ジャンプ動作制御による形彫放電加工の安定化*

ー高速高精度ジャンプ動作制御系と加工液反力制御系の設計ー

中川孝幸** 阿久根光明*** 神谷聖人*** 三平満司† 平田 敦††

Machining Stabilization for Die-sinking EDM with Jump Motion Control
- Design of High Response and Precision Controller and Disturbance Rejection Controller -

Takayuki NAKAGAWA, Mitsuaki AKUNE, Kiyohito KAMIYA, Mitsuji SAMPEI and Atsushi HIRATA

This paper discusses optimal control of jump motion for die-sinking electrical discharge machining(EDM). Efficient flushing machining debris from a clearance between an electrode and a workpiece is important to improve machining stability, precision and speed. The fast jump motion realizes the efficient flushing and decreases the idling time, but excites the machine vibration. Moreover, reaction force from dielectric fluid causes the machining unstable. In this paper, optimal control has been developed for the jump motion. The first controller was designed using 2-inertia model with optimal control theory whose objective function included vibration and speed. The second one, which consisted of sine and square waves, was derived from Fourier expansion. Added to these, the disturbance reduction control strategy has been proposed for the large or thin electrode. The new motion control improves the jump speed and reduces machine vibration and electrode damage, and it has been confirmed the efficiency in experiments.

Key words: electrical discharge machine, jump motion, optimal control, reaction force, machining stability

1. 緒 言

放電加工は、電極と被加工物を数から数十 μm の範囲に距離を保ちながら、その間に電圧を印加してアーク放電を発生させることにより被加工物を溶解する加工方法である。加工により発生する加工屑が電極と被加工物の間に堆積すると加工速度や加工精度への影響が懸念される¹⁾。特に形彫放電加工は被加工物が凹形状になり加工屑が排出されにくい状態で加工することが多いため、加工屑を効率良く排出させることが高速高精度化において重要である。

加工屑を排出させる方法の1つとして、ジャンプ動作によるポンピング作用を用いる方法がある²⁾。これは電極と被加工物の距離を一時的に広げる動作であり、高速に実施することで加工屑を効率的に排出できることが知られている。しかしながら、急激な加減速動作により機械振動が励起されると、電極と被加工物の衝突やジャンプ動作終了後まで残留した機械振動の影響により加工が不安定化する。結果として加工速度や加工精度が悪化する場合がある。さらに、一般に対向面積が増大する大面積電極や電極の剛性が低いリブ電極を用いた加工において高速にジャンプ動作を行うと、加工液から受ける流体反力により機械振動が励起されるだけでなく、電極や被加工物の破損や変形、固定部の緩みなどによる加工精度の悪化が懸念される³⁾。

今井らは、モード解析により機械系をモデル化し、機械変形量から流体反力を推定した値に基づいて加工指令を補正することで加工精度が向上することを確認している⁴⁾。しかしながら、これまでに加工液から受ける反力の発生を抑制することを目的

とした研究例は報告されていない。

ロボットアームなどの機械振動を励起しないよう指令軌跡にフィルタを導入した研究例が数多く報告されている⁵⁾⁶⁾。異なる2点間の片道移動であれば、フィルタを導入することにより移動時間が増加するものの、途中経路は問われないため問題とならない。形彫放電加工機のジャンプ動作のように経由点を通して開始点方向に戻る動作に対して単純にフィルタを導入すると、条件によっては経由点に到達する手前で折り返し動作することになる。加工屑排出能力や加工時間に大きな影響を与えるジャンプ動作の距離は、設定条件通りとすることが望まれる。

本論文では、機械本体や電極の振動を励起することなく高速なジャンプ動作を実現する制御方式を提案する。まず、2慣性振動系にて放電加工機をモデル化し、機械振動を励起することなくジャンプ動作を高速化する手法について述べる。さらに、加工液から大きな流体反力を受ける場合を考慮して、反力の状態をリアルタイムに検出してジャンプ動作を制御することで、流体反力を抑制しつつ高速なジャンプ動作を実現するジャンプ制御方式を提案する。また、横方向に剛性が低いリブ形状電極を用いた加工にも本手法を適用し有効性を確認した結果を示す。

Fig.1 Die-sinking Electrical Discharge Machine

* 原稿受付 平成 27 年 2 月 17 日

掲載決定 平成 27 年 6 月 29 日

** 正 会 員 三菱電機株式会社 (東京都千代田区丸の内 2-2-3)

*** 三菱電機株式会社

† 東京工業大学 (東京都目黒区大岡山 2-12-1)

†† 正 会 員 東京工業大学

Fig.2 Schematic illustration of 2-inertia system

Fig.3 Block diagram of position control system

2. 最適化理論によるジャンプ動作指令軌跡の導出

2.1 2 慣性モデル

本章では図 1 に示す形彫放電加工機について議論する。本装置は回転型モータとボールねじの組み合わせにより、モータの回転動力をボールねじにより直進方向に変換する構成となっている。そこで、図 2 に示す 2 慣性系にて放電加工機の駆動軸の 1 つをモデル化し、ジャンプ動作指令軌跡の最適化手法について述べる。

このモデルはモータ慣性 J_m と負荷慣性 J_l がバネ K_s を介して接続されており、モータトルク T_m がモータ慣性 J_m に供給される構成となっている。モータ慣性、負荷慣性の回転角度をそれぞれ θ_m , θ_l とする。ここでは慣性の回転運動としてモデル化したが、実際はボールねじにより直進運動に変換されている。負荷慣性の回転角度にボールねじのリードを乗算したものが直進移動距離となる。ここで負荷慣性は直進運動する機械構造体の質量を含めて負荷慣性として考慮する。

この制御対象に対して図 3 に示す位置制御系を構成する。ここで、 ref はジャンプ動作の回転角度指令、 K_p , K_v はそれぞれ位置制御ゲイン、速度制御ゲインを示す。このときのモータ慣性と負荷慣性の位置と速度を状態変数として状態方程式を導出した結果を式(1)~(8)に示す。

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Br \quad (1)$$

$$y = Cx + Dr \quad (2)$$

$$x \triangleq [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [\theta_m, \frac{d\theta_m}{dt}, \theta_l, \frac{d\theta_l}{dt}]^T \quad (3)$$

$$r \triangleq T_m \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_s + K_p K_v}{J_m} & -\frac{K_v}{J_m} & \frac{K_s}{J_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_s}{J_l} & 0 & -\frac{K_s}{J_l} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_p K_v}{J_m} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$D = 0 \quad (8)$$

また、各パラメータを表 1 に示す値とする。このときの回転角度指令 ref から負荷慣性位置($y = x_3$)への周波数応答を図 4 に

Table 1 Simulation parameter

Position loop gain	K_p	200
Velocity loop gain	K_v	1
Motor inertia	J_m	1.0 kg m ²
Load inertia	J_l	1.2 kg m ²
Spring constant	K_s	50 N/m

Fig.4 Bode diagram for position control system

示す。本制御系の共振周波数は約 100Hz になっているため、急な加減速指令を与えるとこの周波数で軸端が大きく振動する。この機械振動を励起することなく高速に動作するジャンプ動作指令軌跡が必要である。

2.2 拘束条件付き最適化問題

本節では前述のモデルを用いた拘束条件下における最適化理論により、振動を抑制しつつ高速な動作を実現するジャンプ動作指令軌跡の導出方法について述べる。まず、式(9)に示す評価関数と拘束条件を定義する。

評価関数：

$$\min_{ref(t)} \left[w_t \int_0^{t_1+t_2} HPF\{T_m(t)\} dt - \int_0^{t_1} ref(t) dt \right] \quad (9)$$

拘束条件：

- [1] 加速度が制限値以下： $|T_m(t)| \leq 5 \text{ G}$
- [2] 速度が制限値以下： $|x_2(t)| \leq 5 \text{ m/min}$
- [3] 最終速度が設定値以下： $|x_2(t_1)| \leq 0.1 \text{ m/min}$
- [4] 始点・終点において位置指令が連続： $ref(0) = ref(t_1) = 0$

この評価関数は、第 1 項で機械振動の大きさ、第 2 項でジャンプ速度を表す。機械振動の大きさの指標として、加速度に比例するトルクの機械振動周波数以上の成分を用いる。また、ジャンプ速度の指標として、一定時間内で移動する距離を用いるが、ジャンプ速度が大きくなるに従って評価関数が小さくなるように設定するため減算する。

ここで、ジャンプ動作指令開始時刻を 0、終了時刻を t_1 、ジャンプ動作指令終了後の振動評価時間を t_2 とする。また、HPF は振動成分を抽出するためのハイパスフィルタ、 $T_m(t)$ はモータトルク、 $ref(t)$ は本最適化問題で導出するジャンプ動作の位置指令軌跡、 w_t は高周波振動成分への重みを示す。式(9)に示す評価関数を最小にすることは、規定時間内でジャンプ動作の高さを大きく、かつ、機械共振周波数を含む高周波領域におけるトルク変動を抑制し、機械振動を抑制することを意味する。 w_t の値を大きくするに従って機械振動が抑制され、ジャンプ動作の高さが小さくなるため、ここでは残留振動が $1\mu\text{m}$ となる範囲で小さ

(a) Full view

(b) Partial enlarged view

Fig.5 Simulation results for optimal control theory

な値を選択する。評価関数を最小化する指令軌跡は、MATLAB™ 及び同ソフトのオプションである Optimization Toolbox™ の fmincon 関数によりサンプリング 2ms の指令軌跡を導出する。

2.3 シミュレーション結果

図 5 にジャンプ距離を 3mm、評価関数内のハイパスフィルタを遮断周波数 50Hz、次数 1 とし、高周波振動成分への重み w_t を 20 とした場合のジャンプ動作指令軌跡と負荷慣性位置のシミュレーション結果を示す。ここで、(a)は全体図、(b)はジャンプ動作終了前後の拡大図である。なお、位置、速度、加速度は直進方向に換算した値を示す。位置指令を赤一点鎖線、モータ慣性位置(x1)を青破線、負荷慣性位置(x3)を黄緑実線で示す。

本手法では指令位置と実際の位置の差を評価関数に加えていないため時刻 0.05~0.06s におけるモータ慣性位置や負荷慣性位置が指令軌跡よりも 0.2mm 程度小さくなっているものの、ジャンプ終了前後の負荷の振動幅が 1μm 以内に収まっており良好な結果が得られている。

しかしながら、本手法はジャンプ動作指令軌跡を導出するまでに Intel Core i5 3570(クロック 3.40GHz)搭載の計算機を使用した場合、数分間の演算時間を要するため、リアルタイム処理で実機への搭載には課題が残る。また、事前に設定可能なジャンプ高さそれぞれでジャンプ動作指令軌跡を導出し、メモリに保存する方法ではメモリ容量の点で実機搭載が難しくなるなどの問題点がある。

3. 解析的ジャンプ動作指令軌跡の導出

3.1 ジャンプ動作指令軌跡の最適化

本節では、図 2, 3 に示す放電加工機の 2 慣性振動系モデルに対

Fig.6 Fundamental reference for jump motion

Fig.7 Fundamental wave without limit

し、前節で述べた最適化理論の課題を解決するため、解析的に指令軌跡を導出できるよう正弦波と矩形波で構成した基本波形の組み合わせにてジャンプ動作終了時の振動を考慮しながらジャンプ動作の短時間化を図る手法について述べる。

機械振動を励起しないよう機械共振周波数における振動成分が基準値以下となり、かつ、動作を高速化させるような指令軌跡を導出する。正弦波部分は単一周波数成分しか持たないことから、機械共振周波数よりやや小さい周波数成分とすることで機械振動を励起せず、動作を高速化することができる。矩形波部は周期と振幅により高周波成分が決まることからフーリエ級数展開にて算出する。

図 6 に本手法におけるジャンプ動作の指令軌跡を示す。機械共振を励起しないよう十分に滑らかな加速度パターンを生成し、積分することで速度パターン、さらに積分することで位置指令軌跡を導出する。ここで振動成分を考慮する基準角周波数を W_c とし、基準角周波数以上の成分が事前設定値 C_m 以下となるようなジャンプ動作指令軌跡を生成する。基準角周波数 W_c として機械共振周波数を設定し、機械共振を励起しない程度に十分小さい C_m を設定することで機械振動を抑制できる。軸の上昇、下降動作それぞれで加減速があるため、加速度パターンは 1 つの山を基本パターンとして正側に 2 つ、負側に 2 つで構成する。ここで、加速度が最大値に達しない場合と達する場合に分けて基本パターンの高周波成分を述べる。

3.1.1 最大加速度に達しない場合

ジャンプ動作中の移動距離が小さい場合、最大加速度に達する前に減速を始める必要がある。このように加速度が最大値に達しない場合の加速度の基本波形を図 7 に示す。

この基本波形は、0 を中心とした正弦波と高さ $a/2$ の矩形波に分解できる。正弦波部分は単一周波数成分のみを持っているため、この周波数を基準角周波数 W_c よりも小さい周波数に設定することで基準角周波数 W_c の成分を含まない指令軌跡にすることができる。次に矩形波に含まれる基準角周波数成分について述べる。図 8 に周期 T 、振幅 A の矩形波を示す。この矩形波のフーリエ級数展開を式(10)に示す。

Fig.8 Square wave

Fig.9 Fundamental wave with limit

$$\frac{4A}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{2m+1} \sin \frac{2(2m+1)\pi}{T} t \right\} \quad (10)$$

ここで本来 m は 0 以上の整数であり、離散化されたものである。設定した機械振動周波数が実機と完全に同一であれば離散化された値で議論すれば問題ないが、一般的に両者には誤差があるため、ここでは離散値を結んだ曲線の基準角周波数成分を議論する。以下は m を実数と仮定し、矩形波の基準角周波数 W_c における成分の大きさ C_c を求めると式(11)のようになる。

$$C_c = \frac{8A}{W_c \cdot T} \quad (11)$$

ここで、矩形波の周期は正弦波部分の周波数によって決まるため、 $T/2 = 2\pi/\omega$ 、 $2A = a/2$ を代入して式(11)で示す矩形波の基準角周波数 W_c における大きさ C_c が C_m 以下になる条件は式(12)のようになる。

$$\omega \leq \frac{2\pi W_c}{a} C_m \quad (12)$$

3.1.2 最大加速度に達する場合

最大加速度に達する場合の基本パターンを図 9 に示す。図 9 に示す波形は正弦波と次に示す 2 つの矩形波に分解できる。

- ・振幅： $\frac{a}{2}$ ，周期 $2t_a$
- ・振幅： $\frac{a}{2}$ ，周期 $2\left(\frac{2\pi}{\omega} + t_a\right)$

これらに対してフーリエ級数展開を用いて基準角周波数 W_c における成分を演算する。ここで基準角周波数 W_c における許容値を C_m とすると、条件を満たす t_a は

$$t_a \geq \frac{-\pi C_m W_c + 2a\omega + \sqrt{\pi^2 C_m^2 W_c^2 + 4a^2 \omega^2}}{C_m W_c \omega} \quad (13)$$

となる。さらに、最大加速度、最大速度、ジャンプ高さなどによる制約条件から関係式を導出し、各パラメータを算出することでジャンプ動作指令軌跡を生成する。

(a) Position trajectory (full view)

(b) Position trajectory (partial enlarged view)

(c) Velocity trajectory

Fig.10 Jump trajectory

3.2 シミュレーション結果

本節では解析的手法によるジャンプ動作のシミュレーション結果(ana で図示)を示すとともに、前章にて述べた最適化理論によるジャンプ動作(opt で図示)を比較する。ジャンプ距離は 3mm とし、最適化理論のパラメータは前章と同じ値を用いた場合の両者のシミュレーション結果を図 10 に示す。開始直後は最適化理論によるジャンプ動作の方が早く加速しているが、解析的手法によるジャンプ動作の方が最大速度(5m/min)で動作している時間が長くなっているため、2μm 以内に収束する時間で比較すると最適化理論の 0.125s に対して解析的手法は 0.131s となり、時間の差は 5%未満となった。これらの結果から、解析的手法は演算量を実装可能な範囲まで抑制しながら、最適化理論によるジャンプ動作指令軌跡とほぼ同等の性能が得られることが確認できた。

Fig.11 Time sequence of axis position and current

4. 加工液反力抑制制御

4.1 大面積加工における高速ジャンプ動作の課題

図 11 に $\phi 180\text{mm}$ の円柱電極にて加工時(in Liquid で図示)と非加工時(in Air で図示)のジャンプ動作開始前後の電極位置と電極を駆動するモータの電流を示す。ここでモータ電流は本装置の定格値との比を示す。非加工時のジャンプ動作では、電極の動作に応じてモータ電流が増加する。ここで 0.03s 前後で電流値がやや大きくなっているが、これは静止状態から動き出す際の静止摩擦の影響によるものである。一方、放電加工中のジャンプ動作は、電極と被加工物の間を $10\mu\text{m}$ 前後の狭い距離を保った状態から高速動作を行うため、特に大面積加工時に加工液から大きな反力を受ける。その影響で、0.05~0.07s 前後の時間帯でモータ電流が増大するとともに電極位置が大气中のジャンプ動作と比べて最大 $100\mu\text{m}$ 程度遅れていることが観測できる。なお、加工により加工屑が発生するため、一般的には電極位置がやや上昇している状態でジャンプ動作に移行する。そのため、静止摩擦の影響が小さくなり、非加工時のように 0.03s で電流の増加がみられない。

対向する平面を高速に引き離すと、スクイーズ効果によって加工液から大きな外力が加わることが知られている⁷⁾。粘度 μ の流体の中で半径 r の円形の板 2 枚が距離 h で対向しており速度 v で移動する場合の流体から受ける外力 F を式(14)に示す。

$$F = \frac{3\mu\pi r v^4}{2h^3} \quad (14)$$

ここで、放電加工時を想定して距離 $h=20\mu\text{m}$ 、電極半径 $r=90\text{mm}$ 、速度 $v=300\text{mm/min}$ 、加工液の粘度 $\mu=2.42\text{ mPa}\cdot\text{s}$ (20°C における灯油の粘度)とすると、加工液から受ける外力 F は約 470kN となる。このように、電極や被加工物には大きな外力が部分的に加わっており、電極や被加工物電極や被加工物の変形やずれだけでなく、機械本体の振動や変形などが懸念される。しかしながら、距離 $h=1\text{mm}$ であれば他は同一条件でも外力 F は約 5N と小さくなる。電極や駆動軸など駆動部分の質量を 50kg 、加速度を 9.8m/s^2 とすると、駆動に必要な推力に比べて加工液の影響は十分小さいため、距離が十分広がった後は加工液から受ける流体反力の影響を無視できる。

4.2 流体反力制御手法

本節では、大面積電極使用時、かつ、放電加工時の約 $10\mu\text{m}$ と

Fig.12 Disturbance control method

Fig.13 Time sequence of axis position and disturbance

狭い距離からジャンプ動作を行う場合でもリアルタイムに流体反力を抑制しながらジャンプ動作を高速化する手法を述べる。

電極と被加工物の距離が短くなる場合としてジャンプ動作の開始直後と終了直前が挙げられるが、ジャンプ動作下降における高速動作は数十から数百 μm 手前までであり、そこから緩やかに近づける条件が一般的に用いられることからジャンプ動作終了直前には過大な流体反力は発生しない。そこで、ジャンプ動作開始直後の流体反力を抑制する制御手法を提案する。

図 12 に本制御を適用しない場合を赤破線、本制御を適用した場合を青実線で指令軌跡を示す。以降、時刻 $T1$ において流体反力によって変化する指標値が事前設定値に達したものと動作を説明する。時刻 0 から時刻 $T1$ の間は、前章にて述べた解析的ジャンプ動作指令軌跡を使用する。時刻 $T1$ において指標値が設定値に達したことを検出するとその時点から加速度を減少させ、時刻 $T2$ において一旦速度の増加を止める。その際、解析的手法で用いた正弦波の位相を途中で変更するため、時刻 $T1$ において加速度は連続であるがその変化量が不連続になり機械共振をやや励起することになるが、大きな流体反力を開放することの効果の方が大きいことや、ジャンプ動作終了までに十分時間があるためダンピング効果により振動の収束が期待できる。その後、時刻 $T2$ から再び加速し、機械振動を励起しないよう滑らかな加速度変化にて指令軌跡を生成し直す。

4.3 大面積電極による加工実験

$\phi 180\text{mm}$ 電極を用いた加工中のジャンプ動作にて流体反力制御の効果を確認した。その際、加工液から受ける反力の増大によりモータ電流が急激に変化することを利用して、モータ電

Fig.14 Machining sample

Table 2 Experimental conditions	
Jump height	0.6mm
Maximum velocity	10m/min
Electrode width	20mm
Electrode thickness	0.8mm
Machining depth	20mm

Fig.15 Electrode surface after machining

流を指標値とした。実験結果を図13に示す。ここで、本制御を用いない場合の位置を青、駆動推力と外力を和である指標値を黄緑、流体反力制御を適用した場合の位置を赤、指標値を淡紅色にて示す。流体反力制御が無い場合、指標値が1.7まで増加が見られた。また、被加工物固定部から大きな異音とともに、固定治具のボルトの緩みが確認された。一方、設定値を0.5としてこの値を超えないように流体反力抑制制御を適用した結果、指標値が0.5前後まで抑制されることが確認できた。また、電極と被加工物の距離が十分に広がった後にジャンプ動作を高速化したため、ジャンプ動作全体の所要時間の増大は約5ms(全体の約3%)に抑制できた。

4.4 リブ形状電極による側面加工実験

前節の結果から単一方向の動作にてジャンプ動作開始直後は速度を制限しながら電極と被加工物の距離を確保し、その後、高速な動作を行うことで流体反力の影響を抑制しながら時間を短縮できることが分かった。そこで、電極が薄く、横方向に大きな反力を受けると電極に変形や振動が発生しやすいリブ形状電極を用いる加工に対して、前節と同様の速度制限を設けたジャンプ動作を加工方向と垂直な方向にも動作が必要な揺動加工にて加工時間や安定性を検証した。放電加工は電極と被加工物の距離を適切な距離に保つことで単位時間当たりの放電発生数が多くなり、加工速度が向上するため、ここでは加工速度により加工の安定性を測る。

図14に加工例、表2に実験条件を示す。また、図15(a)に速度制限を実施せず、ジャンプ動作における全領域で最大速度10m/minとした場合、図15(b)にジャンプ動作開始から0.1mm上昇するまでの間は最大速度を100mm/minに制限し、その後、ジャンプ動作終了するまでの最大速度を10m/minとした場合の加工後の電極先端の状態を示す。速度制限を実施しない場合は電極の下部に擦り傷のようなものが見られるが、速度制限を設けることで改善している。また、加工時間は速度制限を設けない場合は3時間19分、速度制限を設けた場合は3時間3分となり、

電極の振動を抑制した結果、加工が安定化したことが確認できた。ジャンプ動作の速度を一部制限することで加工屑排出能力が幾分低下していると推測され、また、ジャンプ動作時間が増加しているが、これらの影響よりも電極振動の低減効果が十分に得られたことから全加工時間の短縮を実現できたと考えられる。

5. 結 言

本研究では、形彫放電加工におけるジャンプ動作の制御について次のような結果を得た。

- (1) 加速度の機械共振周波数以上の成分とジャンプ高さを評価関数とした最適化理論にてジャンプ動作指令軌跡を導出し、有効性を確認した。
- (2) 正弦波と矩形波で構成された基本パターンを組み合わせた指令軌跡を解析的に導出する方法を提案した。その結果、計算量を実装可能な程度まで減らし、また、最適化理論とほぼ同等のジャンプ性能を得られることを確認した。
- (3) 加工液から受ける反力により大面積電極の変形や精度の悪化を防ぐため、リアルタイムにモータ電流を計測しながらジャンプ動作指令軌跡を制御する手法を提案し、実機にて有効性を確認した。また、前述の実験にて導出されたジャンプ動作指令軌跡をリブ形状電極による加工に適用することで電極への損傷を防止するとともに加工時間が短縮することを確認した。

参 考 文 献

- 1) 増沢, 佐田, 木下: 放電微細加工における加工くずの役割, 精密機械, 37, 440 (1971) 680
- 2) 土屋, 金子, 佐藤: ジャンプフラッシング放電加工に関する研究 (第1報), 精密工学会誌, (1990) 849
- 3) 毛利, 齊藤, 石田: 放電加工機実稼働における機械的諸特性に関する研究, 電気加工学会誌, 20, 39 (1987) 19.
- 4) 今井, 三宅, 竹下他: 外乱オブザーバによる放電加工深さ精度の改善, 第36回計測自動制御学会学術講演会予稿集 (1997) 845
- 5) 宮崎, 池田: 時変最適レギュレータ理論を用いた最短時間制御問題の高速解法, 日本機械学会論文集(C編), 65, 630 (1999) 478.
- 6) 岩崎, 松井: 振動抑制効果を考慮したロボットアームの最適位置指令設計法, 電気学会論文誌C, 117, 1, (1997) 50
- 7) 小波, 西海: 油圧制御システム, 東京電機大学出版局(1999) 289
- 8) 斎藤: 放電加工のしくみと100%活用法, 技術評論社(1979) 1
- 9) K.P.Rajurkar and S.M.Pandit: Adaptive Control of EDM-technology and Research, Society of Manufacturing Engineers, MR83-202 (1983) 1
- 10) S.M.Pandit and W.H.Witting: A Data Dependent Systems Approach to Optimal Microcomputer Control Illustrated by EDM, Journal of Engineering for Industry, 106(1984)137
- 11) 尾崎, 山本, 毛利: 空間経路が指定されるマニピュレータ動作の軌道計画, 計測自動制御学会論文集, 23, 3 (1987) 288
- 12) 志水: 最適制御の理論と計算法, コロナ社 (1994) 316
- 13) B.Van Coppenolle and D.Dauw: On the Evolution of EDM Research, PartI Modeling and Controlling the EDM Process, Proc. of the ISEM-11(1995)117
- 14) 中川, 今井, 阿久根: 最適ジャンプ制御による加工の安定化, 電気加工学会全国大会講演論文集, (2001) 111.
- 15) 阿久根, 中川, 毛呂: 放電加工における最新駆動制御技術の応用, 生産加工・工作機械部門講演会: 生産と加工に関する学術講演会, (2001) 249