操作量飽和がある線形系に対する各種設計法の 実験的検討*

米澤 洋**・吉田 和信***・西村 行雄**

An Experimental Examination of Various Methods of Designing
Constrained Controllers for Linear Systems*

Yoh YONEZAWA**, Kazunobu YOSHIDA*** and Yukio NISHIMURA**

In order to investigate the practical aspect of a series of constrained control laws proposed by the present authors, an experimental examination using a servomechanism as a controlled object has been done. The control laws are as follows : (i) linear control using an admissible gain, (ii) variable gain feedback control, (iii) relay control via the gain satisfying the Popov condition, and (iv) relay control for a quadratic performance index.

The results of the experiment have shown high performance of Controls (ii), (iii) and (iv). Control (i) is not effective, because of the dead zone in the servo system. These control laws are so simple that the sampling time for Direct Digital Control can be 30~70 ms when using the interpreter-type BASIC program on a 16-bit personal computer (the clock frequency of CPU is 10 MHz).

1. はじめに

現実の制御系では、操作量は電圧、電流、流量などの物理量であり、これらの量には当然制限がある。もしこのような制限条件を無視して制御系を設計すれば、所望の制御性能が期待できないだけでなく、安定性さえ失われる恐れがある。

これまで、制限条件のもとでの制御系設計法に関して、数多くの研究が行われてきた¹⁻⁸。一方に、最短時間制御問題に代表される最適制御方策があり、これは一般に閉ループ制御しか与えないので実用的ではないとされている。また、他方に、あまり高性能でなくてもよいから、閉ループ系の構成が簡単となる線形制御理論を用い

て、制限条件内で設計を行なうという方法がある。そして文献2), 3), 5)の非線形制御則を挙げることができる。しかしながら、これらの非線形制御則では、制御系の安定性は保証されているが、物理的意味の明瞭な評価関数を小さくするという意味で、線形制御則より優れているという保証さえ与えられていない。

先に、筆者らは、閉ループ系の構成が簡単なゲイン状態フィードバック制御に着目し、線形の制御対象に対して、操作量の制限条件を満足する制御系の設計をゲイン空間で行なう設計法を提案した⁹⁻¹³。これらの設計法は、つぎの4種類の制御則を与える。

- (i) 許容ゲインを用いた線形制御⁹
- (ii) 可変ゲインフィードバック制御¹⁰
- (iii) Popov 条件を満足するゲインを用いたリレー制御(リレー制御 I)¹¹
- (iv) 2次形式評価に対するリレー制御(リレー制御 II)^{12,13}

(i) は、ある初期状態に対して操作量制限を満足するゲイン(許容ゲイン)のなかで、与えられた評価関数を最小とするゲインを用いて構成される。すなわち、こ

* 原稿受付 1987. 11. 7

** 広島大学 工学部 Faculty of Engineering, Hiroshima University ; Shitami, Saijo-cho, Higashi-Hiroshima 724, JAPAN

*** 広島工業大学 工学部 Faculty of Engineering, Hiroshima Institute of Technology ; Miyake, Saeki-ku, Hiroshima 731-51, JAPAN

Key Words : control system design, bounded control, non-linear controller, servomechanism, direct digital control.

の制御則は、線形制御の範囲内で最良の評価を与えるものである。

線形制御則では、状態が平衡点に近づくに従って操作量の大きさも小さくなる。より効果的な制御方法は、制御時間全体で操作量を制限内で、できるだけ大きく維持することであり (bang-bang がもっとも効果的)、状態の変化に伴ってフィードバックゲインを切り換えるという (ii) の可変ゲインフィードバック制御則がそのような制御方法を可能にする。

(iii) の制御則の設計は、Popov 条件を満足するゲインを用いて行なわれ、大域的に漸近安定でかつ代表的な初期状態に対して良好な応答を示すリレー制御系を得ることができる。

(iv) も (iii) と同様に定ゲインによるリレー制御則であり、状態の 2 次形式積分評価に関して、操作量制限内で設計された線形制御よりも優れた評価を与えることが保証されている。

これらの制御則によれば、制限条件を満足しかつ高い制御性能を有する制御系の設計を系統的に行なうことができる。また、制御則は定ゲインまたは可変ゲインによる状態フィードバックとして与えられるので、制御量の計算が容易であるという利点を有する。したがって、低コストかつ高性能な制御系の実現を可能にするため、その応用範囲は広いと思われる。例えば、最近、制御の分野でも多くの関心を集めているロボットマニピュレータなどのメカニカルサーボ制御系¹⁴に適用対象を見いだすことができるであろう。ロボットの運動は、熱プロセスなどの挙動に比べて、格段に速く、それゆえ制御量の計算時間は短いことが要求される。マイクロコンピュータ程度の計算機を用いてソフトウェアサーボ系を構成するためには、制御則が簡単であることが必要である。また、機械振動の能動制御も近年注目されている問題であるが¹⁵、この問題に関してもメカニカルサーボ系と同様のことがいえる。

本論文では、上記の各設計法の実用性を調べるために、サーボ実験装置を用いて行なった位置決め制御実験について考察する。サーボ系には、操作量飽和以外に摩擦による不感帯や歯車機構に起因するバックラッシュなどの非線形性が存在する。また、電気回路部におけるノイズも不可避である。このような系において、各設計法を適用しその有効性を実験的に検証する。

本論文の内容はつぎのとおりである。2. では、(i) ~ (iv) の設計法について概説する。3. では、制御対象のサーボ系について説明し、ステップ応答による系の同定結果を示す。また、パーソナルコンピュータをコントローラとして用いた制御系の構成法を示す。4. では、上

記の手法によって設計したサーボ系の位置決め制御実験の結果を示し、各設計法の有効性を比較検討する。また、負荷を変化させた場合のロバスト性の検討も行なっている。

2. 各種設計法の概説

制御対象および制限条件はつぎのとおりである。

$$\dot{x} = Ax + bu \quad (1)$$

$$|u| \leq 1 \quad (2)$$

x は n 次元ベクトル、 u はスカラー操作量、 A および b はそれぞれ $n \times n$ および $n \times 1$ の定数行列で、対 (A, b) は可制御とする。制御の目的は、外乱などによって乱された状態 x を (2) 式の制限条件のもとで速やかに平衡点に戻すというものであり、その設計手法として状態の 2 次形式積分などを評価として考える。

2.1 許容ゲインを用いた線形制御系の設計法⁹

初期状態の集合 Ω_0 (有界閉集合) および評価関数 $J = J(k)$ が与えられた場合、(2) 式を満足する線形制御

$$u = -k'x \quad (3)$$

の中で、最小の評価値を与えるフィードバックゲイン k を見いだすという設計法である。

$\forall x_0 \in \Omega_0$ に対して

$$|u(t)| = |k'x(t)| \leq 1, \quad \forall t \geq 0 \quad (4)$$

を満足するゲイン k を許容ゲインと呼ぶ。許容ゲインの必要十分条件は

$$z(t, k) \in \tilde{\Omega}_0, \quad \forall t \geq 0 \quad (5)$$

となる。ただし、 $z(t)$ は

$$\dot{z} = (A - bk')z, \quad z(0, k) = k \quad (6)$$

の解であり、集合 $\tilde{\Omega}_0$ は $y \in R^n$ に対して

$$\tilde{\Omega}_0 = \{y \mid |y'x_0| \leq 1, x_0 \in \Omega_0\} \quad (7)$$

で定義される集合である。

ゲイン k の設計は、(5) 式の条件のもとで評価関数を最小化するゲインを見いだすという非線形計画問題を解くことによって行なわれる。

2.2 可変ゲインフィードバック制御系の設計法¹⁰

(3) 式のゲイン k を区分的に一定なゲインとした場合の制御則であり、つぎのように設計される。

$$u(t) = -k_i'x(t) \quad (8)$$

$$\nu = \max\{i \mid x(t) \in \mathcal{R}_i, 0 \leq i \leq N\} \quad (9)$$

ただし、ゲイン $k_i (i = 0 \sim N)$ は、単調増加系列 $\rho_i > 0$

($i = 0 \sim N$) に対して

$$k_i = k(\rho_i) \quad (10)$$

で与えられる。 $k(\rho_i)$ は評価関数

$$J = \int_0^\infty (\rho_i x' Q x + u^2) dt \quad (11)$$

に対する LQ 最適ゲインである。また $\mathcal{R}_i$ は

$$\mathcal{R}_i = \{x_0 \mid |k'(\rho_i)\Phi(\tau, k(\rho_i))x_0| \leq 1, \forall \tau \geq 0\} \quad (12)$$

$$\Phi(\tau, k(\rho_i)) = \exp(A - bk'(\rho_i))\tau$$

で定義される集合であり、線形領域と呼ばれる。

(8) 式の制御則は、その計算が比較的簡単であり、つぎの評価

$$I = \int_0^\infty x' Q x dt \quad (13)$$

を小さくするという意味で、操作量制限を満足する線形制御より優れている。

係数 ρ_0 は、 $\mathcal{R}_0$ が設計で考慮する初期状態の集合を含むように決定される。

また、係数 ρ_N は、 $\mathcal{R}_N$ が小さな外乱やシステムノイズを包含するように決定される。数 N は、系の評価と操作量の計算時間とのトレードオフを考慮して、決定される。

2.3 Popov 条件を用いたリレー制御系の設計法 (リレー制御 I)¹¹

制御則は

$$u = -\text{sgn}(k'x) \quad (14)$$

なるリレー制御である。 A が安定という仮定のもとで、閉ループ系が大域的に安定となるように、ゲイン k は Popov 条件を満足するようにつぎのように設計される。

$$k = g + \tau h \quad (15)$$

ただしベクトル g, h は

$$g = 2(I + \beta A')^{-1} P b \quad (16)$$

$$h = 2(I + \beta A')^{-1} w \quad (17)$$

で与えられ、 $n \times n$ 行列 P, n ベクトル w はつぎのリアプノフ方程式を満足する。

$$(\mu I + A)' P + P(\mu I + A) + w w' = 0 \quad (18)$$

τ は代数方程式

$$\tau^2 - \beta h' b \tau - \beta g' b = 0 \quad (19)$$

の根である。Popov 条件を満足する実ゲインが得られるための、パラメータ $\mu > 0, \beta \geq 0, w$ に関する十分条件はつぎのとおりである。

- (1) $\mu I + A$ は安定
- (2) $(w', \mu I + A)$ は可観測
- (3) $|I - \beta A'| \neq 0$

$$(4) 1 - \beta \mu \geq 0$$

(19) 式の根 $\tau_1 \geq \tau_2$ に対応するゲインを k_1, k_2 とする。

応答特性を考慮したパラメータ μ, β, w の決定は、リレー制御系が有するスライディングモード (s モード) の特性に着目して行なう。そのために、s モードにおける速応性の指標

$$\zeta = -\max_i \text{Re } z_i \quad (20)$$

$z_i (i = 1 \sim n)$ は $\gamma(s) = k'(sI - A)^{-1}b$ の零点および s モード領域の大きさの指標

$$\eta = \|k_s\|^{-1} \quad (21)$$

$$k_s = (I - k k' / k' k) A' k / k' b \quad (22)$$

を定義し、適切な ζ, η を与えるパラメータを選ぶものとする。適切な ζ, η の大きさは、初期状態に依存しており、代表的な初期状態からのシミュレーションを行ないながら決定する。

2.4 2 次形式評価に対するリレー制御系の設計法 (リレー制御 II)¹³

制御則は

$$u = -\text{sgn}(b' P(k)x) \quad (23)$$

なるリレー制御である。ただし、 $P(k)$ は

$$(A - b k')' P(k) + P(k) (A - b k') + Q = 0 \quad (24)$$

の解であり、 k は $(A - b k')$ が安定となり、 $Q = C' C$ と分解したとき $(C, A - b k')$ が可観測となるように与えるものとする。また、この制御則が適用されるためには、初期状態 x_0 について

$$x_0 \in \Omega(k) \quad (25)$$

$$\Omega(k) = \{x \mid x' P(k)x \leq (k' P(k)^{-1} k)^{-1}\} \quad (26)$$

が成立しなければならない。

(23) 式の制御則は、つぎの評価

$$I = \int_0^\infty x' Q x dt$$

を小さくするという意味で、線形制御 $u = -k'x$ よりも優れていることが保証されている。

3. サーボ実験装置とその同定

3.1 制御対象の同定

実験に用いたサーボ系は NATIONAL サーボモデル VR-611 A であり、Fig. 1 に示すように、DC アンプ、DC サーボモータ (SAWAMURA 電気工業製、最大入力電圧 12 V)、歯車、負荷から構成されており、サーボモータの軸からポテンシオメータまでの歯数比は 72:1 である。

Fig. 2 に制御対象の伝達関数を示す。 u はアンプの入力電圧 (V)、 x_1 はポテンシオメータの出力電圧 (V)、

Fig. 1 Servomechanism

Fig. 2 Controlled object

および x_2 はサーボモータ軸の回転速度を検出するタコメータの出力電圧 (V) を表わしている。操作部には、 ± 1 V の飽和要素と $\pm$ 約 0.2 V の不感帯が存在する。この不感帯幅は u にステップ状の信号を与えることによって求めたものである。 u が滑らかに変化する場合には、不感帯幅がやや大きくなる傾向がある。非線形部は図中のブロックに示すように近似的に表現できる。 x_1 と x_2 の電圧と物理量との対応は、 $x_1 = 1$ V のときポテンシオメータの角度が 24° 、 $x_2 = 1$ V のときモータ軸の角速度が $5875.2^\circ/\text{s}$ となっている。

同定するパラメータはゲイン K_m 、 K_g および時定数 T である。この時定数は、サーボ機構 (アンプ、サーボモータ、負荷) の遅れを包括的に表現している。同定方法は、 $u = 0.3$ V のステップ状の電圧を投入して x_1 と x_2 のステップ応答から各パラメータを推定するという方法を採用した。負荷は歯車軸に取り付けられた円盤であり、その慣性モーメント $J_m = 2.06 \text{ gcm}^2$ の場合を検討することとする。また、ロバスト性の検討のために $J_m = 0.52 \text{ gcm}^2$ と変えた実験も行なう。それぞれの場合の同定結果を Table 1 に示す。各パラメータは 10 回

Table 1 Identified parameters

$J_m (\text{gcm}^2)$	$T_{(a)}$	K_m	K_g
2.06	6.0	10.5	3.4
0.52	3.5	10.5	3.4

Fig. 3 Control system

ずつ行なったステップ応答から得られた値の平均値である。測定値で、時定数 T には、 $\pm 10\%$ 程度のばらつきが見られ、ゲイン K_m 、 K_g には、 $\pm 5\%$ 程度のばらつきがそれぞれ認められた。

サーボ系の線形部分の状態方程式はつぎのようになる。

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & K_g \\ 0 & -1/T \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ K_m/T \end{bmatrix} u_1 \quad (27)$$

$$x = (x_1, x_2)'$$

3.2 制御系の構成

制御系の構成を Fig. 3 に示す。コントローラとしては、パーソナルコンピュータ NEC PC-9801 VM2 を用いており、制御用言語は MS-DOS 上で走る N 88 BASIC である。A/D 変換器は、CONTEC 製 PC-MODULE AD 12-16 (98) であり、変換速度は $50 \mu\text{s}$ である。D/A 変換器は、同じく CONTEC 製 PC-MODULE DA 12-4 (98) であり、変換速度は 600 ns である。

4. 実験結果および考察

すべての実験において状態 x を $(0, 0)'$ から $(2, 0)'$ へ制御するという位置決めサーボ実験を行なう。すなわち、ポテンシオメータの角度を 0° から 48° まで回転させるという制御実験である。また、制限条件は、操作量飽和

$$|u| \leq 1 \quad (28)$$

を考える。

4.1 (i) の方法 (線形制御) による実験

評価関数を

$$J = \int_0^{\infty} (\rho x_1^2 + u^2) dt \quad (29)$$

とし、LQ 最適ゲイン $k(\rho)$ が許容ゲインとなるような ρ のなかで最大の ρ に対する LQ 最適ゲインを用いれば、(i) の設計方針に従うゲインが得られる。設計されたゲインはつぎのとおりである。

$$J_m = 2.06 \text{ の場合 } k(0.25) = (0.5, 0.974)'$$

J_m の単位 (g cm^2) は省略する。以下も同様である。

これらの実験結果を Fig. 4 に示す。いずれも、1.5 秒程度で制御が定常的になっており、不感帯の影響で 0.7 V 程度の定常偏差が残っている。大きな操作量を維持できない線形制御は不感帯がある場合あまり有効ではないことがわかる。1 回の操作量計算に要した時間は約 30 ms であった。

Fig. 4 Results of experiment by control (i): $J_m = 2.06$

4.2 (ii) の方法 (可変ゲイン制御) による実験

用いるゲインは (29) 式に対する LQ 最適ゲインである。ゲインの個数は 3 とする。すなわち、 $N=2$ である。 ρ_i は、

$$\rho_0 = 0.25, \rho_1 = 1, \rho_2 = 5$$

とした。 $J_m = 2.06$ の場合のゲインは

$$k_0 = k(0.25) = (0.5, 1.302)'$$

$$k_1 = k(1) = (1, 1.878)'$$

$$k_2 = k(5) = (2.236, 2.854)'$$

である。ただし、線形領域 $\mathcal{R}_i$ は時間の刻み幅 $\Delta\tau = 0.5$ として近似されている¹⁰。

Fig. 5 に、実験結果を示す。4 番目の信号は選定されたゲインを表わしている。理論的には、ゲインの番号は単調に増大するが、実験ではノイズの影響で必ずしも単調増大ではない。応答は、約 1.5 秒で定常的になっている。定常偏差は、0.1 V 残っているが、線形制御に比べて大幅に改善されているのがわかる。また、 x_1 の立ち上がり急になっているという意味で、速応性も改善されている。ゲインが変わるとき x_1 の応答が波うっているのが認められる。数値シミュレーションではこれほどの乱れは見られなかったので、不感帯やバックラッシュの影響と思われる。ゲインが一定になっても u がばらついているのは、特に、タコジェネレータの出力 x_2 に含まれるノイズの影響である。1 回の操作量計算に要し

Fig. 5 Results of experiment by control (ii): $J_m = 2.06$

Fig. 6 Results of experiment for robustness test using control (ii)

た時間は約 70 ms であった。

制御則のロバスト性を調べるために、負荷が $J_m = 2.06$ に対する制御則で、負荷を $J_m = 0.52$ に変えた場合の実験を行なってみた。結果を Fig. 6 (a) に示す。また、逆に、 $J_m = 0.52$ に対する制御則で、負荷を $J_m = 2.06$ に変えた場合の実験結果を Fig. 6 (b) に示す。両者の時定数は、3.5 s と 6 s という違いがあるにもかかわらず、応答はそれほど劣化していない。

4.3 (iii) の方法 (リレー制御 I) による実験

制御対象は漸近安定でなければ (iii) の方法は適用できないので、リレー要素の出力を ± 0.9 V として残り ± 0.1 V は安定化のためのフィードバック

$$u_0 = -f x_1 \quad (30)$$

に利用した。ただし、 $|x_1| \leq 3$ と仮定して係数 f を決定した。

与えたパラメータは

$$\mu = 0.001, w = (1, 0)', \\ f = 0.019$$

である。ゲインは、 k_1 と k_2 の二つがあるが k_1 の方を採用した。つぎの β に対するゲインを用いた場合の実験結果を Fig. 7 (a), (b), (c) に示す。理想的なリレー要素を用いると演算遅れやバックラッシュなどの影響でチャタリングが生ずるので $\|\alpha k_1\| = 10$ とした飽和制御でリレー要素を近似している。

$$\begin{aligned} \beta = 10, k_1 &= (18.331, 4.484)', \\ \zeta &= 4.09, \eta = 0.07 \\ \beta = 15, k_1 &= (12.395, 7.914)', \\ \zeta &= 1.57, \eta = 0.23 \\ \beta = 30, k_1 &= (6.431, 8.921)', \\ \zeta &= 0.72, \eta = 0.73 \end{aligned}$$

s モード領域 (指標 η) が大きくなるに従って、s モードが支配的となっている。この場合 $\beta = 15$ が良好な応答を与えており、可変ゲインフィードバック制御に比べて、 x_1 の応答は滑らかである。また、応答は約 1 秒で整定しており、速応性も優れている。1 回の操作量計算に要する演算時間は、線形制御の場合とほとんど同じで約 30 ms で

あった。

4.4 (iv) の方法 (リレー制御 II) による実験

負荷は $J_m = 2.06$ の場合を考える。評価関数は

$$I = \int_0^\infty x_1^2 dt \quad (31)$$

であり、基準となる線形制御は (29) 式の評価に対する LQ 最適ゲイン ($\rho = 0.036$) を用いた。設計されたゲインはつぎのとおりである。

$$P(k)b = (2.635, 5.926)'$$

Fig. 8 に、実験結果を示す。ここでもリレー要素の代わりに $\|\alpha P(k)b\| = 10$ とした飽和制御を適用している。(iii) の方法で得られた応答と比較すると、s モードがやや支配的となっているのがわかる。整定時間は約 2.5 秒であり、速応性は (iii) の方法で設計された場合より劣っている。定常偏差は 0.05 V となっており、可変ゲインの場合より小さい。これは、制御則がリレー制

Fig. 7 Results of experiment by control (iii) : $J_m = 2.06$

御の近似となっているためである（リレー要素は不感帯を補償する）。

ここでも、制御則のロバスト性を調べるために、4.2と同様の実験を行なった。負荷が $J_m = 2.06$ に対する制御則で、負荷を $J_m = 0.52$ に変えた場合の実験結果を Fig. 9 (a) に示す。また、逆の場合の結果を Fig. 9 (b) に示す。負荷を小さくした場合、チャタリングが顕著になっているが、ゲインの大きさを小さくすれば応答が滑らかになる。この場合も、制御対象のパラメータ変化に対して十分なロバスト性が見られる。(iii)と(iv)の方法は、同じリレー制御則を与えているので、(iii)の設計法でも、同様のロバスト性がある。

5. おわりに

これまでに筆者らによって提案された各設計法の実用性を検証するために、簡単なサーボ実験装置を用いた位置決め制御実験を行なった。

位置決め制御実験はポテンショメータの出力電圧を 0 V から 2 V へ制御するというものであるが、(i)の方法（線形制御）では、サーボ装置の不感帯の影響で 0.7 V 程度の定常偏差が残った。(ii)の方法（可変ゲインフィードバック制御）では、定常偏差が 0.1 V 程度に小さくなり、速応性の向上も認められた。(iii)の

Fig. 8 Results of experiment by control (iv) : $J_m = 2.06$

(a) $J_m = 0.52$; control for $J_m = 2.06$ (b) $J_m = 2.06$; control for $J_m = 0.52$

Fig. 9 Results of experiment for robustness test using control (iv)

方法(リレー制御Ⅰ)では、最も優れた速応性が得られ、定常偏差もほとんどなくなった。(iv)の方法(リレー制御Ⅱ)による応答は、sモードがやや支配的であり、(iii)の方法で設計された場合に比べ、速応性はやや劣っていた。また、(iii)、(iv)の方法について、制御対象のパラメータ変化に対するロバスト性も検討したが、いずれも、十分なロバスト性が認められた。

実験では、特に不感帯の影響で、大きな操作量を維持できる(ii)、(iii)、(iv)の設計法の優位性が見られた。ここで行なった制御実験は、2秒程度で制御が終了するという速い現象を扱ったが、操作量の計算が簡単なので、制御用の計算機はマイクロコンピュータで十分であった。制御用の言語として、MS-DOS上のN 88 BASICを用いた場合、1回の操作量計算に要する時間は30~70 msであった。

本実験では、(iii)の方法によって設計された制御系が最も大きな速応性を示したが、いずれの方法が優れているかという理論的説明はなされていない。ただ、(ii)、(iv)の設計法による制御則は、状態の2次形式評価を小さくするという意味で、制限条件内で設計された線形制御則よりも優れている。また、(iii)の方法は、設計パラメータの与え方が自明でないで、シミュレーション

による試行錯誤を必要とする。

ここでは、一つの目標値を取り扱ったが、ほかの目標値(例えば1, 3, 5 V)についても、2 Vの目標値の場合と同程度に数値シミュレーション結果と類似した制御応答が得られ、同様の考察ができる。

参考文献

- 1) ポントリヤギン(関根訳): 最適過程の数学的理論, 文一総合出版(1967)
- 2) R. E. Kalman & J. E. Bertram: Control System Analysis and Design via the "Second Method" of Lyapunov I, II; Trans. ASME Basic Engineering, Ser. D, 82, pp. 371~400 (1960)
- 3) J. F. Frankena & R. Sivan: A Non-linear Optimal Control Law for Linear Systems; Int. J. Control, Vol. 30, No. 1, pp. 159~178 (1979)
- 4) H. Kiendl: Calculation of the Maximum Absolute Values of Dynamical Variables in Linear Control Systems; IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-27, No. 1, pp. 86~89 (1982)
- 5) P. O. Gutman & P. Hagander: A New Design of Constrained Controllers for Linear Systems; IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-30, No. 1, pp. 22~33 (1985)
- 6) E. P. Ryan: Optimal Relay and Saturating Control System Synthesis, Peter Peregrinus (1982)
- 7) J. E. Gibson(堀井訳): 非線形自動制御, pp. 391~552, コロナ社(1968)

- 8) 北川編：最適制御過程Ⅱ，共立出版（1967）
- 9) 西村，吉田，米澤：操作量や状態に制限がある場合の線形制御系の設計；計測自動制御学会論文集，20 巻，7 号，pp. 600～605（1984）
- 10) 吉田，西村，米澤：操作量に制限がある線形系に対する可変ゲインフィードバック制御系の設計，計測自動制御学会論文集，21 巻，7 号，pp. 677～683（1985）
- 11) 吉田，西村，米澤：Popov 条件を満足するゲインを用いたリレー制御系の設計；計測自動制御学会論文集，23 巻，2 号，pp. 197～199（1987）
- 12) 吉田，西村，米澤：操作量制限がある線形離散時間系に対する非線形コントローラの設計；計測自動制御学会論文集，22 巻，10 号，pp. 1112～1114（1986）
- 13) 吉田，西村，米澤：操作量制限がある線形系に対する非線形コントローラの設計；第 25 回計測自動制御学会学術講演会予稿集，pp. 661～662（1986）
- 14) 吉川：ロボットアームの制御方式；計測と制御，25 巻，1 号，pp. 37～44（1986）
- 15) 背戸，鈴木：振動の能動制御と動特性同定；日本機械学会誌，89 巻，811 号，pp. 635～642（1986）