除去加工用修正加工システムに関する研究

(第1報)*

—2次元輪郭形状の修正研削加工—

垣野義昭** 井原之敏** 岩崎嘉徳*** 松原 厚** 大坪 寿†

Study on Amendable Machining System
by Using Machining and Measuring Center (1st Report)
— Amendable Grinding of 2 Dimensional Parts with High Accuracy —

Yoshiaki Kakino, Yukitoshi Ihara, Yoshinori Iwasaki,
Atsushi Matsubara and Hisashi Otsubo

Nowadays the machine tools have become multi-functional with the development in their speed and accuracy, for example, machining center can be used for grinding. Meanwhile, the deviation-detecting type on-the-machine measuring method has been developed for measuring the machined error of a workpiece on the machine efficiently and precisely. Therefore, it is possible to do roughing, measuring and finishing on a machine without replacing the workpiece. An amended machining system has been studied, in which the machining error of rough grinding is measured by on-the-machine measuring and then dimensional and profile errors are amended by changing the program of finish grinding.

Key words: Machining center, Grinding, Dimensional measurement, Correction, Cubic boron nitride wheel

1. 緒 論

工作機械において従来の機械加工以外の機能, 例えば計測・熱処理・組立などの処理能力を付加する複合化の試みが行われている。複合化によって, いくつかの工程を1つの場所に集約し, 1回の段取りで加工が終了できるため, コストダウンを図ることができる。さらに, 工作機械上で計測を行うことは, 良品・不良品の選別, 検定だけにとどまらず, 計測の結果得られた情報をいずれかの工程にフィードバックまたは次の加工にフィードフォワードすることによって, より高い加工精度を実現できる可能性がある。

そこで本研究では, 加工後の寸法誤差・位置誤差・輪郭形状誤差をオンザマシン計測し, そのデータをフィードバックすることにより仕上げ加工でこれらの加工誤差を補正する修正加工システムを開発することを目的とした。

2. 修正加工の原理と修正加工システム

2.1 修正加工の原理

開発した修正加工システムは以下に示した特徴を備えている。

- (1) 加工機および計測機として使用する工作機械は門型のMCであり, 少なくとも2次元加工あるいは2½次元加工の工作物に対して適用可能である。
- (2) 加工機上での計測値による補正を行うため, 再現性の高い系統誤差に対して誤差の発生原因に関係なく, 修正加工を行うことができる。
- (3) 修正加工はすべてNCプログラムの部分的変更, すなわち, 加工パラメータの変更または工具経路の変更によって行う。

Fig.1 Dimensional error in two dimension

* 原稿受付 平成4年10月28日
** 正 会 員 京都大学工学部 (京都市左京区吉田本町)
*** 京都大学大学院 (現在, 川崎製鉄㈱)
† 正 会 員 安田工業㈱ (岡山県浅口市里庄町浜中1160)

また、本研究では、修正加工の対象を2次元の加工誤差に限定する。そこで、2次元の加工誤差を修正加工の観点から、以下の3つに分類・定義し、修正加工法を考えることとした。その際、工具は非常に鋭く、切削・研削抵抗も少なく、切込み量がそのまま除去量となる理想的な場合を想定した。

1) 寸法誤差

設計寸法または加工における指令寸法と実際の加工寸法との差である。2次元の寸法誤差の一例を図1に示す。図中の加工物には位置誤差、形状誤差がなく、設計寸法と加工寸法との偏差 E_d のみが存在し、これが加工による寸法誤差である。加工パラメータのうち切込み量を E_d だけ増やすことによって、または、工具径補正値のパラメータを E_d だけ減らすことによってこの未加工量を除去することができる。

Fig.2 Position error in two dimension

2) 位置誤差

設計上の位置と実際の加工物の位置との偏差であり、並進移動量(オフセット)の誤差および回転方向の誤差として定義できる。2次元の位置誤差の一例を図2に示す。図中の加工物には寸法誤差、形状誤差がなく、設計位置と加工位置との並進誤差 E_p 、及び図形の回転方向の誤差 R のみ存在し、これらが加工による位置誤差である。

並進誤差 E_p は1つの誤差ベクトルとして検出される。従って、誤差ベクトル E_p を打ち消す補正ベクトル $-E_p$ を中間仕上げ加工のワーク座標系に加え、修正加工のワーク座標系とすることにより、並進誤差(オフセット誤差)を補正できる。

回転方向の誤差に対しては、NCの座標回転機能を利用すればよい。検出された回転誤差 R だけ修正加工の加工座標系を逆方向に回転することにより、回転の誤差を補正することができる。

3) 輪郭形状誤差

寸法誤差や位置誤差の補正がいくつかの加工パラメータの変更によって行われるのに対し、輪郭形状誤差の補正にはさらに別の工夫が必要となる。真円度・真

Fig.3 Profile error in two dimension

Fig.4 Procedures for amended machining

直度などのスカラー量で表現される形状精度の修正のためには、加工物各部の形状誤差ベクトル一つ一つを補正せねばならない。これらの形状誤差ベクトルを補正するためには、修正加工用の工具経路を変える必要がある、その工具経路の決定法が問題となる。

2次元の輪郭形状誤差の一例を図3に示す。図中の加工物は寸法誤差・位置誤差がない、いわゆるベストフィットの状態にある。従って、図中の実線で示したベクトルが形状誤差ベクトルに相当する。ある1つの形状誤差ベクトル E_f に対して、これを打ち消す補正ベクトル $-E_f$ が一意に定まる。そして、この補正ベクトルの終点の位置を工具経路が通過すれば、形状誤差ベクトル E_f を除去することができるはずである。そこで、すべての形状誤差ベクトルに対して補正ベクトルを算出し、これらの補正ベクトルの終点を微小線分または

近似円弧で接続すれば、修正加工の工具経路を決定することができる。

2.2 修正加工システム

2.2.1 修正加工システムの概要

(1) 修正加工の手順

中間仕上げ加工からポストプロセス計測までの修正加工の手順を図4に示す。以下に、それらの内容について詳述する。

i) 加工誤差の検出……偏差検出型オンザマシン計測によって得た計測データを解析し、加工箇所ごとに加工誤差を寸法誤差・位置誤差・輪郭形状誤差の3つの誤差成分に分離して検出する。

ii) 修正加工の必要性の判断……加工箇所ごとにあらかじめ設定されている誤差の許容値と先に検出した誤差の大きさを比較し、穴径の過大などの修復不可能な誤差が存在すれば、不良品と判断する。もしすべての誤差が許容値内におさまっていれば、加工を終了する。加工箇所に修正加工の必要があり、しかも修正加工可能な誤差があれば、その誤差に対して修正を行うことを決定する。

iii) 修正加工用工具・加工条件の設定……修正加工を行う加工箇所に対して、残りの取り代・誤差の許容値・仕上げ面粗さなどを考慮して、使用可能な工具の中から最適な工具を選び出す。選択した工具に対して切込み量・周速・送り速度などの実現可能な最適加工条件を決定する。本研究では、加工の再現性を維持するため、中間仕上げ加工に使用した工具・加工条件を変更せずに修正加工を行うこととした。

iv) 修正加工用NCプログラムの作成……中間仕上げ加工のNCプログラムに対して加工パラメータの変更及び工具経路の変更を行い、修正加工用NCプログラムを作成する。

(2) 修正加工システムの構成

本研究で開発した修正加工システムは以下に示したハードウェア・ソフトウェアから構成されている。

i) 加工用ハードウェア……MC, NC装置, 工具, などの周辺機器

ii) 計測用ハードウェア……変位検出型プローブ(3Dプローブ)・C軸法線制御プローブ(1Dプローブ)など

iii) 計測用ソフトウェア

iv) 修正加工用ソフトウェア

修正加工システムは、原理的に切削加工・研削加工いずれに対しても適用可能である。しかし、修正加工を行う場合には、加工物に要求される精度は研削加工

によって確保されるので、本研究では第1ステップとして修正加工システムの研削加工への適用を試みる。

2.2.2 加工機とその運動精度・再現性

修正加工システムの加工機・計測機として中型の門型マシニングセンタを使用した。これは文献³⁾で利用したものと同一であるので、その詳細は省略する。

2.2.3 研削加工と研削加工装置²⁾

(1) 研削加工法

グラインディングセンタに十分な研削機能を付加するために、主軸の増速装置としてTD増速ユニットを使用することとした。

(2) 砥石

本研究では電着CBN砥石を用いることとした。その主な仕様を表1に示す。また、本研究での研削加工条件を表2に示す。

2.2.4 偏差検出型オンザマシン計測法とその測定精度

本研究に用いた計測法と計測システムは文献³⁾で用いたものと同じであるので省略する。

Table 1 Specification of CBN wheel grinding

form	straight
diameter	φ20
grain size	100μm
concentration	200

Table 2 Grinding conditions (die-mold steel)

workpiece	SKD11(die-mold steel)
wheel revolution	30000rpm
wheel speed	1885m/min
depth of grind	20μm
feed rate at grinding point	456mm/min
direction of movement	CCW
spark-out	none

3. 実験方法

TD増速ユニットを用いた円筒内面研削加工に対して本修正加工システムを適用し、その寸法誤差・位置誤差(並進誤差)の修正加工と真円度の修正加工を行う。実験に用いた加工物の形状・寸法を図5に示す。修正加工の対象とするのは、穴C1とC2の内径寸法(寸法精度)、穴C1とC2の中心座標の位置(位置精度)、穴C1とC2のピッチ寸法(位置精度)及び穴C1とC2の真円度である。

3.1 寸法誤差・位置誤差の修正

本実験では、仕上げ加工の取り代を0.2mmと設定して

Fig.5 Drawing of the workpiece used

中間仕上げ加工を行い、最終的に、穴C1とC2の内径を33.200mm、穴C1とC2のピッチを120mmに仕上げることにした。すなわち、ビトウィーンプロセス計測時の穴C1とC2の内径が33.000mmとなるように中間仕上げ加工を行う。実験は以下の手順で行う。

1)加工物及びマスタボールをMCのテーブルにクランプした後、測定プローブのキャリブレーションをする。この時、マスタボールの中心座標を検出し、これを原点とする測定座標系ですべての計測・加工を行うこととする。2)穴C1, C2の芯出しを行い、各々の中心座標を算出する。3)穴C1, C2の内径が33.000mmになるように指令半径を16.500mm、工具径補正值を10.050mmに設定し、TD増速ユニットを用いて中間仕上げ加工を行う。研削加工条件は表2に示したとおりで、そのうち1回当たりの切込み量を10 μ mとした。4)中間仕上げ加工終了後、主軸に測定プローブを装着し、マスタボールを用いてアライメント誤差のキャリブレーションを行う。次に、加工物に付着した切り粉をアルコールで拭き取り、穴C1とC2についてビトウィーンプロセス計測する。5)計測データを非線形最小自乗法によって解析し、加工誤差を算出する。6)算出した加工誤差をもとに、工具径補正值・穴C1とC2のワーク座標系のパラメータを

変更して、修正加工用NCプログラムを作成する。加工条件は中間仕上げ加工の加工条件と同じである。7)穴C1とC2の内径が33.200mmとなるように修正加工を行う。8)アライメント誤差のキャリブレーションの後、ポストプロセス計測を行う。

3.2 真円度の修正

図5に示した板状部品の穴C1, C2に対して、本修正加工システムを適用し、その角度方向の輪郭形状誤差(真円度)の修正加工実験を行った。データ処理の流れを図6に示す。その手順は以下の通りである。

- (1) 穴C1またはC2に対してTD増速ユニットによる中間仕上げ研削加工を施す。中間仕上げ加工の加工条件は表2に示した。
- (2) 加工を行った穴に対して偏差検出型オンザマシン計測を測定速度1mm/s、データ取込みのサンプリング周期200msで行う。この条件で計測を行った場合、得られる加工物とプローブ球の接触点の数は約480個であり、同数の修正加工の近似データ点を作成することができる。
- (3) 計測データをパソコン上で処理し、形状誤差ベクトルを算出し、その結果を真円度プロフィールとしてプロット出力する。一方、近似データ点の座標値を計算し、これらを微小線分または微小円弧で接続することにより、修正加工の工具経路を決定する。この工具経路はNCのサブプログラムとして、NC装置に転送・登録される。
- (4) 中間仕上げ加工NCプログラムを修正加工用NCプログラムに書き換え、これによって、修正加工を実行する。修正加工の加工条件は中間仕上げ加工の時と同じである。
- (5) 修正加工を行った穴に対して偏差検出型オンザマシン計測を測定速度1mm/s、データ取込みのサンプリング周期200ms、サンプリング点数480点で行う。
- (6) 計測データをパソコン上で処理し、形状誤差ベクトルを算出し、その結果を真円度プロフィールとしてプロット出力する。

4. 実験結果と考察

4.1 寸法誤差・位置誤差の修正

(1) ビトウィーンプロセス計測結果
ビトウィーンプロセス計測によ

Fig.6 Data processing at amended machining of profile error

Table 3 Machined error measured (between-process measuring)

hole	C1	C2
unremoved thickness (R16.500mm)	32.5 μm	32.6 μm
position error measured (parallel)	(+0.9 μm , +15.0 μm)	(-0.1 μm , +16.3 μm)
pitch error (120.000mm)	0.8 μm	

Table 4 Machined error measured (post-process measuring)

hole	C1	C2
dimensional error (R16.600mm)	0.4 μm	1.3 μm
position error measured (parallel)	(-1.1 μm , +0.7 μm)	(-1.4 μm , -0.8 μm)
pitch error (120.000mm)	0.3 μm	

る計測データから中間仕上げ加工の未加工量（寸法誤差）・位置誤差を算出した結果を表3の加工精度表に示す。未加工量が32.5 μm 残っているのを、工具径補正値を10.0500mmから10.0175mmに変更する。また、穴C1, C2ともに中心位置が+Y方向に15 μm 以上ずれている。この位置誤差（並進誤差）を補正するため、穴C1のワーク座標系を（-0.9 μm , -15.0 μm ）、C2のワーク座標系を（+0.1 μm , -16.3 μm ）だけシフトさせ、修正加工用NCプログラムを作成した。計測開始から修正加工用NCプログラム作成まで約30分を要した。

(2) ポストプロセス計測結果

ポストプロセス計測によって得られた加工誤差を、表4の加工精度表に示す。修正加工後の寸法精度・穴の中心の位置精度・ピッチ寸法精度は、いずれもビトウィーンプロセス計測時よりもかなり向上している。これら修正加工後の加工誤差は、いずれもオンザマシン計測の測定誤差とほぼ同じ大きさであり、修正加工システムによる補正が適切に行われていることがわかる。

4.2 真円度の修正

中間仕上げ加工によって得られた真円度プロフィールを図7に示す。プロフィールは、1目盛2 μm で表示し、5点単純移動平均法によってアベレージングを施してある。最小領域円半径差による真円度は8.5 μm 、研削終了点の切込み過ぎは4 μm である。また、全体的に形状が楕円状にひずんでいる。

近似データ点480点を微小線分で近似し、修正加工の工具経路を作成し、実際に修正加工を試みた。加工の結果得られた真円度プロフィールを図8に示す。真円

Fig.7 Out-of-roundness profile obtained at intermediate machining

Fig.8 Out-of-roundness profile obtained at amended machining

度は4.5 μm 、研削終了点の切込み過ぎは2 μm に減少している。しかし、研削開始点には切残しが4 μm 残存している。また、研削開始点・終了点以外の部分では、楕円状の歪が修正され、ほとんどの形状誤差ベクトルの大きさが2 μm 以下になっている。従って、微小線分近似による修正加工法の有効性が確認できた。

修正加工によって真円度プロフィール全体の楕円状のひずみは補正されているにもかかわらず、研削終了点付近においては、切込み過ぎや切残しなどの不具合が依然として存在する。

研削終了点の切込み過ぎの発生原因は、以下のように説明される。TD増速ユニットを用いた円筒内面研削においては、TD増速ユニットや砥石の静剛性が低いため、研削抵抗によって出力軸にたわみを生じる。砥石が図9(a)に示した経路で加工物にアプローチするとき、研削開始点に到達する前に砥石が加工物に接触し、取り代の一部を削り取る。砥石が加工穴を一周して再び研削終了点に近づいてくる場合、研削終了点付近で

Fig.9 Modification of NC

Fig.10 Out-of-roundness profile at amended machining using modified CL

は、すでにその取り代の一部が除去されているため、研削抵抗が減少して出力軸のたわみが解放され、他の部分よりも多く加工物の除去が行われる。つまり、研削終了点付近では実質的に砥石が2回加工物と接触するために、切込み過ぎが生じるものと考えられる。

本実験では、以下のように修正加工の工具経路を変更することにより、研削終了点の切込み過ぎの低減を図った。

1) 砥石を加工物から逃がす工具経路を図9(b)のように変更する。2) 研削開始点付近に切残しが生じる恐れがあるため、アプローチ終了後の数個の近似データ点を破棄し、通常の円弧補間で加工を行う。

修正加工の結果得られた真円度プロフィールを図10に示す。研削終了点の切込み過ぎが $2\mu\text{m}$ 程度に抑えられている。加工穴全体の真円度も $3\mu\text{m}$ 程度であり、高精度な修正加工が行われている。

5. 結 論

偏差検出型オンザマシン計測により、加工物の2次元の加工誤差を寸法・位置・形状の3つの誤差成分に分離して検出し、その計測情報をフィードバックすることにより修正加工を行う除去加工用修正加工シス

テムを開発した。その結果、次の結論が得られた。

- (1) TD増速ユニットによる円筒内面研削加工を施した2つの加工穴をもつ板状部品に本修正加工システムを適用し、その寸法誤差・位置誤差の修正加工を試みたところ、加工物の内径 33.200mm に対して寸法精度 $1\mu\text{m}$ 前後、穴の中心の位置精度も $1\mu\text{m}$ 前後まで補正できた。すなわち、本修正加工システムが寸法誤差・位置誤差に対して有効であることが確かめられた。
- (2) 板状部品の加工穴の真円度の修正加工を試みた。まず、穴を円弧補間した時の真円度と微小線分近似した時の真円度が、 $2\mu\text{m}$ 以内で一致していることを確かめた。微小線分近似による修正加工の結果、真円度を $4\mu\text{m}/16\text{mm}$ 程度まで低減することができた。特に楕円状の歪に関してはほぼ $2\mu\text{m}$ 以下に補正でき、さらに、加工物から砥石を逃がす工具経路の変更によって研削終了点の切込みを $2\mu\text{m}$ 程度まで抑えられることを確かめた。また、微小円弧近似による修正加工の結果から、補正精度を劣化させることなく、近似データ点の数を圧縮できることを確認した。すなわち、本研究で提案した輪郭形状誤差の修正加工法の妥当性が確かめられた。

ただし、本システムの加工精度は使用する工作機械の運動精度の再現性と外乱に依存する。

謝 辞

測定にご協力をいただいた京都府中小企業総合センターの後藤卓三氏に感謝いたします。さらに、研究にご協力いただいた三菱電機(株)、(株)ミットヨ、光洋精工(株)、聖和精機(株)、その他のメーカーの方々に謝意を表します。

また、この研究は文部省科学研究費一般C04650110の支援の下に行ったものであり、ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 垣野義昭, 井原之敏, 亀井明敏, 伊勢 徹: NC工作機械の運動精度に関する研究(第1報) - DBB法による運動誤差の測定と評価 -, 精密工学会誌, 52, 7 (1986) 1193.
- 2) 垣野義昭, 山路伊和夫, 木村 弘, 中川平三郎, 喜田義宏: MC研削に関する基礎的研究(第1報) - 電着CBN砥石による焼入鋼の内面研削 -, 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1989) 919.
- 3) 垣野義昭, 岩田義雄, 岩崎嘉徳, 大坪 寿: 加工形状誤差の偏差検出型オンザマシン計測に関する研究, 精密工学会誌, 58, 6 (1992) 1059.