

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420212

研究課題名(和文) インチワーム型多自由度精密位置決め装置の最適化

研究課題名(英文) Optimization of an inchworm-type multi-DOF positioning system

研究代表者

鳥井 昭宏 (Torii, Akihiro)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：70267889

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：インチワーム型精密位置決め装置の最適化を試みた。負荷の増加に伴って変位が減少することを明らかにした。摩擦の影響を除去するために浮上によって非接触状態を発生する移動機構を開発した。位置決め性能を高めるためのフィードバックシステムを構成した。圧電素子を用いたパラレルメカニズムの機構に、インチワームの機能を追加し、位置3自由度、姿勢3自由度の位置決めが可能なインチワーム型位置決め装置を実現できた。

研究成果の概要(英文)：An inchworm-type precision positioning device was optimized. It was revealed that the displacement decreased as the load increases. In order to eliminate the influence of friction, a moving mechanism that generated a non-contact state by levitation was developed. In order to improve the positioning performance, a feedback position control system was implemented. The inchworm-type positioning device which was capable of the positioning with 3 DOF (degrees of freedom) position and 3 DOF orientation was realized by adding the function of inchworm to the mechanism of the parallel mechanism using the piezoelectric element.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：位置決め装置 圧電素子 インチワーム スクイーズ膜

1. 研究開始当初の背景

小形の機械の製作に小形の製造装置を利用することは省資源、省エネルギー、省スペースの観点から理にかなっている。製造装置の構成要素の一つに位置決め用アクチュエータがある。小形機械を製造するためには小形かつ精密な位置決め用アクチュエータが必要であった。

卓上生産システムにおいて使用可能な小形かつ広い動作範囲（ストローク）を持つ精密ステージが望まれていた。それを実現する要素の一つが多自由度超精密位置決め装置である。平面上を自在に移動できる3自由度の自走機能に加えて、3自由度の姿勢制御が可能な構成が望まれた。位置制御と姿勢制御においては高い分解能だけでなく広いストロークを実現できる機構が必要であった。

小型位置決め装置の位置と姿勢の制御が課題となっていた。産業機器への応用を目指し、負荷変動や摩擦などによる外乱に対応する機器の構成や位置の制御が望まれていた。

2. 研究の目的

広域精密ステージに応用できる多自由度超精密位置決め装置の高性能化を目的とする。平面上を自在に移動できる移動機構であるインチワームを拡張し、インチワームの原理を用いて姿勢制御を行う。スチュワートプラットフォーム機構を応用した構造であり、パラレルメカニズムの機構にインチワームの原理を融合し、位置と姿勢のストロークに原理的に制限が無い無限の動作範囲を持つ機構の実現を目的とする。

摩擦による移動軌跡への影響を避けるために、浮上による非接触状態を利用した移動機構の開発を目的とする。パラレルメカニズムと融合したインチワーム型の移動機構は、ガイド（案内）やベアリング（軸受）を利用しない構造である。そのため、移動時の直進性や回転時の回転中心が保障されない。摩擦の影響を受けない機構を開発することによる動作性能の向上を目的とし、浮上の周波数特性を明らかにする。

位置と姿勢のフィードバックによる位置決め性能の向上を目的とする。開発するインチワーム型の移動機構はガイドやベアリングを利用しない構造であるため、外乱によって位置と姿勢に誤差が含まれる。そこで、光学的な方法によって位置と姿勢のフィードバックを行い、位置決め性能の向上を目的とする。外乱をモデル化することなく実現可能な制御の実現を目的とする。

3. 研究の方法

圧電素子は、電圧印加によってマイクロメートル以下の変形を発生する小型アクチュ

エータであるが、その発生変位は非常に小さく、変形にヒステリシスを有するなどのデメリットもある。インチワームは、一定の動作・変位を繰り返すことによって動作する移動機構であり、原理的に動作範囲に制限が無い利点がある。パラレルメカニズムは、高剛性で誤差の蓄積が無く多自由度動作の実現に適した機構である。

そこで圧電素子を用いたインチワームを実現できれば動作範囲の大きい機構が実現できる。また、移動機構の構造をパラレルメカニズムにすることによって、圧電素子の特性のばらつき補正やヒステリシスの影響の低減に有効である。

六個の圧電素子を六員環構造に接続し、その接続点に電磁石を配置する。図1に全体像を示す。スチュワートプラットフォーム構造のパラレルメカニズムである。電磁石の励磁と非励磁、圧電素子の伸長と収縮を制御することによって、平面上で3自由度動作、搭載した球状ステージの3自由度姿勢変化が可能である。ステージ上に搭載した負荷の質量と位置姿勢の変化の関係を明らかにする。

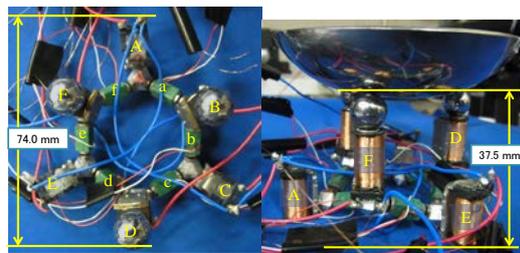


図1 六員環状の多自由度インチワーム

インチワーム型移動機構は、ガイドやベアリングを使用しない。そのため摩擦などの外乱の影響を受けやすい。そこで、摩擦の影響を受けない非接触状態を用いた移動機構の実現を目指す。

物体の浮上方法のひとつに、スクイーズ膜と呼ばれる空気膜を用いる方法がある。スクイーズ膜効果とは、微小間隙において対向する2平面が近距離で高周波振動し、その間隔の増加と減少を繰り返すときに、その間隙内に時間平均的に正の圧力が発生する現象である。鉛直方向に振動する圧電素子を用いて、その底面の下部に発生するスクイーズ膜によって浮上する。

鉛直方向に振動する圧電素子を用いて、浮上を発生する機構を製作し、その入力信号と浮上特性を測定する。図2に浮上機構を示す。圧電素子に適切な周波数と適切な振動振幅の入力信号を与えると、圧電素子の鉛直方向の振動によって機構全体が浮上する。変位計を用いてプレートの鉛直方向変位すなわち浮上量を測定する。浮上しているときと浮上していないときの圧電素子への印加電圧と電流を測定する。浮上機構に組み込まれた状態での圧電素子の周波数特性を測定する。

浮上機構を構成する圧電素子への印加電圧をパラメータとして周波数特性を求める。このパラメータが浮上量の周波数特性に与える影響を明らかにする。これらを通して浮上機構へ与えられる電気信号と浮上機構が生じる機械特性の関係を明らかにする。

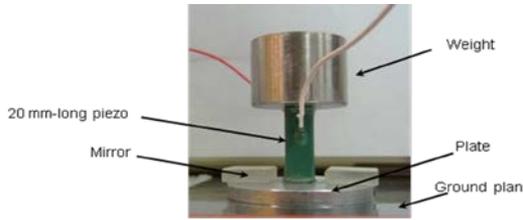


図2 浮上機構

電磁石と圧電素子を組み合わせた多自由度アクチュエータを製作し、その直進性能を評価する。図3に示す正三角形に接続したインチワーム型の移動機構を製作する。電磁石の位置を、隣接する2個の圧電素子の伸縮による移動させる。圧電素子を正三角形に接続し、その頂点に電磁石を取り付けてある。ここでA、B、Cは電磁石を表し、a、b、cは圧電素子を表す。その位置を変位センサによって検出し、圧電素子への印加電圧を変化させる。検出装置を図4に、印加電圧の変更アルゴリズムを図5に示す。圧電素子aとbへの印加電圧を等しくし、電磁石Aの方向に直進させる制御を行うが、外乱によって進行方向が変わった場合の印加電圧を変更することによって、姿勢を補償する。電磁石Aの方向をy軸方向、電磁石BとCが作る直線をx軸方向とした。

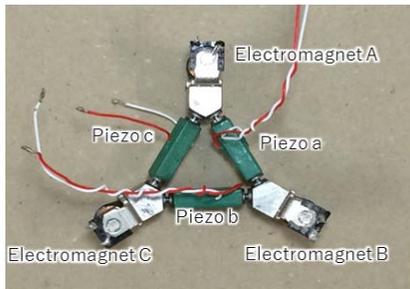


図3 正三角形のインチワーム

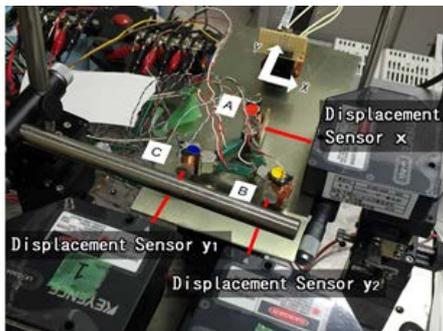


図4 位置制御システム

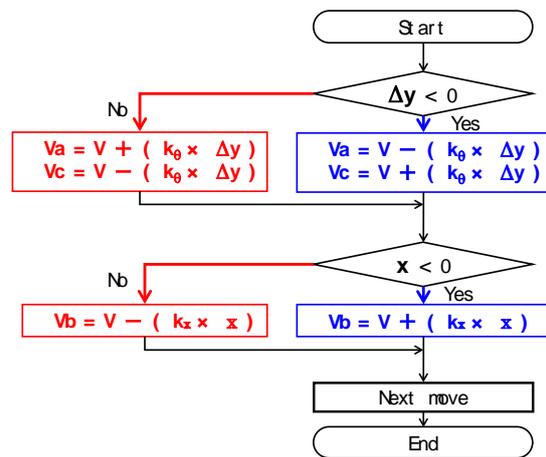


図5 圧電素子の電圧制御アルゴリズム

4. 研究成果

六員環形状の多自由度インチワームの負荷特性を図6に示す。負荷を搭載したときの回転角度の変化を求めた。負荷が0g(無負荷)から60gに増加するにつれて1周期あたりの角度変位が減少することがわかる。この実験結果では負荷が80gになると動作不可能になることが明らかになった。

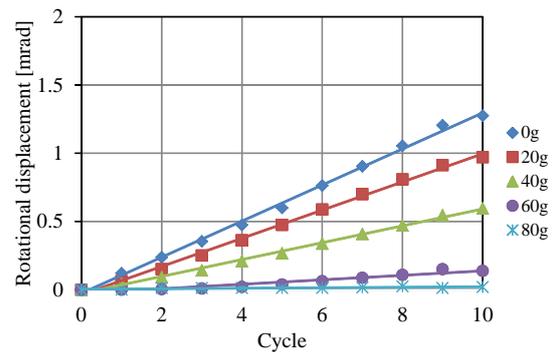


図6 負荷特性

浮上機構の圧電素子を適切な周波数で駆動させ、入力電圧を変えたときの浮上量を図7に示す。ここでは周波数を10kHzとした。振動振幅が小さいとき、すなわち、印加電圧が小さいときは浮上が生じない。しかし、約1.4Vを超えると印加電圧の増加にしたがって浮上量が増加することがわかる。印加電圧を変更することによる浮上量の制御が可能と考えられる。

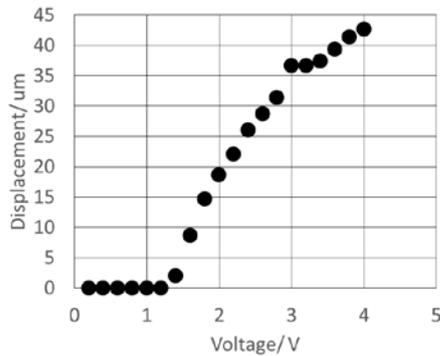


図7 浮上特性

また、浮上量と消費電力を求めた結果を図8に示す。浮上が生じた状態では消費電力が大きくなっていることがわかる。このことより、消費電力を観測することによって、浮上量を推定できる可能性を示している。

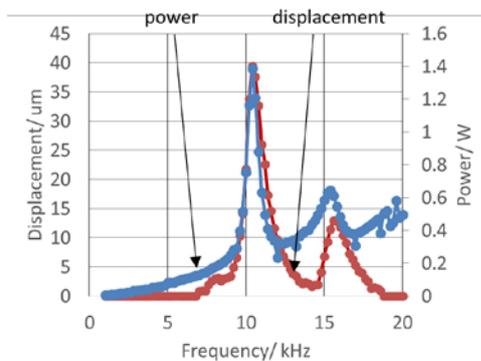
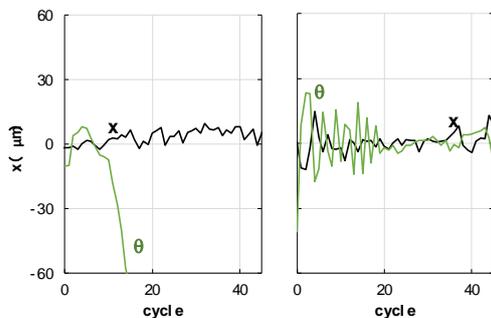


図8 浮上と消費電力の周波数特性

正三角形形状のインチワームの位置姿勢制御の結果を図9に示す。制御を行わないときは、姿勢 (θ) が大きく負の側に移動することがわかる。一方、制御を行うことによって θ がゼロ付近にとどまっている。摩擦の状態は推定することが困難であるため摩擦をモデル化しない制御を行った。圧電素子の伸縮量を変化させてインチワームの姿勢変化を補償した。適切な伸縮量の決定法の解明が必要である。



フィードバック無 フィードバック有
図9 位置と姿勢の測定結果

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 3 件)

(1) 曾根勝利、鳥井昭宏、元谷卓、道木加絵、
圧電素子の鉛直振動による浮上特性、電気学会論文誌 C、査読あり、135 巻 12 号(2015 年)、
pp. 1481-1485、

DOI:10.1541/ieejieiss.135.1481

(2) 鳥井昭宏、西尾光広、道木加絵、植田明照、
鉛直振動による浮上を用いた 3 自由度インチワーム、電気学会論文誌 C、査読あり、134 巻、11 号 (2014 年) pp. 1716-1723

(3) 上谷亮介、鳥井昭宏、道木加絵、自走式 5 自由度プラットフォームの回転動作と負荷特性、電気学会論文誌 C、査読あり、134 巻、12 号 (2014 年) pp. 1832-1833

[学会発表] (計 25 件)

(1) A. Torii, K. Tanaka, S. Mototani, K. Doki, Levitation characteristics of an actuator in a non-contact mechatronic system, euspen's 17th International Conference & Exhibition, 2017 年 5 月 29 日, Hannover (Germany)

(2) A. Torii, Y. Mitsuyoshi, S. Mototani, K. Doki, Positioning of a 3-DOF inchworm stage with optical navigation, euspen's 17th International Conference & Exhibition, 2017 年 5 月 29 日, Hannover (Germany)

(3) 田中健翔、満吉悠太、鳥井昭宏他、積層型圧電素子を用いた浮上機構の機械的特性と電気的特性、2016 年精密工学会秋季大会学術講演会 J63、2016 年 9 月 6 日、茨城大学(茨城県・水戸市)

(4) Akihiro Torii, Yuta Mitsuyoshi, Suguru Mototani, Kae Doki, The characteristics of an inchworm stage using piezoelectric actuators and electromagnets, euspen's 16th International Conference & Exhibition, 2016 年 5 月 30 日, Nottingham (UK)

(5) Akihiro Torii, Shori Sone, Kae Doki, Suguru Mototani, Levitation caused by vertical vibration of a piezoelectric actuator, euspen's 16th International Conference & Exhibition, 2015 年 6 月 1 日, Leuven (Belgium)

(6) Akihiro Torii, et al., Input signal for levitation caused by vertical vibration of a piezoelectric actuator, American Society for Precision Engineering, Annual Meeting, 2015 年 11 月 1 日, Austin (USA)

(7) 鳥井昭宏、曾根勝利、上谷亮介、道木加絵、振動による浮上を用いた 3 自由度インチワーム、第 26 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム 21Ap3, 2014 年 5 月 21 日、アイーナ岩手県民情報交流センター (岩手県・

盛岡市)

(8) Shingo Ishibashi, Yuta Mitsuyosi,
Akihiro Torii, Kae Doki, Suguru Mototani,
Positioning of a Movable Stewart Platform,
2014 International Conference on
Positioning Technology, AC3, 2014年11月
20日, 北九州国際会議場(福岡県・北九州市)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥井 昭宏 (TORII, Akihiro)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：70267889

(2) 研究分担者

道木 加絵 (DOKI, Kae)

愛知工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00350942