超精密加工用 3 軸制御ファストツールサーボの開発 (第 1 報) *

ーファストツールサーボユニットの試作と基本性能の評価ー

和田紀彦** 高橋正行** 森脇俊道*** 中本圭一†

Development of a Three Axis controlled Fast Tool Servo for Ultra Precision Machining (1st Report)
- Development of 3-axis FTS Unit and evaluation of its characteristics -

Toshihiko WADA, Masayuki TAKAHASHI, Toshimichi MORIWAKI and Keiichi NAKAMOTO

This paper presents a newly developed 3-axis controlled Fast Tool Servo (FTS) machining system for ultraprecision machining, which is driven in synchronization with the rotation of the workpiece fixed on the rotary table. The 3-axis controlled FTS unit can drive the cutting tool along the arbitrary cutter path in the space by controlling the motions of three piezoelectric actuators arranged in three axes of the orthogonal coordinates. The three directional motions are measured with use of three capacitive-type proximeters and the motion signals are fed back to the controlling computer in order to guarantee the required tool paths. The FTS machining system can be applied to machine sculptured surfaces, micro lens arrays etc. A mold with cylindrical surface was machined with the developed system, and the obtained form accuracy was $0.22 \mu\text{m P-V}$.

Key words: fast tool servo, ultra precision machining, non rotationally-symmetric surface

1. 緒 言

光学デバイスの小型化, 高機能化に伴い要求される形状も軸対称非球面から非軸対称自由曲面へと変化し, またバックライトパネルや回折格子などの微細溝形状を多数有する光学素子のニーズも増加している. 光学デバイスの金型加工では切削加工あるいは研削加工が多く用いられている. 非軸対称自由曲面形状の加工では一般に点群で構成された加工目標点を順次移動しながら加工するため, 加工機の工具走査速度の制限により加工に膨大な時間を要するという問題がある. また, 一方でマイクロレンズアレイなどの微細形状を多数有するデバイスの加工においても, 単一工具による逐次加工では加工面積に応じて加工時間が増加する. 長時間加工においては加工雰囲気の変化および工具の摩耗, 破損による精度の劣化という問題が顕著となるため, 加工時間の短縮が大きな課題となっている.

加工時間を短縮させる方法の一つとして FTS (Fast Tool Servo) が知られている¹⁾²⁾. これは回転ステージ上に設置された工作物の回転と同期して工具を切込み方向に高速に制御して, 旋盤上で非軸対称形状を加工する方法である.

筆者らは自由曲面形状あるいは微細形状の加工高速化および高精度化を目的として, 工具を任意方向に制御することが可能なユニットを用いた 3 軸制御 FTS 加工システムを開発した. 開発したユニットは工具を 3 次元空間内で駆動させることができるため, 加工形状の自由度が高く, また工具運動に楕円振動機能を付加することで楕円振動切削³⁾などに見られる断続切削の効果により, 工具摩耗の低減や難削材料加工への適用も期待できる. 本報では, 開発した 3 軸制御ユニットの基本特性と加工結果について報告する.

2. 3 軸制御 FTS ユニット

2.1 3 軸制御 FTS ユニットの基本的な考え方

図 1 に本研究における 3 軸制御 FTS 加工システム概念図を示す. 本ユニットは, 工具に対して圧電素子を 3 軸直交方向に配置し, 各々の圧電素子を独立に制御して工具を 3 次元空間内で高速に駆動させることを特徴とする. このユニットを用いて, 工作物の回転に同期して工具を駆動すれば, 非軸対称の目標形状でも旋盤加工と同様に高速で加工することができる. 例えば自由曲面形状を加工する場合には, 一般に加工目標点の法線方向で計算される工具経路に沿って工具を順次位置決めしながら加工する必要がある. ここで目標点数が多い場合には, プレーナー加工のような直線状の切削運動とピックフィードの組み合わせでは加工に膨大な時間が必要となる. これに対して本提案のように工作物を回転させながら工具を回転半径方向に送り, 同時に加工面法線方向の目標工具位置に工具を位置決めしながら切削すれば, 高速で加工を行うことができる. この場合, 工具の運動を 3 軸同時制御し, 常に加工面法線方向の目標点に沿って位置決めする必要がある.

Fig. 1 Conceptual diagram of 3-axis FTS unit

* 原稿受付 平成 19 年 5 月 7 日

** 正 会 員 松下電器産業(株) (門真市松葉町 2 番 7 号)

*** 正 会 員 摂南大学工学部 (寝屋川市池田中町 17-8)

† 正 会 員 神戸大学大学院 (神戸市灘区六甲台町 1-1)

Fig. 2 Micro machining by 3-axis FTS unit

また、本ユニットのもう一つの特徴としてマイクロ形状加工への適用が可能であることが挙げられる。本ユニットの工具を3次元空間内で制御できるという特徴を用いれば、ユニットのみで工具に所定の動作をさせることでマイクロ形状を加工することができる。図2では本ユニットを用いたマイクロレンズアレイの加工例を示している。ユニットの動きとユニットを取り付けたステージの位置決め動作を組み合わせることにより、マイクロレンズアレイを順次加工することができる。さらに本ユニットにおいては工具を高速に円運動させることも可能であるため、楕円振動切削機能を付加することも可能であると考えられる。楕円振動切削加工法は、切削方向と切り屑流出方向を含む面内で工具に楕円振動を付加することにより切削抵抗が著しく低減すること、通常切削では工具摩耗のために切削不可能である焼入れ鋼の超精密ダイヤモンド切削が可能となることなどが知られており⁴⁾、本加工システムのFTS機能に振動切削機能を加えることで、微細形状加工への適用や工具摩耗の低減による大面積加工へも適用できると期待される。

2.2 3軸制御 FTS ユニットの設計と試作

工具を3軸方向に制御することができるFTSユニットを設計した。図3に概念図を示す。本ユニットには以下に示す3項目が要求される。

- ① 高精度位置決めが可能であること
- ② 駆動変位量が大きいこと
- ③ 応答周波数が高いこと

以上のことを考慮し、工具駆動には積層型の圧電素子を用いた。積層型の圧電素子は小型・軽量でかつ高精度高速動作が可能であるという特徴があるため、精密位置決めや振動発生源として広く用いられている。その一方で、圧電素子を駆動するための駆動電圧と発生する変位量との間には直線性がなくヒステリシスが存在するため、高精度に位置決めするためには工具位置を逐次測定しその誤差量を補正する必要がある。本ユニットでは工具位置の測定に静電容量型センサを用い、圧電素子と接着された工具ホルダの変位を各軸方向に測定することができる構造とした。工具ホルダに設けたターゲットの変位を静電容量型センサにより測定し、フィードバック制御することで、圧電素子のヒステリシスおよび各軸の変位の相互干渉を補正することができる。

工具位置を高精度に制御するためには、アッペの原理より加工点である工具刃先をセンサの測定軸上に配置することが必要となる。そこで図3に示すように、工具切込み方

Fig. 3 Developed 3-axis FTS unit

Fig. 4 Preload of PZTs

Table 1 Specifications of 3-axis FTS unit

Stroke of PZT	30 μm
Resonance frequency of PZT	34 kHz
Sensor resolution	1 nm
Maximum force of PZT	3500 N
Dimension	80 mm x 80 mm

向となる Z 軸方向では工具刃先とセンサの測定軸を同一軸上に、水平方向となる XY 軸方向では工具刃先と工具固定点間の距離だけオフセットした位置が測定軸と一致するようにセンサを配置している。また、積層型圧電素子は引張り力に弱いために引張り力が加わると破損する恐れがある。そのため圧電素子の機械的破損防止および駆動時の応答特性の向上を目的として、図 4 に示すように工具ホルダと圧電素子の固定とは別にねじにより工具ホルダを各圧電素子と 45° の対角方向へ引張ることで各圧電素子に対して同時に与圧を加える構造としている。表 1 に本ユニットの基本仕様を示す。以上の設計に基づいて 3 軸制御 FTS ユニットの試作した。図 5 に試作したユニットの外観を示す。

Fig.5 3-axis FTS unit

(a) Open-loop control

(b) Feedback control

Fig. 6 Command signal and measured motions

3. 3 軸制御 FTS ユニットの評価

3.1 制御特性の評価

製作したユニットの駆動特性を評価した。本ユニットにおいて各圧電素子は工具ホルダを介して互いに連結されているため、各軸を駆動させると他の軸にも相互に影響を及ぼすが、各軸の位置をリアルタイムでフィードバック制御することで軸間の干渉が補正される。図 6 に Z 軸方向に $0.25\mu\text{m}$ 毎にステップ送りを行った場合のオープンループ制御およびフィードバック制御の駆動結果を示す。オープンループ制御では Z 軸方向の送りにより X 軸及び Y 軸方向に工具が変位しているのに対して、フィードバック制御ではこの干渉を補正できていることがわかる。図 7 に各軸の周波数応答特性を示す。各軸ともほぼ同等の特性を示している。開発したユニットの共振周波数は 3kHz であった。

3.2 工具刃先の位置決め精度評価

本ユニットにおいてセンサの測定位置と工具刃先位置は

(a) Gain

(b) Phase

Fig. 7 Frequency responses of 3-axis FTS unit

Fig. 8 Measurement method of FTS unit motion

異なるため実際の工具動作においては指令値との間に誤差が生じる。この誤差量の測定を試みた。工具刃先の位置を計測することは困難であるため、本実験では工具の代わりに先端に $R=0.5\text{mm}$ のルビー球を取り付けた治具を、球の頂点が工具刃先位置と一致するように取り付けて球の頂点の位置を測定することとした。測定方法は図 8 に示すようにユニットを超高精度 3 次元形状測定器 UA3P (松下電器産業(株)製)に設置し、各軸に指令値を与えた前後における球の頂点位置の変化量を測定した。本方法によれば、工具先端に見立てた球の動きを 3 次元空間内で測定することができるため、一軸方向の動作だけでなく他の軸方向に発生する誤差も測定することができる。

図 9 に各軸に指令値を与えた場合に発生する各軸方向の位置決め誤差を測定した結果を示す。(a), (b), (c) は X, Y, Z 軸のみに指令値を与えた場合、(d), (e), (f) は XY, YZ, XYZ 軸に対して同量の指令値を与えた場合の各軸の位置決め誤差を示している。Z 軸の位置決め誤差が小さく

Fig.9 Position error of 3-axis FTS unit

Fig. 10 Block diagram of FTS machining system

抑えられているのに対して、X、Y 軸の位置決め誤差が大きくなっている。本測定における測定分解能は、各軸方向とも等しく 3nm である。X、Y 軸の位置決め誤差が大きい原因としては、Z 軸のセンサ位置が工具刃先と同一軸上にあるのに対して、X、Y 軸のセンサ位置は工具刃先位置に対してオフセットした位置にあるためであると考えられる。本ユニットにおいて工具切込み方向である Z 軸の位置決め誤差は 0.5μm 以下であった。

4. 3 軸制御 FTS 加工システム

3 軸制御 FTS ユニットの用いた FTS 加工システムを開発した。ユニットを搭載するステージには空気静圧軸受を具備した 4 軸超精密加工機を用いた。図 10 に FTS 加工システムのブロック図を示す。ユニットの制御信号は、ステージエンコーダからの座標信号をリアルタイムに読み込み、所定の計算式により目標工具位置を計算した後、D/A 変換を介してアンプへと出力している。本システムのサンプリング周波数は 10kHz である。

これまで FTS を用いて自由曲面形状を加工する場合、アクチュエータの制御軸数として切込み方向の 1 軸あれば加工することは可能であった。しかし制御軸数が 1 軸の場合には、工具が駆動しない方向に対して工具目標位置を一定とする必要があるため、収束計算を用いてそのような工具経路を作成していた。また、収束計算を用いると計算時間が長くなりリアルタイムで工具経路を計算することが困難であるため、予め用意されたデータテーブル上に保存した工具経路データを読み出して加工する方法が用いられるが、データ領域の問題から加工領域が制限されるという問題があった。本システムでは工具の 3 軸方向位置決めにより工具経路作成に収束計算が不要となり、現在位置情報から工具目標位置をリアルタイムに計算し加工することで加工リードタイムの短縮を実現している。

5. 加工実験

5.1 実験方法

本システムを用いた加工実験としてシリンダリカル非球面形状を加工した。加工方法を図 11 に示す。工作物を回転テーブル中心に設置し、工作物回転と同期して工具を加工点法線方向の工具目標位置へ 3 軸方向に動作させることにより加工した。工作物材料は Al で、工作物回転数を 150min⁻¹、工具送り速度を 0.6mm/min とし、工具には刃先ノーズ半径 R=0.05mm の単結晶ダイヤモンドバイトを用いた。加工範囲は幅 4mm、長さ 60mm の矩形形状である。

Fig. 11 Machining method of cylindrical aspherical mold

Fig. 12 Command signal and measured motions

5.2 応答遅れの補正

指令値に対して実際のユニット動作は図7に示すように応答の遅れがある。この遅れは工具位置決め誤差となるため加工形状に誤差を生じる。例として図12(a)に半径方向位置35mmにおけるZ軸の指令値とセンサの出力波形を示す。指令値に対してユニットの動作が遅れていることがわかる。今回の加工方法においては半径方向位置により工具が工作物上を通過する時間が変化するため位相遅れ量に変化する。そこで加工座標に応じた位相の補正を試みた。回転テーブルが S で回転し、回転中心からの半径方向軸座標 x において、ワークを加工する距離 W であるとする、加工周波数 f (加工範囲における動作周波数) は次式より求められる。

$$f = \frac{2\pi \times x \times S}{60 \times W} \quad (1)$$

また、加工周波数 f の時にユニットの位相遅れが ϕ 、工作物回転数 S の時の回転遅れ角度 θ は次式より求められる。

$$\theta = \frac{S \times \phi}{60 \times f} \quad (2)$$

上記の式を用いて加工範囲に入る θ 前に指令値の演算を開始するように補正を導入した。図12(b)に補正後の指令値とセンサの出力波形を示す。応答遅れが補正され指令値に同

Fig. 13 Mold machined by 3-axis FTS system

Fig. 14 Form accuracy of machined cylindrical aspherical mold

期して工具が動作していることがわかる。

以上の応答遅れの補正を用いて加工した工作物の外観を図13に、形状精度の測定結果を図14に示す。図14より、本加工においては形状精度として $0.22\mu\text{mP-V}$ が得られていることがわかる。

6. 結 言

3次元形状の超精密高速加工を実現するための3軸制御ユニットを用いた FTS 加工システムを開発した。3軸 FTS ユニットのフィードバック制御による工具の高精度位置決めとリアルタイム工具目標位置演算による高速加工の可能性を確認した。本研究において以下の結果を得た。

- (1) 3軸制御 FTS ユニットの静電容量型センサを用いた3軸独立のフィードバック制御を採用し、駆動時において軸間の干渉がない高精度な位置決めを実現した。
- (2) 3次元形状測定器を用いて工具刃先の位置決め誤差を測定した。工具刃先が測定軸上にある工具切込み方向において最も位置決め誤差が小さいことを確認した。
- (3) 工具の制御における位相遅れを補正したシリンドリカル非球面形状の金型加工により本研究で開発した FTS 加工システムの有効性を確認した。

参 考 文 献

- 1) Y.Okazaki: Fast tool servo system and its application to three dimensional fine figures, Proc.of 13th ASPE,(1998),100.
- 2) T.A.Dow, M.H.Miller and P.J.Falter: Application of a fast tool servo for diamond turning of nonrotationally symmetric surfaces, Precision Engineering,13-4,(1991),233.
- 3) 社本英二, 森本祥之, 森脇俊道: 楕円振動切削加工法(第1報)-加工原理と基本特性, 精密工学会誌,62,8(1996)1127.
- 4) 社本英二, 鈴木紀和, 森脇俊道, 直井嘉和: 楕円振動切削加工法(第4報)-工具振動システムの開発と超精密切削への応用, 精密工学会誌,67,11(2001)1871.