

# 3つのサンプル周期を含む デジタル状態推定を用いたモータ制御

櫻井 大輔\*, 古関 隆章 (東京大学)

Motor Control Using a Triple Rate Digital State Observer  
Daisuke Sakurai, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

## 1. はじめに

モータのフィードバック制御では、パルスエンコーダを用いて位置情報と速度情報を取得することが多い。この手法では、情報を得るサンプル周期が十分に短い必要がある。一方、汎用ビデオカメラを用いた位置情報の取得を考えると、以下の点を考える必要がある。

[1]カメラのフレームレートに起因する粗いサンプル周期の影響を受ける。

[2]位置情報の取得にむだ時間を生ずる

[3]安価なA/D、D/Aのインターフェースを考えると、離散的な情報をコンピュータに取り込む際に、位置情報取得時とは独立の周期で離散化される場合がある。

本論文では、[3]の課題を解決する方法として、3つのサンプル周期を含むオブザーバ(トリプルレートオブザーバ)を考える。簡単のため、以下の例では、むだ時間がなく、 $T_1 : T_2 : T_3 = 4 : 1 : 3$ という場合を例に説明する。

## 2. デュアルサンプリングレートオブザーバ<sup>(1)</sup>

上記の[1][2]を解決する手法である。出力のサンプル周期 $T_1$ に合わせてオブザーバを構成する場合は、推定状態量については以下の式となる。

$$\hat{x}_{m+1} = A_1 x_m + B_1 u + L_1 C_1 (x_m - \hat{x}_m) \quad (1)$$

これを入力信号を $T_2$ ごとに取得するように変形する。

$$\hat{x}_{n+4} = A_1 \hat{x}_n + B_1 u + A_2^3 L_2 C_2 (x_n - \hat{x}_n) \quad (2)$$

ここで $A_1$ と $B_1$ は連続系でのシステム入力行列 $A$ と $B$ を時間 $T_1$ で、 $A_2$ 、 $B_2$ は時間 $T_2$ で離散化したものである。 $L_1$ を定めて(1)式と(2)式の係数が一致するよう  $L_2 = A_2^{(-3)} L_1$  という式で変換すると、実際に用いるゲイン $L_2$ が決定される。これを発展させた、むだ時間に対応する方式もある。<sup>(2)</sup>

## 3. トリプルレートオブザーバ

<3・1>システムの概要

前章で説明したオブザーバに、「離散的な情報を取り込む際に再度離散化される」という課題を解決する機能を加える。この時、出力情報は「周期 $T_1$ で離散化」→「周期 $T_3$ で離散化」という二段階を経て、オブザーバに取得される。信号の流れを図1に示す。

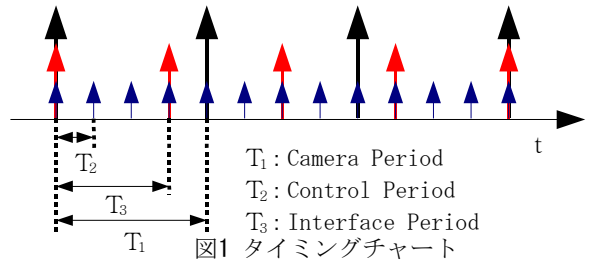


Fig. 1. Timing chart

オブザーバに位置情報が伝えられるのは $T_3$ に一回であるが、カメラが取得する信号は $T_1$ に一回であるために、変動するむだ時間が生じることになる。この時の推定状態量の変化を記述すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} \hat{x}_{n+1} &= A_2 \hat{x}_n + B_2 u + L_{2d} C_2 (x_n - \hat{x}_n) \\ \hat{x}_{n+2} &= A_2 \hat{x}_{n+1} + B_2 u \\ \hat{x}_{n+3} &= A_2 \hat{x}_{n+2} + B_2 u \\ \hat{x}_{n+4} &= A_2 \hat{x}_{n+3} + B_2 u + L_{2a} C_2 (x_n - \hat{x}_n) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_{n+1} &= A_2 \hat{x}_n + B_2 u \\ \hat{x}_{n+2} &= A_2 \hat{x}_{n+1} + B_2 u \\ \hat{x}_{n+3} &= A_2 \hat{x}_{n+2} + B_2 u + L_{2b} C_2 (x_n - \hat{x}_n) \\ \hat{x}_{n+4} &= A_2 \hat{x}_{n+3} + B_2 u \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_{n+1} &= A_2 \hat{x}_n + B_2 u \\ \hat{x}_{n+2} &= A_2 \hat{x}_{n+1} + B_2 u + L_{2c} C_2 (x_n - \hat{x}_n) \\ \hat{x}_{n+3} &= A_2 \hat{x}_{n+2} + B_2 u \\ \hat{x}_{n+4} &= A_2 \hat{x}_{n+3} + B_2 u \end{aligned} \quad (7)$$

この12行の式がこの順番で繰り返される。これをブロック線図で示したものが図2である。式全体を見ると、位置情報が $T_3$ ごとに一回取り込まれる機会がある。このうち(5)式の第4行については、図1からもわかるように、第1行と同じ値が繰り返し取得されるだけなので、ゲインを0としてオブザーバへ入らないようにする。(5)(6)(7)をそれぞれ(1)に一致させるためにゲインを以下のように定める。

$$L_{2a} = 0 \quad (8)$$

$$L_{2b} = A_2^{(-1)} L_1 \quad (9)$$

$$L_{2c} = A_2^{(-2)} L_1 \quad (10)$$

$$L_{2d} = A_2^{(-3)} L_1 \quad (11)$$

すると、(5)(6)(7)式はすべて以下ようになる。

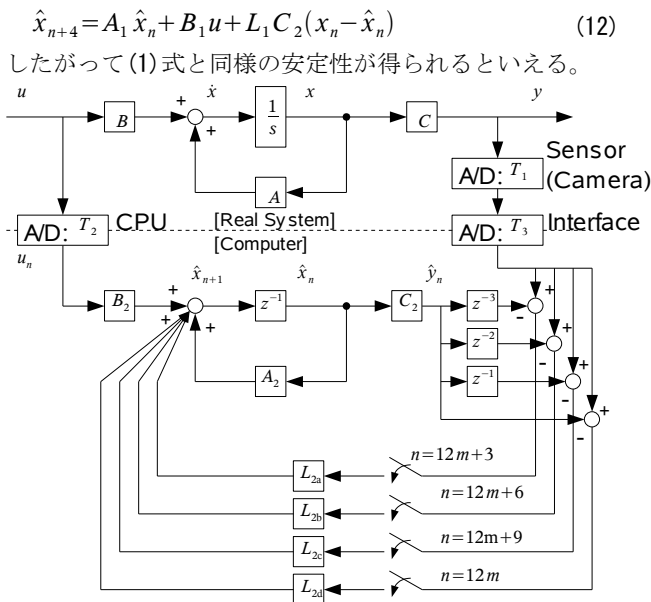


図2 トリプルレートオブザーバのブロック線図  
fig.2. Block diagram of a triple rate observer

#### 4. リニア同期モータ制御シミュレーション

##### <4・1>シミュレーション条件

実際のリニア同期モータのパラメータを用い、電流ループ、速度ループ、位置ループをもった位置時定数100msの制御器で制御する。入力は図3とし、 $5 \leq t \leq 7$ で負荷力-18[N]を加える。 $T_1=40ms$ 、 $T_2=10ms$ 、 $T_3=30ms$ とする。

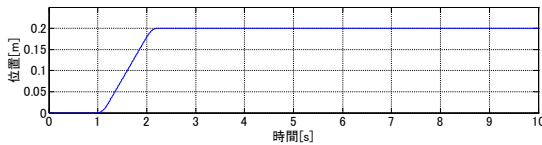


図3 入力信号(位置指令値)  
fig.3. Input signal (target position)

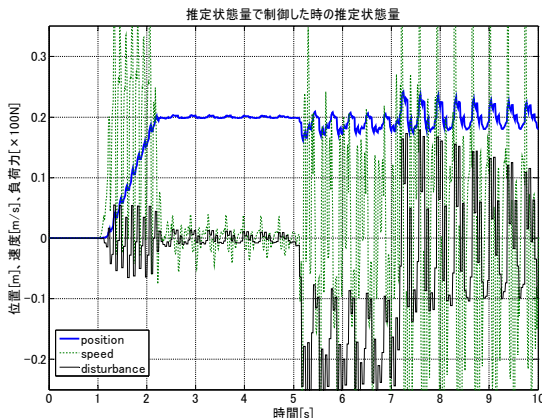


図4 デュアルサンプリングレートオブザーバの推定値で制御した場合の推定値

fig.4. Estimated state in a simulation of LSM driving using dual rate observer

<4・2>デュアルサンプリングレートオブザーバをそのまま使用した場合

推定状態量と実状態量を比較する時にずれが生じているため、図4に示すようにまともに推定することができない。

<4・3>適切な状態量の比較ができるデュアルサンプリングレートオブザーバを使用した場合

これは、式(5)(6)(7)において、

$$L_{2a} = 0 \quad (13)$$

$$L_{2b} = L_{2c} = L_{2d} = A_2^{(-3)} L_1 \quad (14)$$

という形でゲインが定められていると見なせる。(5)(6)(7)をそれぞれまとめると、

$$\hat{x}_{n+4} = A_1 \hat{x}_n + B_1 u + L_1 C_2 (x_n - \hat{x}_n) \quad (15)$$

$$\hat{x}_{n+4} = A_1 \hat{x}_n + B_1 u + A_1^{-2} L_1 C_2 (x_n - \hat{x}_n) \quad (16)$$

$$\hat{x}_{n+4} = A_1 \hat{x}_n + B_1 u + A_1^{-1} L_1 C_2 (x_n - \hat{x}_n) \quad (17)$$

となり、オブザーバの極がずれ、安定性は保証されない。

<4・4>トリプルレートオブザーバを使用した場合

図5に示すように、安定した制御ができる。位置、速度、負荷力が適切に推定されていることがわかる。

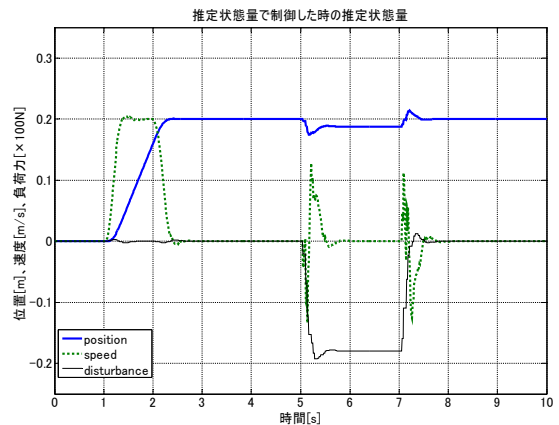


図5 トリプルレートオブザーバの推定値で制御した場合の推定値

fig.5. Estimated state in a simulation of LSM driving using triple rate observer

#### 5. まとめ

本論文では、周期の長い離散的な出力信号をさらに離散的に取り込む場合に生じる問題について考え、それに対処できるオブザーバの構成について述べた。今後は、 $T_1, T_2, T_3$ があらゆる整数比の場合に適用できることを示し、また、大きなむだ時間も考慮した場合について研究を進め、実験する。

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) 鈴木武海, 古関隆章「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」平成20年電気学会全国大会論文集, 4-186, pp.310-311(2008)