リップルフリーストラッキングのための必要十分条件†

加藤 久雄*・舟橋 康行*

Necessary and Sufficient Conditions for Ripple-Free Tracking

Hisao KATO* and Yasuyuki FUNAHASHI*

When the sampled-data control systems are used, undesirable oscillations between the sampling instance are occasionally observed. Such phenomenon is called ripple. Some studies deal with this problem, and derive the conditions to achieve the ripple-free responses.

In this note, we consider the ripple-free tracking problem for sampled-data systems. A proof for the necessary and sufficient conditions to achieve the ripple-free tracking is given. This result also shows the necessity of the continuous-time internal model for the possibility of the ripple-free responses. The feature of our proof is that we use a new concept "convergence to the C^∞ class." We consider this concept makes discussion easier in this note.

Key Words: sampled-data system, ripple phenomenon

1. 緒 言

近年の計算機技術の発展により、自動制御の分野においてサンプル値制御系が広く用いられてきている。これに伴い、その理論的解析も重要度を増してきていると言えるが、その課題のひとつとしてリップルがあげられる。これはサンプル点間では望ましい応答をしているにもかかわらず、サンプル時点が無視し得ない偏差を生じるという現象のことで、その存在自体は以前からよく知られていたものである。この望ましくない偏差は、時間とともに減衰していく場合もあれば、定常状態でも振動が残る場合もある。また、サンプル周期を短くすれば小さくなることもあるが、逆に大きくなることもあり、扱いが非常に難しい。こうした点については文献5)で詳しく議論されている。

この現象に対しては、厳密な理論的アプローチがあまりなされてこなかったが、比較的近年、いくつかの研究がこのリップル現象を回避する条件について考察している。これらをデッドビート条件(つまり有限時刻以後は完全に偏差が零になるもの)を課したもの、そうでないものに分けると、前者としては文献2), 7)が、後者としては1), 3), 4), 6)などがあげられる。

このうち1)ではリップルを生じない(リップルフリー)た

めには連続時間目標値信号に対応する連続時間内部モデルの存在が必要かつ十分であることが示されているが、議論の厳密さが十分でないように思われる。4)では、サンプル値系を2ノルムを保存するかたちで離散時間系に等価変換することにより議論している。また6)では、1)に基づいて一般化ホールドを用いることによりコントローラの導出法を示している。1)の議論をより厳密にすすめたのが3)である。そこでは、状態空間表現で統一したかたちで議論し、連続時間内部モデルの必要十分性を導いている。

本稿は、この文献3)と同様にデッドビート条件を課さないリップルフリーストラッキング問題を“ C^∞ 級への収束”という新たな概念を導入して議論するものである。これは、サンプル値系においてサンプル点間では、外部入力とホールド出力が滑らかな場合、応答も常に滑らかになるが、これが時間がたつにつれてサンプル時点でもより“滑らか”になるという概念である。これによりリップルフリー達成のための条件、連続時間内部モデルの必要十分性が異なったかたちで証明される。その際、より議論が簡潔になっていると思われる。

なお本稿では以下の表記を用いる。

R : すべての実数の集合

Z_+ : すべての非負整数の集合

2. サンプル値制御系

Fig. 1で与えられる1自由度サンプル値制御系を考える。ここで、 $\tilde{P}(s)$, $K(z)$, S , H はそれぞれ連続時間プラント、離散時間コントローラ、サンブラ、零次ホールドを示す。これらはすべて1入力1出力としサンプル周期は T とする。そして、 $\tilde{r}$, $\tilde{y}$, $\tilde{u}$, $\tilde{e}$ はそれぞれ目標値、出力、入力、偏差を示し

† 第19回 Dynamical System Theory シンポジウムで発表 (1996・10)

* 名古屋工業大学 名古屋市昭和区御器所町

* Nagoya Institute of Technology, Showa-ku, Nagoya
(Received March 10, 1997)

(Revised April 27, 1998)

Fig. 1 System configuration

ている。

さて、プラントの最小実現が

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}\tilde{x}(t) + \tilde{b}\tilde{u}(t)$$

$$\tilde{y}(t) = \tilde{c}^T \tilde{x}(t)$$

で与えられるとする。このとき、これを離散化したもの、つまり

$$P(z) := S\tilde{P}(s)H$$

の実現は

$$x(k+1) = Ax(k) + bu(k)$$

$$y(k) = c^T x(k)$$

ここで

$$x(k) := \tilde{x}(kT)$$

$$u(k) := \tilde{u}(kT)$$

$$y(k) := \tilde{y}(kT)$$

$$A := \exp(\tilde{A}T)$$

$$b := \int_0^T \exp(\tilde{A}\tau) d\tau \tilde{b}$$

$$c := \tilde{c}$$

である。目標値 $\tilde{r}$ は本稿では任意の時刻で C^∞ 級の関数であり

$$\dot{\tilde{x}}_r(t) = \tilde{A}_r \tilde{x}_r(t), \quad \tilde{x}_r(0) : \text{given}$$

$$\tilde{r}(t) = \tilde{c}_r^T \tilde{x}_r(t) \quad (1)$$

で生成されるとし、 $\tilde{r}$ のラプラス変換を $\tilde{R}$ で表す。

上を離散化したものは

$$x_r(k+1) = A_r x_r(k), \quad x_r(0) = \tilde{x}_r(0)$$

$$r(k) = c_r^T x_r(k)$$

ここで

$$x_r(k) := \tilde{x}_r(kT)$$

$$A_r := \exp(\tilde{A}_r T)$$

$$c_r := \tilde{c}_r$$

となる。偏差は

$$\tilde{e}(t) := \tilde{r}(t) - \tilde{y}(t)$$

であり、これをサンプルしたもの

$$e(k) := \tilde{e}(kT)$$

と表記する。

本論文で考える問題は、このサンプル値系でリップルフリートラッキングつまり、 $y(k)$ が $r(k)$ に近づくだけでなく

$\tilde{y}(t)$ が $\tilde{r}(t)$ に近づくための条件を求めることである。

以下ではプラントは

$$\det \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{b} \\ \tilde{c}^T & 0 \end{bmatrix} \neq 0$$

を満たすと仮定する。このとき

$$\left(\begin{bmatrix} \tilde{c}^T & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{b} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right) : \text{可観測} \quad (2)$$

となる。またサンプル周期 T として

$$(c^T, A, b) : \text{可制御かつ可観測}$$

$$(c_r^T, A_r) : \text{可観測}$$

$$\det \begin{bmatrix} A-I & b \\ c^T & 0 \end{bmatrix} \neq 0$$

を満たすものを選ぶとする。ほとんどすべての正実数 T に対しこれが満たされることが知られている。このとき

$$\left(\begin{bmatrix} c^T & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} A & b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) : \text{可観測} \quad (3)$$

も成立する。

3. C^∞ 級への収束

上のシステムで区間 $[kT, (k+1)T)$ における $\tilde{y}(t)$ は

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\tilde{u}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{b} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{u} \end{bmatrix}, \quad \begin{array}{l} \text{初期} \begin{bmatrix} \tilde{x}(kT) \\ \tilde{u}(kT) \end{bmatrix} \\ \text{状態} \end{array}$$

$$\tilde{y} = \begin{bmatrix} \tilde{c}^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{u} \end{bmatrix} \quad (4)$$

で与えられる。この $\tilde{y}(t)$ は $t = kT (k \in \mathbf{Z}_+)$ 以外の各点においては C^∞ 級であるが、各区間の $\tilde{u}$ の選び方によっては $t = kT (k \in \mathbf{Z}_+)$ において微分不可能、2階微分不可能等になり得る。しかし、結論を先に述べれば $\tilde{y}(t)$ が $\tilde{r}(t)$ (これは定義より C^∞ 級) に漸近的に近づく場合には時間がたつ程 $\tilde{y}(t)$ はより“滑らか”になる。このことを示すために次の概念を定義する。

定義：実関数 $v(t)$ が $t = kT (k \in \mathbf{Z}_+)$ 以外では C^∞ 級であるとする。このとき任意の $i \in \mathbf{Z}_+$ に対し

$$v^{(i)}(kT^+) - v^{(i)}(kT^-) \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty)$$

を満たすとき、この $v(t)$ は C^∞ 級に収束すると呼ぶ。ここで (i) は i 階微分を示す。

この定義を用いると、上の $\tilde{y}(t)$ に対し次の定理が成立する。

定理1: (4)式の $\tilde{y}(t)$ が(1)式の $\tilde{r}(t)$ に収束するならば常に $\tilde{y}(t)$ は C^∞ 級に収束する。

この定理の証明のためには次の補題が必要となる。

補題1: あるベクトル列 $\xi: \mathbf{Z}_+ \rightarrow \mathbf{R}^n$, 行列 A , ベクトル c によって、関数列 $f_k: [0, T) \rightarrow \mathbf{R} (k \in \mathbf{Z}_+)$ が

$$f_k(t) := c^T \exp(At) \xi(k) \quad (5)$$

で生成されるとする。このとき、 f_k が 0 に一様収束するならば、 $f_k^{(i)}$ も 0 に一様収束する。つまり、

$$\|f_k\|_\infty \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty)$$

ならば常に

$$\|f_k^{(i)}\|_\infty \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty), \quad \forall i \in \mathbf{Z}_+$$

となる. ここで $\|\cdot\|_\infty$ は

$$\|g\|_\infty := \sup_{t \in [0, T]} |g(t)|$$

である.

(証明) ある正則行列 V で

$$\begin{cases} c^T V = [c^T & 0] \\ V^{-1} A V = \begin{bmatrix} \hat{A} & 0 \\ * & * \end{bmatrix} \\ (\hat{c}^T, \hat{A}) : \text{可観測} \end{cases}$$

となるとする. そして

$$\begin{bmatrix} \hat{\xi}(k) \\ * \end{bmatrix} := V^{-1} \xi(k)$$

とすると

$$f_k(t) = \hat{c}^T \exp(\hat{A}t) \hat{\xi}(k)$$

となる. さらに, $\hat{A}$ が $n \times n$ のとき

$$\begin{cases} (\hat{c}^T, \exp(\hat{A}L)) : \text{可観測} \\ (n-1)L < T \end{cases}$$

を満たす正実数 L を求める ($T/(n-1)$ より小さいほとんどすべての L がこれを満たす). このとき,

$$\begin{bmatrix} f_k(0) \\ f_k(L) \\ \vdots \\ f_k((n-1)L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{c}^T \\ \hat{c}^T \exp(\hat{A}L) \\ \vdots \\ \hat{c}^T \exp(\hat{A}(n-1)L) \end{bmatrix} \hat{\xi}(k)$$

よって

$$\begin{aligned} \|f_k\|_\infty &\rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty) \\ &\Rightarrow \begin{bmatrix} \hat{c}^T \\ \hat{c}^T \exp(\hat{A}L) \\ \vdots \\ \hat{c}^T \exp(\hat{A}(n-1)L) \end{bmatrix} \hat{\xi}(k) \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty) \\ &\Rightarrow \hat{\xi}(k) \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty) \\ &\Rightarrow \sup_t |\dot{f}_k(t)| = \sup_t |\hat{c}^T \hat{A} \exp(\hat{A}t) \hat{\xi}(k)| \\ &\quad \leq (\sup_t \|\hat{c}^T \hat{A} \exp(\hat{A}t)\|_E) \|\hat{\xi}(k)\|_E \end{aligned}$$

となる. ここで $\|\cdot\|_E$ はユークリッドノルムを示す. 上で最後の不等式は Cauchy-Schwarz の不等式である. 上式において

$$\sup_t \|\hat{c}^T \hat{A} \exp(\hat{A}t)\|_E < \infty$$

なので結局

$$\sup_t |\dot{f}_k(t)| \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty)$$

つまり

$$\|\dot{f}_k\|_\infty \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty)$$

以上により 1 階微分に関して証明された. 2 階微分以降に関しては

$$f_k^{(i)}(t) = \hat{c}^T \hat{A}^i \exp(\hat{A}t) \hat{\xi}(k)$$

により, すべて (5) のかたちになるので同様. ■

(定理 1 の証明) 偏差はサンプル点間において

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_r \\ \hat{x} \\ \hat{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_r & 0 & 0 \\ 0 & \hat{A} & \hat{b} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_r \\ \hat{x} \\ \hat{u} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{e} = \begin{bmatrix} \tilde{c}_r^T & -\tilde{c}^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_r \\ \hat{x} \\ \hat{u} \end{bmatrix}$$

によって記述される. したがって, あきらかに各区間で (5) 式のかたちとなる. よって補題 1 より

$$\tilde{e}(t) \rightarrow 0 \quad (t \rightarrow \infty)$$

のとき

$$\tilde{e}^{(i)}(t) \rightarrow 0 \quad (t \rightarrow \infty), \quad \forall i \in \mathbf{Z}_+ \quad (6)$$

となる. そして, これは

$$\begin{aligned} (\tilde{r} - \tilde{y})^{(i)}(kT^+) - (\tilde{r} - \tilde{y})^{(i)}(kT^-) &\rightarrow 0 \\ (k \rightarrow \infty) \quad \forall i \in \mathbf{Z}_+ \end{aligned}$$

を意味するが, $\tilde{r}(t)$ は C^∞ 級なので

$$\tilde{r}^{(i)}(kT^+) = \tilde{r}^{(i)}(kT^-), \quad \forall k, \quad \forall i$$

であり結局

$$\tilde{y}^{(i)}(kT^+) - \tilde{y}^{(i)}(kT^-) \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty) \quad \forall i$$

つまり, $\tilde{y}(t)$ は C^∞ 級に収束することとなる. ■

次に (4) 式の $\tilde{y}(t)$ が C^∞ 級に収束するための必要十分条件を求める. そのために次の補題を与える.

補題 2: 実関数 $v(t)$ が $t \in [kT, (k+1)T)$, $k \in \mathbf{Z}_+$ で

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) &= F\xi(t), \quad \xi(kT) : \text{given} \\ v(t) &= g^T \xi(t) \\ (g^T, F) &: \text{可観測} \end{aligned}$$

により与えられるとする. このとき, この $v(t)$ が C^∞ 級に収束するための必要十分条件は

$$\begin{aligned} \xi((k+1)T) - \exp(FT)\xi(kT) &\rightarrow 0 \\ (k \rightarrow \infty) \end{aligned} \quad (7)$$

である.

(証明) 上の v は

$$v^{(i)}(t) = g^T \xi^{(i)}(t) = g^T F^i \xi(t), \quad i \in \mathbf{Z}_+$$

より

$$v^{(i)}((k+1)T^-) = g^T F^i \exp(FT) \xi(kT)$$

および

$$v^{(i)}((k+1)T^+) = g^T F^i \xi((k+1)T)$$

となる. よって, v が C^∞ 級に収束するための必要十分条件は

$$\begin{aligned} g^T F^i \exp(FT) \xi(kT) - g^T F^i \xi((k+1)T) &\rightarrow 0 \\ (k \rightarrow \infty), \quad \forall i \in \mathbf{Z}_+ \end{aligned}$$

つまり

$$\begin{bmatrix} g^T \\ g^T F \\ g^T F^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \{ \exp(FT) \xi(kT) - \xi((k+1)T) \} \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty)$$

これより, (g^T, F) が可観測なので (7) 式が導かれる. ■

この補題を (4) 式の $y(t)$ に適用すると次の定理が得られる.

定理 2: (4) 式の $y(t)$ が C^∞ 級に収束するための必要十分条件は

$$u(k) \rightarrow \text{const.} \quad (k \rightarrow \infty) \quad (8)$$

である.

(証明) あきらかな関係

$$\exp\left(\begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{b} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} T\right) = \begin{bmatrix} A & b \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

より(7)式は、この場合

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ u(k+1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A & b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty)$$

となる。ここで上側の式は常に成立し、下側の式が離散化された系の有限次元性より(8)式と等価となる。 ■

4. リップルフリートラッキング

前節の結果を用いると、リップルフリートラッキング問題に対する解は次のようになる。

定理3: Fig. 1 の系において $K(z)$ が $\tilde{P}(s)$ に対しリップルフリートラッキングを達成するための必要十分条件は以下の3条件が満たされることである。

- i) $K(z)$ が $P(z)$ を安定化する。
- ii) $\tilde{R}(s)$ が $s=0$ 以外で不安定極をもつならば、それは重複度も含めてすべて $\tilde{P}(s)$ の極に含まれる。
- iii) $\tilde{R}(s)$ が $s=0$ に m 個の極をもつならば次のいずれかが満たされる。
 - a) $\tilde{P}(s)$ が $s=0$ に m 個の極をもつ。
 - b) $\tilde{P}(s)$ が $s=0$ に $(m-1)$ 個の極をもち、 $K(z)$ が $z=1$ に1個の極をもつ。

(証明) 必要性: リップルフリートラッキングならば当然サンプル時点ではトラッキングしなければならないので、i) の必要性及び

$$e(k) \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty) \quad (9)$$

はあきらか。さらに定理1, 2より

$$u(k) \rightarrow \text{const.} \quad (k \rightarrow \infty) \quad (10)$$

も必要である。

さて P, K の既約多項式対による分解表現を

$$P(z) = \frac{N_P(s)}{M_P(s)}, \quad K(z) = \frac{N_K(s)}{M_K(s)}$$

とすると

$$E = \frac{M_P M_K}{M_P M_K + N_P N_K} R \quad (11)$$

$$U = \frac{M_P N_K}{M_P M_K + N_P N_K} R \quad (12)$$

となる。ここで E, U, R はそれぞれ e, u, r の Z 変換とする。このとき $R(s)$ の不安定極(右半平面の極)は $R(z)$ の不安定極(単位円外の極)に移る。特に $s=0$ の極は $z=1$ の極に移る。

(9)式より $E(z)$ は不安定極をもってはならず、(10)式より $U(z)$ は $z=1$ に1個もつ以外は不安定極をもてはいけない。さて $R(z)$ が $z=1$ 以外に不安定極をもつ場合、それは E, U とともに消されねばならない。この場合 M_K と N_K は既約なので M_P によってすべて消去されなければならない。また $R(z)$ が $z=1$ に極をもつ場合、それは E ではすべて消去されねばならないが、 U ではひとつ残ってもかまわない。以

上の議論より ii), iii) を得る。

十分性: ii), iii) が満たされているとする。このとき、行列

$$\begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{b} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

は $\tilde{r}(t)$ のモードをすべてもっていることになる。よって(2)式より目標値 $r(t)$ は

$$\left([\bar{c}^T, 0], \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{b} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right)$$

で表現される実現をもっていることになる。つまり任意の $\tilde{x}_r(0)$ に対し次式を満たす $\tilde{x}'_r(0)$ が存在する。

$$\begin{aligned} & \bar{c}^T \exp(\bar{A}t) \tilde{x}_r(0) \\ &= [\bar{c}^T, 0] \exp\left(\begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{b} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} t\right) \tilde{x}'_r(0) \end{aligned} \quad (13)$$

ここで右辺の実現は最小とは限らないことに注意。

次に(4)式を離散化すると

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ u(k+1) \end{bmatrix} &= \Phi \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta u(k+1) \end{bmatrix} \\ y(k) &= \phi^T \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

ここで

$$\Phi = \begin{bmatrix} A & b \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\phi^T = [c^T, 0]$$

$$\Delta u(k) := u(k) - u(k-1)$$

となり、(13)の右辺を離散化すると

$$\begin{aligned} x'_r(k+1) &= \Phi x'_r(k) \\ r(k) &= \psi^T x'_r(k) \end{aligned} \quad (15)$$

ここで

$$x'_r(k) := x'_r(kT)$$

となる。

さて、i), ii), iii) が満たされると(11)式より

$$e(k) = r(k) - y(k) \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty) \quad (16)$$

となり、(12)式より

$$u(k) \rightarrow \text{const.} \quad (k \rightarrow \infty) \quad (17)$$

となる。よって、(17)式及び定理2より $\tilde{y}(t)$ は C^∞ 級に収束する。

また、(16)式より n を拡大プラント(14)の次数とすると

$$\begin{bmatrix} r(k) - y(k) \\ \vdots \\ r(k+n-1) - y(k+n-1) \end{bmatrix} \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty)$$

が得られるが、これに(14), (15), および(17)から得られる

$$\Delta u(k) \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty)$$

を用いると

$$\begin{bmatrix} \phi^T \\ \phi^T \Phi \\ \vdots \\ \phi^T \Phi^{n-1} \end{bmatrix} \left\{ x'_r(k) - \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \right\} \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty)$$

となる。よって(3)を用いると

$$x'(k) - \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \rightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty)$$

が容易に示せる。これより結局 $y(t)$ と $r(t)$ の各周期での初期状態が近づいていくので

$$\bar{y}(t) \rightarrow \bar{r}(t) \quad (t \rightarrow \infty)$$

つまり、リップルフリートラッキングが得られる。■

上の定理より、 $\bar{P}(s)$ が上の ii), iii) を満たさない場合にはこれを連続時間の前置補償器によって補わなければならないことがわかる。これがリップルフリートラッキングを達成するための連続時間内部モデルの必要性である。

5. 結 言

本論文では、サンプル値系においてリップルを生じないための条件を、“ C^∞ 級への収束”という新たな概念を用いて導出した。得られた結果は本質的に過去の研究によるものとおなじであるが、導出課程がより簡潔になっていると思われる。

参 考 文 献

- 1) G. F. Franklin and A. Emami-Naeini: Design of Ripple-Free Multivariable Robust Servomechanisms, IEEE Trans. Automat. Contr., **31**-7, 661/664 (1986)
- 2) S. Urakura and A. Nagata: Ripple-Free Deadbeat Control for Sampled-Data Systems, IEEE Trans. Automat. Contr., **32**-6, 474/482 (1987)
- 3) 河野, 萩原, 荒木: サンプル値系のロバストサーボ条件, 第19回制御理論シンポジウム資料, 35/40 (1990)
- 4) H. K. Sung and S. Hara: Ripple-Free Condition in

Sampled-Data Control Systems, 13th DST Symposium, 269/272 (1991)

- 5) 手塚, 原, 近藤: デジタル繰返し制御におけるリップル現象, 計測自動制御学会論文集, **27**-8, 915/921 (1991)
- 6) Y. C. Wu and N. Z. Yen: A Ripple Free Sampled-Data Robust Servomechanism Controller Using Exponential Hold, IEEE Trans. Automat. Contr., **39**-6, 1287/1291 (1994)
- 7) H. Katoh and Y. Funahashi: Continuous-Time Deadbeat Control for Sampled-Data Systems, IEEE Trans. Automat. Contr., **41**-10, 1478/1481 (1996)

[著 者 紹 介]

加 藤 久 雄 (正会員)

1991年, 名古屋工業大学大学院工学研究科博士。後期課程修了。同年, 名古屋工業大学機械工学科助手。デッドビート制御, 繰返し制御, サンプル値系の研究に従事。電子情報通信学会会員(工学博士)。

舟 橋 康 行 (正会員)

1968年, 名古屋大学大学院博士課程修了。同年, 名古屋大学工学部自動制御研究施設助手。86年5月より名古屋工業大学機械工学科教授。制御理論の研究に従事。IEEE, 日本機械学会, 電子情報通信学会の会員(工学博士)。