多面体校正法による機上形状計測（第1報）*

—放電加工機への適用—

毛利尚武** 鈴木政幸*** 古谷克司** 八木孝正† 武沢英樹††

On-the-machine Measurement by a Calibration System with Polyhedra (1st Report)
— Application to Electrical Discharge Machine —

Naotake MOHRI, Masayuki SUZUKI, Katsushi FURUTANI, Takamasa YAGI
and Hideki TAKEZAWA

This paper deals with on-the-machine measurement of an electrode and a workpiece in electrical discharge machining (EDM). A calibration system with polyhedra is installed on the machine. The measuring probe can be detached from the machine in machining stage and it is attached to the machine in measuring stage at any attitude according to the portion being measured. The position at the top of the measuring probe is determined with the equations of planes on the polyhedron. This paper describes the principle of the measurement with an estimation of the error of the measurement and some experimental results of the measurements.

Key words: electrical discharge machining, measuring instruments, calibration, change of shapes, polyhedron, measuring error

1. はじめに

機械加工において、高精度な製品を実現するには、加工途中で加工物の形状や、工具の消耗を計測する必要がある。市販の3次元座標測定機を利用する場合は、加工物をいったん加工機から取り外さねばならず¹⁾、再加工時にこれを μm 単位の精度で元の状態に戻すことは非常に困難である。そこで、加工物形状を加工機上で計測するための幾多の方法が、これまでに開発されてきた^{2)~4)}。

機上における3次元形状測定装置として、マシニングセンタの主軸に取り付ける変位検出プローブやタッチプローブが知られている²⁾³⁾。一方、筆者らが当初必要としていたのは、放電加工機上で電極および加工物の3次元形状計測が可能な測定システムであった。放電加工のような総型工具による加工では工具電極と加工物形状とが刻々と変化するため、これらを同時に計測する必要がある。このように複雑な形状を計測する場合には、通常のプローブでは測定の困難な部位が存在する。しかもこれまでの機上計測では、プローブは工作機械の主軸に工具の代わりに取り付けられるため、加工物の形状計測はできるものの、工具の形状計測は不可能であり、別の計測システムによるしか方法がない。

また放電加工は水や油などの加工液槽の中で実施されるので、加工中は測定プローブを加工機の外に取り出しておく必要がある。加工途中の測定時には、いったん加工液を排出した後、上記プローブを測定しようとする電極表面や加工物表面の位置や傾きにに合わせて取り付ける。測定精度は加工機械の運動精度の影響を免れ得ないが、数 μm 程度を確保する必要がある。

本論文では、以上に述べた諸課題を解決するための、非常に

簡便な機上計測システムを提案する。このシステムでは、多面体を利用してプローブ位置の機上校正を行う。ここでは、提案する機上3次元形状計測システムの原理について述べ、これに基づく幾つかの測定結果を報告する。

2. 機上3次元形状計測装置の構成

本研究における機上3次元形状計測システムでは、測定プローブの位置や傾きを校正するために基準多面体を用いている。この基準多面体は加工機に取り付けられている。プローブは加工中には加工機から取り外すことができる。そして計測段階では、測定部位に合わせて任意の姿勢で取り付ける。測定プローブの先端位置は、基準多面体の平面の方程式から求められる。

図1に試作した装置の概要を示す。NC加工機には形彫り放電加工機（三菱電機製：M35K）を用い、測定用プローブには、表面粗さ計のスタイラス（小坂研究所製：全方向型スタイラスPU-DB5F）を利用している。基準多面体には図2に示すような108面を有するガラス製の多面体を利用し、加工機上の任意の位置へ設置できるよう取付台座を介してマグネットベースに固定している。基準多面体は加工機の主軸およびNC

Fig. 1 On-the-machine 3-D measurement system

* 原稿受付 平成6年8月3日

** 正会員 豊田工業大学（名古屋市天白区久方2-12-1）

*** 正会員 （株）三協エレクトロニクス（高浜市稗田町4-1-55）

† 正会員 積水エンジニアリング（株）（京都市南区上鳥羽上調子町2-2）

†† 正会員 （株）ダイナックス（千歳市上長都1053-2）

Fig. 2 A polyhedron for calibration

テーブルに1つずつ設置し、主軸側工具を測定する際は主軸側多面体を、加工物を測定する際はテーブル側多面体をそれぞれ用いてプローブ触針の先端位置を校正する。プローブは姿勢を自在に変化させるため、マグネットベースを有する多関節アーム（カネテック製：油圧クランプ式測定保持具）に取り付けている。

この多関節アームは十分な剛性が期待できない。しかも、アームおよびプローブの自重に基づくアームのたわみ量は姿勢によって変化する。しかしながら、本計測システムでは以下の測定手順で示すように、アームの姿勢を加工物の形状に合わせて一度設定すれば、その後この姿勢を保ったまま、多面体による校正を行い、しかも形状を計測する。したがって、校正時点におけるアームの姿勢を、計測時においても変化させない限り、上記アーム剛性に起因する誤差は生じ得ないと考える。事実、後（図5）に示すように低剛性アームの使用にもかかわらず、高い精度の計測が実現している。

図1に示すように、本測定装置は既存のNC加工機へわずかな装置を付加するだけで実現できるため、放電加工機に限らず他のNC加工機へも適用できる。

3. 多面体校正法の原理

3.1 多面体校正法による計測原理

図3(a)に基準多面体を用いた計測システムの原理を示す。加工物の形状計測の場合は、プローブは主軸側に取り付け、多面体はテーブル側に配置する。

多面体の各面は3次元座標測定機などによって計測し、各面の方程式をあらかじめ求めておく。

面の方程式を求めるために必要な測定点数は、原理的には3点でよい。実際は、統計誤差や平面の不完全さを考慮して、5点計測によりムーア・ペンローズ一般逆行列を用いて、各平面の方程式の係数を計算している。なお、面の方程式を決定するための計測は、使用多面体の台座に固定した座標系に対して、一度のみ実行する。以後の機上計測においては、改めて計測する必要はない。

面の方程式は多面体の台座上に始点をもつ位置ベクトル u' によって以下のように表される。

$$u' \cdot n_i = d_i \quad (1)$$

ここで

n_i : i 番目の面に対する単位法線ベクトル

d_i : i 番目の面と多面体の座標原点との間の距離である。

以下に計測手順の詳細を示す。

① 測定面の位置および傾きに合わせたプローブ姿勢の決定

Fig. 3 Principle of measurement

測定プローブ先端の形状による誤差をできる限り小さくし、高精度を達成するために、プローブは測定面に垂直に対向させることが望ましい。したがって、プローブの方向は測定位置によって変えられるべきである。そのために、プローブの位置や方向を変える度に、プローブの先端位置の校正が必要となる。

② プローブの先端位置の校正

①の姿勢を保ったまま、NCテーブルを移動してプローブを基準多面体へ近づけ、この多面体上の面の中からプローブ軸の方向に近い面法線を有する面を3面選んでプローブの先端位置を校正する。

放電加工機のNC装置は、主軸の変位 Δh およびテーブルの変位 Δt を表示する。

機械ベッド上の B_0 を全体の座標系の原点とする。プローブの位置ベクトル p 、多面体の面の位置ベクトル u および加工物の測定面の位置ベクトル w は以下のように書ける。

$$p = h_0 + \Delta h + h_{B0} + p' \quad (2)$$

$$u = \Delta t + t_{u0} + u' \quad (3)$$

$$w = \Delta t + t_{w0} + w' \quad (4)$$

ここで、式(2)~(4)の各ベクトルは、以下に示す位置を表す。

h_0 : 主軸ヘッドの初期位置

p' : プローブ原点からプローブ先端までの相対位置

w' : 測定物の原点 (W_0) から、測定物の測定点までの相対位置

h_{B0} : 主軸ヘッド (H_0) からプローブ原点までの相対位置

t_{u0} : テーブル (T_0) から多面体原点までの相対位置

t_{w0} : テーブル (T_0) から加工物の原点 (W_0) までの相対位置である。式(2), (3), (4)は、機械ベッド上の原点 B_0 に対応する座標系で表されている。

ここでプローブ先端が多面体の、ある面上にあるなら、

$$p = u \quad (5)$$

Fig. 4 Measuring error owing to the radius of the probe

式 (2), (3) より次式を得る.

$$\mathbf{u}_j' = \mathbf{R}_{u0} + \Delta \mathbf{r}_j \quad (6)$$

ここで

$$\Delta \mathbf{r}_j = \Delta \mathbf{h} - \Delta \mathbf{t} \quad (7)$$

は、NC テーブルからの主軸ヘッドの相対移動距離である。

Δr_j は表示された NC の座標値の読みから求められる. さらにベクトル

$$\mathbf{R}_{\text{u0}} = (\mathbf{h}_0 + \mathbf{h}_{\text{B0}}) - \mathbf{t}_{\text{u0}} + \mathbf{p}' \quad (8)$$

は、スタイラスの位置や姿勢が決まれば、一定となる未知ベクトルである。ここで、式(1)に式(6)を代入し、多面体上の3つの面に関する連立方程式を解けば、未知ベクトル $\mathbf{R}_{u0} = (R_x, R_y, R_z)$ が決定できる。

③ 加工物面の座標の測定

プローブの姿勢を保ったまま NC テーブルを移動して測定物の測定を行う。測定時は、プローブ先端を加工物の表面に接触させる。プローブ端面 p 位置と、測定面上の接触位置 w が一致したとき、ベクトル $\boldsymbol{p}$ と $\boldsymbol{w}$ とは、次式を満足する。

$$p = w \quad (9)$$

したがって、式(2)、式(4)および式(8)より、

$$\mathbf{t}_{w0} + \mathbf{w}' - \mathbf{t}_{u0} = \mathbf{R}_{u0} + (\Delta \mathbf{h} - \Delta \mathbf{t}) \quad (10)$$

となる. ここで図 3(a) より, 多面体の原点から加工物の接触位置 (w) への相対位置ベクトル w'' は, 次式で表される.

$$\mathbf{w}'' = \mathbf{w}' + \mathbf{t}_{\mathbf{w}_0} - \mathbf{t}_{\mathbf{u}_0} \quad (11)$$

したがって、式(10)、式(11)より w'' は

$$w'' = R_{u0} + (\Delta h - \Delta t) \quad (12)$$

となる。ここで、 $(\Delta \mathbf{h} - \Delta \mathbf{t})$ は NC データとして求まる。したがって、式 (12) および先の ② により求めたプローブの先端位置の校正値 $\mathbf{R}_{u0}$ より、測定点の位置ベクトルを求めることができる。

測定面の傾きとプローブ軸の方向とのなす角が許容範囲を越えたならば、再度①から処理を行う。

3.2 測定精度の検討

この測定法では高精度測定を実現するために、測定プローブの軸を測定面に対してできるだけ垂直に配置することを前提にしている。この場合の測定誤差について検討する。測定面の法線ベクトルとプローブ触針の方向ベクトルとが図4のような関係にある場合、接触点と測定点との間に誤差が生じる。この時生じる誤差は、プローブがZ軸に沿って上方から下りてくる場合、各軸の座標値の誤差は式(13)、距離の誤差 e は式(14)となる。

Table 1 Measuring error and number of the change of probe direction N

Error μm		1	2	5	10
N	$R=5\text{ }\mu\text{m}$	100	25	4	0
	$R=350\text{ }\mu\text{m}$	5×10^5	1×10^5	2×10^4	5 000

$$\Delta X = \alpha R, \quad \Delta Y = \beta R, \quad \Delta Z = (\gamma - 1)R, \quad \gamma = \cos \phi \quad (13)$$

$$e = (\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2)^{1/2} = R\{2(1 - \gamma)\}^{1/2} \quad (14)$$

但し,

(α, β, γ) : 測定面の単位法線ベクトル

R : プローブ先端球の半径

ϕ : プローブ軸 (Z) と測定面の法線とのなす角

この誤差を小さくするには、プローブ先端球の半径を小さくするかプローブの軸を測定面に対して垂直にあてる必要がある。後者の場合、測定面の傾きに応じてプローブの姿勢を変更する必要がある。測定面の法線ベクトルとプローブ軸とのなす角度が ϕ 以下である範囲の立体角 ω (ステラジアン) は、

$$\omega = 2\pi(1 - \cos \phi) \quad (15)$$

であるから、 $N=4\pi/\omega-1$ より所定の許容誤差を維持するための姿勢変更回数が求められる。

今回計測に使用したプローブ先端球の半径は $R=5\text{ }\mu\text{m}$ である。一方、市販の形状測定機に用いられるプローブ先端球の半径は通常数百 μm であってかなり大きい。これらのプローブを用いた場合の、各許容誤差に対する姿勢変更回数を式(13)～(15)によって求めた。結果を表1に示す。ただし、便宜上それぞれのプローブ先端は、全方向に接触可能であると仮定している。

先端半径 $5\text{ }\mu\text{m}$ のプローブを用いて全方向に対して誤差 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の計測を行う場合は、プローブ軸と被測定面の法線のなす角度 ϕ は、 11.5° 以下に収めることが必要である。ただし、この角度 ϕ が 11.5° 以下の範囲内かどうかの判断は、現時点では目視に頼っている。この時、プローブ姿勢の変更回数は約 100 回を必要とする。 $2\text{ }\mu\text{m}$ の誤差が許されるならば、 ϕ は 23° となり姿勢変更に必要な回数は二十数回で済む。一般の形状計測では面の傾きの範囲はごく限られているから、この計測に対する姿勢変更回数は実用上問題にならないほど少なくて済む。一方先端半径が数百 μm のプローブを用いるならば、所望の誤差を維持するためには非常に多くの変更回数を必要とし、本方式を適用することは実用的ではない。大きな先端半径のプローブを用いる場合は、測定部位近傍を複数回測定することによって当該領域の面の傾きを推定して補正を行うのが通例である。このような場合は曲率の大きな角部の詳細な計測は不可能である。プローブ表面の電位分布を計測して接触点を算出する方法も試みられているが⁴⁾、鋭いキャビティの計測には向かない。

なお、本実験に用いた放電加工機の3次元位置決め精度は実稼動において2~3 μm 、加工精度は加工条件や電極消耗の影響を受けるため一概には言えないが、電極低消耗の条件では10 μm 程度である。熱変形による影響は、温度の時間変化が非常に緩やかな場合には、電極（主軸）と加工物（テーブル）間の相対誤差は無視できる。本計測システムの精度は、“JIS B 7440 測定法”に基づいて試験した結果、数 μm 程度であった。

3.3 球体の測定

本計測システムによる放電加工機テーブル上での球体の測定

Fig. 5 Result of measurement of a steel ball

を実施し、実計測における計測精度を調べる。球体には、直径15/8インチの球軸受用鋼球を用いた。測定は、プローブをXZ平面上に拘束し、Y方向へ5mmずつ変位させて実行した。プローブ触針と測定面がなるべく垂直にあたるよう、プローブの姿勢を計35回変化させている。図5は測定結果を3次元的に表示している。オーバハングした部位に対する計測が実現されていることが分かる。

測定結果を基に球体の直径を算出すると、別途真円度測定器によって計測して得られた結果に比べて約4μmの誤差に収まった。以上のことから本計測システムの精度は実計測においても数μm以内に収まっていることが分かる。

4. 工具電極の形状計測と加工物側座標系との位置関係

4.1 電極（主軸）側の測定物の形状計測

前節ではNCテーブル側の測定物に対する計測原理と測定例について述べた。本節では、本計測システムの特徴の一つである主軸に取り付けた電極に対する測定原理と測定例について述べる。

電極の形状計測の場合は、多面体を主軸ヘッド側に配置しプローブをNCテーブル上に取り付けて測定する。

図3(b)に測定原理を示す。加工物測定の場合と同様に機械ベッド上のB₀を原点として表現したプローブ先端の位置ベクトル q 、多面体位置ベクトル v および電極測定部の位置ベクトル e は、それぞれ式(2)、(3)、(4)と同様に表現できる。また多面体上の面の方程式についてもベクトル v' を用いて式(1)と同様に表現される。

ここで

v' ：多面体の台座上の原点を始点とする面の位置ベクトル

n_i ：i番目の面に対する単位法線ベクトル

d_i ：i番目の面と多面体の座標原点の間の距離

q' ：プローブ原点からプローブ先端までの相対位置

e' ：電極原点(E₀)から電極測定位置(E)までの相対位置

t_{B0} ：テーブル(T₀)からプローブ原点までの相対位置

h_{v0} ：主軸ヘッド(H₀)から多面体原点までの相対位置

h_{e0} ：主軸ヘッド(H₀)から電極原点(E₀)までの相対位置である。

NCテーブル側の測定の場合と同様に式(8)の R_{v0} に対応して

$$R_{v0} = t_{B0} - (h_0 + h_{v0}) + q' \quad (16)$$

が得られ、多面体の3面を使用してベクトル $R_{v0} = (R_x, R_y, R_z)$ を求めれば良い。

電極形状計測においても同様に、電極測定点の位置ベクトル

Fig. 6 Shape change of edge portion of cylindrical copper electrode

e'' は式(12)に対応して

$$e'' = R_{v0} + (\Delta t - \Delta h) \quad (17)$$

となり、校正値 R_{v0} とNCデータ $(\Delta t - \Delta h)$ とより求められる。

4.2 電極消耗の推移測定

次に、点列計測により放電加工における電極の加工に伴う形状の時間変化の様子を測定した。測定物は直径10mmの銅製円筒電極を用いた。

放電加工では、加工の進行に伴い電極と加工物の双方の形状が時間と共に変化していく。この変化の程度は、加工時の電気条件その他により異なるが、電極角部における形状の変化は円筒の側面や底面などの形状変化に比べて大きい。そこで、電極角部の形状を加工時間ごとに測定し、形状の時間変化を追跡した。この場合、1回の測定ごとにプローブの姿勢を3回変化させている。測定結果を図6に示す。時間の経過とともに電極の角部が丸く消耗していく様子が知れる。特に最終形状は、別途実施した顕微鏡写真による形状とよく一致していることを確認している。

本計測システムにより、従来の机上計測では測定が不可能であった主軸側の電極形状を、数μmのオーダーで精度良く測定することができた。

4.3 電極（主軸）側と加工物（NCテーブル）側の位置関係の校正

工具電極と加工物との相対位置関係を知ることができるならば、着目しているそれぞれの場所に対応して形状変化の推移が観察できる。とくに放電加工では、加工途中における任意の位置での対向する面同士の間隙（放電ギャップ）を知ることができ、放電加工メカニズムの解明に重要な役割を果たすものと考えられる。

加工物および電極表面の座標は、それぞれの測定に使用した多面体の台座上の原点からの位置ベクトル w'' と e'' として求めている。従って、それぞれの座標系を統一する必要がある。その方法を以下に述べる。

校正手順の概念図を図7に示す。手順はこの図に示したように

- ① 上のプローブの校正を行う、
- ② 下のプローブの校正を行う、
- ③ 上下プローブの触針先端を合わせ、上下の座標系の関係を求める、

の順序で進める。手順①と②については既に述べたとおりである。手順③における上下プローブ先端を一致させる操作を

Fig. 7 Uniformity of upper and lower coordinates

次に述べる。

まずルーペなどで観察しながら上下プローブ先端が接触する範囲まで主軸（Z）およびNCテーブル（X, Y）を移動する。その後プローブをX, Y各軸の方向に走査させて、プローブからの出力電圧が最大になるX, Yの位置を捜す。さらにZ軸を駆動してプローブからの出力が“0”になった時点でZ位置を決定する。上下プローブの一致精度は機械の運動精度（2~3 μm）程度と考えられる。

手順③では上下プローブの先端が接触するから、図3(a), (b)において、点Pと点Qが一致することを示す。したがって、

$$p=q \quad (18)$$

が成り立つ。よって、

$$h_0 + \Delta h + h_{B0} + p' = \Delta t + t_{B0} + q' \quad (19)$$

を得る。ここで式(8)と式(16)を用いて式(19)の p' と q' を消去すれば

$$R_{P0} = R_{V0} - R_{U0} - (\Delta h - \Delta t) \quad (20)$$

となる。ここでベクトル R_{P0} は多面体の配置に依存する一定ベクトル“ $t_{U0} - (h_0 + h_{V0})$ ”である。また右辺はすべて既知である（ R_{V0} ：下プローブ先端校正值， R_{U0} ：上プローブ先端校正值， $\Delta h - \Delta t$ ：NC値）。

図3(a), (b)を比較すれば、 R_{P0} は、機械が初期の位置（例えば測定開始時におけるNCのリセット時点）にあるときの、それぞれの多面体の位置関係を表すことが分かる。主軸側基準多面体原点から見たテーブル側の基準多面体の原点へのベクトルを表す。したがって上下座標系間の相対位置が決まり、この関係を基に電極、加工物の位置関係が求められる。

4.4 電極および加工物の同時測定

電極と加工物の同時計測の有効性を確認するために、それぞれの形状変化の時間的推移を同時に計測した。最初図8(a)に示すような8角すい台形状の凸部と凹部とをボールエンドミルによって切削加工し、加工によって生じたカッターマークを除去するために一方を電極として他方を加工物とみなした放電加工を実施した。この場合、電極と加工物との間の間隙を指定した値に保つために、電極には加工物に対して相対的な球面運動を付与する。図8(b)は加工の途上で測定した図8(a)のAで示した部位における凸部および凹部の断面形状をそれらの相対位置も含めて示す。なお、カッターマークの高さを確認しやすくするため、横軸よりも縦軸を拡大して表示している。放電加工の直前で認められたカッターマークは加工後には除去され、しかも双方の間隙が約700 μmに維持されていることがわかる。この

Fig. 8 Measurement of relative position of an electrode and a workpiece

ような判断は、加工途中における電極と加工物との同時机上計測と相互の相対位置関係が明らかになれば可能となる。

5. ま と め

机上3次元形状計測において、多面体を用いたプローブ先端位置の校正法を考案し、これに基づいてプローブの位置や姿勢を任意に選択して測定を行う形状計測システムを開発した。放電加工機を用いた形状測定を実行し、次のような結論を得た。

- (1) 測定プローブは加工途中では取り外し、測定段階では被測定面の位置や姿勢に応じて加工機に取り付けて精密な測定が実施できる極めてフレキシブルな机上計測装置が実現できた。
- (2) 加工物の形状のみならず、複雑な形状の工具電極の形状測定が可能である。特に曲率の大きな部位の詳細な計測が実施できる。本計測システムによる測定精度は、100 mm程度の大きさの物体に対しては±数 μm程度であった。
- (3) 放電加工の場合は、電極と加工物の形状測定とともに、お互いに対向する部位における局所的な極間距離を知ることができる。
- (4) 本測定システムはNC装置を有する他の加工機械にも適用できる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり多大のご援助をいただいたトヨタ自動車(株)の古谷政典氏、堀江金属(株)の稲本光弥氏、豊田工業大学の東正毅氏と石黒輝雄氏に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 中村哲夫：FAにおけるCNC三次元測定システム，精密工学会誌，54, 4 (1988) 633.
- 2) 垣野義昭，岩田義雄，岩崎嘉徳，大坪 寿：加工形状誤差の偏差検出型オンザマシン計測に関する研究，精密工学会誌，58, 6 (1992) 1059.
- 3) 鈴木 裕，浅尾晃道，水垣善夫，坂本正史，原田英治：オンマシン測定システムの開発（第2報）——誤差モデルの生成と加工誤差補正機能について，1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1991) 1187.
- 4) 青山英樹，岸浪建史，斎藤勝政，河合正治：位置ベクトルと単位法線に基づく寸法測定システムの開発，精密工学会誌，57, 5 (1991) 807.