

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03153

研究課題名(和文)自由曲面上へのナノ構造創成の実現とそれを用いた機能性パターンの最適化

研究課題名(英文) Realization of nano-structured free form surface and optimization of functional pattern on the surface

研究代表者

吉岡 勇人 (Yoshioka, Hayato)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：90361758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、微細構造パターンを有することで特異な性質を付与した三次元機能表面を実現するため、新たに超磁歪素子駆動工具サーボを組み込んだ三次元加工システムを開発した。基本加工特性評価実験を行うことで、開発した工具サーボ機構を用いることでマイクロメートルオーダの微細切削加工が可能となり、3軸駆動機構と組合せ加工を行うことで三次元曲面と微細パターンを同時に高能率で創成可能であることを確認した。また工具・工作物間の相対変位を精密にモニタリングする新たな方法を提案し、実験的にその有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は今後様々な展開が期待される三次元機能性表面の高能率創成に関する研究であり、新たな機構を組み込んだ機械加工システムを開発することで、飛躍的な加工時間の短縮、加工形状の自由度の拡張、広範囲な材料の加工を実現した。これらの成果により、濡れ性、耐摩耗性、潤滑性、光学的機能など様々な機能を付与した機能性表面の検討および製造が効率よく可能となり、幅広い産業分野へ波及効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Demand for generating functional micro patterns on a curved surface such as molds has increased in various industrial sectors. In order to meet the demand, a new advanced micro machining system which generates curved form and fine patterns simultaneously and efficiently was developed. The machining system has a fast tool servo mechanism for milling process driven by a giant magnetostrictive actuator. The results of actual machining experiments confirmed that the developed system has capability to position the end mill precisely during machining and to generate patterned curved surface. Furthermore, a new monitoring method based on photoelectric effect was proposed to detect approach of a cutting tool, and its effectiveness was confirmed through the basic experiment.

研究分野：生産加工，精密機械システム，ナノ加工

キーワード：自由曲面 微細パターン 機能性表面 微細加工 精密位置決め モニタリング

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

- (1) 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増大している。特に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。
- (2) MEMS 技術を用いることで微細パターンの創成は可能であるが、自由曲面のような曲率に変化する面には適用できず、加工する材質についても制限がある。一方、機械加工では三次元形状は加工可能であるものの、微細パターンを加工する場合には工具をパターンに沿って運動制御する必要があり膨大な時間を有する。すなわち、加工機械の運動軸は自由曲面を創成しつつ、さらに工具のみの微細かつ精密な運動を合わせて行うことが必要となるが、そのような技術は基礎的な旋盤加工などで一部実現されているだけであり、自由曲面を対象とした研究は皆無である。

### 2. 研究の目的

- (1) 幅広い材料へ適用可能である切削加工を対象に、三次元自由曲面の創成と機能性表面を実現する微細パターン創成とを、同時に高能率に実現可能な加工システムを実現する。
- (2) 工具-工作物間の相対距離認識および接触検知において、光学的手法を用いて 10nm オーダの検出分解能が実現可能であることの提示。
- (3) 回転主軸に対応する工具サーボ機構の適用により、微細パターンを有する曲面の高能率加工を実現する。

### 3. 研究の方法

- (1) 微細パターンを有する三次元加工自由曲面を加工可能なシステムを構築するため、各構成要素の選定および最適なレイアウトを検討した。その結果、図 1 に示すように、重量を有する高速回転主軸を水平横向きに安定して支持する横形マシニングセンタと類似の構造構成とした。また、精密な位置決めを実現するため、主軸はリニアモータ駆動ステージ (Z 軸) 上に搭載した。一方、工作物側は、剛性が十分な鋳鉄製イケール上に位置決め系を構築し、鉛直軸は重力による誤差を抑制するためボールねじ駆動 (Y 軸) として、さらにその上に水平にリニアモータ駆動テーブル (X 軸) を搭載する構造とした。  
微細パターンの加工において重要となる工具サーボ部は、主軸端面に図 2 に示す超磁歪素子を組込んだユニットを固定することで、外部コイルによる磁場生成により高速回転中の工具を非接触で精密位置決めする機構を実現した。

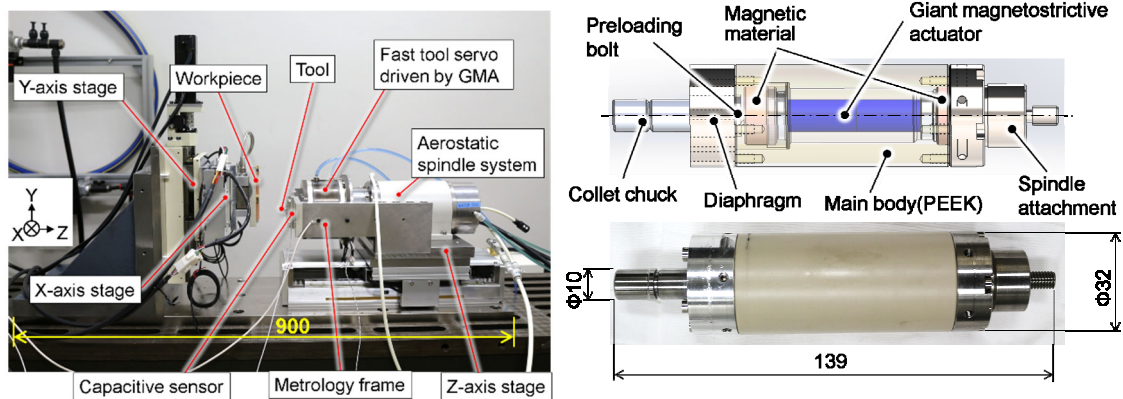
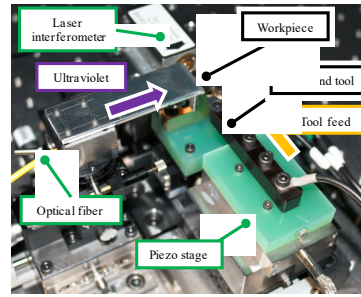
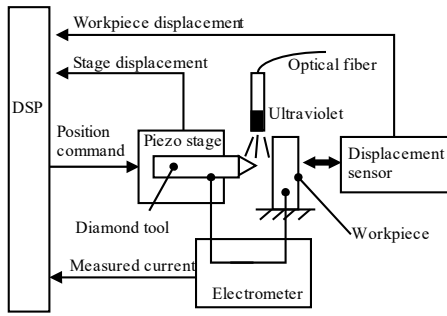


図 1 フライス加工用工具サーボを有する三次元曲面加工システム

- (2) 工具-工作物間の相対距離を精密にモニタリングするため、超精密加工で広く用いられるダイヤモンド切削工具を対象に、紫外線照射による光電効果を利用した相対距離測定方法を提案した。ダイヤモンドはバンドギャップが大きな材料で通常は絶縁体であるが、バンドギャップに相当するエネルギーを有する紫外線を照射することで電子がバンドギャップを乗り越え工作物との間に微小電流が生じるようになる。この微小電流を測定することで工具-工作物間の距離を検知することが可能となる。図 2 に工具-工作物検知システムの構成および原理確認用システムの外観を示す。ダイヤモンド工具は圧電素子駆動微動ステージにより工具-工作物間を精密位置決めされ、それに応じた微小電流を測定する構成となっている。



(a) 検知システムの構成

(b) 測定原理の検証システム

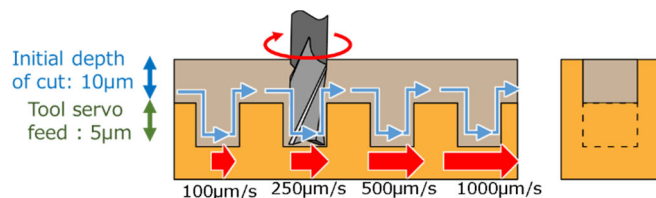
図2 光電効果を用いた工具—工作物間相対距離の検知システム

(3)XYZの三軸駆動機構と工具サーボ機構とを組み合わせた駆動指令値を加工システムに与えることで、微細構造を有する三次元曲面の高能率機械加工を実現する。工具サーボは数百Hzの高速応答を有するもの可動ストロークが数十 $\mu\text{m}$ に限られるため、駆動指令値を作成する際にはこのストロークを考慮することで駆動機構のZ軸で駆動するか、工具サーボで駆動するかの分配を適切に行う必要がある。本研究ではDSP内蔵のコントローラ内で制御アルゴリズムを構成することで、各駆動軸への指令値生成を高能率に実現した。

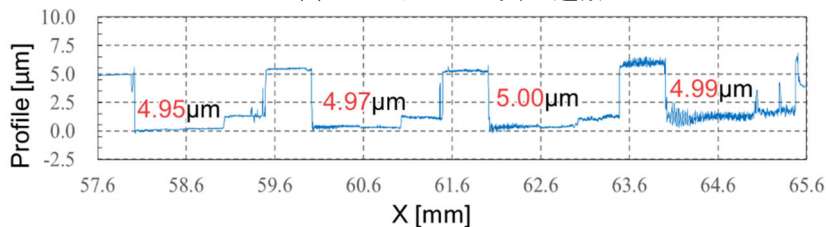
#### 4. 研究成果

(1)構築した加工システムを用いて図3(a)に示す工具サーボ機構による運動により微細加工特性評価実験を行った結果、図3(b)の加工断面が得られた。図3(a)に示すように、初期切込み量 $10\mu\text{m}$ を設定したまま水平方向に送り、そこからさらに工具サーボを用いて $5\mu\text{m}$ 切込むことで段差を創成する加工を行った。工具は $\phi 0.5$ の超硬スクエアエンドミル(刃数2)、工作物は無酸素銅のブロックを用いた。主軸回転数は $4950\text{min}^{-1}$ とし、送り速度は図に示すように各部で変更しその影響を評価した。

断面形状の測定結果より、いずれの送り速度においても段差はほぼ指令値である $5\mu\text{m}$ で加工されていることが確認できる。段差の上部と底部を平均化し段差寸法を求めたところ最大でも $0.05\mu\text{m}$ の誤差であり、高精度な加工が実現できることが確認できる。したがって、本研究で構築した超磁歪素子駆動工具サーボにより、高速回転中の切削工具を加工中においても精密位置決め可能であり、加工面に微細形状を連続的に創成可能であることを明らかにした。



(a) エンドミル工具の運動



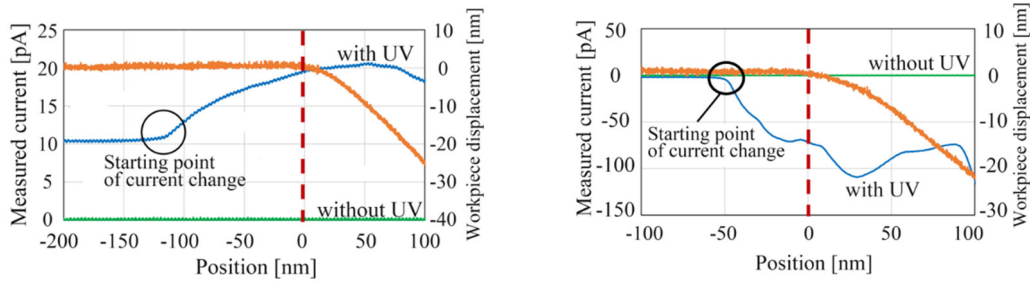
(b) 加工面の断面形状測定結果

図3 工具サーボによる微小切込み加工

(2)提案する工具—工作物間の相対距離モニタリング方法の検証結果を図4に示す。工具—工作物間に $\pm 100\text{V}$ の印加電圧を与え、圧電素子駆動ステージにより工具を接近させた際の電流変化を示している。図のように紫外線を照射しない場合は、いずれの電圧においても両者の接触前後を通じて電流が流れておらず、接近をモニタリングすることはできない。一方、紫外線を照射することで、 $+100\text{V}$ の場合は $-110\text{nm}$ 付近から、 $-100\text{V}$ の場合は $-50\text{nm}$ 付近から電流が検出され、接近に伴いその値も変化している。すなわち、工具—工作物が接触する前からそ

の接近をモニタリングすることが可能であることが確認できる。

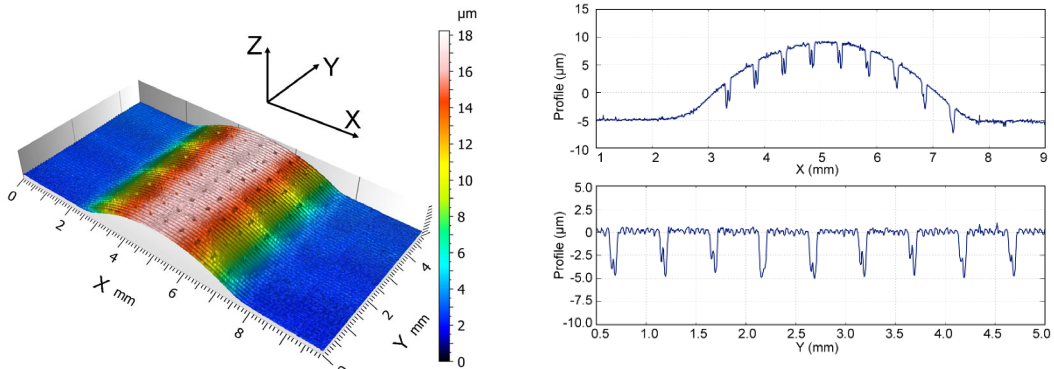
これは通常絶縁体であるダイヤモンド切削工具を、光電効果を用いることでプローブとして使用することを可能とする技術であり、工具機能とプローブ機能の融合を意味し、今後の展開に期待できる成果が得られた。



(a) 印加電圧+100[V] (b) 印加電圧-100[V]  
図4 工具—工作物相対距離と微小電流の関係

(3) 曲面と微細パターンの同時創成を行った例を図5に示す。加工では半径224.8mmの円筒面をXYZの三軸を走査することで削り出すと共に、走査中に工具サーボ機構により $5\mu\text{m}$ の微小切込みを一定間隔で与え、表面に微細パターンを同時創成した結果である。図に示すように、円筒面上に等間隔で微小なディンプルが形成されていることが確認でき、また両方向の断面形状からディンプル深さもほぼ指令値の $5\mu\text{m}$ となっていることが分かる。

このように、提案する加工システムを用いることで、微細構造を有する三次元曲面の高効率創成が可能なることを実際に確認した。このような技術を展開することでより高附加価値な三次元金型の製造などが可能となり、様々な産業へ波及効果が期待できる成果が得られた。



(a) 加工面の測定結果 (b) 断面形状

図5 微細ディンプルを有する円筒面の創成

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hayato Yoshioka, Kotaro Kojima, Daisuke Toyota	4. 巻 69
2. 論文標題 Micro patterning on curved surface with a fast tool servo system for micro milling process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 CIRP Annals Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 吉岡 勇人
2. 発表標題 超磁歪素子の自己検知機能を利用した微小位置決め機構の開発
3. 学会等名 2017年度日本機械学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshioka, H., Shinno, H., Akiyama, M.
2. 発表標題 Approach detection of diamond cutting tool by using photoelectric effect
3. 学会等名 The 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kotaro Kojima, Yuuki Tamura, Hayato Yoshioka
2. 発表標題 Fine milling by magnetostrictive element-driven tool servo
3. 学会等名 The 18th International Machine Tool Engineerings' Conference（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉岡勇人, 田村勇樹, 小島功太郎, 新野秀憲
2. 発表標題 超磁歪素子を用いたフライス用工具サーボによる微細加工の基本特性評価
3. 学会等名 日本機械学会 第13回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉岡勇人
2. 発表標題 超精密切削加工を実現する要素技術
3. 学会等名 日本機械学会関東支部神奈川ブロック(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayato Yoshioka
2. 発表標題 Development of an Ultraprecision Machining System
3. 学会等名 The 22nd International Symposium on Advances in Abrasive Technology (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 吉岡勇人(分担第6章第5節)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 7
3. 書名 磁性材料・部品の最新開発事例と応用技術	

〔産業財産権〕

〔その他〕

- ・吉岡勇人，次代の工作機械を目指して，大田区-東京工業大学技術交流セミナー，大田区Pio，2017年10月27日．
- ・吉岡勇人，超スマート社会エンジニアリング検討フォーラム，東京工業大学大岡山キャンパス，2018年7月23日．
- ・吉岡勇人，熱変形抑制エアスピンドルと微細加工への機能付加，日本トライボロジー学会工作機械のトライボロジー研究会，第11回研究会，2018年10月16日．
- ・吉岡勇人，工学が支える先進的のものづくり，2019年東京工業大学オープンキャンパス模擬講義，東京工業大学大岡山キャンパス，2019年8月10日．

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----