

ISSN 0389-4010
UDC 629.7.062
681.527.34
681.587.347

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1336

多重油圧操縦系統の積分補償型モデル追従制御

小川敏雄

1997年10月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

概 要	1
1. まえがき	1
2. 記号	2
3. 多重油圧操縦系統の構成と数式モデル	2
3.1 多重油圧操縦系統の構成	2
3.2 多重油圧操縦系統の数式モデルの導入	2
3.3 多重油圧操縦系統の状態方程式	4
4. モデル追従制御方式	5
4.1 モデル追従制御の構成	5
4.2 多重油圧操縦系統への適用	7
5. 多重油圧操縦系統の作動実験	8
5.1 3重系油圧操縦系統の基本特性	8
5.2 モデル追従制御系の過渡特性	15
6. 結 論	16
7. 引用文献	16

多重油圧操縦系統の積分補償型モデル追従制御*

小川 敏雄*¹

Model Following Control Scheme Incorporating Integral Compensator for Multiple Hydraulic Flight Control Systems*

Toshio OGAWA *¹

ABSTRACT

Mechanical summing of the output of redundant flight control systems into a single axis shows that the output forces do not always act synchronously, because there are the differences of output in respective systems caused by system parameter variations and disturbances. As a result, operation of the systems is never smooth and the servomechanism is subjected to excessive loads. To prevent these problems, we apply a model following control incorporating an integral compensator to the redundant systems. In this control system, steady state errors do not arise if the system parameters vary from their nominal values and constant disturbances. Experimental results were demonstrated by operating three-channel electrohydraulic servosystems.

Keywords: multiple hydraulic control system, model following control, optimal servosystem

概 要

航空機の操縦系統において、信頼性を向上させるために、多重油圧操縦システムを構成する場合、各系統の出力を同期させることが、円滑な作動のために必要である。しかし、各系統はそれぞれのシステムパラメータの変動や外乱などにより、出力が変動するので、各系統間に出力差が生じやすい。これに対して、積分補償を加えたサーボモデルの動きに、各系統が追従するモデル追従制御を構成すれば、各系統の出力は一つのサーボモデルに近付くことになり、結局その出力差は微小になり、良好な出力特性が得られることが期待される。この報告では、多重油圧操縦システムにおいて、積分補償型モデル追従制御を構成し、これらの出力特性を3重系油圧操縦装置の作動により検証する。

1. まえがき

航空機の操縦系統は、通常、電気油圧サーボ機構が用いられるが、その信頼性を向上させるためには、系統を多重化することが必要である。その多重化には種々の方式が考えられるが、要するにパイロットあるいはオートパイロットの操舵信号を、並列に舵面まで伝え、舵面

を駆動することである。その舵面駆動のさいに、舵面を動かすサーボアクチュエータが多系統で並列駆動する方式と、舵面より前の部分で1系統に統合して、舵面ではその1系統で駆動する方式とがある。本報告では後者の方式を取り扱う。この方式では、全系統は常時負荷作動していて、その出力は加算出力されて1系統になり、舵面を駆動することになる。このように作動することにより、1系統故障時に生じ易い無用な舵角発生を抑えること

* 平成9年3月4日受付 (received 4 March 1997)

*¹ 新型航空機研究グループ(Advanced Aircraft Research Group)

ができる¹⁾。

このような作動方式では、各系統の出力が、すべて一致することが望ましいが、各系統それぞれのシステムパラメータの変動や外乱などにより、出力差を生じ易い。そのため各系統の出力の同期が取れず、舵面出力特性を低下させたり、システムに過大な負荷状態をもたらすことになる。これに対して、特定のサーボモデルを定め、これに全系統の出力が一致するように動作するモデル追従制御を構成すれば、各系統の出力は一つのサーボモデルに一致するように動作するので、結局、各系統の出力差は微小になることが期待され、全体的に円滑に作動し、性能保持が可能になると考えられる。

本報告では、多重油圧操縦系統に積分補償型サーボモデルを設けて、モデル追従制御系を構成する。これを3重系油圧操縦装置の作動に適用して、その効果を検証する。

操縦系統の多重化は通常2～4重で構成されており、本報告では最も標準的な3重系を取り扱うが、モデル追従制御の各系統制御部は同等な系で構成される。したがって、いったん制御系が構成されると、そのシステムの系統の数にあわせて制御部を増やせば、その多重化が達成される。また、各系統出力を統合する場合は、機械的に加算出力するものとする。

2. 記号

Q_V	: サーボ弁およびシリンダ部での流量	l/min
I_V	: サーボ弁の入力電流	mA
K_V	: サーボ弁の流量ゲイン	$l/(mA \cdot \min \cdot \sqrt{MPa})$
P_S	: 供給油圧	MPa
P_R	: 戻り油圧	MPa
L_V	: スプール漏れ係数	$(l/min)/MPa$
P_L	: ピストン差圧	MPa
V	: シリンダ容量	l
B	: 油の体積弾性係数	MPa
X_p	: ピストンロッド部変位	mm
X_c	: シリンダマウント変位	mm
L_a	: オリフィス漏れ係数	$(l/min)/MPa$
A	: ピストン実効面積	mm^2
K_p	: ピストンロッド・ベルクランク部ばね定数	N/mm
R	: ベルクランクおよび出力リンクのアームの長さ	mm
ϕ	: 出力角	rad
K_s	: シリンダマウントばね定数	N/mm
K_a	: サーボ増幅器ゲイン	mA/V
E_e	: サーボ弁への制御信号	V

E_r	: サーボ増幅器への入力信号	V
E_{fb}	: フィードバックの出力信号	V
K_{fb}	: フィードバックセンサのゲイン	V/mm
X	: アクチュエータ出力	mm
M	: 直線運動する質量	kg
I	: 慣性モーメント	$kg \cdot m^2$
I_M	: 等価慣性モーメント	$kg \cdot m^2, I_M = MR^2 + I$
K	: 軸の捩りばね定数	$MN \cdot m/rad$
F	: 外力	N
S	: ラプラス変換のパラメータ	
添字	: 数字は系統を表す	

3. 多重油圧操縦系統の構成と数式モデル

3.1 多重油圧操縦系統の構成

操縦系統は図1に示すように、3重のパイロットあるいはオートパイロットのコマンドが、それぞれの油圧アクチュエータに入り、加算出力されて1系統になり、信号アクチュエータとして機能し、パワーアクチュエータを駆動して、舵面を作動させる構成になっている。このうちパワーアクチュエータは、出力パワーを増強することがその役割であって、信号アクチュエータの舵面負荷特性が満足できるものであれば、その作動はこのサーボ系がもたらす機能に直接影響を与えるものではない。したがって、パワーアクチュエータは操縦系統の基本的な作動特性に影響が小さいとして省略できる。このような場合、多重操縦系統の数式モデルは、主としてパワーアクチュエータを除いた油圧アクチュエータと加算出力機構の作動特性に基づくものとなる。この操縦系統を模擬する3重系油圧操縦系統の諸元を表1に示す。通常、この油圧アクチュエータと加算機構とは一体に製作され、冗長出力型アクチュエータという。

3.2 多重油圧操縦系統の数式モデルの導入

油圧サーボ機構と加算出力機構を図2のように合せて示す。各系統はそれぞれのサーボ弁からの油圧によるシリンダで駆動され、ピストンロッドからベルクランクを通して、共通の出力軸に機械的に固定されている。出力系統は、同じように固定した出力リンクを通して出力ロッドに伝えられ、舵面を駆動することになる。以下3重系であることを考慮して数式化する^{2)~4)}。

サーボ弁流量 Q_V は、サーボ弁流量ゲイン K_V 、サーボ弁の入力電流 I_V 、供給油圧 P_S 、戻り油圧 P_R 、スプール漏れ係数 L_V 、ピストン差圧 P_L として、次のように表せる。

$$Q_{V1} = I_{V1} K_{V1} \sqrt{P_S - P_R} - L_{V1} P_{L1} \quad (1.1)$$

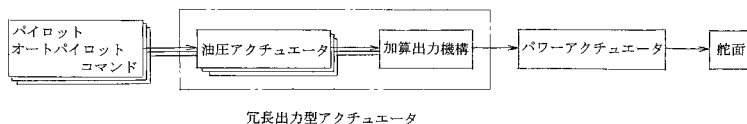


図1 3重系油圧操縦系統の構成

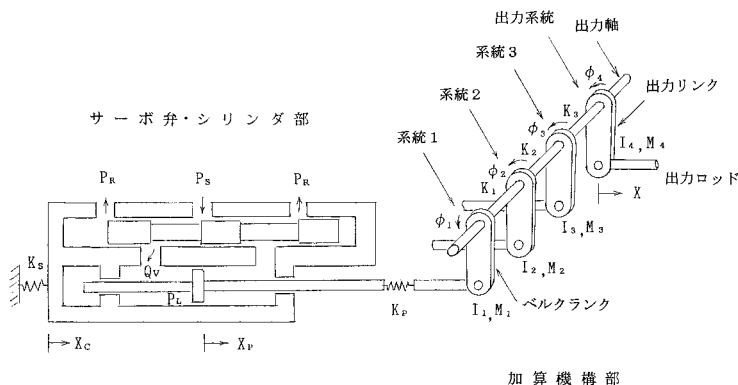


図2 冗長出力型アクチュエータの構造

表1 3重系油圧操縦系統の諸元

K_V	0.0643	$l / (mA \cdot \min \cdot \sqrt{MPa})$
P_S	21	MPa
P_R	0.35	MPa
L_V	1.44	$(l/min) / MPa$
V	0.0124	l
B	1350	MPa
A	248	mm^2
L_a	0.96	$(l/min) / MPa$
K_p	25.8	kN/mm
K_s	98.0	kN/mm
K_{fb}	0.2	V/mm
K_a	21	mA/V
R	100	mm
M_1	0.193	kg
M_2	0.193	kg
M_3	0.193	kg
M_4	3.57	kg
I_1	0.0012	$kg \cdot m^2$
I_2	0.0014	$kg \cdot m^2$
I_3	0.0012	$kg \cdot m^2$
I_4	0.0031	$kg \cdot m^2$
K_1	0.431	$MN \cdot m/rad$
K_2	0.431	$MN \cdot m/rad$
K_3	0.489	$MN \cdot m/rad$
F		N

$$Q_{V2} = I_{V2} K_{V2} \sqrt{P_S - P_R} - L_{V2} P_{L2} \tag{1.2}$$

$$Q_{V3} = I_{V3} K_{V3} \sqrt{P_S - P_R} - L_{V3} P_{L3} \tag{1.3}$$

この流量がシリンダ流量に等しいとすると、シリンダ容積 V 、油の体積弾性係数 B 、ピストン実効面積 A 、ピストンロッド部変位 X_P 、シリンダマウント部変位 X_C 、オリフイス漏れ係数 L_a として次式で表せる。

$$Q_{V1} = (V/4B) \dot{P}_{L1} + A(\dot{X}_{P1} - \dot{X}_{C1}) + L_{a1} P_{L1} \tag{2.1}$$

$$Q_{V2} = (V/4B) \dot{P}_{L2} + A(\dot{X}_{P2} - \dot{X}_{C2}) + L_{a2} P_{L2} \tag{2.2}$$

$$Q_{V3} = (V/4B) \dot{P}_{L3} + A(\dot{X}_{P3} - \dot{X}_{C3}) + L_{a3} P_{L3} \tag{2.3}$$

シリンダ作動によりピストンロッドと出力軸が変位するから、ピストンロッド・ベルクランク部ばね定数 K_P 、ベルクランクのアームの長さ R 、出力角 ϕ として、次のように表せる。

$$A P_{L1} = K_{P1} (X_{P1} - R \phi_1) \tag{3.1}$$

$$A P_{L2} = K_{P2} (X_{P2} - R \phi_2) \tag{3.2}$$

$$A P_{L3} = K_{P3} (X_{P3} - R \phi_3) \tag{3.3}$$

シリンダ作動力によるシリンダマウントの変位 X_C は、シリンダマウントばね定数 K_S として、次式で与えられる。

$$A(P_{L1} + P_{L2} + P_{L3}) = -K_S X_C \tag{4}$$

サーボ増幅器を取込み図3のように制御系を形成するものとして、次式で表す。

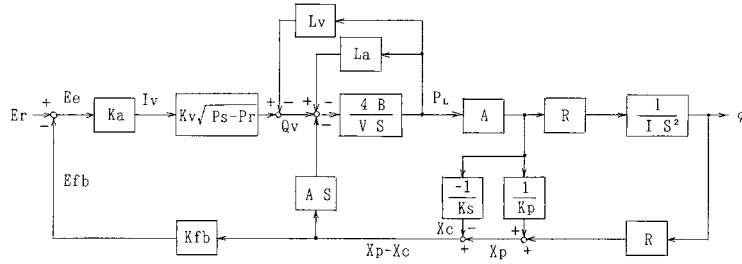


図3 冗長出力型アクチュエータ系統図

$$I_{V1} = K_{a1} E_{e1} \quad (5.1)$$

$$I_{V2} = K_{a2} E_{e2} \quad (5.2)$$

$$I_{V3} = K_{a3} E_{e3} \quad (5.3)$$

$$E_{e1} = E_{r1} - E_{fb1} \quad (6.1)$$

$$E_{e2} = E_{r2} - E_{fb2} \quad (6.2)$$

$$E_{e3} = E_{r3} - E_{fb3} \quad (6.3)$$

$$E_{fb1} = K_{fb1}(X_{p1} - X_c) \quad (7.1)$$

$$E_{fb2} = K_{fb2}(X_{p2} - X_c) \quad (7.2)$$

$$E_{fb3} = K_{fb3}(X_{p3} - X_c) \quad (7.3)$$

出力角の位置変位への変換は、次のように表せる。

$$X_1 = R \phi_1 \quad (8.1)$$

$$X_2 = R \phi_2 \quad (8.2)$$

$$X_3 = R \phi_3 \quad (8.3)$$

$$X_4 = R \phi_4 \quad (8.4)$$

加算機構部は、4 慣性系を連結した軸の強制捩り振動の問題として定式化する^{5), 6)}。図2に示すように、回転する質量の出力軸回りの慣性モーメントI, 直線運動部の質量M, 回転角を ϕ , 各系統間の捩りばね定数をKとして、次のように与えられる。

$$(M_1 R^2 + I_1) \ddot{\phi}_1 + K_1(\phi_1 - \phi_2) = A R P_{L1} \quad (9.1)$$

$$(M_2 R^2 + I_2) \ddot{\phi}_2 - K_1(\phi_1 - \phi_2) + K_2(\phi_2 - \phi_3) = A R P_{L2} \quad (9.2)$$

$$(M_3 R^2 + I_3) \ddot{\phi}_3 - K_2(\phi_2 - \phi_3) + K_3(\phi_3 - \phi_4) = A R P_{L3} \quad (9.3)$$

$$(M_4 R^2 + I_4) \ddot{\phi}_4 - K_3(\phi_3 - \phi_4) = -R F \quad (9.4)$$

これで操縦系統の定式化が達成された。

3.3 多重油圧操縦系統の状態方程式

前項(1.1)～(9.4)式により油圧操縦系統の動的な挙動は記述されているが、中間変数を表に出し、制御系構成の演算に便利な状態方程式に書き換える。

$$\begin{aligned} \dot{P}_{L1} = & 1/Q_1 \{ KP_{23} QK_1 E_{r1} - KSP_2 QK_2 E_{r2} - KSP_3 QK_3 E_{r3} \\ & - P_{L1} (KP_{23} QK_{1K} - KSP_2 QK_{2S} - KSP_3 QK_{3S}) \\ & - P_{L2} (KP_{23} QK_{1S} - KSP_2 QK_{2K} - KSP_3 QK_{3S}) \\ & - P_{L3} (KP_{23} QK_{1S} - KSP_2 QK_{2S} - KSP_3 QK_{3K}) \\ & - \phi_1 KP_{23} QK_{1R} - \phi_5 KP_{23} A R \\ & - \phi_2 KSP_2 QK_{2R} + \phi_6 KSP_2 A R \\ & + \phi_3 KSP_3 QK_{3R} + \phi_7 KSP_3 A R \} \quad (10.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_{L2} = & 1/Q_2 \{ KP_{13} QK_2 E_{r2} - KSP_1 QK_1 E_{r1} - KSP_3 QK_3 E_{r3} \\ & - P_{L1} (KP_{13} QK_{2S} - KSP_1 QK_{1K} - KSP_3 QK_{3S}) \\ & - P_{L2} (KP_{13} QK_{2K} - KSP_1 QK_{1S} - KSP_3 QK_{3S}) \\ & - P_{L3} (KP_{13} QK_{2S} - KSP_1 QK_{1S} - KSP_3 QK_{3K}) \\ & - \phi_2 KP_{13} QK_{2R} - \phi_6 KP_{13} A R \\ & - \phi_1 KSP_1 QK_{1R} + \phi_5 KSP_1 A R \\ & + \phi_3 KSP_3 QK_{3R} + \phi_7 KSP_3 A R \} \quad (10.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_{L3} = & 1/Q_3 \{ KP_{12} QK_3 E_{r3} - KSP_1 QK_1 E_{r1} - KSP_2 QK_2 E_{r2} \\ & - P_{L1} (KP_{12} QK_{3S} - KSP_1 QK_{1K} - KSP_2 QK_{2S}) \\ & - P_{L2} (KP_{12} QK_{3S} - KSP_1 QK_{1S} - KSP_2 QK_{2K}) \\ & - P_{L3} (KP_{12} QK_{3K} - KSP_1 QK_{1S} - KSP_2 QK_{2S}) \\ & - \phi_3 KP_{12} QK_{3R} - \phi_7 KP_{12} A R \\ & - \phi_1 KSP_1 QK_{1R} + \phi_5 KSP_1 A R \\ & + \phi_2 KSP_2 QK_{2R} + \phi_6 KSP_2 A R \} \quad (10.3) \end{aligned}$$

$$\dot{\phi}_1 = \phi_5 \quad (10.4)$$

$$\dot{\phi}_2 = \phi_6 \quad (10.5)$$

$$\dot{\phi}_3 = \phi_7 \quad (10.6)$$

$$\dot{\phi}_4 = \phi_8 \quad (10.7)$$

$$\dot{\phi}_5 = \frac{1}{I_{M1}} \{ A R P_{L1} - K_1(\phi_1 - \phi_2) \} \quad (10.8)$$

$$\dot{\phi}_6 = \frac{1}{I_{M2}} \{ A R P_{L2} + K_1(\phi_1 - \phi_2) - K_2(\phi_2 - \phi_3) \} \quad (10.9)$$

$$\dot{\phi}_7 = \frac{1}{I_{M3}} \{ A R P_{L3} + K_2(\phi_2 - \phi_3) - K_3(\phi_3 - \phi_4) \} \quad (10.10)$$

$$\dot{\phi}_8 = \frac{1}{I_{M4}} \{ -R F + K_3(\phi_3 - \phi_4) \} \quad (10.11)$$

$$X_1 = R \phi_1 \quad (11.1)$$

$$X_2 = R \phi_2 \quad (11.2)$$

$$X_3 = R \phi_3 \quad (11.3)$$

$$X_4 = R \phi_4 \quad (11.4)$$

ここに,

$$Q_1 = A^2 K P_{23} / K P_1 + A^2 / K_S + V K P_{23} / (4 B)$$

$$Q_2 = A^2 K P_{13} / K P_2 + A^2 / K_S + V K P_{13} / (4 B)$$

$$Q_3 = A^2 K P_{12} / K P_3 + A^2 / K_S + V K P_{12} / (4 B)$$

$$K P_{12} = 1 + K S P_1 + K S P_2$$

$$K P_{13} = 1 + K S P_1 + K S P_3$$

$$K P_{23} = 1 + K S P_2 + K S P_3$$

$$K P_1 = A P_{L1} / (X_{P1} - R \phi_1)$$

$$K P_2 = A P_{L2} / (X_{P2} - R \phi_2)$$

$$K P_3 = A P_{L3} / (X_{P3} - R \phi_3)$$

$$K S P_1 = A^2 / \{ K_S A^2 / K_{P1} + K_S V / (4 B) \}$$

$$K S P_2 = A^2 / \{ K_S A^2 / K_{P2} + K_S V / (4 B) \}$$

$$K S P_3 = A^2 / \{ K_S A^2 / K_{P3} + K_S V / (4 B) \}$$

$$Q K_1 = K a_1 K_{V1} \sqrt{P_S - P_R}$$

$$Q K_2 = K a_2 K_{V2} \sqrt{P_S - P_R}$$

$$Q K_3 = K a_3 K_{V3} \sqrt{P_S - P_R}$$

$$Q K_{1S} = Q K_1 K f b_1 A / K_S$$

$$Q K_{2S} = Q K_2 K f b_2 A / K_S$$

$$Q K_{3S} = Q K_3 K f b_3 A / K_S$$

$$Q K_{1K} = Q K_1 K f b_1 A / K_{P1} + Q K_{1S} L_{V1} + L a_1$$

$$Q K_{2K} = Q K_2 K f b_2 A / K_{P2} + Q K_{2S} L_{V2} + L a_2$$

$$Q K_{3K} = Q K_3 K f b_3 A / K_{P3} + Q K_{3S} L_{V3} + L a_3$$

$$Q K_{1R} = Q K_1 K f b_1 R$$

$$Q K_{2R} = Q K_2 K f b_2 R$$

$$Q K_{3R} = Q K_3 K f b_3 R$$

$$I_{M1} = M_1 R^2 + I_1$$

$$I_{M2} = M_2 R^2 + I_2$$

$$I_{M3} = M_3 R^2 + I_3$$

$$I_{M4} = M_4 R^2 + I_4$$

4. モデル追従制御方式

4.1 モデル追従制御の構成

モデル追従制御を構成するために、まず、システムがパラメータ変動や定値外乱に対処できるようにするため、積分補償を加えたサーボモデルを求める^{7), 8)}。次に、そのサーボモデルに、各操縦系統が追従するように制御則を求め、モデル追従制御を構成する^{9) ~ 11)}。これらの問題を解くために最適レギュレータ理論¹²⁾を適用する。

対象とするモデルシステムの状態方程式は、次のように表されているとする。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A x + B u + E d \\ y &= C x \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、 x は n 次元状態、 u は m 次元操作入力、 d は任意の次元の定値外乱、 y は m 次元制御出力、 A, B, C, E は適当な大きさの定数行列である。また、 (A, B) は安定化可能、 (C, A) は検出可能であるとし、

$$\det \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \neq 0 \quad (13)$$

であるとする¹³⁾。

このシステムにおいて、定値の m 次元入力 r を考える。出力 y が定値 r になるような状態と入力の定常値 x_∞, u_∞ は一意に定まり、

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\infty \\ u_\infty \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r - \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} d \quad (14)$$

となる。これらの定常値からの状態と入力の偏差は、

$$\tilde{x} = x - x_\infty, \tilde{u} = u - u_\infty \quad (15)$$

と表すことができる。偏差出力は e は、

$$e = r - y \quad (16)$$

であり、 w は e の積分値として、

$$w = \int_{-\infty}^t e dt \quad (17)$$

で表す。 v は u の微分値で、次式で表す。

$$\dot{u} = v \quad (18)$$

(12) 式のシステムに積分補償を加えるため、その拡大系を次のように与える。

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\tilde{u}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{u} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} d$$

$$e = \begin{bmatrix} -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{u} \end{bmatrix} + r \tag{19}$$

この拡大系に対して、偏差系は(14)式を用いて、次のように表せる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\tilde{u}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{u} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} v$$

$$e = \begin{bmatrix} -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{u} \end{bmatrix} \tag{20}$$

この偏差系に対して、2次形式評価関数

$$J_1 = \int_0^{\infty} (\tilde{x}^T Q_1 \tilde{x} + \tilde{u}^T Q_2 \tilde{u} + v^T R v) dt \tag{21}$$

を考える。\$Q_1, Q_2\$ は半正定、\$R\$ は正定とする。

$$\left(\begin{bmatrix} Q_1^{1/2} & 0 \\ 0 & Q_2^{1/2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right)$$

は検出可能とする。

(20)式のシステムに対して、(21)式の評価関数を最小にする入力 \$v\$ は、

$$v = -R^{-1} \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{u} \end{bmatrix} \tag{22}$$

のフィードバック制御則で与えられる。ただし、

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix}$$

は次のリカッチの方程式

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A^T & 0 \\ B^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} R^{-1} \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix} = 0 \tag{23}$$

の半正定解である。

ここで、(18)、(20)式を用いて、(22)式を書き換えると、次式で表せる。

$$\dot{u} = K_{PD} \dot{\tilde{x}} + K_I e \tag{24}$$

ここに、\$K_{PD}, K_I\$ は、

$$\begin{bmatrix} K_{PD} & K_I \end{bmatrix} = -R^{-1} \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B^{-1} \\ -C & 0 \end{bmatrix} \tag{25}$$

である。これを積分し、(15)式の微分 \$\dot{\tilde{x}} = \dot{x}\$ を用いて、次のように与えられる。

$$u = K_{PD} x + K_I w \tag{26}$$

これでサーボモデルの制御則が求められた。このシステムは、積分補償が加わっており、そのブロック線図で図4のように表すことができる。

次にサーボモデルに追従する制御系を導く。サーボモデルの閉ループ系は、(12)、(16)式に(26)式を用いて、

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + B K_{PD})x + B K_I w \\ e &= -C x + r \end{aligned} \tag{27}$$

と表せる。ここで 定値外乱 \$d\$ の項は、サーボモデルを求めるさいに取り扱われているので除いている。

操縦系統の状態方程式は、

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= A_p x_p + B_p u_p \\ e_p &= -C_p x_p + r \end{aligned} \tag{28}$$

と表せるので、サーボモデルと操縦系統をまとめて次のように表す。

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{w} \\ \dot{x}_p \\ \dot{w}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B K_{PD} & B K_I & 0 & 0 \\ -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_p & 0 \\ 0 & 0 & -C_p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ w \\ x_p \\ w_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_p \\ 0 \end{bmatrix} u_p + \begin{bmatrix} 0 \\ I \\ 0 \\ I \end{bmatrix} r \tag{29}$$

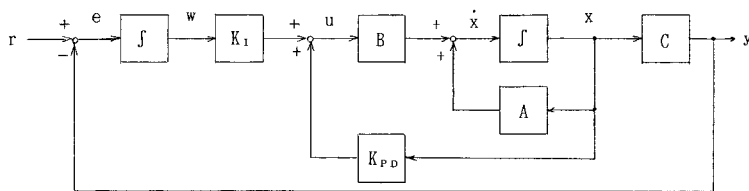


図4 積分補償を加えたサーボモデル

このシステムにおいて，前と同じように定値の m 次元入力 r を考える，出力 y が定値 r になるような状態と入力の値 x_∞, w_∞ は一意に定まり，

$$\begin{bmatrix} A + B K_{PD} & B K_I & 0 & 0 \\ -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_p & 0 \\ 0 & 0 & -C_p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\infty \\ w_\infty \\ x_{p\infty} \\ w_{p\infty} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_p \\ 0 \end{bmatrix} u_{p\infty} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I \end{bmatrix} r = 0 \quad (30)$$

これらの定常値からの状態と入力との偏差は $\tilde{x} = x - x_\infty$ ， $\tilde{w} = w - w_\infty$ ， $\tilde{x}_p = x_p - x_{p\infty}$ ， $\tilde{w}_p = w_p - w_{p\infty}$ ， $\tilde{u}_p = u_p - u_{p\infty}$ であり，偏差系は，次のように与えられる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\tilde{w}} \\ \dot{\tilde{x}}_p \\ \dot{\tilde{w}}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B K_{PD} & B K_I & 0 & 0 \\ -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_p & 0 \\ 0 & 0 & -C_p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{w} \\ \tilde{x}_p \\ \tilde{w}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_p \\ 0 \end{bmatrix} \tilde{u}_p \quad (31)$$

ここで，

$$\tilde{x} = [\tilde{x} \quad \tilde{w}]^T, \quad \tilde{x}^p = [\tilde{x}_p \quad \tilde{w}_p]^T \quad (32)$$

$$\tilde{x}_A = [x \quad w \quad x_p \quad w_p]^T \quad (33)$$

とおく。まず，

$$H = [I \quad -I] \quad (34)$$

$n \times 2n$ 次元行列を定義し，モデルと操縦系統の出力差を考える。

$$\hat{x} = [I \quad -I] \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{x}_p \end{bmatrix} = \tilde{x} - \tilde{x}_p \quad (35)$$

とにおいて，(31)式のシステムにおいて，モデル追従のための評価関数を次式で与える。

$$J_2 = \int_0^\infty (\hat{x}_A^T \bar{Q}_2 \hat{x}_A + \tilde{u}_p^T R \tilde{u}_p) dt \quad (36)$$

ここに， \bar{Q}_1 は半正定， R は正定行列である。

ここで，

$$\bar{Q}_2 = [I \quad -I]^T \bar{Q}_1 [I \quad -I] \quad (37)$$

とにおいて，(36)式を変形する。

$$J_2 = \int_0^\infty (\tilde{x}_A^T \bar{Q}_2 \tilde{x}_A + \tilde{u}_p^T R \tilde{u}_p) dt \quad (38)$$

この評価関数を最小にする制御則 u_p は，

$$\tilde{u}_p = -R^{-1} [0 \quad 0 \quad B_p^T \quad 0] \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{12}^T & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{13}^T & P_{23}^T & P_{33} & P_{34} \\ P_{14}^T & P_{24}^T & P_{34}^T & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{w} \\ \tilde{x}_p \\ \tilde{w}_p \end{bmatrix} \quad (39)$$

で与えられる。

ここで，

$$\begin{bmatrix} A + B K_{PD} & B K_I & 0 & 0 \\ -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_p & 0 \\ 0 & 0 & -C_p & 0 \end{bmatrix} = F, \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_p \\ 0 \end{bmatrix} = B,$$

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{12}^T & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{13}^T & P_{23}^T & P_{33} & P_{34} \\ P_{14}^T & P_{24}^T & P_{34}^T & P_{44} \end{bmatrix} = P \text{ と改めておけば，}$$

P は次のリカッチの方程式，

$$P F + F^T P - P B R^{-1} B^T P + \bar{Q}_2 = 0 \quad (40)$$

の半正定解である。ここで， w_∞ は任意に設定できるので，出力が定常値になったとき $w_\infty = 0$ とおけば，(30)式から $x_\infty = 0$ ， $x_{p\infty}$ は x_∞ に一致するように制御することから $x_{p\infty} = 0$ したがって $u_{p\infty} = 0$ ， $w_{p\infty}$ は w_∞ と同じようにおくことが出来るから $w_{p\infty} = 0$ である。結局，フィードバック制御則は次のように与えられる。

$$u_p = -R^{-1} [0 \quad 0 \quad B_p^T \quad 0] \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{12}^T & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{13}^T & P_{23}^T & P_{33} & P_{34} \\ P_{14}^T & P_{24}^T & P_{34}^T & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \\ x_p \\ w_p \end{bmatrix} \quad (41)$$

ここで，

$$[-K_1 \quad -K_2 \quad -K_{PPD} \quad -K_{PI}] = -R^{-1} [0 \quad 0 \quad B_p^T \quad 0] \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{12}^T & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{13}^T & P_{23}^T & P_{33} & P_{34} \\ P_{14}^T & P_{24}^T & P_{34}^T & P_{44} \end{bmatrix} \quad (42)$$

とおけば，制御則は

$$U_p = -K_1 x - K_2 w - K_{PPD} x_p - K_{PI} w_p \quad (43)$$

となる。これが，操縦系統に施すモデル追従制御のための制御則である。これをブロック線図で表すと図5のようになる（操縦系統は1系統のみを示す）。

4.2 多重油圧操縦系統への適用

多重油圧操縦系統の各系統出力はベルクランクを介して一軸に固定されているので，各系統間に出力差があれば，出力の同期が取れずに出力性能に悪い影響を与える。しかし，各系統は，それぞれの系のシステムパラメータの変動や外乱などにより，わずかながら出力差を生じ易い。これらの影響を抑え，多重系統の特質を保持すると

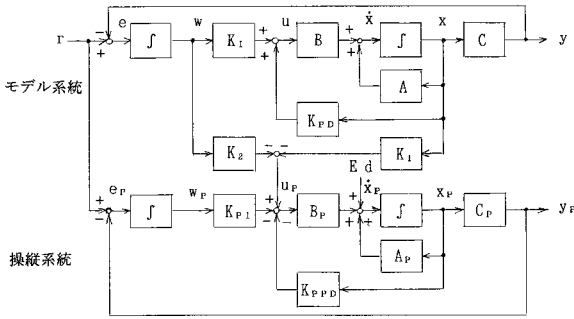


図5 モデル追従制御系

共に各系統それぞれの出力特性を改善するために、モデル追従制御方式を適用する一例を示す。

(10.1) ~ (10.11)式において、 $K_s = \infty$, $K_1 \sim K_3 = 0$ とおけば各系統は切り放されて、単独の系になる。系統1について示せば次のように与えられる。

$$\ddot{\phi}_1 = -\bar{K}_1 \ddot{\phi}_1 - \bar{K}_3 \bar{K}_5 \dot{\phi}_1 - \bar{K}_2 \bar{K}_5 \phi_1 + \bar{K}_4 \bar{K}_5 E r_1$$

ここに、

$$\begin{aligned} \bar{K}_1 &= QK_{1K}/Q_1, \bar{K}_2 = QK_{1R}/Q_1, \bar{K}_3 = AR/Q_1, \\ \bar{K}_4 &= QK_1/Q_1, \bar{K}_5 = AR/I_{M1} \end{aligned}$$

これは3次系である。操縦系統の各系は、もともと同一の構成要素によって組み立てられた系であり、本質的にその出力差は小さいと考えれば、各系統は切り放して考えてよい。これによりモデルの形として3次系を取ることにする。その応答特性は減衰係数 $\zeta = 0.5$, 固有周波数 $\omega_n = 30$ を取ることにし、伝達関数 $G(s)$ の形で次のように与える。

$$G(s) = 90,000 / \{ (s^2 + 30s + 900)(s + 100) \} \quad (44)$$

この $G(s)$ の系に積分補償を加えるため、評価関数として $Q_1 = 0.0001 I$, $Q_2 = 10^4 I$, $R = 1$ とすれば制御則 u は、

$$u = -4.34x - 0.145\dot{x} - 0.00111\ddot{x} + 100w \quad (45)$$

となり、したがってサーボモデルとしては次のように求められる。

$$\ddot{x} = -230.16\ddot{x} - 16,938\dot{x} - 480,720x + 9,000,000w \quad (46)$$

操縦系統は、表1の諸元を(10.1)~(11.4)式に代入したものを、3次系に当てはめて次のように求めた。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_p &= -8,770\ddot{x}_p - 236,000\dot{x}_p - 19,500,000x_p \\ &+ 973,000u_p \end{aligned} \quad (47)$$

モデル追従制御を求めるため、評価関数 $\bar{Q}_1 = 100 I$, $R = 1$ とすれば制御則 U_p は次のようになる。

$$\begin{aligned} U_p &= 31.9x + 27.3\dot{x} + 10\ddot{x} - 2.69w - 12.3x_p \\ &- 27.1\dot{x}_p - 9.99\ddot{x}_p + 9.99w_p \end{aligned} \quad (48)$$

モデル追従制御は、(46)式のサーボモデルを設けて、各操縦系統に(48)式の制御則を付加することにより構成される。

制御則(48)式では、状態量の4つの要素をフィードバックすることになるが、一般にそのうちの幾つかの要素は、他の要素と較べてその影響が無視できるほど小さい場合がある。それを制御則の構造的な基準で知ることができないので、実際の作動で判断する必要がある¹³⁾。これは制御系の単純化のうえで重要なことである。

5. 多重油圧操縦系統の作動実験

5.1 3重系油圧操縦系統の基本特性

3重系油圧操縦系統の作動実験は、表1の諸元を持つ3重系油圧操縦装置によって行った。3重系油圧操縦装置は図6.1, 6.2に示すように、実機用相当の冗長出力型アクチュエータと負荷装置、荷重計、位置変位計およびそれらを結びつけるリンク機構より構成されている。本装置の作動は、その主要要素である冗長出力型アクチュエータの作動特性に基づくことが大きい。冗長出力型アクチュエータの仕様を表2に示す。作動実験はまず何等の制御方式をも含まない本装置の原形について行った。

本装置の原形におけるステップ応答結果の例を示す。計測は各系統の位置変位をそれぞれのアクチュエータ出力センサで行い、系統1についてはその位置変位出力の不完全微分 $S/(1 + 0.02S)$ で位置変位速度を表す。ピストン差圧はアクチュエータシリンダに並行して設けられている小シリンダのロッド端のセンサで行うが、4N(差圧で0.18MPa相当)の予荷重(Preload)と、計測系にローパスフィルタ(DC ~ 10Hz)が掛けられているので本来の出力と多少異なることが考えられる(ただし、この出力は制御に用いていない)。また、出力系統の波形は示していないが、その上部の系統3の出力とほぼ同一と見てよい。しかし、各系統の出力を伝えるアクチュエータロッドとベルクランク部には弾性変形を起こす傾向があり、これががたのような効果を示すので、出力系統の出力はその分増減する可能性がある。

図7.1は原形で3系統の通常作動の例である。出力に対する負荷は、1kN程度では出力にほとんど影響がないので、与えていない。各系統のアクチュエータはその出力が一本の出力軸に固定されていて、出力軸の捩り変形は微小(最大トルクで0.0034rad程度)であるので、3系統ともほぼ同様に応答しているが、系統3の一部に過減衰の状態が認められる。この原因はピストン差圧にずれが生

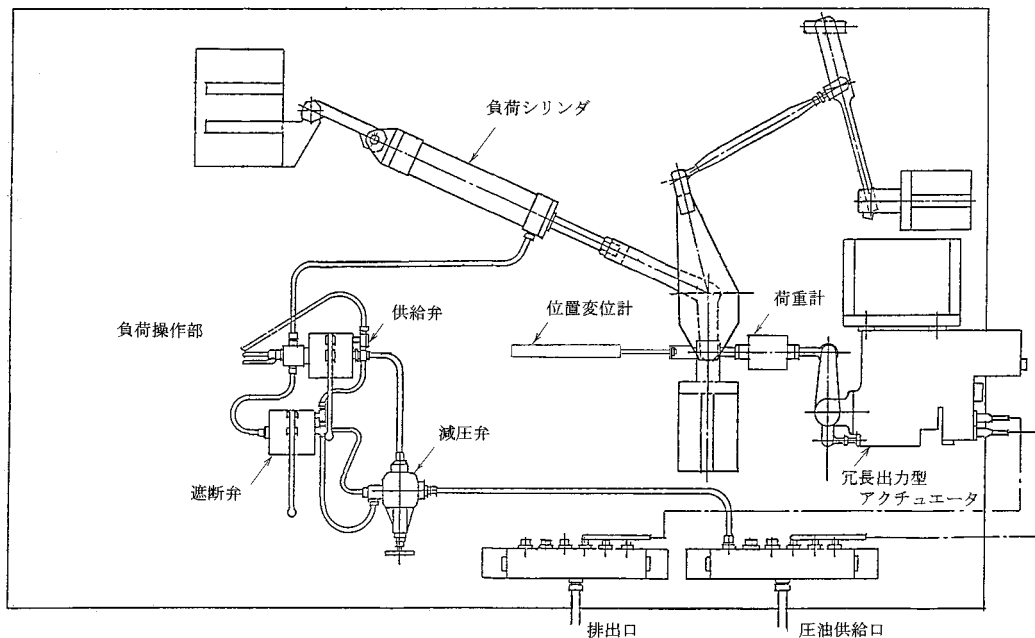


図 6.1 3重系油圧操縦装置

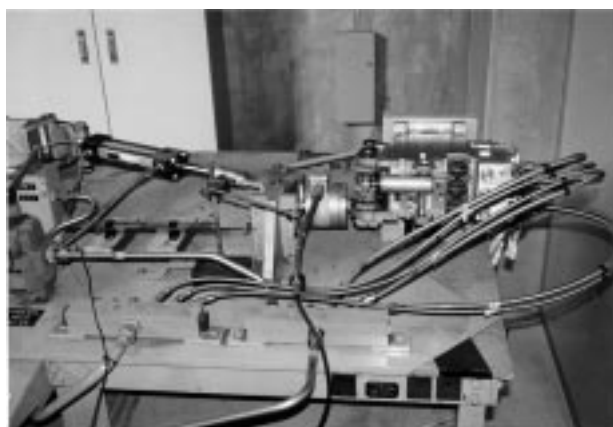


図 6.2 3重系油圧操縦装置の外観

表 2 冗長出力型アクチュエータの仕様

3系統並列作動	1系統に加算出力
1系統作動力	1.67 kN (出力制限, 通常使用)
	5.13 kN (出力制限なし)
ピストン・ストローク	± 25 mm

じていることにあると考えられるが、電氣的、機械的な微小な偏差に基づくことであり、取り除くことはかなり困難なことと考えられる。このように3系統の通常作動では一応各系統も同様に作動するが、多重系としては各系統の一部に入出力の欠落、システムパラメータの変動および外乱の発生などにどの様に応答するかが重要である。図 7.2 は3系統のうち系統3の油圧 OFF (油圧の供給停止) になった場合である。系統3の位置変位が減少し

ている

次はモデル追従制御の場合で、4.2項に示したケースについての実験例を示す。ここではサーボモデルをアナログ演算素子で構成している。定められた制御則のうち、位置変位の加速度項は系に及ぼす影響が小さいので無視し、 \dot{X}_p は X_p の不完全微分信号 $S/(1 + 0.02S)$ を用いた。この速度項はループゲインが高く、また位置変位項ゲインも高いので、サーボ弁部での発振状態が発生し易い状況にある。これを防ぐため、 \dot{X} では 57%、 \dot{X}_p では 24% 程度にゲインを下げている。

図 8.1 はモデル追従制御による3系統作動で、ステップおよびランダム入力に対して、モデル出力に各操縦系統出力がよく追従していることを示している。なお、出力系統には架台 (位置変位計を取り付けている) の振動と思われる振動がわずかに重畳している。図 8.2 には改めて3系統作動のステップ応答を示す。シリンダピストン差圧の動きは、モデル追従制御の付加によりトリムずれが目立つようになっている。図 8.3 は3系統作動で、系統3のフィードバック経路の出力ゲインが 10% 増加している場合の応答である。系統3の出力が減少しているのが分る。図 8.4 は系統2および系統1の入力が OFF になった場合を続けて示した。この場合は+-のステップ入力を与えているが、その系統に入力がないため、積分補償型制御で特有な積分器のワインドアップ (Windup)¹⁴⁾ 現象が生じる。つまり、始めの入力の次の逆方向入力時にオフセットや出力ゲインの減少など不都合な結果が起きている。このような故障には、故障系統の切り放しなどの処置が必要であろう。

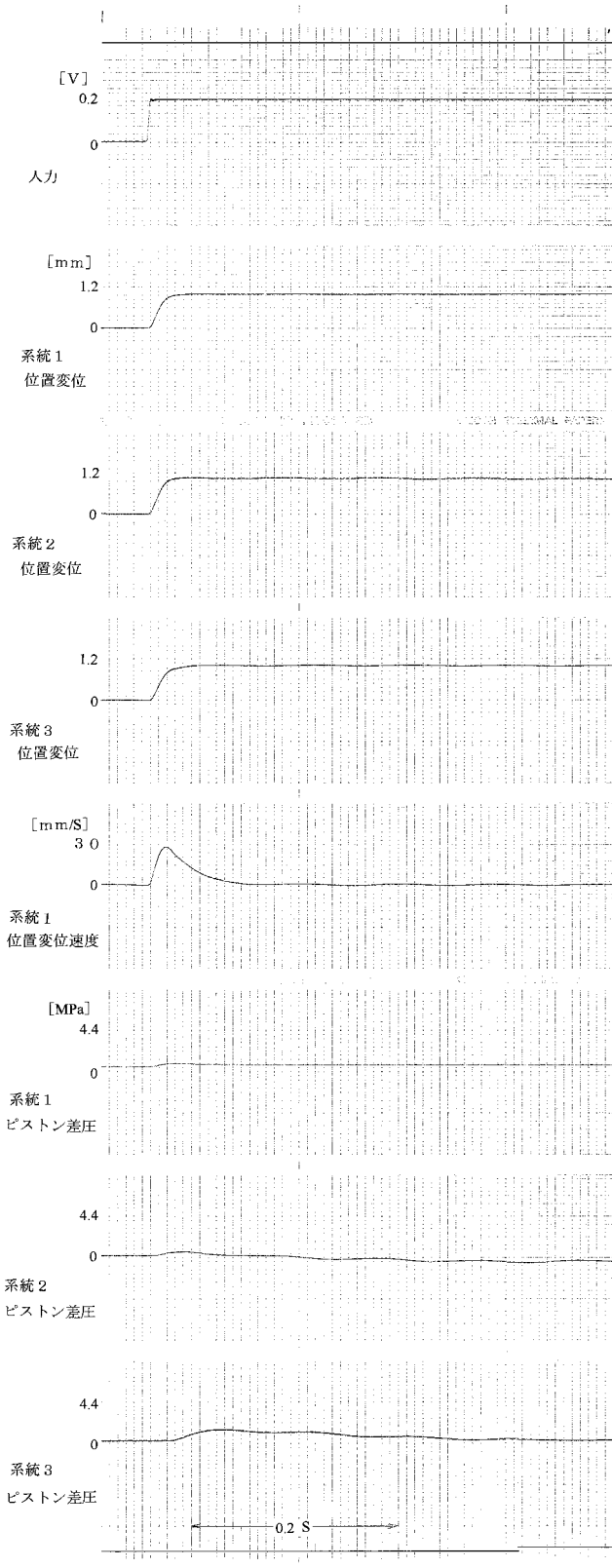


図 7.1 3系統作動 (原形)

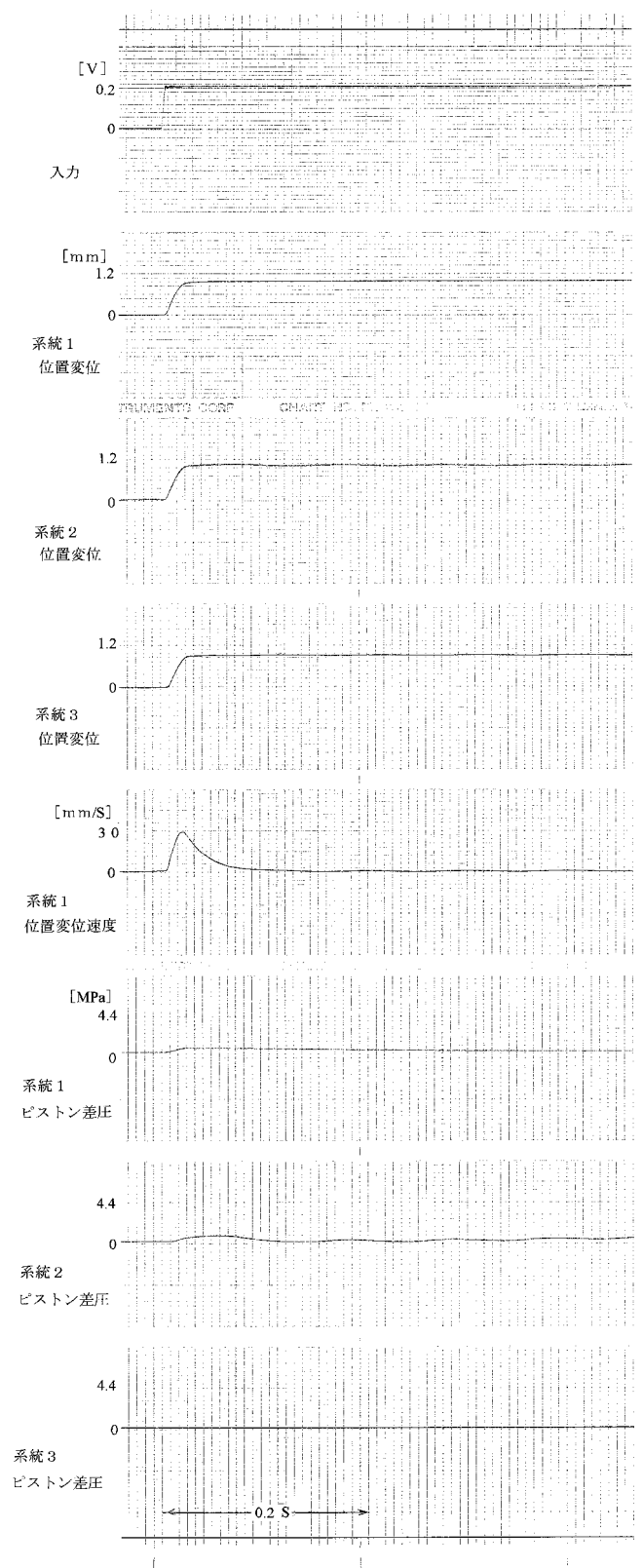


図 7.2 系統 3 油圧 OFF (2 系統作動)

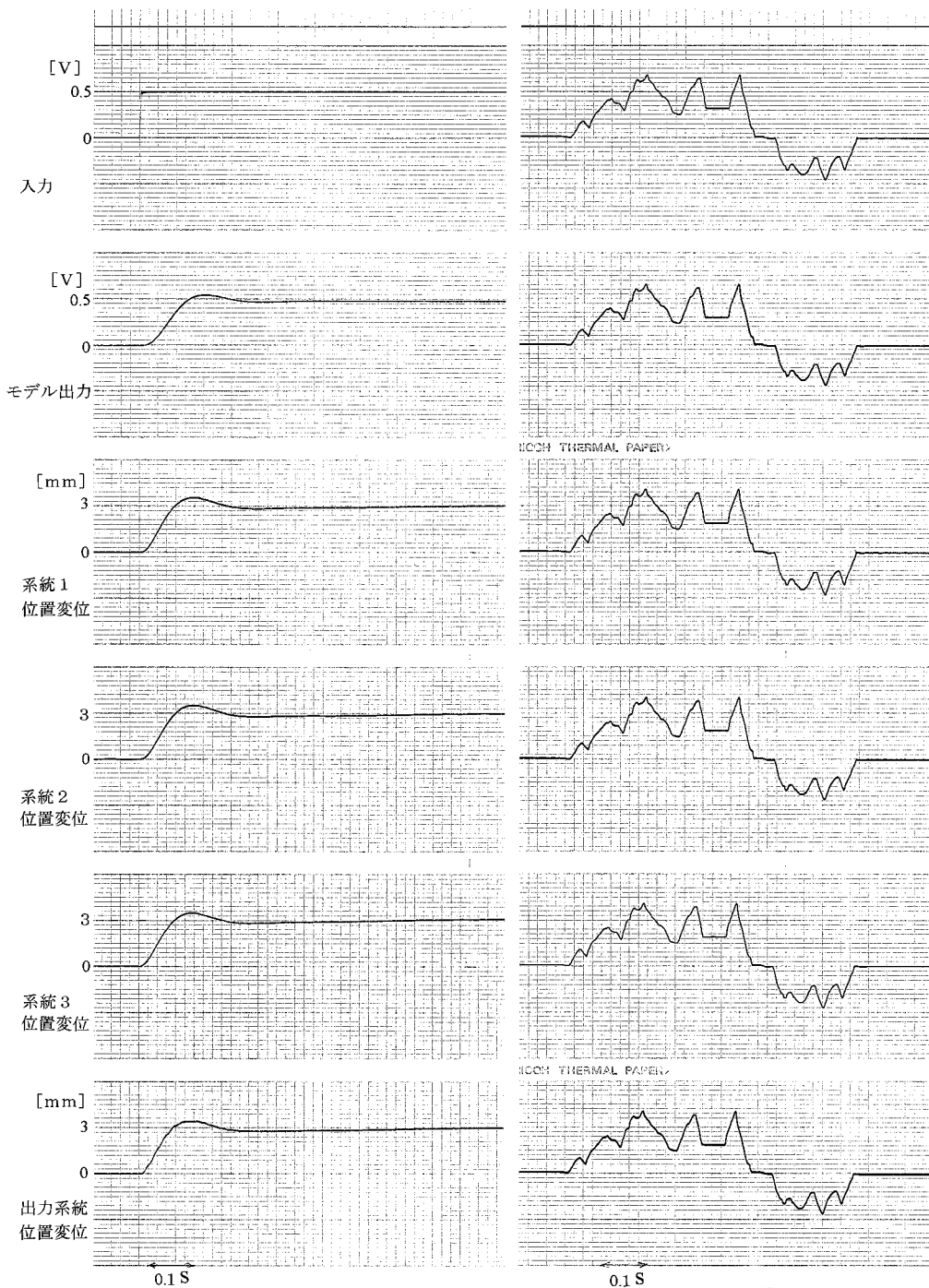


図 8.1 3 系統作動 (モデル追従制御) ステップ, ランダム入力応答

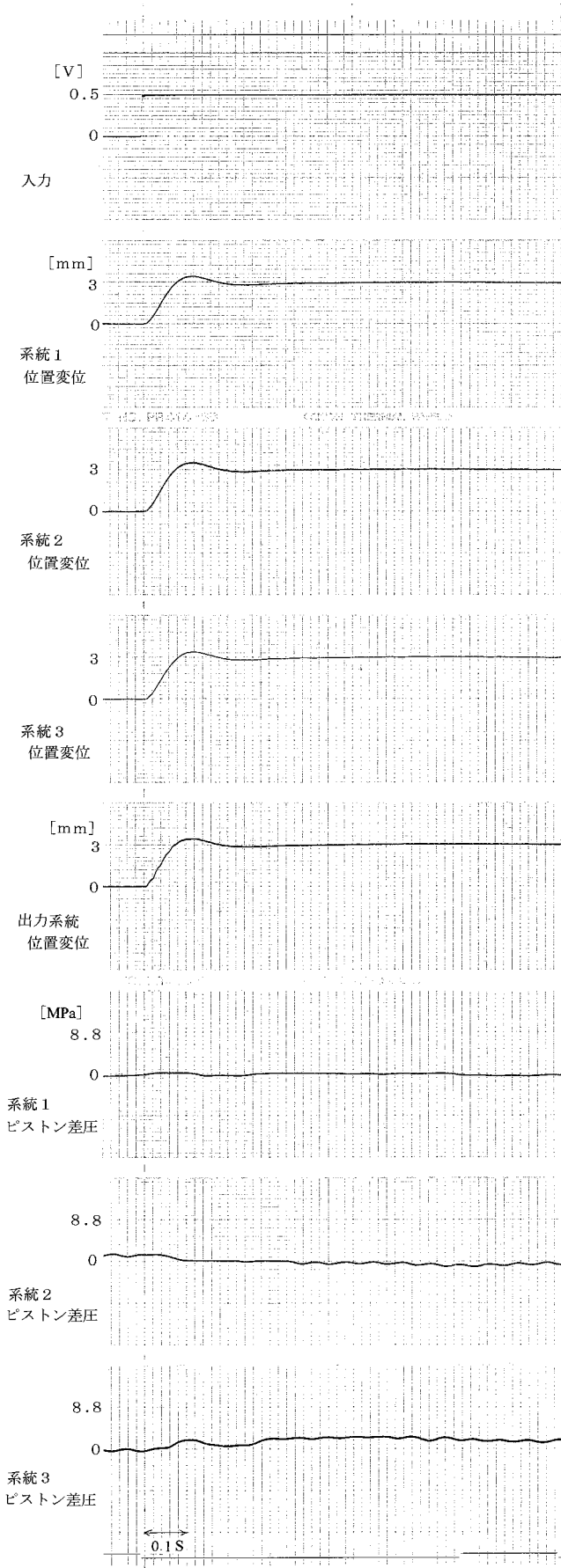


図 8.2 3系統作動 (モデル追従制御)

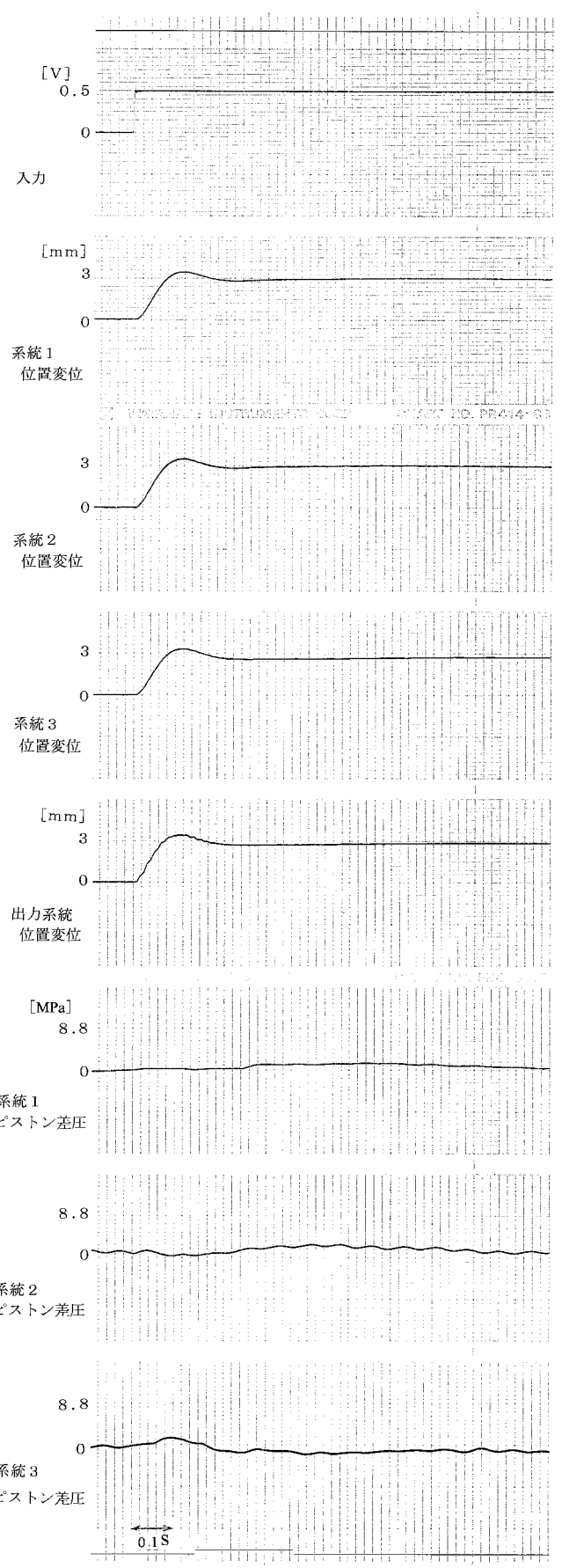


図 8.3 系統3 K_{fb} 10%増

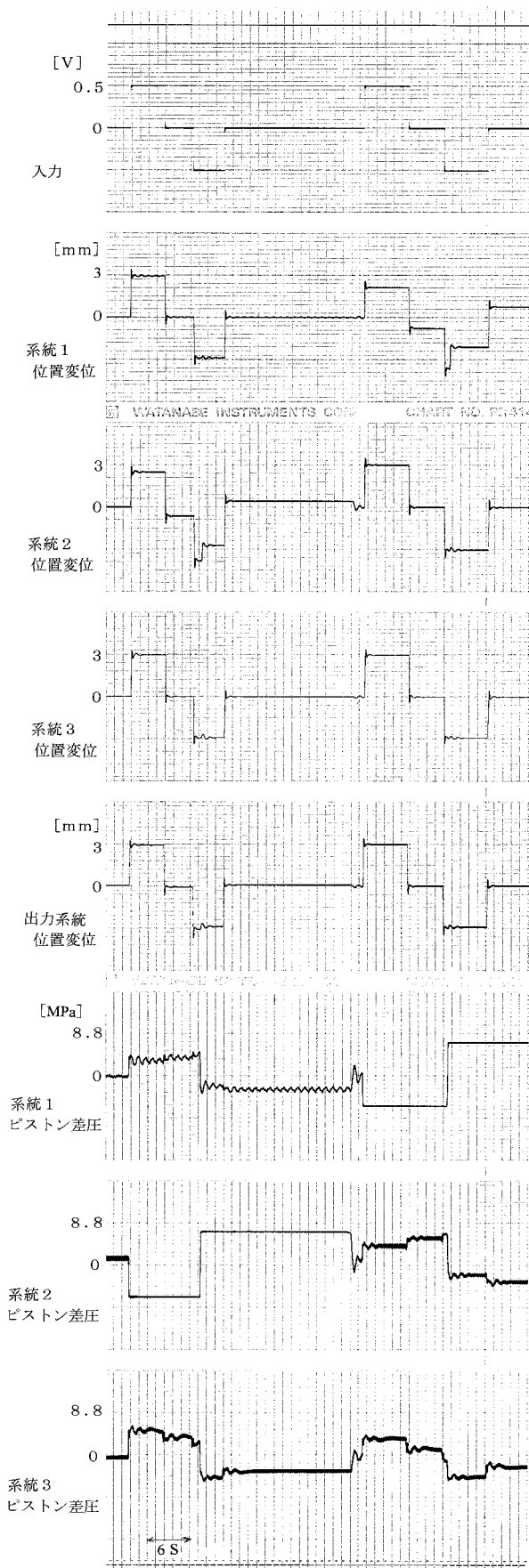


図8.4 系統2,1入力OFF

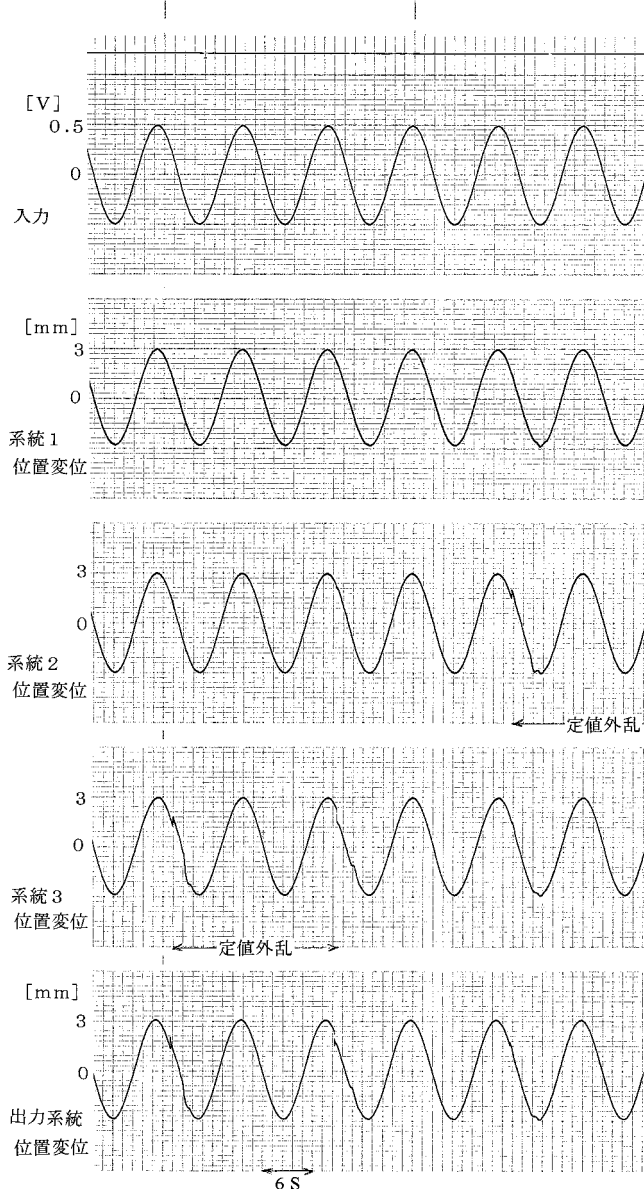


図8.5 外乱応答(モデル追従制御)

以上3重系油圧操縦装置に何等の制御方式を含まない原形の場合と、モデル追従制御方式を施した場合のステップ応答を幾つかの形態について示してきたが、ここで両者のステップ応答に基づいた定常特性をまとめて表3に示す。しかし、この表で制御方式を含まない原形の系と、モデル追従制御方式の系とを比較することは、入力大きさが異なるので厳密にはできないが、原形の方の油圧OFFの場合、入力0.2と入力0.4の場合の出力差はあまりないので、ある程度の比較は可能と思われる。このことから、両者を比較すれば、系統に不作動のある場合は大差はないが、システムのパラメータ(前向き経路の定数)の変動に対してモデル追従制御では、系統間のばらつきが少なく良好な特性を示している。また、このような前向き経路でのばらつきを補償する特性が、フィー

表3 3重系油圧操縦装置の定常出力特性

制御形態	原形(制御方式を含まない)				モデル追従制御			
作動形態	系統1	系統2	系統3	出力系統	系統1	系統2	系統3	出力系統
3系統	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
系統1油圧OFF					0.94	1.00	1.01	1.00
" 2 "	1.00	1.04	1.01	1.01	1.00	1.04	1.00	1.00
" 3 "	1.00	1.00	0.91	0.94	1.00	1.00	0.93	0.95
" 1,2 "	1.01	1.04	1.00	1.01	1.03	1.06	1.01	1.01
" 1,3 "					0.97	1.00	0.93	0.94
" 2,3 "	1.00	0.98	0.91	0.91	1.00	1.00	0.93	0.94
系統2油圧OFF	1.02	1.04	1.00	1.02				
" 3 "	1.01	0.99	0.97	0.95				
" 1,2 "	1.07	1.05	1.01	1.03				
" 2,3 "	1.01	0.98	0.96	0.94				
系統1入力OFF	0.22	0.94	0.96	0.95	0.71	1.00	1.00	1.00
" 2 "	0.98	0.50	0.96	0.89	1.00	0.86	1.00	0.99
" 3 "	0.98	0.96	0.37	0.53	1.00	1.00	0.72	0.81
" 1,2 "	0	0	0.51	0.39				
" 1,3 "	0	0.46	0.01	0.07				
" 2,3 "	0.72	0	0.01	0.04				
系統1 Ka 10%増	0.96	0.94	0.98	0.99	0.99	1.01	1.01	1.00
" 2 "					0.99	1.01	0.99	1.00
" 3 "	0.98	0.94	0.96	1.01	0.99	1.00	1.01	1.00
系統1 Kfb10%増	0.85	0.94	0.98	0.99	0.96	1.00	1.01	1.00
" 2 "					1.06	0.90	1.01	0.99
" 3 "	0.98	0.95	0.88	0.94	1.00	1.00	0.92	0.92

注1. 原形では入力0.2v(一部0.4v),モデル追従制御では入力0.5vとし,3系統通常作動時の出力を基準にする。原形0.2v入力で0.97mm,モデル追従制御0.5v入力で3mm出力。

注2. の部分は0.4vの入力で,0.2v入力で換算。

注3. モデル追従制御の入力OFFでは+-出力の平均値。windアップ現象あり。

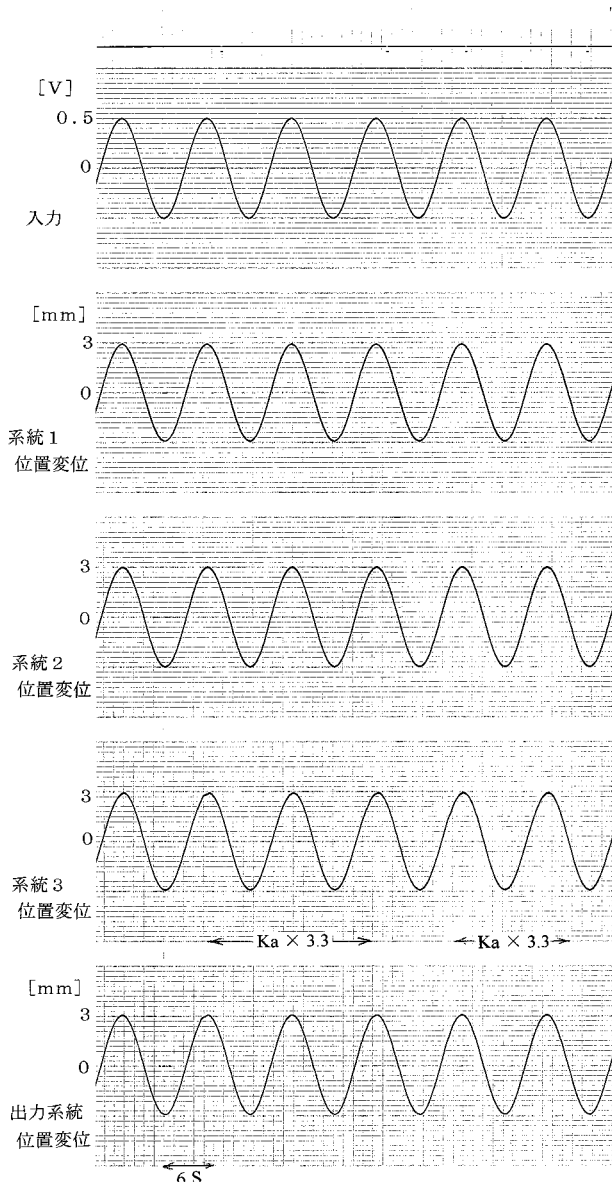


図 8.6 系統 3 Ka ゲイン 3.3 倍のステップ状変化の応答

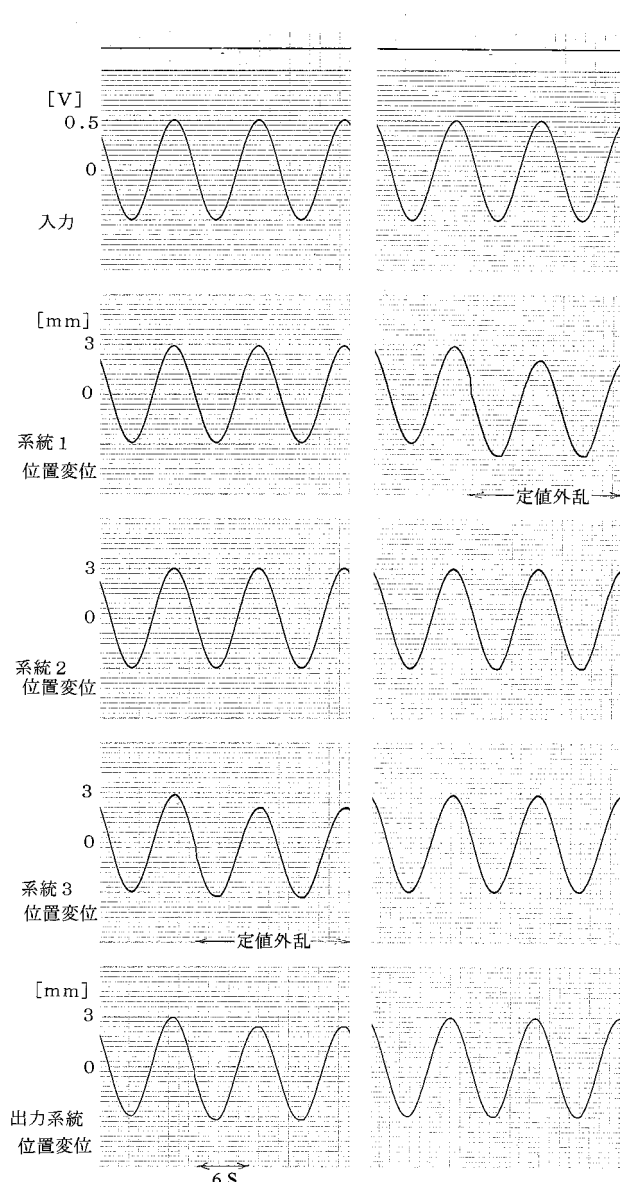


図 8.7 フィードバック経路アクチュエータ 3 mm 相当外乱ステップ応答

ドバック経路におけるパラメータ変化に対しても、出力がより正確になることに寄与しているものと考えられる。このように出力が揃うということは系統の作動力が揃うことであるので、これはモデル追従制御方式の効果と考えられる。一般的に、系統 3 が正常作動でない場合は、出力ゲインの減少が見られるが、これは作動力伝達経路のベルクランク部でのがたが原因と考えられる。

5.2 モデル追従制御系の過渡特性

一般に制御系に外乱が入った場合は、モデルを含めて全系統に同じ様に入れば、多重系として問題はないが、操縦系統の 1 系統のみに入る場合は問題になるので、次に検討する。

図 8.5 に全系統が出力振幅 3 mm の調和振動中、前向き

経路にアクチュエータの動き 6 mm 相当の定値外乱が系統 3 および系統 2 にステップ状に入った場合を続けて示す。過渡的には影響されるが、直ちにその動きは解消されている。また、出力系統に近い系統での外乱にはより強く影響されることが分る。図 8.6 は系統 3 の前向き経路に K_a などのゲインがステップ状に 3.3 倍になった場合である。ほとんど出力に影響がでていない。これは表 3 の K_a が 10% 増に対応する（変化の大きさは異なる）もので、過渡的にも影響がないことが分る。図 8.7 はフィードバック経路にアクチュエータの動き 3 mm 相当の定値外乱を系統 3、系統 1 に加えた場合の応答である。フィードバック経路であるので原理的にこのような外乱に対しては対応できないが、出力系統より離れている系統 1 の場合はその影響は小さい。

6. 結 論

多重系油圧操縦系統の制御において、全系統を常時作動させ、その各出力を加算出力する操縦系統に、積分補償型サーボ系をモデルとするモデル追従型制御方式を構成し、3重系油圧操縦装置による作動実験を行った。

1. 多重系の各系統に同等な制御方式である積分補償型サーボ系をモデルとするモデル追従制御を構成した。
2. 積分補償型サーボ系の特質が多重系においてももたらされていて、各系統間の出力差を最小限に抑えることができる。
3. 一部の系統のシステムパラメータの変動や定値外乱に対するオフセットを抑え、各系統間の出力差を最小限にできる。

7. 引用文献

- 1) 山本和男；FBW用信号アクチュエータについて，日本航空宇宙学会誌，VOL. 30, NO. 336(1982) pp. 53-63.
- 2) J. G. Rolland Collete; Analysis and Design of Space Vehicle Flight Control Systems, Volume XI-Component Dynamics, NASA CR - 830(1967) pp.64-86.
- 3) 山口惇，田中裕久；油空圧工学（昭和61）pp.63-82，コロナ社
- 4) 小川敏雄；多重油圧操縦系統における冗長出力型アクチュエータの作動シミュレーション，航空宇宙技術研究所資料，TM-711（1997）
- 5) 原 辰次，千田有一，佐伯正美，野波健蔵；ロバスト制御のためのベンチマーク問題（I） 3 慣性系に対する位置制御・速度制御ー，計測と制御，VOL. 34, NO.5（1995）pp.403-409.
- 6) 谷下市松，渡辺 茂訳；チモシエンコ工業振動学（1954）pp. 220-243，東京図書
- 7) 池田雅夫，須田信英；積分型最適サーボ系の構成，計測自動制御学会学術論文集，VOL.24, NO.1（1988）pp.40-46.
- 8) 武田常広，北森俊行；線形多入出力最適追従制御系の一設計法，計測自動制御学会学術論文集，VOL.14, NO.4（1978）pp.359-364.
- 9) Igal Tiroshi, Jarrell R.Elliott; Explicit Model Following Control Scheme Incorporating Integral Feedback, J.Aircraft, VOL.11, NO.5（1974）pp.364-366.
- 10) J.S.Tyler, Jr., The Characteristics of Model-Following Systems as Synthesized by Optimal Control, IEEE Transactions on Automatic Control, October（1964）pp.485-498.
- 11) 小川敏雄；多重油圧操縦系統のモデル追従制御，第35回計測自動制御学会学術講演会予稿集（1996）pp.767-768.
- 12) 木村英紀；多変数制御系の理論と応用 ，システムと制御，VOL.22, NO.5（1978）pp.293-301.
- 13) 木村英紀，藤井隆雄；多変数制御系の理論と応用 - ，システムと制御，VOL.22, NO.7(1978) pp.426-435.
- 14) 川口忠雄，湯井勝彦，貝塚 洋；製鉄業におけるロバスト制御，コンピュータール NO.13，（1986）pp.117-123，コロナ社

航空宇宙技術研究所報告 1336号

平成9年10月発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話(0422)47-5911 ㊦182
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12

© 禁無断複写転載

本書(誌)からの複写, 転載を希望される場合は, 企画室調査普及係にご連絡ください。

Printed in Japan