非円形輪郭切削に関する研究 (第1報)*

——逆伝達関数補償法の適用——

樋口 俊郎** 山口 智実***

Study of Non-circular Machining (1st Report)
—The Application of Inverse Transfer Function Compensation—

Toshiro HIGUCHI and Tomomi YAMAGUCHI

This paper describes a newly developed lathe for machining numerous non-circular profile articles with high accuracy and high efficiency. In general, the machining of non-circular profile articles, such as camshafts and rotary engines, has conventionally been carried out by means of a copying lathe. This method sets upper bounds to machining speed owing to mechanical factors. In order to machine a non-circular profile object by a lathe with high efficiency, a lathe has been developed whose the cutting tool is positioned in-phase with the rotation of the spindle by the use of an electro-hydraulic servo-mechanism controlled numerically. When the speed of the spindle is increased to improve machining efficiency, the positioning of the cutting tool tends to become out of phase with the rotation owing to the delay caused in the servo-system. The inverse transfer function compensation, which is a kind of feed-forward control, has been applied to the system in order to overcome the problem of the delay. And application of this compensation has enabled improvement in positioning accuracy of ± 0.5 mm to ± 0.1 mm at a spindle rotation of 180 rpm. This result and some examples of the products machined by the developed lathe are shown in the paper.

Key words: servo-system, non-circular machining, electro-hydraulic servo-mechanism, feed-forward control, numerical control, phase lead compensation

1. はじめに

自由曲面を含む3次元形状の加工において、金型等いわゆる角ものに対してはNCフライス盤によるCAMによって加工は可能となり、既に広く利用されている。一方、旋削によって行われる軸物の3次元形状加工に対しては特殊な例を除きNC旋盤はほとんど用いられていない。軸ものの3次元形状の加工には、非円形輪郭の旋削加工が必要不可欠な要素となるが、従来の油圧倣い旋盤やNCフライス盤等によって行われる加工法では加工の能率性・高精度性、及び加工形状の多様性等に問題があり、このことが3次元形状の旋削加工の発達を遅らせている大きな要因と考えられる。そこで、著者らは、任意の3次元形状の旋削加工を目的として、旋盤による高能率、かつ高精度の非円形輪郭切削加工の研究に着手した。

旋盤による非円形輪郭形状の加工には、図1に示す

* 原稿受付 昭和62年3月5日。昭和58年度精機学会春季大会学術講演会(昭和58年3月29日)にて発表

** 正会員 東京大学生産技術研究所(東京都港区六本木7-22-1)

*** 学生会員 東京大学生産技術研究所

ように、主軸の回転に同期してバイトの位置決めを行

Fig. 1 Developed system for non-circular machining

う制御機構が不可欠であるが、能率の良い加工を行うには主軸の回転数を大きくする必要があるので、この位置決め機構には高速応答性が要求され、また、切削抵抗に対抗できる力も要求される。また、加工形状の多様性に対応するために数値制御が可能でなければならない。これらの要求を満たすことが期待できるバイトの位置決め制御機構として、計算機制御による電気油圧サーボ機構を用いることにした。

この電気油圧サーボ機構を用いたバイトの位置決め制御系では、主軸の回転数を大きくしたり、あるいは輪郭形状の複雑なものを加工したりすることにより位置決めサーボ系への入力周波数が高くなると、サーボ系の遅れによる位置決め誤差が大きくなり問題となる。高精度な非円形輪郭形状の切削加工を行うためには、このサーボ系の遅れによる位置決め誤差を低減しなければならず、系の遅れを補償する必要がある。そこで、本論文では、遅れの補償法の一つとしてフィードフォワード制御の一手法と言える逆伝達関数補償法を適用することを検討した。

この逆伝達関数補償法は、対象とする系の伝達関数の逆数を有する要素を系の前に直列に加え、系全体の伝達関数を1とすることにより、目標入力と出力とを一致させる方法である。一般に、この逆伝達関数補償法を実現するのは困難であると考えられるが、本非円形輪郭切削問題に関しては、加工形状が既知であることに着目して適用を可能とした。

本論文では、まず予備段階として、バイトの代わりにベンによって回転円板に非円形の線図を描かせる実験を行うことにより、逆伝達関数補償法の効果を確認し、次に、切削負荷の無い状態でのバイトの位置決め精度、及び、実際に切削を行ったときの加工製品の形状精度について実験を行い、逆伝達関数補償法の有効性について評価検討を行う。また、今回開発した非円形輪郭切削装置を用いて加工した製品の例を示す。

2. 実験装置の概要

実験装置の概略図を図1に示す。装置は旋盤と計算機とからなり、旋盤本体は普通旋盤を一部NC化したものである。バイト台は油圧シリンダで駆動され、サーボ弁と油圧シリンダ及び差動トランスとで閉ループ系の電気油圧サーボ系を構成している。サーボ弁には東京精密測器 213 F-24 L-100 を用い、油圧シリンダの有効面積は 3.46 cm^2 、油圧源の供給圧力は $9.8 \times 10^6 \text{ Pa}$ $\{100 \text{ kgf/cm}^2\}$ とした。なお、バイトを含む可動部の質量は 8.7 kg である。また、旋盤の主軸には 1000 パルス/回転のエンコーダを取り付け、主軸の回転角の

Fig. 2 Application of the inverse transfer function compensation to the system

Fig. 3 Frequency characteristics of the servo-system $T(s)$ and $\hat{T}(s)$ (approximated to $T(s)$)

検出を行っている。

目標とする断面形状（以後、目標形状と呼ぶ）が極座標で $r=f(\theta)$ と与えられた場合、このデータから主軸の回転角 θ に対するバイトの位置決めサーボ系への指令値を算出できる。この指令値のデータをあらかじめ計算機内のメモリーに格納しておき、エンコーダからの主軸回転角検出信号に応じて、各回転角に対応する指令値を計算機から D/A 変換器を介してバイトの位置決めサーボ系へ順次出力していく。これにより、油圧シリンダに取り付けられたバイト台が主軸の回転に同期して位置決め運動を行い、非円形輪郭形状の切削を行う。なお、バイト台の主軸方向の送りは、ボールねじとステップモータで構成し、エンコーダからの信号を分周した信号をステップモータに入力することにより行う。こうすることにより、主軸方向の送りは主軸の回転に同期し、その送りの設定は分周比を変化させることにより行える。

3. 逆伝達関数補償法を適用した制御系

先の実験装置に、逆伝達関数補償法を適用した制御系の構成を図2に示す。 $R(s)$ は目標入力、 $Y(s)$ は出力、 $U(s)$ は制御入力を表し、 $G(s)$ は電気油圧サーボ系の一巡伝達関数を、 $T(s)=G(s)/(1+G(s))$ は閉ループ系の伝達関数を表す。この系の伝達関数 $T(s)$ の周波数特性を図3に示す。 $T(s)$ の測定結果に示されるように、入力の周波数が高くなるとゲインの減少

と位相の遅れが生じ、出力誤差が顕著になる。この誤差を低減するためには、系に何らかの補償を行う必要がある。そこで、仮に電気油圧サーボ系の伝達関数の逆数 $1/T(s)$ の特性を有する要素をサーボ系の前に直列に加えれば $Y(s) = T(s) \cdot 1/T(s) \cdot R(s) = R(s)$ となり、いかなる入力周波数に対しても入力と出力とを一致させることが可能であると考えられる。このように、系の伝達関数の逆数を用いて制御系の遅れの補償を行う方法はフィードフォワード制御の基本的な一手法と言えるが、用語が確定していないので、ここではこの方法を逆伝達関数補償法と呼ぶことにする。

この逆伝達関数補償法を適用する場合、系の伝達関数の同定を行い、その逆伝達関数の要素を実現する必要があるが、一般にサーボ系では遅れ要素を含むことが多く、その逆伝達関数は進み要素を含み、実時間で実現するには微分演算を行わねばならない。そのため、安定な系の実現が困難であり、逆伝達関数補償法は一般にはほとんど用いられていない。しかし、本論文の非円形輪郭切削問題においては、バイトの位置決めサーボ系への回転角に対する目標入力 $\tilde{r}(\theta)$ が、目標形状が決まれば既知となることに着目し、その位置決めサーボ系において実時間の微分演算を行うことなく逆伝達関数補償法の考えを適用することができることを見出した。以下に、実際の適用方法について述べる。

図3に示した電気油圧サーボ系 $T(s)$ の周波数特性の測定結果より、 $T(s)$ を2次系の伝達関数 $\hat{T}(s)$ で近似すると、 $\hat{T}(s)$ は

$$\hat{T}(s) = \frac{K}{\tau s^2 + s + K}; K=273, \tau=0.00265 \quad (1)$$

と表せる。補償に用いる逆伝達関数には式(1)の $\hat{T}(s)$ の逆数 $1/\hat{T}(s)$ を用いる。このとき、サーボ系 $T(s)$ への入力 $U(s)$ は、

$$U(s) = R(s) / \hat{T}(s) \quad (2)$$

と表せる。式(2)に式(1)を代入し、時間の関数 $u(t)$ 、 $r(t)$ で表すとすると、

$$u(t) = r(t) + \frac{1}{K} \cdot \frac{dr(t)}{dt} + \frac{\tau}{K} \cdot \frac{d^2r(t)}{dt^2} \quad (3)$$

となる。ここで、主軸の回転角速度 ω_0 の変動が小さく一定であると仮定すると、主軸の回転角 θ と時間 t との間には、

$$\theta = \omega_0 t \quad (4)$$

なる関係が成り立つ。このとき、回転角 θ に対する目標入力を $\tilde{r}(\theta)$ とし、 $\tilde{r}(\theta) = r(t)$ であるとして式(3)は、

$$\tilde{u}(\theta) = \tilde{r}(\theta) + \frac{\omega_0}{K} \cdot \frac{d\tilde{r}(\theta)}{d\theta} + \frac{\tau\omega_0^2}{K} \cdot \frac{d^2\tilde{r}(\theta)}{d\theta^2} \quad (5)$$

Fig. 4 Schematic diagram of the servo-system with the inverse transfer function compensation

と回転角 θ における関係式で表される。式(5)右辺の第2項、第3項がサーボ系の遅れに対する補正項となる。 θ に関して $\tilde{r}(\theta)$ 、 $d\tilde{r}(\theta)/d\theta$ 、 $d^2\tilde{r}(\theta)/d\theta^2$ の値は既知であるから、主軸の回転角速度を知ることにより $\tilde{u}(\theta)$ を微分演算を直接行うことなく求めることができる。本実験装置においては、 $\tilde{u}(\theta)$ のデータを計算機内で式(5)に基づいて算出し求める。すなわち、主軸の回転角は1000パルス/回転のエンコーダにより検出しているため、計算機内で算出する $\tilde{u}(\theta)$ のデータ $\tilde{u}(\theta_i)$ ($i=0, 1, 2, \dots, 999$) は、

$$\tilde{u}(\theta_i) = \tilde{r}(\theta_i) + \frac{\omega_0}{K} \cdot \frac{d\tilde{r}(\theta)}{d\theta} \Big|_{\theta=\theta_i} + \frac{\tau\omega_0^2}{K} \cdot \frac{d^2\tilde{r}(\theta)}{d\theta^2} \Big|_{\theta=\theta_i} \quad (6)$$

で表される。図4に逆伝達関数補償法を適用した場合の装置の概要を示す。 $\tilde{r}(\theta)$ 、 $d\tilde{r}(\theta)/d\theta$ 、 $d^2\tilde{r}(\theta)/d\theta^2$ が既知であることから、計算機内にあらかじめ $\tilde{r}(\theta_i)$ 、 $1/K \cdot d\tilde{r}(\theta)/d\theta|_{\theta=\theta_i}$ 、 $\tau/K \cdot d^2\tilde{r}(\theta)/d\theta^2|_{\theta=\theta_i}$ のデータを角変位 θ_i に対して格納しておきエンコーダからの信号に応じて式(6)を実行、 $\tilde{u}(\theta_i)$ を算出し、

位置決めサーボ系へ出力する。これにより、微分演算を行うことなく加減乗算のみで逆伝達関数補償法を適用することができる。なお、式(6)を実行する際の主軸の角速度 ω_0 の値は、エンコーダからの信号を F/V 変換器、及び A/D 変換器を介して計算機内に取り込む。従って、本制御方法では、1つの形状に対して、先のデータを格納しておきさえすれば、いかなる回転角速度 ω_0 に対しても、式(6)に表されるように、それに対応し得る補償入力を得ることができる。

4. 逆伝達関数補償法の有効性

以上のように構成した制御系において、逆伝達関数補償法の有効性を確認する実験を行った。

4.1 予備実験

予備実験として、主軸に円板を取り付け、油圧シリンダの先端に取り付けたペンで回転する円板に非円形の線図を描くことを行った。

目標形状 $f(\theta)$ は、 $f(\theta) = 38 - 5 \sin 3\theta$ (mm) とした。そして、位置決めサーボ系への目標入力 $\tilde{r}(\theta)$ は、主軸中心とペン先の零点との距離を 38 mm に保つことにより、 $\tilde{r}(\theta) = 5 \sin 3\theta$ (mm) とした。また、主軸の回転角速度 ω_0 は、(a) $\omega_0 = 2\pi$ rad/s (=60 rpm)、(b) $\omega_0 = 4\pi$ rad/s (=120 rpm)、(c) $\omega_0 = 6\pi$ rad/s (=180 rpm)、(d) $\omega_0 = 8\pi$ rad/s (=240 rpm) とした。

図5に円板に描かれた線図を示す。①は目標形状を表し、②は各回転角速度において逆伝達関数補償法を適用しないで描いた線図、③は各回転角速度において逆伝達関数補償法を適用した場合に描いた線図を表す。図5からも明らかなように、 $\omega_0 = 4\pi, 6\pi, 8\pi$ rad/s のとき、逆伝達関数補償法を適用しない場合には位相の遅れによる目標形状とのずれが見られるが、適用した場合には線図が良く一致していることがわかり、逆伝達関数補償法が有効であると言える。

4.2 無負荷時における逆伝達関数補償法の効果

予備実験により逆伝達関数補償法の有効性が示せたので、本実験では、油圧シリンダにバイト台を取り付け、切削負荷の無い状態でのバイトの位置決め誤差を求め、バイトの位置決め制御に対する逆伝達関数補償法の有効性について検討を行った。

位置決め誤差は、サーボ系の出力信号を差動トランスからエンコーダの信号に応じて計算機内に取り込み、目標入力データとの差を算出することにより求める。本実験では、目標入力 $\tilde{r}(\theta) = 1.5 \sin 3\theta$ (mm) とし、目標形状は、 $f(\theta) = 30 - 1.5 \sin 3\theta$ (mm) とした。

主軸の回転角速度 $\omega_0 = 6\pi$ rad/s、及び 7.7π rad/s

Fig. 5 Effect of the inverse transfer function compensation in the preparatory experiment

(=230 rpm)における、逆伝達関数補償法を適用した場合と、適用しなかった場合とでのバイトの位置決め誤差の測定結果を図6に示す。図6より、どちらの回転角速度においても逆伝達関数補償法を適用した場合の方が、誤差が低減されていることがわかり、逆伝達関数補償法の有効性が確認された。

しかし、どちらの場合も、補償を行った場合においておよそ ± 0.1 mm の誤差が生じていることが図6よりわかる。切削抵抗等の外乱の影響が考えられない無負荷時において逆伝達関数補償法を適用した場合、理論的な線形モデルでは、いかなる周波数においても出力と目標入力とは一致するはずであるが、実際には、補償に用いた伝達関数 $\hat{T}(s)$ の電気油圧サーボ系の伝達関数 $T(s)$ に対する同定誤差、及び油温等の変化に伴うパラメータの経時変化による系の特性変動などによって、特に高周波域における系全体の伝達関数を1にできないため、図6に示されたように補償後も幾らかの出力誤差が存在してしまうと考えられる。

Fig. 6 Effect of the inverse transfer function compensation in cutting tool positioning control without cutting

4.3 切削時における逆伝達関数補償法の効果

無負荷時におけるバイトの位置決め制御において、逆伝達関数補償法の有効性が得られたので、本実験では、実際に非円形形状の製品を加工した場合の形状誤差を測定することにより、切削時における逆伝達関数補償法の有効性について検討を行った。

被削材としては、アルミニウム合金 A3B2(17S) の $\phi 70 \times 150$ の棒材を用いた。目標形状は $f(\theta) = 30 - 1.5 \sin 3\theta$ (mm), 目標入力 $\tilde{f}(\theta) = 1.5 \sin 3\theta$ (mm) とし、送り $s = 0.1$ mm/rev とした。

また、切削加工した製品の形状誤差の測定は以下のようにして行った。加工後、まず、旋盤のバイト台にリニアゲージセンサをバイトの先端と同じ位置に来るように取り付け、そして、あらかじめ切削しておいた直径 60 mm の円形状を基準円として零設定した後、主軸を回転させながら非円形形状の寸法を測定する。このとき得た形状寸法の測定値を計算機内に取り込み、あらかじめ格納してあった目標入力データとの差をとり形状誤差を求めた。なお、測定時の主軸の回転数は 12 rpm (回転精度 $\pm 1\%$)、リニアゲージセンサから計算機へのデータの取込みはエンコーダの信号により

行った。

逆伝達関数補償法を適用したときの、各切削条件下における製品形状の加工誤差の測定結果を図 7 に示す。本実験では、切削抵抗等の切削条件が及ぼす影響より無負荷時における位置決め誤差の影響が大きすぎたのか、どの切削条件においても、形状誤差はおおよそ ± 0.1 mm と無負荷時での位置決め誤差とほぼ同じ結果が得られた。

5. 製品の加工例

本論文で示した実験装置は、先にも述べたように、バイトの位置決めと主軸方向の送りとが同期して動作する機構になっているため、非円形の輪郭形状を主軸方向に関して変化させることによって、いわゆる軸ものの 3 次元形状曲面を加工することが可能となる。しかし、切削が可能な任意の 3 次元形状を現段階の本実験装置によって加工するには、形状データ格納のためのメモリーが不足している。そこで、3 次元形状曲面加工の初歩的段階として、断面形状が主軸方向に関して規則性をもって変化するいくつかの場合について加工を

Fig. 7 Profile error of a non-circular profile article machined by the use of the machining system with the inverse transfer function compensation

Fig. 8 Various examples machined by the use of the developed non-circular machining system

行った。図8に加工例を示す。

本装置では、図8に示すように、主軸1回転分の位置決めサーボ系への入力データをそのまま用いて加工した、最も基本的な形状(図8(a))のほかに、ねじれを加えた形状(図8(b))、あるいは、テーパ等断面形状の基準円の径が主軸方向に変化する形状(図8(c))が加工できる。また、後者2つを組み合わせた形状(図8(d))も加工し得る。ねじれを付した形状は、主軸1回転分の位置決めサーボ系への入力データのアドレスを主軸が1回転、あるいは数回転する度にシフトしながら位置決めサーボ系へ出力することにより加工できる。また、テーパ等を付した形状は、主軸1回転分の入力データに一定値を加算するとバイトの変位の零点

が変化することを利用し、この加算値を主軸の送り方向に連続的に変化させることにより加工できる。

6. おわりに

非円形輪郭形状の切削の高能率化を図るため、数値制御による電気油圧サーボ機構を用いたバイトの位置決め制御系を開発し、さらに、この制御系に逆伝達関数補償法を適用し遅れを補償することにより、未補償のときには ± 0.5 mmあった位置決め誤差を ± 0.1 mmに大幅に低減させることが可能となり、また、加工した製品に対してもおよそ ± 0.1 mmの形状精度が得られた。

本実験装置においては、逆伝達関数補償法は実際に要素を構成しなくても計算機内での簡単なデータ計算を行うだけで実現できる。そのため、補償後の系全体の安定性を問題にする必要もなく、また、さらには実験結果に示されたように補償効果も大きいことから、非常に有用性のある補償法であると言えることができる。しかし、実験から得られた ± 0.1 mmという精度は、バイトの位置決め精度や加工精度として決して十分な値であるとは言えず、加工の高精度化を図るためには、さらに高精度な位置決めが行えるように改良を施す必要がある。現在、伝達関数の同定誤差が位置決め誤差に与える影響を調べ、高精度化を達成できるよう研究中である。

最後に、実験に際し多大な御尽力をして頂いた、職業訓練大学校・水野毅氏、及び豊田自動織機製作所・河村忠一氏、日立エンジニアリング・三本勝氏、日立製作所・星武彦氏、そして、装置の製作に協力して頂いた浦和製作所の皆様に謝意を表します。

なお、本研究は昭和59,60年度科学研究費補助金(一般研究(C)、課題番号59550083)の助成を受けて行われたことを付記します。

参考文献

- 1) 鴻田 隆, 藤本千敏: 旋削による三次元加工, マシニスト, 20, 6 (1976) 16.
- 2) 小笠原祐蔵: カムならい機構を持つ超精密加工機によるVTRシリンダの切削加工, 応用機械工学, 308 (1985.10) 114.
- 3) 大八木光治: 非円形ワークの旋削機構, 機械の研究, 21, 12 (1969) 1624.
- 4) 浦田暎三: 油圧ならい装置に関する研究(第2報)——旋盤による非円形断面の切削, 日本機械学会論文集(B編), 46, 409 (1980) 1713.