インプロセス計測加工精度補償の研究 (第7報)*

——非制御中心部の制御加工と全体面への展開——

矢澤 孝哲** 山崎 俊文*** 河野 嗣男†

In-process Measurement and Workpiece-Referred Form Accuracy Control (7th Report)
- Controlled Cutting with Reference Surface for Central Part and Expansion to Periphery -

Takanori YAZAWA, Toshifumi YAMAZAKI and Tsuguo KOHNO

The author proposed a new system called the workpiece-referred form accuracy control system (WORFAC), and confirmed an effectiveness of this manufacturing method. It is direct control method of the relative displacement between cutting tool and workpiece used by in-process measurement. Since the displacement sensing is based on the workpiece surface, for the precise controlled cutting, the first reference surface with a good quality is essential. To obtain a well defined first reference surface, a controlled cutting with a reference surface (CCRS) is proposed. This method is a way of controlling the depth of micro-cutting by in-process measurement of distance between the tool and the reference surface. The second and following surfaces are made by Worfac referring to the first and previous reference surfaces. An accurately controlled surface can be made to all over the workpiece.

Key words: In-process measurement, form accuracy, control systems, single-point diamond turning, controlled cutting with reference surface

1. 序 論

超精密切削といわれる分野が脚光を浴びてから10年以上が経過したにもかかわらず、その期待を十分に満足する結果が得られているとはいいいにくい。確かに加工精度などは飛躍的に向上しているが、それにしがつてコスト高などの問題が発生し、新たなブレークスルーが必要となっている。このような状況に対して筆者らは、インプロセス計測を利用して工具と加工面の相対位置を常に一定に保つ手法である加工面基準制御加工法 (Workpiece Referred Form Accuracy Control: Worfac) を提案し、一定の成果を挙げてきた^{1)~4)}。しかし加工面基準制御加工法 (以下Worfacと略す) では、すでに切削された加工面を基準として工具台と加工面の相対変位を計測するため、基準となる面 (初期参照面) が加工面上に存在しなければならない。さらに、この基準面に誤差が含まれていると、変位計の横分解能によってはその誤差の影響を受けてしまう。この誤差の影響について、補正制御係数 m によりその誤差の影響を収束させること^{3)~6)}は可能であるが、第一参照面上には依然として誤差は残ってしまう。

そこで本研究では、初期参照面を高精度加工する方法として、基準面参照制御加工法を提案し、その特性と有効性を検討した。さらに、基準面参照制御加工法からWorfacに切り替えて制御加工を行い、連続的に制御加工を実現できたので報告する。

2. 加工面基準制御加工法の原理と初期参照面の問題

2.1 加工面基準制御加工法の原理

超精密切削加工は除去加工であり、換言すれば加工面に対する工具の相対運動の転写加工である。この相対運動を安定させ、高精度加工を実現するために一般的には、工作機械の外部に基準を設け構成要素の位置を測定すること、また各要素の精度向上・剛性の強化を行うことなどの対策が図られている。つまり、各要素の絶対精度を向上し、絶対的な位置決めをした結果として、高精度加工を実現するのである。この方法では、各要素に関する種々の研究を反映できる等の利点を持つ反面、個々の要素の誤差がわずかつつであったとしても、加工面と工具の相対運動に対して相加・相乗して影響を及ぼし、期待していたほどの成果が得られないことがあるなどの欠点がある。

これに対してWorfacでは、「加工面を基準としてインプロセス計測し、工具と加工面の相対位置を常に一定に保つ」ことによって高精度加工を実現しようとするものである。図1に原理図を示す。工具台に取り付けられた変位計が、工具台と加工面の相対変位を計測する。この計測されたデータは、工具台に取り付けられている微小切込み装置 (Micro Tool Servo: MTS) に即座にフィードバックされ、工具台と加工面の相対位置が変化しても工具と加工面の相対位置は常に一定になるように微小切り込み量を制御して加工を行う。その結果、スピンドルや送りテーブルに存在する誤差の影響を受けずに高精度加工が実現

Fig.1 Principle of Worfac

* 原稿受付 平成10年6月5日

** 学生会員 東京都立科学技術大学 (日野市旭が丘6-6)

*** 東京都立科学技術大学 (現、日立電線 (株)): 日田市日高町5-1-1)

† 正会員 東京都立科学技術大学

Fig.2 Results of reproduction experiment

できる。

2. 2 加工面基準制御加工法の転写特性と問題点

すでに述べたようにWORFACは、加工面を基準としたインプロセス計測によって工具－加工物間の相対位置を一定に保つ加工法である。あくまで加工面を基準としているため、制御加工を行うためにはすでに切削された加工面を必要とする。そして変位計の横分解能より大きな形状は、制御面に転写されてしまう。図2は、WORFACの転写特性を示す実験結果である。ここで、変位計の横分解能は1μmであり、初期参照面に作られた矩形波状の誤差（幅1mm、2mm）が次の面、その次の面と転写加工されていることが分かる。このことから、初期参照面に変位計の分解能より大きな誤差が存在すると、その形状を転写加工してしまうことが考えられる。筆者らはこの対策として、補正制御係数 m を用いること、工具と変位計を適当な位置に配置することを提案・検討^{3)~5)}してきたが、これらの方式は初期参照面の誤差の影響を低減、あるいは受けないようにすることを目的としている。したがって、初期参照面は誤差をもったまま加工面上に残存し、根本的な解決にはなり得ない。そこで初期参照面を高精度に加工する方法が必要となる。

3. 基準面参照制御加工法による初期参照面の制御加工

3. 1 基準面参照制御加工法の原理

ここでは加工面基準制御加工法の初期参照面を加工する方法として、基準面参照制御加工法（Controlled Cutting with Reference Surface: CCRS）を提案する。この方式は文字通り基準面を参照して制御加工をおこなう加工法である。

2章でも述べたように、除去加工において加工精度を決定しているのは工具と加工面の相対位置である。この相対位置を決めているのが図3に示す機械要素チェーンである。この機械要素チェーンはスピンドル、X、Z軸という3軸の運動要素を有しており、これらすべてが相対位置に対する誤差要因となりうる。WORFACでは、変位計とMTSを用いて機械要素チェーンをショートカットし、事実上最短化して誤差混入を排除し、高精度加工を実現している（図4）。基準面参照制御加工法では、主軸台と剛体のジグで一体となった基準を設け、その基準と工具台の誤差運動を計測することによって機械要素チェーンを短

Fig.3 Mechanical element chain of cutting machine

Fig.4 Shortened mechanical element chain

Fig.5 Mechanical element chain of CCRS

SB:Spindle base, SP:Spindle, WK:Workpiece, R:Reference surface

Fig.6 Principle of CCRS

絡化する（図5）。WORFACに比べると若干長くなっているものの、X、Zという2軸の運動要素がチェーンに含まれていないため高精度な位置決めが容易である等の利点がある。図6に具体的な原理図を示す。主軸台と剛体のジグで一体となった基準に対して、工具と変位計をアッペの原理を満たすように配置している。したがって、工具台と主軸台の間の相対変位は、基準面と変位計の相対変位として計測することができる。さらに、工具と変位計をアッペの原理を満たすように配置しているため、工具台のヨーイング、ピッチング、ローリング等による切込み方向への誤差の影響も減少するように計測制御することが

可能である。

3.2 実験システムの構成と実験条件

図7に実験システムの構成を示す。基本構成はWORFACと全く同様である。変位計が測定した計測結果は目標値となってパーソナルコンピュータに取り込まれ、MTSの微小切り込み量が決定される。MTSは2枚の平行板ばね機構を採用し、アクチュエータとして積層の圧電素子を使用している。圧電素子のヒステリシス補償とMTSの剛性強化を目的として平行板ばねの左右にひずみゲージを貼り付け、この信号を微小切り込み量の状態信号としてフィードバック制御系を形成している。

表1に本実験に使用した実験器具を、表2に実験条件を示す。特に断りがない限り、以後の実験はこの条件の下に行ったものとする。

3.3 制御加工実験

制御加工実験は、①加工精度向上、②外乱除去特性、③テーパ面の加工制御について行った。

加工精度向上実験の図8(a)には送りねじの影響と思われる4mmピッチ、 $0.3\mu\text{m}$ P-Pの誤差が再現性を伴って観測されるが、(b)の制御加工後は $0.1\mu\text{m}$ 以下に低減されている。

図9の外乱除去特性実験では、工具台－加工物間にP-V約 $1\mu\text{m}$ 、5mm幅のステップ波状の外乱をNCに命令を入力することによって発生させ、その除去特性について考察した。(a)の場合は、外乱の影響がそのまま加工面の形状に影響を及ぼしている。これに対して制御加工を行った(b)の場合には、その影響を $0.1\mu\text{m}$ 以下に抑えている。このときのインプロセス計測結果を図11に示す。この結果より、変位計が外乱を計測し、MTS

Fig.7 System of experiment

Table 1 Experiment device

Reference surface : Straight edge
Gap sensor : KII-HIPOSS
Form tester : Surfcom204B (by Tokyo Seimitu)

Table 2 Condition of Experiment

Spindle speed : 1000rpm, depth of cut : $5\mu\text{m}$
Feed rate : 20mm/min, Workpiece : Aluminum alloy (A5056)
Tool : Single point diamond tool (nose radius 3mm)

Fig.8 Experiments of CCRS

Fig.9 Suppression of disturbance

Fig.10 Controlled cutting with taper surface

Fig.11 In-process measurement signal

が追従制御を行っていることがわかる．このことから，基準面参照制御加工法は工具台－加工物間の外乱に対して強い加工法であるといえる．

③は，今後，WORFACを球面形状や自由曲面に発展させることを考えて，X，Z2軸を同時に動かした場合でも制御加工が可能であることを確認するための実験である．基準面は，X，Z2軸を同時に動かした際に，変位計の出力信号がある程度以上傾かないように設定した．(a)の面では，2軸の誤差が積み重なって表面に影響を及ぼしているが，(b)の面を見ると制御加工によってその影響が $0.1\mu\text{m}$ 以下まで低減されている．このことから，球面あるいは非球面のように2軸を同時に動かすような加工面であったとしても，それに相当する参照面さえ用意できれば制御加工が可能であると思われる．

以上の結果より，基準面参照制御加工法は，WORFACの初期参照面を得る手段として十分な精度向上効果を持つ加工法であるといえる．

4. 基準面参照制御加工法から加工面基準制御加工法への切り替え実験

4. 1 基準面参照制御加工法の問題点

前章で述べたように基準面参照制御加工法は，外乱の影響を受けず高精度加工を実現できる加工法である．しかし，加工物が大型になるとそれに準じて基準面も大きなものが必要となる．現在のところ，大型の基準面を得ることは難しく，また基準面を保持するジグも長時間にわたる切削による発熱などから何らかの影響が出ることも考えられる．このように，WORFACに比較すれば機械要素チェーンが長くなっている分だけ，外乱の影響を受けやすい．以上から，基準面参照制御加工法はWORFACの初期参照面の高精度加工にのみ使用し，WORFACが可能な領域に入った後は，制御加工法を切り替えるものとした．そこで本章では，実際に基準面参照法からWORFACへの切り替え実験を行った．

4. 2 切り替え手順

実験装置のシステム構成図を図12に示す．制御信号の流れは変位計が切り替わる点を除いてすべて基準面参照制御加工法の場合と同様である．加工進行方向をX軸とし，回転中心を原点とする．加工点をxとし，加工点から変位計2の測定点までの距離を x_g とする．制御加工は回転中心から開始し，変位計1を使用して基準面参照制御加工法により制御加工を行う．さらに変位計2が中心部を通過した後に，変位計2に切り替えてWORFACにより制御加工を行う．

制御を切り替える際には，二つの変位計の値に電圧差が存在すると加工面に段差を生じてしまうことになる．また，切り替え時点におけるMTS駆動用アクチュエータの出力と状態出力は未知数である．

基準面参照制御加工法では変位計①の出力を $h_1(x)$ とすれば，制御系の目標値 $r(x)$ は，

$$r(x) = h_1(x) - h_1(0) \quad (1)$$

となる．切り替え時点の位置を x_0 ，変位計②の出力を $h_2(x)$ ，変位計①に対する変位計②の変換係数を $a(<0)$ とする．切り替え後の制御系の目標値 $r(x)$ は

$$\begin{aligned} r(x) &= a \{ h_2(x - x_0) - h_2(x_0 - x_0) \} + r(x_0) \\ &= a \{ h_2(x - x_0) - h_2(x_0 - x_0) \} + \{ h_1(x_0) - h_1(0) \} \end{aligned} \quad (2)$$

とすることによって，段差等の誤差を生じずに2つの変位計を

Fig.12 System of CCRS and WORFAC

Fig.13 Experimental result of Controlled cutting with CCRS and WORFAC

Fig.14 In-process measurement signal with WORFAC and CCRS

切り替えて制御加工を行うことができる。

4. 3 制御加工実験

以上の手順に従い実際に制御加工を行った。図1 3 (a)は制御をしない場合の加工面形状であり、(b)は制御をした場合である。図1 4にインプロセス計測信号を示す。切り替えによってWORFACの性質が失われていないことを確認するため、切り替え後の加工面には(a)の右方に見られるようなステップ状の外乱を加え、その除去特性を確認した。

実験結果より、切り替えにおいて段差等の問題を生じることなく、送りねじの影響と思われるうねりを加工面全面にわたって0.1 μm 以下に軽減して制御加工していることが確認される。また外乱に関しても十分、制御が行われていることが確認された。ただし外乱に追従できずひげのようなものが加工面にできてしまっているが、これはインプロセス計測に使用している変位計に10Hzのローパスフィルタを使用しているために制御系が追従しきれなかったと考えられる。

5. 結 論

加工面基準制御加工法の問題点であった初期参照面の高精度加工について、基準面参照制御加工法を使用することを提案し、実際に加工実験を行うことによってその有効性について確認した。その結果として以下の点が明らかになった。

- (1) 基準面参照制御加工法を使用することによって、4mmピッチ、0.3 $\mu\text{mP-V}$ の誤差を0.1 μm 以下に低減することができた。
- (2) 基準面参照制御加工法により、工具－加工物間のP－V約1 μm 、5mm幅のステップ波状の外乱を0.1 μm 以下に低減できた。このことから、この加工法は工具－加工物間の外乱に強い加工法であるといえる。
- (3) 基準面参照制御加工法をX、Zの2軸を同時に動かすテーパ面の制御加工に適応し、その誤差の影響を0.1 μm 以下に低減できることを確認した。このことから球面あるいは非球面のように2軸を同時に動かすような加工面であったとしても、それに相当する参照面さえ用意できれば制御加工が可能である。
- (4) 以上の(1)～(3)の検討と実験により、基準面参照制御加工法は加工面基準制御加工法の初期参照面の高精度加工に使用できることを確認した。

さらに、大型の加工物の高精度加工のために、基準面参照制御加工法から加工面基準制御加工法に切り替える加工法につい

て検討し、加工実験を行った。その結果として以下の点が明らかになった。

- (1) 二つの変位計の切込み方向のセッティング位置誤差を解消するように制御切り替え時の初期値を算出することによって、変位計切り替え時に段差などの誤差を生じないことを確認した。
- (2) 切り替え後の加工面にステップ状の外乱を発生させてもその影響を除去することが可能であり、切り替えによって従来から明らかにされている加工面基準制御加工法の外乱除去特性が保たれることを確認した。
- (3) この(1)～(2)より、基準面参照制御加工法と加工面基準制御加工法をなめらかに切り替えることが可能であり、大きな加工面に対しても制御加工できることを確認した。

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」の委員の方々、特に(株)ニコン宇田氏と、本研究室の大野、菅野、その他学生に協力を得たことを記し、謝意を表する。

また、本研究の一部は平成9年度科学研究費のもとに行われたことを付記する。

<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-HIPOSSと平行ばね式微小切り込み工具台の応用－，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.
- 5) 宇田 豊ほか：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－，精密工学会誌，**61**, 7(1995)976.

編集後記

「モノに力が作用すれば変形する。」この物理学の世界ではあまり考えないことをしっかりと認識しているのが機械屋であると言われる。機械工学の初等教育である材料力学において応力やひずみを学んだとき、「これまでとは違う世界に足を踏み入れた!」と感銘を受けた人も多かろうと思います。もちろん精密工学技術においても、用いる機械の変形能/剛性を把握することなしに、加工品の精度を得ることはできませんし、とらえにくい非線形振動や騒音に悩まされることにもなります。

しかしながら、このような設計の基本である剛性設計とそのため剛性解析の技術は、ともすればざらびやかさに欠け、企業のノウハウ的なところもあり、なかなか表に現れにくいのではないのでしょうか。流行の最先端技術を達成するには、基盤技術こそが重要であろうことは読者もよくご存じのことと思います。そこで今回の特集では、実用性を第一の念頭におき、「精密機械要素の剛性解析」と題して、各種それぞれの精密機械要素の研究の第一人者8氏から実

例に基づいた最新の剛性解析手法についての解説をご寄稿いただきました。

日ごろありきたりに接している直動ガイド、ボールねじ、歯車、リンク機構といった機械要素も、その剛性を解析するにあたり、詳細に検討すれば実に複雑な変形を考慮しなければならないことがわかります。また、最近とりわけ超精密機構に配置されることの多い弾性ヒンジや流体軸受の剛性についても詳細な解析式が提供されています。さらに、省スペース化、ユニット化のための一体型転がり軸受の剛性とそれによる回転軸の共振周波数などについても実例をご提供いただいています。

そして、林輝先生には、それら個々の機械要素の集合体である精密機械システムの剛性の解析、測定、評価、設計方法を俯瞰していただき、さらなる「精密」のために、方法の一般化、普遍化が不可欠であろうとの将来展望を提示していただきました。この点を踏まえて本特集が読者諸賢のご参考になれば幸いです。

最後に、お忙しい中、本特集の趣旨をご理解いただき、玉稿をお寄せいただいた執筆者諸氏に心より厚く御礼申し上げます。

(岩附信行)