造から、従来の検査装置等に容易に組み込み、可動子を消耗品として扱うことも可能となり、これまでにない利用方法が採用できることが分かった。

(3) 新しい平面モータ構造設計・試作と評価

上記(1)(2)のアクチュエータユニットよりも、高い推力・可動子質量比が得られる新ユニットの最適な構造について数値解析的に調べ、推力・可動部質量比や推力リップル、推力・電力比の優れた形状を明らかにした。決定した形状での理論上の推力は、印加電流3.95Aに対し68.6Nである。その結果を基礎に、平面モータを設計・試作した。図9は、試作した平面モータの全体像である。今回は製作容易性を重視し、案内として滑り平面案内を採用している。可動テーブルの質量は約0.73kgであり、9G以上の加速度を出す可能

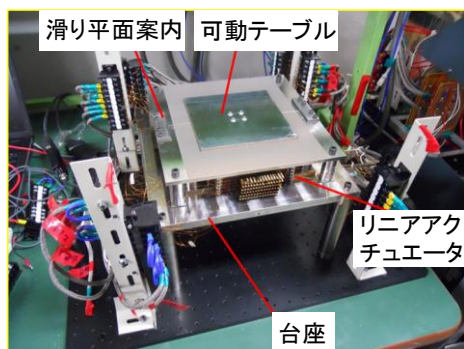


図9 試作した多層型平面モータ

性をもっている。

新ユニットは多層構造をもち、各層の部品構造は単純であるが、層構造部品を正確に組み立てることが重要となる。そこで特別な治具を用いなくても、容易に組立可能な可動子構造を提案し、実際に試作して有効性を確認した。一方で、実験装置の推力性能は、摩擦力の影響のため、理論値よりも大きく低下しており、その悪影響の低減が今後の重要な課題であることが明らかになった。

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 Kaiji Sato, Novel Compact Linear Switched Reluctance Motor with a Thin Shape and a Simple and Easily Replaceable Mover, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.7, No.3, 2013, pp.295-304

[学会発表] (計4件)

- ① 國米皓, 安部紘平, 佐藤海二: 単純で製作が容易な可動子を持つ薄型リニアスイッチトリラクタンスマータ, 2013年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2013, pp.787-788
- ② Kaiji Sato, and Kohei Abe, Design and Driving Characteristics of Thin Linear Reluctance Motor without Permanent Magnets, Proceedings of the 5th International Conference on Positioning Technology, 2012, pp.31-32.
- ③ Kaiji Sato, Hasmawati Antong and Takeshi Saito, Multi-layer Type Compact Linear Motor without Permanent Magnet - New Design and Basic Characteristics of a Prototype Based on the Design-, Proceedings of the 4th International Conference on Positioning Technology, 2010, pp.206-209
- ④ 佐藤海二, 斎藤剛史, Hasmawati Antong: 永久磁石を用いない多層型コンパクトリニアモータ - 基本構成, 第21回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, 2009, pp.119-122

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称: 電磁石型アクチュエータ及びこれを用いた平面モータ  
発明者: 佐藤 海二

権利者：東京工業大学  
種類：特許  
番号：特願 2012-145303  
出願年月日：2012 年 06 月 28 日  
国内外の別：国内

名称：電磁石型アクチュエータ及びこれを用いた平面モータ  
発明者：佐藤 海二  
権利者：東京工業大学  
種類：特許  
番号：特願 2012-140937  
出願年月日：2012 年 06 月 22 日  
国内外の別：国内

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕  
ホームページ等  
なし

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
佐藤 海二 (Sato Kaiji)  
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授

研究者番号：00215766

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし