ローカル・マシニング・ステーション方式による放電加工*

古谷克司** 権丈裕二*** 武沢英樹† 毛利尚武**

Electrical Discharge Machining by Local Machining Station Method

Katsushi FURUTANI, Yuji KENJO, Hideki TAKEZAWA, Naotake MOHRI

This paper deals with a machining device for a local area on a large workpiece called Local Machining Station (LMS). It consists of a small machine tool, a reference plane with displacement sensors, extendable legs and adhesion pads. By adhering on a workpiece with the pads and pressing the LMS with a robot, the stiffness of the system is improved. Because the movement range of the mobile machine tool is restricted within the reference plane, higher positioning accuracy can be easily obtained by the LMS method. A prototype with five degrees of freedom is a mechanism which consists of a parallel mechanism and an xy stage. A small electrode feeding device for electrical discharge machining (EDM) on the xy stage is installed as a mobile small machine tool in the prototype. The tool electrode is positioned in a local coordinate system for a workpiece by using holes which have been machined as references. Some holes are machined by EDM on the workpiece. The accuracy of measured interval between two holes and the center of the machined holes with the LMS are better than that with a robot.

Key words: positioning, electrical discharge machining, parallel mechanism, linear drive mechanism

1. 結 論

大型工作物に形状加工や表面処理加工を局所的に行う自動加工システムでは、従来から、ロボットアームの先端にグラインダやエンドミル等の加工工具を取り付けた自動加工が試みられている^{1)~3)}。また、グラインダを搭載した走行車両も提案されている⁴⁾。ロボットは一般的に位置決め精度および応答性がマシニングセンタなどと比較すると低いため、単体で精密加工を実行することは困難である。放電加工に十分な応答周波数を持たせるために、1自由度エンドエフェクタを用い、かつ制御系に改善を加えた例がある⁵⁾。ロボットの動作領域は広いが、ハンドの位置測定系は広い測定範囲を持つ必要がある^{6)~9)}。しかし、広い測定範囲にわたって高精度に位置を測定することは困難であり、装置は高価になる。

一般のロボットはシリアルメカニズムで構成されているため、姿勢の変化により慣性や剛性が大きく変化する。これを改善するために、パラレルメカニズムが提案されているが¹⁰⁾¹¹⁾、動作領域がシリアルメカニズムより小さいという欠点を持つ。

一方、被加工面上を走行しながら加工する自走式加工機が提案されている¹²⁾¹³⁾。これらはそれ自身が走行する面を加工するため、表面の状態により移動が困難になる場合が考えられる。また、エネルギーや加工液などの供給が問題となる。また、ロボットの場合と同様に移動機構の位置測定に関する問題を持つ。

これらの問題点を解決するために、ローカル・マシニング・ステーション(LMS)方式を開発した。本方式は、大型工作物などの局所的な加工における位置決め精度を向上する方法である。本論文では、まずLMS方式の概念と特徴について述べる。次に、LMS方式のプロトタイプの基本特性および加工結果に

ついて述べる。

2. ローカル・マシニング・ステーション方式の原理

2.1 ローカル・マシニング・ステーションの構成

図1にLMSの概念を示す。LMSは変位測定機能を持つ移動基準面、多自由度小型加工機、可変長脚、吸着装置等から構成される。そして、吸着装置により工作物に固定され、工作物面上に穴や溝などの形状を加工する。移動基準面上を走行する多自由度加工機は小型であるため高応答性が期待できる。脚はリニアアクチュエータで構成されるため、その長さを変えることで移動基準面と工作物の相対位置を変化させることができる。工作物に対する移動基準面の高さや傾きは、小型加工機に搭載した距離センサにより測定する。小型加工機の位置は移動基準面に設けられた変位センサで測定する。吸着装置は真空パッドまたは電磁石などを用いる。

LMS方式では図2に示す絶対座標系 Σ_0 、LMSの移動基準面の座標系 Σ_{LMS} 、工作物全体の座標系 Σ_{WW} 、工作物上の局所領域の座標系 Σ_{WL} の4種類の座標系を考慮する必要がある。工作物が設置されると、工作物全体の座標系 Σ_{WW} は絶対座標系 Σ_0 内で

Fig. 1 Concept of Local Machining Station (LMS)

* 原稿受付 平成10年6月1日

** 正会員 豊田工業大学(名古屋市中天白区久方2-12-1)

*** 学生会員 豊田工業大学(現、正会員 アイシン精機(株)); 刈谷市朝日町2-1)

† 学生会員 豊田工業大学

Fig. 2 Coordinate systems in LMS method

(a) LMS as portable machine tool

(b) LMS as end effector mounted on robot arm

Fig. 3 Usage of LMS

固定される。次に、LMS が工作物全体の座標系内に粗位置決めされる。実際の加工では工作物上の局所座標系 Σ_{WL} が用いられる。この座標系は、あらかじめ加工されている穴、角、稜線などの形状を用いて定義される。その結果、工作物上の局所座標系内で高精度な位置決めをすることができる。

LMS の特徴をまとめると以下ようになる。

- (1) 工作物表面以外に移動面を設けるため、加工液や加工くず、被加工物表面の形状や仕上げ状態に小型加工機の移動特性が影響を受けない。
- (2) 移動基準面に位置測定系を持たせるため、位置測定範囲を限定でき、小型加工機の位置の測定精度を向上させることができる。
- (3) 移動基準面に給電線や加工液供給ノズル等を取りつけるため、小型加工機の動きを阻害することが少ない。
- (4) 被加工物に可変長脚の先端をクランプすることで LMS はパラレルメカニズムとして働く。したがって、剛性の

Fig. 4 Appearance of LMS (motor drive type)

増加が期待できる。

2.2 ローカル・マシニング・ステーションの適用形態

LMS の適用形態を図3に示す。同図(a)はロボットにより LMS を作業地点まで運搬しそこに放置して、作業終了後次の作業場所に移す方法である。この方法では、ロボットは単なる運搬装置として用いられる。複数の LMS を被加工物上に配置することが可能であるため、複数の箇所の同時加工が可能となる。これにより、全体の加工時間の短縮が期待できる。ワイヤクレーンをロボットの代わりに用いることも可能である。同図(b)は、ロボットアームの先に LMS を固定し、作業ごとにロボットアームを移動させる方法である。この方法では、LMS をロボットで支えるようになるので、それぞれを単独で使用するよりも高い剛性が期待できる。この場合には、ロボットは単なる運搬装置だけではなく、LMS の支えとしても働く。

3. プロトタイプの構成

プロトタイプでは、放電加工により形状を加工することにした。図4にプロトタイプの外観を示す。全体の寸法は $210 \times 240 \times 280 \text{ mm}$ 、質量は 5 kg である。本プロトタイプは3自由度を持つパラレル機構と2自由度を持つ xy ステージの組合せにより構成され、全体で5自由度を持つ。工作物に吸着したときにパラレル機構を構成する可変長脚には、DC サーボモータ駆動によるねじ送り機構を用いた。脚の変位量の測定にはポテンシオメータ(測定範囲 50 mm 、直線性 3%)を用いた。この脚はベースプレートに 120° ごとに取りつけられている。移動基準面内の移動には、ステッピングモータ駆動の xy ステージ(移動範囲 $\pm 10 \text{ mm}$ 、分解能 $1 \mu\text{m}$)を用いた。プロトタイプの姿勢の調整可能な範囲は角度で約 8° 、高さで 20 mm である。工作物と移動基準面との相対位置を測定するためにレーザ変位計(測定範囲 $\pm 40 \text{ mm}$ 、分解能 $10 \mu\text{m}$ 、スポット径 $1 \times 2 \text{ mm}$)を搭載した。加工機にはインパクト駆動機構¹⁴⁾を利用したペンシルサイズ放電加工機¹⁵⁾を用いた。放電加工による微細加工の場合には加工反力が小さいため、水平面上に配置する場合には自重による摩擦力で LMS を工作物上に拘束するために十分な力が得られる。したがって、本装置には吸着機構を設けなかった。

図5に本システムの構成を示す。LMS およびペンシルサイズ放電加工機はパーソナルコンピュータ(80386, 16 MHz)で制御される。放電回路にはコンデンサ回路(抵抗 132Ω 、コンデンサ $0.47 \mu\text{F}$ または $1.6 \mu\text{F}$)を用いた。放電加工では、放電回路への平均供給電流と基準電流を比較することにより、座標系 Σ_{LMS} の z 軸方向の送りが制御される²⁰⁾。4章以下の実験では、主に

Fig. 5 System configuration

Fig. 7 Machining sequence

Fig. 6 Appearance of LMS (Impact Drive Mechanism type)

Fig. 8 Example of positioning

この装置を用いた。

図 4 に示したプロトタイプ他、図 6 に示すような移動基準面内の移動機構にインパクト駆動機構¹⁴⁾を用いた装置¹⁶⁾も用意した。この装置では、移動用のインパクト駆動機構の変位がレーザ変位計(分解能 2 μ m, 測定範囲 10mm)で測定されるフルコースドループ制御系とした。

4. プロトタイプの性能

4.1 加工手順

LMS を用いた加工手順を図 7 に示す。

- (1) ロボットアームにより、工作物上の加工位置に LMS を粗位置決めする。
- (2) LMS の脚を工作物側に繰り出し、吸着装置により工作物にクランプする。
- (3) LMS の脚長を調節し、LMS と工作物との相対的な位置決めを行う。
- (4) すでに加工されている形状を基準として、多自由度小型加工機により、加工位置への高精度位置決めを行う。
- (5) 形状を加工する。

以下では、この手順に従いプロトタイプの特性を説明する。

4.2 姿勢制御

所定の姿勢を得るための各可変長脚の長さは、逆運動学を

解くことにより求める。工作物上に粗位置決めされると、吸着装置と工作物の接触状態により、移動基準面の高さや傾きが指令値からずれる可能性がある。そこで、xy ステージに取り付けられたレーザ変位計を走査し、3 点で移動基準面と工作物との相対位置を測定する。それらの測定点は xy ステージの可動範囲で取れる最大の正三角形(一辺 20.7mm)の各頂点とした。これにより求められた相対位置が許容誤差より大きい場合には、可変長脚の長さを修正することでさらに位置決めを行う。

比例積分制御により各姿勢に対する位置決めを行った。図 8 に傾きを 0°, 高さの指令値を基準高さから 2mm 移動した位置とした場合の位置決めの例を示す。LMS の姿勢は LMS 外に固定された別のレーザ式変位計(測定範囲 ± 3 mm, 分解能 0.2 μ m)により測定した。この場合の整定時間は 2s であった。3 本の足を独立に位置決めしているため、偏差の減少は滑らかにならなかった。図 9 に 10 回ずつ位置決めしたときの平均誤差を示す。位置決め終了後の誤差は、各姿勢で異なった。ばらつきでは、各姿勢とも搭載されたレーザ変位計の測定分解能以下となった。脚間の距離に対して測定点の間隔が小さいため、パラレル機構のレーザ変位計を用いた位置決めの分解能はレーザ変位計の本来の分解能より低下し、高さで約 100 μ m、角度換算で 0.14°となる。各脚の長さの位置決め精度は 30 μ m であり、脚先

Fig. 9 Average positioning error

Fig. 10 Arrangement of holes used as reference

と工作物との接触状態による位置ずれが小さかったため、一度工作物上に設置した後は位置決めをやり直すことはなかった。

4.3 加工されている穴を基準に用いた位置決め

今回は、2 個の丸穴を小型工作機械の位置決めの基準として用いた。図 10 に 2 個の穴の位置関係を示す。SK5 上に加工され、両方とも直径は 2mm で中心の間隔は 5mm である。工作物の厚さは 5mm であり、貫通穴とした。

工作物上でレーザ変位計を粗いピッチでスキャンさせ穴位置の概略を求め、次にその穴の近傍を細かいピッチでスキャンさせる。この形状を微分することで穴の輪郭を抽出し、中心座標を計算した。本実験では粗い方のピッチを 100μm、細かい方のピッチを 40μm とした。図 11 に細かいピッチで測定し、輪郭を求めた結果の例を示す。同図(a)はレーザ変位計の出力、同図(b)はあるしきい値で 2 値化した結果、同図(c)は同図(b)を微分した結果である。レーザ変位計のレーザ光のスポットが楕円であること、およびレーザ光が工作物に斜めに当たり反射することにより、抽出された輪郭は楕円形になる。しかし、測定対象の円の中心と求められた楕円の中心は一致しているため問題にはならない。この方法により算出した中心座標間の距離は 5.004mm であり、工具顕微鏡(最小表示量 1μm)による測定値 5.002mm との差は 2μm であった。穴の測定精度をスカラ型組立用ロボットと比較した。使用したロボットの公称位置決め精度は±50μm、分解能は 10μm である。50μm ピッチで上記のレーザ変位計をスキャンさせ穴間隔を測定した結果は、5.033mm で、工具顕微鏡による測定結果との差は 31μm であった。これより、LMS 方式の方が高い測定精度を持たせることができる

Fig. 11 Example of edge detection

Fig. 12 Local coordinate on workpiece

可能性があると考えられる。

4.4 加工性能

4.3 節で LMS を用いて測定した結果を用いて図 12 に示す座標系を工作物上に設定した。工作物上の局所座標系 Σ_{WL} に基づき xy ステージの位置決めを行い、ペンシルサイズ放電加工機で加工した。電極には直径 1mm のタングステンを使用し、加工液には EDF-K (三菱石油製) を使用した。極間開放電圧は 100V とした。この場合の加工反力は非常に小さいため、加工装置の工作物への固定は、装置の自重による摩擦力のみとした。

xy ステージの位置決め後、z 軸方向にサーボをかけて穴加工を行った。加工結果を図 13 に示す。穴の総数は 9 個であり、1 個あたりの加工時間は 15 秒とした。放電回路のコンデンサは 1.6μF とした。穴は Σ_{WL} の原点から約 20mm 離れた位置に加工し、各穴の間隔は 2mm とした。位置決めの時間を含め全体の加工時間は 15 分であった。隣り合う穴の間隔の精度を工具顕微鏡で測定した結果、誤差の平均は 10μm、標準偏差は 6μm であった。また、 Σ_{WL} の原点からの距離の誤差の平均は 22μm、標準偏差は 7μm であった。使用した xy テーブルの公称位置決

Fig. 13 Example of machining

め精度は $5\mu\text{m}$ 、直線性は $15\mu\text{m}$ である。

次に移動機構にインパクト駆動機構を用いた装置による場合の直線性と穴の間隔の誤差を、前述のスカラ型組立用ロボットを用いた場合と比較した。1.5mm 間隔の6個の穴を3回ずつ加工した。バックラッシュの影響が出やすいように、どちらの装置でも加工の順序は図14に示す通りとした。工作物には厚さ0.1mmのステンレス鋼板(SUS304)を用いた。放電回路のコンデンサは $0.47\mu\text{F}$ とした。直線性は加工された穴の中心位置の回帰直線からのずれとし、間隔の誤差は隣り合う穴の中心位置の距離が設定値1.5mmからずれた量を間隔の誤差と定義した。測定結果を表1に示す。LMS方式の方はフルクローズドループにより移動量が制御されているため、使用したロボットより間隔の誤差のばらつきが小さかった。このように、移動機構の作業領域が小さい場合には、比較的容易に加工位置を測定することが可能となるため、高精度な加工が実現しやすくなる。

5. 結 論

本論文では、大型工作物の局所的な加工のための位置決め精度を向上する方法であるローカル・マシニング・ステーション(LMS)方式を提案した。結果をまとめると以下になる。

- (1) 工作物上の形状を基準として座標系を設定し、その座標系に基づき加工を行った。
- (2) LMS方式を用いた加工では、ロボットより狭い領域を作業領域とする。したがって、ロボットのみによる加工と比較して、それと同等以上の位置決め精度を持たせることができる可能性がある。このことを実験的に明らかにした。

謝 辞

実験の遂行に当たりご協力いただいた豊田工業大学大学院修士課程修了生・柴谷一弘氏(現、ミノルタ)、同工学部卒業生・安藤昇氏(現、トヨタ自動車)に感謝いたします。また、プロトタイプ製作にご協力いただいた同試作工場の皆様に感謝いたします。

本研究の一部には、金型技術振興財団、天田金属加工機械技術振興財団、東海産業技術振興財団、大澤科学技術振興財団、堀情報科学振興財団の研究助成および文部省科学研究費補助金奨励研究(A)(05750129)、基盤研究(C)(2)(07650155)、基盤研究(A)(1)(06555041)を用いました。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 国枝正典, 中川威雄, 樋口俊郎: 磁力研磨工具を用いたロボットによる曲面の研磨, 精密工学会誌, 54, 1 (1988) 125.

Fig. 14 Definition of error

Table 1 Comparison of LMS (IDM type) with a robot

		LMS	Robot
Straightness μm	μ	1	21
	σ	0	7
Pitch error between two neighboring holes μm	μ	1	3
	σ	1	19

μ : average, σ : standard deviation, IDM: Impact Drive Mechanism

- 2) 鈴木基之, 一安俊平, 桐井一成, 砂原秀一, 作田俊裕, 浅井昭夫: データ駆動によるプレス金型自動仕上げロボットの開発, 精密工学会誌, 58, 8 (1992) 1309.
- 3) H. V. Vrusel and W. Persoons: Robotic Deburring of Small Series of Casting, Ann. CIRP, 45, 1, (1996) 405.
- 4) Y. Nasu, N. Kouda, K. Mitobe, T. Kuroda and K. Shibata: Precision Trimming of Large GFRP Parts Using a Mobile Robot with Onboard Grinder, Proc. 11th Annual Meeting Am. Soc. Prec. Eng., Monterey, California, USA, (1996) 546.
- 5) 中根浩幸, 成清辰生, 芥田友彦, 毛利尚武, 斎藤長男: 精密加工ロボットの制御系設計—放電改質加工への応用, 精密工学会誌, 59, 10 (1993) 1637.
- 6) 青柳誠司, 岡部佐規一, 佐々木 健, 高野政晴: 超音波によるロボットの3次元位置測定(第1報)—計測原理と計測システムの構築—, 精密工学会誌, 58, 5 (1992) 859.
- 7) M. R. Driels and U. S. Pather: Vision-Based Automatic Theodolite for Robot Calibration, IEEE Trans. Robotics and Automation, 7, 3, (1991) 351.
- 8) M. R. Driels and W. E. Swayze: Automated Partial Pose Measurement System for Manipulator Calibration Experiments, IEEE Trans. Robotics and Automation, 10, 4, (1994) 430.
- 9) O. Nakamura, M. Goto, Y. Tanimura and K. Kurosawa: Development of a Coordinate Measuring System with Tracking Laser Interferometer, Ann. CIRP, 40, 1, (1991) 523.
- 10) R. S. Stoughton and T. Arai: A Modified Stewart Platform Manipulator with Improved Dexterity, IEEE Trans. Robotics and Automation, 9, 2, (1993) 166.
- 11) 古谷克司, 柴谷一弘, 伊東直樹, 毛利尚武: パラレルメカニズムを用いた走査放電加工用エンドエフェクタ, 精密工学会誌, 63, 5 (1997) 721.
- 12) 青山尚之, 岩崎隆之, 佐々木 彰, 深谷次助, 下河辺 明: 小型自走機械群による超精密生産機械システム(第1報)—自走機械の設計と試作, 精密工学会誌, 59, 6 (1993) 1007.
- 13) 古谷克司, 毛利尚武, 樋口俊郎: インパクト駆動機構を用いた自走式放電加工機, 精密工学会誌, 63, 9 (1997) 1290.
- 14) 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 (1988) 2107.
- 15) 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 (1991) 910.
- 16) 古谷克司, 毛利尚武, 樋口俊郎, 斎藤長男: ローカル・マシニング・ステーション方式による精密加工(第1報)—基本構想—, 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1993) 319.