

非円形輪郭切削NC旋盤の開発

Development of Non-circular Machining NC Lathe

樋口 俊郎*

Toshiro HIGUCHI

近年、断面が円形で無い形状の製品の加工をNC旋盤で行いたいという要求が高まっている。この非円形輪郭切削を必要とする例として、カムシャフト、ロータリーコンプレッサ、ピストン等がある。従来、これらの部品の非円形輪郭の加工は、フライス盤や旋盤によって行われていた。加工の高速化高精度化の要求と製品の多様化に対処するために、非円形輪郭切削を行えるNC(数値制御)旋盤の開発が強く要望されており、いくつかの方式による非円形輪郭切削用NC旋盤が開発されてきている。本解説では、非円形輪郭切削の概要を説明し、NC化に不可欠なバイト(工具)の高速高精度位置決め機構とその制御方法を紹介する。

1. はじめに

旋盤は代表的な工作機械であり、通常は断面輪郭形状が円形となる製品の加工に用いられる。一方、断面輪郭形状が円形でない軸物の製品が存在しており、これらを加工することを目的として、非円形輪郭加工用旋盤が特殊な旋盤として用いられている。旋盤で加工されている全製品に対する割合としては、この非円形断面を有するものは極めて微々たるものであるが、重要な部品が多い。現在、何らかの形の非円形輪郭切削用旋盤で加工されている部品および、旋盤による加工が期待されているものとして次のような製品および部品がある。

自動車用エンジンのカムシャフトとピストン、ロータリーエンジン、ペーンタイプのロータリーコンプレッサや油圧ポンプ、スクリューポンプ、ピッチが変化するスクリュー、偏心軸、プラスチック容器やガラスの瓶の金型、カム、ハーモニックドライブ機構、圧延・形成用ロール、スプライン、軸継手、クラッチ、特殊歯車、ビデオレコーダの磁気ヘッドシリンダー、家具等の木工装飾品等である。

断面形状が真円になることを理想として発達してきた旋削加工において非円形輪郭加工は特異な存在であるが、次のような理由から今後、その重要性が増すものと考えられる。ロータリーエンジンのように非円形状が機能上、不可欠である場合に加えて、良い性能を得るためには非円形状が適しているにもかかわらず、加工が困難であったために円形で妥協してしまっている場合が相当あると思われるからである。また、CADの発展によって機械設計者が定規とコンパスの世界から解放され、直線と円に

限定されない自由な曲線と曲面を容易に取り扱えるようになっており、これに伴い、自由曲面を有する軸物の製品の能率の良い加工法が求められている。

著者の研究室では、1982年頃より、旋削加工が可能な範囲の任意の3次元形状の加工を高精度、高能率を行うことを目的とするNC旋盤の開発を行ってきた。

本解説では、非円形輪郭切削に関する技術の紹介を行う。旋盤による非円形輪郭切削で最も重要な課題は、主軸に同期したバイトの高速高精度位置決め機構の開発である。したがって、この位置決め機構とその制御法についての説明に重点を置きたい。

2. 従来の非円形輪郭切削加工機

研削加工を含む非円形輪郭形状の旋削加工を行う工作機械はポリゴン旋盤、ポリゴン研削盤と呼ばれていた。旋削加工に用いられているバイトを工具として用いて非円形輪郭の旋削を行うためには、なんらかの方法によ

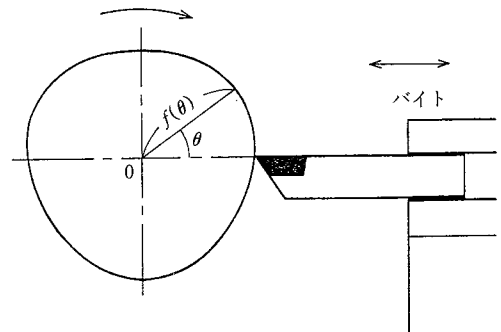


図1 非円形輪郭形状切削

*東京大学生産技術研究所 第2部

て図1に示すように、旋盤の主軸の回転に正確に同期してバイトを往復運動させる位置決め機構が不可欠である。このバイトの位置決め的手法として、次のものが考えられている。

- (a)カム等の機械的機構(メカニズム)を用いて主軸の回転に同期した軌道運動を得る方法
- (b)油圧等によるサーボ機構による倣い装置や、純粋なメカニズムによる倣い装置を用いて、主軸と同一軸に取り付けたモデルあるいは主軸と同期して回転するモデルに倣って動く触針の動きにバイトを追従させる方法
- (c)数値制御によって主軸の回転角の検出信号に基づき、これに同期したバイトの位置決め制御を行う方法

図2に示す旋盤は、 $r(\theta) = r_0 + K(1 - \cos n\theta)$ で表せるサインカム曲線を旋削することができるものであり¹⁾(a)の例である。スプライン軸が歯車列(n が決まる)を介して主軸と同期して回転しており、偏心量 K が調整できる軸がスプライン穴を介して回転し、工具台を付けたテーブルが左右に動かされる機構である。このような方法では、加工が可能な形状が機構学で実現可能な軌跡に限定される。

(b)の例として油圧倣い機構を用いる方法の例を図3に示す。浦田²⁾はこの油圧倣い機構についての研究を行っており、サーボ系の遅れを補償することを目的とした倣いモデルの形状の変換法を開発している。一般に倣い機構を用いる方法は、倣いモデルを製作する必要があり、多種少量生産には適しておらず、また主軸の回転数が大きくなると触針(スタイラス)が跳ねてモデルから離れてしまうという問題がある。軸方向に形状が変化しない場合にはテンプレートをモデルとして用いることができるが、軸方向に形状が変化する製品を加工するためにはモデル自体の製作に3次元の非円形輪郭旋削加工が必要となる。

最も早期に開発された(c)の例として、CNC装置付特殊ロール旋盤³⁾の主要部の略図と加工対象のロールの形

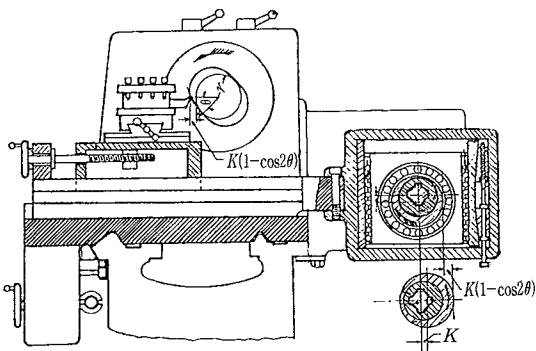


図2 サインカム曲線加工用旋盤(大木)¹⁾

状を図4に示す。これはピガール圧延ロールの加工用に開発されたものであり、X、Z、Bの3軸の制御がNCで行われている。以前の油圧倣い機構による場合に比べて3倍以上の主軸回転数での加工が可能になったことが報告されているが、開発された装置での回転数は5 rpm程度であり、一般の旋削加工に比べて主軸回転数はかなり小さいといえる。

3. バイトの位置決め機構

非円形輪郭切削においては、主軸の回転角に正確に同

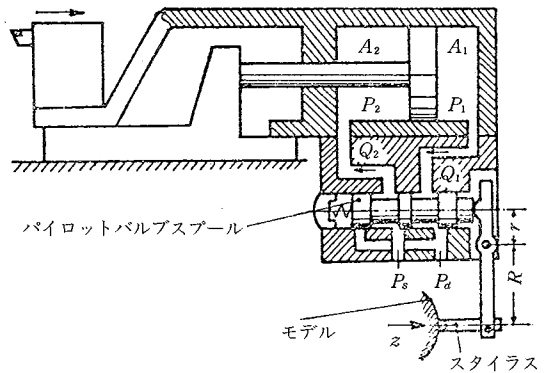


図3 油圧倣い機構(浦田)²⁾

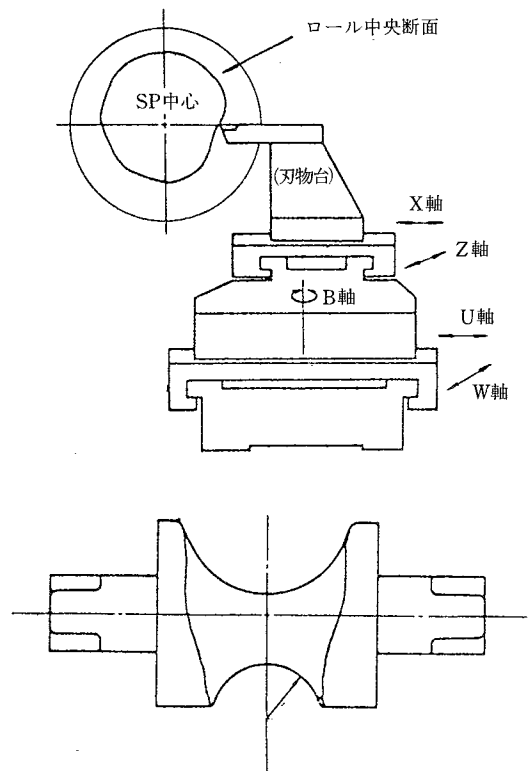


図4 CNC特殊ロール加工用旋盤と製品例(鴻田)⁴⁾

期したバイトの位置決め機構が不可欠である。旋削加工の能率を高めるためと良好な切削加工面を得るためには主軸の回転数を大きくする必要があり、これに伴い、バイトの位置決め機構には高速応答性と位置決め精度が要求される。さらに、このバイトの位置決め機構には、切削抵抗に対抗できる剛性を有することが求められる。バイトの位置決め機構として、次のようなアクチュエータと機構を用いることが考えられる。

- (a) 通常のNC旋盤で広く利用しているサーボモータとボールねじで構成される送り機構
- (b) リニアモータによる位置決め機構
- (c) サーボ弁と油圧シリンダで構成される電気油圧サーボ機構
- (d) 圧電素子を利用した位置決め機構
- (e) 電磁石の吸引力を制御する方法による位置決め機構

著者らは、先に述べたように(c)の電気油圧サーボ機構を選択して、非円形輪郭切削装置の開発を始めたが⁵⁾、その理由として、市販品の要素を用いて構成する場合に、他の方法で、当時、電気油圧サーボ機械に匹敵するパワーと応答性を得られるものを容易に見いだせなかったからである。

しかし、上記の機構にはおのおの、長所と短所があり、加工対象の製品の形状と寸法、材質、要求される加工精度等によってアクチュエータとその位置決め機構を選定すべきである。

(a)の機構では、通常のNC旋盤とそのコントローラを活用出来る利点があるが、一般のNC旋盤の工具台の位置決め機構をそのままの形で用いた場合、高速応答性を期待できない。したがって、通常よりも大パワーと高速応答のサーボモータを用いる必要がある。また、ボールねじは高頻度繰り返し負荷に十分耐えるものを使用しなければならない。

(b)の機構では、切削抵抗に打ち勝つ力を得るリニアモータの開発が課題となる。軽負荷の加工機として、たとえばボイスコイル形直流リニアモータが適していると考えられる。

(d)の圧電素子を利用した機構として、超精密の真円の旋削加工を行う目的で研究開発が近年活発に行われているものが利用できる。圧電素子は応答性に優れており、微小変位の高精度位置決めが可能である。したがって、最大径と最小径との差が数十 μm 以内の非円形輪郭切削が必要な場合には、最適の機構といえる。

(e)は振幅が0.1mm~1mm程度を必要とする加工機を目的として著者らが提案し、開発しているものである⁶⁾。

エンジンのピストンの外周形状は真円柱ではなく、長軸と短軸との差が0.2mm程度の楕円に近い断面をしており、しかも中心軸方向に沿って形状が微妙に変化する

ように加工しなければならない。これは、ピストンが実際にエンジン内で使用される時、その上側と下側では大きな温度差があり、これによる熱変形を考慮した形状寸法での加工が必要となるからである。このピストンの加工を主目的としたNC旋盤として、(c)、(b)、(a)の機構によるものが、おのおの開発され市販され始めており、さらに(e)、(d)の機構もこのピストンの加工機への利用を目標として研究と検討がなされている。

4. 非円形輪郭切削NC旋盤の基本構成

著者らが開発した非円形輪郭切削旋盤の試作機を例として、バイトの位置決めのための制御系の基本構成を説明する。

実験装置の構成の概略図を図5に示し、主要部の写真を図6に示す。バイト台はサーボ弁を直結した油圧シリン

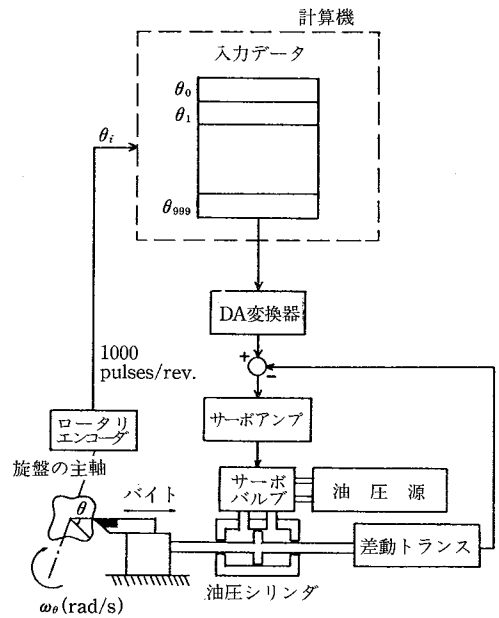


図5 試作した非円形輪郭切削の装置の構成

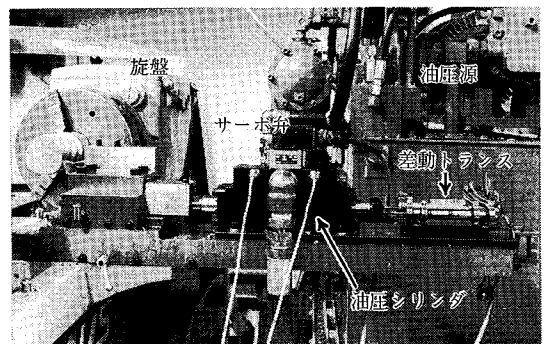


図6 非円形輪郭切削の実験装置

ンダで駆動され、差動トランスで位置を検出し、電気油圧サーボ系を構成している(サーボ弁:東京精密測器213 F-24L-100, 油圧シリンダ有効面積:3.46cm², 油圧源:100kgf/cm²), 旋盤の主軸にエンコーダ(1000パルス/回転)を取り付け、主軸の回転角の検出を行っている。

目標とする断面輪郭形状は極座標で $r=f(\theta)$ と与えられる。主軸の回転角に対するバイトの位置決め系への指令値を求め、計算機内のメモリーに格納しておき、エンコーダの信号に応じて、回転角に対する指令値をD/A変換器を介して、サーボ系へ順次出力していく。こうすることにより、主軸の回転に同期したバイトの位置決めを行い、非円形輪郭の切削が行える。

サーボ系への指令値は、計算機の演算速度が十分早ければ、メモリーを用いずに $f(\theta)$ を直接 θ に対して順次計算しても良い。主軸に付けたエンコーダの分解能は、要求される加工精度と形状の複雑さ、主軸回転数等によって選定する必要がある。

上記の方法のほかに非円形輪郭を形成する方法として、旋盤の主軸の回転角 θ をバイトの位置と同時に制御する方法も考えることができる。しかし、旋削加工では、主軸の回転速度が大きいために望まれることから、先に述べた θ の検出信号を基準としてバイトの位置決め制御を行う方法を用いるのが普通である。

この例のようにバイトの位置決め制御系の基本構成は単純なものであるが、実際には電気油圧サーボ系を含む位置決めサーボ系の入出力間には遅れが必ず存在し、主軸の回転角に対してサーボ系へ指令値を単に入力するだけでは正確な形状を得ることはできない。主軸の回転角速度が大きいために、また輪郭の形状が複雑になるほど、バイトの位置決めサーボ系への入力の周波数が高くなり、サーボ系の遅れの問題が顕著になる。旋削加工では、生産性を高めるためと、良好な加工面を得るために主軸の回転数を大きくすることが求められることから、このサーボ系の遅れの問題を解決することが、非円形輪郭切削で最も重要な課題となる。

5. 逆伝達関数補償法によるサーボ系の改善⁷⁾

電気油圧サーボ機構の入出力間の伝達関数 $T(s)$ の周波数特性は図7の測定例が示すように入力の周波数が高くなるに従って振幅の減少と位相の遅れを伴うことがわかる。3章で述べたどのアクチュエータを用いた場合においても、遅れが顕著となる周波数は異なるが、図7と同様の周波数特性を示すといえる。

入力を $R(s)$ 、出力を $Y(s)$ で表すと $Y(s)=T(s) \cdot R(s)$ である。実現したい理想的な制御系は、いかなる周波数に対しても $Y(s)=R(s)$ となることである。そこで、図8に示すように位置決めサーボ系の伝達関数の逆の特性を有する要素 $T^{-1}(s)$ をサーボ系の前に直列に加えることができれば、 $Y(s)=T^{-1}(s) \cdot T(s) \cdot R(s)=R(s)$ とす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いえるが、その用語が確定していないので、著者らはこの方法を逆伝達関数補償法と呼んでいる。

一般に位置決めサーボ系では遅れ要素を含んでおり、その逆伝達関数は進み要素を含むことになり、これを実時間で実現する場合には微分演算を伴い、実現が困難である。ところが、非円形輪郭切削においては、創成すべき輪郭形状の情報は既知であり、バイトの位置決めの目標値は $r(\theta)$ で与えられる。したがって $dr(\theta)/d\theta, d^2r(\theta)/d\theta^2$ 等の θ に関する微係数をあらかじめ求めておくことができる。このことに着目すると、実時間による微分演算を行うことなく、図8に示す逆伝達関数によるサーボ系の遅れの補償を実現することができる。試作装置での具体的例で、その説明を行う。図7に示した電気油圧サーボ系の測定結果より、 $T(s)$ を2次系の伝達関数 $\hat{T}(s)$ で近似すると、 $\hat{T}(s)$ は

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

と表せる。

サーボ系への補償後の入力 $U(s)$ は、

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

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

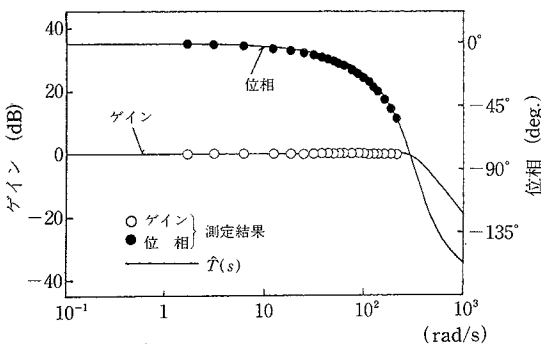


図7 電気油圧サーボ機構の周波数特性

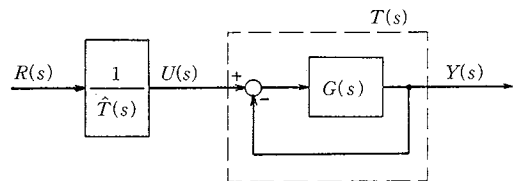


図8 逆伝達関数補償法

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

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 の間には、 $\theta = \omega_0 t$ の関係が成り立つ。このとき、回転角 θ に対する目標値を新たに $\tilde{r}(\theta)$ とし、 $\tilde{r}(\theta) = r(t)$ であるとすると、式(3)は、

$$\ddot{\alpha}(\theta) = \tilde{r}(\theta) + \frac{\omega_0}{K} \cdot \frac{d\tilde{r}(\theta)}{d\theta} + \frac{\tau\omega_0^2}{K} \cdot \frac{d^2\tilde{r}(\theta)}{d\theta^2} \quad (4)$$

と表せる。式(4)の右辺の第2項、第3項がサーボ系の遅れに対する補正項となっている。先に述べたように、 $\tilde{r}(\theta)$ 、 $d\tilde{r}(\theta)/d\theta$ 、 $d^2\tilde{r}(\theta)/d\theta^2$ の値は既知であるから、計算機内にデータとして格納しておき、エンコーダの信号に応じて $\ddot{\alpha}(\theta)$ を算出することによって、加減乗算のみによって逆伝達関数補償法を実現できる。主軸の角速度 ω_0 はエンコーダの出力の周波数から求めており、式(4)に基づき、主軸の角速度の設定が変化しても瞬時に対処できる構成となっている。

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円板上に非円形の線図

を描くことを行った。目標形状を $f(\theta) = 38 - 5\sin 3\theta$ (mm)とした。図9にその結果を示す。①は目標形状を表し、②は逆伝達関数補償を適用しない場合を、③は適用した場合の線図を表している。逆伝達関数補償が有効であることがわかる。

アルミニウム合金(17S)を用いて、 $f(\theta) = 30 - 1.5\sin 3\theta$ (mm)の形状を切削する実験では、逆伝達関数補償を用いた場合でも図10に示すように、目標形状から ± 0.1 mm程度の誤差を生じている。切削負荷の無い状態においてもパイトの位置決め誤差も同程度であった。これらの誤差の原因としては、補償に用いた伝達関数 $\hat{G}(s)$ の実際のサーボ系の伝達関数に対する同定の誤差、油温等の変化に伴うパラメータの変動などによるものと考えられる。

6. 繰り返し制御による位置決め精度の改善

逆伝達関数補償法を用いることによってパイトの位置決めサーボ系の遅れによる誤差を大幅に低減することができたが、逆伝達関数は近似を含んでおり、また加工力による影響に対しては効果が期待できない欠点がある。したがって、目標形状からの誤差を自動的に零に収束していくような制御系を構成することが必要となる。そこで、このような制御方法の1つとして繰り返し制御を適用する方法を開発した⁹⁾。

繰り返し制御は、周期的目標値によって単一動作を多数回繰り返す運転形態の制御対象の高精度制御に適した方法である。過去の偏差を1周期遅れにサーボ系への入力に加えていくことを繰り返すことによって、偏差を究極的に零にしようとする方法で、いくつかの形式が提案されている^{9),10)}。繰り返し制御は制御対象の同定を正確に行えない場合に対しても、周期的目標値によって同一動作を多数回繰り返す形態の運動の制御を高精度に行える利点がある。

非円形輪郭切削においては、断面形状が主軸方向に関して一様であるならば、位置決めサーボ系への入力の主軸の1回転を1周期とする周期関数となる。このことに注目して、非円形輪郭切削への繰り返し制御の適用を行ってみた。

繰り返し制御を説明するブロック線図を図11に示す。 $T(s)$ は位置決めサーボ系の閉ループ伝達関数である。 $Y_n(s)$ 、 $E_n(s)$ 、 $U_n(s)$ は、それぞれ繰り返し数 n 回目の時

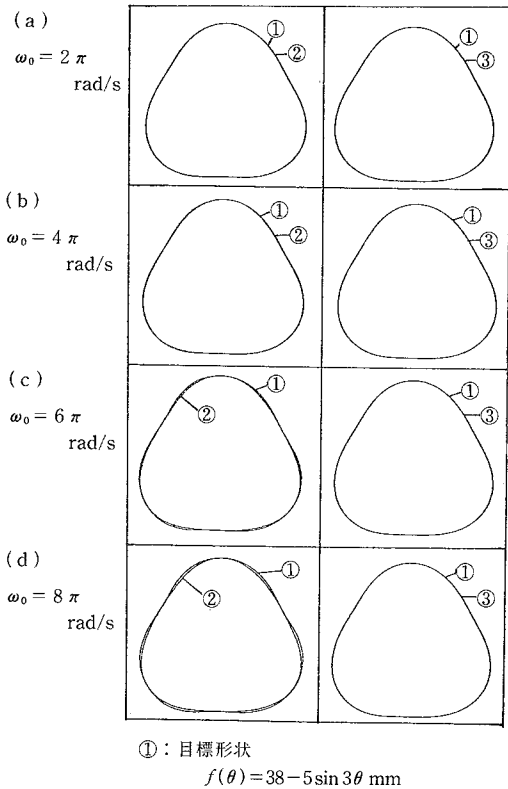


図9 逆伝達関数補償法の効果

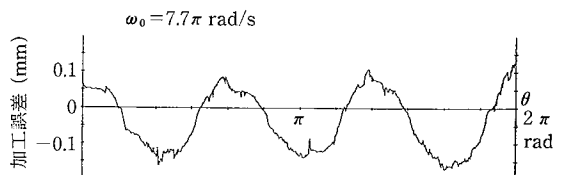


図10 逆伝達関数補償法を用いて加工した場合の誤差の例

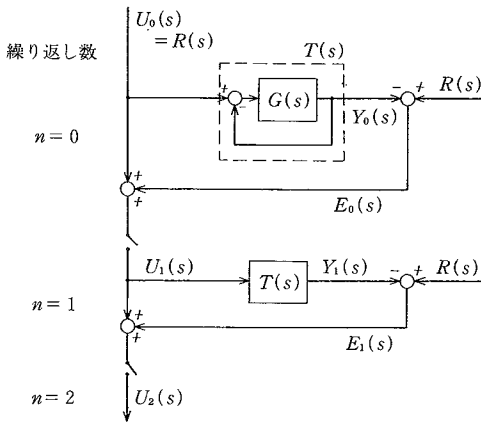


図11 繰り返し制御のブロック線図

の出力, 偏差, 入力を表し, $R(s)$ は目標入力を表す.

$$U_{n+1}(s) = U_n(s) + E_n(s), \quad U_0(s) = R(s) \quad (5)$$

$$Y_n(s) = T(s) \cdot U_n(s) \quad (6)$$

$$E_n(s) = R(s) - Y_n(s) \quad (7)$$

の関係がある.

n 回目の周期における偏差を $n+1$ 回目の周期の入力に加えることによって, 入力を修正し, 最終的には目標入力との誤差を零とする出力を得ようとするものである.

先に述べた電気油圧サーボ機構による非円輪郭切削装置を用いて, 切削を行わない時の繰り返し回数と誤差のrms (2乗平均の平方根) との関係調べた結果を図12に示す. 目標とする形状を $f(\theta) = 30 + 1.5\sin 3\theta$ (mm) とした. また, 図13に繰り返し数 $n=0, n=3, n=7$ における主軸の1回転に対するバイトの位置決め誤差の測定結果を示す. 繰り返し制御によって位置誤差のrmsは一時減少するものの, さらに繰り返しを続けると, 誤差が逆に増大してしまうことがわかる. また, 目標入力の周波数よりも高い周波数成分が増大することが図13からわかる.

先に示した(5)(6)(7)式により, 偏差 $E_n(s)$ を求めると

$$E_n(s) = R(s) (1 - T(s))^{n+1} \quad (8)$$

が得られる. これより, 偏差が零に収束するための条件として, サーボ系への入力 $U_n(s)$ に含まれるすべての角周波数 ω に対して次式を満たすことが導ける.

$$\|1 - T(j\omega)\| < 1 \quad (9)$$

図13に示した結果となったのは, サーボ系の非線形性や何らかの外乱によって(9)式を満たさない高次の周波数成分が発散したためであると考えられる.

この問題に対して, 先に述べた逆伝達関数補償法と組み合わせた繰り返し制御法を開発した. 図14にそのブロック線図による説明図を示す. この場合の繰り返し制御の収束条件は次式のようになる.

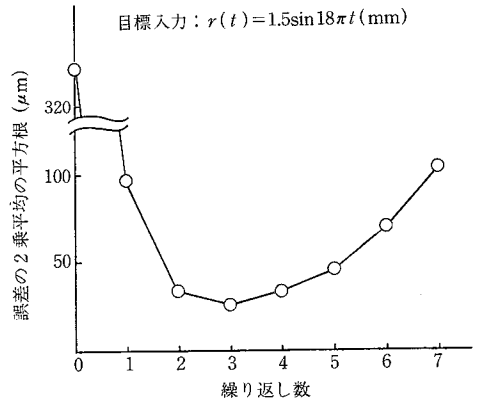
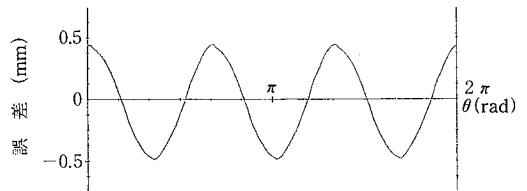
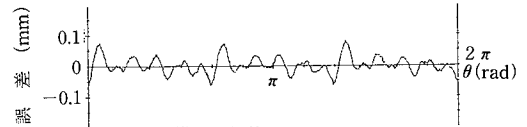


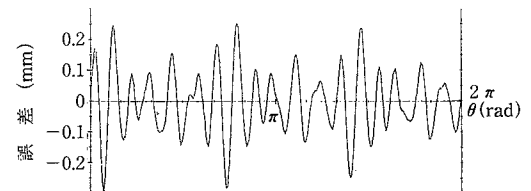
図12 繰り返し数と誤差のrmsの関係



繰り返し数: $n=0$



繰り返し数: $n=3$



繰り返し数: $n=7$

図13 バイトの位置決め誤差の様子

$$\|1 - T(j\omega) / \hat{T}(j\omega)\| < 1 \quad (10)$$

$T(s)$ のみの場合に比べて, 逆伝達関数 $1/\hat{T}(s)$ によってサーボ系 $T(s)$ の位相の遅れやゲインの変化を補償しており, $T(s)/\hat{T}(s)$ が1に近いことから, 収束域を高い周波数まで広げることができる.

実際に図15に示すように, 4回の繰り返しで(5回以降も図15と同様の結果が得られ発散しない) $\pm 10\mu\text{m}$ の精度で位置決めが出来ていることがわかる. 位置指令の最小ビットが $5\mu\text{m}$ に相当している. この実験例では, 約0.1秒の間に3mmの距離を単振動で往復運動させていることになる. このような比較的高速な位置決めでかなり高精度を得られていることがわかる.

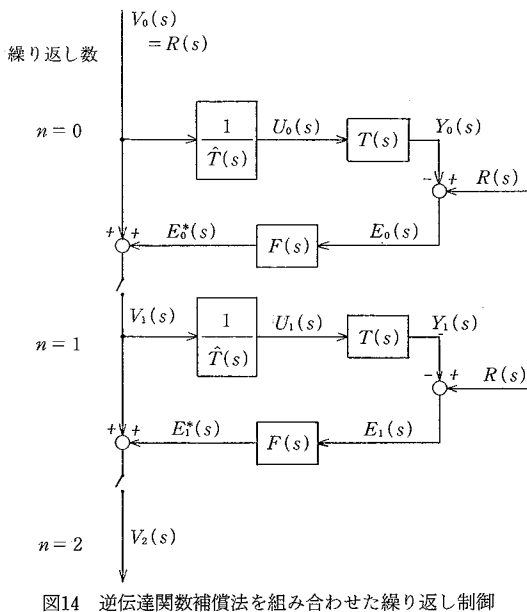


図14 逆伝達関数補償法を組み合わせた繰り返し制御

実際に切削加工を行った場合についても、同様の精度の結果を得ている。繰り返し制御の利点として、繰り返し制御の周期と同一の周期を有する外乱に対しては、これによる出力への影響を零に収束できる入力を得られることが知られている。切削力が主軸の回転と同期して作用すると考えられ、非円形輪郭の切削時の加工力の影響をも自動的に補償できることを明らかにしている。

7. おわりに

数値制御による電気油圧サーボ機構を用い、新しい制御法を工夫することによって、さまざまな形状の製品を高精度に加工できる非円形輪郭切削用NC旋盤の開発を行うことができた。この著者らの研究グループのほか、数社の企業で非円形輪郭切削を目的としたNC旋盤の開発が進められてきており、近い将来において、非円形輪郭用旋盤の性能の向上が期待でき、広く普及することが予想できる。

宮崎正吉氏の著書「絵話：工作機械の歴史」によって旋盤の発達の歴史を知ることができる。これには、16世紀から18世紀にかけて欧州では貴族文化の発展に伴い、複雑奇妙な形状が尊重された時代（バロック文化に代表される）があり、楕円やさまざまな形状の切削加工が人力の倣い旋盤（主として木工用）で行われており、特に装飾品を加工するために、ローズエンジンと称される精巧なメカニズムで構成された旋盤が開発されていたことが述べられている。旋盤の歴史をたどってみると、精度や加工能率は別として、非円形や3次元形状の加工が広

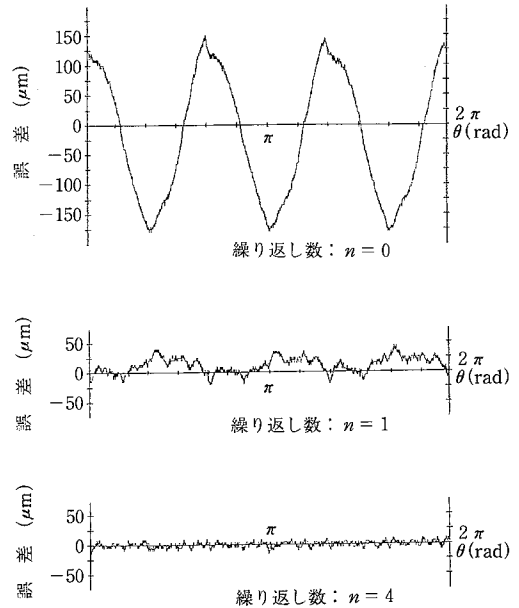


図15 逆伝達関数補償法を組み合わせた繰り返し制御の効果

く旋盤で行われていた時代があったことは注目に値すると思う。
(1988年8月31日受理)

参考文献

- 1) 大八木光治：非円形ワークの旋削機構，機械の研究21，12（1969），1624～1630
- 2) 浦田暎三：油圧ならい装置に関する研究（第1報，誤差を軽減する方法），機械学会論文集，40，337（1974），2609～2616
- 3) 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），機械学会論文集，46，409（1980），1713～1720
- 4) 鴻田 隆，藤本千敏：旋削による三次元加工，マシニスト（1976. 6），16～22
- 5) 樋口俊郎，水野 毅，菅井 博：油圧サーボ機構に関する研究，昭和58年春季精機学会講演論文集，875～876
- 6) 樋口俊郎，山口智実：電磁吸引力を用いた高速位置決め機構，昭和63年精密工学会春季大会講論集，（1988），917～918
- 7) 樋口俊郎，山口智実：非円形輪郭切削に関する研究，精密工学会誌，54，1，（1988）145～150
- 8) 樋口俊郎，山口智実：逆伝達関数補償法を組合せた繰返し制御を適用したバイトの位置決め制御，システムと制御，30，8，（1986），503～511
- 9) 井上 恵，岩井真一，中野道雄：プレイバックサーボ系の高精度制御，電気学会論文誌C，101，4（1981），9～16
- 10) 川村貞夫，宮崎文夫，有本 卓：学習制御方式のシステム論的考察，第26回自動制御連合講演会前刷，（1983），197～198