高応答・多自由度磁気浮上アクチュエータを用いた放電穴加工* (穴加工速度における電極運動の方向, 振幅および周波数の影響)

上山 吉崇^{*1}, 進士 忠彦^{*2}, 張 曉友^{*3}, 湯澤 隆^{*4}, 佐藤 達志^{*4}

Hole Electrical Discharge Machining Using a High-Response and Multi-DOF Controlled Maglev Actuator (Effects of Direction, Amplitude and Frequency of Electrode Motion on Hole Machining Speed)

Yoshitaka UHEYAMA, Tadahiko SHINSHI^{*2}, Xiaoyou ZHANG,

Takashi YUZAWA and Tatsushi SATO

^{*2}Tokyo Institute of Technology, Precision and Intelligence Laboratory
Nagatsuta-cho 4259, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8503 Japan

This paper describes hole electrical discharge machining (EDM) using a cylindrical electrode driven by a high response and multi degrees of freedom (DOF) controlled magnetically-levitated (maglev) actuator. To avoid abnormal electrical discharge and achieve high speed hole EDM, several combinations of electrode motions such as high speed and high precision axial positioning to keep a gap voltage, jump motion, orbital motion and high frequency axial vibration of electrode (dither) for facilitating debris ejection were tested. Experimental results showed that the combination of the high speed positioning, jump and orbital motions of the electrode was effective for improving the speed of hole EDM. Finally, frequencies and diameters of the orbital motions were surveyed in order to improve the machining speed.

Key Words : Electrical Discharge Machining, Maglev Actuator, Orbital Motion, Jump Motion, Dither

1. 結 言

放電加工は、絶縁性の加工液中で、工具電極（電極）と加工物間に電圧を印加、放電を発生させ、熱エネルギーによって加工物を溶融、さらに、加工液の気化による爆発で、溶融物を加工面から除去する加工法である。電極と加工物が接触しない非接触加工であるため、工具反力は接触加工と比較して小さい。このため、導電性硬質材料の加工、剛性の低い微小工具の利用が可能であり^{(1)~(3)}、エンジンの噴射ノズル、インクジェットプリンタの細穴加工など、高アスペクト比の細穴加工が必要な分野において、適用されている。

放電加工では、加工中、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、絶えず変化するため、極間距離が放電に適するように、電極位置を高速、高精度に微調整する必要がある。電極駆動機構には、高精度・高応答性が求められる。一般的な放電加工機は、電極を多自由度に駆動するため、1自由度の位置決め機構を積み重ねた構造となっている。このため、下層の位置決めステージでは可動部質量が大きくなり、このステージが担う運動方向では、電極の応答性が低い。電極の応答性を向上させるため、磁気軸受⁽⁴⁾⁽⁵⁾、可動コイル⁽⁶⁾、圧電素子^{(7)~(9)}を用いたローカルアクチュエータの採用が提案されているが、従来の研究開発では駆動方向が1自由度に限定されている。

* 原稿受付 2010年9月16日

^{*1} 正員, 東京工業大学大学院 総合理工学研究科メカノマイクロ工学専攻

^{*2} 正員, 東京工業大学 精密工学研究所 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

^{*3} 正員, 日本工業大学 機械工学科

^{*4} 三菱電機㈱

E-mail: shinshi@pi.titech.ac.jp

筆者らのグループは、電極を5自由度方向に位置決め可能な高速・高精度磁気浮上アクチュエータを提案・試作し⁽¹⁰⁾、これを用いた放電穴加工を行い、極間電圧をフィードバック信号とした、加工方向に対してバンド幅100Hz以上の高速サーボを用いることで、穴加工速度が従来比20~400%向上することを確認している⁽¹¹⁾。さらに、高速サーボと、電極を加工方向と垂直な平面内で数百Hzの周波数、数マイクロメートルの振幅で、揺動することで、既存加工機と比較して、加工速度が最大560%改善されることを見出した⁽¹²⁾。

他のグループの研究でも、放電加工高速化のために、電極を揺動させる手法⁽¹³⁾についての報告がなされている。しかしながら、数十ヘルツを超える周波数域での、揺動加工の研究例は既存加工機の性能の限界から実施されていない。

本論文では、磁気浮上アクチュエータの特徴を生かし、軸方向に極間電圧をフィードバック信号とした電極位置制御を行う放電穴加工において、加工方向と垂直面に対して、揺動周波数や揺動振幅を変化させた運動を加え、加工速度の変化を実験的に調査したので報告する。また、上記に加え、ジャンプ、軸方向の強制的な高周波微小振動（ディザ）も複合した場合の、加工速度への効果に関しても検討した。

2. 放電加工システム

2・1 磁気浮上アクチュエータ

図1に、本研究で使用する磁気浮上アクチュエータの概略図および写真を示す。磁気浮上アクチュエータは、工具電極を取り付け駆動するためのロータ、ロータを軸方向（Z方向）に駆動するためのスラスト磁気軸受、径方向（X, Y方向）およびロータ重心回り（ Θ, Φ 方向）に駆動するため、上下に配置されたラジアル磁気軸受から構成される。詳細な構造、制御法は、既報⁽¹²⁾にて報告済みであり、説明を省略する。位置決め性能を表1にまとめる。

2・2 加工制御システム

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（極間電圧）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。図2は、軸方向に垂直穴加工を行う、放電加工制御システムのブロック線図である。電極、加工物間の極間電圧（V）を加工中モニタリングし、これを増幅、フィルタリング処理（500Hzローパスフィルタ）する。

Fig. 1 Configuration and photograph of maglev actuator

Table 1 Positioning performances of maglev actuator

	Bandwidth	Positioning resolution	Positioning stroke
X, Y directions	260Hz	0.15 μ m	200 μ m
Z direction	240Hz	0.5 μ m	2mm
Θ, Φ directions	140Hz	2 μ rad	2mrad

Fig. 2 Block diagram of EDM control system for machining hole in Z direction

コントローラは、フィードバック電圧 V_{fb} と目標値電圧 V_{ref} の偏差から、電極の加工方向目標位置 Z_{ref} を生成する。 Z_{ref} は、磁気浮上アクチュエータシステムの入力として入力され、磁気浮上アクチュエータは、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。加工用コントローラと磁気浮上アクチュエータ間に挿入されたローパスフィルタは、電極の応答周波数を制限するために用いられる。また、 $[X_{o_ref}, Y_{o_ref}]$ 、 Z_{d_ref} および Z_{ref} は、それぞれ次章以降で説明する加工高速化のための揺動運動、ジャンプ運動および高周波微小振動を実現するための目標値である。

3. 加工条件

3・1 加工条件

直径 2mm の円柱型電極を用いた、深さ数十 μm 程度の垂直穴放電加工を行う。加工穴深さは、磁気浮上アクチュエータの加工方向 (Z 方向) の位置決め範囲内である。電極材料は銅であり、加工液および加工物はそれぞれ、放電加工用油 (EDF-K, Nippon Oil Corp.)、プリハードン鋼 (NAK-80, Daido Steel Co., Ltd.) である。加工中、ロータには軸まわりの特別な拘束を与えていないが、電極の回転は目視の範囲内では確認できなかった。加工電源は RC 回路を使用し、抵抗 1.1k Ω 、コンデンサ容量 0.01 μF 、開放電圧 90V の仕上げ加工用の設定とする。極性は、加工物が正極、電極が負極とする。加工時間は 1 サンプル当たり 1,200 秒とし、加工穴のサンプル数は次節以降で説明する 6 通りの加工法で各 3 とする。図 2 のブロック線図中、放電加工用コントローラの比例要素および積分要素のゲイン β, γ は、全ての加工においてそれぞれ 1.3×10^{-6} 、 1.5×10^{-4} とする。

3・2 電極の運動

本研究では、放電加工の高速化を実現するため、適切な放電状態を維持するための加工方向の電極位置の補正および加工屑、気泡の排出性改善のための電極の運動に関して、磁気浮上アクチュエータを用いた検討を行う。以下に、本研究で実施する電極の運動方法について説明する。

3・2・1 加工方向応答性

磁気浮上アクチュエータによる電極の高応答な位置補正の効果を検討するため、ロータの加工方向 (Z 方向) のバンド幅を 15Hz および 240Hz に設定し、電極応答性と加工速度の関係についての調査を行う。本研究では、バンド幅を 15Hz に設定する場合は、カットオフ周波数 15Hz の 2 次ローパスフィルタを使用し、バンド幅を 240Hz に設定する場合は、ローパスフィルタを使用しない。

3・2・2 ジャンプ

加工穴に滞留した加工屑, 気泡の排出性を向上させるため, 本研究では電極を加工物から一旦高速に退避させ, 再度接近させるジャンプ動作を付加する. 図2中の, Z_{j_ref} はジャンプ動作の目標値である. ジャンプ軌道は, 電極のオーバーシュート, ジャンプ終了直後の残留振動を防止するため, 三角形形状の波形とした. ジャンプは, 間隔 0.5s, 一回あたりのジャンプ所要時間 0.03s, 速度 6.7mm/s とし, ジャンプ高さ 0.1mm とした.

3・2・3 揺動

加工屑, 気泡の排出性を改善することを目的として, 電極が X-Y 平面内で直径数〜数十 μm の円軌道を描くよう揺動する. 図2ブロック線図中に, X, Y 方向で位相が 90° 異なる, 揺動の目標値である正弦波を示す. 初期設定として, 揺動直径 15 μm , 周波数 50Hz とする.

3・2・4 微小振動 (ディザ)

ジャンプおよび揺動とは異なる電極の運動として, 電極をマイクロメートルのオーダーで加工方向に強制的に高速かつ微小に振動させる. 図2ブロック線図中, Z_{d_ref} は, 微小振動のための正弦波目標値である. 本研究では, 電極を周波数 300Hz, 実両振幅 2 μm で振動させる.

3・3 電極運動の組み合わせ

電極の高速, 高精度な位置補正, 加工屑排出性改善のためのジャンプ, 揺動, ディザ, およびそれらの複合効果を検討するため, 表2に示す6通りの条件で穴加工実験を行う.

Table 2 Machining method

Method	Bandwidth in Z direction (Hz)	Orbital motion in X-Y plane	Dither in Z direction	Jump in Z direction
1	240			
2	15			✓
3	240			✓
4	15	✓		✓
5	240	✓		✓
6	240		✓	✓

Fig. 3 Feed displacement of electrode (Z) in each machining method

4. 放電加工実験

4・1 電極の各種運動の電極送りに対する効果

4・1・1 データ処理方法

図3に、渦電流変位計(PU-05, AEC Corp.)によって計測した、加工開始から1,200秒間の電極の送り量を示す。変位は、レコーダ(EZ7510, NF Corp.)を用いて、サンプリング周波数10kHzで記録し、波形には記録したデータを25,000分の1に間引いたものを使用した。尚、電極のジャンプを用いた加工法2～6では、波形中、ジャンプ動作の変位は除いてある。

4・1・2 電極送り量

加工方向の電極応答性240Hzで、電極のジャンプ等の運動をなにも付加しない加工法1では、加工が進んだ100秒以降、電極が大きく振動し、送りが停滞した。この停滞は、3回の実験いずれも発生した再現性のある現象である。この結果から、電極を加工方向に高速に位置補正する場合においても、ジャンプ動作を行わない場合、放電状態が不安定化すると考えられる。加工方向の電極応答性15Hzで、電極のジャンプを用いる加工法2では、加工法1と比較して、加工方向の電極の応答性が低いにも関わらず、電極の送りに改善が見られる。これは、ジャンプによる加工屑および気泡の排出性改善の効果であると考えられる。これに対して、加工法2の電極応答性を240Hzに改善した加工法3では、加工法2と比較して大きな違いが見られない。以上より、加工法1と比較して、送りが改善されたのは、ジャンプ単独の効果が主たる原因であると考えられる。加工方向の電極応答性15Hzで、電極のジャンプを加えた加工法2に対して、さらに揺動を付加する加工法4では、加工法2と比較して送り速度が改善されている。また、加工法4において、電極の応答性を15Hzから240Hzに向上させた加工法5では、更に、送り速度が改善されている。

加工方向の電極応答性240Hzで、電極のジャンプおよびディザを併用した加工法6においても、送りに改善が見られた。しかし、その効果は揺動より小さい。以上より、本研究で検討した6つの加工法では、加工方向の電極応答性240Hzで電極をジャンプおよび揺動させる加工法5が、電極が効果的に送られていることが確認できる。

4・2 短時間における電極挙動

図4は、加工法3、5、6で、電極の送り波形を、加工開始900秒後から5秒間について拡大表示したものである。データは、10kHzで記録したものを間引きせずに使用した。波形中、0.5秒間隔で発生しているインパルスは電極のジャンプである。まず、加工法3では、電極が周期数秒、振幅10 μ m以上で退避、接近に伴う振動を繰り返している。図5は、加工法3における、加工後の穴底面の写真である。底面中央部には黒色のタール状の加工屑が付着していることが確認できる。このように付着した加工屑は、電極と加工物間の放電を阻害するとともに、適切な電極の位置補正を困難するために、退避、接近が発生したと考えられる。

揺動を加えた加工法5の波形においても、加工法3と同様な電極の退避、接近による振動が発生しているが、その振動振幅は10 μ m程度に減少し、大きな振動が発生していない時間帯も確認された。ディザを加えた加工法6における電極送り波形では、加工法3と同様に周期数秒の退避、接近が発生している。しかしながら、その振動振幅は10 μ m程度で、加工法3と比較すると減少した。

4・3 加工穴深さ

図6に、6通りの加工法における加工穴深さを比較する。加工穴深さは、白色干渉計(New View 5032, Zygo Corp.)によって計測した。3サンプルの平均値は加工法毎に、それぞれ、(1)37 μ m、(2)50 μ m、(3)52 μ m、(4)61 μ m、(5)73 μ m、(6)62 μ mとなり、加工法5で最大となった。加工穴深さと電極送り量の順は一致し、加工法5が最大で、加工法1から97%増加した。

5. 揺動直径、周波数と加工速度の詳細な関係

5・1 加工条件

前章で、6通りの加工法で放電加工を行った結果、電極を加工方向に高速サーボし、ジャンプおよび揺動させる加工法5が、加工の高速化に有効であることが明らかになった。本節では、加工法5において、表3のように揺動周波数を1~300Hz、直径を5~20 μm に変化させ、加工速度との関係を調査し、放電加工の高速化に適した揺動パラメータを検討する。揺動パラメータを除いた加工条件は、3・1節と同様である。

5・2 電極送り量

図7に、50Hzで揺動を実施した加工において、電極の送り波形を揺動直径ごとに比べる。波形に使用するデータは、4・1節と同様に、10kHzで記録したものを25,000分の1に間引いたものであり、ジャンプ動作の変位は除いてある。加工開始時は、波形に大きな違いは見られないが、揺動直径が5 μm では、800秒以降で、その他の揺動直径と比較して、送りの停滞が確認された。揺動直径の大きさは、加工速度に影響を与える要因であると考えられる。

5・3 加工穴深さ

図8に、各揺動条件にて3回の加工実験を繰り返した、加工穴深さの平均値を示す。加工穴深さは揺動なしの場合と比較して、全ての揺動条件で改善され、揺動周波数200Hzでは10 μm 、その他の周波数では15 μm のとき最大となった。しかし、揺動直径が20 μm を超えると、加工穴深さは減少している。この理由として、揺動直径の増加に伴い、加工穴側面への放電頻度が増加することが考えられる。揺動と側面放電の関係については今後の検討課題である。また、揺動直径15 μm において、周波数1Hzの低速揺動を行った場合は、その他の揺動周波数と比較して、穴深さは小さくなった。揺動を周波数数十Hz以上で行うことが、加工高速化に有効であると考えられる。

Fig. 4 Feed displacement of electrode (Z)

Fig. 5 Machined hole (method 3)

Fig. 6 Depth of machined hole in each machining method

Table 3 Frequency and diameter of orbital motion

		Frequency Hz					
		1	20	50	100	200	300
Diameter μm	5		✓	✓	✓	✓	✓
	10		✓	✓	✓	✓	
	15	✓	✓	✓	✓	✓	
	20		✓	✓	✓	✓	

5・4 電極の送り速度

図9は、4・3節と同様に、600秒から1,200秒までの電極送りの波形の傾きから求めた、電極の送り速度の3サンプルの平均をまとめたものである。送り速度は揺動なしと比較して、全ての揺動条件で改善されている。また、揺動直径の増加に伴って、送り速度は向上する傾向が見られるが、50Hzのときは揺動直径15 μm から20 μm にかけて、送り速度が低下した。この原因も、加工穴深さの場合と同様に、揺動直径の増加に伴う、加工穴側面への放電が関係していると考えられる。また、加工穴深さの場合と同様に、揺動直径15 μm 、周波数1Hzのとき、その他の周波数と比較して、送り速度が低下している。

5・5 加工穴直径

図10は、デジタルマイクロスコープ（VHX-1000, Keyence Corp.）を使用して測定した、各条件で加工した3個の穴直径の平均値である。図中、点線で示された直線は、揺動を実施しない加工穴直径に、揺動直径を加えた、加工穴直径の予想値である。揺動直径が増加するに伴い、直径が増加する傾向が見られる。

6. 結 言

本研究では、直径2mmの電極を使用した、深さ数十 μm 程度の放電穴加工において、加工方向の電極位置の極間電圧に基づく高速補正、加工屑排出のための電極のジャンプ、揺動、および加工方向の高周波微小振動の効果

Fig. 7 Feed displacement of electrode in each machining method

Fig. 9 Feed speed of electrode

Fig. 8 Depth of machined holes

Fig. 10 Diameter of machined holes

を調査するため、上記の電極運動を組み合わせた加工法を比較検討した。加工方向の高速駆動に、電極のジャンプおよび揺動を組み合わせる手法が、加工の高速化有効であるとの結論を得た。また、上記の加工法において、揺動の周波数および直径と加工速度の関係を調査した結果、50Hzを除く揺動周波数では、20 μ m程度の揺動振幅までは、振幅の増加に伴い、電極送り速度が増加することが明らかになった。

文 献

- (1) 増沢隆久, “マイクロ放電加工”, 精密工学会誌, Vol. 68, No. 2 (2002), pp. 180-184.
- (2) 国枝正典, “放電加工の基礎と将来展望 I”, 精密工学会誌, Vol. 71, No. 1 (2005), pp. 58-62.
- (3) 国枝正典, “放電加工の基礎と将来展望 II”, 精密工学会誌, Vol. 71, No. 2 (2005), pp. 189-194.
- (4) 中川孝幸, 三宅英孝, 今井祥人, 戸倉和, “磁気支持型アクチュエータ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 (2006), pp. 677-680.
- (5) 三宅英孝, 中川孝幸, 今井祥人, “微細穴放電加工の高速化”, 電気加工技術, Vol. 28, No. 90 (2004), pp. 1-4.
- (6) 増沢隆久, 田中勝也, 藤野正俊, “可動コイル式ヘッドによる放電微細加工の高速化”, 電気加工学会誌, Vol. 8, No. 16 (1975), pp. 43-52.
- (7) 今井祥人, 佐竹彰, 種田淳, 小林和彦, “高速電極駆動装置による放電加工速度の改善”, 電気加工学会誌, Vol. 27, No. 55 (1993), pp. 23-30.
- (8) 家澤雅宏, 今城昭彦, 鈴木智, “高速微動アクチュエータによる細穴放電加工の高速化”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 69, No. 680 (2003), pp. 982-988.
- (9) 古谷克司, 毛利尚武, 樋口俊郎, “インパクト駆動機構を用いた自走式放電加工機”, 精密工学会誌, Vol. 63, No. 9 (1997), pp. 1290-1294.
- (10) Zhang, X., Shinshi, T., Kajiware, G., Shimokohbe, A., Imai, Y., Miyake, H., and Nakagawa, T., “A 5-DOF Controlled Maglev Local Actuator and its Application to Electrical Discharge Machining”, *Precision Engineering*, Vol. 32, No. 4 (2008), pp. 289-300.
- (11) Zhang, X., Shinshi, T., Shimokohbe, A., Sato, T., Miyake, H., and Nakagawa, T., “High-Speed Electrical Discharge Machining By Using a 5-DOF Controlled Maglev Local Actuator”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 2, No. 4 (2008), pp. 493-503.
- (12) 上山吉崇, 張 暁友, 進士忠彦, 下河辺明, 中川孝幸, 佐藤達志, 三宅英孝, “磁気浮上アクチュエータを用いた微細穴放電加工”, 精密工学会誌, Vol. 76, No. 6 (2010), pp. 58-62.
- (13) Eberhard, B., and Sumet, H., “Orbital Electrode Actuation to Improve Efficiency of Drilling Micro-holes by Micro-EDM”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 4 (2009), pp. 1826-1834.