平均速度読み込み型瞬時速度オブザーバにおける慣性モーメントの同定

准員 岡村 勇作 (東京大)
非会員 全 瑩 煥 (東京大)
正員 堀 洋 一 (東京大)

Inertia Moment Identification in the Average Speed Type Instantaneous Speed Observer

Yusaku Okamura, Associate, Yeonghan Chun, Non-Member, Yoichi Hori, Member (University of Tokyo)

In servomotor control systems, it is difficult to obtain the accurate speed information by using a low resolution encoder because encoder pulses are very rare in a low speed range. To overcome this problem, we proposed the instantaneous speed observer to estimate the instantaneous speed and improved the system stability and also realized the disturbance rejection control. However, when the inertia moment changed, the estimated instantaneous speed had an error because the observer used the nominal inertia to calculate the speed. For this reason, the identification method of the inertia moment was proposed but it operated at about 50rpm speed command. In this paper, we propose novel identification methods for the average speed type instantaneous speed observer and identify the inertia moment in a very low speed range below 1 rpm.

キーワード：瞬時速度オブザーバ、慣性モーメント同定、適応アルゴリズム、超低速運転

1. はじめに

低精度エンコーダを用いるサーボモータの制御系では、低速域においてエンコーダパルス数が少なくなるため、速度情報を差分によって得る場合に桁落ちがはげしくなり、その結果定常誤差を生じたり、系の安定性を損なうことがある。そこで、電流情報を利用してエンコーダ読み込み点間の瞬時速度を推定する瞬時速度オブザーバが提案され、安定性の向上に大きな効果があることが報告されている^{[1]~[3]}。筆者らは、これらの提案を整理し、オブザーバとしての収束特性や設計法を明らかにすると同時に、推定される外乱のフィードフォワード補償を行なって優れた外乱抑圧性能を実現できることを示してきた^[4]。この瞬時速度オブザーバには、エンコーダからの位置情報をもとに速度を推定する中高速用の「位置読み込み型」と、高速カウンタによって計測したエンコーダパルスの時間間隔をもとに速度を推定する低速用の「平均速度読み込み型」がある。

しかし、瞬時速度オブザーバは慣性モーメントのノミナル値を用いて瞬時速度を推定するため、実際の慣性モーメント値が変動すると速度推定値に誤差を生じ、制御性能の劣化を招くという欠点があった。そこで、電動機と負荷を含めた慣性モーメントを同定し速度推定に用いれば、慣性モーメントの変動にロバストになることが考えられ、「位置読み込み型」においてこれを実現した^[5]。ただし、その速度指令値には±50rpm程度のかなり大振幅の方形波が必要であった。

本論文では、低速用である「平均速度読み込み型」に同様の同定法を適用し、「位置読み込み型」では制御できない低速域でも慣性モーメントの変動にロバストな制御系を

実現することを試みた。慣性モーメントの同定においては外乱項の処理が重要なポイントとなるが、従来の外乱を差分によって消去する方式以外に、外乱オブザーバの出力する推定外乱を外乱項に代入する方式を新たに提案し、両方式を比較した。また、適応アルゴリズムには逐次型最小二乗法および固定トレース則を用いた。

これらの同定法が良好な同定結果を得られることを実験によって示すとともに、その手法の特徴を比較検討する。

2. 「平均速度読み込み型」とその問題点

2.1 「平均速度読み込み型」の原理

「平均速度読み込み型」のタイミングチャートを図1に、速度推定の原理を図2に示す。ここでは、エンコーダパルスの時間間隔 T_1 がDSPの制御周期 T_2 よりもかなり長くなるような低速領域を扱っている。 T_2 ごとの短い電流制御点 $[m,k]$ での加速トルク $T_{mech}[m,k]$ は、電動機トルク $K_m i[m,k]$ と区間 m で一定と仮定した外乱トルク $\hat{f}_L[m]$ の和、

$$\hat{T}_{mech}[m,k] = K_m i[m,k] + \hat{f}_L[m] \quad (1)$$

によって推定できる。ここで、 K_m はトルク係数、 $i[m,k]$ は電流値である。これを台形積分することで速度推定値を(2)式により求め、さらに速度を台形積分して位置推定値を(3)式で求める。

$$\omega[m,k] = \omega[m,k-1] + \frac{T_2}{2} \left(\frac{\hat{T}_{mech}[m,k] + \hat{T}_{mech}[m,k-1]}{J_n} \right) \quad (2)$$

$$\hat{\theta}[m,k] = \hat{\theta}[m,k-1] + \frac{T_2}{2} \left(\omega[m,k] + \omega[m,k-1] \right) \quad (3)$$

高速カウンタはパルス到来時にリセットされるようにの

図1 「平均速度読み込み型」のタイミングチャート
Fig.1 Timing chart of the average speed type instantaneous speed observer.

図2 速度推定の原理
Fig.2 Principle of the speed observer.

み設定されている。すべての電流制御点でカウンタ値を読み込むことにより、パルス到来時と電流制御点との時間差 $T_{dif}[m]$ を知ることができるので、

$$T_w[m] = T_1[m] - T_{dif}[m] + T_{dif}[m+1] \quad (4)$$

からパルス間隔 T_w を正確に求めることができる。パルス間の平均速度 $\bar{\omega}[m]$ は、

$$\bar{\omega}[m] = \frac{\theta_0}{T_w} \quad (\theta_0 \text{ は 1 パルスの角度}) \quad (5)$$

で与えられる。この平均速度 $\bar{\omega}[m]$ を周期 T_1 の平均速度と等しいとして近似すれば、 $[m+1,0]$ における真の位置は、

$$\theta[m+1,0] = \theta[m,0] + \bar{\omega}[m] \cdot T_1 \quad (6)$$

となる。このとき、誤差は非常に小さいと考えられる。(6)式によって計算した真の位置と(3)式から計算した位置推定値から位置推定誤差、

$$\Delta\theta = \hat{\theta}[m,K] - \theta[m+1,0] \quad (7)$$

を計算する。ここで、 $\Delta\theta$ が二つの要因、すなわち、区間 m での推定開始時における速度初期値の誤差 $\Delta\omega$ と、外乱推定誤差 ΔT_L によって生じたと解釈し、 γ_1, γ_2 なる比率で責任を分担する。すなわち、

$$\gamma_1 \Delta\theta = T_1 \Delta\omega \quad (8)$$

$$\gamma_2 \Delta\theta = \frac{T_1^2}{2J_n} \Delta T_L \quad (9)$$

とし、次の区間 $m+1$ では、

$$\hat{T}_1[m+1] = \hat{T}_1[m] - \Delta T_L \quad (10)$$

$$\bar{\omega}[m+1,0] = \bar{\omega}[m,K] - \frac{T_1}{J_n} \Delta T_L - \Delta\omega \quad (11)$$

図3 慣性モーメント同定周期 T_3
Fig.3 Fixed interval T_3 of inertia identification.

と修正して推定を開始する。

<2.2> 瞬時速度オブザーバの収束特性の設計

詳細は省略するが、電流および速度 (I_0 および Ω_0) を一定と仮定すると、「位置読み込み型」と同様に推定値に関する差分状態方程式が次のように得られる^[4]。

$$\hat{x}[m+1] = A\hat{x}[m] + u[m] \quad (12)$$

$$\text{ただし、} \hat{x}[m] = \begin{pmatrix} \bar{\omega}[m,0], \hat{T}_1[m] \end{pmatrix}^T : \text{状態変数} \quad (13)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 - \gamma_1 - 2\gamma_2 & (2 - \gamma_1 - 2\gamma_2) \frac{T_1}{2J_n} \\ -\frac{2\gamma_2 J_n}{T_1} & 1 - \gamma_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$u[m] = \begin{bmatrix} (2 - \gamma_1 - 2\gamma_2) \frac{T_1}{2J_n} K_m I_0 + (\gamma_1 + 2\gamma_2) \Omega_0 \\ -\gamma_2 K_m I_0 + \frac{2\gamma_2 J_n}{T_1} \Omega_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

A の固有値はオブザーバの極であり、特性方程式

$$|zI - A| = z^2 + (\gamma_1 + 3\gamma_2 - 2)z - \gamma_1 - \gamma_2 + 1 = 0 \quad (16)$$

の根で与えられ、オブザーバの2つの極は前述の責任分担比率 γ_1, γ_2 により自由に指定できることがわかる。

3. 慣性モーメントの同定

瞬時速度オブザーバは、慣性モーメントが大きく変動する場合、制御周期点の瞬時速度をノミナル値を用いて推定するため、慣性変動の影響を直接受けて瞬時速度に誤差が生じる。そこで、慣性モーメントをリアルタイムで同定し補償する必要がある。

<3.1> 慣性モーメント同定周期の設定

「平均速度読み込み型」では速度を取得できるのはエンコーダパルス到来時であり、この周期 T_1 はモータ速度によって変動する。この速度から加速度を計算し同定を行なうと同定周期の変動のために加速度値にノイズが生じ、正確に慣性モーメントを同定できない。そこで、エンコーダパルスの生成とは独立の慣性モーメント同定周期 T_3 を新たに設定し、加速度値を求めるにあたっては瞬時速度オブザーバ

図4 外乱差分消去形

Fig.4 Disturbance cancellation by difference operation.

の出力する瞬時速度の周期 T_3 間の平均値、

$$\bar{\omega}[j] = \sum_{m=1}^{M} \omega[m, k] / T_3 / T_2 \quad (17)$$

を用いた。この概念を図3に示す。

<3.2> 慣性モーメントの同定法

直流機の運動方程式は、加速度を a として、

$$J \cdot a = K_t \cdot i + T_L \quad (18)$$

である。慣性モーメントの同定を行なうにあたって、電流値と加速度値はセンサ情報から知ることができるが、外乱は何らかの方法で推定または除去する必要がある。

(1) 外乱差分消去形

直流機の運動方程式を考えると、 T_3 周期のエンコーダ読み込み点では、

$$J \cdot a[j] = K_t \cdot i[j] + T_L[j] \quad (19)$$

$$J \cdot a[j-1] = K_t \cdot i[j-1] + T_L[j-1] \quad (20)$$

が平均的に成立すると考えられる。ただし、加速度は、

$$a[j] = (\bar{\omega}[j] - \bar{\omega}[j-1]) / T_3 \quad (21)$$

で計算する。(19)式から(20)式を引くことで、

$$J \cdot \Delta a[j] = K_t \cdot \Delta i[j] + \Delta T_L[j] \quad (22)$$

が得られる。ここで外乱の変化が T_3 に比べて十分遅いと仮定すると、(22)式の $\Delta T_L[j]$ は小さなランダム雑音とみなすことができるため、最小二乗法などの統計処理を用いることによってその影響を小さくできる。

同定した慣性モーメント値は、瞬時速度オブザーバおよび速度制御器にフィードバックしている(図4参照)。なお、 Δa には差分による大きなノイズが含まれるため、ローパスフィルタを用いて高周波のノイズ分をカットした。

(2) 推定外乱代入形

瞬時速度オブザーバは速度と外乱を同時に推定するオブザーバとなっているため、その外乱オブザーバの出力する推定外乱を(18)式の外乱項に代入すれば、外乱の影響を取り除くことができると考えられる。この方法では、 Δa を求める必要がなく、ローパスフィルタの時定数決定の手間を省くことができる。

この方法は、速度オブザーバの出力する外乱推定値が、慣性モーメントの同定アルゴリズムに使われ、同定された慣性モーメントは再び速度オブザーバに用いられるため、両者をつなぐフィードバックが存在し、瞬時速度オブザー

図5 推定外乱代入形

Fig.5 Disturbance estimation by disturbance observer.

バと同定機構が一つとなって瞬時速度推定・慣性モーメント・外乱の推定を行うことになる(図5参照)。

この収束特性を明らかにすることはかなり困難であり、今後の課題の一つである。

<3.3> 適応アルゴリズム

適応同定に用いられる適応アルゴリズムは、さまざまな安定理論に立脚したものが提案されているが、本論文では、式誤差法の一般的な形である逐次型最小二乗法、および、モデル規範形適応システム(MRAS)から導かれる適応アルゴリズムである固定トレース則を用いた。

(1) 逐次型最小二乗法

(22)式の式誤差、

$$\frac{\hat{J}}{K_t} \cdot \Delta a[j] - \Delta i[j] \quad (23)$$

を二乗し、さらに忘却係数 λ をかけたものの和を評価関数とし、最小にすることを考える。すなわち、

$$G\left(\frac{\hat{J}}{K_t}\right) = \sum_{j=1}^J \lambda^{J-j} \left(\frac{\hat{J}}{K_t} \cdot \Delta a[j] - \Delta i[j] \right)^2 \quad (24)$$

を最小化するように慣性モーメント値を決定する。忘却係数 λ によって、過去のデータよりも新しいデータにより大きな重みをかけて同定を行なうことになる。評価関数(24)式を最小にする $\hat{J}$ は、次の漸化式から得ることができる。

$$\hat{\theta}[j] = \hat{\theta}[j-1] - \frac{P[j-1] \Delta a[j]}{\lambda + P[j-1] (\Delta a[j])^2} \times \left(\hat{\theta}[j-1] \Delta a[j] - \Delta i[j] \right) \quad (25)$$

$$P[j] = \frac{P[j-1]}{\lambda + P[j-1] (\Delta a[j])^2} \quad (26)$$

ただし、 $\hat{\theta}[j] = \frac{\hat{J}}{K_t}[j]$ とおいた。推定外乱代入形では Δa を a

に、 Δi を $i + \frac{\hat{T}_L}{K_t}$ に置き換えた形となる。この場合、つねに $\frac{\hat{J}}{K_t}$ の形で推定されるため、以下では、トルク係数にノミナル値 K_m を用いて $\frac{\hat{J}}{K_m}$ を推定することにする。

(2) 固定トレース則

固定トレース則は比較的最近開発された手法で、推定のための漸化式は、

図6 DSPを用いた高性能サーボ系実験装置

Fig.6 Experimental setup of high performance servosystem using DSP.

$$\hat{\theta}[j] = \hat{\theta}[j-1] - \frac{P[0]\Delta a[j]}{1 + P[0](\Delta a[j])^2} \times (\hat{\theta}[j-1]\Delta a[j] - \Delta i[j]) \quad (27)$$

$$P[0] = \gamma I : \gamma > 0 \quad (28)$$

となる。この適応アルゴリズムは、逐次型最小二乗法における一種のゲインである $P[j]$ を固定することにより、逆に忘却係数が可変となっている。実際に直流機の運動方程式に適用した場合の忘却係数は、

$$\lambda[j] = \frac{1}{1 + \gamma(\Delta a[j])^2} \quad (29)$$

で示すように加速度の関数となる。これは、加速度値が大きい場合には忘却係数が小さくなり、新しく取得したデータから慣性モーメントを推測するが、逆に加速度値が小さい場合には忘却係数が大きくなり、過去のデータから求めた推定値を保持する、というアルゴリズムとなっている。

4. 実験結果

以上述べた慣性モーメント同定法の実験結果を示す。ハードウェア構成は図6となっており、制御演算はDSP (NECμPD77230)により行なっている。表1にモータ定数を示す。400[W]の永久磁石励磁DCサーボモータを用いている。エンコーダは5,000[pulse/rev]の分解能をもち、1/4通倍(1,250[pulse/rev])から4通倍(20,000[pulse/rev])までを選択できる。また、負荷の慣性モーメントを任意に設定できる慣性シミュレータをモータ軸に直結している^[7]。制御・同定のアルゴリズムはDSPアセンブラで記述し、 $T_2 = 100[\mu s]$ 以内に電流制御を含むすべての演算を行なっている。いずれの場合も、瞬時速度オブザーバの離散極は $z = 0.58$ としている。電流情報 $i[j]$ には、 T_2 間隔でサンプリングした $(j-1)T_3$ から $(j+1)T_3$ までの平均値を用いている。

<4.1> 慣性モーメントの同定

図7には「位置読み込み型」による外乱差分消去形での慣性モーメントの同定結果、図8には「平均速度読み込み型」による外乱差分消去形および推定外乱代入形での同定結果を示す。エンコーダパルス数は1,250[pulse/rev]、速度指令値には振幅5~15[rpm]・周波数7[Hz]の正弦波を用い、慣性モーメントをノミナル値からその3倍まで変化させて同定を行なった。適応アルゴリズムには逐次型最小二乗法を用い、外乱差分消去形では速度 $\hat{\omega}[j]$ から加速度 $a[j]$ を求める際にDSP内で時定数20[ms]のローパスフィルタを通し

表1 実験に用いたモータ定数

Table 1. Motor parameters used in the experiment.

定格	400[W]
電機子抵抗	$R = 1.4[\Omega]$
電機子インダクタンス	$L = 3.98[mH]$
回転子慣性モーメント	$J = 0.00588[kgm^2]$
トルク係数	$K_t = 0.35[N \cdot m/A]$
エンコーダ精度	1,250~20,000[pulse/rev]

$\hat{J} : 0.00588[kgm^2/div]$, $\omega : 5.0[rpm/div]$
 $\hat{T}_L : 0.30[N \cdot m/div]$, $a : 200.0[rad/s^2/div]$, Time : 0.50[s/div]

図7 「位置読み込み型」での慣性モーメントの同定

Fig.7 Experimental result of inertia identification by "position input type".

$T_2 = 100[\mu s]$, $T_3 = 200T_2$, pole : $z = 0.58$, RE : 1,250[pulse/rev]

ている。図7の「位置読み込み型」では速度値が激しく桁落ちしており、慣性モーメント値は全く同定されていない。これに対し、図8の「平均速度読み込み型」では良好に同定されていることが見てとれる。慣性モーメントが3倍に変化した瞬間には、慣性モーメントの増加はすべて等価外乱として推定され $\hat{T}_L$ が非常に大きくなっている。慣性モーメントが同定されていくに従い、外乱オブザーバの出力が小さくなり、同時に良好な応答を示すことが分かる。

次に、電流制御を施した負荷側モータから0.2[Nm]の外乱トルクを入切したときの同定結果を図9に示す。外乱オブザーバの出力がステップ状に変化しているが、外乱差分消去形および推定外乱代入形のどちらも外乱の影響はほぼ完全に取り除かれていることが分かる。

さらに、エンコーダパルス数を10,000[pulse/rev]に増加させ、超低速度での慣性モーメントの同定を試みた。実験結果を図10に示す。両方式とも0.8rpmという超低速度で良好に慣性モーメントを同定できていることが分かるが、推定外乱代入形の方がより正確に同定できていることが見てとれる。

<4.2> 適応アルゴリズムの比較

逐次型最小二乗法と固定トレース則との比較実験を行なった。その結果を図11に示す。

速度指令値の正弦波の周波数を7Hz→1Hz→7Hzと変化さ

図8 「平均速度読み込み型」での慣性モーメントの同定
 Fig.8 Experimental result of inertia identification by "average speed type".
 $T_2 = 100[\mu\text{s}], T_3 = 200T_2, \lambda = 0.98, \text{pole} : z = 0.58, RE : 1,250[\text{pulse}/\text{rev}]$

図9 外乱に対するロバスト性
 Fig.9 Robustness against disturbance torque.

$T_2 = 100[\mu\text{s}], T_3 = 200T_2, \lambda = 0.98, \text{pole} : z = 0.58, RE : 1,250[\text{pulse}/\text{rev}]$

図10 超低速度での慣性モーメントの同定
 Fig.10 Inertia identification at very low speed.

$T_2 = 100[\mu\text{s}], T_3 = 200T_2, \lambda = 0.98, \text{pole} : z = 0.58, RE : 10,000[\text{pulse}/\text{rev}]$

図11 適応アルゴリズムの比較 (推定外乱代入形)

Fig.11 Comparison of the adaptive methods.

$T_2 = 100[\mu\text{s}]$, $T_3 = 200T_2$, $\text{pole} : z = 0.58$, $RE : 1,250[\text{pulse}/\text{rev}]$

せた。逐次型最小二乗法を用いた場合、指令値が7Hzである場合には良好に同定可能であるが、1Hzでは加速度が小さいためノイズに加速度値が隠れてしまい、真の値よりも小さい値に同定値が収束してしまう。それに対して、固定トレース則を用いた場合、加速度値が小さい場合には忘却係数が大きくなり慣性モーメント値を保持するため、正確な値をオブザーバにフィードバックすることがない。再び加速度値が大きくなると忘却係数が小さくなり、新しいデータから慣性モーメントを同定している。

ただし固定トレース則は、低加速度のときには慣性モーメントが変動した場合でも同定を行わないが、ノイズに隠れるほど加速度が小さい場合には慣性モーメントの変動による制御系への影響は小さいため、問題は少ないと考えられる。

5. あとがき

本論文では、低速用瞬時速度オブザーバである「平均速度読み込み型」での慣性モーメントの同定法を提案し、その特性をDSPを用いた実験で確認した。その結果、1rpm以下でも慣性モーメントの同定が可能であり、このような超低速域でも慣性モーメントの変動に対してロバストな制御系を実現できることを示した。「平均速度読み込み型」を用いることによってエンコーダ精度を等価的に非常に高くすることができるため、安価で高精度の制御が可能となる。

最後に、議論を通じて有益な助言をくださった本学の茅陽一教授に感謝の意を表します。

(平成6年6月23日受付)

文 献

- (1) 渡部, 他: 「瞬時速度オブザーバを用いたデジタルサーボ」, 電学論D, **107**, 1468, (昭62)
- (2) 藤田・佐藤: 「MRASによる機械時定数同定機能を有するACサーボシステム」, 電学D部門全大, No.175, (平2)

- (3) 藤田・海田: 「イナーシャ同定機能を付加した瞬時速度検出」, 機械設計6月, 164, (平3)
- (4) 今野・堀: 「高次外乱補償機能を有する瞬時速度オブザーバ」, 電学論D, **112**, 539, (平4)
- (5) 堀・亀井: 「低精度エンコーダを用いるサーボモータの高性能制御-瞬時速度オブザーバと慣性モーメントの同定-」, 電学論D, **114**, 424, (平6)
- (6) 佐藤・松井: 「負荷トルクオブザーバを用いたイナーシャ推定法」, 電学論D, **112**, 181, (平3)
- (7) 堀・茅: 「他励直流機による慣性シミュレータ」, シミュレーション, 7, 25, (昭63)

岡村 勇作

(准員) 1994年東京大学工学部電気工学科卒業。同年, 同大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程進学, 現在にいたる。現在は, パワーエレクトロニクスおよび車両の粘着制御に関する研究に従事。電気学会会員。

全 瑩 煥

(非会員) 1983年韓国国立ソウル大学工学部電気工学科卒業。'85年, 同大学修士課程修了。'86年, 韓国電気研究所入社。'94年, 東京大学工学系研究科電気工学専攻博士過程入学, 現在にいたる。現在は, 主として H_∞ 制御理論のモーションコントロールへの応用に関する研究に従事。

堀 洋一

(正員) 1978年東京大学工学部電気工学科卒業, '83年博士課程修了。助手, 講師を経て'93年より同電気工学科助教授。制御工学とその産業応用, 特に, モーションコントロール, メカトロニクスなどの分野への応用研究に従事。計測自動制御学会, 日本ロボット学会, システム制御情報学会, 日本機械学会, IEEEなどの会員。