

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05759

研究課題名(和文)加工負荷外乱下におけるボールねじ機構の微視的特性と超精密位置決め性能

研究課題名(英文)Microscopic behavior and ultraprecision positioning performance of a ball screw mechanism under disturbance from machining load

研究代表者

深田 茂生(FUKADA, Shigeo)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：70156743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、工作機械の位置決め駆動要素として一般的に用いられているボールねじ機構による超高分解能の位置決めを、実際の加工負荷外乱下において実現するために、VCMによる負荷装置を備えた位置決め実験装置を用いた実験により、負荷外乱下におけるボールねじ機構の微視的特性と位置決め性能をサブナノメートルレベルで解明した。また、ボールねじ駆動機構による超精密旋削加工系を構成し、実際の加工負荷外乱下におけるボールねじ機構の位置決め性能を実験的に検証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, microscopic behavior and positioning performance of a ball screw mechanism are investigated at sub-manometer-level on the basis of experimental results using a positioning apparatus equipped with a loading device by VCM in order to realize ultra-fine positioning by using ball screw mechanism under actual disturbance from machining load. Moreover, an ultra-precision turning system is fabricated to consider experimentally on positioning performance under actual machining condition.

研究分野：精密工学

キーワード：ボールねじ 超精密位置決め 精密加工 加工負荷

1. 研究開始当初の背景

精密位置決め技術は超精密工作機械や半導体製造装置および精密測定機などの性能を支配する最も重要な基盤技術の一つであり、着実な進展が期待されている。図1は、種々の精密機械システムを構成する位置決め機構および関連する精密機器のストロークに対する精度・分解能を、研究代表者がマップとして整理したものである。同図から読みとれるように、現在までに実用的に使用されている精密位置決め機構は、工作機械や半導体製造装置のように数十mm～数mの比較的長ストロークの位置決め機構と、SPM（走査探針顕微鏡）の走査機構等のようにストロークが数十 μm 以下の微動位置決め機構に分化している。このうち、の長ストロークの直動位置決め機構の駆動要素としてはボールねじが広く用いられており、特に負荷条件が厳しい工作機械においては剛性に有利なボールねじが多用されている。一方図1からは、のベクトルの最先端を牽引しているのが最新のリアエンコーダの分解能の高さであることも読み取ることができ、その分解能は数十ピコメートルにまで達している。

送りねじを用いた位置決め系の概念構成を図2に示す。研究代表者はこれまでに、ステージに対する定常的負荷が無い場合についてモータによるねじ軸トルクと回転角度およびステージ変位間の微視的挙動を実験的に詳細に検討してきており、 $1\ \mu\text{m}$ 以下の変位領域においては巨視的な変位領域とは全く異なる非線形弾性的挙動が送りねじ機構の位置決め特性を支配していることを明らかにしている。またそれらの非線形弾性的挙動を利用する位置決め制御系によりサブナノメートルレベルの位置決め分解能を得ている。しかしそれらは無負荷状態における成果であった。工作機械等における実際の位置決め機構は様々な負荷条件に晒されており、そのような負荷外乱下においても高分解能・高精度の位置決め性能を発揮することが切望された。

2. 研究の目的

現状の工作機械の位置決め駆動要素としては、ボールねじ機構を用いる場合が最も多い。一方、ステージ位置検出用のリアエンコーダの分解能が数十ピコメートルレベルまで高まってきており、ボールねじを用いた位置決め機構においても、無負荷状態においてはサブナノメートルレベルの位置決め分解能が実現されている。今後は実際の加工負荷外乱下においても同様の性能を発揮することが期待される。そこで本研究では負荷外乱下におけるボールねじ機構の微視的特性と位置決め性能をサブナノメートルレベルで解明し、加工負荷外乱下における性能を検証する。

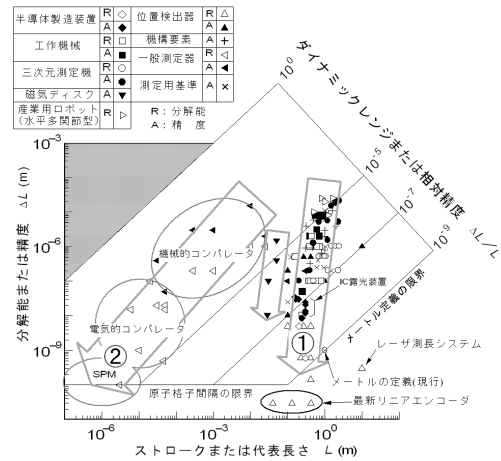


図1 種々の位置決め機構および関連機器の精度・分解能 対 ストロークのマップ

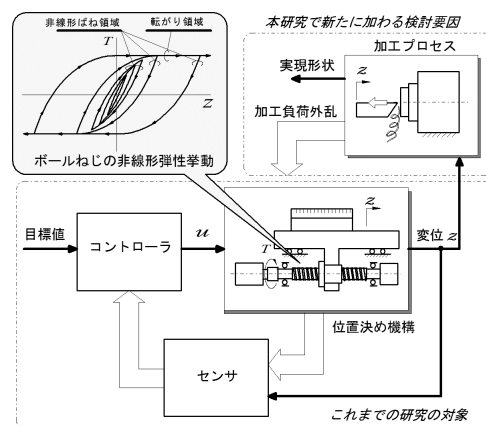


図2 送りねじを用いた位置決め系の構成

3. 研究の方法

これまでの研究で得られた無負荷条件下における性能を負荷外乱下の位置決め機構へと拡張するためには、負荷条件下における特性を詳細に検討し、無負荷状態の特性との相違を明確にするとともに、負荷条件下の特性を考慮した適切な制御系を適用する必要がある。本研究では、ボールねじで駆動されるストローク位置決めステージについて、以下のような3つのステップを設定して検討を行った。

- (1) 負荷条件下における特性把握：軸方向負荷を静的・動的に印加した状態においてねじ軸トルクとねじ軸回転角度およびステージ変位間の関係を実験により系統的に解明し、負荷条件下におけるボールねじ機構の微視的特性の動的モデルを構築する。
- (2) 負荷条件下の制御性能：変位フィードバックによる位置決め制御系の負荷外乱下における性能を明らかにし、(1)で得られた動的モデルを元に適切な制御方法を探索する。
- (3) 超精密正面旋削加工系での特性：実際に簡易的な超精密旋削加工系をステージ上に構成して、加工負荷外乱下におけるボールねじ機構の性能を実験的に検証する。

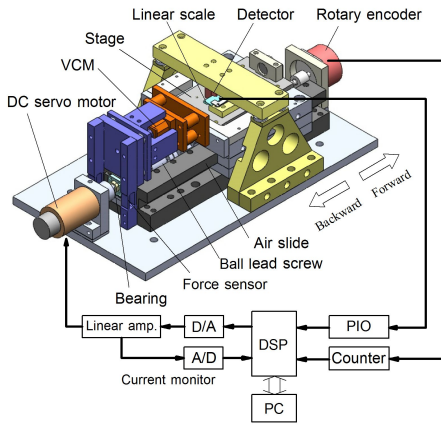


図3 軸方向負荷位置決め実験装置

4. 研究成果

(1) 負荷条件下における特性把握

実験装置の構成

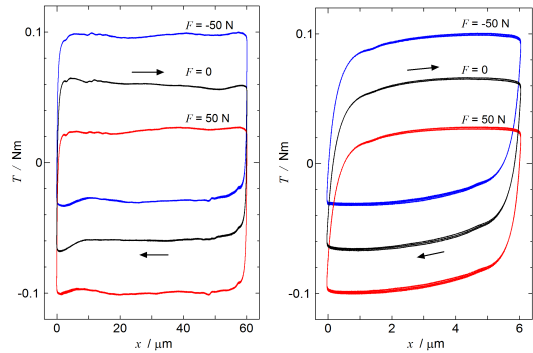
図3に実験装置の構成を示す．ストローク 200 mm のエアスライドを，ボールねじと定格出力 130 W の DC サーボモータで駆動する．ボールねじは，ねじ軸外径 20 mm，リード 5 mm のシングルナットオーバサイズボール予圧型で，ボール循環回路は 2.5 巻 2 列である．ステージとナット間には 4 自由度のフローティングユニットが設置されている．ステージ変位は，分解能 70 pm のリニアエンコーダにより検出し，ねじ軸回転角度を分解能 360 万 ppr のロータリエンコーダにより検出する．ステージ移動方向は，モータから他端に向かう方向を順方向，モータ側に戻る場合を逆方向と定義する．ステージに対して軸方向負荷を電磁力により非接触で与えるため，ボイスコイルモータ (VCM，発生力定数 50 N/A) を設計製作して設置した．VCM 発生力の作用線はリニアエンコーダの目盛面と同軸上に配置されている．この発生力はフローティングユニットを介してナットに対する単純軸力として作用する．軸方向負荷 F の符号は，モータ側からロータリエンコーダ方向に押す場合を正，逆方向を負と定義する．

実験結果と考察

図4は，周期 10 秒の準静的正弦波状目標変位 (3 周期分) を与えた場合のモータトルク T ($= K_T I$ ， K_T : トルク定数， I : モータ電流) とステージ変位 x の関係を示す．(a) の変位振幅 30 μm においては，軸方向負荷 $F=0$ の場合は原点から始動後，順方向移動中のトルク値は約 0.6 Nm 一定であり，ステージ移動方向の反転とともにトルクの符号が逆転し，ループを描いて始点に復帰する．ここで一定の軸方向負荷 $F=+50\text{ N}$ を与えると，ループ全体が下方に平行移動し，逆に $F=-50\text{ N}$ の場合は上方に平行移動している．この平行移動量は約 0.4 Nm であり，ねじに作用する軸力のトルク換算値 $T = F \cdot (P/2\pi)$ (P : ねじの

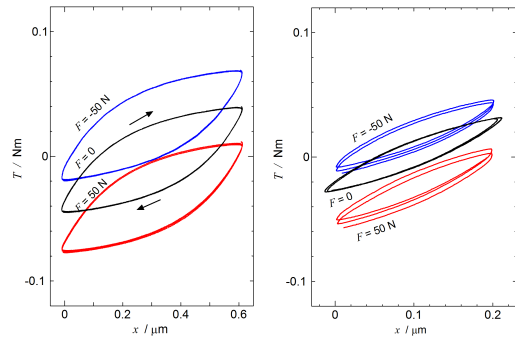
リード) にほぼ一致している．(b) は振幅を 3 μm とした場合であり，非線形ばね特性のヒステリシスループを描いている． F が印加されるとやはりループが上下に移動するが，ループ自体の形は殆ど変化していない．また (c) の振幅 0.3 μm の場合と (d) の振幅 0.1 μm の場合は，ヒステリシスループが線形な特性に近づいており， F の印加とともに上下にシフトしているが，平行移動量は振幅 3 μm の場合よりも減少している．一方，図5はステージ変位 x とねじ軸回転角度 θ の関係を示している．いずれの振幅においても軸力の存在如何にかかわらず，ねじ軸回転角度とステージ変位の間の幾何学的関係は，ねじのリードにより支配されていることを示している．

ここで研究代表者が提案しているボールねじの力学モデルを図6に示す．このモデルでは非線形ばね特性をクーロン摩擦と線形ばね



(a) 振幅 $x_0=30\ \mu\text{m}$

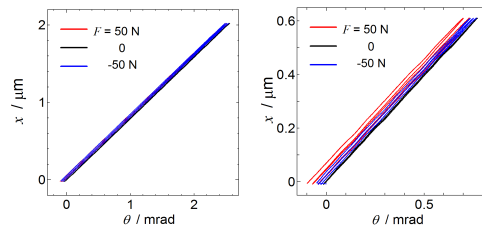
(b) $x_0=3\ \mu\text{m}$



(c) $x_0=0.3\ \mu\text{m}$

(d) $x_0=0.1\ \mu\text{m}$

図4 モータトルク T と変位 x の関係



(a) $x_0=1\ \mu\text{m}$

(b) $x_0=0.3\ \mu\text{m}$

図5 変位 x と回転角度 θ の関係

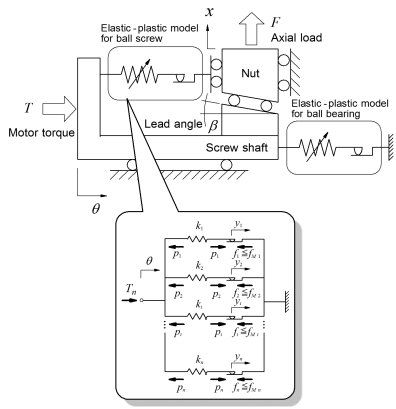


図6 力学モデル

の組合せにより表現しているが、ねじの幾何学的関係はリード角 β により維持されているので、軸力 F が作用する場合の釣合状態は図7のように単純化して考えることができる。(a)はクーロン摩擦が支配的な場合であり、 $T-\theta$ のループは単純な長方形を描き、軸力 F によってループが下方にシフトする。ここで、モータトルクの順方向仕事 E^+ と逆方向仕事 E^- は次の関係を満たす。

$$(E^+ + W) + (E^- - W) = L \quad (1)$$

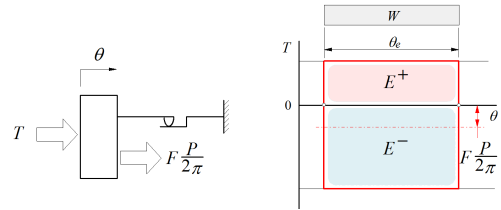
ここで W は軸力の仕事の大きさであり、 L はループを一周する間の損失エネルギー(ループの面積)である。ここで全損失 L が、順方向動作における損失 L^+ と逆方向動作における損失 L^- の和で与えられるとすると、次の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} L^+ &= E^+ + W \\ L &= E^- - W \\ L^+ &= L^- \end{aligned} \right\} E^- - E^+ = 2W \quad (2)$$

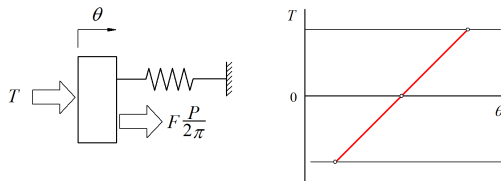
式(2)の考え方によると、図7(b)のような純粋なばねである場合は、モータトルクと軸力の仕事はばねの弾性ポテンシャルと無損失の交換関係を維持するため直線は上下にシフトしない。クーロン摩擦と弾性特性が混在するような(c)の非線形ばね特性の場合は、ヒステリシスループのシフト量はやはり式(2)により定まり、振幅の減少とともに $T=0$ の線上のヒステリシスカーブの幅(同図の θ_e)が減少し、結果としてループのシフト量も減少することができる。

(2) 負荷外乱下の位置決め特性

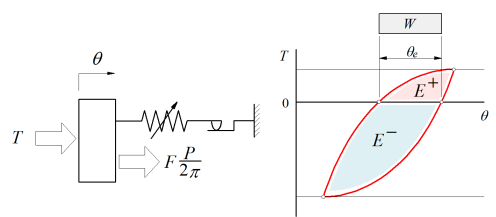
負荷外乱下における位置決め性能を検討するため、VCMにより軸方向負荷を印加して目標変位2mmの位置決め実験を行った。サンプリング周波数は8000Hzとし、制御には、図8に示した変位に対するPI-D動作と微分フィードフォワードを併用した制御を用いた位置決め実験の目標値入力は、加減速の加速度が正弦波状となる目標変位パターンを用い、



(a) クーロン摩擦が支配的な領域



(b) 弾性特性が支配的な領域



(c) 非線形ばね特性の領域

図7 負荷条件下の非線形ばね特性の模式図

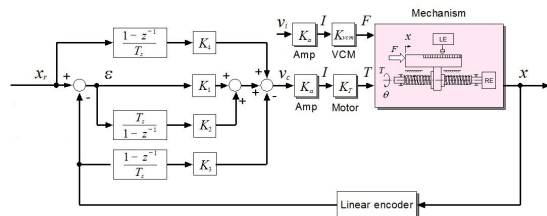


図8 制御システム

最終目標変位2mm、最大速度1mm/s、最大加速度2mm/s²とした。減速後の目標変位2mmの持続時間は6秒間とした。

まず無負荷状態において定常偏差 ± 0.5 nm程度の高精度な位置決めが実現されることを確認した。次に一定値の負荷を印加した場合についても、最終変位の平均線は無負荷と同等の偏差に収まり、軸方向負荷の大きさの違いの影響はほとんどみられなかった。

次に、VCMにより周期 T_L の正弦波状の動的な軸方向負荷を印加し、目標変位2mmの位置決め実験を行った。実験結果を図9に示す。同図より、正弦波状負荷の周期が0.009s(周波数111Hz)までの範囲では、周期が小さくなるにつれて偏差は増大した。しかし、周期が0.009sから0.007sの間で偏差は発散し、さらに周期を小さくしていくと偏差は減少していった。これは、周期0.008s(周波数130Hz)付近に実験装置の振動系の固有振動数が存在しているためだと考えられる。

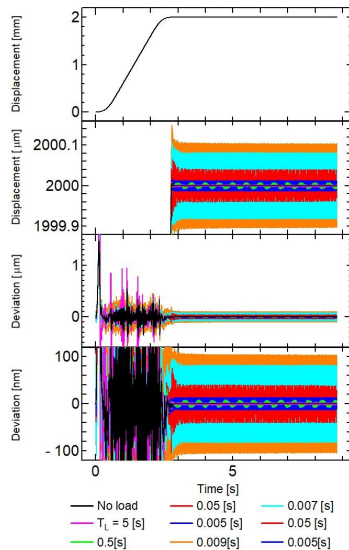


図 9 正弦波状外乱の場合の時間応答

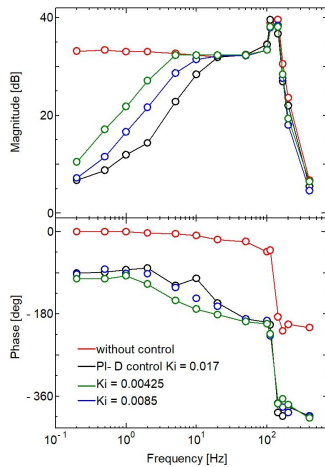


図 10 負荷外乱入力に対する周波数応答

そこで本制御系の負荷外乱入力に対する周波数応答を実験的に検討した。図 10 にボード線図を示す。ここで、ゲインは偏差の振幅と正弦波状荷重入力の振幅の比をとっており、位相は VCM 駆動アンプの出力電流と偏差の波の位相差をとっている。図 10 から、周波数が高くなるにつれてゲインは大きくなり、130Hz 付近で共振し、以降はゲインは減少していくことがわかる。なお制御時の低周波から位相が 90° 遅れるのは積分動作が含まれるためである。これより PI-D 動作によって 10Hz 程度までの外乱に対しては偏差を 10 分の 1 まで抑えている。従って本制御系の制御帯域は約 10Hz までと言える。

以上の結果から、本制御系は 10Hz 以上の動的負荷に対しては、静的負荷と比べて修正動作が十分ではないと言える。今後はこのような動的負荷条件下においても位置偏差に与える影響が少ない位置決めを可能とするロバストな制御系を構築していく必要がある。

(3) 超精密正面旋削加工系における特性

図 11 に旋削加工系の構成を示す。本加工系は、ボールねじ位置決め機構(z 軸)とすべり送りねじ位置決め機構(x 軸)を直交に配置している。すべり送りねじ位置決め機構側にはワークを取り付けるエアスピンドル(アキシャル剛性は $147\text{N}/\mu\text{m}$)を設置し、定格出力 80W、定格回転数 3000rpm の DC サーボモータを用いて駆動する。ボールねじ位置決めステージ上にはダイヤモンド切削工具と工具動力計を設置した。

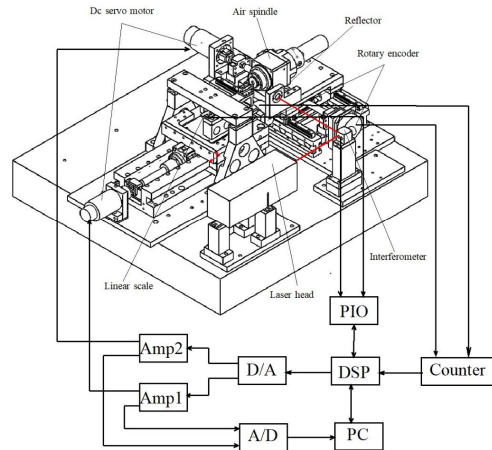


図 11 旋削加工系の実験装置

この簡易的な旋削加工系により、ダイヤモンドバイト(刃先コーナー半径 0.8 mm)を用いてアルミニウム合金(A5052)の正面旋削加工実験を行った。刃先の目標切り込み変位(z 軸)は階段状ステップであり、エアスピンドルが設置された x 軸は、 $10[\mu\text{m}/\text{rev}]$ の一定速度で移動させる。また、階段状加工を行う前に一定切り込み量(10, 5, 1 μm)で端面加工を行った。制御は前項と同様な微分フィードフォワード併用変位 PI-D 制御を用い、サンプリング周波数は 5000Hz とした。

一定切り込み(制御無し)の場合の実験結果を図 12 に示す。切り込みが 10, 5, 1 μm の場合、背分力はそれぞれ約 2N, 1N, 0.4N となった。また、加工時に切り込み量に応じてステージが押し返されている。この結果から、ステージの剛性は約 $8.5\text{N}/\mu\text{m}$ とみなせる。

図 13 は階段状 50nm ステップ加工の結果で、ステージ変位、z 軸モータ出力トルク、背分力の時間変化を示している。ステージ変位については、無負荷状態と同程度の位置決めが可能であることがわかった。また加工時にはステップ動作に伴うモータ出力トルクが上昇している。背分力は 0~0.1N の間で変化しているが、50nm のステップ動作に伴う背分力変化が小さく、段差に対応した背分力の変化は確認できなかった。

加工面は図 14 に示すように鏡面が得られ

た、また触針式表面粗さ計により表面形状の測定を試みたが、50nm の階段状ステップは確認できなかった。今回使用した触針式表面粗さ計の性能ではナノレベルの凹凸を正確に検出できない可能性があるため、他の計測器で測定する必要がある。また、x 軸の直線運動精度や潤滑の有無なども加工結果に影響してくると考えられる。

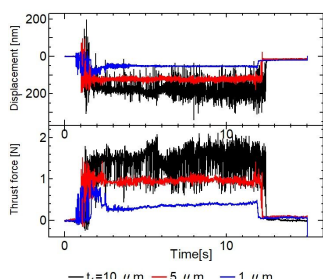


図 12 一定切り込みの場合の結果

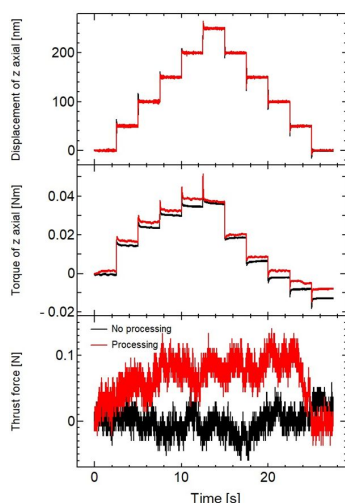


図 13 50nm 階段状切込みの結果



図 14 加工表面の性状

(4) まとめ

以上により、VCM による負荷装置を備えた位置決め実験装置を用いた実験により、負荷外乱下におけるボールねじ機構の微視的特性をサブナノメートルで明らかにした。特に、軸方向負荷の存在する状態では、転がりの非線形ばね特性に伴うヒステリシス曲線がトルクの増減方向にシフトすることを初めて実験的に明らかにして考察したことは特筆に値す

る。また負荷外乱下における位置決め性能を実験的に検討し、負荷変動の周期による偏差振幅の変化を実験により確認し、外乱入力に対するボールねじ機構の周波数応答特性と関連づけた考察を行った。

さらに、ボールねじ機構による超精密旋削加工系を構成し、実際の加工負荷外乱下におけるボールねじ機構の位置決め性能を実験的に検討した。その結果、実際の加工条件下においても本制御系によって無負荷状態と同等の位置決め分解能を実現できることを実証し、サブナノメートルレベルの位置決め分解能を実現する可能性を提示できたことは意義深い。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

深田茂生：ボールねじ駆動による精密位置決め機構と構成要素の微視的特性，機械の研究，査読無，70, 2 (2018) p. 97-108，および 70, 3 (2018) p. 238-242.

小池 颯一郎，深田茂生：負荷外乱下におけるボールねじ位置決め機構の微視的特性，2017 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集，査読無，A15 (2017-11) p. 1-2.

深田茂生，小池颯一郎，廣川 翔大：負荷外乱下における予圧ボールねじ位置決め機構の微視的特性(電磁力負荷装置による準静的基礎実験)，2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，査読無，(2017-9) p. 427-428.

Shigeo Fukada, Soichiro Koike: Microscopic behaviour of ultraprecision positioning mechanism driven by ball screw with external axial load, Proceedings of the 17th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 査読有，(2017-6) p. 449-450.

6. 研究組織

(1)研究代表者

深田 茂生 (FUKADA, Shigeo)
信州大学・学術研究院工学系・教授
研究者番号：70156743