細穴放電加工用電極送り機構の比較

古谷克司* 毛利尚武* 樋口俊郎**

Comparison between Electrode Feeding Devices for Small-Hole Machining by EDM

Katsushi FURUTANI, Naotake MOHRI, Toshiro HIGUCHI

Abstract

Conventional types of electrode feeding devices consist of a screw, gears and an electro-magnetic motor, or a hydraulic cylinder. Several new types of electrode feeding devices using piezoelectric devices have been developed. This paper deals with comparisons of electrode feeding devices for machining small holes with the electrical discharge machining.

The criteria of suitability to the electrode feeding device for machining small holes are proposed by considering requirements in machining small holes with EDM. The criteria are the resolution of the electrode feeding, the response of the mechanism in case of servo-control, the size of whole mechanism and the stroke of the electrode feeding.

The conventional types and the new types of electrode feeding devices are classified into mechanisms and into chucking methods. Their characteristics and the suitability are discussed. The electrode feeding devices using piezoelectric elements are suitable for machining small holes. The chucking method should be chosen according to the purpose.

1. はじめに

一般に、微細な穴は1個の工作物に多数加工される場合が多い。放電加工は、ドリル加工、レーザ加工などに比べ加工速度が小さいため、全体の加工時間が問題となる。この解決法の一つとして、電極送り機構を近接して配置し、同時に複数の穴を加工することが考えられる。そのためには電極送り

* 豊田工業大学

** 東京大学工学部

機構を小型化することが必要となる。

装置を小型化する場合には、加工機全体の構造を検討するほかにその駆動源を検討する必要がある。従来の加工機では、電極主軸送り機構にはボールねじと電磁モータの組み合わせもしくは油圧シリンダが用いられているため^{1)~3)}、電極主軸送り機構の小型化が困難であった。近年、圧電素子を利用した駆動機構が多数開発されている^{4)~9)}。著者らはそれらを電極主軸送り機構や電極ダイレクトドライブ機構に適用し、放電加工が可能であることを確認している^{10)~14)}。

本論文では細穴放電加工用電極送り機構への適用を前提に、直線駆動機構の比較を行う。

電磁式モータのみを比較する場合には従来から最大接線応力、機構の寸法を元に計算した質量あたりのパワーとパワーレートを指標とする評価法が提案されている¹⁵⁾。しかし、エネルギーやそれから力学量への変換原理が異なるさまざまなアクチュエータを一元的に評価することは困難である。ロボット用のアクチュエータとして考える場合、体積あたりもしくは質量あたりの発生力が評価の尺度となる。この考えに基づきこれまでにロボット用として比較した例がある^{16)~17)}。

しかし、細穴放電加工用電極送りのための機構の比較に関しては例は見られない。また、放電加工用のアクチュエータとして評価する場合、放電加工に要求される仕様から定められる評価の指標が存在すると思われる。

本論文では、まず、細穴放電加工用電極送り機構に要求される仕様を挙げた後、電極送り機構の評価の指標を考える。次に、その指標に基づき各種電極送り機構を比較する。

2. 細穴放電加工用電極送り機構に要求される仕様

放電加工では極間距離は数 μm ～数 $10\mu\text{m}$ と非常に狭い。安定な放電を行うためには、直線駆動機構により常に電極と工作物の間隙を一定に保つ必要がある。放電加工の加工単位は μm オーダー程度であるため、直線駆動機構の分解能はそれと同程度以上が要求される。

また、多数の細穴加工において全体の加工時間を短縮するためには、複数の主軸による同時加工が考えられる。そのためには、個々の送り機構が小型である必要がある。特に、電極送り機構を狭い間隔で配置するためには、電極の半径方向の寸法が小さい必要がある。また、高い応答性を持つ方が加工特性の改善に効果があることが知られている^{11)18)~21)}。

汎用機では、大質量、大面積の電極を駆動する必要がある。大面積の電極を引き戻すときには狭い間隙に加工液がすぐには流入しない。そのため、送り機構には大きな力加わる²⁾。したがって、大きな駆動力が要求される。しかし、細穴加工においては、電極質量が小さく、かつ電極面積が小さいため駆動力は汎用機ほど大きくなくてもよい。

放電加工では加工可能な穴の深さは、横方向に電極を送っても電極径の約10倍が限度である²²⁾。そのため、細穴放電加工では微細な電極送りが可能な範囲は 10mm 程度で十分である。それ以上のスト

ロックは、粗動機構で送る方が送りの時間を短縮することができ、効率的である。一方、微動機構のストロークが小さすぎると電極位置の初期設定が困難となるため、最低数mm程度であることが望ましいと考えられる。

以上のことをまとめると、細穴放電加工用電極送り機構に要求される仕様は、

- (1)連続した微小送り機能
- (2)電極と工作物が短絡、もしくは異常放電した場合には速やかに引き戻せるサーボ機能
- (3)小型であること
- (4)多軸化に適していること
- (5)ストロークが数mm～10mm程度以上であること

などが考えられる。

これらの要求仕様より、細穴放電加工用電極送り機構の比較の指標は分解能、応答性、機構全体の寸法、ストロークが考えられる。

3. 放電加工用電極送り機構の特徴

放電加工用電極送り機構の分類方法は、直線運動を得る方法による分類と電極の保持方法による分類の2種類が考えられる。以下ではそれぞれに基づき分類する。

3.1 直線運動を得る方法による分類

直線運動を得る方法には、

- (A)回転運動を直線運動に変換する方法
- (B)直線運動を直接得る方法

がある。

直線運動を得る機構を2章で挙げた指標に基づき評価した結果を表1に示す。表中の記号で、◎は要求仕様を「十分満たしている」、○は「満たしている」、△は「ほぼ満たしている」、×は「満たしていない」を示す。また、それらの機構を電極送りに適用した場合の概念図を図1に示す。

現在一般的に用いられている送り機構は、ボールねじ、歯車とモータの組み合わせ(図1(a))、もしくは油圧シリンダ(同図(b))などにより構成されている^{1)~3)}。送りねじを用いて小型化した例があるが²³⁾、一般的には小型化が困難であり複数の穴の同時加工には適さない。また、歯車や送りねじを持つ機構は^{24)~26)}、バックラッシュを持つため高分解能化が困難である。

電磁モータを用いた摩擦駆動(同図(i))やベルト駆動は、駆動輪の周が電極の送り量となるため、放電加工に十分な応答性を保ちながら μm オーダの分解能を得ることは困難であると考えられる。また、ベルト駆動ではサーボ時の振動が問題になると考えられる。

リニアステッピングモータでは、応答性は満足するが、移動分解能が0.1mm程度であるため、放

表1 直線駆動機構の細穴放電加工用電極（主軸）送り機構への適用性

直線駆動機構	図1中 記号	送り 分解能	サーボの 応答性	小型化	ストローク	総合評価
電磁モータ＋送りねじ	a	△	○	△	◎	○
油圧シリンダ	b	△	△	×	◎	×
ラック・アンド・ピニオン	c	×	×	△	◎	×
ベルト駆動	—	△	×	△	◎	×
ピストン・クランク機構	—	△	△	×	◎	×
電磁リニアモータ	—	×	○	○	◎	×
ソレノイド	—	○	◎	○	○	○
可動コイル	d	○	◎	○	○	○
形状記憶合金	—	△	×	○	◎	×
圧電素子単体	—	◎	◎	◎	×	×
圧電素子＋変位拡大機構	—	◎	◎	◎	△	△
インパクト駆動機構 （衝撃力による駆動）	e, f	◎	◎	◎	◎	◎
インチワーム	g	◎	◎	○	◎	◎
超音波リニアモータ （楕円運動駆動）	h	◎	◎	○	◎	◎
摩擦駆動	i	△	○	△	◎	△

要求仕様の満足度

◎：十分に満たしている、○：満たしている、

△：ほぼ満たしている、×：満たしていない

電加工には適さないと考えられる^{27) 28)}。

形状記憶合金を用いた機構は、小型、軽量に構成できるが¹⁶⁾、応答性が低いいため放電加工に適用した場合²⁹⁾加工速度は小さくなる。

圧電素子などの固定変位素子は小型であるが、それ自身の変位量が小さいという欠点を持つ。そのため、放電加工においては他の機構と組み合わせて補助的に用いるか、もしくは電極を振動させるためだけにしか用いられた例はなかった^{19) 20) 30) 31)}。これに対し、圧電素子を用いた大変位用小型駆動機構が近年多数開発された^{4) - 9)}。それらは、小型で応答性が高く、高分解能の移動が可能である。また、それらの駆動機構では圧電素子により移動体を駆動するため、圧電素子の変位量以上のストロークを得ることが可能である。したがって、これらの機構（同図(e), (f), (g), (h)）は2章で述べた仕様

図1 細穴放電加工用電極送り機構の構成

を満足すると考えられる。

表1に挙げた他には、電極とおもりのつりあいを利用した機構³²⁾などが過去に考案されている。

3.2 電極の保持方法による分類

電極の保持方法には、

(A)チャック方式

(B)電極ダイレクトドライブ方式

がある。

チャック方式は従来から一般に用いられている方式で、ドリルのチャックと同様の機構で電極をはさむことで保持する方法である。電極が細い場合正確な向きに取り付けることが困難であるが、簡便であり保持力が強いという利点を持つ。電極を正確な向きに取り付けられるように、スリーブとキャピラリを組み合わせた例がある³³⁾。

電極ダイレクトドライブ方式（図1(f), (g), (h), (i)）は、駆動機構により直接電極を駆動する方式である^{(11)~(14) 38)}。電極はガイドに沿って駆動されるため、電極の取り付け方向はほとんど調整する必要がない。細穴加工では電極消耗が激しいが、電極ダイレクトドライブ方式では電極を送ることで消耗量を補償することが可能であるため、電極の交換の手間を減少させることが可能となる。また、細穴加工の場合、電極自体の慣性が非常に小さいため、駆動部分の慣性および応答性により駆動の応答性が決定される。したがって、応答性の高い駆動機構を用いれば、電極送りの応答性を向上することが可能となる。

電極ダイレクトドライブ方式の駆動機構では電極の代わりにチャックを取り付けた主軸を駆動することでチャック式に適用することも可能である。

4. 各種電極送り機構の適用分野

従来の機構と圧電素子を利用した機構による電極送り機構の性能および適用分野を表2に示す。

従来方式のうち可動コイル式（図1(d)）¹⁸⁾やソレノイド式³⁰⁾は小型化に適し、応答周波数は比較的高いが、ストロークが小さいため単独で用いることは困難である。圧電素子を利用した方式は小型であり、特にインパクト駆動式（同図(e), (f)）では電極の半径方向の寸法を小さくできるので多電極化³⁵⁾に適している。また、ストロークを大きく取れるため、粗動機構と組み合わせることなく、単独で用いることが可能である。

チャック式は電極径が多少変化しても同一のチャックで対応可能である。チャック部が限定され、電極の実際に加工に用いる部分を保持機構で押しつけることがないため、電極の断面形状を損なうことはない。また、電極は固定されるため保持力は大きく、送り機構によってのみ変位する。そのため、異形状を持つ穴の加工に適している。

一方、電極ダイレクトドライブ方式は電極消耗を電極を送り出すことで補償可能である。また、電極方向のアライメントを頻繁に行う必要がない。そのために、電極消耗の激しい細穴加工に適すると考えられる。

電極ガイドで回転方向の運動を拘束すれば、異形状断面を持つ電極にも対応可能であると考えられるが、電極とガイド間の摩擦が存在するため、電極が細い場合にはたわみなしに送ることは困難であると考えられる。そのため、ガイドによる回転方向の運動の拘束は困難であり、丸穴の加工に限定されると考えられる。

丸穴を加工する場合には電極を回転させることが多い。従来機では主軸送り機構に回転機構を組み込んでいた。その回転速度はそれほど速くはないことと、圧電素子を利用した電極送り機構は非常に小型であるため、送り機構全体を回転させることで対応可能であると考えられる。

電極をクランプでつかむ機構では、電極の断面形状を損なうことがある。そのため、電極には柔ら

表 2 電極（主軸）送り機構の比較

電極保持方式			チャック			電極ダイレクトタイプ		
駆動方式	電磁モーター +ねじ	油圧シリンダ	可動コイル	インパクト駆動		インチワーム	構円運動	摩擦駆動
外形寸法 mm	1000×300 ×300	1000×300 ×300	80×80×80	70×70×90	10×10×60	26×30×90	60×20×70	100×100 ×100
応答周波数 ^{*3}	数10Hz	10数Hz	数100Hz	1kHz	800Hz	5kHz	1kHz	数10Hz
送り分解能	0.1μm～	数μm～	数μm～	0.02～0.6μm	～数μm	～数μm	～数μm	数10μm～
ストローク	数10cm～	数10cm～	数mm	10mm ^{*1}	無限 ^{*1}	無限 ^{*1}	無限 ^{*1}	無限 ^{*1}
アクチュエー タ 台/電極	1	1	1	1	1	3	4	1
駆動回路/電極	1	1	1	1	1	3	4(2) ^{*2}	1
駆動電流 A/電極	数A以上	-	数100mA	0.1	0.1	0.5以上	0.5	0.2
製作精度	高	高	低	低(送り面の 真直度)	低	高(クランプの 精度)	中(クリアラン スの調整)	中(クリアラン スの調整)
静的駆動力 ^{*4}	数10kg	数10kg	数10g	数10g	数10g	数100g	数100g	数100g
電極径変更時 の調整	容易	容易	容易	容易	容易	クランプを調整 ガイドを交換	容易	ガイドを交換
多電極化	難	難	可能	可能	可能	可能	可能	中
適する用途	細穴 大型工作物	大型工作物	細穴・薄板 多電極放電加工	細穴 多電極放電加工	丸細穴 多電極放電加工	丸細穴 多電極放電加工	丸細穴 多電極放電加工	丸細穴 ワイヤ放電加工
図 1 中記号	a	b	d	e	f	g	h	i

*1: 原理的に無限のストロークを持つ

*2: 駆動電流が大きい場合は4台、小さい場合は2台

*3: 放電加工のサーボが可能な最高周波数

*4: 静的に発生することが可能な引き上げ力

かい黄銅などではなく、タングステンのような材料を用いる必要がある。

圧電素子を利用した電極ダイレクトドライブ方式による電極送り機構は、間欠駆動機構である。ワイヤ放電加工機に適用する場合、張力が変化するためワイヤが振動するおそれがある。そのため、適用は困難であると考えられる。一方、電磁モータを用いた摩擦駆動方式（同図(i)）³⁰⁾は、連続的に電極を送ることが可能で、かつ、一定方向に電極を駆動する場合には振動をほとんど発生しないため³⁰⁾、ワイヤ放電加工機に適用すると考えられる。

5. まとめ

本論文では細穴放電加工用電極送り機構に用いる機構を比較した。

- (1)細穴放電加工用電極主軸送り機構または電極送り機構に要求される仕様をまとめた。
- (2)圧電素子を利用した微小移動機構が要求仕様を満足することが明らかになった。
- (3)直線運動を得る方法と電極の保持方法の2種類の分類法にしたがい、直線駆動機構を分類した。
- (4)各種電極送り機構に適する用途を検討した。その結果、チャック式と電極ダイレクトドライブ方式を目的に応じて選択することが必要であることが明らかになった。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、有益なご助言をいただいた東京大学生産技術研究所中川威雄教授、増沢隆久教授、同工学部須賀唯知教授、黒沢実助教授に感謝いたします。本研究の一部には平成5年度文部省科学研究費補助金奨励研究A（課題番号：05750129）、平成6年度同一般研究B（課題番号：06555041）、平成5年度大沢科学技術振興財団、平成5年度天田金属加工機械技術振興財団、平成5年度中部電力基礎技術研究所の研究助成を用いました。ここに記し感謝いたします。

参考文献

- 1) 向山芳世：放電加工の基礎，応用機械工学，30，12，pp.85-89（1989）。
- 2) 田中俊明，西川守久，加藤幸夫，七沢祐文，松田久和：N C型彫り放電加工機の最新技術，三菱電機技報，Vol.61，No.6，pp.440-447（1987）。
- 3) 齋藤長男編：放電加工のしくみと100%活用法，技術評論社，p.82（1979）。
- 4) 樋口俊郎，渡辺正浩，工藤謙一：圧電素子の急速変形を利用した超精密位置決め機構，精密工学会誌，54，11，pp.2107-2112（1988）。
- 5) D.W.Pohl：Dynamic piezoelectric translation devices，Review of Scientific Instruments，58，1，pp.54-57（1986）。
- 6) Burleigh Instruments Inc.：The Burleigh In-Vacuum，Linear Motor Positioning System，

Burleigh Park Fishers, NY14453.

- 7) 小田高広, 神谷好承, 岡部佐規一: 超音波振動を利用した紙の分離・搬送機構に関する研究 (第1報) 開発理念と基礎的実験, 精密工学会誌, 58, 3, pp.445-450 (1992).
- 8) A.Endo, N.Sasaki, Y.Tomikawa: Linear Type Ultrasonic Motor Using Two Dimensionally Positioned Piezoelectric Elements, Ferroelectrics, Vol.112, pp.165-170 (1990).
- 9) K. Mori, T.Kumagae, H.Hirai: Ultrasonic Linear Motor for a High Precision X-Y Stage, Proceedings of IEEE 1989 Ultrasonic Symposium, pp.657-660 (1989).
- 10) 樋口俊郎, 古谷克司, 山形 豊, 武田幸三: 超小型放電加工機の開発, 精密工学会誌, 57, 5, pp.910-916 (1991).
- 11) 毛利尚武, 森田浩充, 齋藤長男: 電極ダイレクトドライブ方式による細穴放電加工機の開発, 精密工学会誌, 58, 12, pp.2063-2068(1992).
- 12) 古谷克司, 毛利尚武, 齋藤長男, 樋口俊郎, 森田浩充: 衝撃力を利用した電極ダイレクトドライブ方式による超小型放電加工機の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'93講演論文集, pp.749-752 (1993).
- 13) 古谷克司, 毛利尚武, 樋口俊郎, 齋藤長男, 森田浩充: 楕円運動を利用した電極ダイレクトドライブ方式の開発, 平成5年度電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, pp.671-672 (1993).
- 14) K.Furutani, N.Mohri, T.Higuchi, N.Saito, H.Morita: Direct Drive Method of EDM Electrode Utilizing Elliptically Moving Devices, Proceedings of International Conference on Machining Technology in Asian & Pacific Regions, pp.224-229 (1993).
- 15) 長坂長彦: 電磁アクチュエータの分類とその性能評価, 電気学会論文誌D編, 107, 1, pp.42-49 (1987).
- 16) 広瀬茂男, 生田幸士, 梅谷陽二: 形状記憶合金アクチュエータの開発 (性能評価とその新構成法の導入), 日本ロボット学会誌, 4, 2, pp.89-100 (1986).
- 17) 栗林勝利: 新アクチュエータのエネルギー変換特性の比較, 日本ロボット学会誌, 7, 5, pp.435-445 (1989).
- 18) 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, 8, 16, pp.43-52 (1975).
- 19) 樋口俊郎, 古谷克司, 山形 豊, 武田幸三: 超小型放電加工機の重畳用圧電素子による性能の改善, 精密工学会誌, 58, 3, pp.501-506 (1992).
- 20) 今井祥人, 佐竹 彰, 森田 温: 高速駆動装置による放電加工状態の安定化, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.685-686(1990).
- 21) 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, 27, 55, pp.23-30 (1993).
- 22) T.Masuzawa, J.Tsukamoto, M.Fujino : Drilling of Deep Microholes by EDM, Annals of CIRP, 38, 1, pp.195-198 (1989).
- 23) T.Masaki, K.Kawata, T.Masuzawa : Micro Electro-Discharge Machining and Its Applications, Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical System, pp.21-26, Napa Valley, CA, USA (1990).
- 24) 鳳誠三郎, 倉藤尚雄 : 改訂放電加工, p.139, コロナ社 (1961).
- 25) 大島康次郎, 江川 巖 : ステップモータを利用した自動電極送り機構, 精密機械, 29, 10, pp.752-755(1963).
- 26) 毛利尚武, 佐藤益矛, 齋藤長男 : 差動型アクチュエータの開発研究, 精密工学会誌, 54, 4, pp.698-703 (1988).
- 27) 山田 一編 : リニアモータ応用ハンドブック, 工業調査会, p.3 (1986).
- 28) 坪島茂彦, 中村修照 : 新版モータ技術百科, オーム社, pp.109-110 (1993).
- 29) M.Fukui, N.Kinoshita : Developing a 'Mole' Electric Discharge Digging Machining, Annals of CIRP, 38, 1, pp.203-206 (1989).
- 30) D.Kremer, J.L.Lebrun, B.Hosari, A.Moisan : Effects of Ultrasonic Vibration on the Performance in EDM, Annals of CIRP, 38, 1, pp.199-202 (1989).
- 31) 田上雄二, 毛利尚武, 齋藤長男, 大竹廣定, 成宮久善 : 放電加工主軸ユニットの開発研究, 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.567-568 (1988).
- 32) 前田禎三 : 機械振動型自動放電加工に関して, 精密機械, 19, 8, pp.296-301 (1953).
- 33) Raycon Co. : EDM Drills Them Small : Modern machine Shape No.2732M.
- 34) 鳳誠三郎, 倉藤尚雄 : 改訂放電加工, pp.137-139, コロナ社 (1961).
- 35) 樋口俊郎, 古谷克司, 山形 豊, 武田幸三 : 多電極放電加工機の開発, 精密工学会誌, 58, 9, pp.1533-1538 (1992).
- 36) 高橋道郎, 大塚二郎, 小野一也, 臼田 孝, 東福 真 : 摩擦駆動による精密位置決めの研究 (第1報) 構造とトラクション特性, 精密工学会誌, 54, 4, pp.715-720 (1988).

(1994年8月30日受付)