

電気油圧サーボ機構を利用した非円形輪郭切削に関する基礎研究

Primary Study on Application of Electro-hydraulic Servo Mechanism to Non-circular Cutting by a Lathe

樋口 俊郎*・水野 毅*・菅井 博*・尹 昌朝*

Toshiro HIGUCHI, Takeshi MIZUNO, Hiroshi SUGAI and Changjo YUN

1. ま え が き

円形でない輪郭形状あるいは偏心円を有する製品を、図1に示すように旋盤で加工して得るためには、旋盤の主軸の回転に正確に同期させて工具（バイト）を往復動させる必要がある。この工具刃先の位置決め機構には、切削抵抗に打ち勝つ力と高速応答性が要求される。現在、油圧食い機構を工具の位置決め機構に利用した形式のものが、このような加工の一部に用いられているが、¹⁾食いモデルを必要とするために製品の多様化に適しておらず、またサーボ系の入力が固定しているために制御技術による性能向上が期待できない。そこで、計算機制御による電気油圧サーボ機構を用いて、高精度、高能率の非円形輪郭切削加工を実現することを目的として研究を進めている。加工能率を向上させるためには、主軸の回転速度を高くする必要があり、この場合、工具の位置決め機構のサーボ系の遅れが問題になると予想される。本速報では、このサーボ系の遅れを補償する制御方法を示し、その有効性を基礎実験によって確認できた結果等について述べる。

2. 輪郭形成問題と基礎実験装置

要求される輪郭形状は図1に示すように閉曲線であり、この閉曲線は極座標 (r, θ) を用い、 $r=f(\theta)$ で与えられる。非円形輪郭切削の課題は旋盤の主軸の回転角 θ に対して、 $r=f(\theta)$ を満たすように切削工具刃先の位置

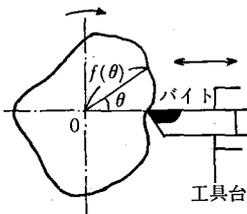


図1 旋盤による非円形輪郭切削

を制御することである。輪郭形成を行う方法として、主軸の回転角 θ と工具刃先の位置の両方を制御する方法と、主軸の回転角を検出し、これに同期させて工具刃先の位置のみを制御する方法とが考えられる。主軸を比較的高速で回転させることが必要である旋削加工においては、後者の方法の方が制御系の構成が容易になると思われるので、この方法を用いることとした。

実際の加工においては切削抵抗が工具刃先位置決めサーボ系への外力として働き、この影響を考慮した制御系を構成しなければならないが、ここでは第一段階として、切削負荷の無い場合の輪郭形成の問題を取り扱った。切削負荷の無い状態において目標とする輪郭を形成できることはその輪郭形状を旋削加工で得るための必要条件であるといえる。

そこで、油圧シリンダの先端に付けたペンで回転円板上に種々の形状を正確に描くことを目標とする実験を行った。図2に基礎実験装置の概要を示す。円板は可変速交流モータで回転させ、ロータリエンコーダ(1,000パルス/回転)によって回転角を検出し、ミニコンピュータに入力する。ミニコンピュータ内のメモリには回転角に対応する油圧サーボ系への位置指令データを格納しておき、ロータリエンコーダの信号に応じて順次出力し、D/A変換器を介してサーボ増幅器に入力される。位置決め電気油圧サーボ系のサーボ弁としては東京精密測器 3F-15L-20 を用い、シリンダの有効面積は 2cm^2 である。油圧源の供給圧力は 70kgf/cm^2 で実験を行った。

リニアポテンショメータによりシリンダの位置を検出し、これをフィードバック信号とした最も単純なサーボ系を構成した。このペンの位置決めサーボ系の周波数特性の測定結果を図3に示す。回転円板の角速度が大きい場合、また $f(\theta)$ が高次の調波成分を多く含む場合には、単に回転角 θ に対して $f(\theta)$ の値を油圧サーボ系の入力とするだけでは、振幅の減少と位相の遅れを伴い、目標とする形状が正確に描けなくなることが図3の周波数特性から予想できる。実際に図6に示す実験結果から明らかかなように、サーボ系の遅れが原因と考えられるずれを

* 東京大学生産技術研究所 第2部

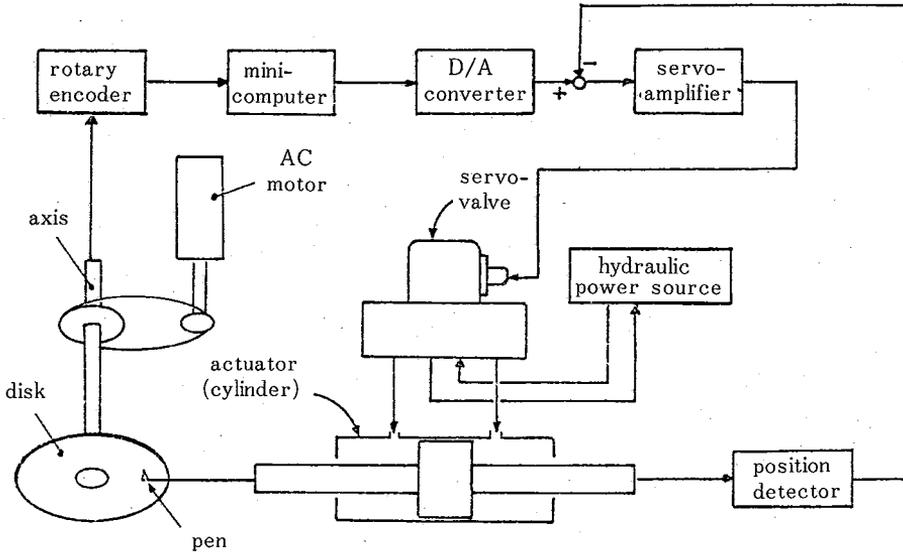


図2 基礎実験装置の概要

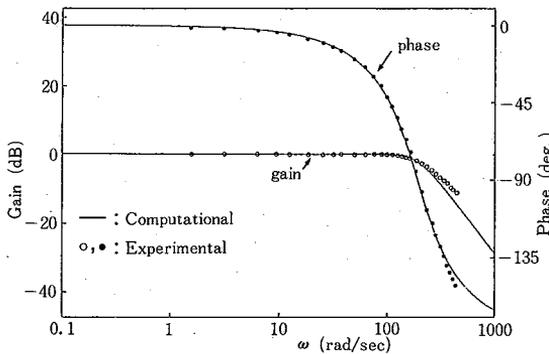


図3 位置決めサーボ系(閉ループ系)の伝達特性のボード線図

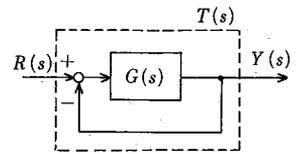


図4 油圧サーボ系のブロック線図

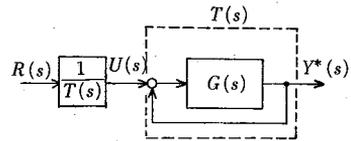


図5 補償後のブロック線図

生じる。このずれを補正する方法について次章に述べる。

3. 逆伝達関数補償による改善

位置決め油圧サーボ系は図4に示すブロック線図で表せる。この系の伝達関数を $T(s)$ とすると、入出力間の関係は $Y(s) = T(s) \cdot R(s)$ である。実現したいサーボ系は、理想的にはいかなる周波数においても $Y(s) = R(s)$ となることである。仮に、図5に示すように系の伝達関数の逆の伝達特性を有する要素を対象とする系の前に直列に加えることができれば、 $Y^*(s) = T(s) \cdot T^{-1}(s) \cdot R(s) = R(s)$ とすることが可能となる。しかし、一般には $T^{-1}(s)$ に微分演算が含まれることから、この要素を実現することは困難である。ところが、本報が対象とする輪郭形成の問題においては、目標値は θ に対して $f(\theta)$ で与えられており既知であり、また $df/d\theta, d^2f/d\theta^2, \dots$ 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とから、図5に示す逆伝達関数を用いる補償を実現できる。

基礎実験装置についての具体例で以下に説明を加える。実験装置の油圧サーボ系の一巡伝達関数 $G(s)$ は $G(s) = K/s(\tau s + 1)$ の1次おくれ積分要素で近似することができる(図4に、 $K=150, \tau=0.004$ としたときの $T(s)$ に関するゲインと位相の周波数特性の計算値を図中の実線で示す)。このとき、 $T(s) = K/(\tau s^2 + s + K)$ で近似できることから、 $T^{-1}(s) = (\tau s^2 + s + K)/K$ が得られる。このとき図5の補償後のブロック線図における油圧サーボ系 $T(s)$ の入力 $U(s)$ は、 $U(s) = T^{-1}(s) \cdot R(s)$ つまり、 $U(s) = (\tau s^2 + s + K)/K \cdot R(s)$ となる。 $U(s)$ と $R(s)$ の関係を時間領域 $u(t), r(t)$ で表すと、

$$u(t) = r(t) + 1/K \cdot dr(t)/dt + \tau/K \cdot d^2r(t)/dt^2$$

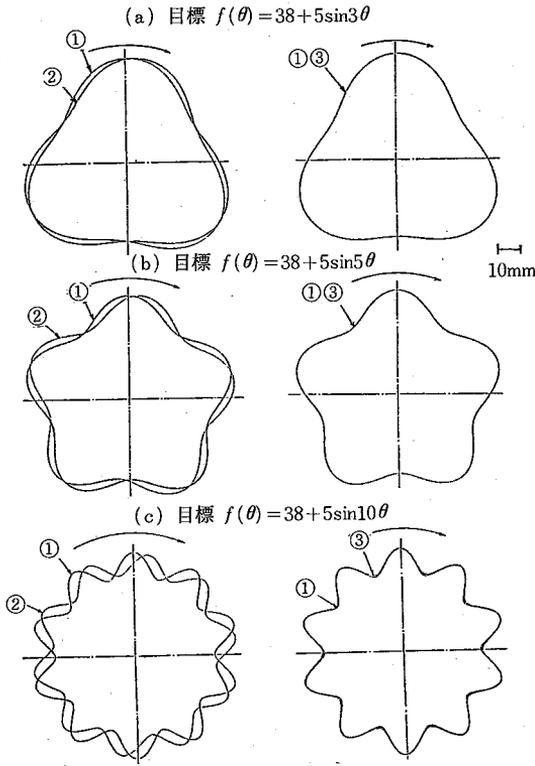


図6 線 図 例

- ① 円板回転速度 10 rpm で逆伝達関数補償無
- ② 円板回転速度 180 rpm で逆伝達関数補償無
- ③ 円板回転速度 180 rpm で逆伝達関数補償有

となる。

ここで、円板の回転の角速度の変動が小さいとし、 $\theta = \omega t$ とし、 $f(\theta) = r(t)$ とすると、円板の回転角 θ に関して、

$$u(\theta) = f(\theta) + \omega/K \cdot df(\theta)/d\theta + \tau\omega^2/K \cdot d^2f(\theta)/d\theta^2$$
 が $f(\theta)$ を補償した新しい油圧サーボ系の入力として得られる。 θ に対して $f(\theta), df(\theta)/d\theta, d^2f(\theta)/d\theta^2$ の値は既知であり、回転の角速度を検出することにより $U(\theta)$ を微分演算を直接行うことなく求めることができる。

4. 実験結果

図6に、逆伝達関数の補償を行った場合と行わなかった場合について、いくつかの形状について描いた線図の例を示す。油圧サーボ系の入力が零の時のペンの位置が円板の中心から 38 mm 離れるようにつまり半径が 38

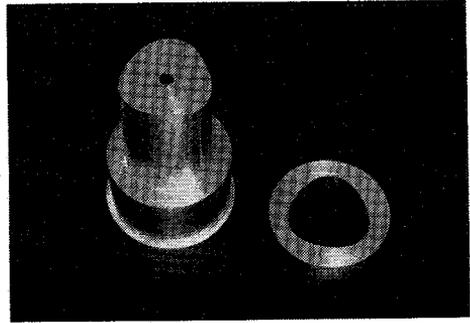


図7 旋盤による加工例

左は外周が、右は内周が図6の(a)と同様の形状に加工できている。材料：ジュラルミン、主軸回転速度：180 rpm

mm の真円を描くように設定している。図6の左側が入力の補正を行わなかった場合であり、円板の回転速度が 10 rpm と 180 rpm とではかなり線図がずれているのに対して、右側の入力の補正を行った場合には、よく一致していることが分かり、逆伝達関数補償法が有効であることがいえる。補償をした場合にみられる、若干のずれは、油圧サーボ系をさらに厳密に近似（たとえば3次系で近似）することによって減ずることができると考えられる。

5. あとがき

逆伝達関数補償法の考えを利用することによって、非円形の輪郭線を回転円板上に描く電気油圧サーボ機構の遅れを補正することができることを示した。この方法が厳密な意味で有効であるのは、電気油圧サーボ機構の伝達特性が正確に把握できる場合に限られる。したがって、非円形輪郭切削の場合には常に油圧サーボ系の特性を同定することが必要となると考えられる。

工具先刃の位置決め機構に本報で示した電気油圧サーボ機構と制御法を適用し、小型旋盤による実際の旋削加工を試みており、図7に示すような加工を実施することができている。現在、中型旋盤を用いた本格的な旋削加工の実験を開始している。

なお、本研究の一部は「昭和57年度選定研究」によって行ったものである。 (1983年11月24日受理)

参 考 文 献

- 1) 浦田：機械学会論文集 46-406, 1713~1720