

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360052

研究課題名(和文)回転主軸対応高速工具サーボシステムの開発

研究課題名(英文)Development of fast tool servo system for milling process

研究代表者

吉岡 勇人(Yoshioka, Hayato)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：90361758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：表面に微細パターンを有する形状の加工への有効性が期待できる工具サーボ技術に関して、これまで適用できなかった回転工具による加工への対応を目的に研究を行った。回転部に組み込む駆動素子に超磁歪素子を採用すること微小駆動を実現し、実際に加工機上での実験で0.01ミクロン単位の駆動を確認した。さらに、超磁歪素子の特性を活かして駆動だけでなく同時にセンサとしても利用することで、変位センサを不要とする微小駆動機構を実現した。

研究成果の概要(英文)：Demands for machining three-dimensional geometries have increased. It is difficult to apply a fast tool servo technique to milling process by rotational tools. This research aims to develop a new tool servo technology. The new concept of tool servo driven by a giant magnetostrictive actuator was proposed in this project, and a prototype system was developed. The developed mechanism can be characterized by a compact structure, a noncontact structure, and high accuracy. Performance evaluation results confirm that the developed tool servo system provides precise linear motion during rotating. Furthermore, to realize the positioning without additional displacement sensors a new estimating method of displacement using a magnetostrictive actuator as a sensor device was also proposed, and the experimental results shows that the method can estimate deformation of actuator and be used for feedback.

研究分野：精密機械

キーワード：位置決め 工具サーボ 回転主軸 超磁歪素子 工作機械

1. 研究開始当初の背景

近年、従来以上の高附加価値あるいは高性能なデバイスを実現するため、3次元複雑形状の加工要求が世界的に増大し、特に表面に微細パターンを有する機能性デバイスを実現するため、微細構造を高速かつ高効率に機械加工する要求が増大している。このような要求に対して微細な駆動範囲を高速に位置決め可能な高速工具サーボ機構が研究されているが、回転工具を用いて加工する工作機械への適用はほとんど研究されていない。このような回転工具による加工はマシニングセンタに代表されるように一般的な加工法となっており、表面に微細パターンを有する機能デバイス加工の重要性が増大している状況においては、高速回転する主軸に適用可能な高速工具サーボシステムの実現が要求されている。

2. 研究の目的

微細三次元複雑形状の高効率加工を実現可能とする、回転主軸へ適用可能な高速工具サーボシステムの研究開発を行う。

- (1) 超磁歪素子を微動駆動要素として用いた場合の磁歪特性、すなわち磁気ひずみ特性について精密位置決め観点から評価を行い、その特性を明らかにする。
- (2) 回転主軸に適用した場合、すなわち超磁歪素子に対して相対的に回転する磁場が作用する場合の磁気ひずみ特性について明らかにする。
- (3) 回転磁場により超磁歪素子に生じる渦電流損など、回転に起因する影響について、実験的に明らかにする。
- (4) 超磁歪素子の特性を用いてアクチュエータ機能と共にセンサとしても利用することで、追加の変位センサを用いない位置決めを実現する。

3. 研究の方法

本研究で提案する回転主軸対応の工具サーボのコンセプトを図1に示す。駆動機構の構造は大別して回転主軸へ設置する微動ユニットおよび非回転部へ固定する駆動ユニットから構成される。微動ユニットには、主軸の回転中心と同軸となるよう工具部付近に超磁歪素子を組み込み、ダイヤフラム部で押さえることで磁歪素子に予圧を加える構造となっている。その外側には主軸頭などの回転しない構造体に固定された駆動コイルと磁束を誘導する磁性体のヨークで構成された駆動ユニットを設置する。超磁歪素子は磁界印可によりひずみを生じる機能性材料である。通常の圧電素子を回転体に組み込むことは配線の問題で困難であるが、超磁歪素子の場合、駆動コイルに電流を流すことで磁束を発生させ、ヨークを介して回転する超磁歪素子へ印可することで、非接触で駆動を行う構造となっている。汎用フライス盤の主軸へ組み込んだ様子を、図2に示す。

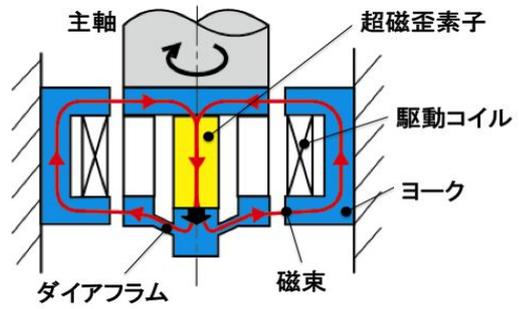


図1 提案する回転主軸対応工具サーボのコンセプト

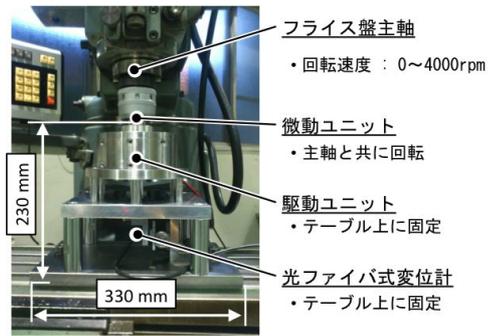


図2 汎用フライス盤への組み込み

また実際の加工機への搭載を想定した場合、駆動変位を測定するための変位センサの組み込みは、工作物との位置関係や主軸頭の形状などの問題があり、容易ではない。本研究では、超磁歪素子をアクチュエータとしてだけでなく、ひずみにより透磁率が変化する特性を利用することでセンサデバイスとしても同時に利用することで駆動変位の推定を行う。その様子を図3に示す。駆動に必要な磁束は超磁歪素子の外側にC字形のヨークを設置し、そこから磁気回路を介して素子へと印可する。また超磁歪素子の周囲には磁歪素子の透磁率を測定するための検出コイルを同軸で新たに設置し、微小交流電流を流す際のインダクタンス変化から推定する。

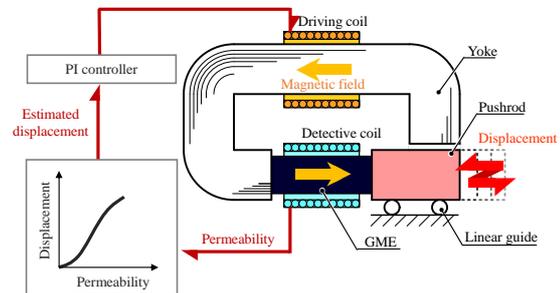


図3 検出コイルを用いた変位推定

図4に実際に構成したシステムを示す。超磁歪素子に対して外部ヨークから磁束を印可する構成であり、磁歪素子のひずみは検出コイルを用いて測定し先端変位を推定する。先端変位はクロスチェックのため光ファイ

バ式変位計で測定する．また図4の構造とすることにより，大きな熱源となる駆動コイルを素子から離して設置することが可能となり，熱的影響の低減が期待できる．

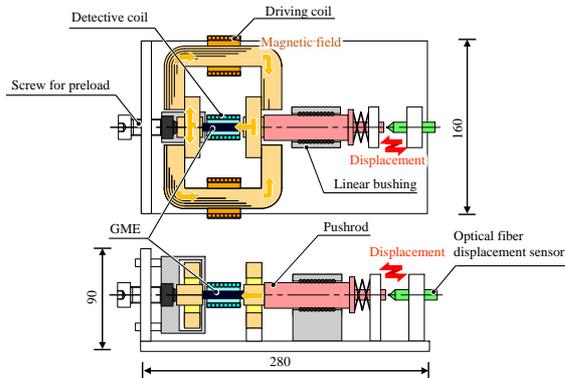


図4 検出コイル評価用装置

4. 研究成果

実際にコイルに ± 1 Aの電流を与えて駆動変位を評価した結果が図5である。まず主軸が非回転すなわち0rpmの場合には、電流変化に対して最大約 $24\mu\text{m}$ の変位が得られていることがわかる。また電流が正負いずれの場合も駆動方向が同じ、すなわち電流の向きによらず素子が伸びる方向にのみ変位することが分かる。一方、主軸を770, 4000rpmで回転させた場合にも、回転に起因する面ぶれによる測定面の振動が含まれるものの、非回転時と同じ伸び量と特性を有していることが確認できる。この結果から、超磁歪素子を用いることで回転中の主軸端面の微小駆動が可能であることが確認できた。ただし、変位特性は電流増加時と減少時で曲線が大きくずれており、超磁歪素子の非線形特性に起因するヒステリシスが存在するため、精密な駆動を行うためにはフィードバック制御が必要であることが分かる。

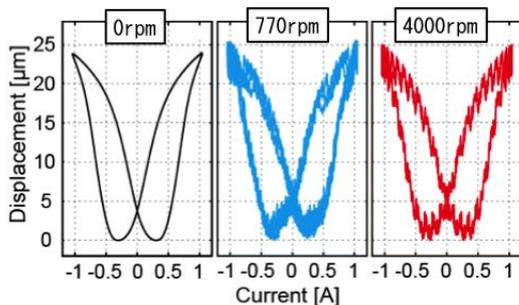


図5 コイル電流と変位の関係

そこで変位計による測定値をフィードバックして駆動電流を操作することで位置決め特性の評価を行った。実験では $20\mu\text{m}$ のステップ変位を与える駆動を行った。その結果を図6に示す。図に示すように非回転時および回転時のいずれの場合においても、目標値

通りの $20\mu\text{m}$ のステップ応答が得られていることが確認できる。さらにこのようなフィードバック制御を行うことによってどこまで微細な位置決めが可能であるか、位置決め分解能の評価を行った。図7にその結果を示すように、非回転時には $0.01\mu\text{m}$ が達成可能であり、4000rpm回転時においても面ぶれを含んで $1\mu\text{m}$ の位置決め分解能となっている。回転時の振れがより少ない高精度な主軸へ適用した場合には、より高分解能な位置決めが可能であると考えられる。

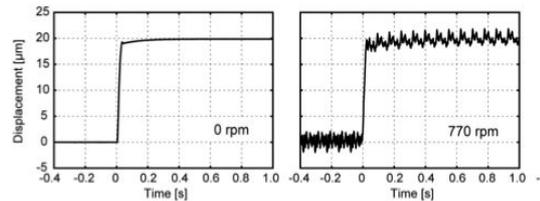


図6 ステップ応答（非回転時，回転時）

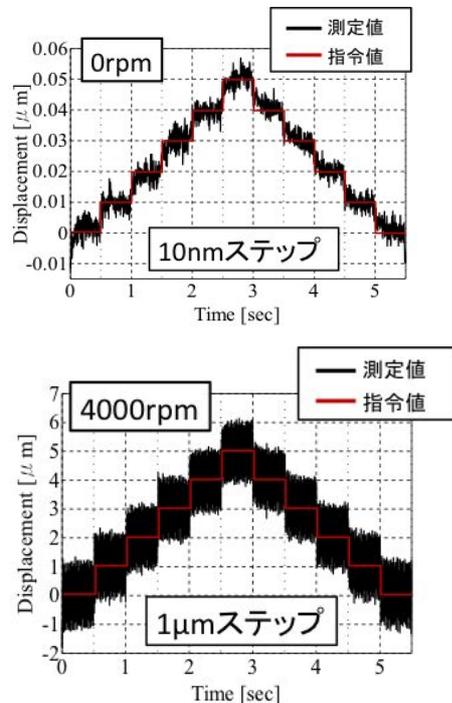


図7 微小変位駆動結果

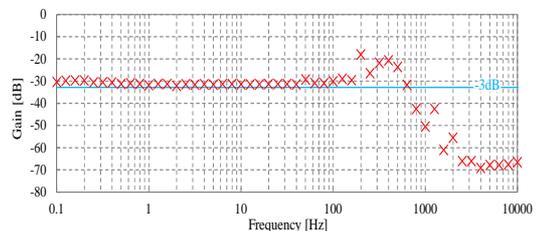


図8 駆動電流と変位間の周波数応答

続いて、検出コイルを用いた変位推定に関して評価を行った。まずはじめに駆動電流に対する実際の変位の周波数応答を測定した結果を図8に示す。図のように機械的な共振

点が約 400Hz にあり、バンド幅として約 600Hz を有していることが分かる。

図 9 に検出コイル出力と実際の素子変位の関係を示す。変位が小さな領域で若干のヒステリシスが存在するものの、ヒステリシスがなくほぼ線形に変化する領域があることが確認できる。この領域を使用することで、検出コイルを用いて変位推定が可能になると考えられる。実際に検出コイルを用いて微小位置決めを行った結果を図 10 に示す。図に示すように検出コイルを用いた場合でも 0.01 μm の高分解能位置決めが可能であることがわかる。

さらに検出コイルを用いた位置決め結果を図 11 に示す。指令ストローク 2.5 μm に対して概ね位置決め制御が実現していることが確認できる。駆動中に若干の誤差が生じているが、これは図 9 に示すグラフが完全な線形ではなく、曲線となっていることに起因する誤差と考えられる。

駆動コイルに 1A の電流を 1 時間連続で与えた場合の温度変化を図 12 に示す。図に示すように、コイル部分はジュール発熱によって 40 度以上の温度上昇をしている一方で、超磁歪素子および変位部の温度上昇は大きく抑制され、それぞれ 3 度および 1 度の温度上昇となっていることが確認できる。以上より、今回採用した構造が駆動電流に起因する熱的影響を大幅に抑制可能であることを明らかにした。

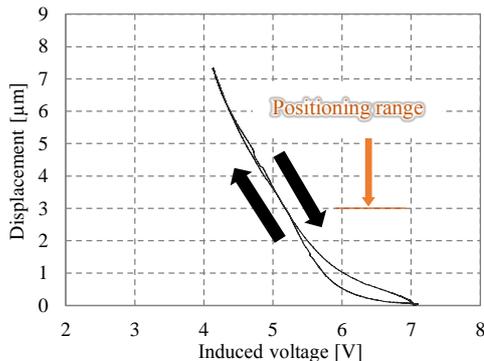


図 9 検出コイル出力と変位の関係

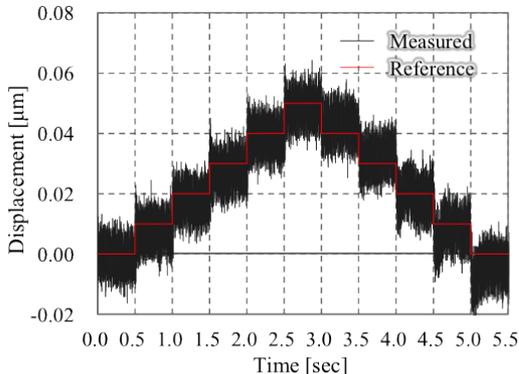


図 10 検出コイルを用いた微小位置決め

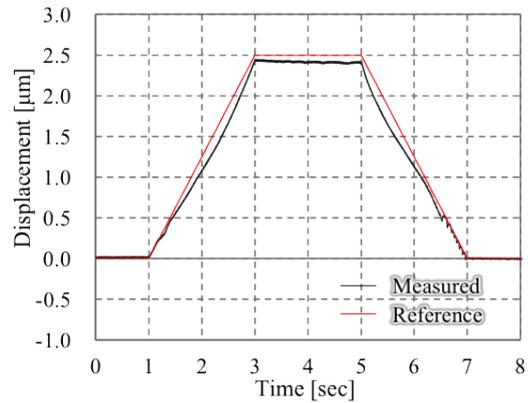


図 11 駆動中の推定誤差

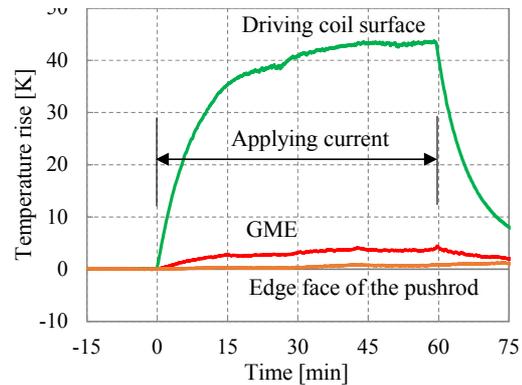


図 12 各部の温度変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Yoshioka, H., Shinno, H., Sawano, H.,
A newly developed rotary-linear motion
platform with a giant magnetostrictive
actuator, CIRP Annals - Manufacturing
Technology, Vol.62, No.1, (2013),
pp.371-374. 査読有り,
DOI:10.1016/j.cirp.2013.03.137

〔学会発表〕(計 3 件)

田村勇樹, 澤野宏, 吉岡勇人, 新野秀憲,
磁束密度を用いた超磁歪素子駆動微動機
構の位置決め, 2015 年度精密工学会春季
大会, 学術講演会講演論文集, 東洋大学
(東京都・文京区), (2015), 3 月 17-19
日, pp.565-566.

田村勇樹, 澤野宏, 吉岡勇人, 新野秀憲,
超磁歪素子の自己検知機能を用いた微小
位置決め機構, 第 10 回生産加工・工作機
械部門講演会, 第 10 回生産加工・工作機
械部門講演会講演前刷集, 日本機械学会,
徳島大学(徳島県・徳島市), 11 月 15-16
日, (2014), pp.111-112.

吉岡勇人, 回転主軸対応工具サーボシス
テムに関する研究, 第 3 回 日本機械学会
RC266 次世代産業を牽引する工作機械に
関する研究分科会, 2014 年 11 月 3 日, 東
京ビッグサイト(東京都・江東区)

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.upm.pi.titech.ac.jp/>

6．研究組織

(1)研究代表者

吉岡 勇人 (YOSHIOKA, Hayato)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：90361758

(2)研究分担者

新野 秀憲 (SHINNO, Hidenori)
東京工業大学・精密工学研究所・教授
研究者番号：40196639

澤野 宏 (SAWANO, Hiroshi)
東京工業大学・精密工学研究所・助教
研究者番号：40514295