2つのフライスによる非円形断面加工に関する研究*

中 尾 陽 —*1

Study on Noncircular Machining with Two Milling Cutters

Yohichi NAKAO*2

*2 Department of Mechanical Engineering, Kanagawa University,
3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 221-8686 Japan

A new machine tool has been developed to produce parts with non-circular cross sections, and especially parts with large radius changes in the workpiece cross sectional profile. Using the machine tool, a workpiece fixed with a spindle chuck is set between two milling cutters so that the workpiece can be machined using both milling cutters simultaneously from opposite sides of the workpiece. The machining time can be cut by half using two cutting tools on one workpiece. It is necessary to control each cutting tool position for cutting directions separately in order to apply the machining method to non-circular workpieces. The machine tool is powered by two linear motor systems. A feature of the linear motor system is that the two linear motors are mounted on a linear rail and can be controlled separately by a machine tool controller. Machining tests are conducted using the developed machine tool system to demonstrate the advantages of the method for non-circular workpieces.

Key Words: Milling, Machine Tool, Generating Motion, Noncircular Machining, Linear Motor

1. 結 言

エンジン用のピストン、カムなどは非円形断面を有し、このような非円形断面を持つ製品の切削および研削加工は、特に非円形加工、非円形切削あるいは非円形研削などと呼ばれている。非円形加工が通常の旋削や円筒研削加工と異なるのは、工作物主軸の回転角に同期させて切削あるいは研削工具の位置を高速かつ高精度に往復運動させる必要があることである^{(1)~(5)}。

非円形切削の場合、バイトによる加工が多く行われている^{(1)~(3), (5)}。これに対し、著者は、フライスで非円形断面を創成する研究を行ってきている^{(6)~(8)}。この一連の研究では、主軸に取り付けられた工作物をフライス工具の側面で切削する加工システムが試作され、この加工システムが、従来のバイトによる非円形切削では、創成が困難であった大きな半径変化を有する非円形形状の高効率加工に有効であることが確認されている。

このような非円形加工における加工時間の短縮のためには、主軸の高速化が有効であり、従来の研究では高

速化によって増大するサーボ系のトラッキング誤差を抑制するために、制御方法に関する検討が行われている。しかし、使用するアクチュエータの特性や利用できる動力の大きさといったハードウェアの制約から、高速運転によって発生するサーボ系のトラッキング誤差を制御手法によって補償することにも限界がある。従って、さらなる加工時間の短縮を図るためには、主軸の高速化に加えて、その他にも有効な対策を講じる必要がある。

そこで、本論文では、2つの切削工具を同時使用して工作物を挟み込んで非円形形状を創成する加工法を提案する。さらに、これに適した2つのリニアモータを用いた工作機械の構成を提案し、これに基づいて工作機械を試作した。本論文では、試作した工作機械の構成を述べるとともに、加工実験の結果を示し、提案した加工法の有用性を述べる。

2. 加工方法及び試作した工作機械の構成

図1に試作した工作機械の概略を示す。本研究で提案する加工法では、工作物はスピンドルに固定され回転運動が付与される。このとき、工作物の外周面がフライスで加工される。提案する加工法の特徴の一つは、図1上図に示すように、サドル上に設置された2つのフライスが送り(Z軸)方向の同一位置で1つの工作物を挟み

* 原稿受付 2002年1月17日。

*1 正員、神奈川大学工学部(〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋3-27-1)。

E-mail: nakao@cc.kanagawa-u.ac.jp

Fig. 1 Schematic of Developed Machine Tool

込むようにして、非円形断面の創成を行うことにある。

本研究の加工対象は、非円形断面を有する製品の加工であるため、2つのフライスで同時加工を行うためには、2つのフライスの X 方向位置、すなわち X_1 軸および X_2 軸を主軸回転角に同期させて、それぞれを独立に制御しなければならない。したがって、 X 軸のために2つのアクチュエータが必要になる。この目的のために、一般的な工作機械のテーブル駆動系のように、それぞれにサーボモータとボールねじを用いることも可能である。しかしながら、この場合、必要な機械要素が増えるだけでなく、大きな設置スペースが必要になり、工作機械を大型化させてしまう。そこで、本研究では、図1に示すように、独立に制御できる2つのリニアモータを1本のレールに設置する方式のアクチュエータを本加工法に適用した。

試作した加工システムのもう一つの特徴は、図2(a)に示すように、2台のリニアモータは、一本のレール上を動くため、一方が他方のリニアモータあるいはフライスに接触する位置まで、内側の可動範囲を広くとれることである。従って、工作物の回転中心を越えて、それぞれの工具を移動させることが容易に可能になる。このような長いストロークを利用して、図2(c)に示すように、提案する構成の加工システムを例えばクランクシャフトの研削加工等に適用することもできる。これに対して、一般的なサーボモータとボールねじを用いた方式では、工具の可動範囲はボールねじのストロークで決まるため、図2(b)に示すように長いストロークで工具を移動させることが難しい。

(a) Machining using Linear Motors

(b) Machining using Servo Motors and Ball Screws

(c) Machining of Crank Shaft

Fig. 2 Advantages of proposed linear motor system

本論文で提案する2つのリニアモータを用いた加工システムは、例えばボールエンドミル、スクエアエンドミル、円筒状あるいは円板状の砥石等、様々な切削あるいは研削工具を用いることにより、多様な形状創成に適用できる。本論文では、一つの適用例として、外丸フライスを用いて加工実験を行った。

外丸フライスの回転軸は、工具を回転させるためのモータ駆動系と工作物との干渉を回避するために、工作物の回転軸に対して45度傾斜させて設置させている。一連の実験に使用した外丸フライスは、外周部の円弧半径が5mm、直径40mmである。工作機械本体の構成を図1下図に示す。工作物の回転角は主軸サーボモータによって任意に制御でき、連続的な回転動作も、割出し動作も可能になっている。Z軸方向に移動するサドルは、サーボモータとボールねじで駆動され、この上にリニアモータや工具駆動系が設置されている。加工はこれらの4軸を制御して行われ、同時4軸、C軸に割出し動作を行わせる3軸加工が行える。なお、この工作機械はパーソナルコンピュータで制御される。

3. 制 御 系

高い加工精度を実現するためには、工作機械のサーボ系のトラッキング精度を良くすることが必要になる。特

(a) Static characteristic

(b) Step response

Fig. 3 Characteristics of linear motor

に、主軸を連続的に回転させながら非円形断面の加工を行う場合、主軸回転角に同期させて X_1 および X_2 軸を制御することになるため、主軸回転数の増加に伴って、 X_1 および X_2 軸のサーボ系のトラッキング誤差が増大しやすい。そこで、試作した工作機械の4軸のサーボ系には、適応フィードフォワードコントローラを用いている⁷⁾。

図3に使用したリニアモータの基本特性を示す。図3(a)に示す静特性より、このリニアモータの位置決め誤差は、 $1\mu\text{m}$ 以下であることがわかる。また、図3(b)はリニアモータのステップ応答の測定結果であり、サーボ系の時定数は約 20ms である。 X 軸以外のアクチュエータの特性は、文献(7)と同様である。

4. 工具経路の生成

工作物に対して斜めに配置した外丸フライスを用いて、非円形断面を創成するために、まず工作物と外丸フライスの幾何学的関係を明らかにし、これに基づいて工具経路を作成する。ただし、本論文では、工作物の回転軸の方向に工作物形状が変化しない場合だけを考える。

工具経路の生成においては、工作物と工具の相対的な関係を明らかにすればよい。そこで、実際の加工におい

Fig. 4 Relation between workpiece and cutting tool

ては、工作物が回転し、外丸フライスは X_1 , X_2 軸上をそれぞれ移動するだけであるが、ここでは工作物を静止させ、その周囲を外丸フライスが工作物に接しながら移動するものとする。また、実際の加工においては、2つの外丸フライスが工作物を挟み込むようにして加工を行うが、2つの切削工具の工作物に対する幾何学的関係は、互いに位相が 180 度ずれているだけである。そこで、まず工具が一つの場合だけを考えることにする。

図4は工作物と接する外丸フライスの幾何学的な関係を表している。本論文では、工作物の断面形状が変化しない場合だけを考えるので、工作物の Z 方向に任意の一断面だけを考える。また、以下に述べるように、工具経路の生成において考えるべき外丸フライスの形状は、工作物との接触点 P_w と外丸フライスの回転軸を含む図中 S_c で表された外丸フライスの断面だけでよい。

加工時の工作物の回転角を角度 ϕ で表せば、図4においては、工作物の回転中心である点 O 回りの外丸フライスの X 軸に対する回転角度として現される。また、点 O と点 P_w とを結ぶ線分と X 軸のなす角を θ とする。実際の加工時のように工作物が回転すると考えれば、このとき点 O と工具中心点 T_c を結ぶ線分は X 軸に一致する。非円形断面形状を加工する場合には、図に示すように、通常、工作物と外丸フライスの接触点 P_w は、点 O と点 T_c を結ぶ線分上ではなく、この線分と点 O と点 P_w とを結ぶ線分のなす角は、 $\theta - \phi$ で与えられる。

工具経路の生成においては、工作物の形状を表す点 P_w を切削するために必要な工具中心点 T_c の座標を表せばよい。具体的には、角度 ϕ と点 O から点 T_c までの距離 X_i の関係を求めればよい。ここで、点 P_w は工作物と外丸フライスとの接触点であり、点 P_w における工作物と外丸フライスの法線は一致するはずである。そこで、

この法線を含み、かつ X - Y 平面に垂直な断面を描くと工作物と外丸フライスの断面形状は、図4下図のように表せる。ここで、図に示されるように、点 P_w における法線は、外丸フライスの先端に設けられた円弧部の中心点 P_c を向いている。

従って、点 P_w 及び T_c 間の距離 l は次式で表される。

$$l = r_1 + r_2 \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 r_1, r_2 は外丸フライス各部の半径を示し、角度 α は工作物の主軸に対して斜めに設置された外丸フライスの傾斜角度を表す。

工作物の断面形状が動径 r_w と偏角 θ によって与えられるとき、断面形状は次式として与えられる。

$$x = r_w \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$y = r_w \sin \theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

点 P_w において法線が X 軸となす角度 β は、式(4)と式(5)より求められる。

$$\beta = \tan^{-1} \left(-\frac{1}{dy/dx} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dr_w}{d\theta} \sin \theta + r_w \cos \theta}{\frac{dr_w}{d\theta} \cos \theta - r_w \sin \theta} \quad \dots\dots\dots (5)$$

このとき、工具中心の X - Y 座標は、式(6)、(7)により求められる。

$$x_i = x + l \cos \beta \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$y_i = y + l \sin \beta \quad \dots\dots\dots (7)$$

結局、1つの外丸フライスの工作物回転中心 O と工具中心間距離 X_i と角度 ϕ は、式(8)、式(9)で与えられる。

$$X_{i1} = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{y_i}{x_i} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(8)、式(9)によって得られるデータを用いれば、 X_1 軸の工具経路を生成することができる。 X_1 軸と X_2 軸の工具経路の違いは、回転角 ϕ の位相が 180 度ずれているだけである。従って、 X_2 軸の工具経路は次式より求められる。

$$X_{i2} = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \frac{y_i}{x_i} + \pi \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、添字の1及び2は、それぞれ X_1 軸および X_2 軸の工具経路を表す。

5. 加工実験

5.1 加工の高速化への効果 試作した工作機械を用いて基礎的な加工実験を行った。まず、はじめに、使用する工具の個数を変えて、 2 mm/rev の送りで直径 50 mm の丸棒の切削加工を行った。このとき表面形状測定機でそれぞれの工作物の表面粗さを測定した結果を図5に示す。これによれば、2つの切削工具で加工を行った場合、表面粗さは1つの切削工具で加工を行ったときの約 $1/4$ になっていることがわかる。これは、試作した加工システムでは、2つの切削工具が Z 方向の同一位置に設置されているため、2つの工具を用いる場合の実質的な送り量は、工具が1個の場合と比較して、半分の送り量と等価になるからである。

この実験では、外丸フライスの半径 5 mm の円弧部で切削を行っている。この場合の理論表面粗さは、1つの切削工具で加工を行った場合が $100 \mu\text{m}$ 、2つの場合が $25 \mu\text{m}$ であり、これらは実験結果と非常に良く一致する。なお、切削工具が2個の場合の表面粗さは、 1 mm ごとに現れるピークが、交互に高低を繰り返す傾向が見受けられる。これは、 X_1 軸と X_2 軸の座標原点が $10 \mu\text{m}$ 程度ずれているためである。このずれは、コントローラの X_1 軸と X_2 軸の原点補正値を修正することによって取り除くことができる。

以上の基礎実験の結果より、試作した工作機械では、表面粗さを増大させることなく、テーブルの送り量を2倍にすることができ、切削時間を半分に短縮できる。従って、主軸回転数の増加によって加工の高速化を行った後、さらに2倍の高速化を図ることができる。

5.2 加工精度向上への効果 2つの切削工具が工作物を挟み込んで加工を行うときに発生する工作物の変形を調べ、これを切削工具が1つの場合と比較した。実験では、加工中の工作物の変形を測定しながら円筒形状の加工を行った。ここでは、加工中の工作物の変形を意図的に大きくするために、工作物の剛性が小さくなるように直径 19 mm 、長さ 580 mm の塩化ビニール樹脂製の丸棒を用いた。このとき、切込みを 0.5 mm として加工を行い、加工中の工作物の変形を測定した。本実験における一回転あたりの送り量は、工具が1個の場合は 1 mm/rev 、2個の場合は 2 mm/rev と設定している。従って、加工によって発生した表面粗さはほぼ等しくなっている。また、単位時間当たりの切削量は、工具が2個の場合は2倍になっている。このとき、図6に示すようにレーザ変位計によって加工中の工作物の変形をレーザ変位計を用いて測定した。この実験では、レーザ変位計を、チャックとセンタで支持された工作物の変位が大きくなりやすいほぼ中央に設置した。レーザ変位計と切削

Fig. 5 Surface roughness

Fig. 6 Measurement of workpiece deflection

Fig. 7 Deflection of workpiece

工具との干渉を防止するために、切削開始位置を設置されたレーザ変位計に接近した位置とし、ここからセンタに向かって送りを与えて加工実験を行い、加工中の工作物中央付近の変形を測定した。なお、測定では工作物の回転角 3.6 deg ごとに変位信号のサンプリングを行った。

図 7 に測定結果を示す。図においては、加工前の工作物表面の位置が零になるように設定されている。また、正の変位量は 1 個の工具で加工を行ったときに、工具から工作物が逃げる方向の変形を表している。また、図 7 においては、前加工において工作物の表面に形成されたカッターマークの影響を取り除くために、加工中の工作物一回転あたりに 100 個のデータをサンプリングし、その平均値によって、その間における工作物の変形を表している。すなわち、工具が 1 個の場合には、工具が 2

Fig. 8 Workpiece profile

Fig. 9 Tool path

Fig. 10 Machined part

Fig. 11 Machined part

方向に 1 mm 移動する間に発生した工作物の変形量の平均となる。また、工具が 2 個の場合には、工具が 2 mm 移動する間の工作物の変形量となる。

本実験の結果から、1つの切削工具を用いて加工した場合、変形量の平均値は $51 \mu\text{m}$ 程度に達している。こ

れに対して、2つの切削工具を用いたときには、発生する切削力の一部を相殺することができるため、工作物に作用する切削合力が小さくなり、また工作物の支持剛性も高くなる。その結果、変形量の平均値は $17\mu\text{m}$ 程度に $1/3$ に減少している。このように、提案する加工法によって、加工中の工作物の変形を抑制することができるので、加工精度の向上への効果が期待できる。

なお、2個の工具で同時加工した場合、理想的には工作物の変形は零になるはずであるが、 X_1 と X_2 軸のサーボ系原点の誤差により、切込み量にわずかな差が発生し、これによって工作物の変形が生じたものと考えられる。

また、図7によれば、どちらの実験結果においても、加工中の工作物の変位が大きく変動している箇所がある。これは、本実験では工作物の変形を顕著にするために、工作物の剛性を意図的に低くしたため、工作物が振動したためと考えられる。

以上の結果より、2つの切削工具で工作物を挟み込んで行う加工は、特に工作物の剛性が小さいような加工において、切削力による工作物の曲げ変形によって発生する加工誤差の増大を抑制する効果がある。ただし、2つの切削工具を用いることにより、工作物に作用する切削力によるモーメントは増大し、これにより工作物の捻り方向の変形が増大する可能性がある。また、本実験では、円形断面の加工時に発生する工作物の変形を測定したが、非円形断面の加工特性については、より詳細にその効果を調べる必要がある。

5.3 非円形断面形状の加工 試作した加工システムを用いて、非円形断面形状の加工実験を行った。一連の加工実験では、加工材料として塩化ビニール樹脂の丸棒を用いた。加工形状の一例としてカム形状の加工事例を示す。図8がカムのプロファイルであり、図9には図8に示すカム形状を加工するために生成した工具経路を示す。また、加工した工作物を図10に示す。また、図11には、工作物断面にわずかな凹部のある形状の加工例を示す。

6. 結 言

本論文では、大きな半径の変化を有する非円形断面の加工効率を上げるために、工作物を挟み込むようにして配置した2つのフライスで加工を行う工作機械を試作した。これら2つのフライスの運動は、一本のレールに配置された2つのリニアモータによって制御される構成を採っている。本研究では、フライスとして外丸フライスを用い、工具経路を生成するために、非円形断面を

有する工作物と外丸フライスの幾何学的な関係を示した。さらに、試作した加工システムによる実験結果より、以下の事項を示した。

- (1) 2つのフライスで工作物を同時に加工することにより、フライスが一つの場合と同程度の表面粗さを保ちながら、送り量を2倍に上げることができる。
- (2) 工作物の加工中の曲げ変形量を測定した結果、2つのフライスで工作物を挟むことにより、切削力により発生する工作物の曲げ変形を抑制できることを示した。
- (3) 試作した加工システムを用いて、半径の変化が大きいカム形状の加工実験を行い、試作した加工システムがこの種の工作物の加工に有効であることを示した。

本研究の一部は、科学研究費補助金(奨励研究(A) No. 08750156 および奨励研究(A) No. 09750151)の助成によって行われました。ここに謝意を表します。

文 献

- (1) 浦田, 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) 機論(B編) 46, 409, pp.1713-1720 (1980).
- (2) 樋口, 山口, 非円形輪郭切削に関する研究(第1報,) 一逆伝達関数補償法の適用一, 精密工学会誌, 54, 1, pp.145-150, 1988.
- (3) M. Tomizuka, et al, Tool Positioning for Noncircular Cutting with Lathe, Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 109-June, pp. 176-179, 1987.
- (4) 米田孝夫 他, 非円形形状の NC 輪郭研削加工に関する研究—電気式サーボ機構による高速高精度加工の実現—, 精密工学会誌, 56, 12, pp.2297-2302, 1990.
- (5) T. C. Tsao, et al, Robust Adaptive and Repetitive Digital Tracking Control and Application to a Hydraulic Servo for Noncircular Machining, Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 116-March, pp. 24-32, 1994.
- (6) 中尾, 内平, 浦田, 回転形円筒工具を使用した CNC 自由曲面加工機の開発(第1報), 機論(C編)60, 576, pp. 2852-2859 (1994).
- (7) 中尾, 安田, 浦田, 回転形円筒工具を使用した CNC 自由曲面加工機の開発(第2報), 機論(C編)62, 604, pp. 4702-4709 (1996).
- (8) 中尾, Between-process 測定に基づく形状適応制御手法を用いた自由曲面加工の高精度化に関する研究, 機論(C編) 65, 630, pp. 793-800 (1999).