

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：16101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686018

研究課題名(和文) 昆虫型マイクロロボットによる高自由度・長距離・小径曲がり穴放電加工システムの開発

研究課題名(英文) Development of Long, Thin, Complex, Curved Hole Electrical Discharge Machining System by Means of an Insect-Like Microrobot

研究代表者

石田 徹 (ISHIDA, Tohru)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：20313421

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,500,000円、(間接経費) 5,850,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の最終的な目的は機械加工では形成不可能な曲線状の穴の創成を可能とするマイクロロボットを開発することである。このマイクロロボットは、穴加工を担う自律的放電加工ユニット、管路内の走行を担う管内自走ユニット、形状の制御を担う方向制御ユニットから構成される。本研究では特に前2者の開発を行い、自律的放電加工ユニットについては、小型化や性能向上および設計法の確立を実現し、管内自走ユニットについては、その具現化と性能検証を行った。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this study is the development of the microrobot which can create curved holes impossible to be fabricated by conventional machining methods. This microrobot consists of the autonomous electrical discharge machining unit, the in-pipe self-movable unit, and machining direction steering unit. In particular, this study deals with the miniaturization, the performance enhancement, and the establishment of the design method, regarding the first unit, also deals with the embodiment and the performance verification, regarding the second unit.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：特殊加工 放電加工 曲がり穴 マイクロロボット 形状記憶合金 圧電素子

1. 研究開始当初の背景

機械加工により穴を形成する場合、一般的に利用される方法はドリルを用いた切削加工である。そのため、形成される穴の形状は基本的に直線状の穴すなわち直穴となる。よって、機械の設計や製造において、穴とは直穴を指し、穴加工とは直穴を形成することを指す。これらは機械設計や機械加工の分野では常識とされてきた。しかし、この常識は、たとえ直穴がふさわしくない場合でも、直穴を駆使せざるを得ないということをも意味している。このような制約による問題点は以前から指摘されていたものの、上記の常識に縛られ、最適とはいえないことを認識しつつも、直穴および直穴を連結した折れ線状の穴を適用せざるを得ないのが現状である。その典型例のひとつとして、金型に形成される冷却管の設計と加工がある。

金型冷却管とは金型に形成される管路のことである。この管路を流れる冷媒の流量と温度の調整により、製品成型中の金型の温度と熱流を適切に制御し、これによって製品に生じうる欠陥を防止するという重要な役割を担っている。したがって、金型冷却管の位置や形状は生産性の高低に直接関係することとなるため、金型冷却管の設計は金型を設計するうえで非常に重要な設計項目のひとつとなる。しかしながら、金型冷却管は一般にドリルを用いた加工により形成されるため、直穴もしくは折れ線状の穴にならざるを得ない。

このような問題を解決するため、曲線状の穴すなわち曲がり穴の加工法の開発が強く求められている。そこで、研究代表者は形彫放電加工機に取り付けることによって曲がり穴を加工できる装置を開発してきた。その一例として、研究代表者が本科学研究費助成を応募するまでに構想し、その実現を目標として研究を遂行してきた、蛇型管内走行マイクロロボットによる曲がり穴放電加工システムがある。このシステムを用いて事前に設計した所望の形状をした曲がり穴の創成や従来加工技術では形成不可能な曲がり穴の創成に成功した。しかし、次に示す問題も指摘されていた。すなわち、この加工システムでは、加工可能な曲がり穴の距離は蛇型機構の長さに依存

してしまう。とはいうものの、蛇型機構部分を長くすると、長さに比例して放電加工機主軸による極間距離制御動作の電極への伝達が難しくなり、放電加工の実現が困難となる。

この問題に対応するために、研究代表者は昆虫型管内自走マイクロロボットによる曲がり穴放電加工システムの構想に至った。開発目標となる昆虫型管内自走マイクロロボットは、次に示す3つのユニット、すなわち、自律的放電加工ユニット、管内自走ユニット、方向制御ユニットから構成されている。

2. 研究の目的

(1) 昆虫型管内自走マイクロロボットを構成する3つのユニットに関する研究開発

- ① 自律的放電加工ユニット
機能：曲がり穴の最底部における自律的な放電加工の実現
- ② 管内自走ユニット
機能：加工屑を含有する放電加工液が充填された曲線状管路内の走行
- ③ 方向制御ユニット
機能：ロボットの加工進行方向すなわち曲がり穴の形状の制御

(2) 昆虫型管内自走マイクロロボットによる曲がり穴放電加工を実現するためのロボット制御法の開発

- ① ロボットの自走軌跡の制御法 (=加工される曲がり穴形状の制御法) の開発
- ② ロボットの位置と姿勢の測定法 (=加工状況のモニタリング法) の開発

3. 研究の方法

(1) 加工システムの概要

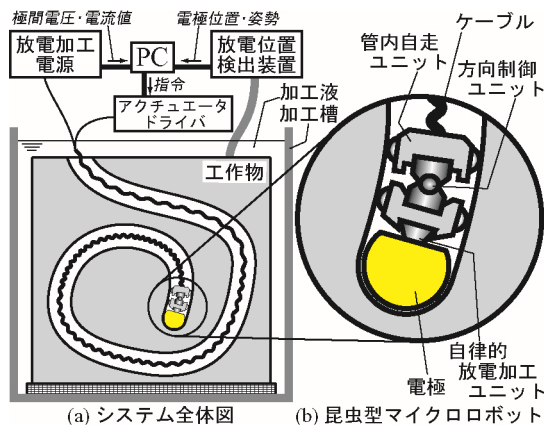
図1に昆虫型管内自走マイクロロボットによる曲がり穴放電加工システムの模式図を示す。

(2) 自律的放電加工ユニット

① 構造と動作過程および製作したユニット

図2に自律的放電加工ユニットの基本構造を示す。本ユニットは、バイアス式2方向性素子、電極、放電加工用電源と放電電流回路からなり、さらに、バイアス式2方向性素子は、形状記憶合金 (Shape Memory Alloy; SMA) 製のばね、ばね鋼製のバイアスばね、管体と軸からなる。加えて、素子を構成する両ばねは管体と軸を介して互いに力を及ぼし合うように組み付けられており、両者の力の釣り合いによって、軸とそれに付加された電極の位置が決まるような構造をしている。また、この放電加工によって生じた放電電流は SMA ばねを流れるように設計されている。

図3を用いて自律的放電加工ユニットの動作過程を説明する。本ユニットに加工電圧が印加された状態すなわち図2に示した状態から、図3(a)に示すように、工作物に接近させて極間距離が放電可能な距離となった位置で停止させたとする。これにより、放電加工が



(a) システム全体図 (b) 昆虫型マイクロロボット
図1. 昆虫型管内走行マイクロロボットによる曲がり穴放電加工システムの模式図

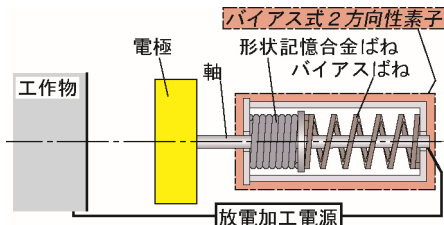
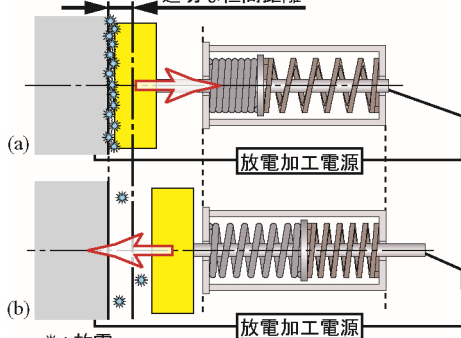


図2. 自律的放電加工ユニットの基本構造
適切な極間距離



※: 放電
図3. 自律的放電加工ユニットの動作過程

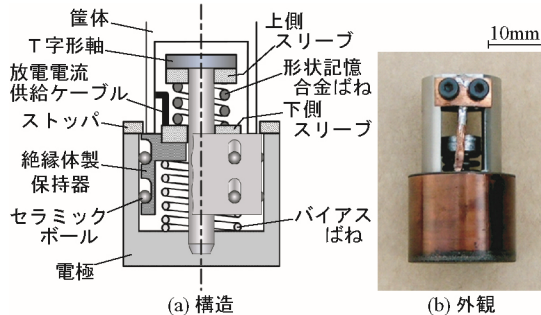


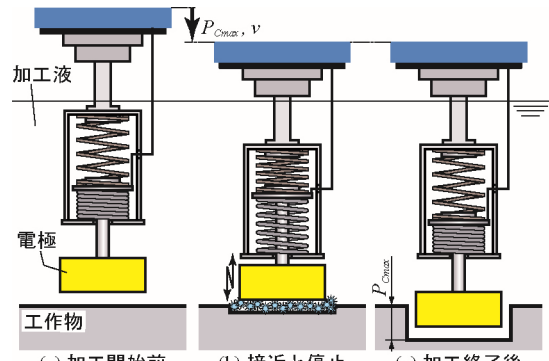
図4. 製作した自律的放電加工ユニットの構造と外観

開始されて放電電流が SMA ばねに流れ、SMA ばねが通電加熱される。図3(a)に示すように、極間距離が狭いと、加工電流は大きくなるため、SMA ばねの温度は上昇する。SMA ばねは変態温度以上になるとばね定数が増大するため、バイアスばねとの釣合い状態が変化し、電極が加工物から離脱するように軸が移動する。逆に、図3(b)に示すように、極間距離が広いと、加工電流が小さくなるため、加工液への放熱が優位となり、SMA ばねの温度は下降する。SMA ばねは変態温度以下になるとばね定数が減少するため、バイアスばねとの釣合い状態が元に戻り、電極が加工物に接近するように軸が移動する。

結果として、SMA ばねの加熱による電極離脱動作と SMA ばねの冷却による電極接近動作が拮抗し、極間距離は常に適切な距離に収束する。したがって、安定した放電加工が維持される。このように、自律的放電加工ユニットは極間距離を自動的かつ自律的に制御することによって、安定な放電加工を持続させることができる。図4に実際に製作した自律的放電加工ユニットを示す。

② 数理モデルの構築

自律的放電加工ユニットの構造と動作特性や加工特性の関係が十分に把握されていないため、これらの特性は実機を製作した後にその実機を用いた検証実験を行うことでしか確



(a) 加工開始前 (b) 接近と停止 (c) 加工終了後
図5. 自律的放電加工ユニットの基本的な運用方法

認できなかった。そこで、この問題の解決と本ユニットの定量的な設計法の確立を目指して、加工中の本ユニットの内部で起こる現象および本ユニットによる放電加工過程を数理モデル化した。

図5に自律的放電加工ユニットを用いて穴加工を行う際の本ユニットの基本的な運用方法を示す。図5(a)に示すように、なんらかの位置決め装置に取り付けた本ユニットは、加工電圧を印加したまま、極間距離 L_G が放電の発生しない最小の距離 L_{G0} となるように位置決めされる。次に、図5(b)に示すように、位置決め装置を用いて本ユニットを速度 v で距離 P_{Cmax} だけ加工物に接近させ停止させる。すると、極間距離は本ユニットにより制御され、放電加工が開始される。その後、図5(c)に示すように、深さ P_{Cmax} の穴が加工され、放電加工が終了する。

ここで、 P_C を加工物を視点とした本ユニット全体の移動量とし、鉛直下向きを負と、また、 P_E を本ユニットを視点とした本ユニットによる電極の移動量とし、鉛直上向きを正と、さらに、 L_M を本ユニットが加工した穴の深さとし、鉛直下向きを負とする。このとき、 L_G は次式のように表される。

$$L_G = P_C + P_E + L_M + L_{G0} \quad (1)$$

また、 P_E は、SMA ばねとバイアスばねのばね定数と初期たわみをそれぞれ K_S 、 X_{S0} 、 K_B 、 X_{B0} とすると、バイアス式2方向性素子の静的釣合いから式(2)のように表され、さらに、 K_S は、SMA ばねの温度を θ 、低温時と高温時の変態温度とばね定数をそれぞれ θ_{TL} 、 K_{SL} 、 θ_{TH} 、 K_{SH} として、 K_S と θ の関係が簡易的に線形であると仮定すると、式(3)のように表される。

$$P_E = \frac{K_S X_{S0} - K_B X_{B0}}{K_S + K_B} \quad (2)$$

$$K_S = K_{SL} + \frac{K_{SH} - K_{SL}}{\theta_{TH} - \theta_{TL}} (\theta - \theta_{TL}) \quad (3)$$

一方、SMA ばねの加熱と冷却はニュートンの冷却法則に従うとし、SMA ばねの電気抵抗、熱容量、熱伝達係数、表面積をそれぞれ R 、 C 、 α 、 S と、また、放電電流を I 、加工液の温度を θ_w 、加工時間を t とすると、 θ と I の関係は式(4)のように表される。

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{I^2 R + \alpha S (\theta - \theta_w)}{C} \quad (4)$$

さらに、数理モデル化のためには、 I と L_G の関係と I と L_M の関係を得なければならないが、これらの関係は、基礎実験を行い、その結果から近似曲線を求めた。得られた関係をそれぞれ式(5)、式(6)に示す。

$$I = I_{max} \left\{ 1 - e^{-60(L_{Gmax} - L_G)} \right\} \quad (5)$$

$$\frac{dL_M}{dt} = 0.0006I^2 + 0.0057I \quad (6)$$

最後に、式(1)を t で微分し、式(2)から式(6)の関係を利用すると、式(7)が得られる。

$$\frac{dL_G}{dt} = v + \frac{dP_E}{dK_S} \frac{dK_S}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} + \frac{dL_M}{dt} \quad (7)$$

$t=0$ のとき、 $\theta = \theta_W$ 、 $L_G = L_{G0}$ という初期条件、および、本ユニットによる穴加工の過程、すなわち、 $\theta < \theta_{TS}$ の段階、 $\theta_{TL} \leq \theta$ かつ $P_C < P_{Cmax}$ の段階、 $P_C = P_{Cmax}$ の段階という条件において、上記の式を解くと、ADGC を用いた放電加工の全過程における I 、 θ 、 P_E などの経時的な変化を計算することができる。

(3) 管内自走ユニット

① 概要

図6は昆虫型管内自走マイクロロボットによる穴加工過程を概念的に表している。この図に示すように、管内自走ユニットは2つの突張機構と伸縮機構で構成されており、前者が後者を挟むように配置されている。これらの機構により、管内自走ユニットは尺取虫のような動作を実現する。

昆虫型管内自走マイクロロボットに図6に示すような穴加工を実現させるためには、管内自走ユニットは加工くずの含有する加工液が充填した穴の中において上記の動作を実現しなければならない。よって、搭載すべきアクチュエータは次の条件を満たす必要がある。条件1：自律的放電加工ユニットによる加工が可能な動作が実現できる。条件2：高精度かつ発生力が大きい。条件3：加工液（放電加工油）中で使用できる。条件4：加工くずが付着しないように磁気を帯びない。以上の条件を満足するアクチュエータとして、本研究では、圧電素子を採用することにした。

② 突張機構の開発

図7に設計した突張機構の構造を示す。突張機構は皿板、屈曲梁、圧電素子および皿板

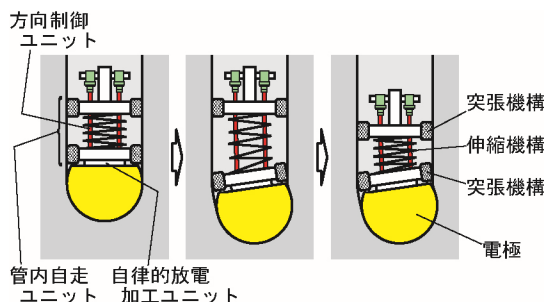


図6. 昆虫型管内自走マイクロロボットによる穴加工過程の概念図

ねで構成されている。直方体形状をした3つの圧電素子が2枚の皿板の間に配置され、皿板の外側から3本の屈曲梁で挟み込むようにしてボルトおよび皿ばねで締め付けられている。このとき、圧電素子は皿板の同心円上に120°間隔で配置されており、屈曲梁は圧電素子と同じ位置に同心円上120°間隔で配置されている。

図8に突張機構の動作を示す。この図に示すように、屈曲梁は加工穴の中心軸方向に生じる圧電素子の力と変位を加工穴の半径方向に変換する役割に加え、圧電素子の変位を拡大する役割も担っている。すなわち、図8(a)に示すように、圧電素子が縮んでいるときは、変位部は縮まるため、突張機構は穴に自身を固定していない状態となる。逆に、図8(b)に示すように、圧電素子が伸びているときは、変位部は広がるため、突張機構は穴に自身を固定している状態となる。すなわち、屈曲梁が突張る動作は圧電素子に印加する電圧を操作することにより制御することができる。

また、この図に示すように、屈曲梁の短手の長さを X 、角度を θ とし、圧電素子が伸びる際の圧電素子の伸びと変位部の変位をそれぞれ ΔL 、 a とすると、両者の関係は次式で表わされる。

$$a = \sqrt{X^2 - (X \cos \theta - \Delta L)^2} - X \sin \theta \quad (8)$$

式(8)より、突張機構の条件を $\theta = 10^\circ$ 、 $X = 10\text{mm}$ 、 $\Delta L = 17.4\mu\text{m}$ とした場合、 $a = 96\mu\text{m}$ となる。すなわち、変位部は圧電素子の伸びを5.5倍に拡大することになる。

③ 伸縮機構の開発

伸縮機構の仕様は自律的放電加工ユニットの性能に依存する。すなわち、自律的放電加工ユニットの許容可能な最大移動距離は $850\mu\text{m}$ であるため、伸縮機構による位置決め最小分解能は $850\mu\text{m}$ 以下であればよい。また、穴を加工するために、伸縮機構は図5や図6に示すように自律的放電加工ユニットを工作物の方向に移動させるが、放電加工が開始してから終了するまでに数分を要するため、伸縮機構による管内自走ユニットの単位時間

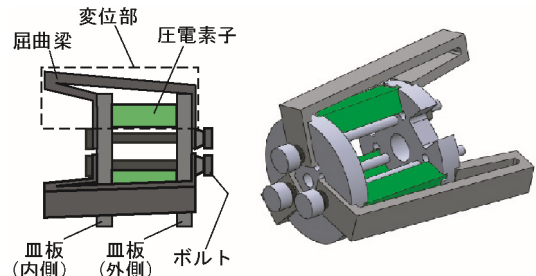


図7. 突張機構の構造

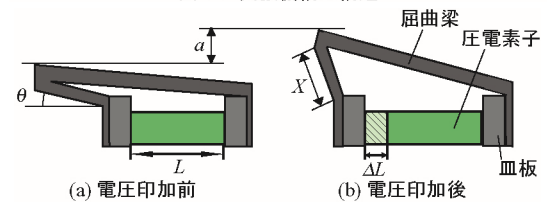


図8. 突張機構の動作

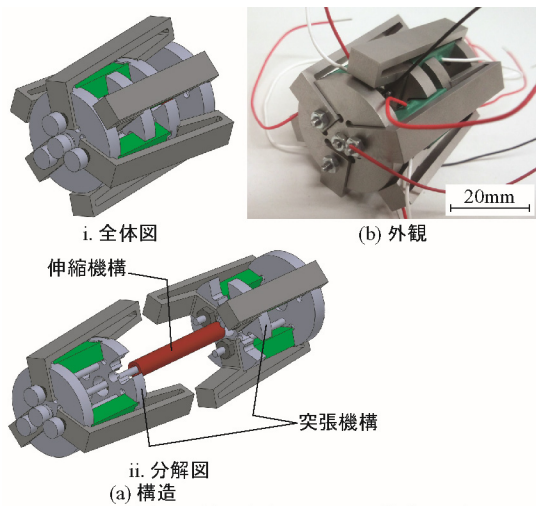


図9. 製作した管内自走ユニットの構造と外観

あたりの移動回数は少なくてもよい。さらに、自律的放電加工ユニットの許容可能な最大移動速度は8mm/minであるため、管内自走ユニットの移動速度はそれ以下であることが望ましい。よって、以上の仕様を満足させるために、伸縮機構として円筒形状の圧電素子を採用した。この圧電素子の最大変位と最大駆動周波数はそれぞれ2.7 μm 、23kHzである。したがって、求められている最小分解能を十分に満たしており、また、管内自走ユニットの移動速度0~8mm/minを実現させるために必要な駆動周波数は0~50Hzとなるため、求められる駆動周波数を十分に実現できる。

④ 製作したユニット

図9に2つの突張機構と伸縮機構を組み立て実際に製作した管内自走ユニットを示す。この図に示すように、2つの突張機構がお互いに干渉しないようにずらした状態で配置されており、その間に伸縮機構が内蔵されている。円筒形状の伸縮機構の内部にボルトを通すことにより、2つの突張機構と伸縮機構が固定されている。寸法は全長が43.0mm、外径が39.8mmである。

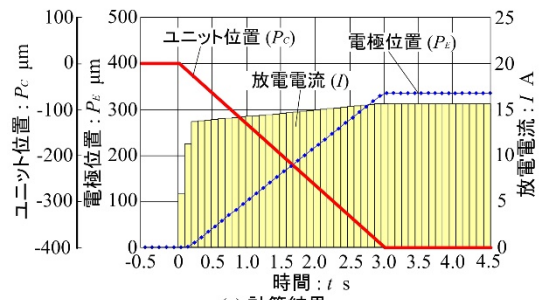
4. 研究成果

(1) 自律的放電加工ユニット

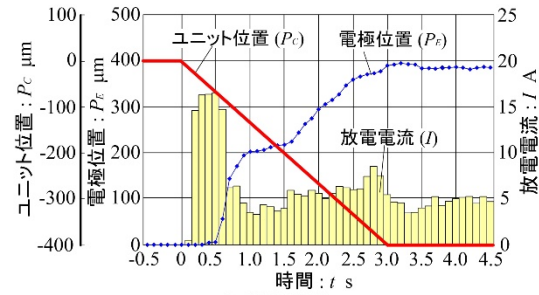
数理モデルの妥当性を検証するために、ルンゲ・クッタ法を用いて数値計算を行った。この計算に用いた条件は、 $P_{Cmax} = 400\mu\text{m}$ 、 $v = 8\text{mm/min}$ 、 $I = 13\text{A}$ 、 $I_{max} = 17\text{A}$ 、 $\theta_w = 303\text{K}$ 、 $L_{G0} = 85\mu\text{m}$ とし、バイアス式2方向性素子に関するパラメータは実際に設計製作した自律的放電加工ユニットの値とした。また、計算のタイムステップは10 μs とした。

図10(a)に計算結果を示す。このグラフは、加工開始初期の P_C 、 P_E 、 I を100ms毎の平均値で表している。計算は発散することなく収束し、図5に示す全過程について計算することができた。

図10(b)に計算に用いた条件とほぼ同一の条件において放電加工実験を行ったときの電極動作と放電電流の計測結果を示す。この計測結果は本研究で開発した計測方法と計測装



(a) 計算結果



(b) 計測結果

図10. 数理モデルによる計算結果と実機による計測結果の比較

置を用いて得たものである。図10(a)と図10(b)に示したグラフの比較から、計算結果は実験結果のおおよその傾向を表現できているといえ、提案した数理モデルが妥当であることがわかる。

したがって、この数理モデルを利用して、本ユニットの構造と動作特性や加工特性の関係を定量的に把握すること、および、本ユニットを定量的に設計することが可能となった。

(2) 管内自走ユニット

① 突張機構の耐荷重実験

開発した突張機構が実際に加工穴の内部において昆虫型管内自走マイクロロボットを支持することが可能か、すなわち、突張機構が昆虫型管内自走マイクロロボットの自重以上の荷重を支持することができるかを検証する基礎的な実験を次に示す方法により行った。

突張機構を仮想の加工穴に挿入し、突張らせる。次に、突張機構の上に分銅を積載していき、徐々に加える荷重を増加させる。最後に、突張機構が荷重に耐えられなくなり、落下したときの荷重を支持可能荷重とした。このような実験を空気中と加工油中で行った。また、昆虫型管内自走マイクロロボットの質量を200gと想定し、200gf以上の支持荷重があれば、突張機構はその機能を果たせるものとした。

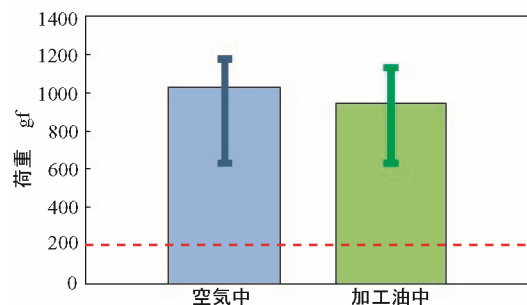


図11. 突張機構の支持可能荷重の測定結果

図 11 に実験により得られた突張機構の支持可能荷重を示す。図に示すように、突張機構は空気中および加工油中ともに 200gf 以上の支持可能荷重を有することを確認できた。

② 突張機構の周波数特性

自律的放電加工ユニットの許容可能な最大移動速度より、管内自走ユニットの移動速度は 0 ~ 8mm/min となることが求められる。伸縮機構の最大変位が 2.7 μ m であるため、突張機構の駆動周波数は 0 ~ 50Hz となる。そこで、突張機構の周波数特性を検証する動作実験を行った。具体的には、突張機構の圧電素子にするパルス電圧の周波数を徐々に増加させ、屈曲梁の変位を高精度変位計で測定した。

図 12 にその実験結果を示す。縦軸の変位は一定の入力電圧を印加した時の屈曲梁の変位を 100%としている。この図に示すように、変位は約 280Hz から急激に低下している。この結果から、突張機構は入力電圧の周波数が 0 ~ 280Hz の範囲で追従することが可能であることがわかる。したがって、求められる管内自走ユニットの移動速度を十分に実現できることが確認できた。ただし、追従可能な周波数の範囲中に、変位の急増がいくつか見られたが、これは突張機構が共振したためである。

③ 管内自走ユニットの動作実験

開発した管内自走ユニットが加工穴内部を自走できるかを確認するために、管内自走ユニットの動作実験を行った。この実験は、管内自走ユニットを仮想加工穴に挿入した後、前後の突張機構および伸縮機構のそれぞれに位相の異なるパルス電圧を入力し、仮想加工穴を 1 分間自走させ、そのときの管内自走ユニットの位置をレーザ変位計で測定することによって行った。入力するパルス電圧の周波数の設定によって、管内自走ユニットの移動

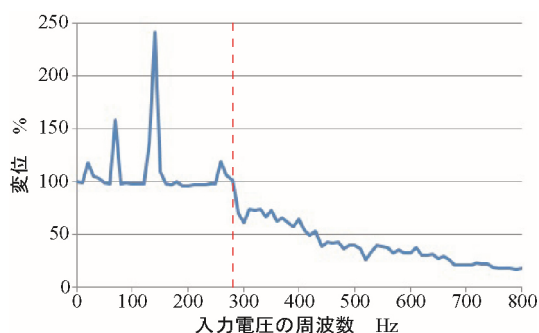


図 1 2 . 突張機構の周波数特性

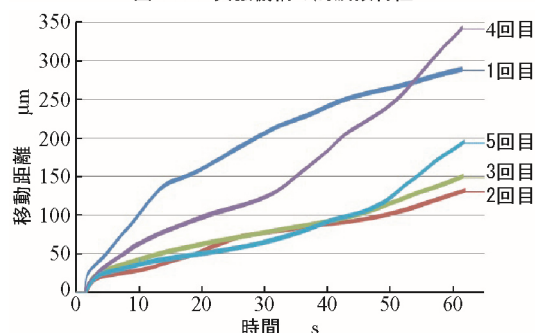


図 1 3 . 管内自走ユニットの動作実験結果

速度を実現できる。

図 13 に実験結果を示す。このグラフはするパルス電圧の周波数を 50Hz としたときの時間と管内自走ユニットの移動距離の関係(試行回数:5 回分)を示している。このグラフからわかるように、管内自走ユニットは仮想加工穴を自走している。しかしながら、グラフの傾きすなわち自走速度が一定にならず、また、試行回数によっても自走距離に大きなばらつきが生じた。今後、この原因の究明と改良が必要と考える。

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 3 件)

- (1) 北 正彦, 石田 徹, 寺本孝司, 竹内芳美: 曲がり穴放電加工用極間距離自動制御機構の設計法に関する研究, 精密工学会誌, 77, 4 (2011.4) 411-416. (査読: 有)
DOI: 10.2493/jjspe.77.411
- (2) Masahiko Kita, Tohru Ishida and Yoshimi Takeuchi: Direct Measurement of Electrode Movement during Electrical Discharge Machining by Means of Automatic Discharge Gap Controller, Int. J. of Automation Technology (IJAT), Fuji Technology Press, 4, 6 (2010.11) 552-561. (査読: 有)
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=IJATE000400060009.xml>
- (3) Tohru Ishida and Yoshimi Takeuchi: Design and Implementation of Automatic Discharge Gap Controller for a Curved Hole Creating Microrobot with an Electrical Discharge Machining Function, Int. J. of Automation Technology (IJAT), Fuji Technology Press, 4, 6 (2010.11) 542-551. (査読: 有)
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=IJATE000400060008.xml>

[学会発表] (計 2 件)

- (1) 長澤誠治, 石田 徹, 北 正彦, 中本圭一, 竹内芳美: 曲がり穴放電加工のための弾性波測定を用いた電極位置検出に関する研究, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 17-18, 2011.3.14, 東洋大学白山キャンパス (東京都).
- (2) 北 正彦, 石田 徹, 中本圭一, 竹内芳美: 極間距離自動制御機構の基礎的数理モデルの構築と検証, 電気加工学会全国大会 (2010) 講演論文集, 73-74, 2010.11.26, アクティシティ浜松 (静岡県).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石田 徹 (ISHIDA, Tohru)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号: 20313421