

表面テクスチャを有する三次元金型の高効率加工に関する研究

東京工業大学 未来産業技術研究所

准教授 吉岡 勇人

(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019020-B2)

キーワード：工具サーボ，表面テクスチャ，三次元加工

1. 研究の背景と目的

近年，高附加価値デバイスを実現するため，三次元複雑形状の加工の要求が世界的に増大している．表面に微細パターンを有することで特異的な機能を発現した機能性表面は古くから知られており，**Bio Inspired Manufacturing** と呼ばれる生物模倣のものづくりが世界的にも注目されている．将来的に必ず三次元形状を加工すると同時にその表面に微細パターンを創成する技術が必要となると予想できる．このような状況を考慮すると塑性加工に用いる金型に対しても，単に高精度かつ滑らかな三次元曲面の創成だけでなく，表面にテクスチャのような微細構造を有する三次元曲面を構成することで，製品表面の物理的および光学的特性の制御，製品の意匠性，成型時の離型性および伝熱特性制御など高い付加価値を生み出すことができると考えられる^{1) 2)}．

しかし微細加工技術として，MEMS 技術に代表される半導体製造技術は，マスクやフィルムなどを用いることで大面積に対して高能率にパターンニングすることが可能であるが，加工対象が平面であることが前提条件であり，金型のような自由曲面に対して微細構造を創成することは困難である．したがって，機械加工で金型の形状と表面テクスチャを同時に創成することが必要となるが，大質量の工作機械送り軸を微細パターンに合わせて軌跡制御する方法ではその慣性が大きなことから応答性が上げられず，長時間を有することとなる．この課題を解決する要素技術として，図1に示すような，圧電素子の代わりに超磁歪素子を駆動要素に用いた工具サーボを提案し³⁾，その動作を確認している．超磁歪素子は磁場印加によりひずみを生じるため，非回転部に固定されたコイルから磁場を非接触で回転部に与えることで，主軸全体を動かすことなく工具近傍のみを局部的に位置決めすることが可能となる．

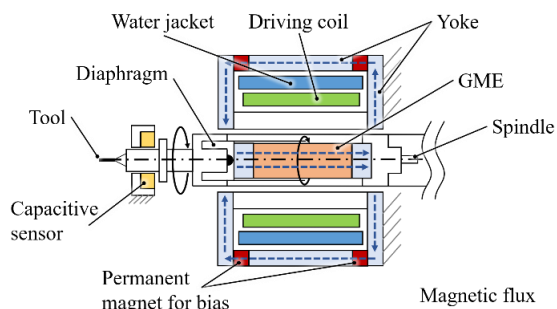


図1 提案する工具サーボのコンセプト

本研究では，表面テクスチャを有する曲面の高効率創成を目的として，提案する工具サーボを組み込んだ三次元加工システムを構築し，実際にその加工特性について評価を行う．具体的には，通常の位置決め駆動系で加工した場合，および工具サーボを併用した場合の加工面を比較し，その応答性および加工形状について評価を行う．また表面テクスチャを有する球面の加工を行い，その加工結果について評価を行う．

2. 工具サーボ適用微細加工システム

2・1 超磁歪素子駆動工具サーボ

前述したように，本研究では微動アクチュエータとして，超磁歪素子を採用した工具サーボを提案し，その駆動原理および位置決め特性を確認している．具体的な構造は，図1に示すように，エンドミルの付け根付近，すなわちツールホルダに相当する位置に磁場によって微小に伸びる超磁歪素子を組込んでいる．切削回転運動中には，駆動コイルによって磁場を発生させ，超磁歪素子を通してのように構成した磁気回路により回転中の素子へ効率良く磁場を誘導することで，主軸全体を動かすことなくエンドミル近傍のみを軸方向へ精密位置決めを行う．

また超磁歪素子は，圧電素子と同様にヒステリシスに代表される非線形特性を有しており，印加する磁場に対してその変位量は一意に定まらないため，このままでは精密位置決めが困難である．本研究では，これらの特性を補償した精密位置決めを行うために，エンドミル工具を中心としたリング形状の静電容量変位計を追加し，工具の微小変位を測定可能としている．この測定変位に基づいてフィードバック制御を行うことで，加工中の工具の精密位置決めを実現している．この変位フィードバックにより，コイルへの印加電流による発熱に起因する熱変位もあわせて補償可能となり，加工中の位置決め精度を向上させている．

2・2 三次元加工システムの構成

図2に構築した三次元加工システムの外観を示す．加工システムは，水平面内に工具主軸を持った横形3軸マシニングセンタの構造を基本としている．工作物は水平方向のリニアモータ駆動 X 軸テーブル上に固定され，さらに鉛直方向にボールねじ駆動の Y 軸で駆動される．主軸には高速かつ高精度な空気静圧主軸を採用し，水平方向に駆動されるリニアモータ駆動 Z 軸ステージに搭載されている．主軸頭の端面には工具サーボ駆動用のコイルユニットが

固定され、コイル外周に設置されたウォータージャケットによって常時冷却されている。さらに Z 軸ステージに固定された計測フレーム上に工具変位測定用の静電容量変位計を固定することで、主軸自体の熱変形の影響を抑制した構造としている。

このような構成とすることで、通常の三軸加工システムとして工作物の形状を切削加工で創成すると共に、図 3 に示すように加工中の XYZ 軸運動と同期して工具サーボの変位を高速に制御することで表面テクスチャを同時に付与することが可能となり、テクスチャを有する三次元曲面の高能率創成が実現される。

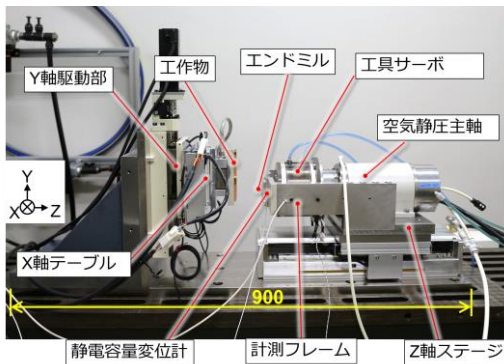


図 2 構築した三次元加工システム

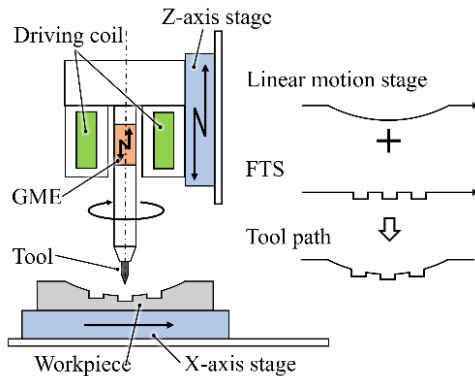


図 3 位置決め指令値の割振り

3. 工具サーボを用いた微細テクスチャ加工

3・1 超磁歪素子駆動工具サーボ

工具サーボを用いた位置決めへの応答性を確認するため、位置指令値に対する実際の周波数応答を評価した。実験は工具サーボシステムの指令値に掃引正弦波を入力し、工具変位測定に組み込んだ静電容量変位計の出力までのボード線図を測定することで評価を行った。

図 4 に測定したボード線図を示す。図に示すように、指令値に対して応答が-3dB となるバンド幅で、約 370Hz であった。この応答性は、一般的な加工システムにおけるボールねじ駆動あるいはリニアモータ駆動のステージに対して十分に高速であり、微細テクスチャの創成に有用であると考えられる。

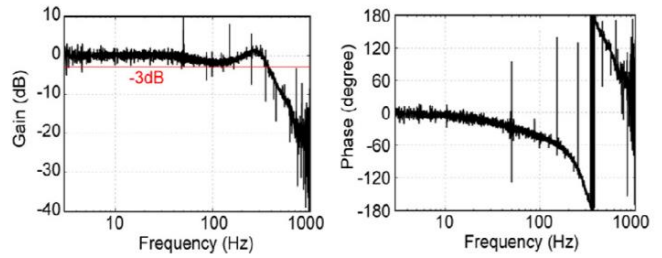


図 4 工具サーボ系の応答性評価

3・2 超磁歪素子駆動工具サーボ

構築した工具サーボを搭載した加工システムの有用性を確認するため、基礎的な加工実験を行いその加工結果を評価した。加工実験では、(i)リニアモータ駆動 Z 軸ステージによる工具位置決め、(ii)工具サーボによる工具位置決め、の 2 つの制御で溝切削中の底面への微細パターンに創成を行った。加工条件は表 1 に示すように、一定速度で X 方向に工作物を送りながら、0.2s おきにパルス幅 0.05s、深さ 5 μ m の指令値を与えることで、微細パターンの加工を行った。

表 1 溝底部へのテクスチャ創成 加工条件

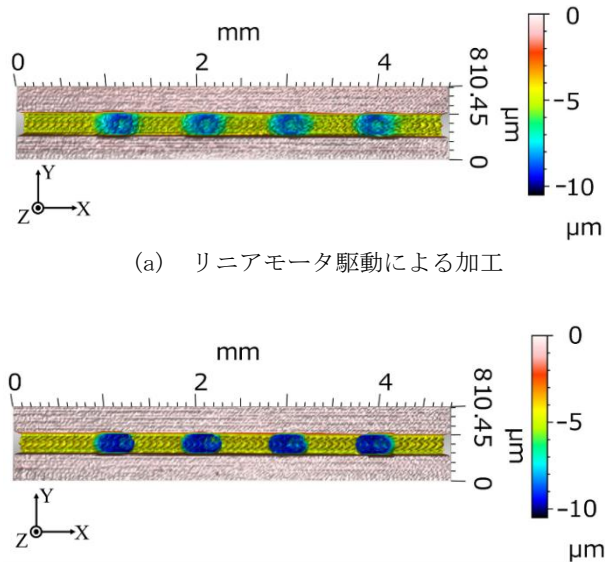
工具	超硬スクエアエンドミル $\phi 0.2$, 2 枚刃
工作物	A2017P
主軸回転速度	15,000min ⁻¹
送り速度 (X)	5mm/s
テクスチャ深さ	5 μ m
工具サーボ駆動パルス幅	0.05s
テクスチャピッチ	1.0mm
切削液	ケロシン

図 5 に加工後の溝部の測定形状を示す。測定は干渉式の表面形状測定機により行った。図に示すように、いずれの駆動方式の場合も、切込み量のパルス指令に応じて溝底部へ微小深さのパターンが形成されていることが確認できる。しかし、リニアモータ駆動 Z 軸ステージで切込みを与えた場合、微細パターンと溝底部の境界が不明瞭になっていることが確認できる。一方、開発した超磁歪素子駆動工具サーボを用いて切込みを与えた場合、一段深くなっているパターン部を明瞭に確認することができる。

図 6 の測定結果において、X 軸に沿った溝中央ラインにおける断面形状を図 X に示す。断面形状から明らかなように、Z 軸ステージでは段差部が斜めになっていることが確認でき、X 軸方向の送り速度に対して、Z 軸方向の切込み量変化の速度が十分に間に合っていないことが原因と考えられる。またこの応答性の低さに起因して、実際の切込み変位が指令値である 5 μ m に達する前に指令値パルスに戻ってしまい、加工後の形状が指令値通りに加工されていない。一方、工具サーボを用いて切込みを与えた場合には、

段差部分がシャープに加工されており、また加工後の段差深さも指令値とほぼ同じになっていることが確認できる。

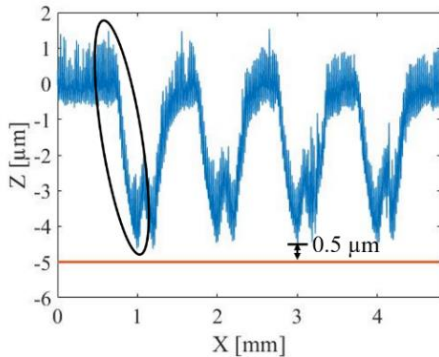
以上の加工実験により、工具サーボを構成して、工具近傍のみ局所的に駆動することで駆動慣性が小となり応答性が向上し、実際の加工においても加工精度が向上することが確認でき、その有用性を示した。



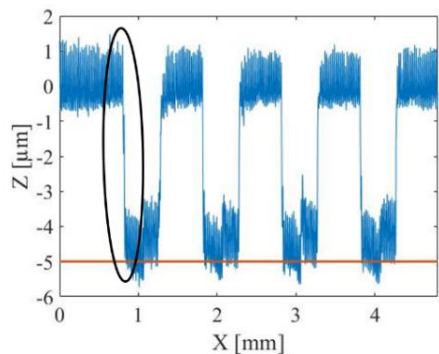
(a) リニアモータ駆動による加工

(b) 工具サーボ併用による加工

図5 溝底部の微細ディンプルの測定結果



(a) リニアモータ駆動による加工



(b) 工具サーボ駆動による加工

図6 溝底部の微細ディンプルの断面

4. 曲面と表面テクスチャの同時創成

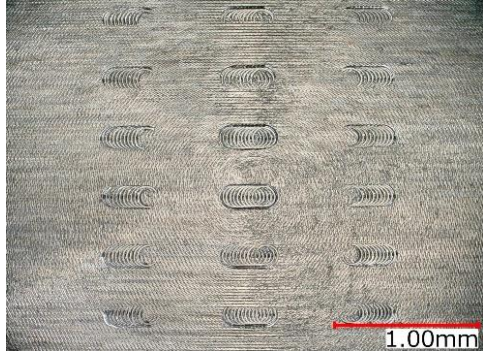
次に確認した工具サーボの切込み量制御の応答性の実際の曲面加工における有用性を評価するため、曲面と表面テクスチャの同時創成加工実験を行った。

加工形状はレンズ金型を想定した凹面状の球面とし、その表面上に微細ディンプルを創成するものとする。球面の形状は加工システムのXYZ軸の運動で軌跡生成を行う。X軸方向に等速送り、およびY軸方向に逐次的に駆動することで加工を行う。またXY軸の運動に合わせてZ軸ステージで切込み深さを与えることで球面加工を行う。さらにこの運動に重畳する形で工具サーボによる微細切込み指令値を与え、曲面上に規則的なテクスチャを創成する。加工条件を表2に示す。球面の半径は2mm、球面の深さは100 μm であり、テクスチャの深さは5 μm である。球面上には、合計で26個のテクスチャを創成する。

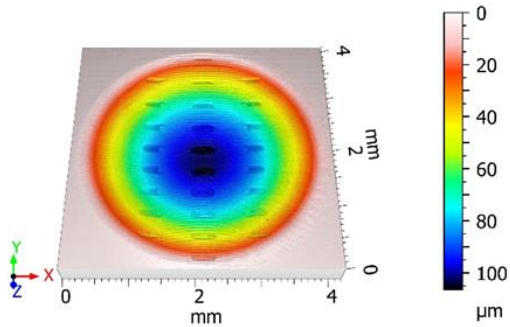
表2 テクスチャ付与球面加工 加工条件

工具	超硬ボールエンドミル $\phi 0.2$, 2枚刃
工作物	A2017P
主軸回転速度	12,000 min^{-1}
送り速度 (X)	5 mm/s
ピックフィード	20 μm
球面半径	2 mm
球面深さ	100 μm
テクスチャ深さ	5 μm
工具サーボ駆動パルス幅	0.05s
テクスチャピッチ (X,Y)	0.8 mm , 0.4 mm
切削液	ケロシン

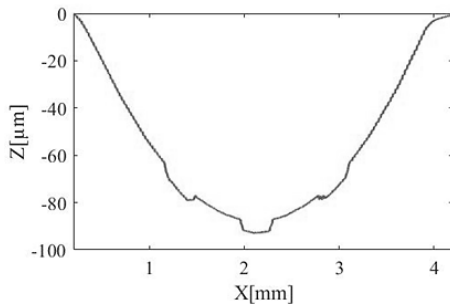
図7に加工結果を示す。図7(a)は加工後の形状の光学顕微鏡による観察像である。光学顕微鏡ではテクスチャ部の横長の溝部が確認できるものの、曲面形状は直接は明確に観察できない。したがって加工面を干渉式形状測定機により評価した結果を図7(b)に示す。測定結果より、中央部が凹状になった全体形状が明確に確認できると共に、その表面にテクスチャが創成されていることが確認できる。図7(c)は計測結果の断面形状である。テクスチャは球面中心に対してオフセットして与えたため、この断面底部は100 μm ではないが、滑らかな曲面上にテクスチャが明瞭に創成されていることが観察できる。図7(d)は各テクスチャ(計26個)の深さを評価した結果である。指令値の5 μm に対して、これらの平均値は4.953 μm 、分散は0.141 μm であった。特に深さの平均値は指令値の5 μm に対して、0.05 μm 以下の誤差に抑制されており高精度な加工が実現されていることが分かる。これは、工具変位を直接測定可能な変位センサを組み込み、変位フィードバックを構成することで、加工中の切削力による偏差および熱変形などを補償が可能となり、高精度な工具位置決めが実現されたことが理由と考えられる。



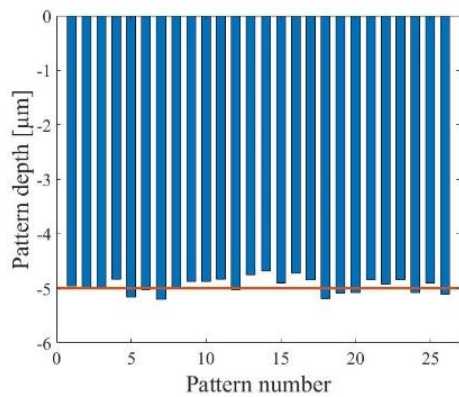
(a) 表面外観



(b) 三次元形状測定結果



(c) 断面形状 (Y=2.70mm)



(d) ディンプル深さの評価

図7 微細ディンプルを有する凹面の加工の一例

5. 結論

本研究では、超磁歪素子による工具サーボ機構を組み込んだ、三次元加工システムを構築し、その加工特性について評価を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 超磁歪素子を用いた工具サーボ系は、駆動完成が小さいこと、アクチュエータの応答性が高いことによりバンド幅370Hz以上の高応答な位置決めが可能である。
- (2) エンドミルによる溝加工において、リニアモータ駆動ステージあるいは工具サーボ系で切込みを与えた場合、その応答性の違いに起因して工具サーボの方がよりシャープな形状が誤差なく加工可能であることを確認した。
- (3) XYZ軸による駆動と工具サーボ系による駆動とを組み合わせることで、曲面および表面テクスチャを同時に創成可能であることを明らかにした。特に工具変位フィードバックにより、高精度なテクスチャ加工が可能であることを確認した。

謝辞

本研究に対して、研究費をご支援いただいた公益財団法人天田財団に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 諸貫信行, 微細構造から考える表面機能, (2011), 森北出版.
- 2) 菊田久雄, 表面微細構造による光学機能の発現と応用技術, 精密工学会誌, 74-8 (2008), 781.
- 3) Yoshioka, H., Shinno, H., Sawano, H., A newly developed rotary-linear motion platform with a giant magnetostrictive actuator, CIRP Annals, 62-1,(2013), pp.371-374.