

令和 3 年 4 月 20 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03914

研究課題名(和文) 特殊加工用5自由度制御型磁気・圧電素子ハイブリッド駆動アクチュエータの研究

研究課題名(英文) A 5-DOF Controlled Magnetic/Piezoelectric Hybrid Drive Actuator for Non-traditional machining

研究代表者

張 曉友 (Zhang, Xiaoyou)

日本工業大学・基幹工学部・教授

研究者番号：30431985

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、放電加工の微細化の実現のため、提案する5自由度制御型磁気浮上アクチュエータを従来の加工機に取り付け、放電加工制御システムを検討し、電極を円運動や正方形運動にさせながら放電加工を行い、創成加工への応用の可能性を検討した。また研磨加工においては、磁気浮上アクチュエータを用いた研磨工具の位置と力制御システムを検討し、長方形と台形模様のテクスチャの創成が実現できた。さらに、レーザー切断加工において、レーザービームの光軸の偏心により加工への影響を検討するため、流体解析によるシミュレーションと基礎加工実験を行った。適当なレーザービームの偏心により、加工速度と加工精度を向上できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気軸受の5軸精密位置決め機能に着目し、それを工作機械へ応用できる磁気浮上アクチュエータより、電極の5自由度制御による創成加工や微動動作によるマイクロ加工を目指すことができる。また研磨工具の多自由度方向の位置制御と力制御で、高品質・微細な研磨を期待できる。さらにレーザービーム光軸の多自由度方向の制御により、レーザー加工の高速化・微細化を目指す。

5自由度制御型アクチュエータの開発より、マイクロレンズ金型やマイクロコネクタ金型などの製作に寄与し、自動車産業、情報・医療機器などに大きく貢献できる。また、開発アクチュエータを精密微細研磨加工や高精度・高効率化レーザー加工などの分野への展開ができる。

研究成果の概要(英文)：In this research, a proposed 5-DOF controlled maglev actuator was attached to a conventional machine and a control system for EDM was designed. EDM experiments were carried out and the experimental results seen that the machining shapes could be adjusted in proportion to the variation of the motion trajectory of the electrode. In polishing process, to realize the motion control of a polishing tool in multi DOF directions and the polishing force control by using the proposed actuator, a hybrid motion/force control system was designed, and the polishing experiments of the rectangular and trapezoid pattern texture maps were tried using diamond tools. Furthermore, in laser cutting, to examine the influence of the laser beam eccentricity on cutting process, based on fluid dynamics, the eccentricity laser cutting process were simulated and verified by cutting experiments. The results show that the appropriate eccentricity can effectively improve the quality of the laser cutting.

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 レーザ加工 研磨加工

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

放電加工の高速化・高精度化、微細化のためには、放電に適した加工物・電極間距離の連続的な維持が不可欠であり、そのために電極の高速・高精度な位置決めと姿勢制御が必要となる。従来の放電加工機では、電極駆動を多自由度化するため、1軸ステージの積み重ね機構となる。これにより各ステージの可動部質量が大きくなり、応答周波数が低くなっている¹⁾。加工速度や加工精度を向上するため、電極を高速、高精度に5自由度制御可能とするアクチュエータが必要となる。

また、部品表面の微細バリの処理、内面の研磨、およびテクスチャの創成などは、作業や検査に熟練を要するため、手作業によって行われているのが現状である。作業時間や人件費などを抑えるために、精密研磨の自動化が課題になっている。また、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²⁾。

一方で、レーザ切断加工では、従来はレーザビームの光軸をアシストガスのノズル開口の中心と一致するように設定している。厚板切断において、切断面へ十分にアシストガスが供給されないため、熔融材料の除去効果が低下して加工速度と精度が低下している³⁾。これらの問題点を解決するため、アシストガス用ノズル中心軸に対し、レーザビームの光軸を加工方向に偏心させることが求められている。このため、レーザビーム光軸の高精度かつ多自由度の制御が必要である。

磁気浮上は非接触であるため摩擦や磨耗が無く、また高速・高精度かつ多自由度制御が可能となる。このため本研究では、磁気浮上の5自由度精密位置決め機能に着目し、それを放電加工、研磨加工、レーザ加工などへの応用を試みる。

2. 研究の目的

本研究では、磁気浮上の5自由度精密位置決め機能を生かし、①電極の位置と姿勢の高速かつ高精度な維持・補正により、高速・高精度・微細の放電加工の実現；②研磨工具を位置と力制御を行い、金型表面に任意のテクスチャの試み；③レーザ光軸の高精度かつ多自由度の制御によりレーザ加工の高速化、高精度化の実現、を目的としている。

3. 研究の方法

(1) 5自由度制御型磁気浮上アクチュエータを従来の放電加工機に取り付け、放電加工制御システムを検討する。また、電極を円運動や正方形運動にさせながら放電加工を行い、創成加工への応用の可能性を検討する。

(2) 磁気浮上アクチュエータを用いた研磨工具を位置と力制御システムの検討を行う。また、除去深さと研磨力及び研磨時間の関係の検討し、それから金型表面に任意のテクスチャの加工方法を検討する。

(3) レーザ切断加工において、レーザビームの光軸の偏心により、アシストガス、加工への影響を検討するため、流体解析によるシミュレーションと基礎加工実験を行う。

4. 研究成果

(1) 5自由度制御型磁気浮上アクチュエータ

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。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 $\pm 2.0\text{mm}$, 分解能 $1.0\mu\text{m}$)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。試作したアクチュエータは、並進方向には $1.0\mu\text{m}$ の位置決め分解能、4mmのストローク、傾き方向には $20\mu\text{rad}$ の位置決め分解能、 70mrad のストロークを実現した。また、アクチュエータのバンド幅はラジアル方向に100Hz、スラスト方向に70Hz、傾き方向に40Hz程度を有した。

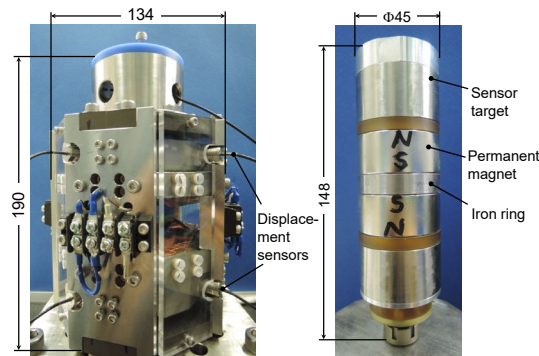


Fig. 1 Experimental maglev actuator and its spindle

(2) アクチュエータを用いた放電加工

試作磁気浮上アクチュエータを既存の放電加工機(EA8PV, Mitsubishi Electric Corp.)に取り付け、放電加工を実施する。ここで、既存の放電加工機は、電極の初期位置への移動、及び放電電源の供給だけに用いる。放電加工中は、磁気浮上アクチュエータで電極、加工物間のギャップを調整し、ギャップ電圧が一定になるように制御する。加工電源はトランジスタ回路であり、ピーク電流値は9.0A、パルス幅は $44.8\mu\text{sec}$ 、休止時間は $57.6\mu\text{sec}$ である。

まず電極の円運動による加工を行った。電極の Z 方向の位置制御でギャップ電圧を制御しながら、電極を XY 平面に円運動させる。この場合の電極の X と Y 方向の目標値を周波数 0.5Hz, 振幅 0.5 mm と 1.5mm の正弦波と余弦波にする。また、加工実験においては、径 0.5mm の円柱体の銅電極とステンレス鋼 (SUS304) の加工物を用い、加工時間を 30s にする。

図 2 に電極の X と Y 方向の変位および加工結果を示す。円運動の直径が 1.0mm である場合、加工形状は中心径 1.0mm 幅 0.5mm の円環となり、一方で電極の円運動の直径が 3.0mm の場合、加工形状は中心径 3.0mm の円環となった。電極の円運動の径の増大に伴い、円環状の中心径は比例に増大している。

また、電極の目標値を正方形に設定して放電加工を行った。正方形の辺の長さを 1.0 mm と 2.0mm にし、加工時間を 60s にする。図 3 に電極の X と Y 方向の変位および加工結果を示す。電極の円運動と同様に、正方形の辺の長さの増大とともに、加工形状は比例に増大している。提案したアクチュエータの 5 自由度制御機能を生かし、電極の様々な運動軌跡を制御でき、創成加工に応用できると考えられる。

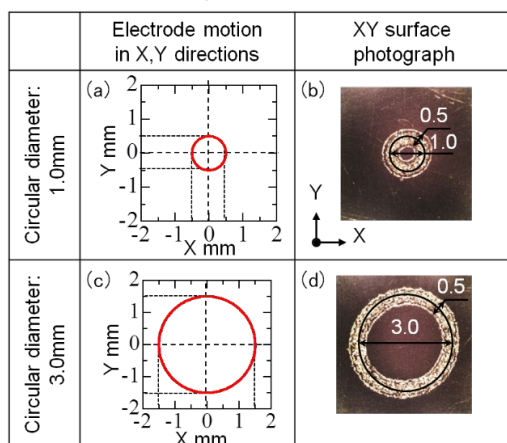


Fig. 2 Electric discharge machining with electrode circular motion

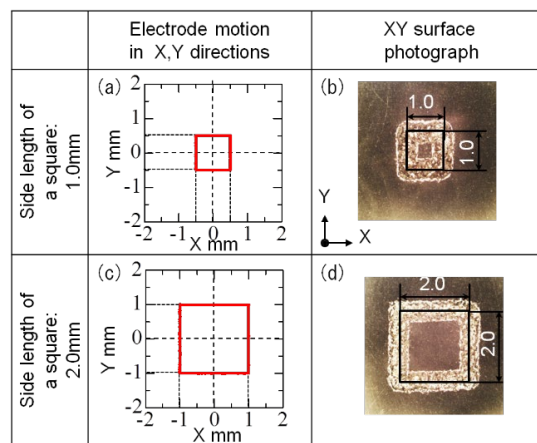


Fig. 3 Electric discharge machining with electrode square motion

(3) アクチュエータを用いた研磨加工

研磨工具の変位と研磨力を同時に制御するため、位置と力のハイブリッド制御を適用した。図 4 に研磨工具用制御システムのブロック線図を示す。本アクチュエータには力センサを搭載していないため、ロードセルで測定した力と電流の関係を利用して、電流制御を行った。このとき、電流センサで測定したコイル電流から、磁気浮上や研磨工具の位置制御のための電流成分を引いて制御した。

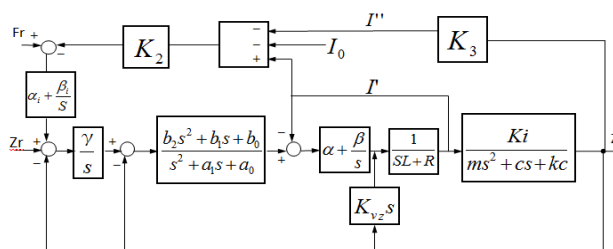


Fig. 4 Block diagram of polishing control system

工作機械のベッドのような滑り移動を行う金属平面の摩擦抵抗を減らすため、摩擦面にテクスチャを加工する。本研究では磁気浮上アクチュエータを用いて金型表面にテクスチャを施した。まず、長方形模様のテクスチャの創成を試みた。各長方形マークの幅を 1.3mm, 長さを 1.9mm とし、各マーク間の距離を X 方向に 1.3mm, Y 方向に 1.9mm とした。加工中に各マークの初期位置への移動は加工機を用い、研磨工具の運動は磁気浮上アクチュエータによって制御される。

被加工物には SUS304 板材を用い、研磨工具は先端径 $\phi 0.3\text{mm}$ の電着ダイヤモンドビットにする。研磨力を 5N, 研磨時間を 180s にする。工具の X と Y 方向の目標値を式(1)に示す。

$$\begin{cases} X_r = A \sin 2\pi f t \\ Y_r = K_y t + K_\theta \end{cases} \quad (1)$$

ここで、工具の振幅 A を 0.5mm, 周波数 f を 10Hz, Y 方向の送り速度 K_y を $3.3\mu\text{m/s}$, 初期位置 K_θ を -1.0mm にした。図 5 にテクスチャの創成結果を示す。マークの幅と長さは約 1.37mm と 1.91mm となり、平均除去深さは $3.15\mu\text{m}$ となった。加工機の大ストローク機能を生かし、被加工物広い範囲にテクスチャの創成が可能となった。

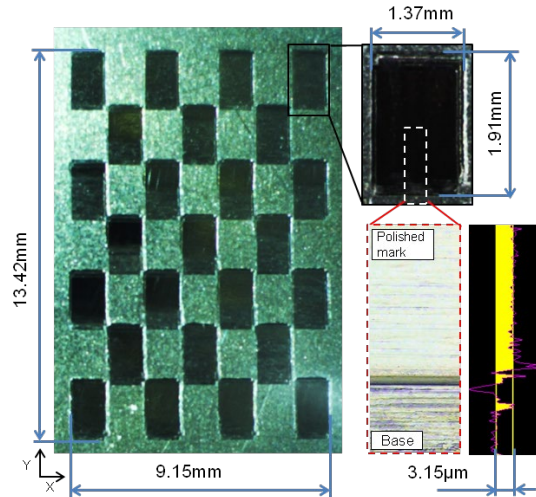


Fig. 5 Rectangular texture and profile of polished mark

異なる模様の特キスチャ創成の可能性を確認するため、等脚台形模様を目標として創成加工も試みた。台形マークの上底を 0.8mm、下底を 1.3mm、高さを 1.9mm にする。研磨工具の X、Y 方向の目標値は、式 (2) に示す。

$$\begin{cases} X_r = (A - K_x t) \sin 2\pi f t \\ Y_r = K_y t + K_0 \end{cases} \quad (2)$$

他の加工条件は長方形模様の特キスチャ創成実験と同様である。加工した台形模様の特キスチャと測定したプロファイルを図 6 に示す。台形マークの上底は 0.72mm、下底は 1.31mm、高さは 1.97mm となり、平均除去深さは 2.65μm となった。実験結果より、磁気浮上アクチュエータより研磨工具の多自由度方向の運動を制御することにより、任意な模様の特キスチャを創成できることが明らかになった。

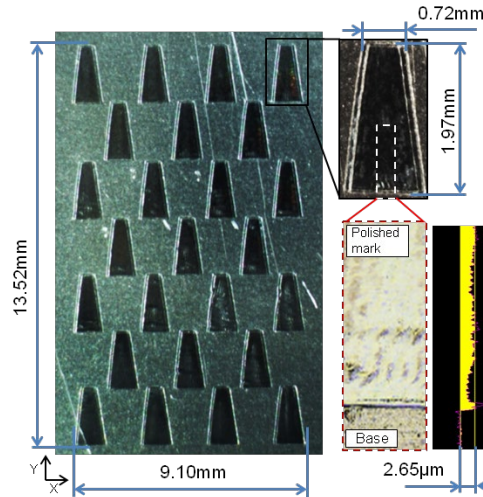
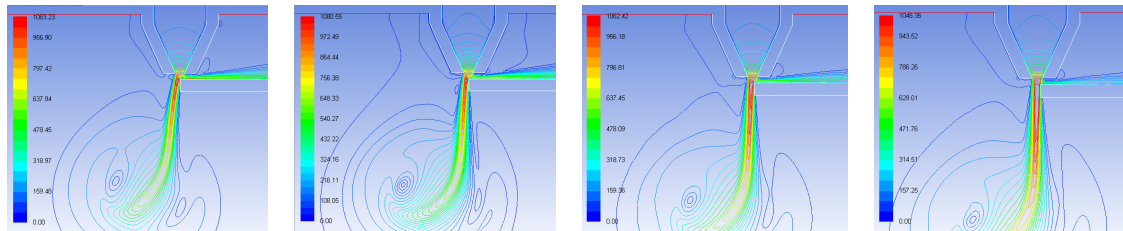


Fig. 6 Trapezoid pattern texture and profile of polished mark

(4) レーザ偏心加工のシミュレーションと基礎実験

まず、アシストガス用ノズル中心軸に対し、レーザービームの光軸を偏心させることにより、アシストガスへの影響を検討するため、レーザー切断加工をモデル化し、有限要素法を用いた流体解析よりシミュレーションを行った。

アシストガスの供給圧力を 0.6Mpa、加工物の板厚を 2mm、アシストガス用ノズルから加工物までの距離を 1mm にし、偏心量をそれぞれ 0、0.1、0.3、0.5mm にして計算したアシストガスの速度の分布図を図 7 に示す。シミュレーション結果から明らかなように、偏心量をそれぞれ 0、0.1、0.3、0.5mm にするとき、ガス噴出速度は 731.46m/s、755.19m/s、824.07m/s、901.82m/s となり、ガスが加工物に到達するときの速度は 11.58m/s、27.53m/s、39.89m/s、49.03m/s となった。偏心量の増加とともに、ガス噴出速度も加工物に到達するときの速度も大きくなった。レーザービームの光軸の偏心のため、アシストガスによりレーザー照射で発生した熔融物の流れをコントロールでき、ガスの消費量も低減できると考えられる。



(a) Eccentricity: 0mm (b) Eccentricity: 0.1mm (c) Eccentricity: 0.3mm (d) Eccentricity: 0.5mm

Fig. 7 Velocity distribution of assist gas

また、レーザービームの光軸の偏心により加工速度と加工精度への影響を検討するため、YAG レーザ加工機を用いて切断加工の基礎実験を行う。ガスの圧力を 0.5Mpa、加工物の板厚を 2mm、加工物までの距離を 1mm にし、偏心量を 0mm と 0.1mm、切断速度を 1300mm/min と 1500mm/min にして加工結果を表 1 に示す。切断速度を 1500mm/min に設定するとき、偏心なしの場合は、加工物を切断できなかった。一方で、0.1mm の偏心の場合は加工物の切断が可能になった。切断速度を 1300mm/min にし、偏心量を 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25mm にするときの加工結果を表 2 に示し、切断面の粗さを図 8 に示す。偏心量の増大とともに、切断面の表面粗さは小さくなり、加工面の品質が良くなっている。

Tab. 1 Machining results under different eccentricities and cutting speeds

偏心量	切断速度	加工物表面	加工物裏面
0mm	1300mm/min		
	1500mm/min		
0.1mm	1300mm/min		
	1500mm/min		

Tab. 2 Machining results under different eccentricities

偏心量	加工物の表面	加工物の裏面	切断面
0mm			
0.05mm			
0.10mm			
0.15mm			
0.20mm			
0.25mm			

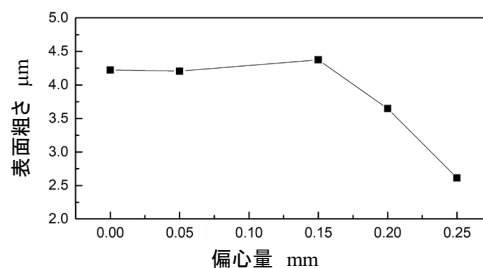


Fig. 8 Relationship between roughness of cut surface and eccentricity

<参考文献>

- 1) KK. Varanasi, SA. Nayfeh: The dynamics of lead-screw drives: Low-Order modeling and experiments, Trans ASME J Dyn Syst Meas Control, 126, 4, (2004), 388-396.
- 2) J. Hong, A. E. K. Mohammad, et al. "Improved Design of The End-Effector for Macro-Mini Robotic Polishing Systems", Proc. of the 3rd Int. Conf. on Mechatronics and Robotics Engineering, Paris, pp. 36-41, 2017.
- 3) O.B. Kovalev, et al.: Modeling of flow separation of assist gas as applied to laser cutting of thick sheet metal, Applied Mathematical Modeling, 33, 9 (2009), 3730-3745.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Feng SUN, Qi ZHANG, Fangchao XU, Qiang LI, Junjie JIN, Ling TONG, Xiaoyou, ZHANG, Weiwei LIU	4. 巻 40
2. 論文標題 Analysis of Fuzzy PID Control Characteristics on Electromagnetic Actuator for Laser Optical Path Control	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Armamentarii	6. 最初と最後の頁 430-441
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Boran Luan, Feng Sun, Shengfei Qi, Fangchao Xu, Qiang Li, Xiaoyou Zhang and Guang Yang	4. 巻 64
2. 論文標題 Propose of electromagnetic actuator for high efficiency EDM	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 1279-1286
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3233/JAE-209446	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yi Zhang, Qiang Li, Ling Tong, Yuanyuan Song, Xiaoyou Zhang, Feng Sun	4. 巻 4
2. 論文標題 Simulation Analysis of Influence of Laser Cutting Auxiliary Gas Parameters on Cutting Quality	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering and Automation	6. 最初と最後の頁 44-46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Xiaoyou Zhang, Satoshi Murata, Qiang Li, Feng Sun
2. 発表標題 Improvement of machining speed and adjustment of machining shape of EDM by using long stroke and 5-DOF controlled maglev actuator
3. 学会等名 The 19th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fangchao Xu, Boran Luan, Shengfei Qi, Feng Sun, Qiang Li, Xiaoyou Zhang
2. 発表標題 Propose of Electromagnetic Actuator for High Efficiency EDM
3. 学会等名 The 19th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村田 賢志, 劉 洋, 張 曉友
2. 発表標題 特殊加工用大ストローク5自由度制御型磁気浮上アクチュエータ
3. 学会等名 第35回 「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村田 賢志, 劉 洋, 張 曉友
2. 発表標題 大ストローク5自由度制御型磁気浮上アクチュエータ アクチュエータを放電加工への応用
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------