インプロセス計測加工精度補償の研究 (第5報)*

——工具-変位計オフセット量の残留形状誤差への影響と補正制御できない特異点の除去対策——

宇田 豊** 河野 嗣男*** 矢澤 孝哲†

In-process Measurement and Workpiece-Referred
Form Accuracy Control (5th Report)
-The Effects of Tool-Sensor Offset Distance for Remained Form Error
and the Elimination of Uncontrollable Point-

Yutaka UDA, Tsuguo KOHNO and Takanori YAZAWA

The author proposed a new system, called the workpiece-referred form accuracy control system (WORFAC), and confirmed an effectiveness of this manufacturing method. In the 3rd report, this method was applied to cylindrical turning using an ordinary NC machine tool, and the corrective servo coefficient was found out. In the 4th report, the effects of coefficient m for error convergency of the first referred surface and for disturbance elimination were cleared. In this study, the effect of tool-sensor offset distance x_g for remained error is cleared by simulation. In the case of $x_g = (n+1/2)\lambda$, the remained form error at servo-on is the same as that case of servo-off, where λ is the wavelength of the tool post error motion, and n is positive whole number. This case is such a special point as uncontrollable for form accuracy improvement. Then the existence of the special point is confirmed by the experiment. In this paper, it is shown that using another sensor attached to the same tool post, the special point can be eliminated. Also an influence of the extra sensor's setting error is simulated.

Key words: in-process measurement, form accuracy, control systems, single-point diamond turning

1. はじめに

超精密加工技術の進歩にともない、要求精度が高精度化するばかりでなく、天体望遠鏡の主鏡に代表されるように大型化が望まれている。それに対し、超精密加工機の性能向上をはかるため、機械要素の高性能化、加工環境の向上、インプロセス計測の利用、等の研究が行われている。一方、超精密加工技術の役割は、本来の役割である精度へのチャレンジだけでなく、一般加工技術への波及効果的役割がある。筆者らは、これらの問題点に対し、インプロセス計測技術を加工技術へ取り入れ、工作機械本来の性能以上の加工精度を得る手法として「加工面基準制御加工法（以下、WORFACと呼ぶ）」を提案し、有効な手段であることを確認している¹⁾²⁾。

第3報にて、①WORFACが一般の工作機械にも適応できること、②補正制御係数 m を用いることにより制御状態を変化させることができること、③補正制御の形状をシミュレーションにより予測できること、を見いだした³⁾。補正制御係数 m ($0 \leq m \leq 1$) とは、変位計の検出量に掛ける係数で、検出量と同じ量をフィードバック量にしている従来の制御に対し、フィードバック量を変化させる係数のことである。

第4報では、補正制御係数 m を用いた制御加工における、①

第一参照面誤差収束の特性、②外乱除去の特性、を明らかにした⁴⁾。ここで、第一参照面とは、制御開始時の測定点と加工点との区間の、基準となる加工面であり、制御されていない加工面である。

第3、4報では、工具-変位計オフセット量が、工具運動誤差周期に比べて小さく、限りなく0に近いとして取り扱ってきた。工具-変位計オフセット量とは、加工点と測定点との工具送り方向の距離であり、加工後の面を基準とする本加工法の特有のオフセット量である。

本報では、工具-変位計オフセット量をパラメータとして、残留形状誤差に及ぼす影響を、シミュレーションにより検討した。その結果、補正制御できない特異点が存在することが分かり、加工実験により確認した。さらに、この特異点を除去する対策についても検討した。

2. 加工面基準制御加工法

本題にはいる前に、本加工法の原理、加工実験装置、シミュレーション方法について概略を説明する。

2.1 本加工法の原理

WORFACとは、「最終的な表面の加工精度は工具と加工物との相対位置関係により決定される。」ということに注目している。すなわち、既に加工された面を測定の基準として、工具と加工物の相対位置関係をインプロセス計測し、工具の切込み量を制御して加工する方法である。図1¹⁾にWORFACの原理概略図を示す。微小切込み工具台（以下、MTS: Micro Tool Servo と呼ぶ）と表面を計測する変位計を用いて、既に加工された面を測定基準とし、工具と加工物の相対位置関係を

* 原稿受付 平成6年6月23日

** 正会員 東京都立科学技術大学（現、(株)ニコン；東京都品川区西大井1-6-3）

*** 正会員 東京都立科学技術大学（日野市旭が丘6-6）

† 学生会員 東京都立科学技術大学

インプロセス計測する。その信号により工具の切込み量を制御し、工具と加工表面との相対距離を一定に保つ仕組みである。

Fig.1 Principle of WORFAC

2.2 実験装置

MTS、変位計、加工物の配置を示した実験装置のシステム構成図を図2³⁾に示す。MTSと変位計は、同じ工具スライド上のテーブルに取り付けてある。変位計は、非接触光学式変位計K-HIPOSSを使用し、加工物を挟んでMTSに対向して取り付け、加工後の面を測定するため、工具台進行方向に対して、わずかな間隔で後方に位置している。変位計の出力は、微細な表面粗さの影響を受けないように、10Hzのローパスフィルタを通して制御装置に出力される。MTSは、ガイド部の平行板ばねに貼り付けられたひずみゲージにより、駆動部の圧電素子のヒステリシスを補正し、さらに切込み方向の剛性を高めている。使用した主な実験機器は以下の通りである。

NC旋盤：TC2-MII（TAKISAWA製）

変位計：K-HIPOSS（オリンパス製）

MTS：自作

Fig.2 Block diagram of WORFAC experiment

2.3 シミュレーション方法

旋盤による円筒切削機構をモデル化し、図3³⁾に示す。ここでのシミュレーションは、以下に挙げる項目の仮定を設けている。

- ①工具台の切込み方向の誤差運動は、正弦波（周期 λ ）とする。
- ②実際には、スパイラル状に円筒切削されるが、二次元的（断面）に切削されるとする。
- ③MTSと変位計は、工具台に剛体として取り付けられているため、同じ動きをする。

- ④その他の旋盤の運動、MTS、変位計は理想の特性を持つものとする。

項目①は、どのような誤差運動もフーリエ展開でき、種々の正弦波の重ね合わせで表せるという原理から一般性のあるものである。

加工物の軸方向をX軸、加工点の位置を x 、工具台の半径方向の挙動を $T_0(x)$ とする。制御を行った場合の工具先端の挙動を $T(x)$ 、加工点と測定点とのX軸方向の距離を工具-変位計オフセット量 x_0 とすると、変位計の検出量 $S(x)$ は、次の式のようにになる。

$$S(x) = T_0(x) + T(x - x_0) + C \quad (1)$$

ここで、 C は制御開始位置 x_0 での検出量 $S(x_0)$ を0となるように設定される。MTSへの制御量は、検出量 $S(x)$ と補正制御係数 m の積とする。 $T(x)$ は次の式になり、この計算を順次行うことによりシミュレーションができる。

$$\begin{aligned} T(x) &= T_0(x) - m S(x) \\ &= (1 - m) T_0(x) - m T(x - x_0) - m C \end{aligned} \quad (2)$$

Fig.3 Simulation model of the experiment

3. 工具-変位計オフセット量の影響

第3報にて補正制御係数 m を用いることにより、残留形状誤差率 M との関係が $M = (1 - m)/(1 + m)$ になることを見いだした。残留形状誤差率とは、制御を行った場合の形状誤差と、制御を行わない場合の形状誤差との比率である。しかし、形状誤差の周期 λ に比べて x_0 が限りなく小さく、0と見なして M を求めている。実際には、工具や変位計の大きさ、切削液や切りくずの影響により、 x_0 を0にすることは困難である。さらに、 λ は未知数であるため、 x_0 を0と見なすことが出来ない場合が生じてくる。ここでは、 x_0 をパラメータとして、 M にどのように影響を及ぼすかについて検討する。

3.1 シミュレーションによる検討

既に述べたように λ は未知数であるため、統一的な検討をするために、パラメータを x_0/λ の比で取り扱うことにする。 $m = 0.5$ として、 x_0/λ を変化させてシミュレーションした結果を図4に示す。まず、第一参照面誤差収束後の振幅について検討する。 x_0/λ が1/2に近づくにつれて、振幅は大きくなり、 $x_0/\lambda = 1/2$ で全く補正制御ができなくなる。その後、 x_0/λ が1に近づくにつれて、振幅は小さくなり、 $x_0/\lambda = 0$ と同様に $x_0/\lambda = 1$ で第3報で見いだした $(1 - m)/(1 + m)$ になる。 $x_0/\lambda > 1$ についても、 λ の周期性がある。

m を変化させても、 $m = 0.5$ の場合と同じ傾向を示し、 x_0/λ

Fig.4 Results of simulation (in the case of changing x_g , $m=0.5$)

Fig.5 Diagram of relationship between x_g/λ and M

λ を横軸に、 M を縦軸にしてみると、図5の関係が得られた。 m をパラメータとして、図5の関係を検討する。 M について、 $x_g/\lambda = 0, 1$ （または、 $x_g/\lambda = N$, N : 正整数）での縦軸の接点は、第3報で求めた $M = (1 - m)/(1 + m)$ になり、 $x_g/\lambda = 1/2$ （または、 $x_g/\lambda = N + 1/2$ ）で $M = 1$ と補正制御が出来ない特異点となる。そして、 $x_g/\lambda = 1/2$ 付近では、 m が大きいほど M は急峻に変化する。

3.2 特異点での加工実験

既に述べた実験装置を用い、特異点でのアルミニウム合金の円筒切削を行った。使用した旋盤の工具台は送りねじの影響で誤差運動周期が6 mmであることが分かっているため、 $x_g = 3$ mmとして加工実験を行う。補正制御係数が大きくなるにつれて、特異点付近で M が急峻に変化し、変位計の取付誤差の影響を受けるので、それを防ぐため、補正制御係数 $m = 0.5$ を選ぶことにする。その他の切削条件は以下のとおりである。

主軸回転数：1000 rpm

送り速度：20 $\mu\text{m}/\text{rev}$

切込み量：10 μm

加工物：アルミニウム合金（5056相当品）

Fig.6 Figure error (in the case of $x_g/\lambda = 0.5$)

長さ = 150 mm, 直径 = $\phi 80$ mm

切削後、形状を軸方向に測定（表面粗さ計：サーフコム204B：東京精密製）した結果を図6に示す。測定結果から、工具台の運動誤差による振幅0.4 μm 、周期6 mmのうねりが、補正制御後も補正されずに観測でき、シミュレーションと同じ結果が得られた。補正制御開始点の前後で傾きの変化が観察されるが、これは主軸と工具スライドのアライメント誤差による影響である。アライメント誤差は、周期が無限大の正弦波と見なすことができ、 $x_g/\lambda = 0$ の場合であるので、 $M = (1 - m)/(1 + m)$ に補正されることになる。

4. 特異点の除去対策

4.1 除去対策について

特異点では、すべての m において、補正制御が行われないことを、図5に示した。これは、検出量 $S(x) = C$ （一定）となるためである。さらに、 λ は任意の値であり、誤差運動はこれらの周期成分の集合であることより、現状の構成では特異点を避けることはできない。そこで、変位計を2台とし、片方が特異点になっても、他方が特異点にならないように配置できれば特異点除去が可能と考えられる。

変位計1のオフセット量を x_{g1} 、変位計2を x_{g2} とする。特異点を除去するためには、 $x_{g1} \neq (n + 1/2)\lambda$ 、または $x_{g2} \neq (j + 1/2)\lambda$ （ j : 正整数）の条件を満たせばよい。上記の条件を満たす一つの解として、 $x_{g2} = 2 \cdot x_{g1}$ がある。 x_{g1} が特異点の場合、 $x_{g2} = 2(n + 1/2)\lambda = (2n + 1)\lambda$ となり、 $2n + 1$ は正整数であるから x_{g2} は特異点とはならない。そして、 x_{g2} が特異点の場合、 $x_{g1} = (j + 1/2)\lambda/2 = (k \pm 1/4)\lambda$ （ k : 正整数）となり、 x_{g1} は特異点にならない。

4.2 シミュレーション方法および結果

変位計2台の円筒切削機構をモデル化し、図7に示す。変位計1の検出量 $S_1(x)$ 、変位計2の検出量 $S_2(x)$ は、以下の式のようになる。

$$S_1(x) = T_0(x) + T(x - x_{g1}) + C_1 \quad (3)$$

$$S_2(x) = T_0(x) + T(x - x_{g2}) + C_2 \quad (4)$$

ここで、 C_1, C_2 は制御開始位置 x_0 での検出量 $S_1(x_0), S_2(x_0)$ を0となるように設定される。微小切込み工具台MTSへの制御量は、 $S_1(x)$ と $S_2(x)$ の平均値 $S(x)$ と m の積とする。 $T(x)$ は次の式になり、この計算を順次行うことによりシミュレーションができる。

$$T(x) = T_0(x) - m S(x) \\ = T_0(x) - m \{S_1(x) + S_2(x)\} / 2 \quad (5)$$

$m = 0.5$ の場合について、 x_g/λ をパラメータとして、変位計2台でのシミュレーション結果の一例を図8に示す。変位計1台のシミュレーション結果（図4）と比較してみると、工具-工作物オフセット量が特異点でない場合、収束後の残留形状誤差が変位計2台の方が多少大きくなる。しかし、特異点でも補正制御が可能で、残留形状誤差がかなり改善されることがわかる。横軸に x_g/λ 、縦軸に M として、シミュレーション結果をまとめると図9の関係が得られる。ピークが、 $x_g/\lambda = \lambda/3$ 、 $2\lambda/3$ 付近の2箇所が存在するが、 M の値が小さくなり、全体的に改善されている。 M は変位計2台の場合も、 λ の周期性がある。

Fig.7 Simulation model of two sensors

4.3 セッティング誤差の影響

2台目のセッティング誤差が残留形状誤差率 M にどのように影響するかを調べる。本制御加工では、表面粗さより周期の長い成分の誤差運動を、制御加工の対象としている。具体的な制御の周波数領域を図10に示す。図10は制御を行わないで加工した形状を周波数解析した結果で、工具送りマークである $20\mu\text{m}$ より左側の誤差成分を制御対象としている。また、図6に示す制御加工実験において、変位計セッティングが $\pm 2\mu\text{m}$ 以下で可能であった。このことより、特異点除去対策の実現できるセッティング誤差量は、スライド誤差運動の周期 λ に対して、 $\pm 10\%$ と考えられる。セッティング誤差が $\pm 10\%$ の場合について、シミュレーションを行い、横軸に x_g/λ 、縦軸に M として、結果をまとめると、図11に示す関係が得られた。

Fig.10 FFT analysis of machined figure with no servo control

 Fig.8 Results of simulations (in the case of two sensors, $m=0.5$)

 Fig.9 Diagram of relationship between x_g/λ and M (in the case of two sensors)

Fig.11 Diagram of relationship between x_g/λ and M (in the case of $\pm 10\%$ setting error)

セッティング誤差がマイナスの場合，全体的に右に移動し，1番目のピーク（左側）が大きくなり，2番目のピーク（右側）が小さくなる．セッティング誤差がプラスの場合は，逆の結果となる．このように，セッティング誤差の影響により，残留形状誤差率 M がわずかに大きくなる場所があるが，この除去対策の実現可能なセッティング誤差範囲で，補正効果が得られることが分かった．

5. ま と め

汎用旋盤での円筒切削に，加工面基準制御加工法を適用し，工具－変位計オフセット量 x_g と補正制御係数 m が，残留形状誤差率 M に及ぼす影響について検討した．その結果，補正制御できない特異点が存在することを見だし，特異点の除去対策についても検討した．

(1) x_g の M に及ぼす影響

① $x_g/\lambda = n$ で $M = (1 - m)/(1 + m)$ となる． $x_g/\lambda = n + 1/2$ で $M = 1$ となり，補正制御できない特異点となる．（ n ：正整数）

② M は周期性（ λ ）がある．

(2) 特異点の除去対策

① $x_{g2} = 2 \cdot x_{g1}$ になるよう，2台目の変位計を配置することにより，特異点が除去できる．

② 特異点は除去できるが，ピークが， $x_{g1} = \lambda/3$ ， $2\lambda/3$ 付近の2箇所に残る．しかし，残留形状誤差率 M が小さくなることにより全体的に大幅に改善されており，補正制御が可能である．

③ セッティング誤差がマイナスの場合，全体的に右に移動し，1番目のピークが大きくなり2番目のピークが小さくなる．

プラスの場合は，逆になる．

④ 残留形状誤差率 M は変位計2台の場合も，誤差運動周期 λ の周期性がある．

変位計2台を用いた特異点除去加工実験は，現在装置の関係で行っておらず，現在準備中である．しかし，シミュレーションによる補正制御加工後の形状予測が可能であることは，第3報，第4報等において十分確認してきたので，シミュレーションと同じ特異点除去加工実験結果が得られる可能性は高い．

謝 辞

本研究の遂行にあたり，（社）精密工学会「インプロセス計測加工制御技術専門委員会」委員の方々，本学研究室の学生，特に林浩二，渡辺晴夫両君に協力を得たことを記し，謝意を表す．

参 考 文 献

- 1) 河野嗣男ほか：インプロセス計測加工精度補償の研究（第1報）－加工面基準制御加工法の原理と基礎実験－，精密工学会誌，54, 8 (1988)1463.
- 2) 内田 出ほか：インプロセス計測加工精度補償の研究（第2報）－K-HIP OSSと平行ばね式微小切込み工具台の応用－，精密工学会誌，56, 1 (1990)134.
- 3) 河野嗣男ほか：インプロセス計測加工精度補償の研究（第3報）－汎用旋盤を用いた円筒切削の制御－，精密工学会誌，59, 6 (1993)951.
- 4) 宇田 豊ほか：インプロセス計測加工精度補償の研究（第4報）－第一参照面誤差収束と外乱除去に対する補正制御係数 m の特性－，精密工学会誌，60, 8 (1994)1159.