2017 年 11 月 29 日

2016 年度　永守財団　研究助成　研究報告書

所属機関名 （大学、大学院、研究所 名）	茨城大学
職位または役職	助教
氏　名	北山　文矢

1．研究題目

広周波数帯駆動のための 2 軸独立駆動型リニア振動アクチュエータの開発

2．研究目的

リニア振動アクチュエータは、交流電圧を印加することで電磁力を発生させ、可動部を振動させる。ギア等の変換機構が不要であり、小型・高速で駆動する。更に、制御により任意の周波数、振幅、位相で振動する。このような特徴を有しているため、電気シェーバ、電動歯ブラシ、エアコンプレッサなどの振動を利用する機器および外乱振動を能動的に抑制するアクティブ制振装置で用いられている。

振動を利用する機器において、1 つの機械的共振周波数でリニア振動アクチュエータを駆動させ、共振現象の利用により高効率化を実現している。この共振を利用した高効率駆動を広域な周波数で実現することで、多様な振動を高効率に生成できる。それにより、機器の多機能化に貢献できると考える。アクティブ制振装置において、リニア振動アクチュエータは制振対象の外乱振動の周波数に合わせて駆動する。自動車用制振装置であるアクティブ・コントロール・エンジンマウントを例に挙げると、リニア振動アクチュエータは 20 から 120 Hz で駆動する。しかし、快適性向上のニーズの高まりや外乱振動の増大により、駆動周波数の更なる広域化が求められている。

前述した要求により、リニア振動アクチュエータにおいてばね、ダンパ、共振周波数などの固有の特性を随時変化させる手法が考案された。アクチュエータ自身の推力を利用する方法や電磁ダンパの原理を応用した方法などが研究されているが、これらは変化可能な特性に限りがあった。共振周波数に着目すると、前者では 20Hz，後者では 50Hz の変化が示されている。これにより、駆動周波数の広域化にも制限が生じていた。

本研究では、2 つの可動子を有する 2 軸独立駆動型リニア振動アクチュエータを提案し、駆動周波数の広域化を実現する。提案アクチュエータは、2 つの可動子に対して異なる質量、ばね定数、ダンパ係数などを自由に設定でき、それらの可動子は独立に駆動する。そのため、大きく異なる特性を 2 つ有することとなり、これらの特性を利用することで駆動周波数の広域化を図る。

3．研究内容及び成果

本研究では、2 軸独立駆動型リニア振動アクチュエータを提案した。本アクチュエータの特徴は、独立した電流を励磁できる 2 つのコイルを有する点、質量の大きい磁極数 3 の可動子(可動子 1)と質量の小さい磁極数 2 の可動子(可動子 2)を有する点である。

2 つのコイルに同位相の電流を励磁した場合(同相励磁)、励磁電流による磁束が可動子 1 に作用し、可動子 1 が振動する。また、2 つのコイルに位相差が 180 度ある電流を励磁した場合(逆相励磁)、励磁電流による磁束が可動子 2 に作用し、可動子 2 が振動する。各可動子の質量から、可動子 1 では低周波数に機械共振が表れ、可動子 2 では高周波数に機械共振が表れる。そのため、可動子 1 は低周波数で、可動子 2 は高周波数で高効率に駆動する。このように、電流励磁によって異なる 2 つの特性(可動子 1, 可動子 2 の特性)を利用できる。低周波数では可動子 1 を、高周波数では可動子 2 を振動させることで、広い周波数帯での高効率な駆動を実現する。

提案アクチュエータの磁場解析により下記の知見を得た。強制電流励磁時の動作特性では、同相励磁時に 100Hz で可動子 1 が大きく振動し、逆相励磁時に 180Hz で可動子 2 が大きく振動した。この解析値は、各可動子質量、磁気・機械ばね特性から計算される機械共振周波数の理論値と概ね一致する。そして、同相励磁と逆相励磁を切り替えることで 20～200Hz の周波数域での振動が得られた。また、100Hz の同相電流と 180Hz の逆相電流を同時に励磁することで、可動子 1 と可動子 2 が同時に大きく振動した。電圧印加時の動作特性では、インダクタンスおよび逆起電圧の影響を受けるため、強制電流励磁時の動作特性とは傾向が異なった。しかし、可動子 1 が 100Hz で, 可動子 2 が 180Hz で大きく振動しており、共振周波数を離すことに成功し、それによる広周波数帯駆動も確認できた。この研究成果は、2016 年 11 月に開催された日本 AEM 学会主催「第 25 回 電磁現象および電磁力に関するコンファレンス(MAGDA)」にて発表し、新規性と独創性が認められ MAGDA 優秀講演論文賞を受賞した。また、日本 AEM 学会論文誌にも掲載され、AEM 学会の発展に寄与することが認められ日本 AEM 学会奨励賞を受賞した。

次に、原理検証のための試作モデルを設計した。試作モデルでは、製作しづらいラジアル配向磁石の利用を避け、オイレスブッシュとリニアベアリングを併用することで安定した支持を実現する。アクチュエータ各部のパラメータ設計を行い、ディテント(コギング)特性および推力特性を改善させた。具体的には、制御性悪化に寄与するディテントの非線形性や推力の非一定性を回避し、各可動子の独立駆動性、推力を向上させる。このパラメータ設計において、各可動子と固定子間のエアギャップ付近に配置されたヨーク寸法がディテントや推力に影響を与えることを明らかにした。設定したパラメータを基に試作機を製作した。波形生成器と電流アンプにより各コイルに同相および逆相で電流を励磁し、各可動子の変位をレーザ変位センサ及び渦電流変位センサにより測定する。同相励磁時で可動子 1 が共振周波数 74 Hz で最大振動振幅 0.43 mm となり、逆相励磁時で可動子 2 が共振周波数 157 Hz で最大振動振幅 0.74 mm となった。この結果から、可動子 1 と可動子 2 の振動特性を大きく異なるものにでき、駆動周波数帯の広域化は実現された。一方、可動子 1 振幅の実測値は解析値と比べると 67%小さい。振幅低下の原因の解明を今後の課題とする。従来の特性を 1 つしか持たないリニア振動アクチュエータと提案アクチュエータを比べると、提案アクチュエータは製作性では劣っている。しかしながら、十分製作可能な範囲であった。実用面での課題として、支持部品の劣化によるアクチュエータの性能低下が挙げられる。実機検証に関する研究成果は、2017 年 10 月に開催された日本 AEM 学会主催「第 26 回 MAGDA コンファレンス in 金沢 (MAGDA2017)」にて発表した。

提案アクチュエータをインバータで駆動させる場合、動作原理上、単相インバータを 2 台必要とする。そこで、アクチュエータを Y 結線とし、3 相インバータ 1 台で駆動させることで、スイッチング素子数を低減する。磁場解析から、コイル電流の制御により Y 結線利用時と Y 結線非利用時で同等の動作特性が得られることを明らかにした。また、Y 結線利用時の課題として、電流値上昇と効率低下を挙げた。本成果は、2017 年 5 月に開催された日本 AEM 学会主催「電磁力関連のダイナミクス シンポジウム(SEAD)」にて発表した。

4．今後の研究の見通し

本年度の成果により、解析結果および測定結果から 2 軸独立駆動型リニア振動アクチュエータの動作特性および広周波数駆動化が明らかになった。しかしながら、前述したように測定結果において可動子 1 の振幅が著しく低下した。この要因は摩擦抵抗と考えており、摩擦力を実測して検証する。摩擦低減のため、本年度用いたオイレスブッシュとリニアベアリングの代わりに板ばねで支持する。本研究は基礎検討であるため、材料や製作のコストは考慮されていないが、今後はこれらを考慮した設計が必要となると考えている。

本年度の成果により、2 軸独立駆動型リニア振動アクチュエータの駆動システムが簡素化された。それにより、単相インバータ 2 台の使用は回避されたが、制御相数は 2 から 3 に増えている。更なるシステムの簡素化のために、アクチュエータに位相遅れ回路を内蔵し、従来のリニア振動アクチュエータと同様に単相インバータ 1 台での駆動や単相矩形波電圧および単相正弦波電圧印加での駆動を目指す。

応用に向け、本アクチュエータに制御を実装し、制御適用時のアクチュエータ性能を評価する。1 つ目の応用先として、ポンプ等の振動生成デバイスを想定する。本デバイスでは、外部負荷が与えられたとき、一定振幅で振動することが求められる。外部負荷発生時の本アクチュエータの線形モデル(伝達関数,状態方程式)を求め、制御系を設計する。本アクチュエータは 2 つのコイルと 2 つの可動子を持つため、2 入力 2 出力もしくは 1 入力 2 出力となる。そのため、従来アクチュエータ(1 入力 1 出力)の制御則を拡張する。制御適用時のアクチュエータの振幅特性を非線形シミュレーションおよび摩擦負荷を与えるテストベンチを用いた振動生成試験により評価する。

二つ目の応用先として、アクティブ制振デバイスを想定する。物体(制振対象)に外乱が加えられると、振動が生じる。制振対象に本アクチュエータを取り付けることで、本アクチュエータの能動的な振動により制振対象の振動を抑える。具体的には、ばねで支持された剛体に加振機を取り付け、外乱を与える。剛体の振動をセンサにより検知し、制御則に基づいて剛体に取り付けた提案アクチュエータを能動的に振動させ、剛体の振動を抑える。上記と同様に、本アクチュエータおよび制振対象の線形モデルを構築し、制御系を設計する。非線形シミュレーションとテストベンチにより、制御適用時の本アクチュエータの制振性能を評価する。

このように、性能面、製作面、実用面の改善および応用に向けた検討により、広周波数域で駆動するアクチュエータの実用化を目指す。

5．助成研究による主な発表論文，著書名

学術論文

1. 北山 文矢, 平田 勝弘, 近藤 良, 「2 つの可動子を有するリニア振動アクチュエータの動特性」, 日本 AEM 学会誌 Vol.25, No. 2, pp.180-185 (2017)

学会発表

2. 北山 文矢, 平田 勝弘, 近藤 良, 佐藤 駿「二つの可動子を有するリニア振動アクチュエータの実機検証」, 第 26 回 MAGDA コンファレンス in 金沢 (MAGDA2017) 講演論文集, 石川, pp. 83-88 (2017)

3. 北山 文矢, 平田 勝弘, 近藤 良「二つの可動子と三相巻線を有するリニア振動アクチュエータの提案」, 第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD29) 講演論文集, 岡山, pp. 459-464 (2017)

4. 北山 文矢, 平田 勝弘, 近藤 良「2 つの可動子を有するリニア振動アクチュエータの動特性」, 第 25 回 MAGDA コンファレンス in 桐生 (MAGDA2016) 講演論文集, 群馬, pp. 382-387 (2016)

受賞

5. MAGDA2016 優秀講演論文賞「2 つの可動子を有するリニア振動アクチュエータの動特性」(2016)

6. 日本 AEM 学会奨励賞「2 つの可動子を有するリニア振動アクチュエータの動特性」(2017)