単純適応制御法による能動制振*

日 野 満 司^{*1}, 岩 井 善 太^{*2}
福 島 浩 介^{*3}, 若 宮 龍 市^{*2}

An Active Vibration Control by means of a Simple Adaptive Control Method

Mitsushi HINO, Zenta IWAI,
Kousuke FUKUSHIMA and Ryuichi WAKAMIYA

In this paper, we consider an active vibration control system based on a simple adaptive control (SAC) method when the system is subjected to bounded disturbances. The SAC method has advantages such that it requires little knowledge with respect to information about disturbances and plant-order when we construct a control system. However, the method was proposed only for tracking control problems. Hence, we first modified the usual SAC techniques to regulator control methods. Effectiveness of the proposed algorithm for the vibration control problems were confirmed by the experimental results obtained from the laboratory-scale experimental equipment of active vibration control. That is, the fundamental vibration suppression characteristics, such as robustness for the nonlinear friction and random disturbances, were attained by use of the modified SAC algorithm.

Key Words: Automatic Control, Vibration, Vibration Control, Active Control, Adaptive Control, Simple Adaptive Control, Dynamic Vibration Absorber, Unknown Disturbance

1. 緒 言

能動制振系は機械、構造物等に生じる外乱による振動をフィードバック制御等により除去しようとするもので、近年活発に研究がなされておりその有効性が検証されつつある。

この場合の制御手法に関してはLQ最適制御等による状態フィードバック制御系や、外乱除去の観点から外乱が計測可能あるいは特定の外乱を対象とし外乱オブザーバで推定可能であるものとしてフィードフォワード制御系等を構成しているもの^{(1)~(6)}がほとんどである。しかし、それらの手法では高周波数領域および特定の周波数に限ってはかなりの制振が達成できるが、広範囲における周波数領域に対する高精度の制振は不可能である。また、実在系では振動系パラメータを正確に把握するのは難しく、さらに、外乱も未知情報となる場合が多いため、従来の制御手法では一般的な確定外乱が印加する振動系に対し良好な制振を達成するのは困難である。

そのような場合の有力な制御手法として著者らはプラントパラメータおよび外乱パラメータが未知である場合でも適用可能な内部モデル原理に基づく適応極配置法を提案し実験においても良好な制振効果を検証している^{(7)~(9)}。しかし、この手法は従来の適応極配置法と比べアルゴリズムがかなり簡単化されているがそれでも複雑なものであり、非線形性の強いプラントへの適用は困難であった。また、それを適用するに際してはプラントおよび外乱特性多項式の次数が既知でなければならず、その仮定が満たされない場合制振性能が悪くなる場合があり、さらに従来の適応制御手法において問題であった制御開始直後のパラメータ推定過程における著しい制振性能の劣化傾向が改善されていない。これらの欠点を克服する適応制御法としてSobel・Kaufmanらにより考案され⁽¹⁰⁾、Bar-kanaによって実用性が高められた⁽¹¹⁾トラッキング制御を対象とした単純適応制御法(Simple Adaptive Control: 以下SACと略記)がある。この手法はプラントがASPR条件(Almost Strictly Positive Real Condition)なる条件を満たしていればプラントおよび外乱に関する情報が未知でも適応制御系が単純な機構で構成でき非線形性に対してもかなりロバストであるという特徴を有している。

* 原稿受付 平成3年4月18日。

^{*1} 正員, 北九州工業高等専門学校 (〒803 北九州市小倉南区志井5-20-1)。^{*2} 正員, 熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪2-39-1)。^{*3} 正員, 東陶機器(株) (〒802 北九州市小倉北区中島2-1-1)。

そこで本研究では従来の規範モデルの介在するトラッキング問題を対象としたSACの優れた特長を制振系に適用することを考え、そのために、同手法を制振問題の1種であるレギュレータ問題に帰着させ能動制振系へ適用することを検討する。また、その場合の制御系の安定性の証明を行う。さらに、実験例によりそのようにして構成した制御系の制振性能を検証する。

2. SAC の 構 成

ここで採用するSACはBar-kanaにより提案されたもの⁽¹¹⁾であり、プラントの次数には無関係かつ従来の適応制御法と比べ極めて単純なアルゴリズムで制御系が構成できる。さらにプラントに非線形性があっても非常に良好な制御性能が得られるという特徴を有している。しかし、このSACはトラッキング問題を対象としているため、そのままの形で制振問題に適用すると規範モデルが介在するため効率の悪いアルゴリズムとなってしまう。ここでは、Bar-kanaの手法を基にしてレギュレータ問題を対象とするSACの構成法を検討する。

2・1 SAC プラントは次の n 次可制御可観測な1入出力系で記述されるものとする。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t) + dw(t) \dots\dots\dots (1\cdot a)$$

$$y(t) = c^T x(t) \dots\dots\dots (1\cdot b)$$

ここに、 $A \in R^{n \times n}$, $b, d, c \in R^{n \times 1}$ は未知パラメータを持つ行列とベクトルである。また、 $x(t)$ は n 次状態ベクトルであり、 $u(t), y(t)$ は検出可能な入出力、 $w(t)$ は未知有界外乱である。

ここで、プラントは次の仮定を満たしているものとする。

(i) プラントはASPR条件を満たす。すなわち、あるフィードバック定数ゲイン k^* が存在して、

$$A_c = A + bk^*c^T \dots\dots\dots (2)$$

とすると、 $G_c = c^T(sI - A_c)^{-1}b$ が強正実(SPR)となる。

(ii) 次式を満たす未知正定数 ρ^* が存在する。

$$\rho^* = \sup_t |w(t)| \dots\dots\dots (3)$$

制御目的は振動系に混入する未知有界外乱 $w(t)$ により励起されるプラントの振動変位 $y(t)$ を微小とする制御入力構成することである。このための適応制御則構成を以下に示す。

制御入力を次式で構成する。

$$u(t) = k(t)y(t) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、可変出力フィードバックゲイン $k(t)$ は σ 修正項を付加した次の比例+積分適応同定則で調整され

る⁽¹²⁾。

$$k(t) = k_i(t) + k_p(t) \dots\dots\dots (5\cdot a)$$

$$\dot{k}_i(t) = -\gamma_i y(t)^2 - \sigma(t)k_i(t) \dots\dots\dots (5\cdot b)$$

$$k_p(t) = -\gamma_p y(t)^2 \dots\dots\dots (5\cdot c)$$

$$\sigma(t) = \sigma_{k1} \frac{y(t)^2}{1 + y(t)^2} + \sigma_{k2} \dots\dots\dots (5\cdot d)$$

ここに、 $\gamma_i, \gamma_p, \sigma_{k1}, \sigma_{k2}$ は正に与える設計パラメータである。ただし、 σ_{k2} は $k(t)$ の発散現象を抑制するもので、本報告で新たに導入したパラメータである。

この制御則を用いるとき、制御系内の全信号は一樣終局有界となる。証明は付録に示す。さらに、本制御則は出力フィードバック制御系を構成しており可変出力フィードバックゲイン $k(t)$ が式(5)より $y(t) \neq 0$ である限り時間とともにある値まで負に大きくなるため、制御系は結果的に外乱に対してロバストなハイゲインフィードバック系となる。

2・2 ASPR 条件 プラントにSACを適用するに際してプラントは仮定(i)のASPR条件を満たす必要があるが、これを判定する手段として次の条件がある。

式(1)で与えられているプラントが次の伝達関数 $Gp(s)$ で表されるものとする。

$$Gp(s) = Bp(s)/Ap(s) \\ = \sum_{j=0}^m b_j s^j / \sum_{i=0}^n a_i s^i \dots\dots\dots (6)$$

このとき、次の条件が満たされていれば $Gp(s)$ はASPRである⁽¹²⁾。

c. 1) $Bp(s)$ が安定多項式

c. 2) $n - m \leq 1$

c. 3) $n - m = 1$ のとき最高位係数 b_m/a_n が正

一般に実システムがこの条件を満足していることは少ない。このような場合には図1に示すようにプランと $Gp(s)$ に対しフィードフォワード補償を行うことで拡張系 $Ga(s)$ をASPR化できることがBar-kanaによって提案されている⁽¹¹⁾。しかしこの場合、制御則が制御対象とみなすのは拡張系 $Ga(s)$ であるため、本来の出力 $y(t)$ に関して制御目的が達成される保証は

図 1 拡張系

ない。したがって、フィードフォワード補償 $F(s)$ を使用する周波数領域において、

$$|F(j\omega)| \ll |Gp(j\omega)| \dots\dots\dots (7)$$

となるように設計すれば、

$$y(t) \approx y_d(t) \dots\dots\dots (8)$$

となり実質的に $y(t)$ を制御することができる⁽¹²⁾。

3. 能動制振系構成

前述した制御手法は、機構は一般に複雑となるが制御時に固定点を必要としないため広い適用範囲を持つ動吸振器形能動制振系に適用可能となる。ここでは、図2に示したような実験装置の具体例について制御系構成を説明する⁽⁹⁾。これは主振動系質量と補助質量の間にアクチュエータを取付けたもので、出力が主振動系質量の変位であり、入力がサーボアンプへのコンピュータからの指令電圧である。制振原理は付加質量にアクチュエータによって外部から制振エネルギーを印加し、付加質量を加速させた時に生じる力の反作用で主振動系質量に力を与え外乱からの力を相殺させることにより主振動系質量の制振を達成しようとするものである。

この振動系の方程式は次のようになる。

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + k_1y = k_2(w' - y) - f - m\ddot{y} - F_r(\dot{y}) \dots\dots\dots (9)$$

$$m\ddot{z} = f \dots\dots\dots (10)$$

ここに、

M ：主振動系質量

m ：補助質量

C ：粘性減衰係数

k_i ：ばね定数

y ：中立点からの主振動系質量の変位

z ：主振動系質量に対するアクチュエータの制御

入力相対変位

w' ：中立点からの外乱変位

f ：アクチュエータから発生する力

F_r ：主振動系質量に作用する摩擦力

補助質量を駆動するアクチュエータとしては位置指令形サーボモータを使用しているが、その動特性モデルは、補助質量 m を同時に考慮した形で、次の二次遅れ系で与えるものとする。

$$\dot{z} = q_1\dot{z} + q_2z + ru \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 u はアクチュエータへの制御入力電圧である。外乱項を w として未知有界摩擦力 $F_r(\dot{y})$ をも含めた形で

$$w = k_2w' - F_r(\dot{y}) \dots\dots\dots (12)$$

と定義し、状態変数を $x^T(t) = [y(t), \dot{y}(t), z(t), \dot{z}(t)]$ と取ると式(9)～(11)は次の状態方程式で表される。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t) + dw(t) \dots\dots\dots (13\cdot a) \\ y(t) = c^T x(t) \dots\dots\dots (13\cdot b) \end{cases}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & q_2 & q_1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ 0 \\ r \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} 0 \\ d_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$c^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

表1 パラメータ概略値

Main mass	kg	M	4.89
Sub mass		m	1.43
Viscous damping coefficient	Ns/m	C	1.0
Spring constant	N/m	k_1 k_2	163 300
Actuator		q_1 q_2 r	-25.9 -47.5 0.387

図2 動吸振器形能動制振系

ただし、式中の記号は次のとおりである。

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{k_1+k_2}{M+m}, a_2 = -\frac{C}{M+m} \\ a_3 &= -\frac{mq_2}{M+m}, a_4 = -\frac{mq_1}{M+m} \\ b_1 &= -\frac{mr}{M+m}, d_1 = \frac{1}{M+m} \end{aligned}$$

なお、このシステムは可制御可観測である。

実験で使用する装置のプラントおよびアクチュエータのパラメータ概略値は表1のとおりである。

このプラントに対してSACを適用することを考える。プラントの入出力に関する伝達関数は次式で表される。

$$Gp(s) = \frac{b_1 s^2}{(s^2 - q_1 s - q_2)(s^2 - a_2 s - a_1)} \cdots \cdots (14)$$

このプラントは仮定c. 1), c. 2)を満たしておらずASPR条件を満足していない。したがってフィードフォワード補償を施しプラントをASPR化する。さらに、条件式(7)を満足するようにするために図3に示すようにプラントに負の入力 $u_1(t) = -u(t)$ を与える。フィードフォワード補償として次の一次遅れ系を考える。

$$F(s) = \frac{\beta}{s + \alpha}, \alpha, \beta > 0 \cdots \cdots (15)$$

このとき、拡張系は次式となる。

$$\begin{aligned} Ga(s) &= \frac{\beta(s^2 - q_1 s - q_2)(s^2 - a_2 s - a_1) - b_1 s^2(s + \alpha)}{(s + \alpha)(s^2 - q_1 s - q_2)(s^2 - a_2 s - a_2)} \\ &\cdots \cdots (16) \end{aligned}$$

この拡張系は仮定c. 2), c. 3)を満たしている。また、分子多項式を安定とする α, β の範囲は表1のパラメータ概略値からフルビッツの安定判別法を用いて次のように求められる。

$$\alpha > 1.82, 0 < \beta < 4.45 \times 10^{-3}$$

ここでは、この範囲内で根軌跡法により α, β の値が零点へ与える影響を調べ安定度が高く条件式(7)を満足するものとして次の値を採用した。

$$\alpha = 7.0, \beta = 1.0 \times 10^{-4}$$

図3 拡張系

フィードフォワード補償のパラメータ選定に際してプラントパラメータの値が必要ではあるが、SACではフィードバックゲインを適応的に調整しているためプラントパラメータ値にはかなりロバストなシステムとなっている。そのため、プラントパラメータ値が、もし、真値とかなり違っていても、式(15)によってASPR条件さえ満足されておれば制振は十分に達成される。

4. 実験

4.1 実験装置 実験装置の概略は既に図2に示した。加振源としては外乱発生装置により $w'(t)$ を発生させ主振動系質量にばね k_2 を介して印加する。主振動系質量変位は差動トランスで検出し、ノイズ処理用フィルタとA/D変換器を介して計算機(MELCOM 70 MX/2600)に取り込まれる。計算機内で制御アルゴリズムに従って処理された信号はD/A変換されたサーボアンプを介してサーボモータに送られ、ボールねじを介し補助質量を直線的に駆動させる装置となっている。検出から制御までの1サンプリング時間はこの場合約3.1msであった。文献(9)に示した通常の適応則を用いた場合には同じ計算機で60~110msを要したのに比べ計算時間は大幅に短縮されているが、これは、通常の適応制御方式では12個のパラメータ同定を同時に行う必要があったのに対し、提案するSAC手法では可変出力フィードバックゲイン1個を適応的に同定すればよいことに起因している。なお、ここではミニコンピュータを使用した。SAC方式を用いれば通常のパーソナルコンピュータでも短い時間で十

表2 制御則の設計パラメータ

実験項目	γ_1	γ_p	$k_z(0)$	σ_{k_1}	σ_{k_2}
(a)	1×10^8	1×10^6	-3000	0.1	0
(b)	1×10^8	1×10^7	0	0.1	0.0015
(c)	3×10^8	3×10^8	0	0.1	0.008

図4 周波数応答

分処理できる計算量となる。

4・2 実験結果および考察 本研究では次の項目について実験を行った。

(a) 外乱周波数を変化させたときの主振動系質量変位の周波数特性

(b) 不規則な外乱が印加された場合

(a) 外乱変位

(b) 無制御時の主振動系質量変位

(c) 制御時の主振動系質量変位

(d) 制御指令電圧

図 5 不規則な外乱を印加した時の制御効果

(c) 制振中に主振動系質量に突発的な外乱が与えられた場合

各項目における制御則の設計パラメータは表 2 のとおりである。

以下、各実験項目に従って実験結果および考察を示す。

(a) 外乱を振幅 9.3 mm の正弦波 1 成分とし角速度を共振周波数 (8.04 rad/s) を含み 4.08 rad/s から 18.9 rad/s まで変化させた時の周波数応答を図 4 に示す。ただし、縦軸 z は次に定義するように主振動系質量の基本周波数における変位の絶対値の最大値と外乱のその比をデシベル値で表したものである。

$$Z = 20 \log_{10}(Y/W)$$

$Y = \max | \text{主振動系質量の基本周波数における出力変位} |$

$W = | \text{外乱の振幅変位} |$

この周波数範囲では制御を行った場合のほうが振動レベルが無制御時の場合に比べ低レベルになっており、良好な制振効果が得られている。高周波数外乱に関しては本実験装置の外乱発生に限界があるのでデータは示していないが、この場合システム自体が低域フィルタ特性を持つので特に制御を行わなくても振動変位は微小となる。一方、低周波数外乱に対しては制御効果は劣化する。これは実験系が主振動系質量変位を補助質量系の加速度変化で制御する一種の動吸振器構造を

(a) 主振動系質量変位

(b) 制御指令電圧

図 6 突発的な外乱を印加した時の制御効果

取っているためであり、その結果、低周波数領域では大きなストロークを発生させることが必要となるが、装置上限界があるため実際には制御できなくなるためである。以上より本実験系に関する限り、制振効果は共振点を含むある周波数範囲に限定される。したがって、実際にはこのようなシステムにおいてはある周波数領域内の振動に限定して制御アルゴリズムを駆動させる等の工夫が必要となるものと思われる。

(b) 不規則な外乱波形を与えた時の結果の一例を図5に示す。この波形は正弦波外乱の振幅および角速度を1周期ごとにガウス分布に従って不規則に変化させることにより発生させた。振幅については絶対値の平均を5.0 mm、標準偏差1.1とし、角速度については平均7.0 rad/s、標準偏差を1.0と設定した。制御を行っていない時の主振動系質量変位の挙動はかなり乱れたものとなっている。この場合も制御開始後直ちに原点へ収束し微小振動を持続しており良好な制振効果が得られている。また、従来の適応制御手法を適用した場合⁽⁹⁾にみられた制御開始直後の大きな振幅変化はない。

(c) 振幅9.3 mm、角速度6.91 rad/sの正弦波外乱を加えて制御中に2回にわたり突発的な変化を主振動系質量に与えた場合の結果を図6に示す。突発的な外乱を与えるとその力により主振動系質量振幅は変動するがその変動は直ちに減少している。

上述の実験結果から次のことが結論できる。すなわち外から加えられる各種の外乱に対し、SACを用いた場合には、これまでの適応制御則に基づいた振動抑制法⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾に比べ制振性能は大幅に改善される。その理由としては、まず、前述したように同定すべきパラメータ個数が基本的には1個であるため1サンプリング当たりの適応制御アルゴリズムの計算量が少なく、計算精度向上とサンプリング時間の短縮な同時に図られたことが考えられる。次に、理論的には適応ハイゲイン出力フィードバック構造となるため⁽¹²⁾、有界な未知摩擦項を含む外乱の影響全体が出力のハイゲイン係数によって結果的には大きく抑制され、ロバスト化が達成されたものと考えられる。

5. 結 言

本研究では能動制振系として動吸振器形能動制振系にSACを適用することを検討しその有用性を実験により検証した。まず、従来のSACは規範モデルを含むトラッキング制御問題として定式化されているが、制振問題に必要なレギュレータ問題に帰着させるために規範モデルを削除することを検討し、アルゴリズムを

簡略化した。次に、実験系を構成し摩擦等の非線形性が存在し、かつ、各種の外乱が印加した場合でも高性能な制振効果が得られることを検証し、提案する制御則が制振系構成に関しロバストであり、実在系の制振問題への適用に際して非常に有効な制御則となり得る可能性を示した。

最後に実験に協力された熊本大学学生 蒲原清隆氏に対し感謝の意を表する。

付録. 制御系内の全信号の有界性の証明

式(1・a)のプラントに理想的なフィードバックゲイン k^* を導入し式(1・b)と制御入力式(4)を用いると次のように変形できる。

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + b\{k(t) - k^*\}y(t) + dw(t) \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここで、右辺第2項を

$$\zeta(t) = \zeta_i(t) + \zeta_p(t) = k(t) - k^* \quad \dots\dots\dots (18)$$

と定義すると、プラントは次式で表される。

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + b\zeta(t)y(t) + dw(t) \quad \dots\dots (19\cdot a)$$

$$y(t) = c^T x(t) \quad \dots\dots\dots (19\cdot b)$$

まず、 $x(t)$ 、 $\zeta_i(t)$ の一樣終局有界性を示す。

式(18)および式(5)より次式を得る。

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_i(t) &= \dot{k}_i(t) \\ &= -\gamma_i y(t)^2 - \sigma(t)\zeta_i(t) - \sigma(t)k^* \quad \dots\dots (20\cdot a) \end{aligned}$$

$$\dot{\zeta}_p(t) = k_p(t) = -\gamma_p y(t)^2 \quad \dots\dots\dots (20\cdot b)$$

いま、正定対称行列 P を考え、次の正定スカラ関数を導入する。

$$V(t) = x(t)^T P x(t) + \gamma_i^{-1} \zeta_i(t)^2 \quad \dots\dots\dots (21)$$

プラント式(19)がASPR条件を満たしているため、Kalman-Yakubovichの補題から次の関係式が成り立つ。

$$A_c^T P + P A_c = -Q, \quad b^T P = c^T \quad \dots\dots\dots (22)$$

ここに Q は正定行列である。ここで、 $V(t)$ の時間微分を取り、式(19・a)～(22)を用いると次式を得る。

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= -x(t)^T Q x(t) - 2\gamma_p y(t)^4 + 2w(t)d^T P x(t) \\ &\quad - 2\sigma(t)\gamma_i^{-1} \zeta_i(t)^2 - 2\sigma(t)k^* \gamma_i^{-1} \zeta_i(t) \\ &\leq -x(t)^T Q x(t) + 2w(t)d^T P x(t) \\ &\quad - 2\sigma(t)\gamma_i^{-1} \zeta_i(t)^2 - 2\sigma(t)k^* \gamma_i^{-1} \zeta_i(t) \quad \dots\dots (23) \end{aligned}$$

行列 $*$ の固有値の最大値(最小値)を $\lambda_{\max}[*]$ ($\lambda_{\min}[*]$)と表すと上式は次式で評価される。

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -\lambda_{\min}[Q]\|x(t)\|^2 + 2\rho^* \lambda_{\max}[P]\|d\| \\ &\quad \|x(t)\| - 2\inf\{\sigma(t)\}\gamma_i^{-1}|\zeta_i(t)|^2 \\ &\quad + 2\sup\{\sigma(t)\}|k^*|\gamma_i^{-1}|\zeta_i(t)| \quad \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

さらに、

$$\eta(t) = [\|x(t)\|, |\zeta_i(t)|]^T \quad \dots\dots\dots (25\cdot a)$$

$$S_1 = \min[\lambda_{\min}[Q], 2\inf_t\{\sigma(t)\}\gamma_i^{-1}] \dots\dots\dots (25\cdot b)$$

$$S_2 = \max[2\rho^*\lambda_{\max}[P]\|d\|, 2\sup_t\{\sigma(t)\}|k^*|\gamma_i^{-1}] \dots\dots\dots (25\cdot c)$$

とおくと式(24)は次式で表される。

$$\dot{V}(t) \leq -S_1\|\eta(t)\|^2 + S_2\|\eta(t)\| \dots\dots\dots (26)$$

ここで、 S_1 は正の値を持つことから Corless-Leitmann の定理⁽¹³⁾が適用でき、 $\eta(t)$ の一樣終局有界性がいえ、したがって $x(t)$, $\zeta_i(t)$ の一樣終局有界性がいえる。

次に、 $y(t)$ と $k(t)$ の一樣終局有界性の証明を行う。式(19・b)より、

$$|y(t)| \leq \|c\|\|x(t)\| \dots\dots\dots (27)$$

と評価されるので $y(t)$ も一樣終局有界である。また、制御則の可変出力フィードバックゲインについても式(5・a), (18), (20・b)より

$$|k(t)| \leq |k_i(t)| + |k_p(t)|$$

$$\leq |k^*| + |\zeta_i(t)| + \gamma_p|y(t)|^2 \dots\dots\dots (28)$$

と評価できるので $k(t)$ も一樣終局有界である。以上で制御系内の全信号の有界性が証明された。

文 献

- (1) 背戸・ほか2名, 機論, 57-534, C(1991), 478.
- (2) 吉田・ほか5名, 文献(1)の472ページ.
- (3) 谷田・ほか3名, 文献(1)の482ページ.
- (4) 水野・荒木, 計自論, 26-6(1990), 692.
- (5) 西村・ほか2名, 機論, 55-517, C(1989), 2321.
- (6) 岩井・ほか4名, 機論, 54-505, C(1988), 2107.
- (7) 日野・岩井, 計自論, 25-7, (1989), 821.
- (8) 日野・ほか2名, 機論, 57-533, C(1991), 94.
- (9) 日野・ほか2名, 機論, 57-537, C(1991), 102.
- (10) Sobel, K., Kaufman, H. and Mabius, L., *IEEE Trans. Aeros. Electron. Syst.*, AES-18-5, (1982), 576.
- (11) Bar-kana, I., *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*, 1, (1987), 95.
- (12) 岩井, ほか2名, 計自論, 27-3(1991), 306.
- (13) Corless, M. and Leitmann, G., *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-26, (1981), 1139.