多軸 NC 放電加工機による形状創成加工法に 関する研究 (第3報)*

——ワイヤフレーム電極による3次元形状創成加工法の理論的検討——

今 野 廣** 岸 浪 建 史*** 齋 藤 勝 政***

Contouring Electric Discharge Machining by Multi Axis Numerical Control (3rd Report)
—Theoretical Examination of the Three-Dimensional EDM
Using Wire Frame Electrodes—

Hiroshi KONNO, Takeshi KISHINAMI and Katsumasa SAITO

A contouring EDM consisting of a wire frame electrode, a four-axis-controlled NC ED machine and an automatic programming system "APSET-II" has been developed to improve the productivity of bottom-stopped-machining. This paper deals with a newly developed automatic programming system "APSET-III" which controls the position and attitude of the wire frame electrode in the three-dimensional space. In the APSET-III, electrode shapes are defined in a two-dimensional tool definition co-ordinate system, and the electrode is controlled along drive curves and two directional-vectors. To generate three-dimensional curved surfaces, a six-axis-controlled NC ED machine is needed. To build this method, the authors propose that a two-joint robot arm be attached to the four-axis (X, Y, Z, C)-controlled NC ED machine. The four-axis co-ordinates of the NC ED machine and the rotation angles of the robot arm can be obtained from calculating the drive curves and the two directional-vectors.

Key words: contouring electric discharge machining, automatic programming system, three-dimensional curved surface, six-axis controlled NC ED machine, robot arm

1. 緒 言

単純形状電極を数値制御で移動させる放電創成加工においては、総型電極を作成する必要がないため作業時間の短縮を図れるばかりでなく、新しい加工法としての応用分野が考えられる。筆者らは先に針金状電極(ワイヤフレーム電極)を用いた2½次元形状加工のための自動プログラミングシステムとその適用例、および3次元形状加工の考え方について報告した¹⁾。ワイヤフレーム電極を用いた3次元形状創成加工は、除去部分をブロック状のまま取り去るので、素材から最終形状に近い形で高速に形状創成を可能とするための素形材加工法として位置付けることができ、その実現には自動プログラミングシステムと6軸制御機能を持つNC放電加工機が必要となる。

本報では、ワイヤフレーム電極を線接触工具として3次元空間で扱うために開発した自動プログラミングシステム(APSET-III)の機能と適用例について報告する。また6軸制御機能を持つNC放電加工機を実現するために、4軸制御機能を持つNC放電加工機に二つの関節を持つロボットアームを取り付けることを提案し、APSET-IIIより出力された電極位置ベクトルと電極の姿勢を定める二つのベクトルを満足するようなNC放電加工機の各軸のデータとロボットアームの関節の回転角が求められることを示す。

2. 放電創成加工と機械加工の比較

工作機械を用いた切削加工技術の基本思想は、工具と被削材間の高速相対運動を工具の回転あるいは直線切削運動により与え、これらの運動系とは独立な位置決め運動系により形状加工を行うものである。実際の汎用工作機械においては、切削運動系は回転あるいは直線往復運動のいずれかを用いる1自由度系である。図1は、立てフライス加工と放電創成加工において、形状を創成するために選択可能な自由度を示したもの

* 原稿受付 昭和63年11月4日。昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和62年10月13日)にて発表

** 正 会 員 旭川工業高等専門学校(旭川市春光台2条2丁目)

*** 正 会 員 北海道大学工学部(札幌市北区北13条西8丁目)

Fig. 1 Selective axes for machining

である。ここで示したように、立てフライス加工においては z 軸回りの回転成分 θ_z を切削運動系として与えている。従って工具形状は z 軸に対称となり、形状を創成するために選択可能な最大制御軸数は5軸となる²⁾。一方、電気エネルギーによる金属除去作用を加工原理とする放電加工では、切削運動系を考慮する必要はなく、工具回転軸も形状を創成するための制御軸と考えることが出来る。また放電加工では、工具に切削運動を与える必要がなく工具切れ刃が全方向性を有していると考えられるため、工作機械とは独立に形状を創成するために三つの自由度を電極形状に与えることが出来る。この場合の電極形状は総型電極と考えられるが、放電創成加工の自動プログラミングシステムでは総型電極は扱わず電極形状に与える自由度を二つに制限する。

以上の考え方に基いて、放電創成加工のための自動プログラミングシステムでは、電極形状を2次元工具座標系 ox_t, y_t で定義する。この座標系は工具に対して固定されている。工具（電極）の動きは、工作物に対して固定された部品座標系内を移動する工具座標系の動きによって規定される。2½次元輪郭形状加工と3次元形状加工における工具座標系と部品座標系の関係を図2に示す。すなわち2½次元輪郭形状加工では、電極断面形状を定義する工具座標系と部品座標系は常に平行関係を保持している。また3次元形状加工では、電極中心線の形状を定義した工具座標系は3次元部品座標系の任意の平面上に存在する。

本報では、3次元形状加工において、このような考えに基づいて工具の位置と姿勢を決定する自動プログラミングシステムの機能と構造について述べる。

3. 自動プログラミングシステム

3次元空間でワイヤフレーム電極の位置と姿勢を決定するための基本的な考え方については前報¹⁾で報告した。すなわち、図3に示すように電極上の一点（工具座標系の原点 o ）の位置ベクトル P の軌跡（ドライブカーブと呼ぶ）と、姿勢を制御するための二つのベクトル N, B （工具座標系の座標軸 y_t, x_t の方向を定める）により決定する。ドライブカーブは、直線、円弧および3次スプライン曲線の3種類のセグメントを組み合わせることにより定義され、いずれもバラ

Fig. 2 Relationship between tool-definition co-ordinates and three-dimensional co-ordinates

Fig. 3 Schematic representation of tool control methods

メータ形式で記述されている。円弧は、3次スプライン補間と同様なデータ形式で表現するために2次/2

次有理式曲線³⁾を用いている。この場合円弧の開き角が大きくなると、円弧の中央部で等間隔パラメータ値に対する円弧上の点の間隔が粗くなるため、開き角が90°を超えるごとに円弧を分割して発生させている。

開発した自動プログラミングシステム“APSET-III”は汎用コンピュータ IBM 4331 にインプリメントされている。図4にメインプロセサの全体構造を示す。メインプロセサでは、電極形状及び電極移動経路を決定するために記述したパートプログラムを処理して P, N, B ベクトルを決定する。メインプロセサのほかに、工具軌跡を出力するための XY プロッタ作画ルーチンおよびグラフィック出力ルーチン、4軸制御放電加工機とロボットアームを駆動するための NC データを作成するポストプロセサがある。NC データは IBM 4331 のフロッピーディスクに書き込まれ、ミニコンピュータ MELCOM 70/40 によってフロッピーディスクから紙テープに出力される。メインプロセサは、図4に示したように、主に5つのルーチンから構成されている。以下にそれらについて述べる。

(1) キャノニカルフォーム作成ルーチン

ドライブカーブを定義するために必要な点、直線、円、セグメント端点における接線ベクトル及び電極姿勢を定義するためのベクトル N, B のキャノニカルフォームを計算する。さらにこれらの図形を定義するための補助的な図形（平面も含まれる）のキャノニカルフォームと共にファイルに登録する。

Fig. 4 System construction and data flow of APSET-III

Fig. 5 Tool path at a cusp

(2) ドライブカーブ作成ルーチン

ドライブカーブを構成するセグメントを発生し、これらを接続して所望する形状のドライブカーブを作成するルーチンである。3次スプラインセグメントは、点群およびセグメント端点において前後のセグメントとの接続関係を指定する。円弧セグメントは端点と回転方向を指定し、直線セグメントは端点を指定する。

(3) マトリクス作成ルーチン

あらかじめ定義されたセグメントを3次元空間の適当な位置に配置するための座標変換マトリクスを作成する。

(4) N, B ベクトル決定・修正ルーチン

N, B ベクトルは用意された加工モードの中から一つを選択することにより決定される。現在加工モードとして、固定モード、直角モード、円弧補間モードの三つが用意されている。固定モードにおいては、最初に与えた一組の N, B ベクトルがドライブカーブ全体にわたり使用される。直角モードにおいては、加工開始点においてドライブカーブの主法線および従法線（逆方向も含む）の中から対話形式で二つのベクトルを選択し、以後は変曲点でベクトルの反転が起こらないように N, B ベクトルを決定する。ただしドライブカーブのセグメントが直線の場合は主法線、従法線が定まらないため、あらかじめ定義しておくか前後のセグメントとの関係より定める。円弧補間モードでは、ドライブカーブ上の適当な点において定義した N, B ベクトルを補間する。また図5(a)に示す例のように、ドライブカーブの接続部が尖点となる場

合は N, B ベクトルが連続に変化するように、円弧補間を自動的に行っている。

(5) オフセットドライブカーブ作成ルーチン

定義したオフセット量だけ N および B ベクトルの方向にオフセットしたドライブカーブを作成する。必要に応じて新しいセグメントを付加したり、セグメント同士の交点を求めセグメントを修正する。同時に N, B ベクトルの補間も行う。図5(b)に円弧セグメントが付加されている例を示す。

本システムの適用例を図6に示す。ここでは、矩形型電極と半円型電極を用いてクランクシャフト状の形状加工を行うことを想定している。それぞれの電極による加工形状と、これらの加工形状を合成したときの最終加工形状を示す。視点を変えることにより、種々の方向から形状を確認することができる。さらに被削材の高さ (Z 座標) を指定することにより、除去形状の表示を可能としている。

4. ロボットアームの構造と制御

4.1 ロボットアームの構造と6軸制御方法

ワイヤフレーム電極を用いて3次元形状創成加工を行うためには、6軸制御機能を持つNC放電加工機が必要となる。本報では、 X, Y, Z, C (Z 軸回りの回転) の4軸制御機能を持つNC放電加工機に図7に示すような二つの関節をもつロボットアームを取り付けることを検討した。

図8は、図7に示したロボットアームのベクトル図

Fig. 6 Tool path simulation by APSET-III

Fig. 7 Schematic representation of robot arm

Fig. 8 Vector representation of robot arm

による表現である。ロボットアームの制御は、APSET-III から出力された電極先端位置ベクトル P と電極の姿勢を定める二つのベクトル N と B を満足するように、回転ヘッドの位置ベクトル R と回転角 θ_1 、およびロボットアームの二つの関節の回転角 θ_2 、 θ_3 を定める問題となる。回転変換テンソルを用いて、図7のロボットの機構学的な性質を表す特性方程式を次のように表すことができる⁴⁾。

$$P = R + E^{k\theta_1}(C_1^k + E^{j\theta_2}(C_2^j + E^{i\theta_3}(G_6^{i*}))) \quad (1)$$

式(1)で $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ はいずれも初期状態からの回転ヘッドおよび各関節の変位角である。また C_1^k, C_2^j はそれぞれロボットの腕を表すベクトルであり、 G_6^{i*} はロボットアーム先端から電極先端までのベクトルを示す。また*はベクトル自身の回転に意味を持つベクトルであることを示している。ここで G_6^{i*} 回りの回転を無視して位置のみを求めると

$$P = R + C_1^k + E^{k\theta_1}E^{j\theta_2}(C_2^j + G_6^j) \quad (2)$$

P と N (単位ベクトルを n とする) が与えられると

$$R_{12} = E^{k\theta_1}E^{j\theta_2}(C_2^j + G_6^j) = -l_2 n \quad (3)$$

が既知となるので θ_1, θ_2 が次式で求められる。

 Fig. 9 Vector representation of robot arm in case vector N is parallel to z -axis

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{x_{12}}{y_{12}} \right) \quad (-\pi < \theta_1 \leq \pi) \quad (4)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{-z_{12}}{\pm \sqrt{x_{12}^2 + y_{12}^2}} \right) \quad (0 \leq \theta_2 < \pi) \quad (5)$$

また式(2)より回転ヘッド位置ベクトル R は

$$R = P - C_1^k - R_{12} \quad (6)$$

さらに式(1)においてベクトル B の単位ベクトル b と、その初期ベクトル b_0 の間には次の関係がある。

$$b = E^{k\theta_1}E^{j\theta_2}E^{i\theta_3}(b_0) \quad (7)$$

式(4), (5)より θ_1, θ_2 は既知であるから、式(7)より

$$E^{j(-\theta_2)}E^{k(-\theta_1)}(b) = E^{i\theta_3}(b_0) \quad (8)$$

となる。式(8)の左辺を b' と置き、その成分を (b'_x, b'_y, b'_z) とすると、 $b_0(b_{0x}, b_{0y}, b_{0z})$ を用いて θ_3 は次式で求めることができる。

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{-b_{0z}b'_y + b_{0y}b'_z}{b_{0y}b'_x + b_{0z}b'_z} \right) \quad (-\pi < \theta_3 \leq \pi) \quad (9)$$

4.2 4軸制御方法

6軸制御においてベクトル N が Z 軸に平行となる場合や、ロボットアームを取り付けない4軸制御加工の場合には、式(4)において θ_1 が不定となるため適用できない。図9からわかるように、 N が Z 軸と平行となる場合は、図8の一般的な6軸制御において $\theta_2 = 90^\circ$ の場合に相当し、同時に $\theta_1 = -\theta_3$ の関係がある。式(8)において $\theta_2 = 90^\circ$ 、 $\theta_1 = 0^\circ$ とおき b' と b (b_x, b_y, b_z) の関係を求めると

$$b'_x = -b_z, \quad b'_y = b_y, \quad b'_z = b_x$$

となる。これらの値を式(9)に代入して θ_3 を求めることができる。

4軸制御の場合は θ_1 のみ駆動すればよいから、この手順により θ_3 を求め $\theta_1 = -\theta_3$ とすることにより6軸制御の場合と同様の方法で計算できる。

またこの計算方法では、6軸制御において N が Z 軸に平行な場合と傾いている場合の移り変わり時に関

Fig. 10 Representation of machined shape by 4-axis-control contouring EDM

(a) Tool path

```

X*N02*G91*G92X0Y0*G83T009*M23*M20*X60000Z49999*H89
-316*B1A-5328*X-2329Y-547*A-5487*X-2323Y-790*A-562
1282*A-5834*X-2077Y-1516*A-5896*X-1920Y-1731*A-592
2077*A-5896*X-1282Y-2197*A-5834*X-1037Y-2279*A-574
29*A-5487*X-316Y-2302*A-5328*X-101Y-2246*A-5155*X1

```

(b) NC data

Fig. 11 Representation of machined shape by 6-axis-control contouring EDM

節の回転角の値が不連続となる。これを防ぐために、移り変わり前後の N ベクトルを XY 平面に投影して N が Z 軸に平行な時の θ_1 を推定することにより、関節の回転角の連続性を保っている。

4.3 計算例

以上の考え方に従って、4 軸制御 NC 放電加工機と

ロボットアームを駆動するためのポストプロセサを作成し、計算を行った例を図 10 と図 11 に示す。図 10 は姿勢制御ベクトルの一方が常に Z 軸方向を向いている加工例であり、APSET-III による除去形状出力結果を示した。この場合、4 軸制御で加工可能である。図 11 は、同じドライブカーブを用いて二つの姿勢制御ベクトルをドライブカーブの法線方向とした加工例であり、6 軸制御 (X, Y, Z, A, B, C) を必要とする。工具経路出力結果とポストプロセサより出力された NC データの一部を示した。

5. 結 論

ワイヤフレーム電極を用いた 3 次元形状創成加工法の基礎研究として

- (1) 機械加工法と比較して、創成加工法では形状を創成するために選択可能な自由度が多いことを明らかにし、創成加工のための自動プログラミングシステムの基本的な機能を定義した。
- (2) 開発した自動プログラミングシステム“APSET-III”を用いて、与えられた形状に対し、電極の位置と姿勢を計算した例を示した。
- (3) 6 軸制御 NC 放電加工機を実現するために、4 軸制御 NC 放電加工機に二つの関節を持つロボットアームを取り付けることを提案し、その構造を検討した。
- (4) APSET-III の出力データから、放電加工機とロボットアームを駆動するための NC データを求めた。

参 考 文 献

- 1) 今野 廣, 岡本隆司, 岸浪建史, 斎藤勝政: 多軸 NC 放電加工機による形状創成加工法に関する研究 (第 2 報) ——ワイヤフレーム電極による輪郭形状制御創成加工, 精密機械, 50, 8 (1984) 1261.
- 2) 岸浪建史: 切削運動の多自由度化により一本の工具で MC 並み工作機械実現へ, 日経メカニカル, 1967. 5. 28, p. 70.
- 3) 山口富士夫: コンピュータディスプレイによる形状処理工学 [II], 日刊工業新聞社 (1982) 179.
- 4) 牧野 洋: 自動機械機構学, 日刊工業新聞社 (1984) 219.