

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 31 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560169

研究課題名(和文)高速・高精度・大ストロークを有する，放電加工用5自由度制御型アクチュエータの研究

研究課題名(英文) A high-speed, high-precision, long-stroke magnetic drive actuator for electrical discharge machining

研究代表者

張 暁友 (ZHANG, XIAOYOU)

日本工業大学・工学部・准教授

研究者番号：30431985

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では，ミリメートルオーダーのストロークを有する，高速・高精度な3自由度制御型磁気駆動アクチュエータの構成と駆動原理を検討し，大ストロークを実現する可能な磁気軸受を設計した．また，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，その性能評価を行った．試作した磁気浮上アクチュエータは， $1.0\mu\text{m}$ 以下の位置決め分解能，2mmのフルストロークを実現した．また，スラスト方向には100Hz以上のバンド幅，ラジアル方向には50Hz程度のバンド幅を有した．また，試作アクチュエータを従来放電加工機に取り付け，放電加工システムを構築した．

研究成果の概要(英文)：In this research, a three degrees of freedom controlled, wide-bandwidth, high-precision, long-stroke magnetic drive actuator was designed and fabricated. The actuator can be attached to conventional electrical discharge machines to realize a high-speed and high-accuracy EDM. The actuator primarily consists of thrust and radial magnetic bearings, thrust and radial air bearings and a magnetic coupling mechanism. By using the thrust and radial magnetic bearings, the translational motions of the spindle can be controlled.

The positioning performance of the actuator was evaluated by experiments. The magnetic drive actuator possesses a positioning resolution of the order of micrometer, a positioning stroke of 2mm, and the bandwidths greater than 100Hz in the thrust direction, greater than 50Hz in the radial directions. Moreover, the developed actuator was attached to an electrical discharge machine, and the EDM control system for machining the holes was examined.

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：機械要素 放電加工 磁気駆動 アクチュエータ

### 1. 研究開始当初の背景

現在、情報機器、自動車産業、精密機器の分野において、マイクロコネクタ金型、インクジェットノズル、燃料ノズルなどのための、高速・高精度加工や微細加工の要求がある。このため、高速、高精度、高機能の加工方法が期待されている。

機械加工は、よく使われる有効な手法であるが、微小切削のために、鋭利で、十分な強度と剛性を有した微小工具を製作することが、課題として存在する。一方、放電加工は、加工力が微小なため、切削工具と比較した場合、微小工具は比較的容易に実現できる。このような特徴から、放電加工により微小機械部品を加工した多くの研究例が報告されている。しかしながら、加工速度、加工精度、仕上げ面あらさでは、切削加工に劣るなどの問題が存在する。

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、常に変化している。高速加工を実現するためには、放電に適する極間距離を常に保つことが必要である。このため、放電加工機の電極駆動機構には、高い応答性が求められる。しかし、一般的な放電加工機では、電極の多自由度駆動に、1軸ステージの積み重ね機構が用いられており、可動部質量の大きいステージが担う運動方向では、電極の応答性が低い。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。

加工速度や加工精度を向上するため、応答性に優れた圧電素子や磁気軸受などをアクチュエータとして、従来の放電加工機に付加することが提案されている。これらのアクチュエータは、電極の軸方向のみに、高速駆動が可能である。しかしながら、放電加工に求められる加工形状は様々であり、要求される形状に応じて、電極運動の多自由度化が求められている。この要求を応じて、電極の5自由度方向の位置・姿勢が制御可能な磁気浮上アクチュエータを提案された。このアクチュエータは径方向に 200 $\mu\text{m}$  のみのストロークを有するため、楕円などの複雑形状を有する微細加工には不十分である。

### 2. 研究の目的

本論文では、ミリメートルオーダーのストロークを有する、高速・高精度な3自由度制御型磁気駆動アクチュエータの開発、およびそれを用いた放電加工の高速化、高精度化、高機能化、微細化の実現を目的としている。

### 3. 研究の方法

(1)大ストロークを実現するためのロータの案内方法の検討：ロータの3自由度方向の大ストロークを実現するため、磁気軸受と静圧空気軸受を併用した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、磁気軸受と静圧空気軸受の構造を探索して設計する。

(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、軌跡制御特性を検討する。

(5)放電加工制御システムの検討とアクチュエータを用いた放電加工：本研究で使用する加工制御システムでは、電極、加工物間の電圧を検出し、これが予め設定した目標値電圧となるよう、電極位置を調整する。また、試作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確認、ならびに、微細放電加工の有効性の検証を行う。

### 4. 研究成果

(1)大ストロークを実現するためのロータの案内方法の検討：図1に、提案する3自由度制御型磁気駆動アクチュエータの原理図を示す。アクチュエータは主に、スピンドル、可動部、スラストとラジアル磁気軸受、スラストとラジアル静圧空気軸受、および電極に電気を供給するための給電・回転機構で構成されている。

ミリメートルオーダーのストロークを実現するため、本研究では、ボイスコイルモータ型磁気軸受を適用する。スラスト磁気軸受を使用してスピンドルのZ方向の運動を制御する。一方で、スピンドルの径方向と傾き方向の運動は、アクチュエータの上下に配置するラジアル静圧空気軸受によって拘束される。ラジアル磁気軸受は、X方向とY方向にそれぞれ2ペアの電磁石を有する。各ペアの2個の電磁石は、スピンドルを支えている可動部の両側に配置される。2ペアの電磁石の電磁力の向きが同様のとき、スピンドルおよびスピンドルを支えている可動部の並進運動を制御できる。一方で、2ペアの電磁石の電磁力の向きが逆のとき、可動部のZ軸まわりの回転運動が制御できる。また、可動部のZ方向と傾き方向の運動は、アクチュエータの上下に取り付けたスラスト静圧空気軸受によって拘束される。給電・回転機構は、スピンドルに取り付けた電極への電気を供給し、モータからスピンドルへトルクを伝達するために使用する。

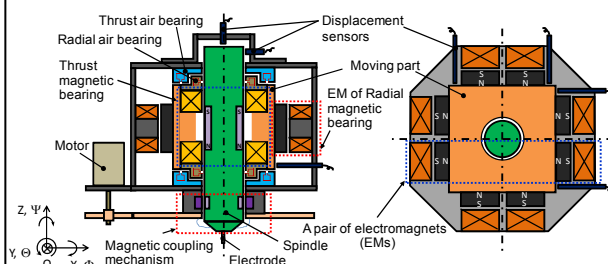


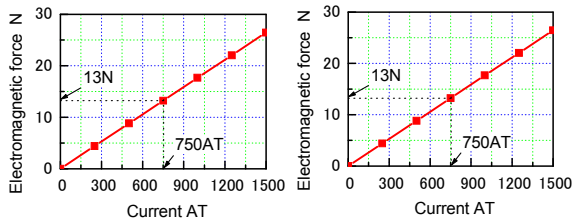
Fig. 1 Configuration of magnetic drive actuator

(2)アクチュエータの設計と試作：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、スラスト磁気軸受とラジアル磁気軸受は、ボイスコイルモータ型磁気軸受を採用する。

スラスト磁気軸受は、図 1 に示すように、スピンドルに配置する永久磁石リングと可動部に配置する 2 個の空芯コイルで構成される。スピンドルの質量を 0.35kg、目標応答周波数を 300Hz、最大補正距離を 10 $\mu$ m とすると、スラスト磁気軸受に要求される最大目標駆動力は 12.5N とする。有限要素モデルを用いた磁場解析ソフトに基づいて、スラスト磁気軸受を設計する。

永久磁石リングの外径と内径を 20mm と 10mm、長さを 26mm にし、計算した電磁力とコイル電流の関係を図 2 (a) に示す。コイル電流が 750Aturns 以上である場合、目標値 12.5N 以上の電磁力を発生できる。

一方で、ラジアル磁気軸受は、可動部に取り付ける永久磁石とハウジングに取り付ける空芯コイルで構成される。スピンドルと可動部の質量の合計を 1.5kg にし、スラスト磁気軸受と同様な性能を有する場合、ラジアル磁気軸受の 1 ペアの電磁石に要求される最大目標駆動力は 30.0N とする。永久磁石の高さを 40mm、幅を 30mm、厚さを 15mm にし、計算した 1 ペアの電磁石の電磁力とコイル電流の関係を図 2 (b) に示す。コイル電流が 3000Aturns 以上である場合、30N 以上の電磁力を発生することができる。



(a) Thrust magnetic bearing (b) Radial magnetic bearing  
Fig. 2 Relationship between electromagnetic force and current

図 3 に、試作した磁気駆動アクチュエータとそのスピンドルを示す。アクチュエータの高さは 124mm、幅は 170mm であり、質量は 9kg である。スピンドルの長さは 121mm であ

り、直径は $\phi$ 20mm、質量は 0.27kg である。スラストとラジアル磁気軸受の空芯コイルは、それぞれ 208 巻きと 588 巻きであり、永久磁石の材質は Nd2Fe14B である。

スピンドルの軸方向と径方向の変位が 3 個の渦電流式変位センサ (PU-05, AEC Corp., 測定範囲 $\pm$ 1.0mm, 分解能 0.5 $\mu$ m), 可動部の径方向の変位は、4 個の渦電流式変位センサ (PU-05) を用いて測定される。スピンドルは、DC モータ、歯車、および磁気カップリング機構により回転される。

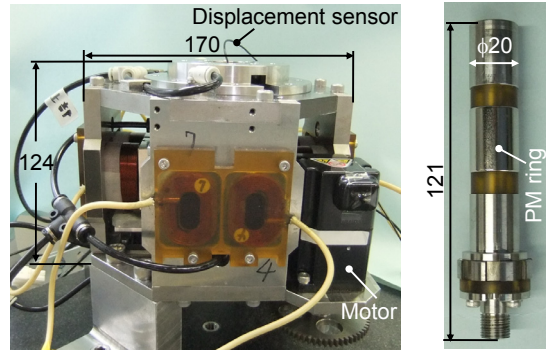


Fig. 3 Experimental magnetic drive actuator and its spindle

(3)アクチュエータの制御系の検討：アクチュエータの制御系は、各自由度間の運動干渉を考慮せず、自由度毎に独立に構成する。Z 方向の制御系のブロック線図を図 4 に示す。その補償器は、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 4 中の、 $m$  はスピンドルの質量、 $c_z$  は減衰係数、 $k_z$  は電磁力・変位係数、 $L_z$  はコイルのインダクタンス、 $R_z$  はコイルの抵抗、 $k_{iz}$  は電磁力・電流係数、 $k_{vz}$  は逆起電力係数、 $k_{ampz}$  はアンプのゲインである。

また、制御パラメータ  $\gamma_z$ ,  $a_{0z}$ ,  $a_{1z}$ ,  $b_{0z}$ ,  $b_{1z}$  と  $b_{2z}$  は、PI コントローラを考慮しない目標値  $Z_r$  から変位  $Z$  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。電流フィードバックループのバンド幅を 160Hz、極の値を 1634 にするとき、制御パラメータと PI コントローラのパラメータを表 1 に示す。また、X 方向と Y 方向の制御システムのブロック線図は Z 方向と同様のため、省略する。

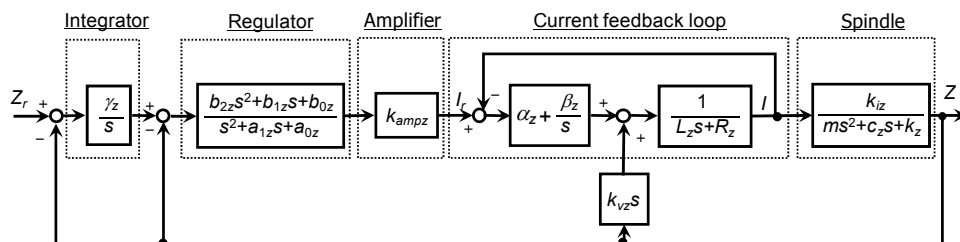


Fig. 4 Block diagram of actuator control system in Z direction

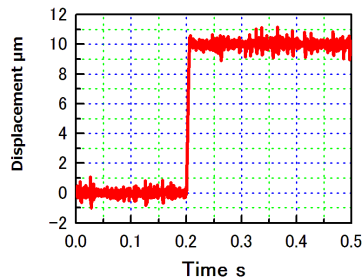


Table 1 Decided parameters of motion controller and PI compensator

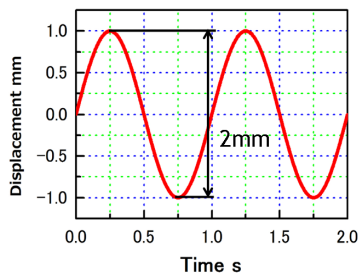
$\gamma_z$	288	$b_{0z}$	$1.79 \times 10^{12}$
$a_{0z}$	$3.12 \times 10^7$	$b_{1z}$	$4.57 \times 10^9$
$a_{1z}$	$8.81 \times 10^3$	$b_{2z}$	$4.69 \times 10^6$
$\alpha_z$	9.9	$\beta_z$	500

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,  $\pm 10V$ ) 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,  $\pm 10V$ ) 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  $\pm 35V$ ,  $\pm 4A$  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。

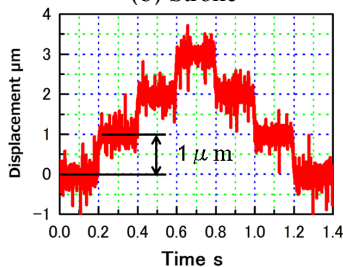
(4) アクチュエータの位置決め性能の評価：図 5 に Z 方向の位置決め性能を示す。図 5 (a) の  $10\mu m$  のステップ応答結果から明らかなように、Z 方向にはオーバーシュートが無く、放電加工に用いたとき、電極が加工物との衝突を避けることができる。また、図 5 (b) に示すように Z 方向において、フルストロークは 2 mm であり、放電加工のとき、電極を



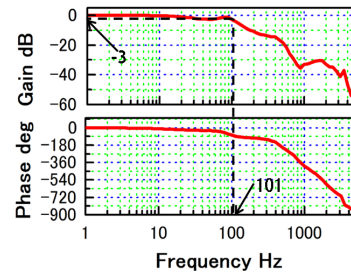
(a) Step response



(b) Stroke



(c) Positioning resolution

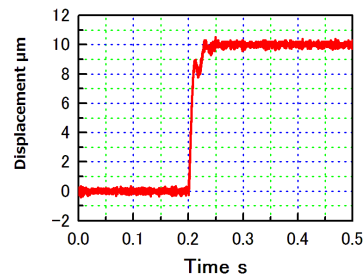


(d) Frequency response

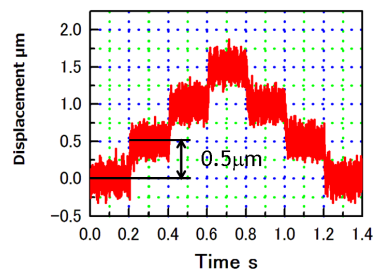
Fig. 5 Positioning performance of actuator in Z direction.

工作物から退避させ、周囲の加工油により、加工屑除去が可能となる。さらに、図 5 (c) と (d) から、Z 方向では位置決め分解能は  $1.0\mu m$ 、ハンド幅は 101Hz を有することが明らかになった。

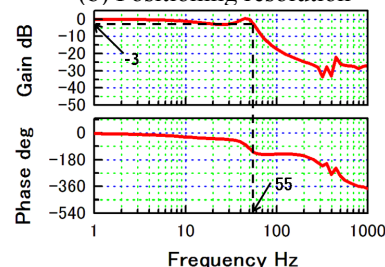
次に、X 方向と Y 方向の位置決め性能を評価する。図 6 (a) に X 方向の  $10\mu m$  のステップ応答を示す。Y 方向は X 方向と同様のため、省略する。Z 方向と同様、X 方向にはオーバーシュートはゼロであった。図 6 (b) には X 方向の位置決め分解能を示す。ラジアル方向に  $0.5\mu m$  の位置決め分解能を実現していた。また、図 6 (c) に示すように、X 方向のバンド幅は 55Hz であった。一方で、図 6 (d) に X 方向に 1Hz の正弦波信号、Y 方向に 1Hz の余弦波信号を与えた、電極の軌跡を示す。実験結果から明らかなように、X 方向と Y 方向には、2 mm のストロークが実現していた。このような電極の揺動運動より、楕円などの複雑な形状を有する微細加工が可能となる。



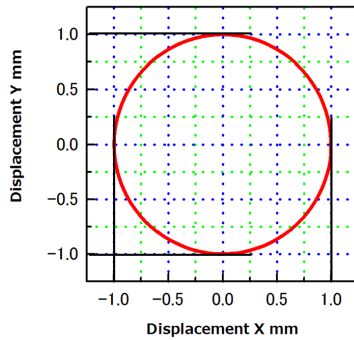
(a) Step response



(b) Positioning resolution



(c) Frequency response



(d) Cylindrical motion of electrode

Fig. 6 Positioning performance of actuator in X direction

(5) 放電加工制御システムの検討とアクチュエータを用いた放電加工：図7は放電加工制御システムのブロック線図である。電極と加工物間の電圧を加工中モニタリングし、これを増幅（ゲイン0.03）、フィルタリング処理（500Hzローパスフィルタ）する。

PIコントローラは、 $V_b$ と目標値電圧  $V_r$ の偏差から、電極の加工方向目標位置  $Z_r$ を生成する。 $Z_r$ は、磁気駆動アクチュエータシステムの目標値として入力される。磁気駆動アクチュエータは、放電に適した極間距離を維持するために電極を駆動する。

また、電極のZ方向の位置制御によりギャップ電圧を制御しながら、同時にXとY方向に目標値  $X_r$ と  $Y_r$ を印加し、電極をXY面内に円運動などをさせ、加工穴の径を補償する。

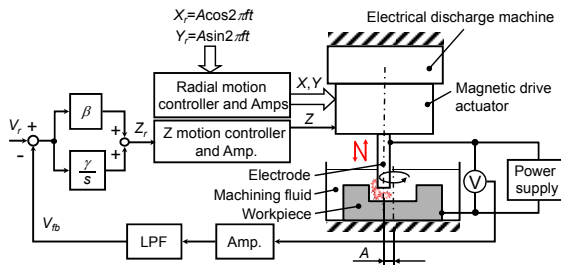


Fig. 7 Block diagram of EDM control system

実験によって放電加工条件、PIコントローラの比例ゲイン  $\beta$ と積分ゲイン  $\gamma$ をチューニングする。今は提案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確認、ならびに、微細放電加工の有効性の検証を行っているところである。

#### 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 2 件)

1. X. Zhang, T. Ishizuka and K. Uchiyama: A 3-DOF Controlled, High-Speed, High-Precision Local Actuator for Micro Electrical Discharge Machining, Applied Mechanics and Materials, 査読あり, Vols. 423-426, (Trans Tech Publications, 2013), p.

2821-2824.

2. X. Zhang, A. Kifuji and D. He: A Magnetic Drive Actuator for Micro Electrical Discharge Machining, Advanced Materials Research, 査読あり, Vol. 591, (Trans Tech Publications, 2012) p. 303-306.

[学会発表] (計 5 件)

1. 田中聡, 張曉友: 大ストロークを有する放電加工用磁気・静圧ハイブリッド駆動アクチュエータ, 2014年度精密工学会春季大会 学術講演会講演集, 東京, 2014年3月20日.
2. 石塚知宏, 内山公貴, 張曉友: 放電加工用高速・高精度3自由度制御型アクチュエータの研究, 2013年度精密工学会秋季大会学術講演会講演集, 大阪, 2013年9月12日.
3. X. Zhang, T. Ishizuka and K. Uchiyama: A 3-DOF Controlled, High-Speed, High-Precision Local Actuator for Micro Electrical Discharge Machining, 2013 3rd International Conference on Applied Mechanics, Materials and Manufacturing (ICA3M 2013), Dalian, China, Aug. 25, 2013.
4. X. Zhang, A. Kifuji and D. He: A Magnetic Drive Actuator for Micro Electrical Discharge Machining, Proceedings of the 2012 International Conference on Manufacturing Engineering and Automation (ICMEA 2012), Guangzhou, China, Nov. 18, 2012.
5. 木藤明世, 張曉友, 何東覚: 大ストロークを有する放電加工用磁気駆動アクチュエータ, 第9回生産加工・工作機械部門講演会, 秋田, 2012年10月27日.

[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・准教授

研究者番号: 30431985

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし