工作物の熱変形に起因する形状誤差を 自動的に除去する平面研削法*

——工作機械の弾性変形を利用する加工精度向上の研究（第2報）——

中 野 嘉 邦** 橋 本 一 雄***

A Surface Grinding Technique for the Automatic Elimination of
Profile Errors due to Thermal Deformations of Workpieces

——Studies on the Improvement of Machining Accuracies by Making Use of
the Elastic Deformation of Machine Tools (2nd Report)——

Yoshikuni NAKANO, Kazuo HASHIMOTO

In the preceding paper, it has been shown that the instantaneous relative position of a grinding wheel and a workpiece can be controlled accurately and the profile error due to the thermal deformation of the workpiece can be corrected, by making use of the elastic deformation of the surface grinding machine, which is equipped with a hydraulic servo mechanism and an auxiliary cam. In the present paper, a new technique is presented. In this technique, even if the thermal deformation of the workpiece varies during grinding, the correction of the profile error can be performed automatically, in accordance with the amount of the actual thermal deformation of the workpiece. The thermal deformation of the workpiece is detected in process of grinding by using a wire strain gauge type or a differential transformer type pickup. The detected signal deforms the grinding machine slightly through an electro-hydraulic servo mechanism, until the relative displacement between the wheel and the workpiece cancels the profile error due to the thermal deformation of the workpiece. In this way, the effect of wheel sharpness variations, stock removal variations, workpiece hardness variations, variations of cooling condition during grinding are eliminated from the thermal profile error problem and the straightness of finished workpieces within $1\mu\text{m}$ for 60 mm length can be easily attained.

1. ま え が き

平面研削においては、研削熱のために工作物の上下面に生じた温度差は工作物を中凸状に変形させ、図1に示すような中凹状の形状誤差の原因となる^{3)~5)}。この形状誤差は、研削中冷却液を使用すればある程度は減少させることができる。しかし、生産能率を低下させることなく、冷却液を使用するだけで熱変形を完全に除去することは極めて困難なように思われる。

このような工作物の熱変形は工作機械

の精度とは無関係なものである。したがって、工作物の熱変形に起因する形状誤差は、いくら工作機械自身の精度を高めても除くことのできないものである。

前報¹⁾²⁾では、平面研削盤の弾性変形を利用すること

砥石切込み量: $2\mu\text{m}/\text{パス}$, 乾式, 砥石: WA 46 HmV, $200 \times 19 \times 50$, 砥石周速: 1470 m/min , テーブル速度: 8 m/min , 工作物材質: S 45 C, HRC 50, 研削幅: 15 mm , 研削長: 60 mm , 工作物厚さ: 20 mm

図1 工作物の熱変形に起因する形状誤差の例

* 原稿受付 昭和53年6月9日。昭和47年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和47年10月31日)にて発表。

** 正会員 千葉大学工学部(千葉市弥生町1-33)

*** 正会員 日産ディーゼル工業(株)(上尾市大字1-1)

図2 実験装置

によって前述の形状誤差を除去する方法を述べた。しかし、その方法は形状誤差が一定なものとして考えられている。したがって、たとえば砥石の切れ味、取り代、工作物のかたさ、冷却条件などが研削中に変動すれば、形状誤差を完全に除去することは期待できない。

本報では、工作物の実際の熱変形量に適應するように形状誤差の補正がなされ、したがって研削条件の変動があっても影響しないような新しい研削方法を提案している。

2. 研削方法の原理

本実験に使用した装置の略図を図2に示す。工作物の熱変形は図3に示すように抵抗線ひずみ計検出器または差動トランス形検出器によって研削中にインプロセス測定される。検出器のスタイラスは、工作物の側面に瞬間接着剤で接着された鋼の小片に接触するようになっている。鋼片はできるだけ工作物の下面に近い位置に接着する。熱変形によって工作物が中凸状に彎曲するとこの鋼片は上方に移動し、その変位量はスタイラスによって検出される。検出された変位は増幅器を通して数V程度の電圧に変換され、ポテンシオメータ1の両端子に印加される。ポテンシオメータ1のしゅう動子は補助カムによって往復運動をする。補助カムの輪郭は工作物の熱変形による形状誤差曲線に相似に作られており、テーブルに固定されたラックによって駆動されるようになっている。したがって、ポテンシオメータ1のしゅう動子からの瞬間的な出力電圧は、工作物の中央部における瞬間的熱変形量と瞬間的カムリフトの積、すなわち研削位置に

図3 工作物の熱変形検出器

おける熱変形量に比例する。この出力電圧はサーボ増幅器、サーボ弁を介して油圧アクチュエータを駆動する。アクチュエータの変位はポテンシオメータ2によって検出され、サーボ増幅器にネガティブフィードバックされる。一方、アクチュエータの変位は、連結ロッド、オーバーアームを介して研削盤を弾性変形させる。したがって、砥石と工作物の相対位置は、検出された工作物の熱変形量に応じて変化し、形状誤差は除去されることになる。装置全体のシステム構成は図4のブロック線図で表される。

3. 制御装置の構成

3.1 補助カムの輪郭

補助カムの輪郭は、図1で示したような普通の研削方法で仕上げられた工作物の形状曲線に対応するように決定されている。補助カムの回転速度はピニオンの歯数を

図4 制御装置全体の構成を表すブロック線図

表1 研削盤の主要諸元

形式	横軸角テーブル形
テーブル駆動機構	油圧駆動
最大テーブル行程	640 mm
最小砥石切込み量	2 μm
砥石車寸法	200×19×50
砥石軸回転速度	2 375 rpm
使用砥石	WA 46 HmV

表2 研削盤, オーバアームの静的, 動的力学的特性

	研削盤	オーバアーム
静剛性 (kgf/mm)	8 300	6.8
固有振動数 (Hz)	250	41
減衰比	0.07	0.001

表3 電気-油圧サーボ機構の要素の主要諸元

サーボ弁	
定格流量 (l/min)	15
定格電流 (mA)	30
定格供給油圧 (kgf/cm ²)	140
周波数特性 (Hz)	120 ^{-6dB} _{-90°}
サーボ増幅器	
最大利得 (mA/mV)	30/50
最大入力電圧 (V)	±10
周波数特性 (Hz)	600 ^{-8dB} _{-45°}
油圧アクチュエータ	
定格圧力 (kgf/cm ²)	60
ピストン面積 (cm ²)	4.5
最大ストローク (cm)	2.0
油圧パワーユニット	
定格圧力 (kgf/cm ²)	60
定格流量 (l/min)	6
タンク容積 (l)	40
モータ動力 (kW)	1.5

変えることにより変更することができるし, ポテンシオメータ1のしゅう動子のストロークはL形レバーのレバー比を変えることによって調節できるので, 工作物の長さやポテンシオメータの有効ストローク長などから生じる幾何学的制約に対して融通性を持っており, いろいろな作業条件に対しても1個のカムがあれば実用上十分である。

3.2 研削盤の特性

実験に使用した研削盤の主要諸元を表1に示す。また, 静的, 動的な力学的特性を表2に示す。静剛性はオーバアームの後端に垂直に外力を加えた時の砥石-工作物間の相対変位を測定することによって求めた。固有振動数と減衰比は砥石に打撃を加えた場合の減衰自由振動および加振実験による強制振動の応答曲線から求めた。なお, 表2にはオーバアームの特性も示してある。オーバアームの剛性はかなり低く設計してあるので, 油圧アクチュエータのストロークを大きくとることができる。

3.3 電気-油圧サーボ機構の各要素の特性

実験に使用した電気-油圧サーボ機構の各要素の主要な諸元を表3に示す。

3.4 制御系全体の特性

上述の要素を用いて構成された制御系に対して, 工作物の熱変形量とそれを補正するための砥石-工作物間の相対変位の関係を求めると, いくつかの近似を行えば, 数十 Hz までの低い周波数範囲では次式のようになる。

$$y = \frac{\left(\frac{K_D K_L k_a}{K_P L_P k_m} \right)}{\left(\frac{A}{K_S K_V K_P} \cdot s + 1 \right)} \cdot (x_0 \cdot \varepsilon + \varepsilon_0 \cdot x) \quad (1)$$

ここで,

- y : 砥石-工作物間の相対変位 (mm)
- ε : 検出された工作物の熱変形量の変化分 (mm)
- x : カムリフトの変化分 (mm)
- x_0 : 基準点におけるカムリフト (mm)
- ε_0 : 基準点における熱変形量 (mm)
- K_D : 熱変形検出器 (増幅器を含む) のゲイン定数 (V/mm)
- K_L : L形レバーのレバー比
- K_P : ポテンシオメータ2のゲイン定数 (V/mm)
- L_P : ポテンシオメータの長さ (mm)
- K_S : サーボ増幅器のゲイン定数 (A/V)
- K_V : サーボ弁のゲイン定数 (mm³/(s·mA))
- A : アクチュエータのピストン面積 (mm²)
- k_a : オーバアームの剛性 (kgf/mm)
- k_m : 研削盤の剛性 (kgf/mm)
- s : ラプラス演算子 (1/s)

4. 実験結果と考察

4.1 制御系全体の静・動特性

静的状態における砥石-工作物間の相対変位とポテンシオメータ1の端子電圧の関係を種々のカムリフトをパラメータとして図5に示す。この図から, ポテンシオメータ1の端子電圧, すなわち, 工作物の中央部における熱変形量とカム変位の変化, いいかえれば研削点における熱変形量の変化に応じて, 砥石-工作物間の相対位置は正確に変化することがわかる。また, 実測結果は式(1)から理論的に計算した結果と良く一致していることがわか

図5 制御装置の静特性

図6 制御装置の動特性

る。

ポテンシオメータ1の端子に正弦波電圧を印加し、その周波数を変化させて、砥石-工作物間の相対変位の振幅と位相の変化を測定した。その測定結果の一例を図6に示す。約5 Hzまでの周波数範囲では、砥石-工作物間の相対変位の振幅はほとんど指令値と等しく、また位相のずれも小さい。また、実測結果は式(1)から求めた理論計算結果と良く一致している。この周波数応答特性は、大部分の平面研削作業に対して、十分な性能であると考えられる。

4.2 研削実験

この制御装置を用いて実際に研削作業を行い、工作物

図7 制御装置を用いて研削した場合の工作物の熱変形と砥石-工作物間の相対変位の記録例

の熱変形と砥石-工作物間の補正相対変位をオシログラムに記録した。図7はその一例で、これを見ると砥石-工作物間の相対位置は、工作物の熱変形量の変化に良く対

図8 研削後の工作物形状

応して自動的に変化していることがわかる。

この制御装置を働かせて仕上げた工作物と普通の方法で仕上げた工作物の形状を図8に示す。普通の方法では長さ60 mmあたり $3\mu\text{m}$ 程度の中凹状誤差が生じる場合に、この制御装置を働かせると、研削条件のいかんにかかわらず誤差は長さ60 mmあたり $1\mu\text{m}$ 以内に減少できることがわかる。

4.3 実用上の問題に対する考察

この制御装置を用いる研削方法を実用に供する場合、次のような問題について吟味、検討する必要がある。すなわち、①研削盤の弾性変形によって、砥石軸が傾斜することの影響、②図1に示したような幅方向の形状誤差、③1パス中の非定常熱変形、④熱変形検出器の取扱いの複雑さなどである。

①については、大部分の横軸平面研削盤では、砥石軸ハウジングの突出し長さがかなり長いことと砥石幅がかなりせまいことのため、砥石幅の両端での補正変位の違いは平均値の数%程度にすぎず、あまり大きな影響は生じないと考えられる。

②については、まず、工作物の幅が砥石幅より小さい場合は、通常、サドル前後方向に送りをかけない、いわゆるブランチ研削方式がとられるであろう。その場合はドレッシング時に砥石の輪郭を修正してやれば、サドル前後方向の形状誤差は、ある程度減少させることができる。工作物の幅が砥石幅よりも大きい場合は、サドルの前後送りをかけるので事情はやや複雑になるが、原理的には上述の研削方法はこのような2次元的な問題に対しても適用できると考えられる。

③については、厳密な意味では、この研削方法は1パス中の非定常熱変形に対しては効果は期待できない。なぜならば、この方法では工作物の熱変形は工作物の中央だけで測定されており、ポテンショメータ1のしゅう動子からの出力電圧は、研削位置における瞬間熱変形量と必ずしも一致しないからである。しかし、この違いは普通の研削条件では僅少である。もし、この違いを原理的

に除こうとするには、研削位置における瞬間熱変形量を検出し得るような新しい検出器を開発する必要がある。

④については、本実験で用いた検出器は十分実用に耐えるものではあるが、さらに取扱い容易でかつ信頼性の高い特別な熱変形検出器の開発が望まれる。

5. あとがき

新しい研削方法による実験結果から次の結論が得られた。

- (1) 研削中の工作物の熱変形量に適應するように砥石-工作物間に補正相対変位を与えることができる。
- (2) 研削条件が変動しても、加工能率を低下させることなく、工作物の真直度を長さ60 mmあたり $1\mu\text{m}$ 以内におさめることができる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり黒田精工株式会社、岡本工作機械製作所から多大の便宜をはかっていただいた。また、本研究の一部は昭和48年度文部省科学研究費の援助を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) 中野嘉邦, 浜野康幸: 平面研削におけるといし-工作物間の相対位置の制御——工作機械の弾性変形を利用する加工精度向上の研究(第1報), 精密機械, 38, 3 (1972) 254.
- 2) Y. Nakano and Y. Hamano: Size and Form Control in Surface Grinding—Studies on the Improvement of Machining Accuracies by Making Use of the Elastic Deformation of Machine Tools (1st Report), Bull. JSPE, 6, 1, (1972) 23.
- 3) 中野嘉邦, 太田勝彦: 平面研削中の工作物の熱変形と研削後の形状誤差——平面研削における工作物の熱変形の研究(第1報), 精密機械, 39, 2 (1973) 225.
- 4) Y. Nakano and K. Ōta: Steady-state Thermal Deformations of Workpieces in Surface Grinding, Bull. JSPE, 7, 2, (1973) 57.
- 5) 中野嘉邦, 太田勝彦: 平面研削中の工作物の定常熱変形の解析——平面研削における工作物の熱変形の研究(第2報), 精密機械, 41, 4 (1975) 364.