

研削加工における高精度修正加工システムの研究

水江 宏・船田 昌・大塚 裕俊
機械電子部

Study on Corrective Machining System for Precision Grinding

Hiroshi MIZUE・Masashi FUNADA・Hirotohi OHTSUKA
Mechanics & Electronics Division

要旨

工作機械を使用して金型部品等の除去加工（切削・研削・放電加工等）を行う場合、寸法・形状誤差は、位置決め精度などの工作機械が内包する要因、加工抵抗による力学的・熱的な要因、加工工具の精度等による要因、工作物の取り付けによる要因、加工現象そのものによる要因等から影響を受ける。

そこで、本研究では、バックラッシュエラー等の工作機械が内包する誤差に着目し、ジグ研削盤を用いて、修正加工プログラムによる C 軸制御の輪郭研削加工を行った。その結果、通常の加工プログラムによる輪郭加工と比べて、本加工法により、真円度の精度で約 30%の精度向上が認められた。

1. 緒言

加工誤差のうち工具の誤差、加工条件による誤差、工作物の取り付け誤差等は、作業者の技能に大きく依存している。つまり、熟練作業者の十分な注意により、これらの誤差はある程度減少させることが可能といえる。

一方、工作機械が内包する誤差、例えば、スケールの誤差、真直度の誤差、バックラッシュエラー等の準静的あるいは幾何学的な要因による誤差は、一般的な方法では、減少させることが困難である。

従来、保有する工作機械の精度以上の加工を行う必要がある場合は、熟練作業者による手仕上げ等の方法で対応してきた。しかし、従来の方法では、近年の熟練作業者の不足、手作業による加工効率の悪さ、工作機械の老朽化による精度の悪化など、解決すべき多くの技術的問題がある。これらの問題を解決するには、現有の工作機械を用いて修正加工（仕上げ加工）を行うことにより精度・能率を向上させるための研究が必要である^{(1) (2) (3)}

そこで本研究では、これまで試みられたことのないジグ研削盤を対象として、1次加工の測定データを考慮に入れた修正加工用の NC プログラムを作成し、C 軸制御による輪郭研削加工（仕上げ加工）実験を行った。また、通常の NC プログラムによる輪郭研削加工（C 軸制御）を行い、位置の誤差と形状誤差（真円度）の 2 つの誤差について修正加工と比較検討し、その有効性を明らかにしたので以下に報告する。

2. 修正加工の手法

2.1 工作機械が持つ誤差の種類

修正加工用プログラムを作成するには、対象となる工作機械が内包する誤差の特徴を、1次加工後の測定結果から把握する必要がある。

一般に、従来の方法で円形状の輪郭加工を行う場合、工作機械は以下の誤差を生じると言われている。

- ① スケールの長さ誤差：軸方向(XY)の楕円となる。
- ② 軸案内の真直度誤差：45° 傾斜した楕円となる。
(加工の方向を変えても傾きの方向は同じ。)
- ③ サーボリードエラー：45° 傾斜した楕円となる。
(加工の方向を変えると傾きの方向は反対になる。)
- ④ バックラッシュエラー：各軸(XY)の送り方向が変わるとき段差を生じる。
- ⑤ 定期的エラー：リードスクリュー等の誤差により、振動状の波形が現れる。
- ⑥ その他の誤差：スケールの部分的エラー等により不定期に発生する誤差。

2.2 誤差の修正方法

本研究では、工作機械により生じた誤差を位置（形状の基準点）の誤差と形状誤差（真円度等）の 2 種類に分類し、修正加工法について検討する。

また、寸法誤差（直径や幅等の誤差）は、工作機械が内包する誤差から生じたとしても、切り込みを追い込むことにより精度向上が期待できることから、今回の研究対象とはしない。

2.2.1 位置の誤差の修正方法

Fig.1 に位置の誤差とその修正方法を示す。位置の誤差とは、設計形状と加工形状がベストフィットの状態であるとした場合の、オブジェクトの設計基準点(設計形状の中心)と測定基準点(加工形状の中心)とのずれをいう。

位置の誤差は、加工プログラムの設計基準点に位置補正ベクトル(P_c)を付加することにより修正した。位置補正ベクトルは、位置誤差ベクトル(P_e)に対して反対方向を向き、位置の補正係数を k_p とすると、(斜体英文字はベクトルを表す)

$$P_c = -k_p \times P_e \quad (k_p=1)$$

と表される。

具体的には、ワーク座標系の設定を位置補正ベクトル分オフセットさせることにより工具経路全体を簡便に移動させる方法と、NC プログラム中の工具位置指令をオフセットさせることにより工具経路を修正する方法がある。今回は、形状補正において工具位置指令をオフセットする必要があるため、後者の方法とする。

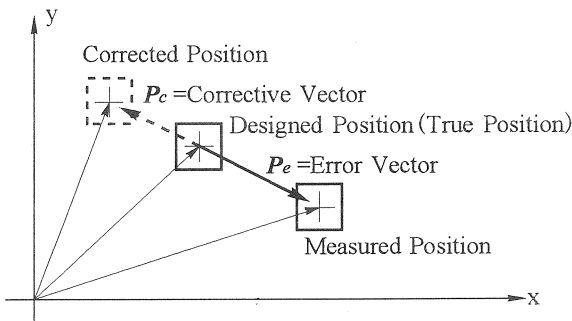


Fig.1 Position error

2.2.2 形状誤差の修正方法

Fig.2 に、形状誤差とその修正方法を示す。形状誤差とは、設計上の真の形状(円や四角等)と測定形状の誤差をいう。形状誤差は、加工プログラムの位置指令座標値に形状補正ベクトル(R_c)を付加する方法により修正する。形状補正ベクトルは、形状誤差ベクトル(R_e)に対して反対の向きを有し、形状の補正係数を k_r とすると、

$$R_c = -k_r \times R_e \quad (k_r=1, 0.8, 0.5, 0.3)$$

と表される。

ここで、形状の補正量(形状補正ベクトルの絶対値)の最適値を検討するため、形状の補正係数 k_r を 1, 0.8, 0.5, 0.3 の4種類とする。

具体的には、NC プログラムの位置決め指令である直線送り(G01)や円弧送り(G02,03)を、形状測定用のデータ数に対応した微小な直線や円弧に細分化し、形状補正ベクトルをそれぞれに付加する。これにより、Fig.2 に示

すように、測定形状に対して設計形状(理想形状)を軸として反転した形状を工具経路とする修正プログラムができる。そして、全ての誤差(凸凹)が再現性を有すると仮定すると、修正加工プログラムは凸凹を打ち消し、工具は理想的な設計形状の上を移動する、と考える。

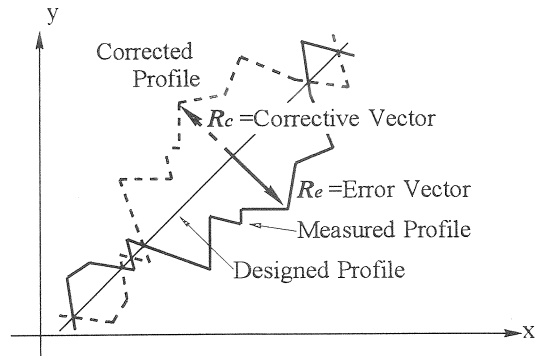


Fig.2 Profile error

3. 実験方法

3.1 装置

工作機械は三井精機(株)製ジグ研削盤 3GCN を使用した。精度比較測定には、(株)ミットヨ製3次元座標測定機 HYPER-KN810 + MPP-4, (株)東京精密製真円度測定機ロンコム 52B-750 を使用した。テキストファイルから FANUC P-G ファイルへの変換は、ファダム(株)製 NC-Convert P-G を使用した。

Fig.3 にジグ研削盤での修正加工実験装置を示す。

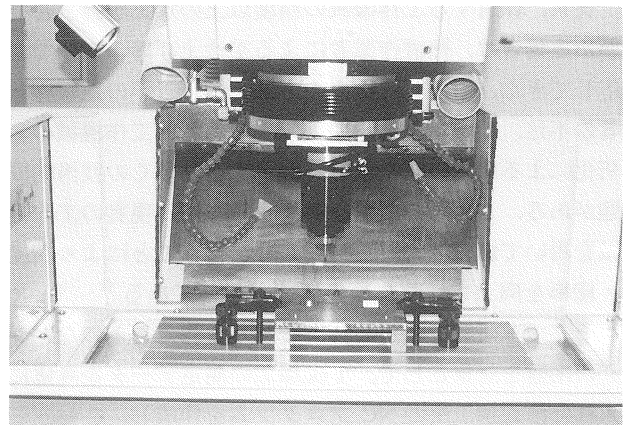


Fig.3 Jig grinding machine

3.2 実験方法

Fig.4 に実験手順のフローを示す。

本研究では、オンザマシンで加工と測定を実施していないため、被削材を加工機と測定機に載せ換える度に、ずれを生じてしまう。

そこで今回は、ダイヤルゲージを使用して、再搭載による被削材のずれを $2\mu\text{m}$ 以内に調整し、必ず基準穴の研削加工を行った後に修正加工を行った。これにより、オンザマシン計測と同等の精度(再現性)を確保する。

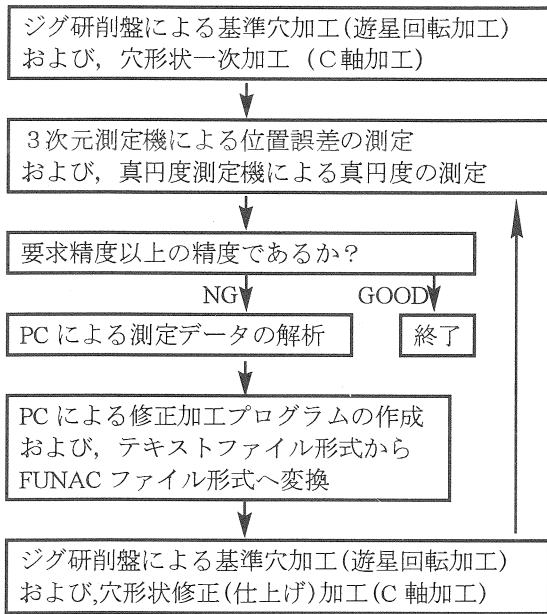


Fig.4 Corrective machining process

3.3 加工条件

Fig.5 に被削材の加工形状を示す。平面研削した板材(SKD-11, Non-heat treatment)に、ワイヤーカット放電加工機で基準穴2個と修正加工用穴1個の下穴加工を行った。次に、ジグ研削盤で基準穴の加工と修正加工用穴の1次加工、修正加工(仕上げ)を行った。基準穴の加工の場合は、遊星回転加工により、切り込み $3\mu\text{m} \times 3$ 回+スパークアウト1回を加工物取り付けの度に実施した。また、修正加工用穴の場合、C軸制御を利用した輪郭研削加工により、1次加工で切り込み $8\mu\text{m} \times 3$ 回+ス

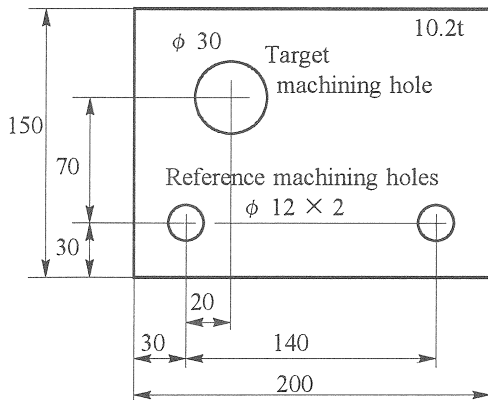


Fig.5 Drawing of the corrective machining

パークアウト1回、修正加工(仕上げ)で切り込み $8\mu\text{m} \times 2$ 回+スパークアウト1回を実施した。

Table 1 に実験条件を示す。基準穴も修正加工用穴の場合も、クイル上下のストローク量は、被削材の上下面から工具砥石側面の約 1/2 がオーバーするように設定した。

また、工具による誤差や加工条件による誤差を排除するために、工具は新品を使用し、切込み量や工具送り速度等の加工条件は、通常の加工より負荷の少ない設定とした。

Table 1 Experimental conditions

		Reference machining holes	Corrective machining holes
CBN tool diameter	mm/Grain	10.0/#120	3.0/#150
Spindle rotational speed	rpm	10,000	30,000
Chopping speed (Quill's updown)	cycle/min	20	180
Planet rotational speed	rpm	50	-
Feed rate	mm/min	-	50, 100
Depth of grind	μm	3.0	8.0
Spark-out		2	1
Chemical solution type fluid	l/min	2.0	2.0

3.4 測定条件

位置の精度測定には、3次元測定機を使用し、倣い測定を行った。測定ピッチは 0.5mm 、測定の深さは上面から 3.0mm の位置、プローブ径は 3.0mm 、測定速度は 3.0mm/sec とした。これにより得られた 160 点の測定データをテキストファイルに変換し、PC 上で真円度が最小値になるように中心座標を繰り返し計算し、位置の誤差を算出した。

形状測定には、真円度測定機を使用した。先端子直径は 1.6mm 、測定速度は 6.0mm/min 、測定倍率は 5000 (Feed rate 100mm/min)、10000 (Feed rate 50mm/min) 倍、中心定義法は最大内接円中心法とした。

4. 実験結果

4.1 位置の誤差

Table 2 に修正加工を行った場合と行わなかった場合の位置の誤差(X,Y)を示す。

修正加工を行うことにより、中心位置の座標値(X,Y)は±が反転しており、誤差の絶対値は大きくなっている。つまり、位置の補正係数 $k_p=1$ では、過剰な修正が行われたといえる。

また、送り 50mm/min と 100mm/min で比較すると、

位置の誤差は反対の方向を示している。今回の実験結果では、位置の誤差は再現性がないと思われるが、中心定義法の違いや熱的影響や加工物クランプ力の影響等を受けやすいため、誤差の再現性を確認するための実験が必要と思われる。

Table 2 Position error X, Y (μm)

Feed rate (mm/min)				50	100	
Non-correction (absolute value)				0.2, 3.8 (3.8)	-0.4, -6.9 (6.9)	
Correction (absolute value)	kp	1.0	kr	1.0	—	0.9, 9.4 (9.4)
				0.8	—	0.6, 7.2 (7.2)
				0.5	-0.3, -4.4 (4.4)	0.5, 7.5 (7.5)
				0.3	—	1.1, 8.0 (8.1)

4.2 形状誤差

Table 3 に修正加工を行った場合と行わなかった場合の形状誤差(真円度)を示す。

修正加工を行った全ての条件で真円度の向上が認められた。特に形状の補正係数 $kr=0.5$ のとき、最も精度が高く、真円度の値で約 30% の改善が認められた。

Table 3 Roundness profile error (μm)

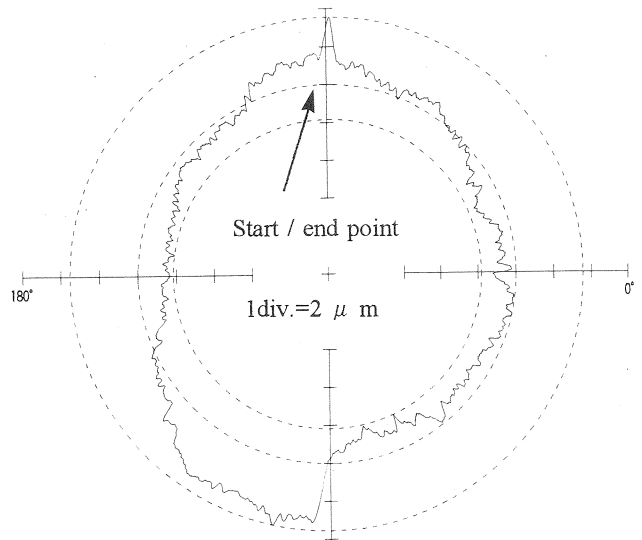
Feed rate (mm/min)				50	100	
Non-correction				1.96	5.4	
Correction	kp	1.0	kr	1.0	—	4.5
				0.8	—	4.7
				0.5	1.36	3.9
				0.3	—	4.5

Fig.6 に送り 100mm/min, 修正加工なしの測定形状を示す。これでは、Y 軸移動方向が-から+へ変化するところで、バックラッシエラーが約 $4\mu\text{m}$ 発生している。また、全体的にみると縦長の楕円形状が認められる。

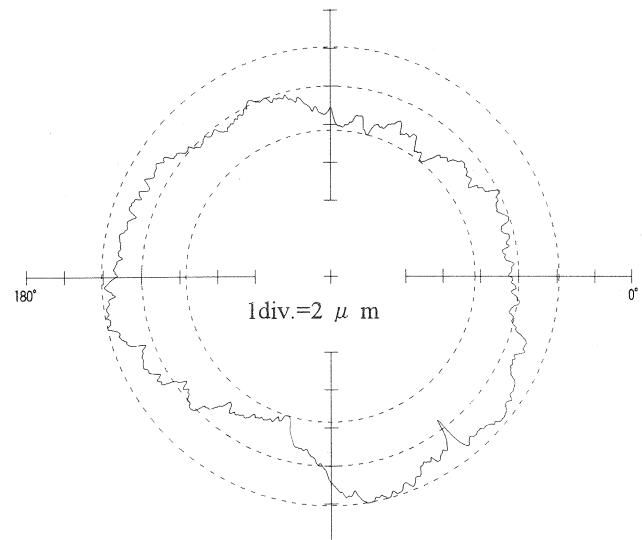
また、加工の start/end point では、二重に加工が行われることにより約 $2\mu\text{m}$ の削り過ぎが生じている。

Fig.7 に送り 100mm/min, 修正加工 ($kr=1.0$) 後の測定形状を示す。これでは、バックラッシエラーが過剰に修正され、また、全体の楕円形状も縦長から横長へと変化し、過剰に修正されていることがわかる。

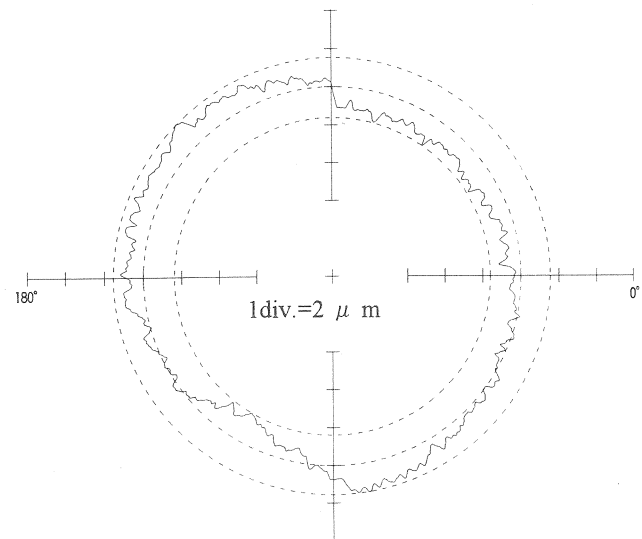
Fig.8 に送り 100mm/min. 修正加工 ($kr=0.5$) 後の測定形状を示す。過剰な修正が行われている部分は認められるが、おおむね良好な真円形状が得られた。



Feed rate : 100mm/min Roundness : $5.4\mu\text{m}$
Fig.6 Roundness profile (Non-correction)



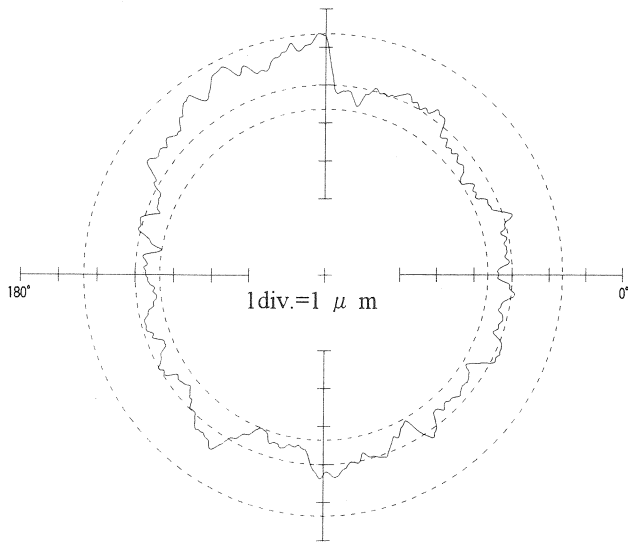
Feed rate : 100mm/min Roundness : $4.5\mu\text{m}$
Fig.7 Roundness profile (Correction ($kr=1.0$))



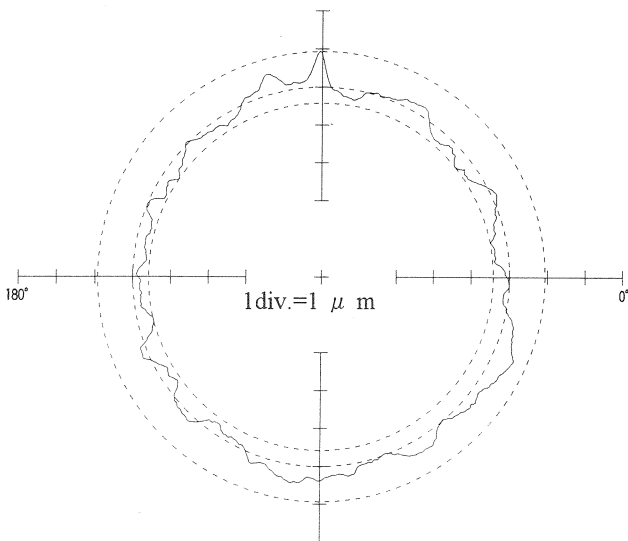
Feed rate : 100mm/min Roundness : $3.9\mu\text{m}$
Fig.8 Roundness profile (Correction ($kr=0.5$))

Fig.9 に送り 50mm/min, 修正加工なしの測定形状を示す。修正なしでは, Y 軸移動方向が+から-へ変化するところで約 $2.5 \mu\text{m}$ のバックラッシュエラーが生じている。また, 全体に $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度の山谷が生じていることがわかる。

Fig.10 に送り 50mm/min, 修正加工 ($kr=0.5$) 後の測定形状を示す。バックラッシュエラーはほぼ修正され, 全周にあった山谷は若干減少し, 良好な真円形状が得られた。



Feed rate : 50mm/min Roundness : $1.96 \mu\text{m}$
Fig.9 Roundness profile (Non-correction)



Feed rate : 50mm/min Roundness : $1.36 \mu\text{m}$
Fig.10 Roundness profile (Correction ($kr=0.5$))

今回の修正加工により, バックラッシュエラーのような比較的大きなうねり状の誤差は, 適切に減少させることができた。しかし, 小さな振動状の波形をした起伏は, 十分には減少できなかった。真円度の精度が高くなれば小さな起伏が問題となる。修正加工により, 再現性のな

い起伏は大きくなる可能性もあるので, それぞれの加工機ごとに再現性のある起伏はどのようなものかを十分検討する必要がある。

また, 加工方向は同じ(時計回り(up cut))にもかかわらず, 送りの違いにより, バックラッシュエラーの発生傾向は全く異なっている。つまり, 誤差の再現性については, 加工条件の違いも考慮に入れなくてはならない。

さらに, 加工の start / end point での削り過ぎについては, 修正加工により, 送り 100mm/min では修正されているが, 送り 50mm/min では修正されていない。今回の方法では, start / end point の山谷も他の山谷と同様の手法で修正プログラムを作成した。今後は start / end point で2回の加工を生じないように工具経路自体を改善するか, この部分のみ形状の補正係数を大きくする等の特別な手法を検討する必要がある。これにより, さらに形状精度を高めることが可能ではないかと思われる。

5. 結 言

修正加工の実験により以下のことが明らかとなった。

- ① 今回の修正加工の手法により, 形状精度(真円度)については約 30%向上する。
- ② 形状の補正係数 kr は 0.5 前後で最適な形状の修正が行われる。
- ③ 位置の補正係数 kp を 1 とすると, 位置の修正が過剰に行われる。
- ④ 形状の補正係数 kr を 1 とすると, 形状の修正が過剰に行われる。

参考文献

- (1) 垣野ら：除去加工用修正加工システムに関する研究：精密工学会誌,59,10(1993)1689
- (2) 垣野ら：NC 工作機械の運動精度に関する研究：精密工学会誌,52,7(1986)1193
- (3) 垣野ら：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