学術論文

超高分解能エンコーダを用いたボールねじ駆動システムの
外乱トルク推定

Estimation of disturbance torque for ballscrew drive system with using high resolution encoder

野口 俊介^{*1}(学生員), 百目鬼 英雄^{*1}(正員)

Shunsuke NOGUCHI(Stu.Mem.), Hideo DOHMEKI(Mem.)

Ballscrew drive system has high mechanical efficiency and is able to get high gear ratio easily. But it also has non liner friction elements like rolling friction and viscous friction, so it makes ballscrew control accuracy worse. For that reason, it is proposed that inserting disturbance observer into control system and compensating disturbance torque. Generally, rotary encoder is used for position sensor in ballscrew control, but its resolution affects accuracy of drive control and disturbance observer. In this paper, we propose a speed control system using AC servo motor ball screw drive system, compare driving characteristics in low speed range when using low resolution encoder and high resolution encoder as position sensor. Also we examine effects for driving characteristics by using and compensating disturbance observer. These verifications were carried out by simulation and actual machine.

Keywords: ballscrew system, high resolution encoder, disturbance torque, non liner friction, disturbance compensation, disturbance observer.

(2017 年 3 月 10 日受付, 2017 年 10 月 4 日再受付, 2017 年 11 月 23 日再々受付)

1 はじめに

産業用ロボットや精密加工機, 電動パワーステアリングなどの動力源として, ボールねじをサーボモータで駆動する直動機構が広く用いられている。近年では性能向上のために機構の高速化と高精度化が進んでいる。ボールねじ駆動システムでは, 機械効率が極めて高く, リードピッチの取り方により高い減速比を得ることが可能であるものの, ボールの転がり摩擦や粘性摩擦をはじめとする非線形摩擦要素を持つことから, 制御性の低下をもたらし, 高速化, 高精度化への妨げとなっている。またボールねじシステムでは, 非線形摩擦による外乱のみならず, 機構の外側から加わる外乱を常に受けて駆動することになるため, 特にごく低速領域における速度精度や位置決め機構における目標位置近傍での位置精度に与える影響が大きく, 外乱に対するロバスト性を持った機構を構築することが求められている。

これらボールねじ駆動システムに悪影響を及ぼす外乱を補償するために, 制御系に外乱オブザーバを組み込み外乱推定を行うことで外乱トルクを補償する手

法が提案されている[2]-[4]。システムのモデル化の過程において, 非線形摩擦に関する研究は古くから行われており, 様々な形の摩擦モデルが提唱されている[1]-[4]。またボールねじの制御には位置センサとしてエンコーダを利用することが一般的であるが, エンコーダの分解能により駆動可能な精度の上限が定まる上に, オブザーバによる推定の精度にも影響を及ぼす。

そこで本稿では, AC サーボモータによるボールねじ駆動システムで速度制御系を構成し, 位置センサに低分解能エンコーダ及び近年開発された 23bit の高分解能エンコーダを用いた際の低速域における運転特性を比較すると共に, 外乱オブザーバを構成して外乱トルクを推定し, 運転特性に対する影響について実機及びシミュレーションで検証を行った。

2 ボールねじ駆動システムの構成

2.1 ボールねじ駆動システムの諸元

Fig.1 に本稿で用いるボールねじシステムの概略を, Table.1 にパラメータを含む諸元を示す。

ボールねじ駆動システムは, ボールねじ及びステータ, サーボモータ(高分解能エンコーダ付き), インバータボード兼コントローラの 3 つで構成する。ボールねじのリードピッチは 20mm であり, 全長は 500mm である。サーボモータには多摩川精機製

連絡先: 野口 俊介, 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 10 号館 1 階, 東京都市大学工学研究科 電気電子工学専攻 電気機器研究室
e-mail: g1691301@tcu.ac.jp

^{*1} 東京都市大学 電気機器研究室

TSM3202N2300E040 を使用し、これには同社製 23bit の高分解能アブソリュートエンコーダが搭載されている。なお低分解能エンコーダは、高分解能エンコーダをそのまま利用し、取得データの下位ビットを切り捨てることにより 11bit(2048pulse/rev)を等価的に再現した。インバータボードにはルネサス製 RX62T マイコンを搭載した 500W 級の 24V 入力 of 自作インバータを利用した。

2.2 システムの制御構成

2.1 節で述べた機器を用いて、Fig.2 に示す制御ブロック図の速度制御系を構成した。本稿で用いる実験機器では、ボールねじに位置センサを持たないため、位置決め制御系への拡張時にはモータに取り付けられたロータリエンコーダのデータを利用してセミクローズドループを構成する。制御周期は電流ループが 100us, 速度ループが 1ms である。電流ループの制御ゲインは比例が $K_{cp}=3$, 積分が $K_{ci}=0.0005$ であり、速度ループ

Table 1. Specification of ballscrew drive system.

Parameter	Value[unit]
Rated Torque	0.64[Nm]
Rated Speed	3000[rpm]
Rated Output	200[W]
Rated Current	6.2[A]
Encoder Resolution	8388608 [pulse/rev] (23bit)
Lead pitch of ballscrew	20[mm]
Length of ballscrew	500[mm]

Table 2. Parameter of ballscrew model.

Parameter	Symbol	Value[unit]
Table Weight	M_t	5[kg]
Viscous damping coefficient	C_t	0.003[Ns/m]
Axial stiffness of ballscrew	K_t	4.16×10^7 [N/m]
Transformation coefficient of rotation-linear motion	R	$0.02 / 2\pi$ [m]
Static Friction		0.1 [Nm]

の制御ゲインは比例が $K_{sp}=1.5$, $K_{si}=0.005$ である。これらのゲインは、カットアンドトライで発散しない値を決定した。また外乱推定用に外乱オブザーバを挿入しており、オブザーバゲインにより外乱補償の有無を調節することが可能である。

2.3 外乱オブザーバモデルの構成

ボールねじ駆動システムにおいて外乱オブザーバを構成するためには、ボールねじ機構をモデル化する必要がある。Table.2 にボールねじ機構のパラメータを示す。ボールねじのモデルとして最も簡易な 2 慣性系のモデルを用いると、ボールねじへモータの回転角 θ を与えた時のモデルは次式で表される。[5]

$$x_m = R\theta \quad (1)$$

$$F = K_t(x_m - x_t) \quad (2)$$

$$F - C_t v = \frac{1}{s^2 M_t} \quad (3)$$

ここで、 x_m は直線系へ変換したモータの移動量、 F はボールねじテーブルに加わる推力、 v はテーブルの

Fig.1. Configuration of Ballscrew Drive System.

Fig.2. Block diagram of ballscrew speed control system.

Fig. 3. Block diagram of ballscrew model including nonlinear friction element.

Fig. 4. Block diagram of disturbance observer.

速度, R は回転系と直線系の変換係数, K_t はボールねじの軸方向剛性係数, C_t は粘性減衰係数, M_t はテーブルの質量, s はラプラス演算子である。

一般にボールねじには、粘性抵抗などによる非線形摩擦要素が含まれることが知られている。そこでこのモデルに非線形摩擦モデルを組み込む。非線形摩擦モデルは数多く提唱されているが、本稿では最も簡単なクーロン摩擦モデルを用いる。クーロン摩擦モデルにおける摩擦力 $F_{friction}$ は、テーブルの速度 v を用いると次式で定義される。

$$F_{friction} = \text{sgn}(v) \times (C_t \times \text{abs}(v) + \text{StaticFriction}) \quad (4)$$

ここで、 StaticFriction は静止摩擦力である。以上(1)～(4)式をブロック線図に表わすと、Fig.3 の通りとなる。

Fig.3 に示したモデルから、ボールねじの逆モデルを導出し、外乱オブザーバのモデルを構成する。本稿では外乱が加わる箇所については特定を行わず、モータ入力からボールねじ出力までの間に加わったすべての外乱を一括して推定する。したがって、(5)～(7)式に示す通り、モータへの指令トルクとボールねじの移動量から求めたトルクの差を求めることで、外乱を推定することが出来る。

$$\hat{T}_m = pK_e i_{q_{ref}} \quad (5)$$

$$\hat{F} = sM_t v + F_{friction} \quad (6)$$

$$T_{disturbance} = \hat{T}_m - R\hat{F} \quad (7)$$

ここで、 p は極対数, K_e は誘起電圧定数, $i_{q_{ref}}$ は q

軸電流指令である。(5)～(7)式によって導かれた外乱オブザーバのブロック線図を、Fig.4 に示す。

なお、推定系には微分項が含まれるため、値の発散を抑制するために Fig.4 の通り LPF を挿入している。ボールねじの共振周波数が 150Hz 周辺にあること、及び速度の制御周期が 1ms であることから、フィルタの遮断周波数は 159Hz とした。

3 ボールねじ運転特性の比較

3.1 シミュレーションにおける比較

本章では、前章で構成した制御系及びモデルを用いて実機及びシミュレーションの双方で運転特性の比較を行う。実験では、23bit の高分解能エンコーダを用いた場合と 11bit の低分解能エンコーダを用いた場合のそれぞれにおいて、外乱オブザーバによる補償を行った場合と行わない場合について検証を行う。10rpm から-10rpm まで、1 秒程度の間隔で 2rpm 刻みで速度を低下させる運転パターンを用い、速度、外乱トルク、 q 軸電流を観測し、特性の比較を行った。なお、外乱オブザーバ補償ありの場合におけるオブザーバゲインは 0.25 を用いた。

シミュレーションには MATLAB/Simulink を用い、実機構成を再現した。Fig.5 から Fig.8 に、シミュレーションにおける速度特性、外乱推定特性、 q 軸電流特性を示す。Fig.5 は 23bit エンコーダ・オブザーバ補償あり、Fig.6 は 23bit エンコーダ・オブザーバ補償なし、Fig.7 は 11bit エンコーダ・オブザーバ補償あり、Fig.8 は 11bit エンコーダ・オブザーバ補償なしである。

Fig.5, Fig.6 と Fig.7, Fig.8 を比較すると、エンコーダの分解能の違いにより、速度特性、外乱推定特性、電流特性のいずれにも大きな違いが表れていることが分かる。23bit エンコーダを用いた場合ではおおむね振動もなく速度指令に追従しているものの、11bit のエンコーダを用いた場合は最大で指令速度 ± 5 rpm 程度の速度振動が発生している。速度の検出精度は理論上高分解能で 7.15×10^{-4} rpm, 低分解能で 2.93rpm であり、およそ 4000 倍の差が生じることから、理論に沿った結果となっているといえる。また 11bit エンコーダを用いた場合では 23bit エンコーダを用いた場合に比べて推定外乱の振動が大きい。角度分解能から求めた理論的なトルク推定の分解能は高分解能で 1.50×10^{-5} Nm, 低

Fig.5. Speed, Disturbance, and Current characteristics (simulation, using 23bit encoder and observer).

Fig.6. Speed, Disturbance, and Current characteristics (simulation, using 23bit encoder).

分解能で $6.14 \times 10^{-2} \text{Nm}$ であり、およそ 4000 倍の差が生じる。今回印加した外乱(0.2Nm)を表現するためには、高分解能では約 13000 ステップであるのに対し低分解能では 3 ステップとなるため、正しく推定が行えていない可能性が考え得る。同様に電流においても低分解能化に伴って電流振動が増加する結果となっている。なお低分解能では理論上推定トルクを 500~1000 ステップで表現する場合 30Nm 程度が推定最低限度となる。

Fig.5, Fig.7 と Fig.6, Fig.8 を比較することで、外乱オブザーバによる補償の効果について比較することができる。Fig.7 と Fig.8 の 11bit エンコーダを用いた場合には前述の通り外乱推定自体が正確でない可能性もあり、補償による効果は判別できない。Fig.5 と Fig.6 の間では、速度指令が変化する部分において振動が発生しているものの、その振動の収束が外乱補償を行った場合の方が早いことが分かる。特に速度指令が 0rpm から -2rpm に変化する部分において、補償なしの場合には収束までに 80ms かかるのに対し補償ありの場合には 50ms で収束しており、速度特性の向上に寄与していることが分かる。なお、速度特性の向上に伴って、電流の振幅も低下する結果となった。

したがって、エンコーダの分解能が低下すると速度の検出精度が低下することに伴い速度制御特性が悪化すると共に、これを用いたオブザーバでの外乱の推定

Fig.7. Speed, Disturbance, and Current characteristics (simulation, using 11bit encoder and observer).

Fig.8. Speed, Disturbance, and Current characteristics (simulation, using 11bit encoder).

に影響が及ぼされる可能性があることが判明した。

Fig.5 から Fig.8 のシミュレーションでは外乱は加わっていない想定であるために、外乱の補償量は小さいものとなる。そこで外乱補償による効果をより分かりやすくするために、同様のシステムに外乱トルクを加えた場合のシミュレーションも行った。ボールねじシステムで想定している外乱は、主としてボールねじ機構の粘性摩擦やクーロン摩擦と、その他機構の外から加わる任意の外力であるため、特定の外乱に限らず検討を行う必要があるが、ここでは基本周波数の他に高調波成分が多く含まれるパルス波を外乱として扱うこととした。パルス波の周波数は 2Hz、パルス幅 25%、大きさ -0.2Nm とした。なおこのシミュレーションでは、外乱の推定が正しいかより正確に確認するため、及び低分解能では推定が行えていない可能性があることを考慮し、高分解能エンコーダにおいて補償の有無について比較を行う。Fig.9 及び Fig.10 にシミュレーションにおける速度特性、外乱推定特性、 q 軸電流特性を示す。Fig.9 がオブザーバ補償あり、Fig.10 がオブザーバ補償なしである。

Fig.9 及び Fig.10 より、いずれの場合も外乱として与えた 2Hz、パルス幅 25%、-0.1Nm の周期パルス进行正しく推定できていることが分かる。しかしながら、速度特性に関してはオブザーバ補償なしの場合、速度指令

Fig.9. Speed, Disturbance, and Current characteristics (simulation, using 23bit encoder and observer).

に対して $\pm 3.5\text{rpm}$ の振動が発生し、その収束に20msかかっているが、オブザーバ補償を加えることで振動幅を $\pm 3\text{rpm}$ に低減し、その収束が10msに短縮されることが分かる。同様に電流についても、補償なしの場合には電流のスパイクが $\pm 400\text{mA}$ 程度になるのに対し、補償ありでは $\pm 300\text{mA}$ 程度に低減されている。また、角度分解能から求めた理論的なトルク推定の分解能は高分解能で $1.50 \times 10^{-5}\text{Nm}$ 、低分解能で $6.14 \times 10^{-2}\text{Nm}$ である。このシミュレーションで推定した外乱トルクは 0.1Nm から 0.2Nm 程度であり、この大きさのトルクを高分解能では約6600ステップ、低分解能では1ステップで表現することとなり、外乱を正しく推定するためには、理論上最低でも20bit程度(約500~1000ステップで表現)は必要になるものと考えられる。ゆえに23bitの高分解能エンコーダを用いることで正しい外乱推定が行えるものと考えられる。

したがって前章で構成したオブザーバにより、正しく外乱の推定が行えていること、並びに外乱オブザーバによる外乱補償により、速度特性並びに電流特性の改善が可能になる可能性が明らかになった。

3.2 実機における比較

前節では、シミュレーションを用いて低速域におけるエンコーダの分解能及び外乱オブザーバの有無による速度特性、外乱推定特性、電流特性について比較を行った。本節では前述した実機を用いて、シミュレーションと同様の速度パターンにおける速度特性、外乱推定特性、電流特性について観測し、比較を行った。Fig.5からFig.8と同様、Fig.11からFig.14に、実機における速度特性、外乱推定特性、 q 軸電流特性を示す。Fig.11は23bitエンコーダ・オブザーバ補償あり、Fig.12は23bitエンコーダ・オブザーバ補償なし、Fig.13は11bitエンコーダ・オブザーバ補償あり、Fig.14は

Fig.10. Speed, Disturbance, and Current characteristics (simulation, using 23bit encoder).

11bitエンコーダ・オブザーバ補償なしである。

Fig.11, Fig.12とFig.13, Fig.14を比較すると、シミュレーションと同様エンコーダの分解能の違いにより、速度特性、外乱推定特性、電流特性のいずれにもに大きな違いが表れていることが分かる。23bitエンコーダを用いた場合では指令速度 $\pm 1\text{rpm}$ 程度で速度指令に追従しているものの、11bitのエンコーダを用いた場合は最大で指令速度 $\pm 3\text{rpm}$ 程度の速度振動が発生している。この結果は速度分解能の理論値から考え得る結果であることが分かる。また23bitエンコーダでは速度の振動の周期は速度に比例しているが、11bitエンコーダを用いた場合にはその傾向が見られない。また11bitエンコーダを用いた場合では23bitエンコーダを用いた場合に比べて推定外乱の微振動が大きく、推定の精度に影響が出ている。同様に電流においても低分解能化に伴って電流の微振動が増加する結果となっている。

実機での測定結果における推定外乱では、シミュレーションでは見られなかった速度に比例する周波数の小さな周期的な外乱トルクが見える。実機においてはモデルで想定した要素以外にも、駆動に影響を及ぼす非線形な要素やカップリング等の機械的な部品が含まれるために、これらによる影響が外乱として現れたものと考えることが出来る。特に速度に比例した周期で表れていることから、ボールねじの主要部分から起きている外乱であると考えられる。

Fig.11, Fig.13とFig.12, Fig.14を比較することで、外乱オブザーバによる補償の効果について比較することができる。Fig.13とFig.14の11bitエンコーダを用いた場合には速度の微振動が目立つものの、補償を入れない場合には外乱に起因する速度の変動の影響を受けているが、補償によって速度の平均値はおおむね指令値と合致する。Fig.11とFig.12の間でも低分解能のときと同様に、補償なしの場合には外乱に起因する速度変動が起きているが、補償によってその外乱による変

Fig.11. Speed, Disturbance, and Current characteristics (actual system, using 23bit encoder and observer).

Fig.12. Speed, Disturbance, and Current characteristics (actual system, using 23bit encoder).

動は抑制ができています。なお、電流特性も補償によってより滑らかになる結果となった。

したがってシミュレーションと同様に、エンコーダの分解能が低下すると速度の検出精度が低下することに伴い速度制御特性が悪化すると共に、これを用いたオブザーバでの外乱の推定に影響が及ぼされることが分かった。また外乱の推定及び補償により、未知な外乱を推定しその外乱によって引き起こされる速度特性の悪化を抑制することが可能であることが確認できた。

4 まとめ

本稿では、ボールねじ駆動システムで速度制御系を構成し、超高分解能エンコーダを用いた際の駆動特性及び外乱推定について、低分解能エンコーダを用いた際との比較を実機とシミュレーションの双方で行った。

シミュレーション及び実機の双方において、低分解能エンコーダでは速度特性に振動が発生し、外乱推定にも影響を及ぼしたが、高分解能化により速度特性や外乱推定、及び電流特性も滑らかになり、全体的な駆動システムの性能向上が可能となった。また、外乱によって引き起こされた速度特性の振動に対して、外乱推定を行い補償することにより、その振動が収束する時間を短縮することや、振動による影響を除去し速度

Fig.13. Speed, Disturbance, and Current characteristics (actual system, using 11bit encoder and observer).

Fig.14. Speed, Disturbance, and Current characteristics (actual system, using 11bit encoder).

追従性を向上させることが可能であることが分かった。

同時にボールねじ機構の未知の外乱についても推定することが可能となったが、より正確な外乱の推定のためにはより実機に即したモデルの構築、すなわちより現実的な非線形摩擦モデルの構築の必要があると考察される。

参考文献

- [1] 伊藤和晃, 前田佳弘, 樋口雄介, 川福基裕, 岩崎誠, 平井洋武, 転がり摩擦特性を考慮した非線形摩擦モデリングとその評価, 電気学会産業計測制御研究会資料, IIC-06-14, No.1-15, pp.77-82, 2006.
- [2] 山元純文, 岩崎誠, 松井信行, 伊藤和晃, ボールねじ駆動テーブルシステムの機械特性変動に対する位置決め精度の解析と性能向上, 電気学会論文誌 D, Vol.128, No.6, pp.839-848, 2008.
- [3] 岩崎誠, 前田佳弘, 川福基裕, 平井洋武, 非線形摩擦のモデル化と摩擦補償による位置決め制御系の高精度化, 電気学会論文誌 D, Vol.126, No.6, pp.732-740, 2006.
- [4] 浅海博志, 藤本博志, 可変自然長ばねモデルと外乱オブザーバに基づくボールねじ駆動ステージの非線形摩擦補償, 電気学会論文誌 D, Vol.129, No.11, pp.1101-1108, 2009.
- [5] 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.
- [6] 杉本英彦, 小山正人, 玉井伸三, AC サーボシステムの理論と設計の実際, 総合電子出版社, 1990.