

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05768

研究課題名(和文) 長ストロークと高精度の両立可能な、特殊加工用5自由度磁気浮上アクチュエータの研究

研究課題名(英文) a 5-DOF controlled, long-stroke, high-precision maglev actuator for non-traditional machining

研究代表者

張 曉友 (Zhang, Xiaoyou)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：30431985

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、長ストロークと高精度、5自由度制御型磁気浮上アクチュエータの構成と駆動原理を検討し、アクチュエータの設計と試作を行った。提案アクチュエータは並進方向に4mmのストローク、1 μ mの位置決め分解能、101Hz(径方向)と70Hz(軸方向)のバンド幅を実現した。また、傾き方向には、70mradのストローク、25 μ radの位置決め分解能、40Hz以上のバンド幅を実現した。

次いで、磁気駆動アクチュエータを用いて穴の放電加工を行い、高速ギャップ制御による加工速度向上への有効性を検証した。また、多自由度方向に制御可能なアクチュエータの研磨加工への応用を検討した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a long-stroke, high-precision, 5-DOF controlled maglev actuator is designed and fabricated. The developed actuator has a positioning resolution and positioning stroke of the developed actuator are 1 μ m and 4mm in the translational directions, 25 μ rad and 70mrad in the rotational directions, respectively. The bandwidth is 101 Hz in the radial directions, 70Hz in the thrust direction, 40Hz in the rotational directions.

A magnetic drive actuator attached to a conventional electrical discharge machine is used to machine micro holes, the effect on the stability and speed of electrical discharge machining was verified. The maglev actuator can improve the average machining speed by 138% in comparison with using only a conventional electrical discharge machine. Moreover, the maglev actuator is used to polishing process to realize the motion control of the polishing tool in multi DOF directions and the polishing force control.

研究分野：工学

キーワード：磁気浮上 アクチュエータ 放電加工 研磨加工

1. 研究開始当初の背景

近年、難削性材料をより高能率に、より高精度に、より高品位に加工することが求められている。そこでは、放電加工が重要な役割を果たしている。

放電加工では、電極と加工物の距離（極間距離）は、放電による加工物の除去によって、常に変化しており、極間距離が適性に保たれないため、放電確率を向上できず、十分な加工速度が得られない。また、微小な極間距離を高精度に保つことが困難なため、放電距離を大きく取らざるをえず、放電を行うための一回あたりのエネルギーが大きくなり、その結果、加工精度が低下し、表面あらさが粗くなる¹⁾。

加工速度や加工精度を向上するため、圧電素子²⁾や磁気軸受³⁾などを用いた電極の軸方向のみに高速駆動を可能にした機構が提案されている。ところで、放電加工に求められる加工形状はさまざまであり、形状によっては、電極運動は加工方向のみの自由度だけでは不十分である。また、電極取り付け後の多自由度の姿勢補正機能や微細楕円穴、テーパ穴加工のための多自由度の位置決め、姿勢制御機能も求められている。このように多様な要求に応えるために、電極を高速、高精度に5自由度制御可能とする必要がある。

一方で、現在、複雑あるいは微細の部品・金型の細部・内面の研磨、および微細バリの処理などは、手作業に頼らざるを得ない場合が多い。これらの作業を自動化して作業時間や人件費などを抑えるためには、高精度、高速、多自由方向に制御できるアクチュエータが必要である⁴⁾。

2. 研究の目的

本研究では、長ストロークと高精度位置決めを両立できる5自由度制御型磁気浮上アクチュエータの開発、および磁気浮上アクチュエータを用いた、放電加工と研磨加工の高速化、高精度化、微細化の実現を目的としている。

3. 研究の方法

(1)長ストロークを実現できる案内方法の検討：ロータの5自由度方向の大ストロークを実現するため、空心コイルと永久磁石からなるボイスコイルモータ型の案内機構を採用する。

(2)アクチュエータの設計と試作：有限要素解析ソフトを用いて、コイルと永久磁石の寸法を探索し、5自由度制御型磁気浮上アクチュエータを設計・試作する。

(3)アクチュエータの制御系の検討：高速、高精度な位置決め・軌跡制御を実現する可能な、アクチュエータの制御系・電気系を検討して構築する。

(4)アクチュエータの位置決め性能の評価：アクチュエータの目標値特性、位置決め分解能、ストロークを検討する。

(5)磁気駆動アクチュエータを用いた放電加工：磁気駆動アクチュエータの適用による放電加工速度の向上への有効性の検証を行う。

(6)磁気浮上アクチュエータを用いた研磨加工：多自由度方向に制御できる磁気浮上アクチュエータを用いて研磨工具を位置と力制御を行い、部品の微細部の精密研磨への応用を検討する。

4. 研究成果

(1)長ストロークを実現できる案内方法の検討：加工屑排出のための電極のジャンプ動作、および楕円などの複雑形状を有する微細加工を実現するため、スピンドルの三つの並進方向には、ミリメートルオーダーのストロークが必要である。このため、ボイスコイルモータ型の案内機構を採用する。

図1に提案する5自由度制御型磁気浮上アクチュエータの原理図を示す。軸に取り付ける永久磁石の上下に、2個で1セットとする8個ずつのコイルが配置される。永久磁石は電磁軟鉄を挟んだ三段構造となっている。上下は極性の異なるリング状の磁石であり、中央はリング状の電磁軟鉄である。この構造により磁束を集中することが可能となる。

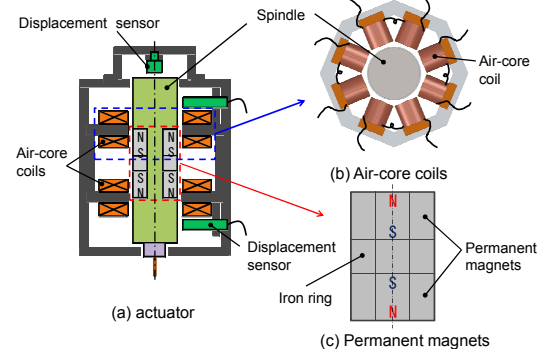


Fig. 1 Configuration of maglev actuator

図2(a)のように、右側のコイルと永久磁石間に吸引力を発生させ、左側には反発力を発生させることによって浮上物のX方向の運動を制御できる。Y方向の運動制御も同様である。一方で、図2(b)のように上下のコイルが発生した電磁力の方向が逆になる場合、Y軸周りの回転運動を制御できる。また、図2(c)のように上側のコイルと永久磁石間に吸引力を発生させ、下側には反発力を発生させることによって浮上物のZ方向の運動を制御できる。

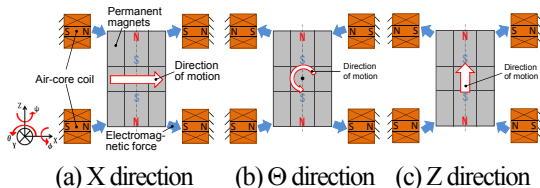
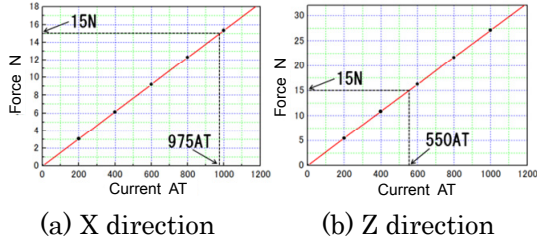


Fig. 2 Driving principle of actuator

(2)アクチュエータの設計と試作：永久磁石とコイルの材質をそれぞれネオジウムと銅に、電磁力の目標値を15Nにして、磁場解析を行い磁石とコイルの寸法を探索する。その結果、永久磁石の外径が45mm、長さが20mm、内径

が 30mm になり、電磁軟鉄の長さが 10mm となった。また、コイルの外形が W20×D20×H30mm、銅線列の厚さが 7.5mm になった。図 3 にコイルの電流と発生する電磁力の関係を示す。解析結果から X 方向ではコイル電流を 975AT、Z 方向では 550AT にして、目標値 15N の電磁力を発生できる。



(a) X direction (b) Z direction
Fig. 3 Relationship between electromagnetic force and current

図 4 に試作アクチュエータとその主軸を示す。アクチュエータの高さは 190mm、幅は 134mm、質量は 8.0Kg である。ロータの長さは 148mm、径は 45mm、質量は 0.7Kg である。1 セットの空芯コイルは、670 巻きであり、永久磁石の材質は Nd2Fe14B である。主軸のスラスト方向の変位は 1 個の渦電流式変位センサ (PU-09, AEC Corp., 測定範囲±2.0mm, 分解能 1.0μm) で測定され、ラジアル方向の変位は 4 個の渦電流式変位センサ (PU-09) で測定される。

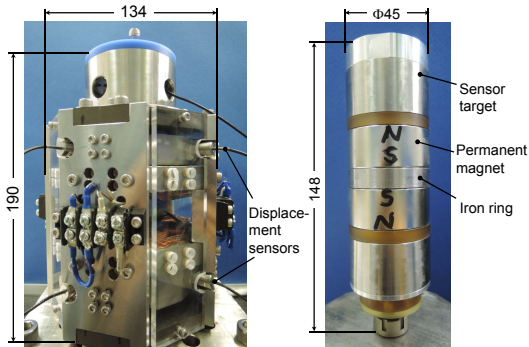


Fig. 4 Experimental maglev actuator and its spindle

(3) アクチュエータの制御系の検討: アクチュエータの各運動方向の制御系は、定常偏差除去を目的とした積分器と、安定化を目的とした分母 2 次分子 2 次のレギュレータから構成される。また、電磁石のバンド幅を拡大させ、コイル電流の遅れを補償するため、電流フィードバックループを導入する。図 5 に X 方向の制御系のブロック線図を示す。図中の、 m はスピンドルの質量、 c は減衰係数、 k は電磁力・変位係数、 L はコイルのインダクタンス、 R はコイルの抵抗、 k_f は電磁力・電流係数、 k_v は逆起電力係数である。

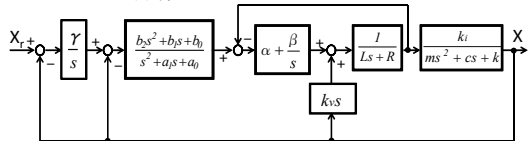


Fig. 5 Block diagram of actuator control system in X direction

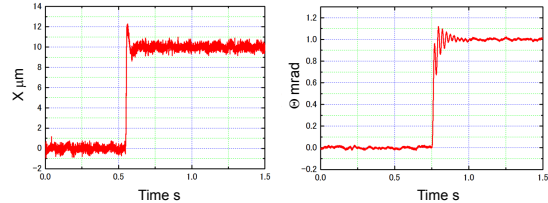
また、制御パラメータ γ , a_0 , a_1 , b_0 , b_1 と

b_2 は、PI コントローラを考慮しない目標値 X_r から変位 X までの、閉ループ伝達関数の極を、複素平面上の実軸上に安定な 1 点に配置することで、自動的に決定される。また、他の方向の制御システムのブロック線図は X 方向と同様のため、省略する。

アクチュエータの制御は DSP システム (DS1103, dSPACE Corp.) を用いて行い、そのサンプリング周波数は 10kHz である。アンプで増幅された、各運動方向の変位センサからのアナログ信号を A/D コンバータ (16bit, ±10V) を介して、DSP ボードに取り込まれ、演算処理が行われる。演算後の制御信号は D/A コンバータ (16bit, ±10V) を介してリニアアンプで増幅され、コイルに印加される。ラジアルとスラスト磁気軸受には、最大出力 ±35V, ±4A のリニアアンプを用いる。電磁石に流れている電流は、電流センサによって測定し電流フィードバック制御を行う。

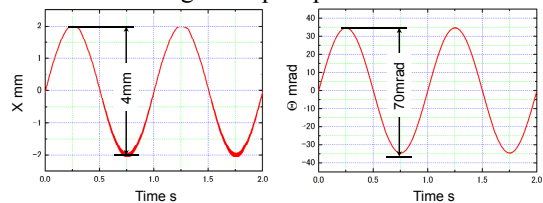
(4) アクチュエータの位置決め性能の評価: 図 6 に X と Θ 方向のステップ応答を示す。実験結果から明らかのように、両方向には 20% 程度のオーバーシュートが見える。放電加工に用いたとき、電極が加工物との衝突を避けるため、オーバーシュートをなくすように、今後は制御パラメータをさらにチューニングする必要がある。

また、図 7 に示すように X と Θ 方向において、4 mm と 70mrad のフルストロークが実現できた。放電加工のとき、加工穴の直径を調整できるし、楕円穴などの微細加工を実現できると考えられる。さらに、図 8 と 9 から、X と Θ 方向においては位置決め分解能は 1.0μm と 20μrad、ハンド幅は 101Hz と 45Hz を有することが明らかになった。提案する磁



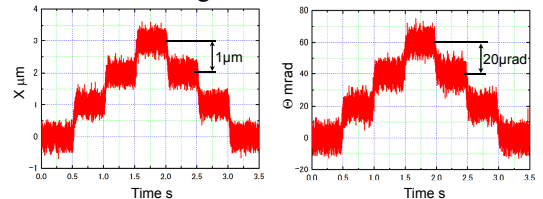
(a) X direction (b) Θ direction

Fig. 6 Step responses



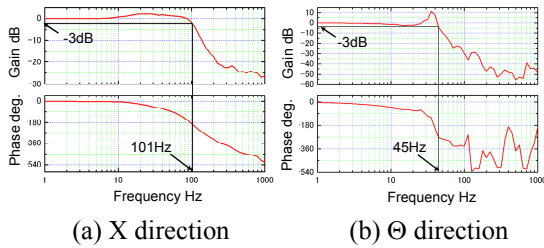
(a) X direction (b) Θ direction

Fig. 7 Full strokes



(a) X direction (b) Θ direction

Fig. 8 Positioning resolutions



(a) X direction (b) Θ direction

Fig. 9 Frequency responses

気浮上アクチュエータの位置決め性能がまとめられ、表 1 に示される。

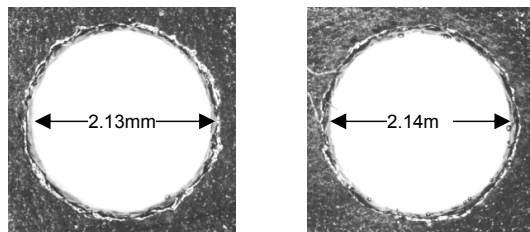
Table 1 Positioning performance of actuator

	Stroke	Positioning resolution	Bandwidth
X direction	4mm	1 μ m	101Hz
Y direction	4mm	1 μ m	101Hz
Z direction	4.8mm	1 μ m	70Hz
Θ direction	70mrad	20 μ rad	45Hz
Φ direction	70mrad	25 μ rad	42Hz

(5) 磁気駆動アクチュエータを用いた放電加工：3年前開発した、電極の加工方向に高速・高精度に位置決め可能、加工方向と垂直な平面内で千ヘルツ程度の周波数、数マイクロメートルの振幅で加振可能な、3自由度制御型磁気駆動アクチュエータを放電加工に適用し、アクチュエータの高速・高精度制御による放電加工速度の向上への有効性の検証、および電極の振動振幅、振動周波数と加工速度の関係の検討を行った。

まず、放電加工速度の向上への有効性の検証を行った。加工電源回路はトランジスタ回路であり、ピーク電流値が 29.0A、パルス幅が 70.4 μ sec、休止時間が 115.2 μ sec である。また、加工中は、電極(材質：銅、直径：2mm)のジャンプ運動や揺動を行わず、油加工液中(EDF-K, JX Nippon Oil & Energy Corp.)で加工物(材質：SUS304、厚さ：0.5mm)を貫通するまで穴加工を行った。

図 10 に、従来の放電加工機を用いた場合と、磁気駆動アクチュエータのみを用いた場合での加工穴の上面図を示す。図 11 に、計測した加工開始から貫通までの電極の送り量を示す。既存の加工機を用いた加工結果と比べ、磁気駆動アクチュエータを用いた場合、加工穴の径はほぼ同様であるが、加工時間は 124.8 秒から 50.8 秒まで短縮され、試作アクチュエータにより加工時間が 2.46 倍短縮した。また、同じ条件で穴加工実験を 5 回行い、平均加工速度を計算した。磁気駆動アクチュエータより電極と加工物間のギャップが高速に制御でき、平均加工速度が 138% 向上した。



(a) Using conventional (b) Using actuator

Fig. 10 Machined holes

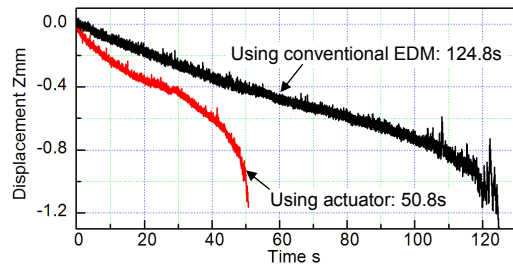


Fig. 11 Feed displacements of electrode

次に、加工方向と垂直な平面内の電極の加振による加工速度向上の検証のため、アクチュエータの X と Y 方向にそれぞれコサイン波とサイン波を入力して電極を円形に振動させた。加振周波数と加振直径をそれぞれ 200~1200Hz、5~20 μ m に変化させ、5 回ずつ穴加工を行った。計算した平均加工速度と加振周波数、加振径の関係を図 12 に示す。各加振周波数において、加振径の増大に伴い、加工速度が向上することが明らかになった。また、加振径を一定とする場合、加振周波数 1000Hz 時に高速加工が実現でき、平均加工速度が無加振時に比べて 74% の向上、従来の放電加工機より 315% 向上した。

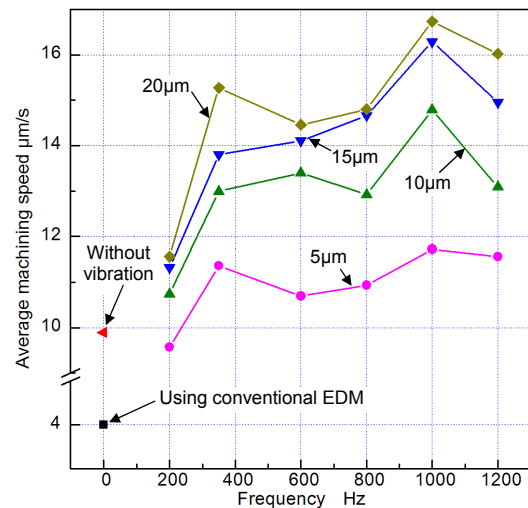


Fig. 12 Relationships between average machining speed, amplitude and frequency of electrode vibration

(6) 磁気浮上アクチュエータを用いた研磨加工：高品質・微細な研磨のため、研磨工具の多自由度方向の位置制御と力制御が求められている。研磨工具の位置と研磨力を同時に制御するため、位置と力の制御システムを設計し、図 13 に示す。工具の位置を制御するため、アクチュエータの各運動方向に搭載した変位センサより測定した工具の変位量をフィードバックする。一方で、研磨力を制御するため、

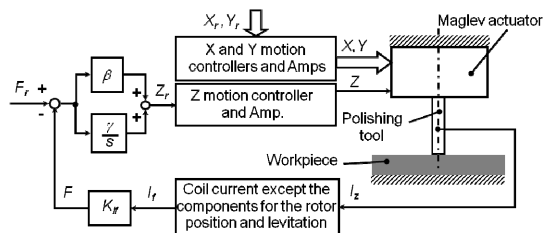


Fig. 13 Block diagram of polishing control system

測定した力とコイル電流の関係を利用して電流制御を行う。

研磨加工には、被加工物を 25°傾斜させ、工具を X 方向に振動させながら研磨力を保持して Y 方向に直線運動する研磨を試みた。研磨工具を砲弾型シリコンゴム砥石に、研磨力の目標値を 5N に、研磨時間を 600s にした。研磨後の加工面粗さは形状解析レーザ顕微鏡 (VK H1XA, Keyence Corp.) で測定した。

図 14 に研磨工具の X, Y 及び Z 方向の軌跡, 図 15 に研磨力を示す。実験結果より、研磨面の位置変化に伴って工具の位置を随時に調整しながら、研磨力を一定の値に維持されていることが確認できた。また、研磨後の被加工面を図 16 に示し、表面粗さ Ra は研磨前の 2.21 μm に対して 1.10 μm まで向上した。磁気浮上アクチュエータのこの機能を生かし、複雑形状を有する部品および金型の細部の研磨や微細バリの処理に応用できると考えられる。

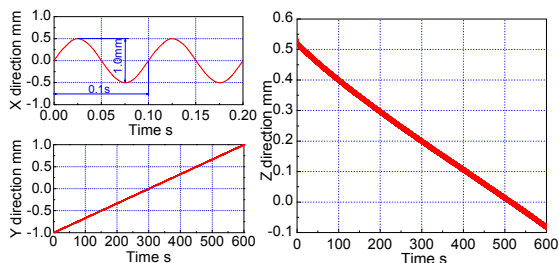


Fig. 14 Trajectory of polishing tool in X, Y and Z directions

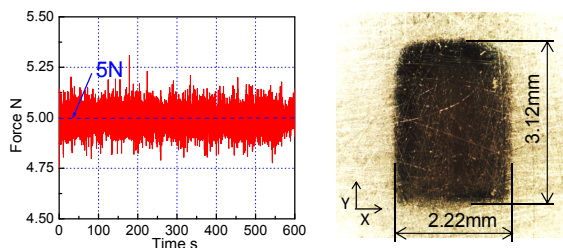


Fig. 15 Polishing force Fig. 16 Polished surface

〔引用文献〕

1. T. Masuzawa, State of the art of micro-machining, Ann CIRP, Vol. 49, No. 2, pp. 473-488, 2000.
2. Y. Imai, A. Satake, A. Taneda and K. Kobayashi, Improvement of EDM machining speed by using high frequency response actuator, Int J Electr, No. 1, pp. 21-26, 1996.
3. 中川孝幸, 三宅英孝, 今井祥人, 戸倉和, 磁気支持型駆動装置による高速微細放電加工モジュールの開発, 精密工学会誌, Vol. 72, No.6, pp. 677-680, 2006.
4. F. Nagata, K. Watanabe, et al., New Finishing System for Metallic Molds Using a Hybrid Motion/Force Control Proc. of 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, pp. 2171-2175, 2003.

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. Yongfeng Guo, Zebin Ling, Xiaoyou Zhang and Yerui Feng, A magnetic suspension spindle system for small and micro holes EDM, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 査読あり, Vol. 94 No.5-8, 2018, pp. 1911-1923. DOI 10.1007/s00170-017-0990-x.

〔学会発表〕 (計 3 件)

1. Yang Liu, Xiaoyou Zhang and Shinichi Ninomiya, Motion Control of Polishing Tool by Using 3-DOF Maglev Actuator, The 7th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2017), CDROM, HSP-P-03, Seoul, Korea, Nov. 14-17, 2017.
2. 劉洋, 二ノ宮進一, 張曉友, 3自由度制御型磁気浮上アクチュエータを用いた精密研磨加工, 第 67 回塑性加工連合講演会講演集, 埼玉, 2016年10月21-23日, 289-290.
3. Xiaoyou Zhang and Kouki Uchiyama, Improvement of EDM Machining Speed by Using Magnetic/Piezoelectric Hybrid Drive Actuator, 4th International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering (CMAME 2016), Chengdu, China, August 25-27, 2016.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○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
張 曉友 (ZHANG, XIAOYOU)
日本工業大学・工学部・教授
研究者番号: 30431985

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし