

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007-2008
 課題番号：19560131
 研究課題名（和文） 小径レーザビームを応用した精密ボールねじリード精度の光学式3点測定システム
 研究課題名（英文） OPTICAL 3-POINT MEASUREMENT SYSTEM OF BALL SCREW'S LEAD ERROR USING LASER BEAM
 研究代表者
 山田 隆一 (YAMADA RYUICHI)
 長岡工業高等専門学校・機械工学科・教授
 研究者番号：40110142

研究成果の概要：本研究の目的は光学式3点測定法の原理と4分割光検出器を適用することによってボールねじ溝形状を測定し、そこからねじ軸単体のリード精度、ねじ溝の形状精度およびねじ軸の振れ回りを評価する光学式非接触計測システムを開発することである。小径レーザビーム3本を用いた測定システムを構築し、ボールねじ全ストロークに渡って溝形状の測定を行い、累積リード誤差、一回転あたりの変動、ねじ溝の半径方向幾何形状精度を求めた。累積リード誤差および一回転あたりの変動はそれぞれ被測定ボールねじのJIS規格を満たしていることが確認できた。しかしながら、実リード曲線にはノイズと見られる高周波の振動が乗っているため今後の検討が必要である。また、任意の3箇所のデータを取り出して半径方向幾何形状精度を計算したところ、いずれの箇所においても2山成分と4山成分が支配的であることがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：ボールねじ, 光応用計測, リード精度, 3点法, 幾何形状精度

1. 研究開始当初の背景

(1) ボールねじのリード誤差はJIS B1192に累積実リード誤差、累積代表リード誤差および変動の3項目が規定されている。それらの測定はいずれも測定子をねじ軸に押し当てる方法が採られているが、この方法でねじ軸の形状誤差を高精度に測定するのはきわめて困難である。したがってリード誤差の高精度測定に関する文献は国内外にほとんど存

在しない。しかしながら、高精度位置決めに果たすボールねじの役割が今後増大することは必至なので、リード誤差の的確な評価システムは必要不可欠である。

(2) 申請者は既に光学式3点測定によるスピンドルの回転誤差測定技術を開発している。この技術を応用してボールねじリード精度の非接触測定システムを開発することは高い意義を持っていると考える。

2. 研究の目的

(1) 高精度位置決め装置として欠かすことのできない存在である精密ボールねじのリード精度，すなわちリード誤差と変動の簡便かつ高精度の光学式非接触計測システムの開発を目的とする。

(2) 本システムは光学式3点測定法の原理を適用することによって，ボールねじの形状誤差を測定し，そこからリード誤差と変動の評価を行うものである。非接触方式のために機械的な干渉はなく，計測装置の厳格な位置決めは不要となる。

(3) 本研究の研究範囲は次の2点である。1) 平行光の透過さえぎり方式を適用し，3本の平行ビームを用いた3点測定によるボールねじの形状誤差測定システムを開発する。検出繰り返し精度 $0.2\mu\text{m}$ を目標とする。2) 本研究の光学系でねじ溝の幾何形状誤差を測定する場合，光源の種類，光束の断面形状と径が測定精度と測定感度に大きな影響を及ぼすものと考えられる。そこで光源として最適の種類，形状および直径を理論的および実験的に明らかにする。

(4) 本システムの開発により，従来相当な時間を要していたリード精度の定量的検測が短時間で実現するので，ボールねじの品質保証と性能維持管理が非常に容易となる。

3. 研究の方法

(1) 測定方法の検討と測定原理の確立

・らせん溝1周上に3組の光束を配置する。この場合，楕円断面上の3点測定となるが，このときに円断面上の3点測定の原理が適用できるかどうか検討する。また，適用可能ならば3光束の設置角度を設置基準を決めて考察する。

・光束の一部をねじ溝でさえぎり，その透過光量を4分割型光検出器で検出する。そして4分割されたおのおのの検出器の受光量から溝形状輪郭の不確かさを測定する。このとき，光束の強度分布・断面形状と4分割型光検出器の寸法・形状とが測定精度および感度に大きな影響を及ぼす。この影響を幾何光学および波動光学の両面からシミュレーション解析し，光源の種類と形状および4分割型光検出器の寸法と形状を検討する。

(2) 測定システム全体の構造設計と製作

・測定ユニットは3光束の相対的設置角度と取り付け精度，相互干渉を避けるための光学フィルタの取り付け精度等に留意して設計する。

・測定ユニット移動部は測定用ボールねじ，送り用ボールねじおよび案内用直動レールの平行度精度，測定用ボールねじの回転に同期した送り軸位置決め精度等に留意して設計する。

・製作を地元企業に発注し，随時連絡を取りながら完成させる。

(3) 信号処理部とデータサンプリングソフトウェアの作成

・市販の測定及び解析処理開発プログラム「LabVIEW」を用いて，データサンプリングおよびデータ処理・表示ソフトウェアを作成する。

(4) 測定システムの感度と測定精度(不確かさ)の検証

・測定用ボールねじに関する制約条件を定量化する。

・リニアリティの確保と雑音信号の除去を検証する。

・ダイナミックレンジおよび総合的な測定精度を明確にする。

(5) 実証実験と実測データの解析

・ボールねじの呼び径と呼びリード，等級，ねじ軸の回転速度等の条件を変化させて測定データを収集する。

・収集したデータを解析し，接触型測定子を用いた測定結果およびデジタル顕微鏡による観察結果との比較検討を行う。

・開発システムの問題点を明らかにする。

(6) 測定システムの改良とシステムの合理性・実用性の検討

・上記問題点を改良し，新たな測定システムを構築する。

・改良システムによる実証実験を行い，本測定システムの合理性と実用性を検討する。

4. 研究成果

(1) 従来の測定方法

図1にレーザ式リード測長器，図2にJIS推奨の半径方向精度の測定法の構成図を示す。図1において，ボールねじと測定部は使用する鋼球と同じ径を持ったピンゲージを

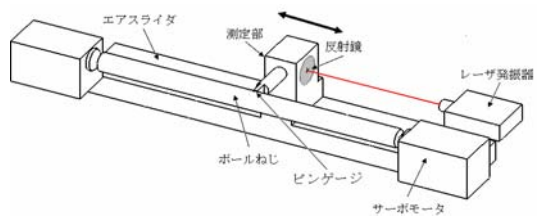


図1 レーザ式リード測長器の構成図

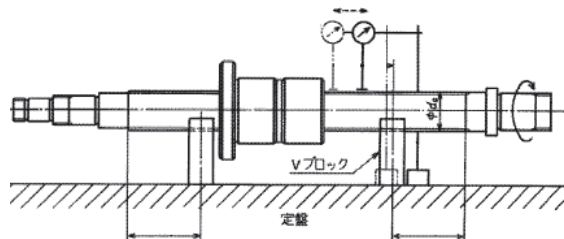


図2 JIS 推奨の半径方向精度測定法構成図

介して接触しており、サーボモータによってボールねじを回転させて測定部を送り、その送り量をレーザ干渉計によって測定する。図2において、ボールねじ軸はVブロックで支持されており、ボールねじ溝にダイヤルゲージを当て、ボールねじ軸を回転させて1点ずつ測定を行っていく。これらの測定法は、それぞれ1種類ずつの測定しか行えず、接触式測定のため摩擦等が問題になってくる場合がある。

(2) 測定原理

図3に光学式3点法の構成を示す。図3において、光学式3点法を構成するレーザ発振器と受光器による3本の光束U, R, Lで検出される変位をそれぞれ S_U, S_R, S_L とする。これらの変位には半径方向誤差成分および回転振れ成分が含まれている。このときレーザ発振器と受光器UからR, Lよる谷までの半径方向誤差成分Eは(1)式によって表わされる。

$$E = S_U + \frac{\cos \beta}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} (S_L + S_R) + \frac{\sin \beta}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} (S_L - S_R) \quad (1)$$

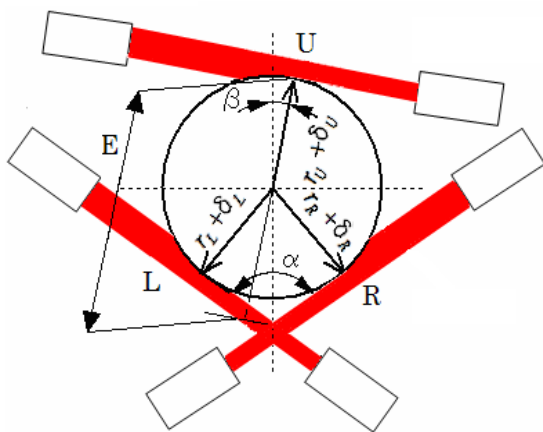


図3 光学式3点法の構成

光学式3点法では回転振れ成分は分離可能であり、分離した回転振れ成分 δ はEを測定し、(2)式によって求めることができる。

$$\delta(x, y) = \left(\frac{((S_L - r_L) - (S_R - r_R))}{2 \cos \frac{\alpha}{2}}, \frac{((S_L - r_L) + (S_R - r_R))}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \right) \quad (2)$$

図4に測定結果より回転振れ成分と半径方向誤差成分を分離する概要を示す。上部レーザ発振器と受光器Uの光束と被測定物の接点からRとLの谷までの法線方向の距離Eは両者の相対的な位置関係によって決まるので、回転中心が移動しても変化することはない。それはレーザ発振器と受光器の設定角 α, β と半径方向誤差成分 r_U, r_R, r_L によってのみ変化する。よって、法線方向の変位距離Eは回転振れ成分 δ の影響を受けずに分離される。

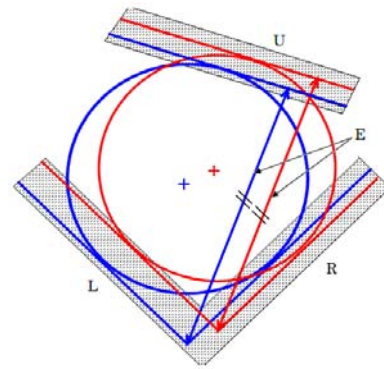


図4 回転振れ分離の概略図

(3) 4分割フォトダイオードによる受光量検出

図5にボールねじ溝で小径レーザの一部をさえぎり、透過光を4分割フォトダイオードによって受光した場合の構成図を示す。まず、レーザ光と4分割フォトダイオードを固定し、ボールねじ溝が軸方向(x方向)と半径方向(y方向)に変位した際の透過光の受光量をシミュレーション計算する。ボールねじの曲率半径は0.7mm, 4分割フォトダイオードは全体で0.6mm×1.2mm, 光源の公称ビーム半径は0.5mmとする。光源はガウシアンレーザビームを想定している。

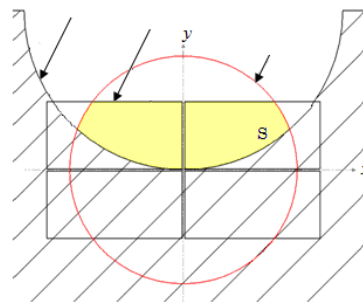


図5 4分割フォトダイオードの構成

基礎実験において、ボールねじ溝の変位は $\pm 40 \mu\text{m}$ を想定し、変位測定にはボールねじのねじ溝の曲率半径と同じ径の穴状エッジでさえぎり、それをステップモーターで $2 \mu\text{m}$ ステップで送りながら測定を行った。測定は光学式3点法で使用する3組のレーザ発振器と受光器 line1~3 について行い、感度差の確認を行った。

図6, 図7にx, y方向の変位に対する受光量変化のシミュレーション結果と測定結果を示す。line1~3においてシミュレーション結果と測定結果の感度はほぼ一致しており、直線性も見られるため受光量を変位に換算することは可能であると判断した。

(4) 実験装置

ボールねじの半径方向精度とリード誤差を光学式3点法で測定するために製作した測定装置を図8, 測定部の詳細を図9それぞれ示す。図8下段が送り部になっており、送り

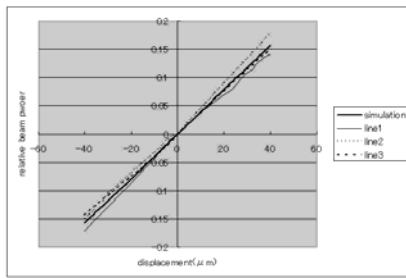


図 6 x 方向直線性

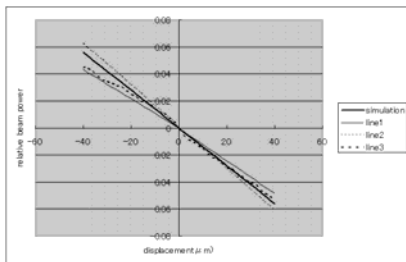


図 7 y 方向直線性

ねじには C0 級精密ボールねじを使用し、下段のステッピングモーターを回転させることで測定部を送る。それと同期させて上段のステッピングモーターを回転させることにより連続的にボールねじ溝でレーザビームをさえぎり、半径方向精度とリード誤差の測定を行う。また、測定部において、レーザ発振器と受光器の設定角度は $\alpha=55^\circ$ 、 $\beta=12^\circ$ とした。光学式 3 点法によって得られる変位方向距離 E は、山数別に拡大係数と呼ばれる感度があり、それは設定角度によって定まるため、拡大係数が適切となる角度を選定した。

ステッピングモータ 測定部 測定対象

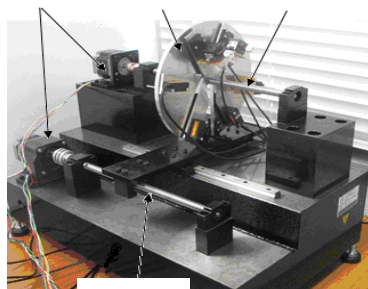


図 8 測定装置概略

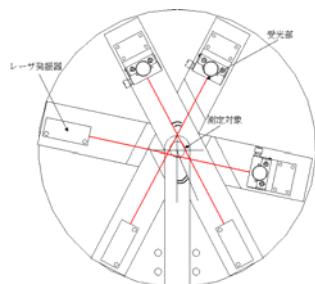


図 9 測定部詳細

(5) 実験結果および考察

図 10 に回転振れを分離した半径方向誤差、図 11 に分離した回転振れ、図 12 にリード誤差をそれぞれ示す。図 10 を見てみると、半径方向誤差の最大値は 70 リード付近の $\pm 6\mu\text{m}$ で、全周ではほぼ $\pm 4\mu\text{m}$ 以内に収まっている。変動の最大値は JIS 規格を超えてしまっているが、ほとんどの部分は規格内に収まっている。図 11 を見てみると、全周にわたってほぼ $\pm 15\mu\text{m}$ で収まっているが、 $15\mu\text{m}$ を越えている部分もあり、振れの偏りも見受けられる。図 12 を見てみると、累積実リード誤差は $4.92\mu\text{m}$ 、累積代表リード誤差は $6.86\mu\text{m}$ となっている。ボールねじの精度を定めた JIS B 1192 によると、C5 級の代表リード誤差は $23\mu\text{m}$ 以下、変動の最大値は $18\mu\text{m}$ 以下となっているため、測定対象は精度基準を満たしている。

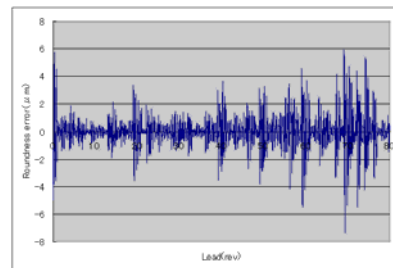


図 10 半径方向誤差測定結果

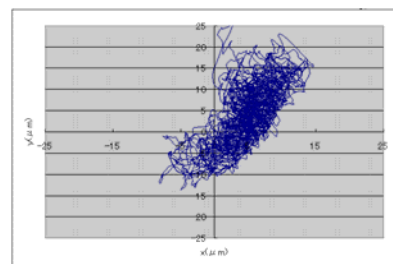


図 11 回転振れ測定結果

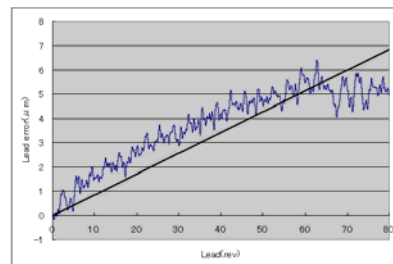


図 12 リード誤差測定結果

図 13 に製作した実験装置とレーザ式リード測長器の累積実リード誤差の測定結果を示す。レーザ式リード測長器は 30 リード付近で急激に変化している。このグラフは累積誤差なので、右上がりや右下がりになるようなグラフになるのだが、レーザ式リード測長器での測定結果は一般的には考えにくい。原因として、レーザ式リード測定長器は接触式

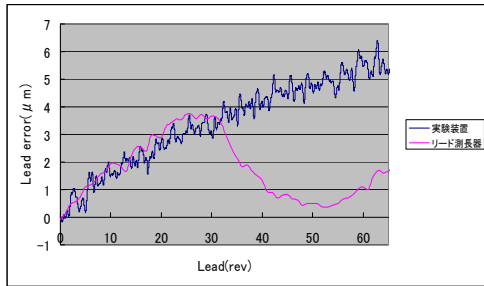


図 13 レーザ式リード測長器との比較

測定法のため、接触部分が問題になっている可能性があり、今後検討が必要である。

80 リード中の任意に選んだ 3 箇所における 1 回転について、図 14 に半径方向誤差、図 15 に回転振れ、図 16 にリード誤差、図 17 に半径方向誤差成分の周波数解析結果を示す。図 14 を見てみると、1 回転あたりの形状成分を確認できる。図 15 を見てみると、ほぼ $\pm 10 \mu\text{m}$ 程度に収まっており、カップリングと軸受けベアリングによる偏心とばらつきが確認できる。16 回転目と 56 回転目を見てみると振れの形状が似ているため、周期的な成分も確認できる。図 16 を見てみると、それぞれバラツキが見られるものの測定した 3 箇所においては誤差 $1 \mu\text{m}$ 以下に収まっている。図 17 を見てみると、形状成分にあたる半径方向誤差成分はいずれの箇所においても 2, 4 山成分が主成分になっていることが確認できる。

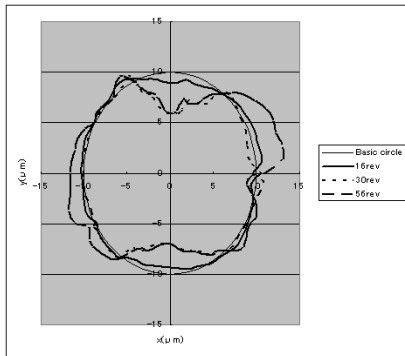


図 14 1 回転あたりの半径方向誤差

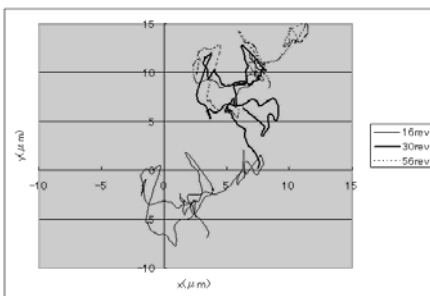


図 15 1 回転あたりの回転振れ

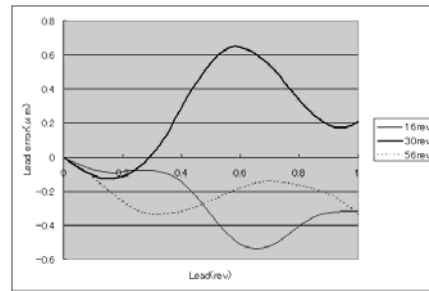


図 16 1 回転あたりのリード誤差

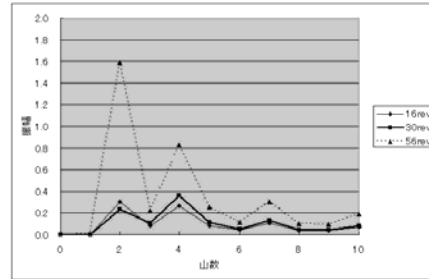


図 17 半径方向誤差周波数解析結果

(6) まとめ

1) レーザビームを用いた光学式 3 点法によるボールねじ評価システムを開発した。開発システムはボールねじの半径方向誤差、回転振れおよびリード誤差の 3 種類の精度を同時に測定できる。

2) ボールねじ 80 リード分の測定を行ったところ、それぞれのボールねじ精度の評価が可能であった。リード誤差に関しては JIS を満たしており、半径方向誤差の変動(最大値)においては JIS 規格を超える誤差となったが、全体においては $\pm 4 \mu\text{m}$ 程度となった。回転振れに関しては振れに偏りと偏心成分が確認できた。

3) ボールねじ 1 リードあたりの評価も可能であり、半径方向誤差の任意に選んだ 3 箇所に関しては、周波数解析を行ったところ 2 山、4 山が主成分であることが確認できた。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 1 件)

- ① 高橋明裕, 山田隆一: 小径レーザを用いた精密ボールねじの光学式 3 点測定, 2008 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, p.83-p.84, 2008, 査読無

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 隆一 (YAMADA RYUICHI)
長岡工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号: 4 0 1 1 0 1 4 2

(2) 研究分担者

外川 一仁 (TOGAWA KAZUHITO)
長岡工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号: 1 0 1 9 7 8 5 8