

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 19 日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420072

研究課題名(和文) ナノレベルの超精密平面加工用工作機械におけるボールねじの熱膨張と微振動の抑制

研究課題名(英文) Containment of Thermal Expansion and Vibration of Ball Screw of Work Machine for nm Precision Plane Processing

研究代表者

大塚 二郎 (Otsuka, Jiro)

静岡理工科大学・その他部局等・教授

研究者番号：30016787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：(1)高精度位置決め装置を完成させ、制御実験を行った結果、分解能がナノレベル(50nm)を有することが分かった。

(2)熱膨張抑制研究では、ナットに取り付けられる高冷却性の水ジャケットを設計・製作した上、冷却実験を行ったところ、二条状水ジャケットの冷却性能が高く、ボールねじ300mmでの熱膨張は2.3μ程度だった。

(3)振動抑制研究では、ボールねじのチューブに圧電素子を装着し、アクティブ制振を行った結果、ボールねじチューブの振動(1.85kHz付近)を抑制することができた。また、ナットの送り速度が10[mm/s]~50[mm/s]では、チューブの変位量が0.1[μm]未満であるとわかった。

研究成果の概要(英文)：1.A special positioning device have been designed and made. A control experiment was carried out. It was found that the feed resolution reached nm level.

2.During thermal expansion control study, two water jackets with high cooling performance that can be amounted on the nut were designed and made. As a result of the cooling experiment, it was found that with the water jacket with two inner screws, the thermal expansion was controlled below 2.3 μm for the ball screw of 300 mm.

3.With regard to the vibration study, a piezo-electric device was amounted on the tube of the ball screw and the active vibration control experiment was conducted. As a result, firstly, a basic active vibration control system was established. Secondly, The vibration around 1.85 kHz of the ball screw tube could be contained. Finally, The displacement of the tube was below 0.1 μm under the condition of nut feed speed from 10 mm/s to 50 mm/s.

研究分野：精密工学

キーワード：位置決め ボールねじ 振動抑制 熱膨張抑制 ナノメーター

1. 研究開始当初の背景

レンズの金型や I-phone の筐体等は直接切削加工する必要がある。このために、超精密工作機械の Y 軸にはリニアモータが使われているので、大変高価な機械になる。

2. 研究の目的

本研究では、安価になりつつあるボールねじを搭載し、分解能 10nm レベルの位置決め装置を設計・製作することを研究目的とする。

3. 研究の方法

(1) 位置決め装置の設計・製作

設計・製作した位置決め装置の仕様は下記の通りである。テーブルのリニアモーションガイドを 8 条とし、ウェーピングを 10nm とする。ステージは大きさ 350mm x 300mm, ボールねじの外径 32mm, リード 6mm, C3 とする。

(2) 制御システムの搭載と制御実験の実施

駆動システムにはコントローラとモータを採用。変位フィードバック用センサー（ハイデンハイ製）を採用。テーブルの真直度測定には三次元測定機（Carl Zeiss 製）を用いる。

(3) 熱膨張を抑制する水ジャケット冷却システムの構築と実験的検証

ボールねじのナットに取り付けられる水ジャケットを冷却することによって、ナット、ボールねじそして位置決め装置全体を冷却する方法を提案・検証した。実験では、2 種類の水ジャケットを設計・製作した。ひとつは、流路がコの字型になっているものである。ナットに取り付けやすい様に分割型で、バネで取り付ける形式である。もうひとつは二条螺旋の位置決め装置は、THK 株式会社製でねじ外径 32mm, リード 6mm, ストローク 300mm である。循環型 water cooler はオーム電機株式会社から貸し出して頂いた。

ボールねじは、両端をチャックと芯押台で支えている。モータとボールねじの間にカップリングを付けることでモータからの発熱は影響しない。ボールねじの回転数は、コントローラによって制御している。

実験方法については、ボールねじを 90 分間回転させ、15 分毎に停止させ温度測定を行う。接触式温度計を用いてねじ軸表面を 0mm から 500mm まで 50mm 間隔で計測する。ねじ軸表面と同時にナットとジャケットの温度も計測する。回転数は 800, 400rpm の 2 種類で実験である。

実験時にトルクも同時に計測する。ナットホルダーにひずみゲージを取り付け、計測したひずみからトルクを算出する。形状になっているものである。

(4) ボールねじ振動源の調査とアクティブな防振対策

まず、制御に必要なデータを得るための測定実験を行う。その後、制御用の圧電素子を設計し、圧電素子を変位させるために必要な

電圧を算出する。そして、設計した圧電素子を用いて、騒音を低減させるための制御実験を行う。

本研究では、チューブの振動に圧電素子から発生させた逆位相の振動を重ね合わせて打ち消すアクティブ制振を行うために、sBOX を用いる。チューブの振動を入力し、プログラムを実行して振動に応じた電圧を圧電素子に出力させて振動を抑制するという制振システムである。

実験では、ボール通過周波数を求める振動実験、チューブの変位量を求める変位実験、およびチューブ直上の騒音を測定する騒音実験を行った。

また、ボール通過周波数を求める振動実験では、加速度ピックアップにより、ボールねじ運転中のナットの振動加速度を測定し、解析した結果、ボール通過周波数のピークは顕著に表れなかった。

さらに、チューブの変位量を求める変位実験では、高精度の変位計により、ボールねじ運転中のナットの変位を測定し、チューブが 0.1[m]未滿で変位していることがわかった。

さらに、チューブ直上の騒音を測定する騒音実験では、実験データを解析した結果、すべての速度領域で、チューブの曲げ固有振動数であると考えられる 1850[Hz]で高い音圧レベルが発生していた。

圧電素子の設計では、制振するボールねじのチューブを覆うような中空の半円筒形の圧電素子を設計した。チューブの変位量を求める変位実験の結果から 0.1[m]縮小させるために必要な電圧を求めた。

一方、制振実験では、チューブ直上の騒音を測定する騒音実験から得られた 1850[Hz]の騒音（曲げ固有振動数）の低減を目的に、実験を行う。圧電素子をチューブに覆い、正弦波加振した状態で、ボールねじ運転中の騒音を測定する。

4. 研究成果

(1) 高精度位置決め装置を完成させ、制御実験を行った結果、Step 入力 0.05 μm に対して出力がうまく追従することができ、分解能がナノレベルを有することが分かった。

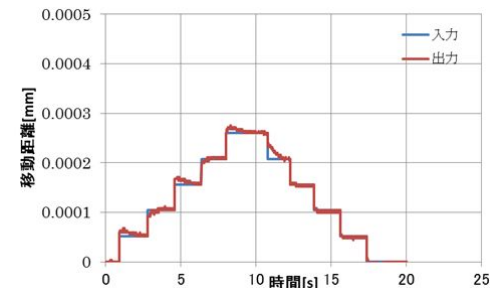


図1 V=10[rpm], 0.05[μm]動かした場合に入力に対する出力の追従

(2) 熱膨張抑制研究では、ナットに取り付

けられる高冷却性の水ジャケットを設計・製作した上、冷却実験を行ったところ、冷却水の温度を室温より2マイナスイタと設定したとき、二条螺旋状水ジャケットの冷却性性能が高く、ボールねじ300mmでの熱膨張は2.3μm程度だった。

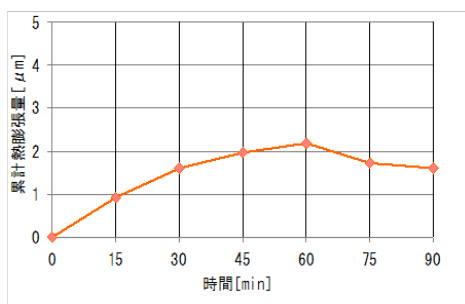


図2 熱膨張量の変化(冷却水温=室温-2)

(3) 振動抑制研究では、ボールねじのチューブに圧電素子を装着し、アクティブ制振を行った成果、図3に示すようにボールねじチューブの振動(1.85kHz付近)を抑制することができた。また、ナットの送り速度が10[mm/s]~50[mm/s]では、チューブの変位量が0.1[μm]未満であるとわかった。

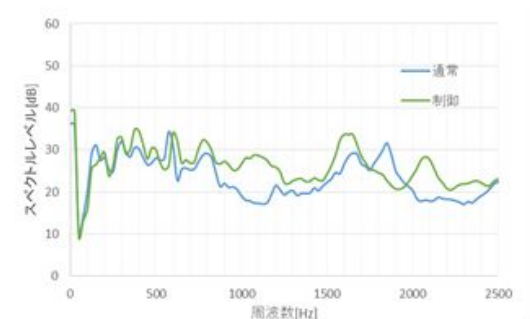


図3 制御実験結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

(1) Takashi Nozaki, Jiro Otsuka, Reduction of Thermal Deformation in a Motor Precision Positioning Device cooled by Peltier Elements, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol.7, NO.5, 2013, PP.544-549

(2) Yasushi Toake, Shigeomi Koshimizu, Takashi Nozaki, Kenichi Taneishi, Jiro Otsuka, Takeki Shirai, Tetsuhiro, Nishide and Tsutomu Togashi, Decrease of Thermal Expansion of Ball Screw Used for Precision Positioning Devices by Peltier Module Cooling Based on Feedback Method, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol.7, NO.5, 2013, PP.564-570

(3) 大塚二郎, 超精密工作機械を支えるナノ、サブナノメートル超精密決め技術の現状, 日刊工業新聞, 2014年3月17日号 第2部, 2014年, PP.13

(4) 大塚二郎, すべりねじとボールねじの熱膨張 その1 ねじの場合, 機械の研究, 査読有, 66巻, 2014年, PP.781-787

(5) 大塚二郎, すべりねじとボールねじの熱膨張 その2 ボールねじの場合, 機械の研究, 査読有, 66巻, 2014年, PP.882-889

(6) 大塚二郎, ボールねじの熱膨張低減対策, 機械の研究, 査読有, 66巻, 2014年, PP.959-967

(7) 大塚二郎, ボールねじの使用拡大, 機械の研究, 67巻, 11号(2015) PP.966-973, 査読有, 67巻, 2015年, PP.966-973

[学会発表](計6件)

(1) 内山清顕, 土朱寧, 川原崇史, 鈴木隆太郎, ベルチェモジュールによる位置決め装置熱変形の抑制, 日本機械学会東海支部第45回学生員卒業研究発表講演会, 2014年03月17日, 大同大学

(2) 鈴木隆太郎, ベルチェ冷却による精密位置決め装置の熱変形抑制 ボールねじの熱膨張低減, 2015年度精密工学会春季大会学術講演会, 2015年03月19日, 東京・東洋大学

(3) 鈴木隆太郎, ベルチェモジュールによる精密位置決め装置の熱変形ドリフトの低減, 第51回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2014年05月21日~2014年05月23日, 浜松市

(4) Yasushi Toake, Accuracy enhancement of positioning device by feedback cooling based on Peltier module, The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2014年12月17日~2014年12月19日, Chang Mai

(5) Ohtsuka Jiro, Thermal expansion containment of a Positioning device by temperate-controlled cooling water, The 6th International Conference on Positioning Technology, 2014年11月18日~2014年11月21日, 北九州市

(6) Yutarou Teramoto, Takahiko Hakamata, Jiro Ohtsuka, Takashi Nozaki, Atsushi Nakata, Yasushi Toake, Ryutaro Suzuki and Tetsuhiro Nishide, Development of a Cooling Method for a Positioning Device, The 6th TSME International Conference on

Mechanical Engineering, 2015 年 12 月 16
日 ~ 2015 年 12 月 18 日, バンコク

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sist.ac.jp/me/zhu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 二郎 (OHTSUKA Jiro), 静岡理工科大学・特任教授

研究者番号: 3 0 0 1 6 7 8 7

(2) 研究分担者

野崎 孝志 (NOZAKI Takashi), 静岡理工科大学・理工学部, 准教授

研究者番号: 2 0 5 4 8 8 8 8

十朱 寧 (TOAKE Yasushi), 静岡理工科大学・理工学部・教授

研究者番号: 6 0 2 8 8 4 0 4