

# むだ時間を考慮したデジタル状態推定を基礎 とした汎用カメラによる電動機駆動制御

鈴木 武海\*, 古関 隆章 (東京大学)

State Feedback Control Using a Digital Observer Considering Dead Time for Motor Drive with a General-purpose Camera  
Takeomi Suzuki, Takafumi Koseki(The University of Tokyo)

## 1. はじめに

電動機の位置制御はパルスエンコーダにより取得された位置信号を制御器にフィードバックすることで行われるが、パルスエンコーダの設置に伴い設計に制約が生じる。そこで、パルスエンコーダの代わりに汎用カメラで可動部を撮影し、映像を画像処理することにより位置信号を取得すれば安価で自由度の高いシステムとなる。しかし、このようなシステムには以下の課題が存在する。

- ・ 汎用カメラのフレームレートが 30fps に限られ制御周期に比して数十倍長い。
- ・ 画像処理に伴い位置信号にむだ時間が発生する。
- ・ 画像のキャリブレーションを正しく行う必要がある。

本論文では、電動機の一例としてリニア同期モータ(LSM)を取り上げ、画像のキャリブレーションは正確に行われていると仮定して残り 2 つの問題に注目する。そして、位置信号のサンプリングレートが低い場合に有効なデュアルサンプリングレートオブザーバ<sup>(1)</sup>をさらに一定むだ時間を考慮した形に拡張することにより、汎用カメラからのむだ時間を含む位置信号をもとに可動子の位置・速度などの力学的状态量を安定に推定し、状態フィードバック制御を行うことを提案する。

## 2. 予測型デュアルサンプリングレートオブザーバ

### 〈2・1〉 むだ時間のない場合の構成

デュアルサンプリングレートオブザーバは、もともと低分解能エンコーダしか搭載できないような環境下で電動機の位置制御を行うために、瞬時速度オブザーバ<sup>(2)</sup>を基礎として考えられたものである。状態空間法による記述を用いることで一般の線形システムに適用可能とし、またオブザーバゲインの決定法を工夫することによりパルス間隔が長く可変であっても安定した状態量推定を行うことを可能にした。

以後、位置信号周期として  $T_1$  を、制御周期として  $T_2$  (ただし  $T_2 < T_1$ ) を置く。またこれらの比を  $N = T_1 / T_2$  とし、便宜上  $N$  は整数であるとする。

デュアルサンプリングレートオブザーバの構成を図 1 に示す。実システムが線形時不変の状態空間で表現されているとき、各行列を  $T_2$  で離散化したものを  $A_2, B_2, C_2$  としてい

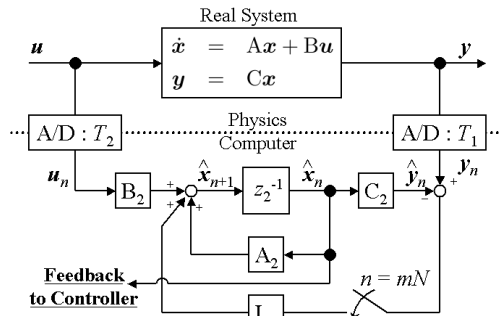


図 1 デュアルサンプリングレートオブザーバの構成  
Fig.1. The structure of a dual-sampling-rate observer

る。また  $z_2$  は離散化周期  $T_2$  での  $z$  変換子である。このオブザーバは測定可能な入力  $u$  (LSM の場合は電流値から計算した推力) をもとにして  $T_2$  ごとに実システムの状態量の推定値を計算する。そしてモデル化誤差や初期値の違い、あるいは実システムへの外乱などで推定値が発散しないように、 $T_1$  に 1 回得られる実システムの出力 (今回は位置信号) と推定出力との差をゲイン  $L_2$  をかけて推定値に足しこむことで訂正を行っている。これを式で表すと、

$$\hat{x}_{n+1} = \begin{cases} A_2 \hat{x}_n + B_2 u_n + L_2 (y_n - \hat{y}_n) & n = mN \\ A_2 \hat{x}_n + B_2 u_n & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$\hat{y}_n = C_2 \hat{x}_n$$

である。また全体が実システム出力周期である  $T_1$  で動作する通常の構成のオブザーバを考え、これが安定して推定を行えるように設計したオブザーバゲインを  $L_1$  と置くときに、

$$L_2 = (A_2^{N-1})^{-1} L_1 \quad (2)$$

とデュアルサンプリングレートオブザーバのゲインを定めることにより、通常のオブザーバと極を同じ位置に配置することができ、安定した状態量推定が行える。

### 〈2・2〉 一定むだ時間を考慮した形式

実システムの出力にむだ時間  $T_d = kT_2$  が含まれている場合には、オブザーバの推定状態量も  $kT_2$  だけ遅れた部分までしか実システム出力による訂正が有効ではない。しかし、制御を行う上では現在の推定状態量を制御器にフィードバックする必要がある。そこで、実システム出力による訂正に基づく状態量推定は現在より  $k$  ステップだけ昔の  $\hat{x}_{n-k}$  に対して行い、リア

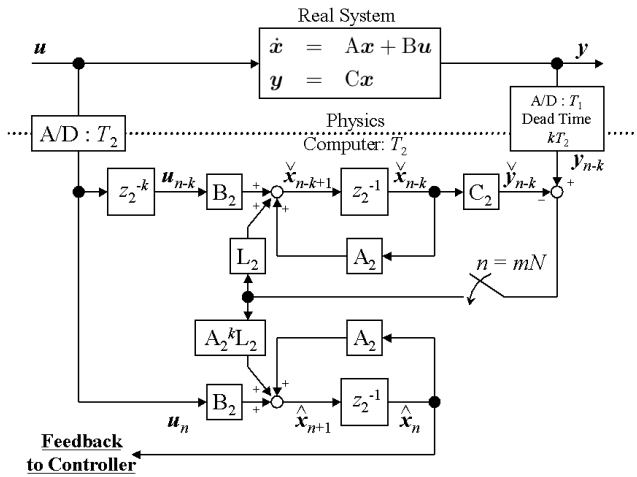


図2 むだ時間を考慮したデュアルサンプリングレートオブザーバの構成  
Fig.2. The structure of a dual-sampling-rate observer considering dead time

ルタイムにわかる実システム入力とモデル情報を用いて、システム行列の漸近安定性を仮定して推定状態量を現在の値  $\hat{\mathbf{x}}_n$  まで外挿することを考える。この外挿を式で示せば、

$$\hat{\mathbf{x}}_n = A_2^k \hat{\mathbf{x}}_{n-k} + \sum_{i=0}^{k-1} A_2^{k-(i+1)} B_2 u_{n-k+i} \quad (3)$$

となる。この式は一見単純であるが、むだ時間が大きい場合  $T_2$  ごとに計算を行う式なので計算量が大きい。一方、デュアルサンプリングレートオブザーバ自体も実システム出力がない間は実システム入力とモデル情報を用いて推定状態量を外挿しているだけであるので冗長である。この冗長性を省くことで、式(3)の計算量を削減できる。

削減の結果、最終的には図2に示すような一定むだ時間を考慮したデュアルサンプリングレートオブザーバを構成できる。推定状態量は、 $k$  サンプル遅れの系列である  $\tilde{\mathbf{x}}$  と現在の系列である  $\hat{\mathbf{x}}$  の2つが存在する。 $\tilde{\mathbf{x}}$  がちょうど図1と同様な推定をむだ時間分遅れて行っており、一方でオブザーバ内部でシミュレータを回し外挿により遅れを取り戻しているのが  $\hat{\mathbf{x}}$  の系列である。このオブザーバを式で示せば、

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_{n-k+1} &= \begin{cases} A_2 \tilde{\mathbf{x}}_{n-k} + B_2 \mathbf{u}_{n-k} + L_2 (\mathbf{y}_{n-k} - \tilde{\mathbf{y}}_{n-k}) & n = Nm \\ A_2 \tilde{\mathbf{x}}_{n-k} + B_2 \mathbf{u}_{n-k} & \text{otherwise} \end{cases} \\ \hat{\mathbf{x}}_{n+1} &= \begin{cases} A_2 \hat{\mathbf{x}}_n + B_2 \mathbf{u}_n + A_2^k L_2 (\mathbf{y}_{n-k} - \tilde{\mathbf{y}}_{n-k}) & n = Nm \\ A_2 \hat{\mathbf{x}}_n + B_2 \mathbf{u}_n & \text{otherwise} \end{cases} \\ \tilde{\mathbf{y}}_{n-k} &= C_2 \tilde{\mathbf{x}}_{n-k} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。オブザーバゲイン  $L_2$  は式(2)と同じである。

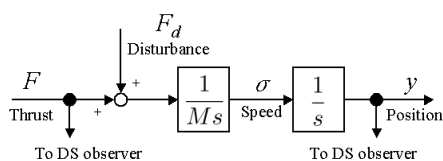


図3 シミュレーションで用いた LSM 可動子のモデル  
Fig.3. The model of LSM mover used in the simulation

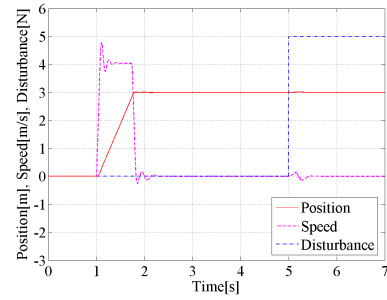


図4 LSM の駆動シミュレーションによる実状態量  
Fig.4. Real state in a simulation of LSM driving

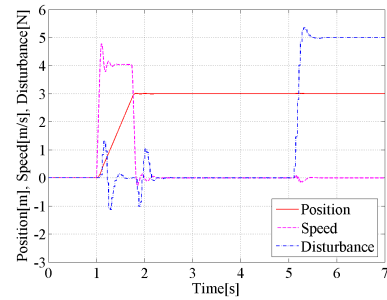


図5 LSM の駆動シミュレーションによる推定状態量  
Fig.5. Estimated state in a simulation of LSM driving

### 3. リニア同期モータ制御シミュレーション

図3のような LSM 可動子モデルを用いて制御シミュレーションを行った。 $T_1 = 33[\text{ms}]$ ,  $T_2 = 1[\text{ms}]$ , むだ時間  $T_d = 80[\text{ms}]$  とし、推定状態量は 0 次外乱を含む形として外乱のフィードフォワード補償を行う。シミュレーション結果の実状態量を図4に、推定状態量を図5に示すが、大きなむだ時間があっても安定した推定が可能になることがわかる。外乱の推定値の反応が遅いのは、外乱は実位置と推定位置の差が検出されて初めてオブザーバに観測されるためであり、ちょうどむだ時間相当だけ外乱推定に時間がかかる。

### 4. まとめ

汎用カメラによる電動機位置制御を実現させるためにむだ時間を考慮したデュアルサンプリングレートオブザーバの提案を行い、シミュレーションで安定な動作を確かめた。この方法は外乱推定が可能なので外乱やモデル化誤差に強いことが特徴といえる。今後は実験を行い、磁気浮上系などカメラによる位置取得が有利な系への適用を目指す。

### 文 献

- (1) Lilit Kovudhikulrungsri, and Takafumi Koseki: "Precise Speed Estimation From a Low-Resolution Encoder by Dual-Sampling-Rate Observer," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.11, No.6, December 2006, pp.661-670
- (2) Sin-ichiro Sakai, and Yoichi Hori: "Ultra-low Speed Control of Servomotor using Low Resolution Rotary Encoder," Proceedings of the 1995 IEEE IECON 21st International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, pp.615-620