現代制御理論によるロボット制御*

美多 勉** 涌井伸二***

Control of Robots using Modern Control Theory / Tsutomu MITA and Shinji WAKUI

Key words: modern control theory, robot arm, trajectory control, iterative control, constraint control

1. はじめに

メカニズムの運動制御として最近現代制御理論が用いられることが多い¹²⁾。そのような制御の一例としてここではロボットアームの軌道制御を例にとってその制御方法について述べてみる。

よく知られているようにロボットアームの軌道・位置決め制御の現状は各軸ごとのローカルPID制御によるPTP制御、CP制御をもとにし、さらに細かい軌道追従や位置決めに関しては、ティーチングとプレイバックを用いた人間の試行錯誤に類したものが主流となっている。これに代わるものとしてオフラインの高速軌道追従・高精度位置決めの自動化が望まれているが、ロボットアームは多変数系であるため、現代制御理論を使うことが考えられる。ただし、現代制御理論での今までの理論的成果は主として線形制御系に関するものに限られているのに対して、多軸のロボットアームは形状変化における非線形性が顕著で、しかも種々の非線形摩擦が存在する制御対象である。このため一般的な現代制御理論が理論やシミュレーション通りの制御効果を持つか否かに対する明確な解答は完全には得られていないのが現状である。しかし、そのような問題に対処する方法として

- (a) 非線形性をオンラインで逆算消去し、ロボットアームを多変数線形系に直して制御しようという、いわゆる逆ダイナミクス法に線形の現代制御理論を適用するもの¹⁾

- (b) 適応制御やスライディング制御など若干の非線形性に対してはロバストである制御を使うもの²⁾³⁾

- (c) 各軸のモータの定格定数以外はすべて外乱と見なし、適当な外乱推定器で外乱を推定し⁴⁾、それを外乱局所化理論などを使い消去してしまうものなどがある。これに対して、ここでは、これらとは別の2つの方法による軌道制御法について概説する。すなわち、反復制御（学習制御、繰返し制御）と呼ばれている試行をロボット自体にやらせる方法と、形状変化に関する非線形性の内、一部だけを逆算してやる拘束条件付制御について、その概要を述べる。

これらの方法は、結果的にはロボットアームが非線形系であるかわりに、多変数系ではあるが入力の状態変数の数の半分と多いことに着目して、適当な高ゲインフィードバック制御により複数の2次系に近似的に分解できることを利用している。その点からPID制御にさらなる工夫をこらして、従来以上の制御効果を得ようとするものであると言えよう。

2. 反復制御による軌道制御

2.1 反復制御

従来の運動制御で用いられる線形サーボ理論は内部モデル原理¹²⁾を使う都合上、目標値や持続外乱が線形時不変系から発生される信号に限定されていたのに対し、この制御方法は、その必要はなく、同じ目標値を繰返し与え得ることに着目し何回か試行を繰返し究極的にはロボットの伝達関数の逆システムを構成しようとする制御方法である。その制御方式は、大きく3つに分類される。

* 原稿受付 昭和63年3月5日

** 千葉大学工学部（千葉市弥生町1-33）

*** セイコー電子工業(株)（松戸市高塚新田563）

図1 制御対象 $G_0(s)$ と前置進み補償器 $K(s)$

すなわち、

- (1) 学習制御：目標値とサーボ動作が有限時間 $[0, T]$ 内で定義され、その収束性を関数解析的に議論するもの⁵⁾⁶⁾
- (2) 反復制御：目標値は $[0, T]$ で与えられるがサーボ動作を従来の線形制御理論と同様に $[0, \infty]$ とし、ラプラス変換あるいはフーリエ変換によって収束性を議論するもの⁹⁾¹⁰⁾
- (3) 繰返し制御：目標値を繰返し波形と考え閉ループ系を組み、目標値、サーボ動作とも $[0, \infty]$ 区間で定義し、従来の内部モデル原理に特殊な理論を使って帰着させて安定性を議論するもの⁷⁾⁸⁾

の3つである。詳しいことは直接文献に当たってもらい、ここでは、線形近似系を基に議論する反復制御⁹⁾¹⁰⁾について簡単に解説してみたい。

今、図1のように、あらかじめ何らかの方法で安定化された制御対象の伝達関数行列を $G_0(s) [m \times m]$ 、進み補償器を $K(s) [m \times m]$ とし、 $G(s) = G_0(s)K(s)$ と置くことにしよう。さらに、 $U_i(s)$ 、 $Y_i(s)$ を第 i 回目の試行における操作量、制御量のラプラス変換値、 $R(s)$ を有限時間区間 $[0, T]$ で定義された目標値 $r(t)$ のラプラス変換値とする。ただし、 $r(t)$ は $r(0) = r(T) = 0$ を満たし、1 回連続微分可能な任意の関数とする。

制御の目的は、 $Y(s) = R(s) = G(s)U(s)$ を満たす操作量 $U(s) = G(s)^{-1}R(s)$ を見つけること、すなわち、逆システムを構成することであるが、 $G(s)^{-1}$ はロボットの位置制御等を考えると、プロパーとはならないので実現不可能である。反復制御ではこれを

$$U_{i+1}(s) = U_i(s) + aE_i(s) \quad (1a)$$

$$E_i(s) = R(s) - Y_i(s) \quad (1b)$$

として、第 i 回目の試行の偏差 $E_i(s)$ 、操作量 $U_i(s)$ で第 $i+1$ 回目の操作量 $U_{i+1}(s)$ を修正しながら試行の反復を行い、 $R(s) = G(s)U_\infty(s)$ を満たす $U_\infty(s)$ を求めて行くものである。ここで、 a は収束速度を決めるパラメータである。この場合、 $R(s)$ に上記の条件を設け、さらに

$$\sup_{0 \leq \omega \leq \infty} \|I_m - aG(j\omega)\|_1 < 1 \quad (2)$$

の条件が成り立つと、式 (1) は安定に試行でき $y_i(t)$ は $r(t)$ に $t \in [0, \infty]$ で一様収束することが知られて

いる。ただし、 $\|\cdot\|_1$ は行列の l_1 ノルムであるとする。

しかし、この場合でも、 $\omega = \infty$ を考えると式 (2) は $G(s)^{-1}$ が安定かつプロパーである場合、すなわち、直接逆システムが作れる場合しか成立しない⁸⁾。

そこで、何らかの意味で近似的な $U_\infty(s)$ を求めたい。すなわち、式 (1) を使うことは、 $\omega = 0 \sim \infty$ のすべての角周波数への追従をねらっていることに相当し、分母の次数が分子の次数より大きい $G_0(s)$ に対しては高周波域で $[\omega = \infty \text{ では常に}]$ 式 (2) は満たされない、すなわち、安定に試行ができなくなるので、式 (1) に適当な遮断周波数を持つ緩和フィルタを入れ、高周波域では追従を諦め、安定化を優先することが考えられる。これは緩和フィルタを $[I_m + V(s)]^{-1}$ とすると

$$U_{i+1}(s) = [I_m + V(s)]^{-1} [U_i(s) + aE_i(s)] \quad (3)$$

として定式化され、式 (1b) を代入して変形すれば

$$U_{i+1}(s) = P(s)U_i(s) + [I_m + V(s)]^{-1}aR(s) \quad (4a)$$

$$P(s) \triangleq [I_m + V(s)]^{-1}[I_m - aG(s)] \quad (4b)$$

とも書ける。これらから、 $[I_m + V(s)]^{-1}$ が安定、プロパーで

$$\sup_{0 \leq \omega \leq \infty} \|P(j\omega)\|_1 < 1 \quad (4c)$$

を満たすならば、 $u_\infty(t)$ 、 $e_\infty(t)$ は

$$U_\infty(j\omega) = [V(j\omega) + aG(j\omega)]^{-1}aR(j\omega) \quad (5a)$$

$$E_\infty(j\omega) = V(j\omega)[V(j\omega) + aG(j\omega)]^{-1}R(j\omega) \quad (5b)$$

の逆フーリエ変換値に $t \in [0, \infty]$ で一様収束することが知られている⁹⁾。

よって、設計問題は式 (4c) を満たしながら、 $\|E_\infty(j\omega)\|$ をなるべく小さく、収束速度を向上させることとなる。これを、 $m=1$ の単入出力系で説明すれば、(1) ある角周波数 ω_c 以下で $|V(j\omega)| \approx 0$ 、 ω_c 以上で $|V(j\omega)| > 0$ とし、まず $\omega < \omega_c$ で、 $|E_\infty(j\omega)| \approx 0$ とする。(2) また、 $|G(j\omega)|$ を全体的に小さくし、かつ、 ω_c を大きくとれるように進み補償器 $K(s)$ を選ぶ。(3) さらに、これに対応して $a \rightarrow \text{大}$ とし、 $aG(j\omega) \approx 1$ とし、式 (4c) の $P(j\omega)$ を 0 に近づけ、式 (4a) の反復計算の収束率を上げることとなる。

2.2 ロボットアームの軌道制御への応用

図2のような3軸のロボットアームの先端の軌道制御を考えよう。パラメータは表1のようなものとして、以下、簡単に設計手順とシミュレーション結果を述べてみる。

以下、 $T=1$ s とし、各関節角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の目標値はアーム先端が作業座標系の $y=0.5$ m = 一定、 $x-z$ の

図2 R-P-P型3軸ロボットアーム

表1 3軸ロボットアームのパラメータ (I)

リンク重量 (kg)	—	$m_2=5.0$	$m_3=3.0$
リンク長 (m)	$l_1=0.4$	$l_2=0.4$	$l_3=0.4$
重心点 (m)	—	$a_2=0.2$	$a_3=0.2$
リンクの慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	—	$I_{2x}=0.05, I_{3x}=0.03$	
	—	$I_{2y}=0.05, I_{3y}=0.03$	
	—	$I_{2z}=0.05, I_{2z}=0.03, I_{3z}=0.005$	
駆動部の慣性 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	$I_1=0.02$	$I_2=0.04$	$I_3=0.02$
粘性摩擦係数($\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$)	$D_1=0.5$	$D_2=0.3$	$D_3=0.02$

平面内で、長径 (x 方向) と短径 (z 方向) がそれぞれ 0.26 m , 0.16 m の楕円を描くように逆算したものをを用いる。また、データを取るための整定時間を 2 s に設定し、 $U_0(s)=0$ とする。

まず、ロボットの運動方程式を目標値の始点で線形近似し、非干渉高ゲインフィードバック制御により、

$$G_0(s) = \text{diag}\left[\frac{1}{(s+30)^2}, \frac{1}{(s+30)^2}, \frac{1}{(s+50)^2}\right] \quad (6)$$

と近似できると仮定した。さらに、 a は簡単のためスカラとしてあったが、対角行列でも良いので、低周波域で $P(j\omega) \approx 0$ とするため、 $a = \text{diag}[30^2, 30^2, 50^2]$ とした。この場合、 $\omega \approx 50$ 以上の高周波域では $\|P(j\omega)\|_1 < 1$ とならないため、試行を重ねると、各軸の制御偏差は一度は収束するように見えるが、図3(a)のように追従軌道は最終的には発散してしまう。そこで、 $K(s)$ として進み補償器

$$K(s) = \text{diag}\left\{\frac{10(s+30)}{s+300}, \frac{10(s+30)}{s+300}, \frac{10(s+50)}{s+500}\right\} \quad (7)$$

を使い $\omega_c \approx 100$ とし、緩和フィルタ

$$\begin{aligned} & [I_3 + V(s)]^{-1} \\ &= \text{diag}\left\{\frac{65(s+75)}{75(s+65)}, \frac{65(s+75)}{75(s+65)}, \frac{105(s+115)}{115(s+105)}\right\} \end{aligned} \quad (8)$$

図3 楕円軌道への追従結果

を使い、 $\|P(j\omega)\|_1 < 1 (\forall \omega)$ を実現し、上記反復を繰り返すと図3(b)のような軌跡となり、約5回の反復で、目標軌道に追従していることが分かる。同図(c)に2回目と5回目のスティック線図を示しておく。なお、シミュレーションには制御対象を非線形のまま扱った。これは、次章の場合も同様である。

以上では、軌道の位置偏差しか利用できないという立場に立ったが、学習制御では⁵⁾⁶⁾、さらに、軌道の速度、加速度の偏差を用いて、 $G^{-1}(s)$ がプロパーになることに相当する条件を実現させようとしている。

3. 拘束条件付制御による軌道制御

3.1 制御方法

ここでは、線形近似系に基づく拘束条件付軌道制御¹¹⁾について概説しよう。

以下、図2のような3軸の関節型ロボットアームを考えることにし、その運動方程式を

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\dot{\theta}, \theta) + D\dot{\theta} + P(\theta) = u \quad (9)$$

とする。 $\theta \in R^3$ は関節間の3次元の関節角ベクトルであり、 $M(\theta)$ は慣性行列、 $C(\dot{\theta}, \theta)$ は遠心力、コリオリ力、 $D\dot{\theta}$ は粘性摩擦力、 $P(\theta)$ はポテンシャル力、 $u \in R^3$ は3次元の制御トルクベクトルである。

また外部に固定された作業座標系上でのロボットアーム先端位置 $(x, y, z)^T$ と関節角ベクトルが

図4 直線上の拘束条件

$$x=f_1(\theta), y=f_2(\theta), z=f_3(\theta) \quad (10)$$

の関係で表されているものとしよう。

以下、簡単のため、図4のように、ロボットアーム先端を直線 $x=l_x$, $z=l_z$ 上に沿って、速度 v_y で追従させたい場合を例にとってみよう。この場合には、拘束条件は、図4より

$$\left. \begin{aligned} x &= f_1(\theta) \\ &= [l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)] \cos \theta_1 \\ &= l_x \\ \dot{y} &= [\partial f_2(\theta) / \partial \theta]^T \dot{\theta} \\ &= v_y \\ &: f_2(\theta) = [l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)] \sin \theta_1 \\ z &= f_3(\theta) \\ &= l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) = l_z \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

となる。

いま、平衡点 $\bar{\theta}$ がこの軌道上にあり、式(10)の拘束条件を満たしているものとし、 $\bar{\theta}$ の近傍で

$$\theta = \bar{\theta} + \Delta\theta, u = \bar{u} + \Delta u \quad (12)$$

において、式(9)、(11)を線形近似すれば、 $\bar{u} = P(\bar{\theta})$ のバイアス入力と(後で述べる、重力補償では、 $u = P(\theta) + \Delta u$ と選ぶ)

$$M\Delta\ddot{\theta} + D\Delta\dot{\theta} + H\Delta\theta = \Delta u \quad (13)$$

$$: M = M(\bar{\theta}), H = (\partial P / \partial \bar{\theta})^T$$

および

$$[\partial f_1 / \partial \bar{\theta}]^T \Delta\theta = c_1 \Delta\theta = 0 \quad (14a)$$

$$[\partial f_2 / \partial \bar{\theta}]^T \Delta\dot{\theta} = c_2 \Delta\dot{\theta} = v_y \quad (14b)$$

$$[\partial f_3 / \partial \bar{\theta}]^T \Delta\theta = c_3 \Delta\theta = 0 \quad (14c)$$

を得る。

これらを状態方程式と出力方程式で記述すると

$$\dot{x} = Ax + B\Delta u \quad (15a)$$

$$y = Cx = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \\ c_3 & 0 \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} 0 \\ v_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15b)$$

図5 IDシステムと基本線形制御系

$$: x = [\Delta\theta, \Delta\dot{\theta}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I_3 \\ -M^{-1}H & -M^{-1}D \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \quad (15c)$$

とおける。式(15b)で $y_1 = y_3 = 0$ となっているので、本式を満たす Δu を見つける問題は、現代制御理論で言うところの出力零化問題(外乱局所化問題)¹²⁾ となっていることが分かる。また、 $y_2 = v_y$ は一定値へのトラッキング問題(1型のサーボ問題)となっていることも分かる。よって、出力零化問題を包含する線形非干渉問題、および線形サーボ問題としてまずこの問題を扱ってみる。

そこで、線形非干渉制御理論¹³⁾に従って、IDシステム(積分非干渉系)を作ることになると、いわゆる非干渉行列 B^* は

$$B^* = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} M^{-1} = GM^{-1} \quad (16)$$

となり、非干渉化できるための必要十分条件 $|B^*| \neq 0$ は特殊な特異姿勢¹¹⁾を除いて成り立つ。また、 A^* は

$$A^* = -GM^{-1}[H, D] \quad (17)$$

となり、非干渉化するための基本的な操作量は、新しい操作量を $w \in R^3$ として

$$\Delta u = -B^{*-1}A^*x + B^{*-1}w \\ = [H, D]x + MG^{-1}w \quad (18)$$

とすれば良いことが知られている。そこで、本式を系(15)へ代入し、線形構造を見やすくするため適当な状態変数変換 $p = Sx$ を行くと¹¹⁾, p は

$$p = [\Delta x, \Delta \dot{x}, \Delta y, \Delta z, \Delta \dot{y}, \Delta \dot{z}]^T \quad (19)$$

とでき、全システムは図5の点線で囲った積分器だけの非干渉されたシステム(IDシステム)となる。特に、

式(19)の $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は平衡点近傍において作業座標上の変位となるものである。そこで、図5のようにフィードバック制御を施し、サブシステム S_1, S_3 を安定化させれば、 $\Delta x, \Delta z \rightarrow 0$ の位置偏差に基づく軌道上への引込み動作が可能である。本方法では、さらに多少の持続外乱やパラメータ変動についても引込み動作がロバストであるように、 S_1, S_3 を1型のサーボ系として構成している。また、 S_2 においては、 Δy に至る積分器は $\Delta \dot{y}$ を積分するという見かけ上の積分器であるため、そのまま放置し、新しく積分器を w_2 の前に挿入し、1型の速度サーボ系を構成している。図5における安定化パラメータ f_i, k_i は、例えば、極指定法や最適1型サーボ理論⁽¹²⁾⁽¹³⁾によって設定できる。

問題は、ロボットアームを運動させることを目的としているため、平衡点の近傍を除いては、式(19)が実際の偏差を反映していないことである。すなわち、 $|\Delta x| \rightarrow 0$ が保証されても、実際の偏差について $|\delta x| = |f_1(\theta) - l_x| \rightarrow 0$ とはならないという現象が起こる。

そこで、本方法では、作業座標上の真の偏差

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= f_1(\theta) - l_x \\ \delta \dot{x} &= [\partial f_1(\theta) / \partial \theta]^T \dot{\theta} \\ \delta y &= [\partial f_2(\theta) / \partial \theta]^T \dot{\theta} \\ \delta z &= f_3(\theta) - l_z \\ \delta \dot{z} &= [\partial f_3(\theta) / \partial \theta]^T \dot{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

をオンラインで計算し、操作量 w の構成に利用する。すなわち、 p の最初の5変数を

$$p_N = [\delta x, \delta \dot{x}, \delta y, \delta z, \delta \dot{z}]^T \quad (21)$$

と入れ代え、この信号を図5の $\Delta x, \Delta \dot{x}, \Delta y, \Delta z, \Delta \dot{z}$ の代わりに使い、実際の制御系を構成する。

3.2 シミュレーション結果

ロボットアームのパラメータとしては表2のものをを用いた。また、各軸の入力の最大許容トルクは、それぞれ、12 Nm, 12 Nm, 3 Nmとした。図6はそれぞれ、 $l_x = 0.3$ m, $v_y = 0.3$ m/s, $l_z = 0.1$ mとしたときの軌道追従結果で、初期位置 $[0.3, -0.3, 0.1]^T$ (m)から最終位置 $[0.3, 0.3, 0.1]^T$ (m)までの直線軌道上を2 sで運動し停止する場合の例である。(a)は最初から軌道上にロボットアーム先端がある場合(上記初期位置にある場合)、(b)は初期値が軌道上になく、 $[0.35, -0.3, 0.15]^T$ にある場合、(c)は先端に0.5 kg(第3リンクの重量の0.5倍に相当する)の負荷をかけた場合のシミュレーション結果である。ただし、線形近似は初期位置と $[0.3, 0.15, 0.1]^T$ で行い、2つの制御モードをつなぎあわせている。

これらより、引込み動作やパラメータ変動にもある

表2 3軸ロボットアームのパラメータ(II)

リンク重量(kg)	—	$m_2 = 2.0$	$m_3 = 1.0$
リンク長(m)	$l_1 = 0.3$	$l_2 = 0.3$	$l_3 = 0.3$
重心点(m)	—	$a_2 = 0.15$	$a_3 = 0.15$
リンクの慣性モーメント(kg・m ²)	—	$I_{2x} = 0.02$	$I_{3x} = 0.01$
	—	$I_{2y} = 0.02$	$I_{3y} = 0.01$
	$I_{1z} = 0.0002$	$I_{2z} = 0.0002$	$I_{3z} = 0.0001$
駆動部の慣性(kg・m ²)	$I_1 = 0.002$	$I_2 = 0.01$	$I_3 = 0.0003$
粘性摩擦係数(kg・m・s/rad)	$D_1 = 0.4$	$D_2 = 0.4$	$D_3 = 0.001$

程度対処でき、また、望ましいと考えられる仕様が満たされている。この方法は式(11)さえ変えれば、ほかに3次元内のあるゆる軌道追従に対処できるが、ここでは省略する⁽¹¹⁾。

なお、実験によれば、モードのつなぎ目で追従精度が落ちることがあり、その場合、重力補償を行ってやれば良い。

4. おわりに

逆ダイナミクスを計算しない、線形近似系に基づくロボットアームの軌道追従制御について述べた。シミュレーションで得られた制御効果は、高ゲインフィードバック制御に基づいており、その制御を施すことによって、平衡点近傍では線形系と見なして良いとの仮定を用いている。これが実機でどの位ロバストに実現でき、また、シミュレーションに用いた高ゲインフィードバック制御がデジタル制御にした時、ロバスト安定性を崩さず実現可能か否かについては、現在、実機、および、ロバスト安定性理論の観点から検討中であるので、別途報告したい。

参考文献

- 小菅一弘, 古田勝久, 横山竜昭: ロボットの仮想内部モデル追従制御, 計測自動制御学会論文集, **24**, 1 (1988) 55.
- 大須賀公一: 非線形メカニカルシステムの適応制御, 計測自動制御学会論文集, **22**, 7 (1986) 756.
- 宮里義彦, 大島康次郎: ロボットマニピュレータの非線形適応制御, 計測自動制御学会論文集, **24**, 1 (1988) 63.
- M. Nakao, K. Ohnishi and K. Miyachi: A Robust Decentralized Joint Control Based on Interference Estimation, IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, (1987) 326.
- S. Arimoto, F. Miyazaki and S. Kawamura: Learning Control Theory for Dynamic Systems, Proc. 24th CDC, (1985) 1375.
- 川村貞夫, 宮崎文夫, 有本 卓: ロボットマニピュレータの運動学習制御, 計測自動制御学会論文集, **22**, 4 (1986) 443.
- 中野道雄, 原 辰次: 繰り返し制御系の理論と応用, システムと制御, **30**, 1 (1986) 34.
- 山本 裕, 原 辰次: 繰り返し制御系の内部モデル原理と安

図6 直線軌道への追従結果

- 定化可能性, 計測自動制御学会論文集, **22**, 8 (1986) 830.
- 9) T. Mita et al.: Iterative Control and Its Application to Motion Control of Robot Arm - A Direct Approach to Servo-Problems -, Proc. 24th CDC, Florida, (1985) 1393.
  - 10) 美多 勉, 加藤英治, 青木康史: 反復制御とロボットアームの軌道制御への応用, 計測自動制御学会論文集, **21**, 11 (1985) 1223.
  - 11) 大明準治, 美多 勉: 拘束条件付制御によるロボットアームの経路制御, 日本ロボット学会誌, **3**, 4 (1985) 285.
  - 12) 古田勝久, 川路茂保, 美多 勉, 原 辰次: メカニカルシステム制御, オーム社 (1984).
  - 13) 小郷 寛, 美多 勉: システム制御理論入門, 実教出版 (1979).