多機能高速工具サーボ FS-FTS を用いた 超精密微細加工と計測*

Ultra-Precision Micro-Fabrication and Measurement by Using a Multi-Functional Fast Tool Servo FS-FTS

高 偉**
Wei GAO

Key words

measurement, fast tool servo, force sensor, FS-FTS, fabrication, diamond cutting, micro-structure, displacement sensor, multi-function, smart manufacturing

1. 緒 言

高速工具サーボ (Fast Tool Servo: FTS) は、1980 年代半ばごろに開発された技術である。最初は超精密旋盤の振動誤差を補正するために用いられたが、後に非軸対称形状や微細形状などのダイヤモンド切削加工にも活用されるようになって¹⁾²⁾。筆者らの研究グループは、1990 年代後半に当時の機械技術研究所 (現・産業技術総合研究所) 岡崎祐一氏の指導を受けて、サーフェスエンコーダ³⁾⁻⁵⁾を用微細基準面の加工に FTS を適用した。加工面の計測評価技術を新たに開発することによって、大面積高精度 2 軸正弦波状微細表面の高精度切削加工に成功している⁶⁾。

一方、超精密加工の高精度化と高能率化のために、加工機上形状計測が有効な手段として発展してきている⁷⁾。しかし、従来の加工機上形状計測は、各種の変位センサを加工機に搭載して行っており、形状測定点と工具加工点不一致という共通の問題点がある。特に複雑な 3 次元微細形状の場合、形状測定結果を正確に補正加工へフィードバックすることは難しい。また、微細形状の大面積化により加工が長時間に及ぶため、加工に用いられるダイヤモンドマイクロ切削工具の切れ刃に摩耗が起りやすくなる。工具の摩耗が起ると加工時の圧縮残留応力が大きくなり、仕上げ面粗さが悪くなる⁸⁾。そのため、加工中の工具の状態を知ることが重要であり、工具と加工物の間に生じた加工力をインプロセスで検出することも求められる。

筆者の研究グループでは、これまでに高剛性高感度力センサを高速工具サーボに組み込んだ FS-FTS (Force Sensor-integrated Fast Tool Servo) を開発してきた。FS-FTS では、ダイヤモンド切削工具をそのまま形状測定プローブとして用いることができるため、形状測定点と工具加工点一致するという特徴がある。また、FS-FTS を活用することによって、マイクロ工具の摩耗と損傷を避ける

ための自動工具原点出し、大面積微細形状創成に有効なステッチング加工や修正加工など微細加工計測技術のイノベーションも可能となる。本稿では、この多機能 FS-FTS とその大面積微細形状ロール金型加工などにおける活用例を紹介する。

2. 多機能工具高速サーボ FS-FTS の概要

図 1 に FS-FTS の一例を示す。円筒型圧電素子の伸縮により工具に変位を与える。円筒型圧電素子 (ストローク 30 μm) の内部に組み込まれた静電容量型変位センサにより、工具の動きを計測する。工具の真後ろに取り付けた圧電セラミックス型力センサにより、工具に加えられた背分力を最高で約 0.05 mN の分解能でインプロセス計測検出することができる。FS-FTS の動特性を向上させるため、円筒型圧電素子に予荷重を与える必要がある。そこで、FS-FTS に予荷重用ヒンジ機構を並列に挿入する構造を採用し、切り込み方向の剛性は 62.17 N/ μm となっている⁹⁾。

3. マイクロ工具の高精度自動原点出し機能

微細形状のダイヤモンド切削には、コーナ半径の小さいマイクロ工具を用いる必要があるが、コーナ半径の大きい一般工具に比べて、工具摩耗や工具損傷が生じやすい。また、多くの場合、微細形状の加工精度を保証するために、ワークの鏡面出しを行ってから微細形状を加工することに

図 1 FS-FTS の一例

*原稿受付 平成 31 年 4 月 19 日

**正 会 員 東北大学大学院工学研究科ファインメカニクス専攻 (仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)

図2 一般工具とマイクロ工具によるリレー加工

図3 切り込み方向におけるマイクロ工具の自動原点出し結果

なっている。ワークが大型になると、鏡面加工の段階で工具の摩耗が進み、微細形状の加工精度が低下してしまう問題もある。そこで、マイクロ工具の摩耗を最小限に抑えるために、図2のような一般工具とマイクロ工具を用いたリレー方式の加工方法が考えられる。まず一般工具を用いてワークの鏡面出しを行った後、マイクロ切削工具に交換して微細形状を加工する。この方法では、微細形状の加工精度を保証するために、ワーク表面を基準としたマイクロ工具の切り込み方向（X方向）の原点出しを高精度に行う必要がある。

開発したFS-FTSの高感度力検出機能を利用し、交換後のマイクロ工具とワーク表面との接触を高感度に検知することによって、工具の高精度自動原点出しを行うことが可能となる。FS-FTSで工具を振幅・周波数一定の微小励振信号で振動させながら、超精密旋盤のXスライドを使ってFS-FTSをワークに接近させる。力センサからの出力信号中の当該周波数成分をロックインアンプを通して検出することで、マイクロ工具とワークの間の高感度接触検知を実現している。図3にアルミ合金ワークを対象としたマイクロ工具の原点出し結果の例を示す¹⁰⁾。コーナ半径0.2 mmと8 μmの工具で、それぞれ10 nmと70 nmの精度で原点出しができた。

図4 ダイヤモンド工具による加工面形状の機上計測の原理

4. 加工機上形状計測機能とその活用

4.1 FS-FTSの加工機上形状計測機能

FS-FTSの加工モードで微細加工を行った後、FS-FTSの形状測定モードに切り替えることで、同じダイヤモンド工具をそのまま利用して微細加工面形状の加工機上測定を行うことができる¹¹⁾。図4にFS-FTSの切削工具による微細加工面形状測定の原理を示す¹²⁾。前節で示した方法で工具先端と加工面を微小な接触力で接触させた後、この接触力が一定になるよう、力センサ出力をFS-FTSの圧電素子にフィードバックして工具のX方向位置を制御する。ワークを超精密旋盤のスピンドルで回転させると、工具先端がワークの円周方向に沿ってワーク表面の微細形状を走査するため、このときの工具先端の運動軌跡が円周方向における微細加工面形状と一致することとなる。ワークの回転位置を測定するスピンドルのロータリエンコーダの出力と、工具のX方向位置を測定するFS-FTSの変位センサの出力より算出した工具先端の運動軌跡から微細加工面形状を得ることができる。工具とワークの接触力を極力小さく設定することで、形状測定中に生じるワーク表面のダメージを最小限に抑えることができる。この機能を利用すれば、FS-FTSで加工を行ったすぐ後にその加工面形状を加工機上で評価できるので、計測評価の高効率化につながる。また、同じ工具で加工および計測を行うことによって、両者の座標系を完全に一致させることができ、形状計測データを高精度に修正加工に適用可能という特徴がある。さらに、FS-FTSの形状測定モードを活用すれば、これまではできなかった3次元微細形状のスティッチング加工やマイクロ工具エッジ形状の加工機上計測なども可能となる。以下ではそれらの活用例を紹介する。

4.2 大面積微細形状のスティッチング加工¹³⁾

マイクロ切削工具を使って大面積微細形状ロール金型を加工する場合、加工面積の増大につれて、工具の摩耗が進み、その結果として加工精度が低下してしまう問題がある。特に金型にはNi-Pなど硬度の比較的高い材料を利用する場合が多く、アルミや銅などの軟質金属のダイヤモンド切削に比べて、マイクロ工具の摩耗は大きくなる。また、3次元微細形状創成のため、マイクロ工具は高速工具サーボで高速に駆動される必要があり、工具は加工中に動

図5 スティッチング加工による加工面積の拡大¹⁴⁾

的な切削抵抗を受ける。コーナ半径が大きい一般工具に比べて、マイクロ工具は強度が弱いので、動的抵抗によって破損する可能性が高くなる。以上のことから、一つのマイクロ工具で大型ロール金型の全面積にわたって均一の精度で微細形状を創成するのは難しい。加工中にマイクロ工具の摩耗や破損を監視し、必要に応じて工具を交換して、加工を継続することが望まれる。それによって、一つのマイクロ工具による加工面積の限界を突破し、微細加工面積が実現すると期待される。

図5に示すように、マイクロ工具1 (Tool 1) で円周および軸方向に配列するマイクロレンズアレイを加工した後、マイクロ工具2 (Tool 2) に交換して同じ形状で同じ配列のマイクロレンズアレイをスティッチング加工する場合について考える¹⁴⁾。二つの異なる工具で加工したマイクロレンズアレイをシームレスにつなげるために、 P_1 点に工具2の先端を位置合わせする必要がある。しかし、 P_1 点位置の不確かさおよび工具シャンク寸法公差などの影響で、工具2先端と P_1 点の間には図5に示すような3次元的な位置偏差 (e_1 , e_2 , e_3) が存在し、スティッチング加工の精度を左右してしまう問題がある。そこで図5のように、FS-FTSの切り込み方向 (X方向) の原点出し機能を利用して e_1 を特定した後、FS-FTS形状計測機能を利用して、 e_2 と e_3 をそれぞれ決める。これら位置偏差をNCプログラムにオフセットとして与えることによって、工具2によるマイクロレンズアレイのスティッチング加工を高精度に行うことが可能となる。図6にこの手法を利用して加工したマイクロレンズアレイの一部を示す。二つの異なるマイクロ工具を使って、シームレスにマイクロレンズアレイが加工されていることが分かる。

4.3 マイクロ工具切れ刃の加工機上輪郭度計測

ダイヤモンド切削加工では、工具切れ刃エッジの輪郭形

図6 マイクロレンズのスティッチング加工例¹⁴⁾ 図7 FS-FTSで加工した参照試料のエッジ部¹⁶⁾

状が加工精度を左右する重要な要素である。加工中に生じる工具摩耗で工具切れ刃エッジの輪郭度が変わるので、高速工具サーボを用いた微細形状の超精密ダイヤモンド切削においても、必要に応じてマイクロ工具の輪郭度を加工機上で計測することが望まれる。FS-FTSの形状計測機能を利用すれば、比較的簡単に工具輪郭度の加工機上測定が実現できる。図7のような鋭いエッジ部をもつ参照試料を加工機のスピンドルに設置し、FS-FTSを形状測定モードに切り替えて、FS-FTSのダイヤモンド工具で参照試料のエッジ部を走査する。参照試料のエッジ半径が十分に小さい場合は、工具切れ刃エッジの輪郭形状をそのままFS-FTSの走査軌跡から得ることができる。その結果と設計形状との差で輪郭度が評価できる。エッジ部をもつ参照試料は、その他のダイヤモンド工具や、FS-FTSで加工したものをそのまま利用することが可能である¹⁵⁾¹⁶⁾。図7にFS-FTSのマイクロ工具でアルミ合金に加工したエッジ形状を示す。それを使って、FS-FTSで計測したそのマイクロ工具の輪郭度を図8に示す。市販輪郭度測定器の結果と一致していることが分かる。

5. インプロセス加工力計測機能とその活用

加工力は加工プロセスを直接的に反映するパラメータの一つである。加工中に加工力をインプロセスで計測することは、工具、加工面および加工機械の状態をモニタリングするのに有効な手段である。本章では、FS-FTSのインプ

図8 マイクロ工具切れ刃の加工機上輪郭度計測結果¹⁶⁾

図9 マイクロレンズアレイ加工中の背分力変化量⁹⁾

ロセス加工力計測機能を利用した活用例を紹介する。

5.1 マイクロ工具摩耗状態のモニタリング

インプロセスで計測した加工力の情報から工具の摩耗や破損状態を把握することができれば、工具の交換時期を適切に管理することができ、大面積微細加工における加工精度の維持につながる。図9に異なる硬さをもつ2種類の無電解Ni-Pメッキ（高リンHV 541，低リンHV 699.9）のワーク表面にそれぞれ新しいマイクロ工具（コーナ半径0.2 mm）でマイクロレンズアレイを加工したときの、背分力の変化量をFS-FTSで計測した結果を示す。高リンワークには400ライン，低リンワークには150ラインのマイクロレンズアレイがそれぞれ加工されている。図10に加工した後のそれぞれの工具を光学顕微鏡で観察した結果を示す。硬度の低い高リンワークでは400ライン加工中に生じた背分力の変化量に大きな変化は見られず，工具も摩耗してないことが分かる。一方，硬度の高い低リンワークでは150ラインの加工中に工具摩耗の進行にともない，背分力が線形的に増大しており，加工終了時点では工具に大きな摩耗が生じている。また，図は省略するが，工具の摩耗箇所に対応するマイクロレンズ表面上の筋状の加工痕が確認されている。このように，加工中生じた背分力の変化をモニタリングすることによって，工具の摩耗や破損の検出を実現できる可能性がある。

5.2 マイクロ欠陥パターンの修復加工

マイクロレンズアレイに代表されるように，多くの大面積微細表面は光学素子として利用される。光学微細表面に

(a) 高リンワーク（低硬度 HV 541）

(b) 低リンワーク（高硬度 HV 699.9）

図10 加工終了時点の工具摩耗⁹⁾

図11 マイクロ欠陥パターンのリアルタイム検出¹⁷⁾

マイクロ欠陥パターンが存在すると，素子の光学特性が低下してしまう。一方，高速工具サーボによる大面積微細加工においては，材料の除去プロセスにともなう機械的，熱的および化学的影響でマイクロ欠陥パターンが生じる可能性は大いに存在する。マイクロ欠陥パターンが生じてしまった場合，加工終了後に，その位置および形態を精密に特定し，修復加工を施すことが望まれる。以下ではFS-FTSを利用してこれを実現する方法を示す¹⁷⁾。

図11に加工中に生じたマイクロ欠陥パターンに対応するFS-FTSのインプロセス力センサ出力を示す。FS-FTSの力センサの出力から加工中のマイクロ欠陥パターンの発生をリアルタイムに検出し，そのときの加工機械座標系における工具位置（欠陥位置）を記録する。加工終了後，FT-FTSを記録した欠陥位置に戻して，その周辺を含めて走査して形状計測する。図12にFS-FTSで計測したマイクロ欠陥パターンの形状を示す。その情報をもとに欠陥パターンの位置および形態を精密に特定する。図12のような欠陥パターンでは盛り上がりの形状を示しているのので，追加の除去加工で修復できる。図12の結果をもとに

図 12 マイクロ欠陥パターン位置と形態特定¹⁷⁾ 図 13 修復前後のマイクロパターン¹⁷⁾

修復加工の NC 加工プログラムを作成し、修復加工を施した結果の光学顕微鏡像を図 13 に示す。マイクロ欠陥パターンが正確に修復されていることが分かる。このように、マイクロ欠陥パターンが生じて、修復する技術が確立できれば、大面積微細表面加工の高精度化と高効率化に寄与することができる。

6. お わ り に

微細形状加工のさらなる高精度化と大面積化にともない、高速工具サーボの加工機能だけでは対応しきれない課題が多く、加工機上計測、とりわけインプロセス計測技術との融合は必要不可欠である。本稿で紹介した高感度高剛性力センサを組みこんだ FS-FTS は、従来の高速工具サーボの加工機能に加え、インプロセス加工力計測およびそれをベースとする工具摩耗状態のモニタリングと自動原点出し機能のみならず、加工工具をそのまま形状計測プローブとして用いるという画期的な計測機能を有しており、それによって大面積微細形状のステッチング加工、微細欠陥パターンの修正など新しい加工技術の確立にもつながっている。今後は、その活用が期待される。

謝 辞

本論文で紹介した研究は、日本学術振興会科研費の助成を受けて行っているものである。

参 考 文 献

- 1) S.R. Patterson, E.B. Magrab: Design and testing of a fast tool

- servo for diamond turning, Precision Engineering, **7** (1985) 123.
- 2) Y. Okazaki: A micro-positioning tool post using a piezoelectric actuator for diamond turning machines, Precision Engineering, **12** (1990) 151.
- 3) X. Li, W. Gao, H. Muto, Y. Shimizu, S. Ito and S. Dian: A six-degree-of-freedom surface encoder for precision positioning of a planar motion stage, Precision Engineering, **37** (2013) 771.
- 4) W. Gao, S.W. Kim, H. Bosse, H. Haitjema, Y.L. Chen, X.D. Lu, W. Knapp, A. Weckenmann, W.T. Estler and H. Kunzmann: Measurement technologies for precision positioning, CIRP Annals, **64** (2015) 773.
- 5) H. Matsukuma, R. Ishizuka, M. Furuta, X. Li, Y. Shimizu and W. Gao: Reduction in Cross-Talk Errors in a Six-Degree-of-Freedom Surface Encoder, Nanomanufacturing and Metrology, **2** (2019) 111.
- 6) W. Gao, T. Araki, S. Kiyono, Y. Okazaki and M. Yanamaka: Precision nano-fabrication and evaluation of a large area sinusoidal grid surface for a surface encoder, Precision Engineering, **27** (2003) 289.
- 7) W. Gao, H. Haitjema, F.Z. Fang, R.K. Leach, C.F. Cheung, E. Savio and J.M. Linares: On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing, CIRP Annals, **68** (2019) <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.005>
- 8) F.Z. Fang and F.F. Xu: Recent Advances in Micro/Nano-cutting: Effect of Tool Edge and Material Properties, Nanomanufacturing and Metrology, **1** (2018) 4.
- 9) 盧泳辰, 李康源, 荒井義和, 高偉: 力センサを組み込んだ高速工具制御システムに関する研究, 精密工学会誌, **77** (2011) 85.
- 10) Y.J. Noh, Y. Arai, M. Tano and W. Gao: Fabrication of Large-area Micro-lens Arrays with Fast Tool Control, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, **9** (2008) 32.
- 11) K.W. Lee, Y.J. Noh, Y. Arai, Y. Shimizu and W. Gao: Precision measurement of micro-lens profile by using a force-controlled diamond cutting tool on an ultra-precision lathe, International Journal of Precision Technology, **2** (2011) 211.
- 12) 高偉, 清野慧: 計測・加工システム, 特許第 4528937 号
- 13) 高偉, 盧泳辰: ステッチング加工方法, 特許第 5334054 号
- 14) W. Gao, Y.L. Chen, K.W. Lee, Y.J. Noh, Y. Shimizu and S. Ito: Precision tool setting for fabrication of a microstructure array, CIRP Annals, **62** (2013) 523.
- 15) Y.L. Chen, Y. Cai, Y. Shimizu, S. Ito, W. Gao and B.F. Ju: On-machine measurement of microtool wear and cutting edge chipping by using a diamond edge artifact, Precision Engineering, **43** (2016) 462.
- 16) Y.L. Chen, Y. Shimizu, Y. Cai, S. Wang, S. Ito, B.F. Ju and W. Gao: Self-evaluation of the cutting edge contour of a microdiamond tool with a force sensor integrated fast tool servo on an ultra-precision lathe, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **77** (2015) 2257.
- 17) Y.L. Chen, S. Wang, Y. Shimizu, S. Ito, W. Gao and B.F. Ju: An in-process measurement method for repair of defective microstructures by using a fast tool servo with a force sensor, Precision Engineering, **39** (2015) 134.

高 偉

1994 年東北大学大学院精密工学専攻博士課程修了, 博士 (工学), 同年東北大学工学部助教, 同講師, 助教授を経て, 2007 年より東北大学大学院工学研究科教授。精密ナノ計測, 精密形状計測, 精密位置計測, 加工計測などの研究に従事。