

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560245

研究課題名(和文) インチワーム型多自由度アクチュエータの高分解能化と精密位置計測法に関する研究

研究課題名(英文) Study on high resolution inchworm-type multi-DOF actuator and precise position measurement

研究代表者

鳥井 昭宏 (TORII AKIHIRO)

愛知工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70267889

研究成果の概要(和文): 電磁石の吸着と圧電素子の伸縮を用いたインチワーム型アクチュエータを開発した。6個の圧電素子を組合せ、複雑な動きが可能になった。基板に形成した周期形状が移動量を変化させた。表面形状を用いた高分解能化が期待できる。位置計測素子をアクチュエータに搭載し、レーザー光源の位置を基準にアクチュエータの位置を計測した。数ミクロンの精度で位置計測ができた。光学系と検出回路の改善により位置計測精度の向上が期待できる。

研究成果の概要(英文): An inchworm-type actuator, which was operated by the adhesion of electromagnets and deformation of piezoelectric elements, was developed. Flexible motion could be realized by six combined piezoelectric elements. Six-DOF motion was realized by the principle of a parallel mechanism and three-DOF displacement was realized by the principle of an inchworm. The position of the actuator was measured by the use of laser light sources and position sensitive detectors, which were installed on the actuator. The position was measured by the position of the light sources and the output of the detectors. The accuracy was about a few microns.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：インチワーム、超精密位置決め、超精密位置計測、圧電素子、位置計測素子、アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

(1) これまでに、研究代表者・鳥井は、マイクロメートル・サブミクロンの微小動作を行うインチワーム型アクチュエータの開発を行ってきた。微小動作の検証手段として、半導体位置計測素子を用いた位置計測技術の開発を行ってきた。

(2) メカトロニクス分野における重要な研究課題として、サブミクロン以下の微小動作を発生する移動機構の実現が望まれていた。さらに、単体のアクチュエータは一方(一自由度)の変位を発生するため、それらを複数組み合わせた多自由度アクチュエータが必要であった。すなわち、多自由度かつ微小動作を実現する精密多自由度アク

チュエータが要求されていた。

(3) 一般の変位センサは一自由度の変位を計測する。多自由度動作を行うアクチュエータの変位検出には、自由度に対応した変位センサを組み合わせる必要があった。そこで、多自由度の変位を検出するためのセンサシステムの開発が望まれていた。多自由度アクチュエータの動作結果の、精度良い計測が必要とされ、精密多自由度変位計測システムの開発が望まれていた。

2. 研究の目的

(1) 先に開発したインチワームの移動性能は、変位を発生する要素である圧電素子の性能に依存した。そこで、移動性能の向上を試みる一環として、移動表面の形状がインチワームの移動性能に及ぼす影響を明らかにする。

(2) インチワームの動作方向(自由度)は、使用する圧電素子の数によって決まる。多数の圧電素子を組み合わせることによって、複雑な動作が可能な多自由度アクチュエータを開発する。具体的には6個の伸縮型の積層圧電素子を接続したアクチュエータを製作し、並進3自由度、回転3自由度の合計6自由度の微動動作が可能であることを明らかにする。

(3) アクチュエータの動作は、位置センサまたは変位センサによって検証される。一般に、これらのセンサは1方向(1自由度)の動作を計測する。そのため、多自由度動作を計測するためには自由度と等しい数の変位センサが必要となる。そこで、多自由度変位計測を行うためのセンサシステムの開発を行う必要がある。平面内での並進2自由度と回転1自由度の計測を行うために、3個の位置検出素子をアクチュエータに搭載し、周囲に光源を配置する。このセンサシステムを用いてアクチュエータの位置を計測するシステムが実現可能であることを示す。

3. 研究の方法

(1) 2個の電磁石の間に1個の圧電素子を挟んだインチワーム型アクチュエータを製作する。電磁石は動作基板との間の吸着力を発生する。圧電素子は積層型圧電素子を使用し、移動方向(電磁石の取り付けられた方向)に伸縮する。電磁石の吸着のオンとオフ、圧電素子の伸びと縮みのタイミングを制御し、インチワームの動作原理によって水平変位を得る。動作平面にはステンレス板を使用し、フライス盤を用いた機械加工によって周期形状を形成する。周期構造を有する基板上でインチワームを動作し、周期形状の向きとイ

ンチワームの変位量の関係を求める。

(2) 長手方向に変形する6個の積層型圧電素子を六員環状に接続した6自由度アクチュエータを製作する。この形状はスチュワートプラットフォームと呼ばれるパラレルメカニズムの一種である。所望のプラットフォーム面の動作から、各リンクを構成する圧電素子の変形量を計算によって求める。この計算は逆運動学演算を利用し、各圧電素子の変形量は容易に求められる。圧電素子に変形を印加電圧に比例すると仮定し、制御用電圧を決定する。電圧を与えたときのプラットフォーム面の変位を、非接触光学変形を用いて求める。プラットフォーム面の変位は6自由度変位であるが、1自由度変位センサを組み合わせることで6自由度の変位を求める。

(3) 上記(2)で製作したアクチュエータは、基板上に3か所で接触している。各接点に電磁石を配置することによって、インチワームの原理で動作する。インチワームの原理を採用することにより、動作基板上で並進2自由度と回転1自由度の動作が可能になり、動作範囲に制限がない。インチワームの原理に基づく並進2自由度と回転1自由度の変位を測定する。

(4) 上記(2)で製作したアクチュエータのプラットフォームは、6自由度動作が可能である。この動作を計測するためには、6個の変位センサを配置しなければならないが、計測システム構成上の制約が存在する。そこで、第1段階としてアクチュエータの並進2自由度、回転1自由度の変位を計測するシステムを開発する。アクチュエータに3個の位置検出素子を搭載し、アクチュエータの周囲に3個の線状レーザを配置した計測システムを提案する。線状レーザは正三角形に配置されたりニアステージに搭載される。線状レーザの位置と、位置検出素子の検知するレーザ光線の位置を用いて、幾何学的考察に基

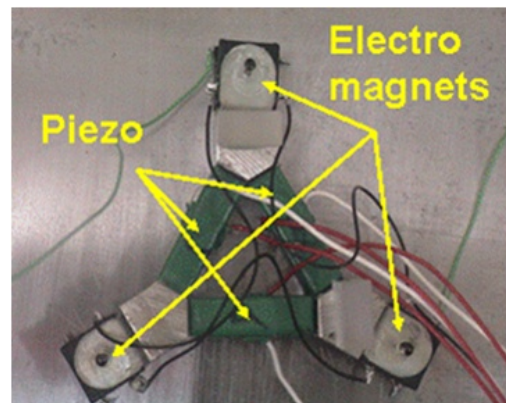


図1 平面3自由度アクチュエータ

づいてプラットフォームの位置（並進2自由度）と角度（回転1自由度）を検出する。

4. 研究成果

(1) 製作したインチワーム型アクチュエータを図1に示す。圧電素子(Piezo)を正三角形に組み合わせた構造であり、正三角形の頂点に電磁石(Electromagnet)を取り付けた。電磁石の吸着のタイミングと、圧電素子の伸縮のタイミングを制御することにより、並進2自由度、回転2自由度を行う。このアクチュエータを図2の基板上で動作させた。ステンレス製の平板をフライス盤にて加工し、表面に円状の表面形状を形成した。円の直径は20mmで、深さは0.1mmとした。図2中の横方向(H方向)、縦方向(V方向)および、形成されていない平坦基板上(F)の上で、図1のアクチュエータを動作させ、変位を計測した。結果を図3に示す。1ステップあたりの変位量は、V方向が最大で1.70 μm であるが、H方向と平坦基板上では、1.65 μm 程度となっている。このことは、基板の表面形状がアクチュエータの変位量に

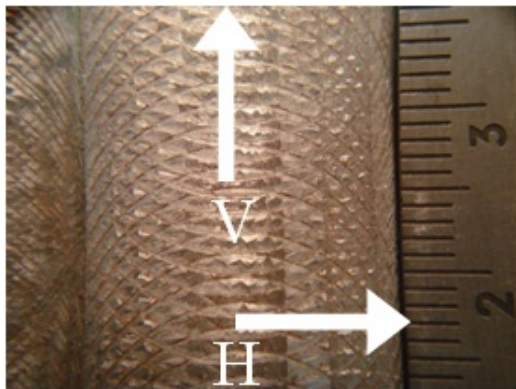


図2 基板表面形状

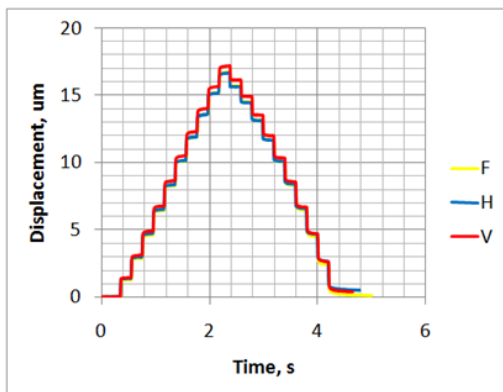


図3 表面形状と直線変位

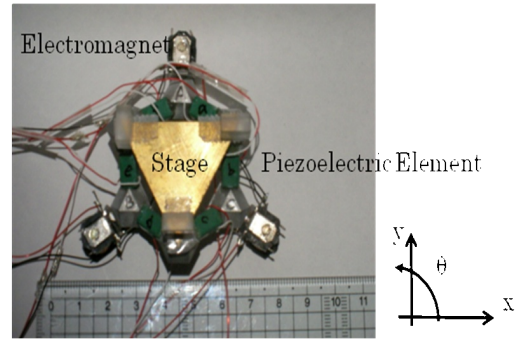


図4 平面3自由度アクチュエータ

影響を及ぼすことを示唆している。表面形状による電磁石の位置保持能力とあわせて、今後、インチワーム型アクチュエータの精密動作に应用可能であると期待される。

(2) 製作したインチワーム型多自由度アクチュエータを図4に示す。6個の圧電素子(Piezoelectric Element)を六員環状に接続した。基板に接触している3か所に電磁石(Electromagnet)を取り付けた。電磁石は位置の保持に、圧電素子は変位の発生に用いられる。三角形のステージ面(Stage)の微動は、3個の電磁石を基板に吸着させた状態で発生する。6個の積層型圧電素子には、所望の伸縮を発生する電圧を与える。使用し

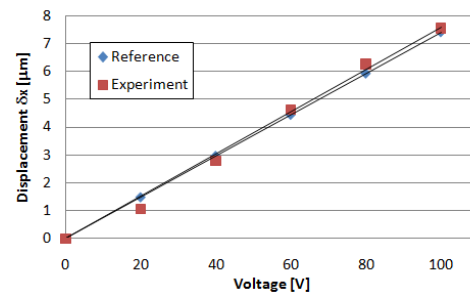


図5 X方向微小並進変位

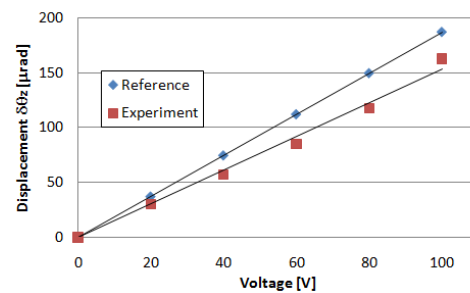


図6 z方向微小角度変位

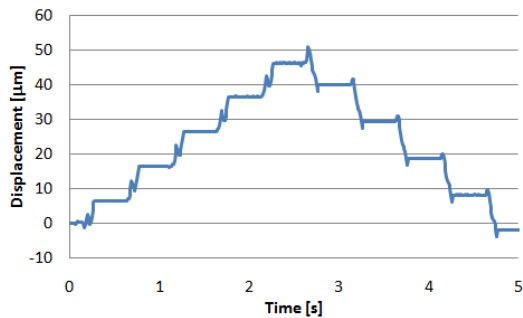


図7 X方向インチワーム変位

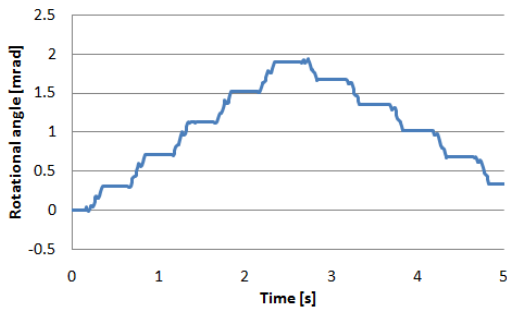


図8 z方向インチワーム角度変位

た圧電素子の特性から、 $6\mu\text{m}/100\text{V}$ として印加電圧を決定した。ステージ面の微小変位を図5と図6に示す。図5はX方向の微小並進変位を、図6は回転方向の微小角度変位を示す。図中の参照値 (Reference) は、所望の微小変位を示す。圧電素子への印加電圧を変えながら微小な変位を測定したところ、数ミクロンと数マイクロラジアン程度の微小な並進と回転動作が確認できた。微小変位は圧電素子への印加電圧に比例した。角度変位では参照値よりも実験結果が小さな値となっている。これは電磁石と圧電素子の接続部分の剛性に影響を受けていると考えられる。微小な6自由度変位が発生できたことから、複雑な動作を精度良く実現するアクチュエータとしての応用が期待される。

(3) 上記(2)で製作したアクチュエータの、インチワーム動作による変位を測定した。並進2自由度、回転1自由度の動作は、3個の電磁石と圧電素子の伸縮のタイミングを制御することにより発生した。並進動作の一例を図7に、回転動作の結果を図8に示す。X軸方向への並進動作は約 $9\mu\text{m}$ ステップであり、回転動作は約 0.4mrad ステップとなっている。これらの値は図5、図6の値よりも大きい。したがって、パラレルメカニズムの原理を用いた微小変位と、インチワームの原理を用いた粗動変位の使い分けによって、粗動

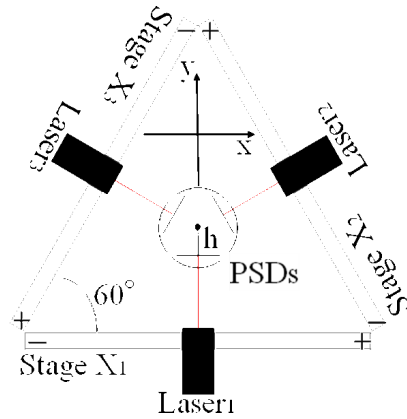


図9 並進2自由度、回転1自由度計測システムの概念図

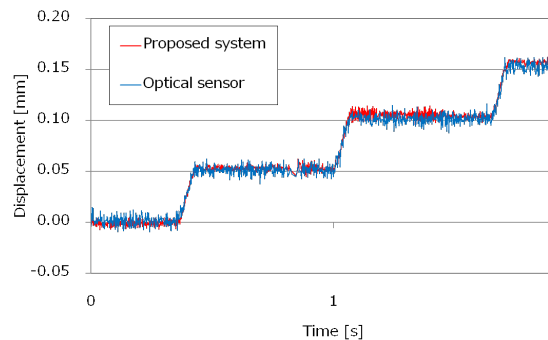


図10 位置計測結果

と微動が可能な6自由度アクチュエータとして、今後の開発が期待される。

(4) 移動用アクチュエータ上に3個の位置検出素子 (PSD) を搭載して、アクチュエータの位置を計測した。アクチュエータの周囲に3個の線状レーザを配置し、各線状レーザはリニアステージによって位置を移動する。計測システムの概念図を図9に示す。リニアステージによって移動する線状レーザの位置 (X_1, X_2, X_3) と3個のPSDの出力からアクチュエータの位置を求めた。位置の検出は、幾何学的考察によって容易に求めることができる。直線変位と回転変位の計測を行った。結果の一例として、直線変位の計測結果を図10に示す。位置の参照用ステージにアクチュエータを搭載して移動した。提案システムを用いた計測結果 (Proposed system) と市販の1自由度光学変位計 (Optical sensor) を用いた計測結果を比較した。 $50\mu\text{m}$ のステップ変位が計測できていることがわかる。両者の結果に含まれるノイズ成分が同程度であ

ることから、市販の光学変位計と等しい精度で検出できていることがわかる。今後は、計測精度の評価を行った上で、多自由度同時計測への拡張が可能になる。

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)

鳥井昭宏、見學知史、山田智弘、植田明照、道木加絵、鉛直振動による浮上を用いたインチワーム型移動機構、電気学会論文誌C、査読有、130巻、2010、2135-2141
鳥井昭宏、坂野正昭、植田明照、道木加絵、自走可能な小形スチュワートプラットフォーム機構、電気学会論文誌C、査読有、130巻、2010、660-667
鳥井昭宏、植田明照、道木加絵、すり足動作する三足ロボットの制御法、電気学会論文誌C、査読有、129巻、2009、467-474

[学会発表](計19件)

鳥井昭宏他2名、電流検出に基づく圧電アクチュエータの変位推定、電磁力関連のダイナミクスシンポジウム、2010年5月19日、門司港ホテル(福岡県)
A. Torii 他3名、Friction control using ultrasonic vibration for piezoelectric translation apparatus、Int. Conf. of euspen、2010年6月2日、Delft(オランダ)
板津佑樹他2名、電流検出による圧電アクチュエータの変位推定、精密工学会秋季大会、2010年9月28日、名古屋大学(愛知県)
見學知史他2名、圧電素子の高周波振動による摩擦力制御機構を用いたマイクロロボット、精密工学会秋季大会、2010年9月28日、名古屋大学(愛知県)
山田智弘他2名、可動灯台を用いた移動ロボットの位置計測法 - 第2報、精密工学会秋季大会、2010年9月29日、名古屋大学(愛知県)
A. Torii 他3名、Position measurement for miniature robot using moving line lasers、ASPE、2010年11月2日、Atlanta(USA)
S. Kengaku 他2名、The inchworm type self-propelled microrobot using a vibration type friction control mechanism、MHS2010、2010年11月9日、名古屋大学(愛知県)
板津佑樹他2名、電流検出による圧電アクチュエータの変位推定 - 第2報、精密工学会春季大会、2011年3月14日、東洋大学(東京都)

見學知史他2名、圧電素子の高周波振動による摩擦力制御を用いたマイクロロボット - 第2報、精密工学会春季大会、2011年3月14日、東洋大学(東京都)
山田智弘他2名、インチワーム型5自由度アクチュエータの提案、電気学会全国大会、2011年3月17日、大阪大学(大阪府)

A. Torii 他3名、A flexure-based planar positioner with friction controllable element、Int. Conf. of euspen、2009年6月4日、San Sebastian(スペイン)

A. Torii 他3名、A microactuator based on an inchworm with friction control device、ASPE、2009年10月6日、Monterey(USA)

A. Torii 他3名、A method for measuring position of an inchworm-type microrobot、Int. Conf. of ASPEN、2009年11月11日、福岡市(福岡県)

坂野正昭他2名、圧電素子を用いたスチュワートプラットフォーム形自走マイクロロボット - 第9報、精密工学会秋季大会、2009年9月10日、神戸大学(兵庫県)

見學知史他2名、振動型摩擦力制御機構を用いたインチワーム型マイクロロボット、精密工学会春季大会、2010年3月16日、埼玉大学(埼玉県)

坂野正昭他2名、可動灯台を用いた移動ロボットの位置計測法、精密工学会春季大会、2010年3月17日、埼玉大学(埼玉県)

M. Banno 他4名、A position measurement method for a miniature robot using three moving landmarks、Int. Conf. on Machine Automation (ICMA2008)、2008年9月26日、兵庫県淡路市

A. Torii 他4名、Improvement of positioning performance of an Inchworm-type microrobot、Int. Conf. on Positioning Technology (ICPT 2008)、2008年11月26日、浜松市

鳥井昭宏他2名、インチワーム型多自由度アクチュエータの変位計測、電気関係学会東海支部連合大会、2008年9月19日、愛知県立大学(愛知県長久手町)

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・准教授
研究者番号：70267889

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：