Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-05-22

[解説]ボールねじ送り駆動系の構成と振動特性

佐藤, 隆太

(Citation)
設計工学,54(4):213-218

(Issue Date)
2019-04

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90008123

解説

ボールねじ送り駆動系の構成と振動特性*

Structure and Vibration Characteristics of Feed Drive Systems Driven by a Ball-screw

佐藤　隆太**
（Ryuta SATO）

Key Words : feed drive system, ball-screw, support bearing, frequency response, vibration mode

1．はじめに

モータの回転運動をボールねじにより直進運動に変換する送り駆動機構は，数値制御工作機械や各種半導体製造装置，三次元測定器や各種搬送装置といった様々な産業用装置に用いられている．送り駆動機構とその制御系とをあわせたものは送り駆動系と呼ばれ，送り駆動系の性能はそれが用いられた装置全体の性能を左右する．送り駆動系により高速な運動を行わせようとすると，運動に伴う慣性力やモータトルク自体が加振力となって振動が励起され，それ以上の高速化が困難になるため，送り駆動系の振動特性を理解して機構や制御系の設計に生かすことが重要となる．

ここでは，まず，精密工学会超精密位置決め専門委員会で実施したアンケート調査の結果を紹介した後，ボールねじ駆動送り駆動系の代表的な構成について解説する．さらに，送り駆動系の周波数特性および振動モードと，各モードに影響を及ぼす因子について実験結果に基づいて説明する．

2．超精密位置決めアンケート

精密工学会の超精密位置決め専門委員会では，大学や企業の研究者や技術者を対象として位置決めに関するアンケート調査を4年ごとに実施しており，現時点における最新の調査結果は2014年度に実施されたものである[1), 2)]．調査報告書によると，回答者の約8割が直進運動を行う機構を対象としており，そのうちの約4割が回転モータと送りねじを用いており，また約4割がリニアモータやボイスコイルモータを用いている．さらに，案内要素としては約6割が転がり案内を用いており，続いてすべり案内，空気または油静圧案内を用いたものが多い．

ボールねじは送りねじ機構に転がり軸受の技術を応用した要素部品であり，1930年代の後半に米国で自動車用ステアリング機構に用いられたのが始まりであるといわれている[3)]．工作機械のNC化において工作機械の送り駆動機構に用いられ，現在では様々な産業用装置においてなくてはならないものとなった．高速化のための様々な技術開発によって，ボールねじを用いた機構で100m/minを超える送り速度が実現できるようになっている[3), 4)]．また，直動転がり案内は案内面に転がり軸受の技術と応用した要素部品であり，1970年代に日本で実用化されたのが始まりである．転動体に球（ボール）を用いる場合とローラを用いる場合とがあり，工作機械のようにより高い剛性が要求される場合にはローラが採用されることが多いようである．

アンケート調査の結果[1)]からは駆動方式と案内方式との間に興味深い関連性がみられる．アンケート結果にみられる駆動方式と案内面との代表的な組合せを表1に示す．ボールねじ駆動の場合には，約8割が転がり案内，約1割がすべり案内を採用してお

Table 1　Typical combination for feed drive system

Drive	Ball-screw	Linear motor
Guide	Rolling guides → 80%	Rolling guides → 60%
	Sliding guides → 10%	Hydro static guides → 20%
	Others → 10%	Others → 20%

＊　原稿受付　2019年1月6日
＊＊　非会員，神戸大学大学院工学研究科
（〒657-8501　神戸市灘区六甲台町1-1）

り，静圧案内の採用例は非常に少ない．一方，リニアモータ駆動の場合には，約6割が転がり案内，約2割が空気または油静圧案内を採用しており，すべり案内の採用例は非常に少ない．

なお，リニアモータ駆動の場合に直動転がり案内を採用する割合は年々増加している一方，同時に静圧案内を採用する割合は減少している．これは，直動転がり案内の精度向上によって，従来静圧案内が用いられていた装置の一部において直動転がり案内が採用されることが増えていることによると考えられる．

3. ボールねじ送り駆動系の構成

3.1 送り駆動機構

ボールねじを用いた送り駆動機構の一般的な構造を図1に示す．モータの回転運動はカップリング（軸継手）を介してボールねじ軸に伝えられ，ナットを介してテーブルの直進運動に変換される．ボールねじ軸の軸方向位置はサポートベアリング（支持軸受）によって拘束されている．

サポートベアリングは2つのアンギュラコンタクト軸受からなり，半径方向と軸方向の荷重を支えている（図2）．ボールねじ軸はモータ側とその反対側の2つの軸受によって支えられる．図3(a)に示すように，モータ側軸受に2つのアンギュラコンタクト軸受，モータの反対側には深溝玉軸受を用いる場合と，図3(b)に示すように，両方にそれぞれ2つのアンギュラコンタクト軸受を用いる場合とがある．前者の場合には，モータと反対側の軸受の軸方向位置は拘束されず，ボールねじ軸に作用する軸方向荷重はモータ側の軸受のみで受けるため，サポートベアリングの軸方向剛性が駆動機構全体の軸方向剛性を左右する．後者の場合には，両方のサポートベアリングで軸方向荷重を支えるため，駆動機構全体の剛性を高くできるが，ボールねじ軸が熱により膨張した場合には軸受に過大な力が作用してしまうため，ボールねじ軸心冷却等の対策が必要になる．

サポートベアリングにおける2つのアンギュラコンタクト軸受の組み合わせ方として，背面組合せ（DB形，図2の方式）と前面組合せ（DF形）とがあり，組み合わせ方の違いによる影響については，例えば工作機械の主軸軸受の剛性については詳細に検討した例があるが[5]，送り駆動機構における影響について明らかにした例は見当たらない．

モータからテーブルまでの間には，サポートベアリングのほかに，カップリングのねじり剛性，ボールねじ軸のねじりおよび軸方向剛性，ナットおよびナットブラケットの軸方向剛性といったばね要素が存在するため，サポートベアリングの軸方向剛性だけを高くしても駆動機構全体としての剛性が高くなるわけではなく，全体のバランスをみた設計が必要になるほか，各構成要素の質量や慣性モーメントとの関係で複数のモードでの振動が生じる．さらに，モータを駆動する制御系の特性も関係して送り駆動系全体としての振動特性が決まることになる．

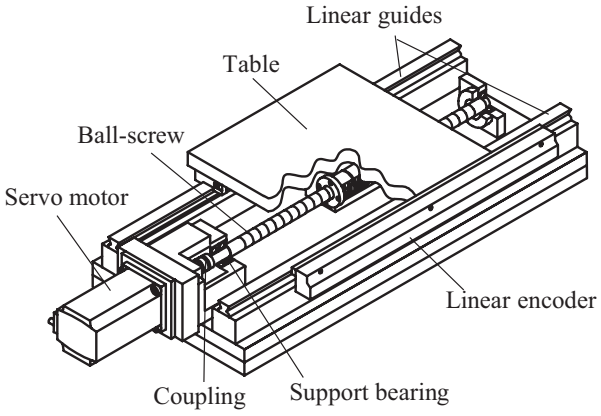


Fig. 1 Feed drive mechanism

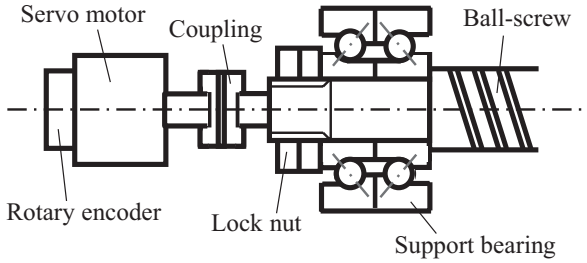


Fig. 2 Support bearing

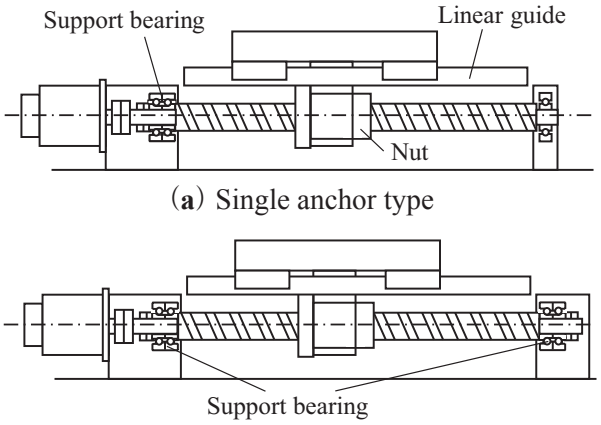
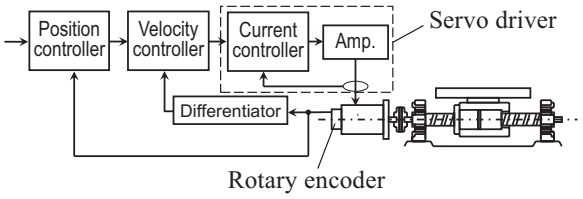
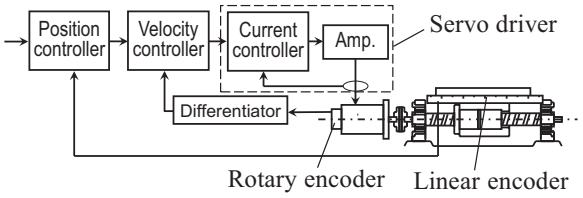


Fig. 3 Supporting methods for ball-screw shaft



(**a**) Semi-closed loop control system



(**b**) Full-closed loop control system

Fig. 4　Control system

3.2　制御系

位置制御を行うための送り駆動系の制御系は，3重のフィードバックループをもつ(図4)．最も内側のループは電流制御ループであり，モータの電機子に流れる電流を制御するためのものである．現在の一般的な送り駆動系にはACサーボモータ(永久磁石同期モータ)が用いられ，この場合にはモータがだすトルクは電流に比例するため，電流制御ループはトルク制御ループと同義である．電流制御器は比例-積分制御(PI制御)となっていることが多い．

なお，ACサーボモータでは固定子側の電流を制御して回転磁界を生成するため，ベクトル制御と呼ばれる演算が行われる[6]．このベルトル制御と電流制御ループとはモータメーカから提供されるサーボドライバ内で行われるのが普通である．

その外側には速度制御ループが構成され，一般的な速度制御器はPI制御系となっている(積分先行形のI-P制御系とした例もある)．モータをベクトル制御するためには回転子の位相情報が必須であり，そのため，ACサーボモータにはロータリエンコーダ(角度検出器)が備えられている．速度制御ループはこのロータリエンコーダによって検出された角度情報を微分した角速度をフィードバック信号として構成される．

最も外側に，位置制御ループが構成される．位置制御器は比例制御(P制御)とすることが多い．位置制御を行うためのフィードバック信号としては，モータに備えられたロータリエンコーダによって検出された角度信号を用いる方法(図4(a))と，テーブルに取り付けた位置検出器(リニアエンコーダ)によって検出された位置信号を用いる方法(図4(b))とがある．前者の方法はセミクローズドループ制御，後者はフルクローズドループ制御と呼ばれる．

セミクローズドループ制御の場合，モータから先の挙動は制御系にフィードバックされないため，例えば，ボールねじのピッチ誤差や弾性変形，温度変化による熱変形が存在するとそれらはテーブルの位置誤差として現れる．一方，フルクローズドループ制御の場合には，テーブルの位置がフィードバックされるため，ボールねじのピッチ誤差や変形による影響を受けにくくなる．ただし，とくに高精度なリニアエンコーダは高価であることや，制御ループ内に弾性要素が存在することによる制御系としての安定性の問題が生じる場合がある[7]．このため，制御系はセミクローズドループ制御とし，ボールねじのピッチ誤差や変形をモデル化して補正することで精度を確保することも多い．

制御系の各フィードバックゲインを大きく設定するほど制御系としての応答性や外乱抑制特性が向上するが，制御系の応答帯域が駆動機構のもつ固有振動数よりも高くなると，機構の発振がおこって実用できなくなる．より高性能な送り駆動系を実現しようとした場合には，制御系の設計と駆動機構の特性との関係は重要である．

4.　送り駆動系の振動特性

4.1　周波数特性

1軸のボールねじ駆動送り駆動系についてその周波数特性を測定し，振動モード解析を行った結果を紹介する．周波数特性を測定する方法としては，インパルスハンマを使った加振試験や制御装置内部で加振信号を印加する方法があるが，ここでは，より高周波数域までの特性を評価できる前者の方法を採用している．測定対象とした送り駆動系は一般的にみられる構成のものであり，ACサーボモータとボールねじによって駆動され，テーブルは直動転がり案内によって案内されている．また，ボールねじ軸のモータ側のみがサポートベアリングで支持されたシングルアンカタイプとなっている．

図5に示すように，テーブル端面を運動方向に加振し，そのときのテーブルの軸方向加速度，ボールねじ軸の軸方向加速度，そしてボールねじ軸の回転角加速度を測定する．ボールねじ軸の回転角加速度は直接測定することができないため，ボールねじの端面にアルミニウム合金製のはりを取り付け，回転の接線方向の加速度を測定して回転角加速度に変換する．このとき，はりに取り付けた加速度計による

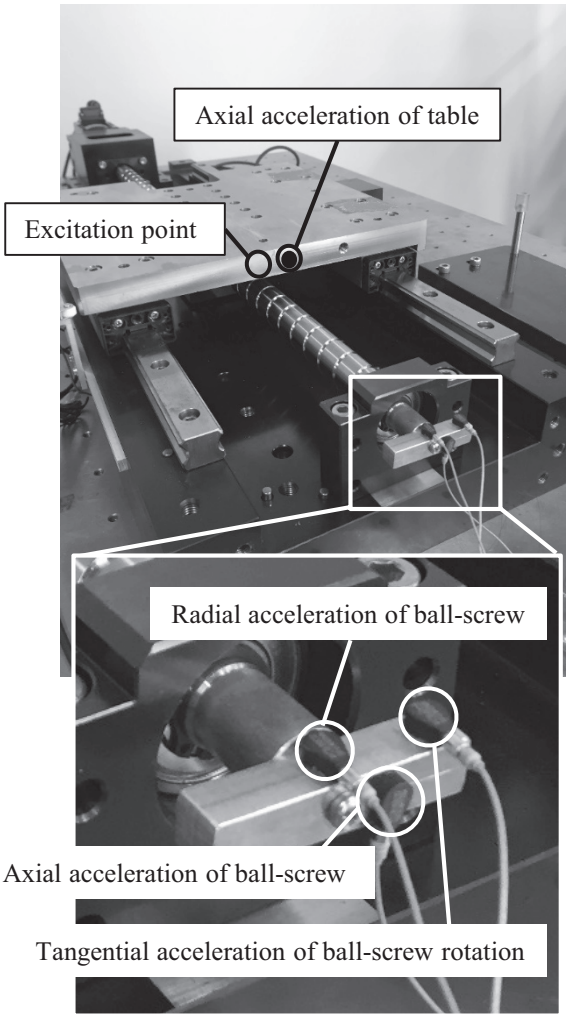


Fig. 5　Measurement set-up

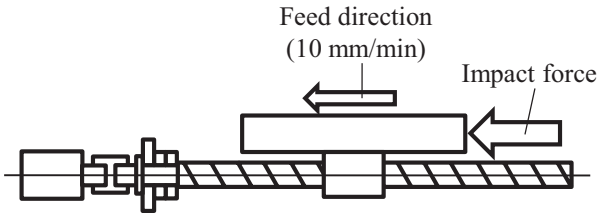


Fig. 6　Excitation direction

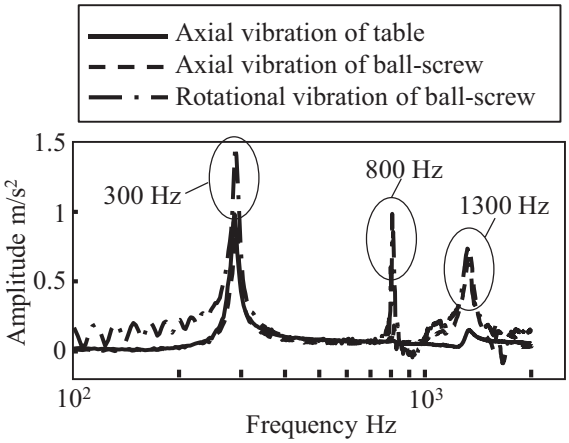


Fig. 7　Measured frequency response

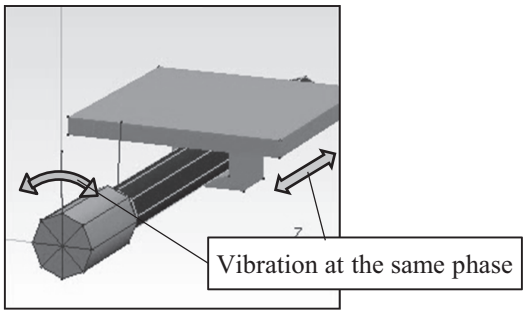
測定結果にはボールねじ軸の曲げ振動による影響も含まれてしまうため，はりのボールねじ軸中心線上に半径方向加速度を測定するための加速度計も取り付け，これによる半径方向加速度の測定結果を接線方向加速度の測定結果から差し引くことで，ボールねじ軸の曲げ振動による影響を取り除いている．

軸受，ボールねじ－ナット間，および直動転がり案内には非線系ばね特性と呼ばれる摩擦特性が存在することが知られている[8), 9)]．これは数百マイクロメートル以下の変位領域では摩擦力が変位依存性を示すというものであり，この特性が送り駆動系の周波数特性に影響を及ぼしていることが確認されている[10)]．ここでは，図６に示すようにテーブルを10mm/sで等速運動させた状態で運動方向に加振することで，摩擦力の非線系ばね特性による影響を取り除いている．

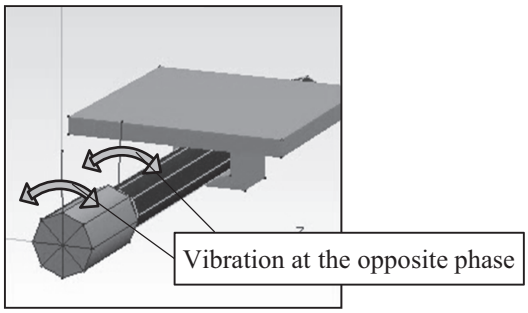
周波数特性の測定結果の一例を図７に示す．テーブルの軸方向運動の測定結果には主に300Hzの振動のみがみられ，ボールねじ軸方向運動および回転運動の測定結果には，300Hzのほかに，800Hzと1300Hzの振動がみられる．とくにボールねじ軸の回転運動では800Hzの振動が最も大きくなる．ボールねじのリードとも関係するが，２次振動モードによる影響はテーブルの軸方向加速度の測定結果には現れにくいため，図５に示すような方法での測定が必要になる．

4.2　振動モード

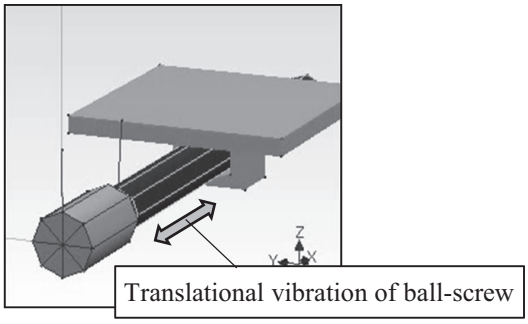
周波数特性の測定結果から振動モードを解析した結果について，図８を使って説明する．最も周波数の低い300Hzの振動は１次振動モードであり，モータからテーブルまでの全ての要素が同じ位相で振動している．１次振動モードの周波数は，とくにフルクローズドループの制御系を構成した場合にその安定性に影響する．この振動モードには，モータとテーブルとの間の全てのばね要素が直列ばねとして影響を及ぼしており，最も弱い剛性をもつ要素がその特性を支配するため，各要素の剛性をみて最も弱いものの剛性を改善することが効果的であるほか，制御系のゲイン設定も振動に大きな影響を及ぼす．１次振動モードでの発振が生じた場合には，振動抑制フィルタ（ノッチフィルタ）等の適用によってその



（**a**）1st vibration mode（300Hz）



（**b**）2nd vibration mode（800Hz）



（**c**）3rd vibration mode（1300Hz）

Fig. 8　Analyzed vibration mode

発振を回避することはその周波数の低さから困難であることが多く，制御系のゲインを低く設定せざるを得ない．より高性能な送り駆動系の実現のためには，駆動機構の設計変更等の根本的な解決が必要になる[11]．

800Hzの2次振動モードは，モータの回転運動とボールねじの回転運動との間で位相が逆になるねじり振動モードであり，カップリングとボールねじ軸のねじり剛性が影響を及ぼしている．2次振動モードは，速度制御系の応答性を高めていったときに励起されやすく，異音の原因になることが多いが，その周波数が高いためノッチフィルタの適用によって回避できることが多い．また，カップリングのねじり剛性と減衰性とを適切に選択することで改善できることもある．

1300Hzの3次振動モードはボールねじ軸の軸方向振動であり，サポートベアリングとナットの軸方向剛性とボールねじ軸質量との関係で決まるが，実際の送り駆動系でこの3次振動モードが問題になる例は少ないようである．

各振動モードが現れる周波数については各要素の剛性や質量との関係によって変化するが，多くの送り駆動系においては図8に示すような3種類の振動モードが現れるようである．しかし，送り駆動系の振動特性と各構成要素の特性との関係については完全には解明されておらず，更なる研究が必要であるといえる[12),13)]．

5.　おわりに

ここでは，ボールねじ駆動送り駆動系について，その構成と振動特性について解説した．ボールねじ駆動送り駆動系は長年にわたって様々な産業用装置に用いられているが，その高性能化は現場での試行錯誤によってきた部分が多く，とくに動的な特性に関する設計指針は確立されていない．送り駆動系の更なる高速高精度化のためには，その動的な設計論の確立が急務となっている．

謝辞

本研究の一部はNSKメカトロニクス技術高度化財団研究助成の支援によるものであり，ご関係の各位に深く感謝の意を表する．

参考文献

1）　精密工学会超精密位置決め専門委員会：超精密位置決めアンケート報告書，(2015)．
2）　大岩孝彰，勝木雅英：超精密位置決めにおけるアンケート調査－精密メカトロニクスと精密計測に関するアンケート調査－，精密工学会誌，81，10（2015），904.
3）　中村晋哉，宮口和男：精密軸受，ボールねじの技術開発，精密工学会誌，75，1（2009），121.
4）　新井覚：精密ボールねじの最新技術動向，2015年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2015)，593.
5）　内田英男，清水茂夫：アンギュラ玉軸受支持スピンドルの負荷分布と剛性，精密工学会誌，63，7（1997），1033.
6）　杉本英彦，小山正人，玉井神三：ACサーボモータの理論と設計の実際－基礎からソフトウェアサーボまで－，総合電子出版社，(1990)．

7) 松原厚：精密位置決め・送り系設計のための制御工学，森北出版，(2008).
8) 佐藤隆太，堤正臣，今木大輔：直動転がり案内における摩擦特性の実験的挙動解析，日本機械学会論文集(C編)，73，734 (2007)，173.
9) 深田茂夫，成瀬慎也，松本貴広：ボールねじの微視的挙動に関する研究(第1報)－準静的特性に関する基礎実験－，精密工学会誌，66，7 (2000)，1070.
10) 田中淑晴，大岩孝彰，大塚二郎：精密位置決め制御のためのリニアボールガイドの摩擦モデルに関する研究，精密工学会誌，72，4(2006)，470.
11) 垣野義昭，松原厚，上田大介，中川秀夫，竹下虎男，丸山寿一：NC工作機械における送り駆動系のトータルチューニングに関する研究(第3報)－機構パラメータのチューニング－，精密工学会誌，62，3 (1996)，423.
12) 佐藤隆太，橋本武志：カップリングの違いが送り駆動系の運動特性に及ぼす影響，2015年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2015)，847.
13) 長尾淳志，佐藤隆太，白瀬敬一，遠藤征司，橋本武志：カップリング及びボールねじが送り駆動系の振動特性に及ぼす影響，2016年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2016)，729.

佐藤　隆太

2001年3月　岩手大学工学部機械工学科卒業．2004年6月　東京農工大学大学院助手．2008年4月　三菱電機株式会社先端技術総合研究所．2010年10月　神戸大学助教，2013年4月　准教授．数値制御工作機械に関する研究に従事．