インプロセス計測加工精度補償の研究 (第2報)*

[JSPE-56-01
'90-01-134]

—K-HIPOSS と平行板ばね式微小切込み工具台の応用—

内 田 出** 河 野 嗣 男*** 尾 西 隆†
岡 崎 祐 一†† 小 澤 則 光†† 竹 内 喜 代 松††

In-process Measurement and Workpiece-Referred Form Accuracy Control (2nd Report)

- The Application of K-HIPOSS and a Parallel Leaf-Spring Micro-Tool Servo -

Izuru Uchida, Tsuguo Kohno, Takashi Onishi, Yuichi Okazaki, Norimitu Ozawa and Kiyomatsu Takeuchi

Following the precision machining method with a control system (Workpiece-Referred Form Accuracy Control : WORFAC) proposed in the previous report, in this report the system and an experiment with an in-process measurement sensor, K-HIPOSS, and a parallel leaf-spring micro-tool servo are described. Comparing to the standard HIPOSS model, K-HIPOSS features a long working distance and a wide dynamic range of about $6\mu\text{m}$, so that it is more suitable for in-process measurement. A parallel leaf-spring micro-tool servo uses a piezoelectric actuator to drive the diamond tool, of which displacement is detected by the strain - gauges on the leaf-springs. This strain signal is used for compensating the hysteresis of a piezo electric stack and improving the motion performance of a feedback loop. The WORFAC experiment was applied to a simple plane - mirror turning and the result demonstrated its perfect compensation for disturbances.

Key words: in-process measurement, single-point diamond turning, micro-positioning control, PZT, workpiece-referred control, form accuracy

1. は じ め に

ダイヤモンドバイトを用いて超精密切削加工を行う場合、加工物の形状精度は一義的には工作機械の精度に依存する。特に、旋削加工においては、加工面と工具との相対位置関係の制御が重要な課題となってくる。

本研究は、比較的大口径の金属鏡を高精度に加工することを目的としている。前報では、切削直後の加工面と工具台との間隔をインプロセスで測定し、切込み量を制御しながら加工を進める「加工面基準制御加工法」の原理について述べた。また、基礎実験として、加工面と工具台との間に故意に与えた外乱を除去することを試み、完全ではなかったものの、補正が可能なことを示した¹⁾。

本報では、平行板ばね式微小切込み機構 (Micro-tool Servo) を改良して、超精密加工制御のための要素として十分な特性を備えたものとし、これに、インプロセス計測に適するように新たに開発された K-H IPOSS を組み合わせて、加工面基準制御法を適用して行った実験の結果について考察する。

2. 加工面基準制御加工法の原理¹⁾

超精密旋盤で行われている制御方法の一つは、機械とは独立して設けた「計測フレーム」を基準として、レーザ干渉計や変位計で工具台の位置を測定し、フィードバック制御を行うものである。しかし、この制御の補正は部分的であり、主軸系などの誤差を取り除くことはできない。加工物が大型になるにつれて測定の精度を保つことが難しくなり、また、ストロークの大きい工具テーブルの位置決め精度には、おのずと限界がある。

これに対して加工面基準制御加工法は、加工面と工具台との距離を直接計測し、切込み量を制御することによって、加工の精度を上げようというものである。図1がその具体的な原理模式図で、工具テーブルに、加工面との間隔をインプロセスで測定する変位計と、切込み量を制御する機構を設置する。加工面に対して

* 原稿受付 平成元年6月21日。昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会 (昭和63年10月4日) にて発表

** 学生会員 金沢大学工学部 (現、横河電機株式会社測定器事業部：武蔵野市中町2-9-32)

*** 正会員 東京都立科学技術大学 (日野市旭が丘6-6)

† 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)

†† 正会員 機械技術研究所 (つくば市並木1-2)

Fig. 1 Principle of workpiece-referred form accuracy control

工具台が遠ざかれば、変位計がその距離の変動分を検出する信号を出し、微小切込み工具台がバイトを送り出す。逆に、工具台が近付けば、バイトは引っ込められる。平面ならそのまま加工を続け、曲面の場合は制御系に任意の関数を加えるようにする。ここでは、工具テーブルのヨーイング誤差はないものと仮定し、この誤差に対しては別に考察する。

3. インプロセス計測用センサ (K-HIPOSS)

加工面基準制御加工法では、加工中に工具台と加工面との間隔を測定する必要がある。本研究では、超精密切削された面が鏡面であることから、光学式微小変位計 (HIPOSS) を、インプロセス計測用のセンサとして用いている²⁾。HIPOSSを超精密旋盤の工具台に取り付けて行ったオンマシン測定実験でも、機械の精度測定や、ワークの形状測定が可能なことは、前報で述べた。しかし、従来のHIPOSSは、測定範囲が $\pm 1 \mu\text{m}$ とやや小さいこと、ワーキングディスタンスが 0.6 mm なので、高速で回転している加工面を測定するには、衝突などを避けるために注意を払う必要があった。

Fig. 2 Photograph of K-HIPOSS

Fig. 3 Relationship between displacement and output voltage

図2は、従来機の対物レンズの倍率を変えて、インプロセス計測に適するようにしたK-HIPOSS³⁾である。図3のように、測定範囲は焦点位置 (出力0 V) を中心として $\pm 3 \mu\text{m}$ 以上確保されており、しかも、ほぼ従来に近い分解能 (1 nm) を保っている。また、ワーキングディスタンスも 8.1 mm に広がったことから、加工面基準制御加工法のための間隔センサとして、非常に使いやすいものになっている。

4. 微小切込み工具台

4.1 微小切込み工具台の構造

加工面基準制御加工法では、変位計で検出された加工面と工具台との相対距離にしたがって、工具の切込み量を制御する機構が必要である。

微小切込み工具台に求められる機能は、工具刃先の位置決めを、目標値に従って、正確かつ高速に行えることであり、さらに刃先の位置が、切削抵抗の変動などによって影響を受けないようにしなければならない。このような理由から、一体切欠き型弾性支持案内機構に圧電素子を組み込んだ方式の微小切込み工具台が開発され、切削試験でも十分な切込み分解能が示されて

Fig. 4 Micro-tool servo

いる⁴⁾。また、前報で述べたように、平行板ばね方式の微小切込み工具台も、切込み量の制御の機構として作動することが確認されている。

今回製作したものは、平行板ばね方式の微小切込み工具台であり、図4がその外観図である。弾性支持案内として、平行板ばねを組み合わせた機構を用い、これがバイトホルダを支えている。駆動源には、積層型の圧電素子を用い、また、機構全体を確実に作動させるために、素子を組み込む際にプリロードを加えている。

本機の基本的な構造は、前報で製作したものと同様であるが、ストレインゲージを板ばねの左右両方に貼り、それぞれ独立にひずみを検出して、両者のゲインを合わせた後、それを平均化することによって、送り分力の変動等の影響を受けないようにしている。ゲージを圧電素子に近い側の板ばねにのみ貼ることによって、切削熱による影響を避けるようにしている。また、切削する位置と、圧電素子の力が加わる位置、そして

Fig. 5 Relations between displacement and output voltage of strain-gauge

Fig. 6 Block diagram of micro-tool servo

ストレインゲージが検出する位置とをすべて同一平面上に配置し、アッペの原理を満足するような構造にした。

板ばねに貼ったストレインゲージは、バイトホルダの実際の移動量を検出し、ローカルなフィードバック制御を行うことによって、圧電素子のヒステリシスを解消させ、また切込み方向の剛性を高めることができる。図5は、バイトホルダの移動量をレーザ干渉計で測定し、ストレインゲージの出力を校正したものである。図から、 $\pm 5 \mu\text{m}$ のストロークが確保されていること、さらに、ストレインゲージ出力の線形性から、変位量検出センサとしての有効性が確認できる。

4.2 微小切込み工具台の特性

図7は、微小切込み工具台の静特性を調べたものである。工具台のフルストローク ($\pm 5 \mu\text{m}$) のうち、ここでは切削時の動作点付近の $\pm 3 \mu\text{m}$ で作動させた。開ループ制御と閉ループ制御では、駆動方法の違いから印加電圧が異なっているが、閉ループ制御によって圧電素子のヒステリシスがほぼ解消されていることがわかる。

図8は、正弦波を掃引して求めた周波数応答である。応答周波数は 100 Hz (-3 dB) であるが、この

Fig. 7 Static characteristics

Fig. 8 Frequency response

Fig. 9 Micro displacement test

値は、ループゲインの調整及びフィルタの選択によって、300 Hz程度まで高めることが可能である。

図9は、微小切込み工具台を矩形波で駆動させ、バイトホルダの移動量の最小分解能をHIPOSSで測定したものである。(a)は10 nmの振幅で、(b)は1 nmの振幅でそれぞれ駆動させたものだが、この結果から、組合せ平行板ばね機構が、10 nm以下の微小変位台としての機能を果たしていることがわかる。図の波形に重畳しているノイズは、フィードバックセンサとして用いているストレインゲージの測定系から発生しているものであり、これが解消されれば、より分解能を高めることができる。

さらに、閉ループ制御時の切込み方向の静剛性は、 $1.2 \text{ kN}/\mu\text{m}$ であり、これは超精密切削での切削力の変動分が10 N以下であることから、十分な値であると言える。

5. 加工面形状の転写実験

K-HIPOSSと微小切込み工具台を組み合わせたシステムで、加工面基準制御法での加工を行う場合、

Fig. 10 Reproduction of the standard surface

基準となる面は最初に機械精度で切削する中心部分であり、その形状を維持しながら残りの外周部分を切削することになる。

図10のように、平面鏡を中心から切削する場合、センサと工具とが d だけ離れていることから、中心から半径 $d/2$ の区間は機械精度で切削され、これが基準の面(a)となる。(a)の形状が、次の区間(b)に転写され、さらにセンサが(b)の区間を検出しながら、最外周の(c)の区間を切削することになる。

この実験の目的は、加工面基準制御法で加工を行う際の、基準面の転写性能を確かめることである。そこで、中心部分の基準面に、転写性能評価の目印となるような2つの溝を形成させた。これには、基準面の切削中に、微小切込み工具台に関数発生器から矩形波を入力することによって、深さが $0.5 \mu\text{m}$ 、幅がそれぞれ1 mmと2 mmの溝を作成した。加工条件は、主軸回転数1160 rpm、工具の送りは $17.2 \mu\text{m}/\text{rev}$ 、切込み量は $20 \mu\text{m}$ で、工具には刃先半径4 mmのダイヤモンドバイトを用いた。

基準面の溝の加工が終わってから平面切削を続け、その溝の部分をK-HIPOSSが検出するような区間に入る直前に、加工面基準制御法に切り替えると、そのまま進行すれば(b)の部分に溝の形状が転写され、さらに、(b)の面がK-HIPOSSで検出され、(b)を基準にして最外周の(c)の区間が切削される。(b)及び(c)の面は、基準面の形状を1及び2回にわたって転写したものであり、これらの形状と基準面とを比較して、加工面基準制御法の転写性能が調べられる。

図11は、加工後の基準面(a)の形状と、転写された面(b)、(c)の形状を、触針式粗さ計で測定した結果である。(a)の結果から、微小切込み工具台によって、基準面に入力信号に従った溝が形成されていることがわかる。(a)と(b)、(c)とを比較する

Fig. 11 Results of reproduction experiment

と、目印としてつけた溝が比較的大きなものであったため、形状が忠実に転写されていることがわかる。逆に言えば、基準面が理想的な面であれば、これを転写させて外周まで良好な面を切削できることが示されたと言える。しかし、(b)、(c)の面を良く観察すると、微少な誤差が少しずつ累積されていくこともわかる。これは、現在の実験装置のような1センサ法では、前述したスライドのヨーイングなどによる誤差が直接に影響してくることを示すものである。基準面の形状をより正確に転写するためには、加工面と工具台との相対距離の検出に複数のセンサを用いて補償制御することが必要であろう。

6. 加工面基準制御加工法による外乱除去実験

この実験は、加工面基準制御法によって、加工面と工具台との間に人為的に与えた外乱を除去しながら加工を行うものである。図12のように、中心部の基準面として平面を加工し、その後、加工面基準制御法で平面を維持するように制御する。切削条件は、先の形状転写の実験と同様である。

図13が実験の結果である。補償制御を行っていない状態で外乱を加えてみた場合は、外乱の影響つまり加工中の加工面と工具台との相対位置が、そのまま面の形状となって残されている。一方、加工面基準制御法で補償制御を行いながら加工した場合は、外乱の影響を取り除き、基準面の形状をそのまま維持できていることがわかる。特に、外乱の加え始めや加え終わりの過渡現象も見られないので、完全な補償制御が行われたことがわかる。前報の結果では、ストレインゲ

Fig. 12 Schematic of WORFAC experiment

Fig. 13 Result of WORFAC experiment

ジのゲイン調整が不十分であったため、外乱の影響を完全には取り除くことができず、加工面上に凸状のものが残ってしまったが、今回の実験装置では、加工面と工具台との間隔を測定するK-HI POSSのゲインと、ストレインゲージのゲインとを正確に合わせることによって、十分な成果を得ることができた。

7. お わ り に

前報で提案された加工面基準制御法による加工実験を、K-HI POSSと平行板ばね式微小切込み工具台を組み合わせたシステムによって行い、良好な結果を得ることができた。この方法で、工具台-加工面間の外乱をほぼ完全に除去して加工を行うことができ、基準面の形状を順次転写できることもわかった。

しかし、現在の実験方法では、最初に切削を行う基準面を機械の精度で加工しているの、工作物の加工精度を十分に改善するまでには至っていない。

平面鏡を加工する際の精度改善の一つの方法として、ストレートエッジを直線運動の基準とする方法があり、スライドテーブルの運動誤差を実時間で計測しながら、切込み量を制御することによって、平面鏡の形状精度が改善できることが報告されている⁵⁾。そこで、加工面基準制御法を行う際に、ストレートエッジを参照にして基準面の切削を行い、それを順次転写させる方法が現在検討されている。ただし、この方法も送りテーブルの誤差は補正されるものの、主軸の誤差に関してはなんの補償も行っていないことにも注意する必要がある。

もう一つの問題は、現在のインプロセス計測用センサがスポット測定であるために、基準面上の表面粗さの影響で、加工面に微小形状が転写されてしまうことである。これに関しては、測定エリアの大きなセンサをスキッド的に用いることによって表面粗さの平均化を行い⁶⁾、仮想基準面を参照面上に設定すれば、この問題は解決される見込みである。

また、先に述べたように、1 センサ法の加工面基準制御法では、スライドテーブルの回転運動によって、センサの検出量と、工具の必要な切込み量との間に誤差が発生してしまう問題がある。そこで、2 個またはそれ以上のセンサを配置することによって、工具の位置での加工面との相対距離を計算によって求め、補償制御を行うことも考えられる。

このような複数のセンサを用いた方法でも、大型工作物を加工する際には、加工が進行するにしたがって、微小誤差の累積や工具摩耗によって、目標の形状から次第にずれてくこともあり得る。そこで、加工物全体の形状を計測するような別の測定系と組み合わせて、全体形状の制御と、うねりの制御とを2重に行う方法が必要となってくる。

形状測定の方法としては、凹面の場合にはハルトマンテスト法がすでにオンマシンでの測定結果も報告されている⁷⁾。そのほか、コモンパス干渉法なども有望なインプロセス形状測定法と思われる。

今回の実験から、加工面基準制御法による微小なう

ねりのコントロールの可能性が実証されたので、今後は面の平均化、及び形状のインプロセス加工制御を行って、2重ループ制御を完成させることなどが、課題として残されている。

本研究は、精密工学会産学協同プロジェクト「超精密計測加工制御分科会」の活動に関連して進められ、関係各位には多大なご援助とご協力を頂いた。また、オンマシン実験の際には三井公之機械技術研究所機械部工作機械課長（現、慶応義塾大学）にご助言とご協力を頂いた。さらに、平行板ばね式微小切込み工具台については、その基礎を面田学氏（現、ピクター機）に築いて頂き、製作に当たっては又野由美子氏（現、横河電機機）にご協力頂いた。ここに深く感謝致します。

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) T.Kohno et al. : High Precision Optical Surface Sensor, Appl.Opt. 27,1,(1983),103.
- 3) 内田出ほか：インプロセス計測加工精度補償の研究（第3報）K-HIP OSSと板ばね式工具台による実験，昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1988),437.
- 4) 岡崎祐一：圧電素子を用いた微小変位工具台，精密工学会誌，54,7,(1988),1375.
- 5) 橋本洋：光学部品の超精密加工技術，精密機械，52,12,(1986),2012.
- 6) S.Kiyono : Datum Introduced by Software Method, Proc.Int.Conf.Advanced Mechatronics, (1989),467.
- 7) 岩井智明ほか：ファイバースレーティングハルトマンテストによる切削金属鏡のオンマシン測定，1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1989),169.