圧電素子による旋削加工精度制御*

——円筒形状工作物について——

竹内芳美** 坂本正史*** 浅尾晃通*** 中村 平***

Control of Machining Accuracy in Turning by Means of Piezo-electric Actuator
—In Case of Cylindrical Workpieces—

Yoshimi TAKEUCHI, Masafumi SAKAMOTO, Teruyuki ASAO and Taira NAKAMURA

The study deals with the development of a tool position control device by means of a piezo-electric actuator and the compensation method of machining errors in turning. The tool position control device is mounted at the tool post of an NC lathe linked to a personal computer for DNC. The voltage control of the piezo-electric actuator by the personal computer makes it possible to slightly move the tool position in the depth of cut. The movement of tool on the basis of the machining errors leads to the improvement of machining accuracy. From experimental results concerning to cylindrical workpieces, it is found that the device has the potential of improving the machining accuracy.

Key words: piezo-electric actuator, tool position control device, DNC lathe, machining accuracy, machining error compensation

1. 序 論

最近の NC 旋盤は $1\mu\text{m}$ の最小設定量をもつものが市販されているが、加工中に発生する様々な加工誤差によって、最小設定量以内の寸法精度、形状精度を実現することは極めて困難である。加工誤差を最小設定量と同程度までに抑制することができれば NC 旋盤のもつ加工能率に加えて高精度加工が期待できる。

そのため、加工誤差を加工中あるいは加工後に計測し、それを低減するよう NC 命令を変更するインプロセス制御、あるいはポストプロセス制御が研究開発されている。また、NC 命令を変更するが、計測装置は使用せず、あらかじめ加工誤差を予測し、それに見合う分だけ NC 命令を修正するという予測制御方式も提案されている¹⁾。これらの補正方式は、いずれも NC 命令の最小設定量を使用して、それと同程度まで加工誤差を減少しようとするものであるが、さらに最小設定量以下の補正を行おうとする場合には、別の機構を設ける必要がある。

この装置を最小設定量が $10\mu\text{m}$ の NC 旋盤を用い

た DNC システムに組み込み、最小設定量以上の加工誤差の補正は NC 装置で行い、それ以下の加工誤差については工具位置補正装置で対処し NC 旋削加工精度の向上をめざす。ここでは、開発した工具位置補正装置を円筒形状工作物に適用した結果を報告する。

微小変位機構として、連続的かつ微小な変位が電圧制御により容易に得られる圧電素子の中ぐり加工用工具の微小位置決めに適用した例が既に 1967 年に報告されている²⁾。そこではひずみゲージを使った力センサと組み合わせて適応制御で $0.25\mu\text{m}$ の精度を実現している。圧電素子をアクチュエータとして微小変位機構に利用する傾向は圧電セラミックス材料の改良とともに増加し、近年、工具台や工具切れ刃位置の微小調整に盛んに応用されている。

梅垣らは 8 つの円弧状切欠きを有する一体型平行ばねの弾性案内に工具を取り付けた装置を圧電素子で駆動してサブミクロン以下の変位調整を可能にしている³⁾。岡崎らは N 型のスリットをもつ一体式切欠き平行リンク構造内に圧電素子を入れ、工具を取り付けた上部を変位させている⁴⁾。高精度位置決めのために変位量をフィードバックし、閉ループサーボ系の構成により 25nm の分解能を得ている。また、ローレンス・リバモア国立研究所ではダイヤモンド旋盤の工具に圧電素子と弾性支持ダイヤフラムを用いた微小切込み機

* 原稿受付 昭和 61 年 12 月 10 日、昭和 61 年度精密工学会秋季大会学術講演会（昭和 61 年 10 月 10 日）にて発表

** 正 会 員 九州工業大学（現、電気通信大学；調布市調布ヶ丘 1-5-1）

*** 正 会 員 九州工業大学（北九州市戸畑区仙水町 1-1）

構 (FTS) を製作している⁵⁾。印加電圧による FTS の変位を差動式静電容量型変位計で検出しフィードバックすることにより 2.5 nm の再現性をもつ。クランフィールド工科大学でも同様な構成で、変位量を差動トランスで検出する閉ループ式の微小変位工具ホルダで 10 nm の分解能を実現している⁶⁾。一方、回転工具の切込み量制御にダイヤモンドバイトと圧電素子を直結し、高電圧をスリッピングを通して供給する方式の装置が内田らによって開発されている⁷⁾。50 mm の幅で最大深さ 2 μm の凹面を 0.1 μm の形状精度で修正している。

本研究では工具切れ刃を切込み方向に微小移動させるため、市販の工具ホルダの先端を切断し、圧電素子とともに新たに工具ホルダに組み込み、非常に簡単な構成にした。通常の NC 旋盤の工具台にこのホルダを取り付けて使用するので、工具台に細工を施す必要がなく剛性低下が避けられる。検出器による閉ループ位置決め機構はないが、再現性の良さに着目し、ヒステリシスを考慮した印加電圧発生で切れ刃位置を制御するものである。

2. 工具刃先位置補正装置

2.1 セラミックスアクチュエータの特性

結晶に電界を加え分極を起こさせると結晶はひずみを発生し、あるいは応力を生ずる。また逆に結晶が張力、圧力あるいはずれの応力を受けてひずみを生じると、結晶に誘電分極を発生し、あるいは電界を生ずる。この両方の現象を圧電効果というが、ここでは大きな変位が得られるように素子を重ね合わせた積層構造のものを補正装置に使用した。薄い圧電体の両面に電極を設け、各電極を 1 層おきに並列に接続したものである。使用したセラミックスアクチュエータ (日本電装製) は、50 枚の PZT (チタン酸ジルコン酸鉛系) セラミックスが積層され、変位量、発生力がともに大きくとれる。セラミックスアクチュエータは外径 19.5 mm、長さ 45 mm の円筒形で、ヤング率 $4.4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ となっている。図 1 に予荷重として 70 N をかけ印加電圧を 100 V ~ 500 V ~ 100 V と変化させたときの変位を示すが、ヒステリシスがあることが分かる。補正に適用する場合には、この変位を関数として与え、変位から逆算し電圧を計算すればよい。図 2 は、印加電圧を 100 V ~ 500 V、500 V ~ 100 V と急激に変化させたときの変位である。応答速度があまり良くないが、これは使用した電源 (松定プレジジョンディバイセズ HSR-0.6 P) の出力電流が最大で 5 mA と小さいためと思われる。出力電流が数 A があるような高電圧源を使

Fig. 1 Relationship between the input voltage and the displacement of the piezo-electric actuator

Fig. 2 Response of the piezo-electric actuator

用すると数 μs の応答が得られるが、実際の補正時にはそのような高応答性は必ずしも要求されないので使用した電源は十分実用範囲にある。

2.2 アクチュエータを組み込んだ補正装置

補正装置には圧電素子の微小な変位を切れ刃部の動きに変換する機構が必要であり、切削力に対する剛性にも十分に留意しなければならない。外周旋削用の補正装置を図 3 に示すが、市販の工具ホルダの先端部を切断し、プレートに固定し、そのプレートにセラミックアクチュエータの変位を伝える。このとき変位の伝達面の接触状態が問題になるので、これを完全に接触させるために、予圧をかける。その調整は 4 本のボルトによって行われる。図 4 に補正装置を分解した様子を示す。

圧電素子を外周旋削用補正装置に組み込んだときの印加電圧に対する工具切れ刃先端部の変位を図 5 に示す。この状態ではヒステリシスが減少しているが、これはボルトにより予圧をかけていることによる効果と

Fig. 3 Configuration of the tool position control device for external turnings

Fig. 4 Expanded view of the tool position control device for external turnings

Fig. 5 Relationship between the input voltage and the displacement of the tool position control device for external turnings

思われる。同時に変位の絶対値も減少しているが、これは圧電素子の変位が補正装置の各所に分散され、吸収されたためと考えられる。同様に応答速度についてのグラフを図6に示す。応答速度については変位の絶対値が小さいこと以外は装置に組み込む前の素子だけの場合と同様である。

内周旋削用の補正装置では、小さな穴径にも使用できるような機構が必要である。そこで図7に示すように、外周旋削とは異なり、セラミックアクチュエータの変位をそれと直角方向へと伝えるようにした。この変位方向変換機構として、リングを用いた。この場合も伝達面を完全に接触させるために、ボルトによる調整機構を設けた。図8に内周用の補正装置の分解状態を示す。

試作した外周、内周旋削用補正装置の位置決め精度、繰返し精度が補正精度に大きく影響するが、100 V から 500 V に印加電圧を変えたとき、500 V での変位は標準偏差 $0.3 \mu\text{m}$ の繰返し精度をもつ。ヒステリシスが存在するので位置決め精度と表現してよいのか分からないが、同じ入力電圧に対する変位のばら

Fig. 6 Response of the tool position control device for external turnings

Fig. 7 Configuration of the tool position control device for internal turnings

Fig. 8 Expanded view of the tool position control device for internal turnings

Fig. 9 Schematic diagram of the compensation system

つきも同程度となっている。従って外周，内周用補正装置の絶対変位量はそれぞれ $10\mu\text{m}$ ， $5\mu\text{m}$ と大きくないが，補正精度は十分と考えられる。

3. 補正システムの構成

製作された補正装置は，切削工具として NC 旋盤（山崎鉄工所 MAZAK Turning Center M 20）の刃物台に取り付けられる。NC 装置（FANUC 20 A）は $10\mu\text{m}$ の最小設定量をもち，8 ビットのパソコン（NEC PC-8001）と DNC 結合されている。これは，NC 装置のテーブルダ部を改造し，パソコンのインタフェースを介して NC 命令（EIA コード）が送れるようにしたものである⁹⁾。さらに，パソコンには圧電素子を制御するために 8 ビットの D/A 変換器や高電圧装置が接続されている。また，加工誤差や補正の効果をj知るために，加工後，刃物台に取り付けられた電気マイクロメータを加工時と同じ経路で移動させながら加工誤差を自動測定する機能も用意されている¹⁰⁾。

本実験装置のブロック線図を図 9 に示す。NC 命令の出力と圧電素子の電圧制御，および測定用 NC 命令の出力と電気マイクロメータからの入力のタイミングはすべてパソコンにより同期がとられている。

4. 円筒形状工作物の補正

4.1 補正方法

この補正装置は既に開発した自動プログラミングシステムと連動し，その中の仕上工程に適用される。すなわち，自動プログラミングシステムが決定した切削速度，切込み，送り等の切削条件から加工誤差を予測し，それを補正するように装置が作動するものである。しかし，ここでは開発した補正装置の機能チェックということから，測定された加工誤差から導かれた加工誤差関数に従って，それを打ち消すような制御電圧を

素子に送り，オンラインで工具切れ刃を補正している。このとき，制御電圧は装置のヒステリシス，応答速度を考慮して決められ，それは仕上の NC 命令と同期をとってパソコンから DNC で伝送される。

補正の対象となる加工誤差は切削熱による工具，工作物の熱変形，切削抵抗による工作物の曲げ変形，工具の摩耗，工作機械の幾何的誤差などが原因となり生じるが，仕上加工への影響の最も大きい工具先端の熱膨張を考えて，あらかじめ測定した加工誤差を

$$f(x) = C_1(1 - e^{-C_2 \cdot x})$$

の形で代表させ，係数 C_1 ， C_2 は最小二乗法で決めたものを使う。ここで x は加工開始からの工作物長である。

4.2 外周旋削の補正

最も基本的な補正例として円筒形状工作物の外周旋削の場合を図 10 (a) に示す。被削材は S 35 C，工具は超硬 P 10 種，切削条件は図中に示す通りである。グラフの横軸は工作物の長手方向であり，左がセンタ側，右がチャック側を表す。縦軸は半径方向の加工誤差を示し，プラス方向は工作物径が小さくなることを意味する。図中の点線は補正無しで加工した場合の測定例である。切削するに従って径が減少するように加工誤差が現れることが理解できる。これは切削時に発生する熱量による工具先端の熱膨張によるものである。この測定値を最小二乗法により指数関数近似したものを実線で示す。これを基に補正すべき工具先端の位置が一点鎖線で示すように計算でき，圧電素子に送る電圧が得られる。DNC 運転をしながら補正装置を作動させオンラインで補正したものが破線で示される。このように $10\mu\text{m}$ 程度であったものが $3\mu\text{m}$ 以内に収まっている様子がわかる。

次に，切込みと送りを変えて補正した結果を図 10 (b) に示す。加工誤差は図 10 (a) の場合より切削量が多いので大きくなっていることがわかる。本実験装置では図 6 から分かるように工具切れ刃部の変位が $10\mu\text{m}$ 程度しか得られなかったのも，それを越える加工誤差については補正を行わない。図から分かるように，工作物端面から 40 mm までは補正により加工誤差が $4\mu\text{m}$ 以内に抑制されているが，それを過ぎると加工誤差が $10\mu\text{m}$ を越えるため通常切削の場合と同じ傾向で加工誤差が現れている。

4.3 内周旋削の補正

外周旋削の場合と同様に円筒形状工作物の内周旋削

(a) In case of depth of cut 0.1 mm, feed rate 0.1 mm/rev, cutting speed 243 m/min, dry

(b) In case of depth of cut 0.2 mm, feed rate 0.2 mm/rev, cutting speed 243 m/min, dry

Fig. 10 Improvement of machining errors for external turnings

補正例を図 11 に示す。被削材は S 35 C, 工具は超硬 P 10 種であり, 切削条件は図中に示す通りである。外周旋削の場合と同様に通常切削を点線で, その指数関数近似を実線で示す。これは加工するに従って内径が大きくなっていることを表す。また, 表面粗さが良くなるのは内周旋削では切りくず処理が難しく表面を傷つ

Fig. 11 Improvement of machining errors for internal turnings

けるためである。さらに内周旋削用の補正装置においても圧電素子の変位を十分伝えることができず, 工具切れ刃先端での変位は最大で $5\mu\text{m}$ となるために, 切込みを 0.05 mm に設定し, 工作物を 50 mm 切削したときに加工誤差が $5\mu\text{m}$ になるようにした。この結果, 図から分かるように, 最大では $5\mu\text{m}$ あった加工誤差が補正により $\pm 2\mu\text{m}$ 以内に抑制されることが確認された。インプロセス計測が困難な内周旋削でも適確に予測した加工誤差に基づいて補正装置を制御すれば加工精度向上に大きく寄与することができる。

5. 結 論

積層型の圧電素子を, 工具切れ刃と組み合わせた補正装置を作り, これを DNC 運転中に制御するシステムを開発し, 最も簡単な円筒形状工作物の旋削加工に適用したところ, 次のような結果が得られた。

- (1) 外周旋削用の工具位置補正装置を作製し, 通常の切削では $10\mu\text{m}$ 程度あった加工誤差が $3\mu\text{m}$ 以内に収まった。
- (2) インプロセス方式では非常に計測が困難である内周旋削でも, 内周用工具位置補正装置を使用すれば加工誤差の補正が可能であることが分かった。

今後は、補正装置の機構の見直しとともに、最小設定単位が $1\mu\text{m}$ のCNC旋盤に取り付け、最小設定単位以下の補正を試みる予定である。また、自動プログラミングシステムと組み合わせて一般形状の工作物へもシステムを拡張し、高精度加工を実現したい。

最後に、卒業研究として本研究に協力された国川隆、澤原一成の両君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Y. Takeuchi et al.: Development of Integrated Turning System with Predictive Compensatory Function for Machining Errors, Ann. CIRP, **34**, 1, (1985) 519.
- 2) J. R. Hicks, L. A. Pallay & M. R. Islam: Boring goes Adaptive, Amer. Machinist, **111**, 17, (1967) 93.
- 3) 梅垣淳一, 河野英一: ピエゾ駆動弾性案内による微小切込み機構の試作, 昭和57年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1982) 192.
- 4) 岡崎祐一, 新野秀憲: 圧電素子を用いた微小変位工具台の開発, 昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1985) 573.
- 5) S. R. Patterson & E. B. Magrab: Design and Testing of a Fast Tool Servo for Diamond Turning, Prec. Engg., **7**, 3, (1985) 123.
- 6) E. Kouno: A Fast Response Piezoelectric Actuator for Servo Correction of Systematic Errors in Precision Machining, Ann. CIRP, **33**, 1, (1984) 369.
- 7) 内田史彦, 森山茂夫: ピエゾ駆動による工具切込み量の回転角同期制御型フライカッティング装置, 昭和59年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1984) 63.
- 8) 田中哲郎, 岡崎清一, 一ノ瀬 昇共編: 圧電セラミック材料, 学献社 (1978) 11.
- 9) 竹内芳美, 坂本正史, 井村公二, 吉田隆一: パーソナルコンピュータによるNC旋盤のDNC化 (第2報) ——外周旋削用自動プログラミング機能の付加, 精密機械, **50**, 2 (1985) 353.
- 10) Y. Takeuchi, M. Sakamoto & K. Imura: Automatic Measurement of Workpiece on a Personal Computer Based BTR-DNC Lathe, Proc. 5th ICPE, (1984) 597.

通産省、先端複合材料の開発推進

通産省は先端複合材料 (アドバンスド・コンポジット・マテリアル, 略称 ACM) の技術開発が宇宙往還機や超々高層ビル, 海洋都市などハイテク産業のポテンシャルを高めるために必要不可欠と判断, 63年度の技術開発プロジェクトの目玉として次世代産業基盤技術研究開発制度などで予算化, 産学官の共同プロジェクトとして推進していくことを固めた。新化学発展協会 (東京都千代田区麴町 3-5-1, 会長・土方武氏) が 62 年度の次世代技術開発の最重要テーマとして取り上げたのを受けて, 通産省でもこれをナショナルプロジェクトとして支援していくことにしたものである。このため同省では, 化学メーカーなど素材産業とユーザにあたる航空宇宙産業などと呼びかけ共同プロジェクト作りを急ぐことにしている。

ところで, 通産省工業技術院の私的諮問機関である 21 世紀産業基礎技術プロジェクト懇談会がまとめた中間報告によると, 先端技術の研究開発が急速に進むとスケールの大きい技術革新が起きるが, 先端技術の技術開発は欧米が国家プロジェクトとして推進しているのに比べるとわが国は革新技術の創造という面からは遅れているた

め, 積極的な研究が必要と指摘している。

特に宇宙, 海洋開発や極超音速輸送機器など大規模システムは極限性, 超信頼性のある材料を確保する必要がある。

こうしたことから通産省では, ハイテク産業には絶対必要な ACM を国家プロジェクトとして研究開発していくことにした。

具体的には次世代基盤技術研究開発制度などで予算化, 素材産業とユーザがそれぞれのテーマごとにプロジェクトを組んで, ① ACM の強化材と母材の界面挙動の原子・分子レベルでの解析, ② ACM の疲労機構の解明, ③ 材料設計技術の確立, ④ ACM の評価技術開発及び実環境での評価——を 10 年間かけ実施する。

同省では ACM プロジェクトは単に第三次技術革新の先進技術開発になるばかりでなく, 素材産業の技術的ポテンシャルの向上, ハイテク産業の基盤強化, さらにには内需拡大, 産業構造の転換促進などの波及効果もあるとして, 広く産業界にも呼びかけていく方針である。

(服部 敏夫)