

ISSN 0452-2982
UDC 629.7.054:
629.7.017.2

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-443

航空計器統合の効果に関する研究

田 中 敬 司 ・ 川 原 弘 靖 ・ 中 沢 一 夫

1981年9月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

航空計器統合の効果に関する研究*

田 中 敬 司** 川 原 弘 靖** 中 沢 一 夫***

A Study of the Effects of Display Integration

Keiji TANAKA, Hiroyasu KAWAHARA,
and Kazuo NAKAZAWA

ABSTRACT

The effects of display integration were studied and the results are described in this paper. An experiment with single-loop manual control was conducted. In the experiment, the following three types of display formats were provided to give the operator the control cues: integrated position plus its velocity, separated position and its velocity, and position only.

The human describing functions for each display type were identified by applying Akaike's MFPE (Minimum Final Prediction Error) method to the obtained time series. It was revealed that the integration of the displayed information causes improved control performance, and that the reason for that improvement can be ascribed to human describing functions.

記 号 表

B	バックワードシフトオペレータ
c	オペレータ操縦量
d	$= c + \dot{c}$
F_{i_1}	外部入力 i_1 の成形フィルタ
F_{i_2}	外部入力 i_2 の成形フィルタ
F_r	レムナントの成形フィルタ
f	$= -m + \dot{c}$
g	$= -\dot{m}$
i_1, i_2	外部入力
L	自己回帰方程式の次数
N	データ個数

P_1, P_2	制御成績
s	ラプラス変数
T	予測時間 [sec]
t	時間 [sec]
w	白色雑音ベクトル
x	時系列ベクトル
$Y(j\omega)$	$= Y_{P1}(j\omega) + Tj\omega Y_{P2}(j\omega)$
$Y_C(j\omega)$	制御対象
$Y_P(j\omega)$	オペレータの記述関数
$Y_{P1}(j\omega)$	$f(t)$ を入力とするオペレータの記述関数
$Y_{P2}(j\omega)$	$g(t)$ を入力とするオペレータの記述関数
α	統合した場合の表示方式
β	統合していない場合の表示方式
r	$f(t)$ のみが示される表示方式
ε	白色雑音ベクトル
ζ	減衰率
ζ_1	白色雑音

* 昭和56年5月28日受付

** 計測部

*** 研修生(日本大学大学院)

Σ	予測誤差分散行列
σ_{ij}	予測誤差分散行列の (i, j) 要素
ω	角周波数 [rad/sec]
ω_c	クロスオーバー周波数 [rad/sec]
ω_f	外部入力固有周波数 [rad/sec]
ω_n	制御対象固有周波数 [rad/sec]
\hat{A}	推定値を表わす
A	ベクトルあるいは行列を表わす

1. 序 論

航空機-パイロット系のインターフェースとしての航空計器は、それぞれの時代における航空機を後追いする形で発達してきた。これは、従来与えられたミッションを遂行し得る航空機を開発することが第一目標であり、計器は主にパイロットの五感を補助するために装備されてきたという経緯の必然であった。一方、近年の航空機の大型化、高性能化により、パイロットに知らせるべき情報の量が一層増加した。最近の大型輸送機の操縦室に収められている計器の数は 300 を越える。パイロットは、これらの計器から現在必要な情報を捜し出し、それに基づいて適切な操作を行わなければならない。この様なパイロットの情報処理作業は特に離着陸時に過大となる¹⁾。航空機事故の大半がこの段階で生じていることを考え合わせると、パイロットの作業負担は課せられた情報処理作業の大きさに対応すると言える。従って、人的過誤による航空機事故を減少させるためにはパイロットの作業負担の内特に情報処理負担の低減化が必要と考えられる。即ち、パイロットの作業負担を常時低いレベルに保つためには、従来から必要に任せて増加したパイロットへの呈示情報を整理し、操縦作業との関連でこれらの情報を合理化しなければならない。特に、視覚に関する情報呈示方式即ち計器システムの合理化から始めることは、人間の五感の内視覚による情報が全体の 90% 以上であることから当然の手順である。

上記観点より、近來航空計器の統合化の研究が実施されてきた。この種の研究において、航空計器の評価を試みた例は多いが、^{2)~4)} 評価の判定基準はパイロットコメント、レーティング、またはせいぜい制御成績にとどまっていた。しかし、実際に統合計

器を設計、開発しようとする場合、統合の効果を定量的に評価できることが望ましい。本研究では、計器、オペレータ等で閉ループ手動制御系を構成し、計器の統合の効果をオペレータの制御特性の側面から明らかにすることを試みた。この手法が確立すれば今後の航空計器開発の手段として効果的であり、定量的計器表示理論を構成する上で有力な手掛りになると思われる。

本資料は、オペレータの手動制御特性に注目した計器システム評価法の基礎研究として、オペレータに 2 種の情報を与え、それを統合した場合の効果を調べる実験について記したものである。実験では、オペレータへの入力情報として、現在位置とその 1 次微分、即ち予測情報とを与えた。これは例えば航空計器の内、縦の制御に必要な高度計と昇降計を想定したものである。

2. 実 験

2.1 実験目的

計器統合の効果を明らかにするため、図 2-1 に示す様にオペレータを含む閉ループ系を構成し、オペレータへの情報を統合した場合とそうでない場合について一軸の手動制御実験を行なう。実験は 3 段階に分けて実施される。それぞれの実験目的は次の通りである。

実験 1 オペレータが一つの制御対象について習熟してゆく過程、即ち練習曲線を、以降で述べる 3 種の表示方式毎に求め、これから表示方式の優劣を比較する。

実験 2 実験 3 で用いるため、オペレータにとって最も制御が容易な予測時間（次節参照、以下では最適予測時間と呼ぶ）を求める。

実験 3 実験 2 で得た最適予測時間を用いて実験を行ない、制御の成績等から予測表示を附加するこ

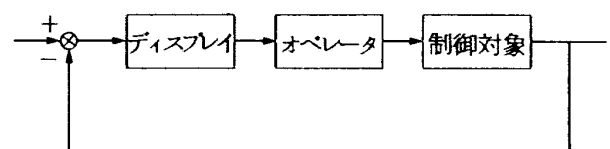


図 2-1 実験ブロック図

とによって表示を統合した場合の効果調べる。さらに、オペレータの制御特性を記述関数の形で求め、これから表示統合の効果論じる。

2.2 実験方法

前節の実験目的に従い、実験を三段階に分けて実施した。被験者に課した作業は、グラフィックディスプレイ上に呈示された2種の情報、即ち現在位置 f とその将来位置 g とを利用して f を零に抑えるべく操縦桿を操作することである。ここで、将来位置 g はある時間後の予測位置（以下この時間を予測時間と呼ぶ）を表わすが、この表示方式として後述の様に α 、 β 、 r の3種を選んだ。以下に各実験毎にその方法を記す。

実験1 被験者が制御対象に習熟するまでの制御成績を、3種の表示方式毎に約20回程度繰り返して練習曲線として求めた。成績の指標は、 f 及び外部入力 i_1 の2乗平均を用いて次式の P_1 で表わした。

$$P_1 = \frac{\sqrt{\bar{f}^2}}{\sqrt{\bar{i}_1^2}} \quad (2-1)$$

上式で、

$$\left. \begin{aligned} f^2 &= \sum_{n=1}^N f^2(n)/N \\ \bar{i}_1^2 &= \sum_{n=1}^N i_1^2(n)/N \\ N &= 128 \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

である。即ち、1試行64〔sec〕とし、サンプリング間隔0.5〔sec〕とした。また、 α 及び β 表示方式において予測時間は仮に1〔sec〕とした。尚、実験1,2で用いた成績指標 P_1 はミニコンピュータで計算し、一試行毎にタイプライタで出力させた。

実験2 被験者への情報は統合表示（後述の α 表示）によって与え、実験パラメータとして予測時間を選び、これを0.0（予測情報なし）、0.3、0.5、0.7、1.0〔sec〕の5種に変化させ、後述の各々の制御対象について（2-1）式の P_1 を計測した。一試行に要する時間及びサンプリング間隔は実験1と同一である。実験1の終了後更に練習を追加して充分に被験者が習熟した後実験2を実施した。1つ

の予測時間に対して、各被験者に6回ずつ試行を繰り返させ、成績を記録した。

実験3 実験2で求めた最適予測時間を用いて同様の実験を行なった。1試行120〔sec〕で、その間でデータが定常と見做し得る90〔sec〕をデータ処理に用いた。実験3の制御成績の指標は、 f 、 i_1 、 i_2 の分散 σ_f^2 、 σ_{i1}^2 、 σ_{i2}^2 を用いて次式の P_2 で表わした。

$$P_2 = \frac{\sigma_f^2}{\sigma_{i1}^2 + \sigma_{i2}^2} \quad (2-3)$$

上式で、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^2 &= \sum_{n=1}^N \{x(n) - m_x\}^2 / (N-1) \\ m_x &= \sum_{n=1}^N x(n) / N \\ N &= 900 \text{ (サンプリング間隔 } 100[\text{ms}]) \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

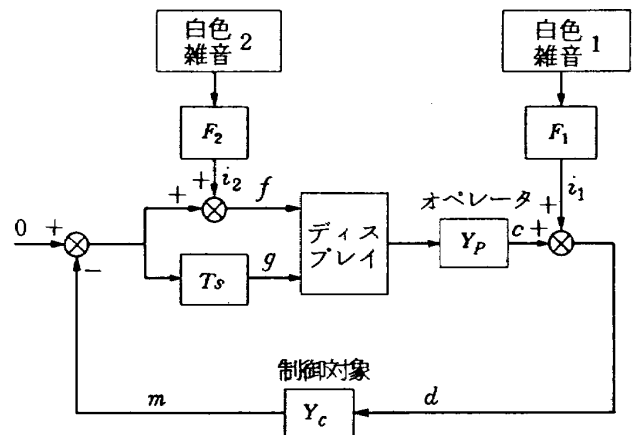


図2-2-1 α 及び β 表示方式の場合の実験ブロック図

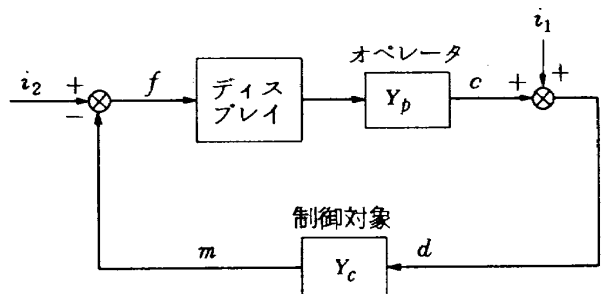


図2-2-2 r 表示方式の場合の実験ブロック図

但し, x は f , i_1 , i_2 である。

次に実験装置, 制御対象等について述べる。(図 2-2-1, 2-2-2 参照)

(1) 被験者

成人男子 3 名とした。以後, M, T, O と略記する。

(2) 操縦装置

スプリングによる復元力を持つ操縦桿である。被験者がこれを前後方向に変位させることでオペレータ出力, c を発生する。回転軸から握りまでの距離は,

$$H = 50 \text{ [cm]} \quad (2-5)$$

変位ゲインは,

$$K_s = 0.3 \text{ [volt/cm]} \quad (2-6)$$

可動範囲は,

$$R = \pm 21 \text{ [cm]} \quad (2-7)$$

である。

(3) 外部入力

2 台の白色雑音発生器からの白色雑音を, それぞれ次式の成形フィルタで成形したものを外部入力とした。

$$F_i = \frac{K_f \omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \quad (2-8)$$

$$\left. \begin{array}{l} i_1 \text{ の場合, } \omega_f^2 = 1 [\text{rad}^2/\text{sec}^2], \\ \zeta_f = 1, K_f = 1 \\ i_2 \text{ の場合, } \omega_f^2 = 0.5 [\text{rad}^2/\text{sec}^2], \\ \zeta_f = 0.5, K_f = 0.1 \end{array} \right\} \quad (2-9)$$

ここで, i_1 , i_2 は, 図 2-2-1, 2-2-2 の様にそれぞれ外乱, 目標入力を想定したものである。

(4) 表示装置及び表示方式

表示装置にはグラフィックディスプレイ (MEGRAPHIC-6000) を使用した。これはミニコンピュータにより制御される。この装置を用いることにより, 従来この種の実験で使用されたオシロスコープに比べより容易な実験が可能となった。表示情報は f と g である。ここで g は次式で与える。

$$g(t) = -T \dot{m}(t) \quad (2-10)$$

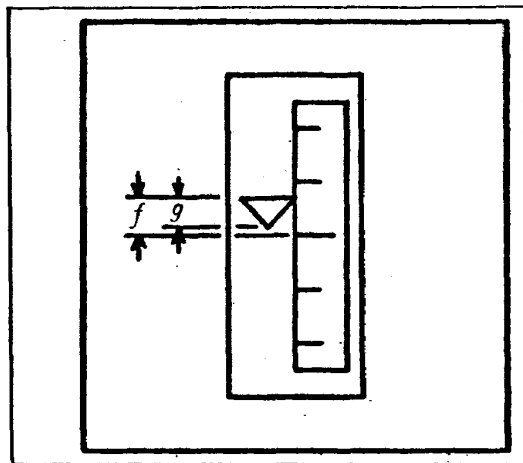
上式で $m(t)$ は制御対象出力であり, T は予測時間である。 f , g の表示ゲインは次式である。

$$K_D = 2.8 \text{ [cm/volt]} \quad (2-11)$$

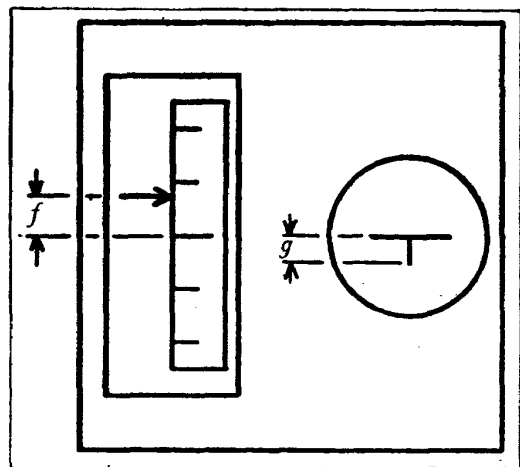
表示方式は以下の α , β , r の 3 種である。

イ. α の表示方式

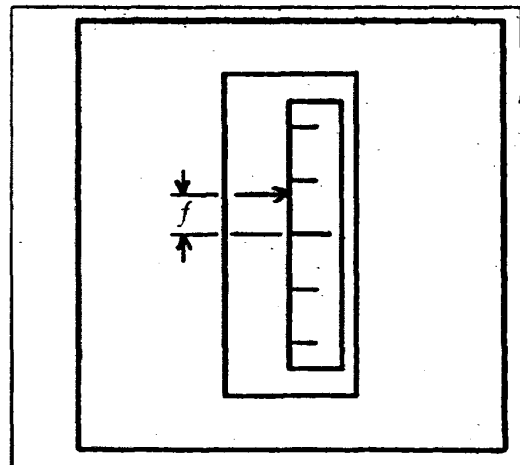
図 2-3(a) に示す様にディスプレイ上に f 及び g を統合して表示する。中心線から三角形の底辺までの距離で f を示し, 底辺から頂点までの距離で g を示



(a) α 表示



(b) β 表示



(c) r 表示

図 2-3 実験で用いた表示方式

す。これは高度計、昇降計を統合した場合に対応する。

ロ. β の表示方式

図 2-3(b)に示す様に f と g をそれぞれ別個に表示する。現用の航空計器の様に高度計と昇降計が分かれて配置されている場合に対応する。

ハ. r の表示方式

図 2-3(c)に示す様に f のみを表示する。これは昇降計のない特別な場合を想定したものである。

(5) 制御対象

制御対象は $d(=c+i_1)$ を入力とし、 m を出力する要素で、次の 4 種とした。

$$Y_{C1}(s) = \frac{1}{s-1} \quad (2-12)$$

$$Y_{C2}(s) = \frac{1}{s^2} \quad (2-13)$$

$$Y_{C3}(s) = \frac{4}{s^2 - 0.2s + 0.4} \quad (2-14)$$

$$Y_{C4}(s) = \frac{1}{s^2 - 0.2s + 1} \quad (2-15)$$

(6) ミニコンピュータ

ディスプレイの表示方式の制御、及び(2-1)式の P_1 の計算のためにミニコンピュータ (NOVA 02/30) を使用した。

(7) アナログコンピュータ

実験で使用した制御対象や入力の成形フィルタの構成、及び実験全般の制御のためにアナログコンピュータ (メルコム EA-7450) を使用した。

2.3 データ処理

実験 1 及び 2 は、前述のミニコンピュータによりデータ処理を行なった。

実験 3 のデータ処理は以下の通りである。ペン書きレコーダ及び磁気テープデータレコーダに 7 チャネル (i_1, i_2, f, g, c, d, m (図 2-2-1 参照)) のデータを記録した。このデータを当所の NAL 磁気テープデータ処理システムによって、サンプリング周期 0.02 [sec] で A/D 変換した後、データを 5 個毎のブロックに分け、その内の最大及び最小値を省いた残り 3 個の平均値をサンプリング周期 0.1 [sec] のデータとし、磁気ディスクに収納した。以

降の解析には当所大型計算機 (FACOM 230-75) を利用した。

3. 時系列解析の本実験への応用

3.1 時系列の自己回帰モデル

本研究では表示情報の統合の効果を定量的に調べるため、オペレータの制御特性に関して解析する。このため、実験 3 によって得たデータに対し赤池の MFPE 法を適用して時系列解析を行ない、オペレータの制御特性を記述関数の形で求める。^{5)~7)}

一般に任意の k 次元の有限な定常時系列ベクトル $x(n)$ ($n = 1, 2, \dots, N$) に対し次式の自己回帰モデルをあてはめることを考える。

$$x(n) = \sum_{m=1}^L \underline{A}_L(m) x(n-m) + \varepsilon(n) \quad (3-1)$$

ここで、 $x(n)$ は平均零とし、次式で与える。

$$x(n) = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_k(n)]^T \quad (3-2)$$

$\underline{A}_L(m)$ は、自己回帰モデルの次数が L であるときの m 番目の $k \times k$ 次元の自己回帰係数行列で、次式である。

$$\underline{A}_L(m) = \begin{bmatrix} a_{L1,1}(m) & a_{L1,2}(m) & \dots & a_{L1,k}(m) \\ a_{L2,1}(m) & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{Lk,1}(m) & \dots & \dots & a_{Lk,k}(m) \end{bmatrix} \quad (m = 1, 2, \dots, L) \quad (3-3)$$

また、 $\varepsilon(n)$ は次式の k 次元の互いに独立な白色雑音である。

$$\varepsilon(n) = [\varepsilon_1(n), \varepsilon_2(n), \dots, \varepsilon_k(n)]^T \quad (3-4)$$

(3-1) 式の自己回帰モデルの次数 L の最適値は、MFPE 法 (Multiple Final Prediction Error Method) を用いて求めることができる。 $x(n)$ の各時系列要素間の動的関係は、最適次数において最小二乗法によって求めた $\underline{A}_L(m)$ ($m = 1, 2, \dots, L$) によって表わされる。

3.2 本実験におけるオペレータ記述関数同定への時系列解析の応用

前節で述べた自己回帰モデルを図 2-1 で表わさ

れる様な手動制御系にあてはめる方法について記す。

3.2.1 α 及び β 表示の場合の解析法

図 2-2-1 の実験ブロック図に示す様に、オペレータへの入力情報は f 及び g の 2 種である。そこでオペレータの伝達関数 Y_p を、 f を入力とする伝達関数 Y_{p1} と g を入力とする伝達関数 Y_{p2} に分けて求める。ここでは、 f 、 g 及び c について 3 次元の自己回帰モデルをあてはめる。図 3-1 にオペレータを擬似線形モデルとしたブロック図を示す。ここで F_r はオペレータのレムナントの成形フィルタとする。この図を参照すると本実験での各信号間の関係は次式となる。

$$\underline{x} = \underline{A}\underline{x} + \underline{F}\underline{w} \quad (3-5)$$

$$\text{但し, } \underline{x} = [c, f, g]^T \quad (3-6)$$

$$\underline{w} = [w_r, w_2, w_1]^T \quad (3-7)$$

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & Y_{p1} & Y_{p2} \\ -Y_c & 0 & 0 \\ -sTY_c & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} F_r & 0 & 0 \\ 0 & F_2 & -F_1Y_c \\ 0 & 0 & -sTF_1Y_c \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

(3-5) 式を書き直して整理すると次式を得る。

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} 1 - F_r^{-1} & F_r^{-1}Y_{p1} & F_r^{-1}Y_{p2} \\ 0 & 1 - F_2^{-1} & (sTF_2)^{-1} \\ F_1^{-1} & 0 & 1 + (sTF_1Y_c)^{-1} \end{bmatrix} \underline{x} + \underline{w} \quad (3-10)$$

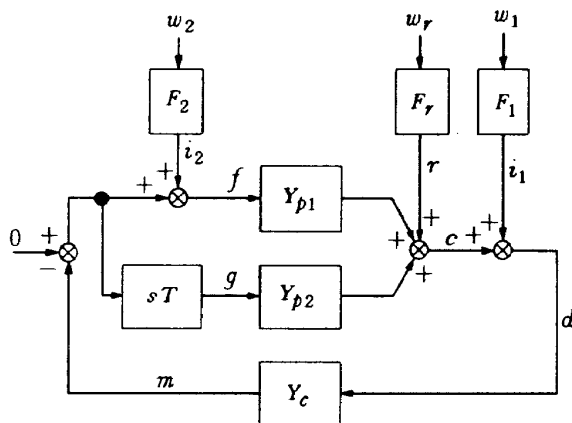


図 3-1 α 及び β 表示の場合のオペレータの擬似線形モデルを用いたブロック図

さて、ここで 3 次元の時系列ベクトル $\underline{x}(n) (= [c(n), f(n), g(n)]^T)$ に対して (3-1) 式の自己回帰モデルをあてはめることを考える。(3-1) 式を $k=3$ の場合について書き直すと次式を得る。

$$\underline{x}(n) = \sum_{m=1}^L \begin{bmatrix} a_{L1,1}(m) & a_{L1,2}(m) & a_{L1,3}(m) \\ a_{L2,1}(m) & a_{L2,2}(m) & a_{L2,3}(m) \\ a_{L3,1}(m) & a_{L3,2}(m) & a_{L3,3}(m) \end{bmatrix} \underline{x}(n-m) + \begin{bmatrix} \varepsilon_1(n) \\ \varepsilon_2(n) \\ \varepsilon_3(n) \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

バックワードシフトオペレータを用いて上式を書き直すと次式となる。

$$\underline{x}(n) = \begin{bmatrix} A_{11}(B) & A_{12}(B) & A_{13}(B) \\ A_{21}(B) & A_{22}(B) & A_{23}(B) \\ A_{31}(B) & A_{32}(B) & A_{33}(B) \end{bmatrix} \underline{x}(n) + \underline{\varepsilon}(n) \quad (3-12)$$

ここで、

$$Bx(n) = x(n-1)$$

また、

$$A_{ij}(B) = a_{Li,j(1)}B + a_{Li,j(2)}B^2 + \dots + a_{Li,j(L)}B^L \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

である。(3-12) 式の白色雑音ベクトル $\underline{\varepsilon}(n)$ は次式で定義される。

$$\underline{\varepsilon}(n) = \underline{\Sigma}\underline{\zeta}(n) \quad (3-13)$$

ここで、

$$\underline{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

$$\underline{\zeta}(n) = [\zeta_1(n), \zeta_2(n), \zeta_3(n)]^T$$

で与えられ、 $\underline{\Sigma}$ はインテンシティ行列であり、 $\underline{\zeta}(n)$ は互いに独立で単位強さの白色雑音ベクトルである。モデルが正しく求められているためには (3-12) 式の $\underline{\varepsilon}(n)$ が (3-10) 式の \underline{w} と対応しなければならない。それ故 $\underline{\Sigma}$ が対角化されて求められている必要がある。今、モデルが正しく求められて $\underline{\Sigma}$ の非対角要素が全て零であるとする、(3-12) 式における $A_L(B)$ の要素と (3-10) 式の要素とを比較することで、オペレータのインパルス応答関数

はそれぞれ次式で得られる。

$$\hat{y}_{P1}(B) = \frac{A_{12}(B)}{1 - A_{11}(B)} \quad (3-14)$$

$$y_{P2}(B) = \frac{A_{13}(B)}{1 - A_{11}(B)} \quad (3-15)$$

周波数応答関数はこれらをフーリエ変換すれば良いが、ここでは上式の B^m を $e^{-j\omega\Delta m}$ で置き換えることにより、それぞれ

$$\hat{Y}_{P1}(j\omega) = \frac{A_{12}(j\omega)}{1 - A_{11}(j\omega)} \quad (3-16)$$

$$\hat{Y}_{P2}(j\omega) = \frac{A_{13}(j\omega)}{1 - A_{11}(j\omega)} \quad (3-17)$$

で得られる。上式で、

$$A_{ij}(j\omega) = \sum_{m=1}^L a_{Li,j}(m) e^{-j\omega\Delta m} \quad (3-18)$$

である。(3-16), (3-17) 式でオペレータ記述関数が同定される。

3.2.2 r 表示の場合の解析法

図2-2-2の様にオペレータへの入力情報は f だけであり、これと c とを用いて2次元の自己回帰モデルを同定する。図3-2にオペレータの擬似線形モデルを用いたブロック図を示す。この図より、

$$\left. \begin{aligned} c &= f Y_p + r \\ f &= -(c + i_1) Y_c + i_2 \end{aligned} \right\} \quad (3-19)$$

である。従って、 w_1 と w_2 とを加え合わせて w とし、

$$x(n) = [c(n), f(n)]^T \quad (3-20)$$

$$w(n) = [w_r(n), w(n)]^T \quad (3-21)$$

として、3次元の場合と同様に整理すると、オペレータ及び制御対象の推定周波数応答関数はそれぞれ

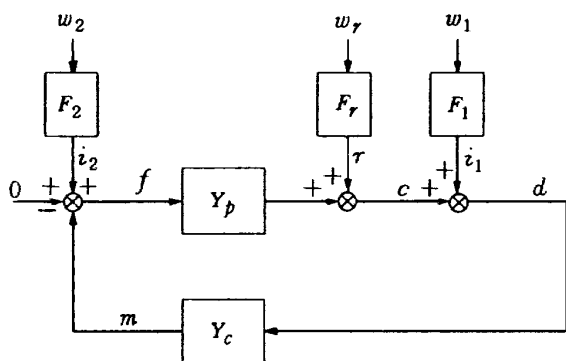


図3-2 r 表示の場合のオペレータの擬似線形モデルを用いたブロック図

次式で得られる。

$$\hat{Y}_p(j\omega) = \frac{A_{12}(j\omega)}{1 - A_{11}(j\omega)} \quad (3-22)$$

$$\hat{Y}_c(j\omega) = \frac{-A_{21}(j\omega)}{1 - A_{22}(j\omega)} \quad (3-23)$$

4. 結果と検討

4.1 実験1

実験1で得た練習曲線の例を図4-1-1～図4-1-4に示す。図において、印が下方に位置するものの程成績が良いことになる。 α 表示では1回目から P_1 が1.0以下に納まっているが、 β , r 表示では数回でも1.0以下にならないことがある。これは、不安定な制御対象に対し、有効な制御ができなかったことを意味する。また、全体的に α 表示では成績のばらつきが小さいが、 β , r 表示ではばらつきが大きく成績も悪い。以上の結果から、被験者は他の表示方式に比較して α 表示に対する慣熟及び制御が容易であったことが得られた。

4.2 実験2

縦軸を実験1と同様の P_1 とし、横軸を予測時間とした結果を制御対象毎に図4-2-1～図4-2-4に示す。これらの図から、制御対象の制御の容易さの差異を成績の差として読み取ることができる。図によれば、 Y_{c1} , Y_{c2} , Y_{c3} の順に制御が容易であり、 Y_{c3} と Y_{c4} は同程度に制御が困難と思われる。

次に予測時間の違いによる成績の変動に注目すると、予測情報の無い場合、即ち予測時間が0 [sec] の場合とその他の場合とでは大きな差があるが、0.3 [sec] から1 [sec] の間では大差がない。従って、この間の適当な値として0.5 [sec] を最適予測時間と見做し、この値を用いて実験3を実施した。この値は文献8)の結果と矛盾がない。

4.3 実験3

4.3.1 時間経過図について

ペン書きレコーダに記録された各種信号の時間経過図の例を Y_{c1} について図4-3-1～図4-3-3に示す。これらの図から、先ずオペレータが制御すべき偏差、 $f(t)$ に着目すると、明らかに α , β ,

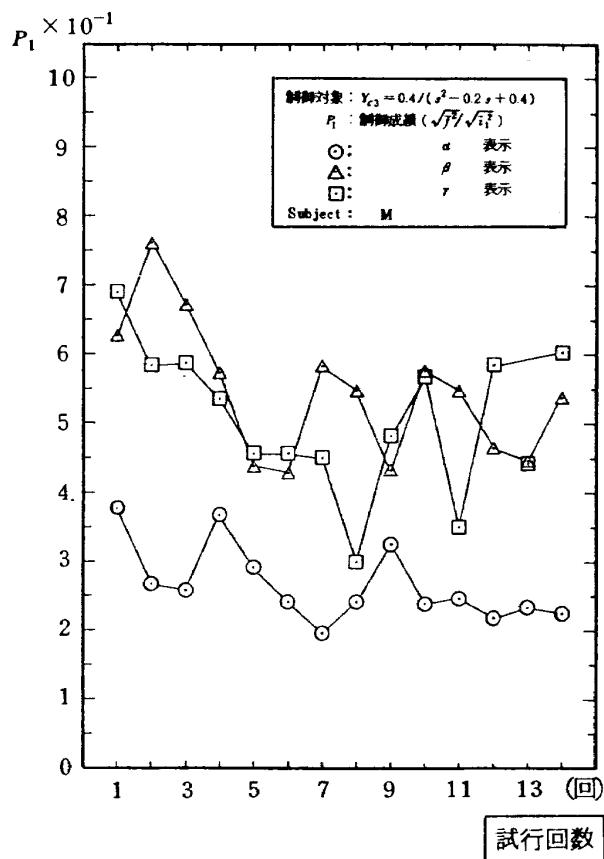


図 4-1-1 被験者Mの練習曲線例
($Y_c = Y_{c3}$)

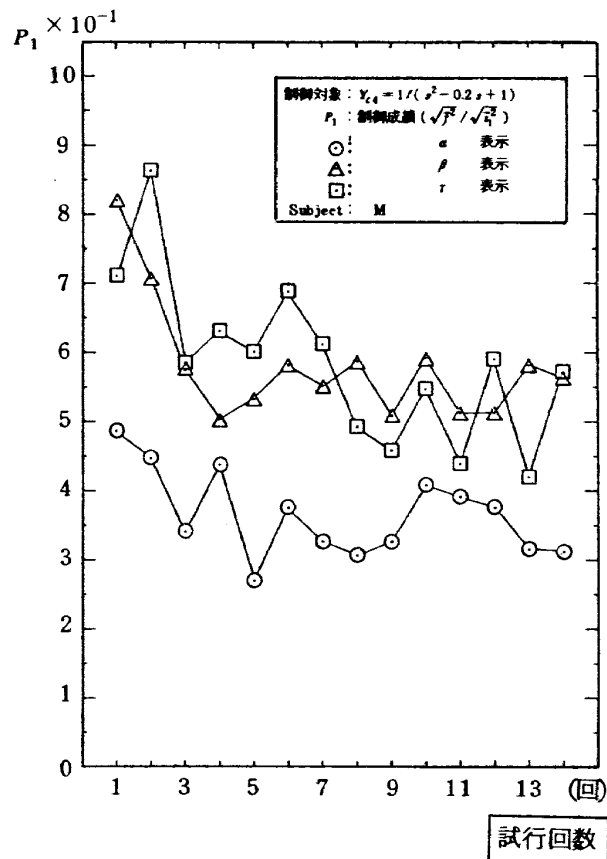


図 4-1-3 被験者Mの練習曲線例
($Y_c = Y_{c4}$)

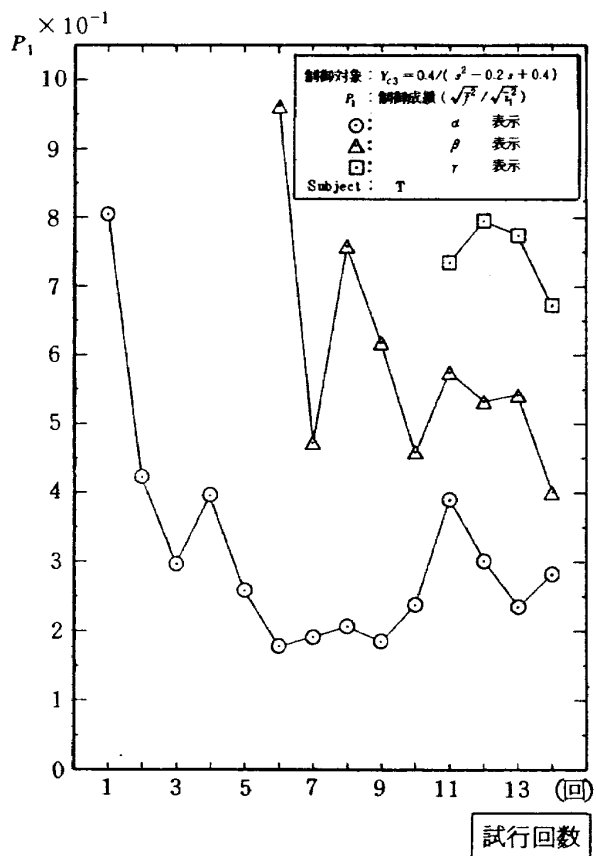


図 4-1-2 被験者Tの練習曲線
($Y_c = Y_{c3}$)

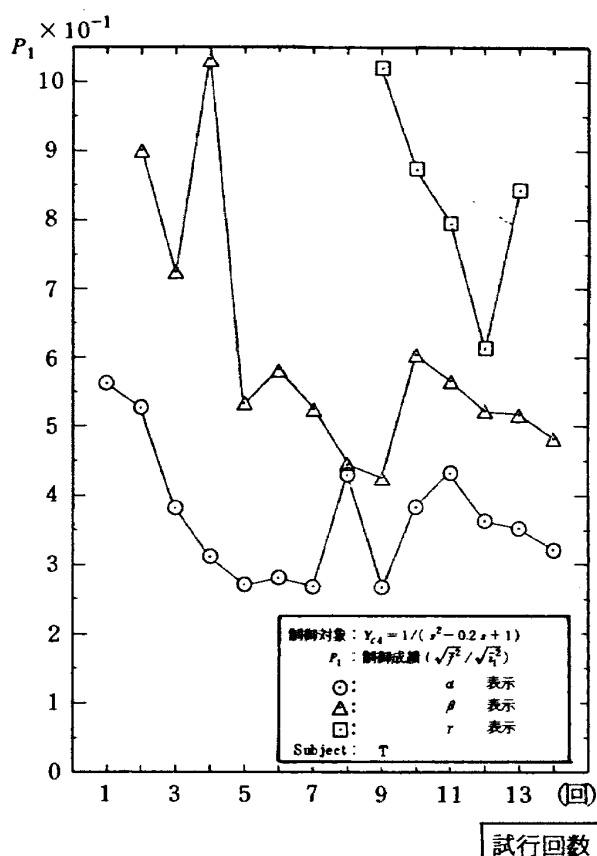


図 4-1-4 被験者Tの練習曲線例
($Y_c = Y_{c4}$)

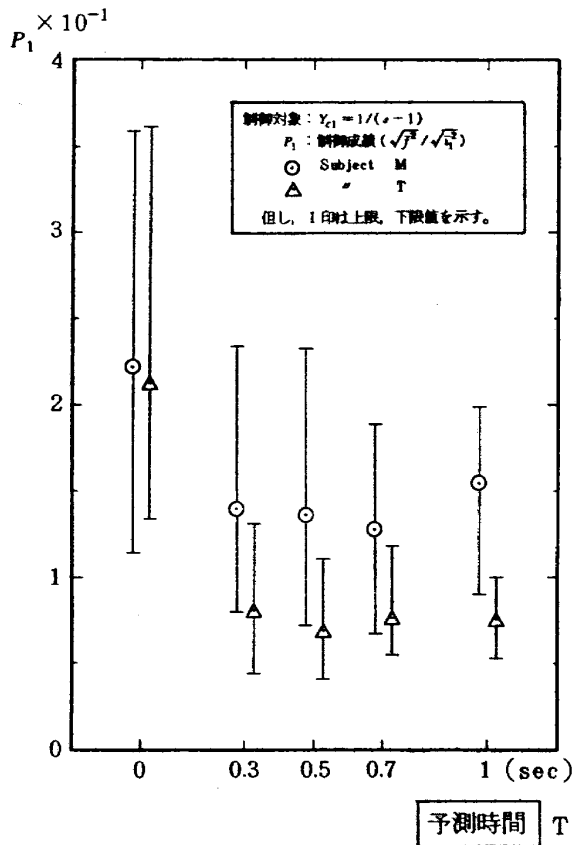


図 4-2-1 実験 2 の予測時間の違いによる成績の変動

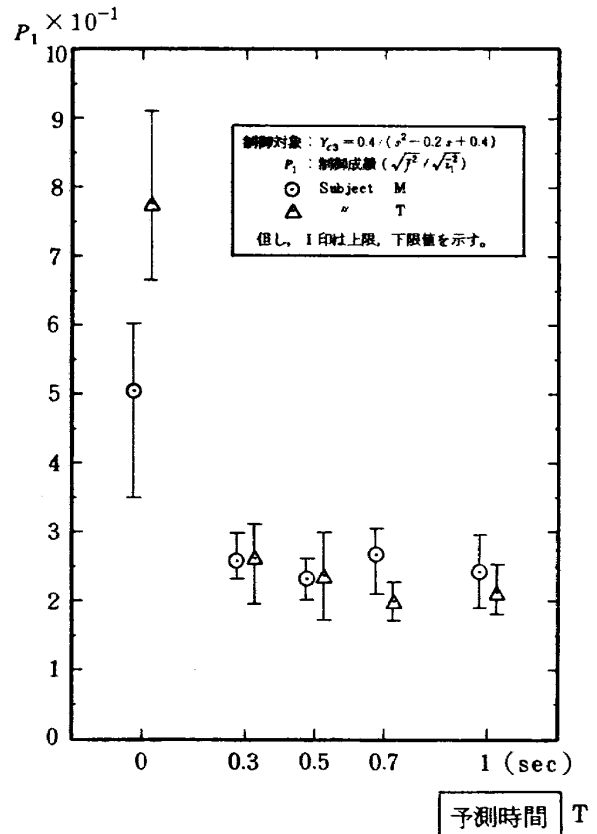


図 4-2-3 実験 2 の予測時間の違いによる成績の変動

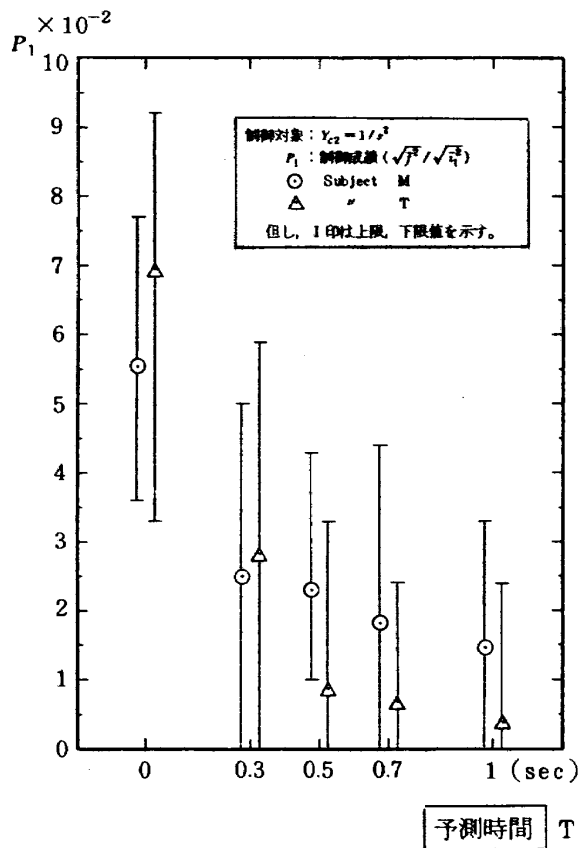


図 4-2-2 実験 2 の予測時間の違いによる成績の変動

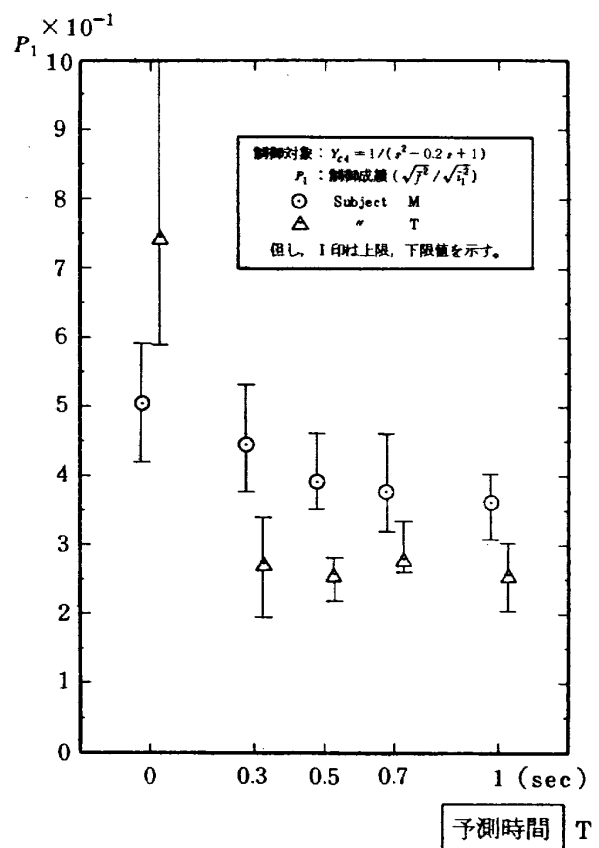


図 4-2-4 実験 2 の予測時間の違いによる成績の変動

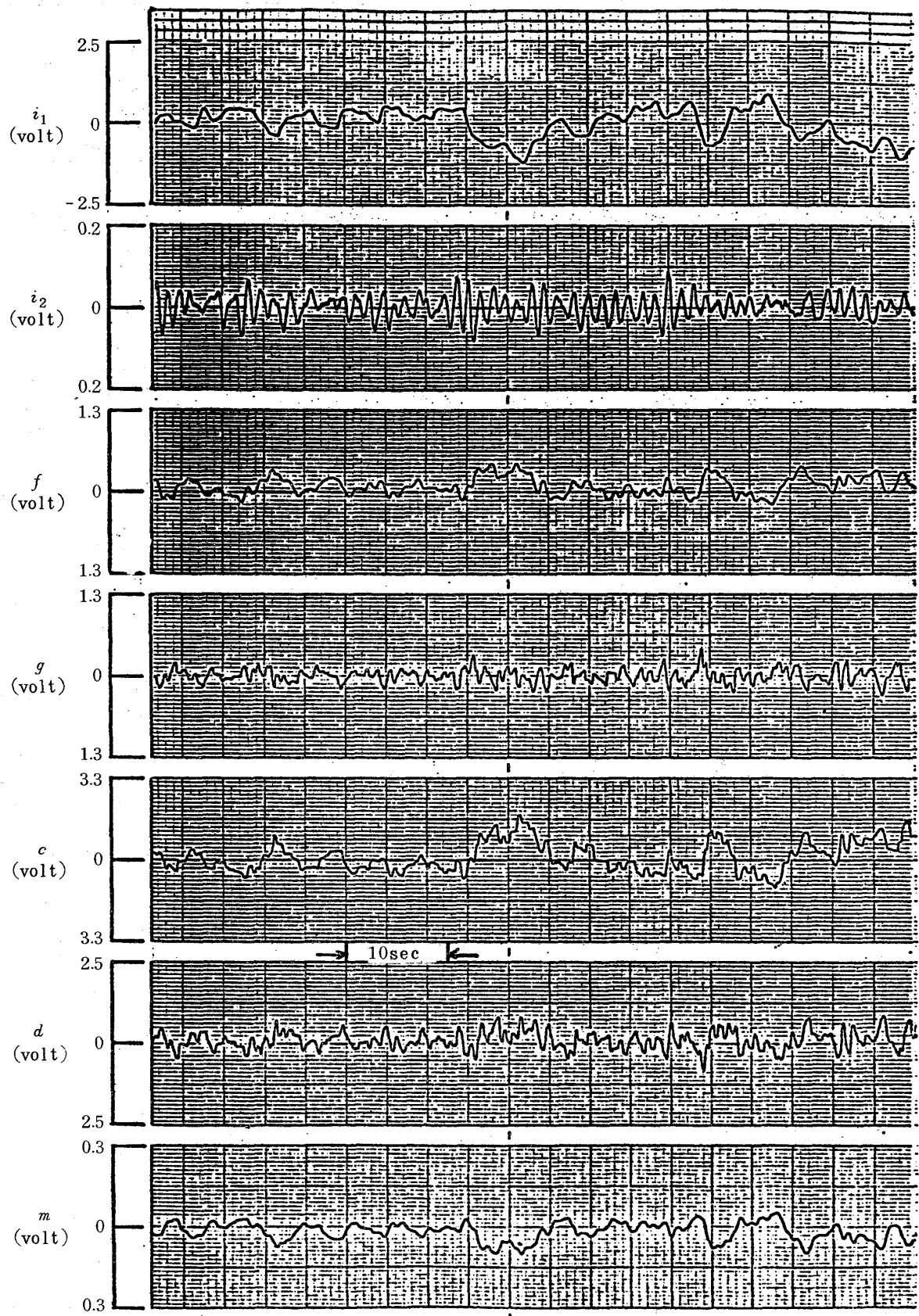


図 4-3-1 時間経過図の例 (α 表示, 被験者 O)

$$Y_{c1} = \frac{1}{s-1}$$

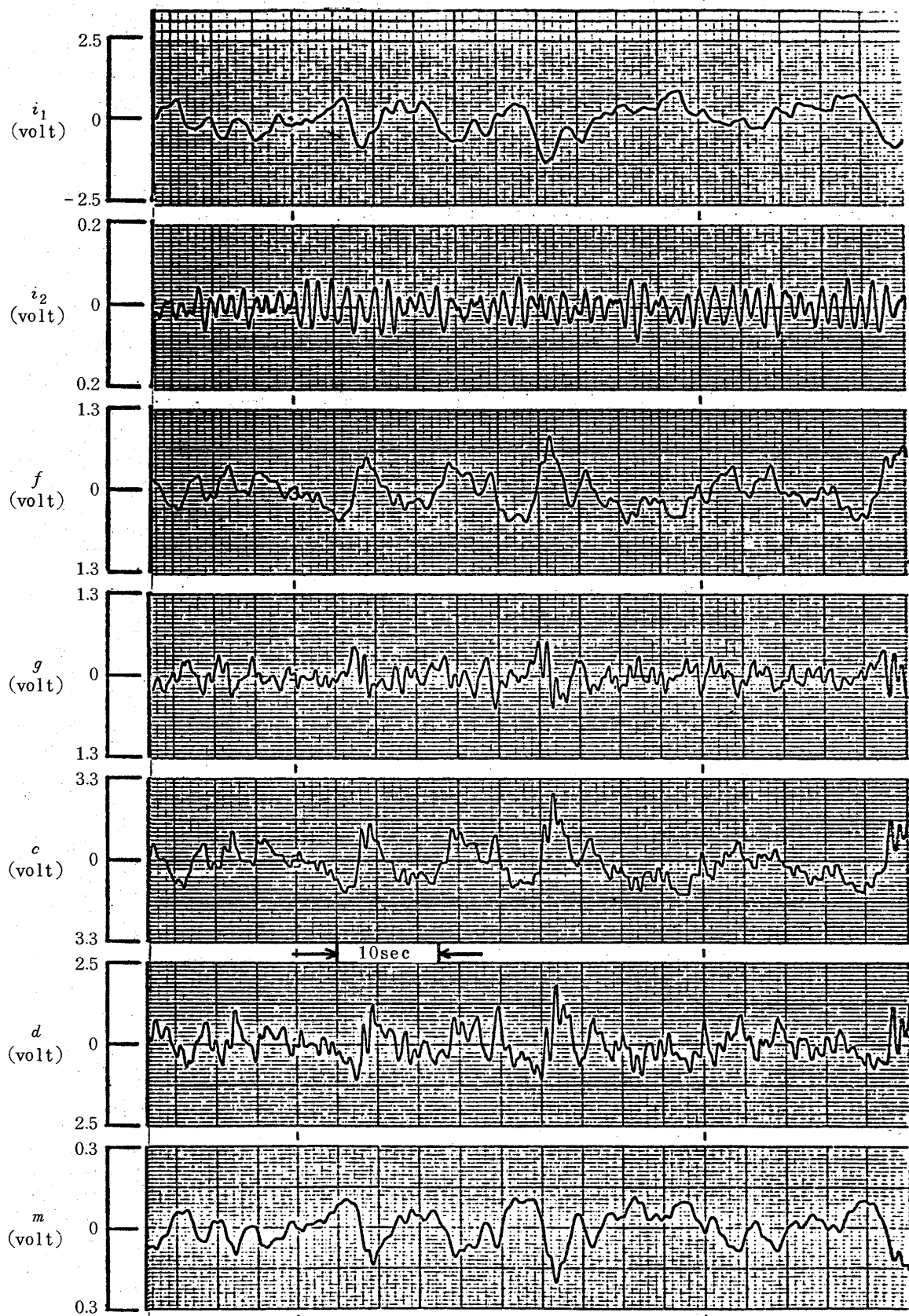


図 4-3-2 時間経過図の例 (β 表示, 被験者 O)

$$Y_{c1} = \frac{1}{s-1}$$

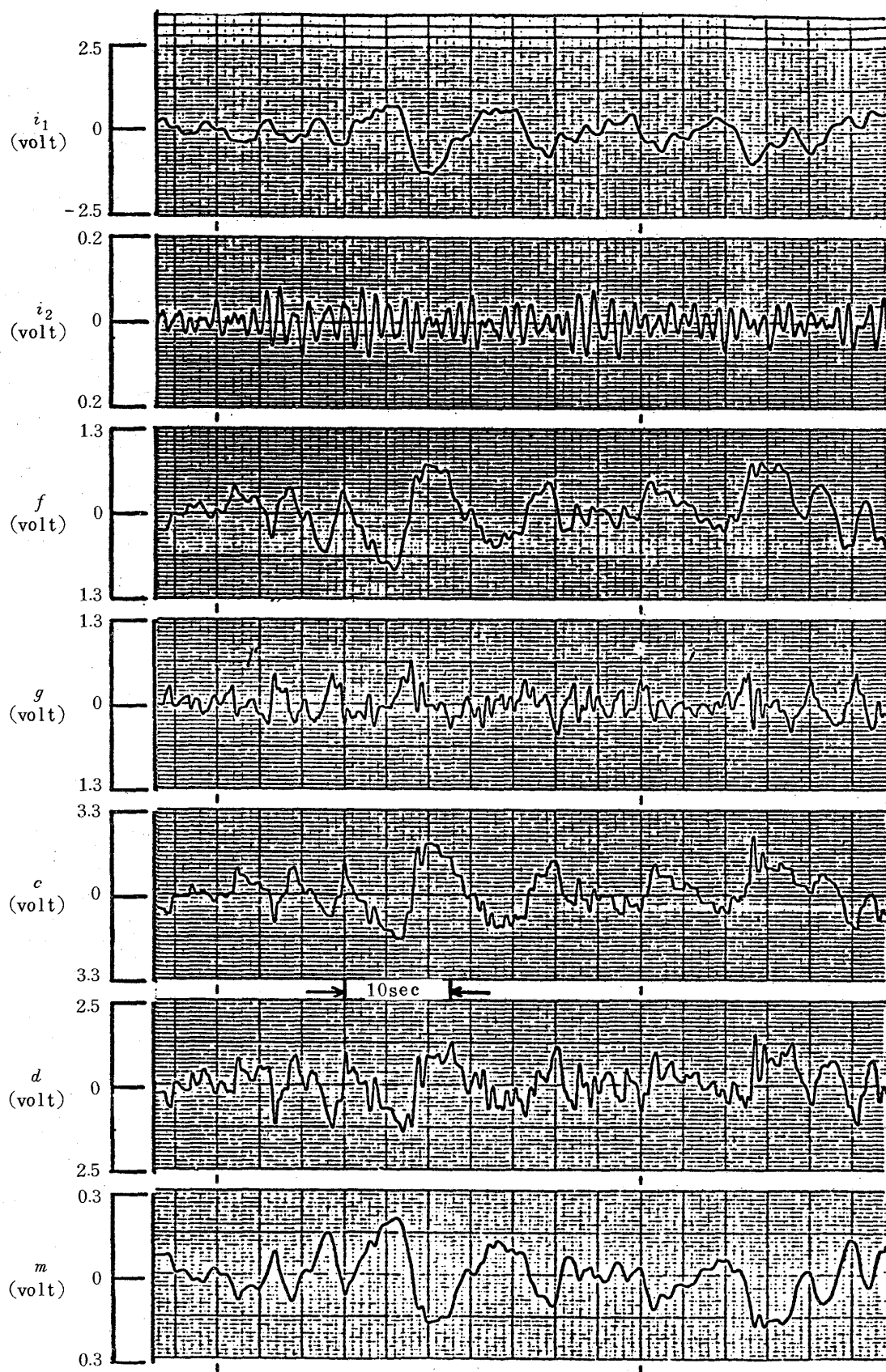


図 4-3-3 時間経過図の例 (r 表示, 被験者 O)

$$Y_{c1} = \frac{1}{s-1}$$

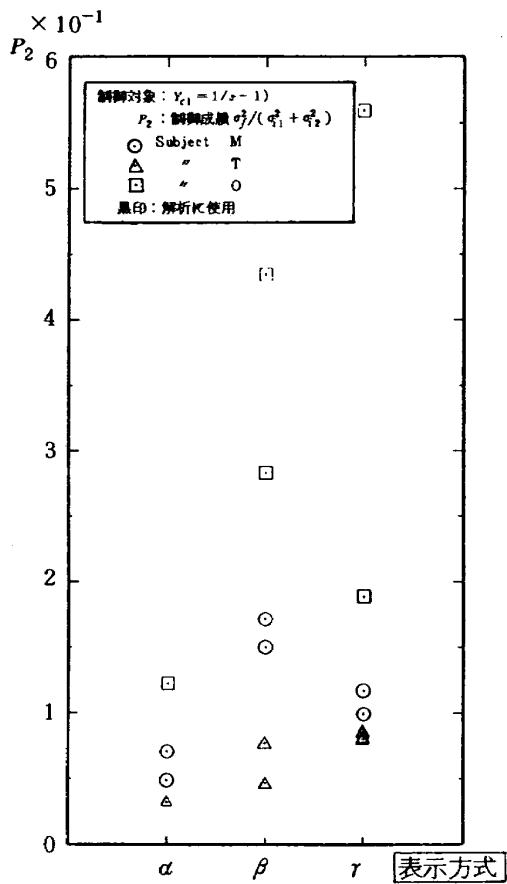


図 4-4-1 表示方式による成績差

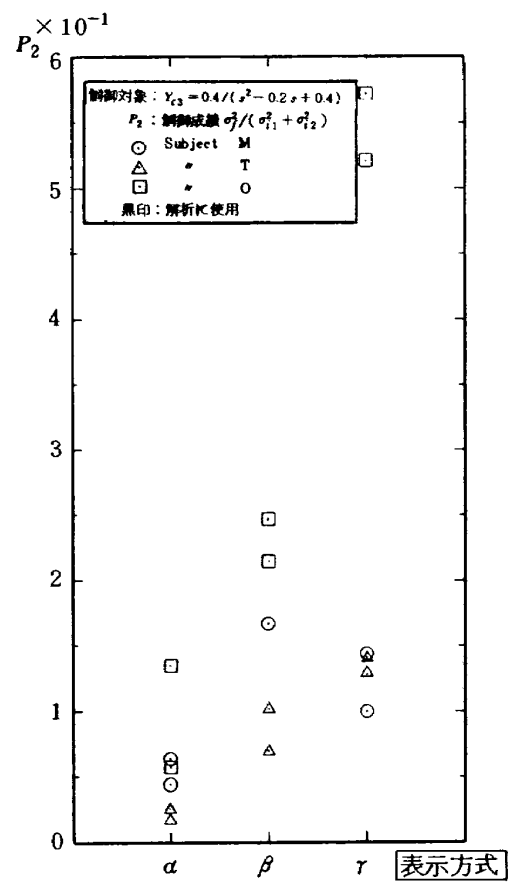


図 4-4-3 表示方式による成績差

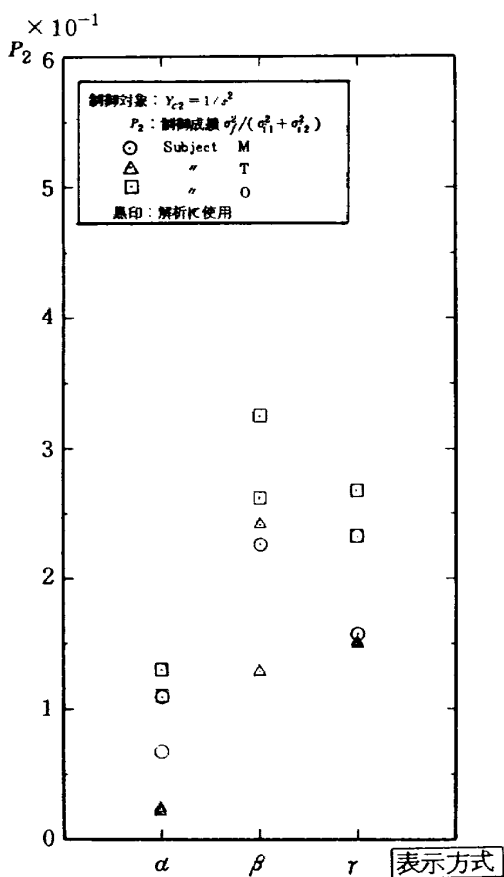


図 4-4-2 表示方式による成績差

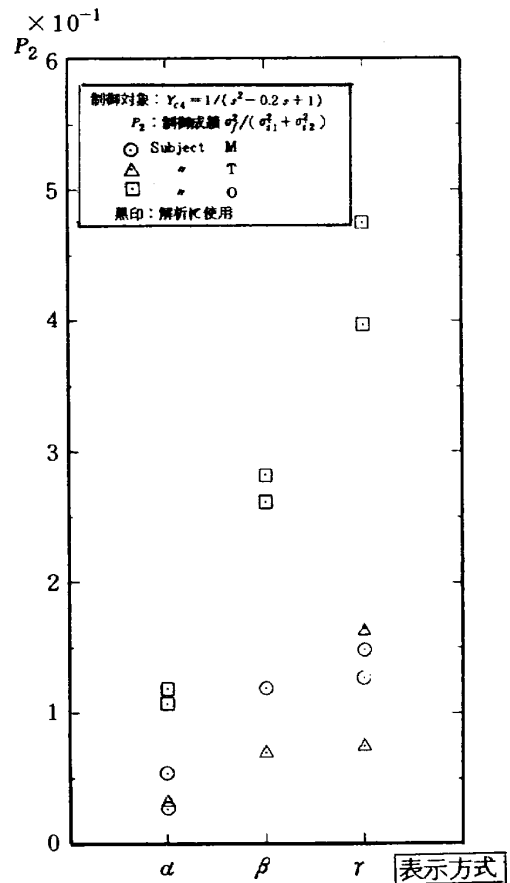


図 4-4-4 表示方式による成績差

r の順に大きくなることがわかる。これはそのまま制御成績の順である。

4.3.2 制御成績について

制御成績の指標として (2-3) 式の P_2 を用いた。3名の被験者、及び4種の制御対象の各々について P_2 の値を図4-4-1～4-4-4に示す。これらの図から次のことが得られる。

1) 制御対象の種類に関わりなく各被験者とも右上りの傾向が見られ、 α 表示は他の表示方式に比べ明らかに成績が良い。このことは、 α 表示ではオペレータは労せず f と g を見ることができ、精度良く制御し得たことを意味すると思われる。

2) β , r 表示について、 Y_{c4} では全ての被験者とも右上りの傾向があるが、 Y_{c1} 及び Y_{c2} では2人、 Y_{c3} では1人の被験者が右下りの傾向であり、成績の差が一定しない。すなわち、比較的制御の容易な Y_{c1} , Y_{c2} においては g を活用して制御する β 表示よりも f だけを凝視して進み制御を行う r 表示の方が制御成績が良いことがある。このことは、オペレータにとって制御の容易な制御対象の場合、情報の与え方が不適切であればその情報が与られない場合よりかえって成績が悪くなることを意味する。これは、航空計器に追加情報を付加する際に、情報を統合する方式を検討しておくことが重要であることを暗示すると考える。

以上の表示方式の違いによる制御成績の差は、以下でオペレータの記述関数と合わせて検討する。

4.3.3 記述関数同定法の妥当性について

ここでは、第3章に記した2種の記述関数同定法について、実験データからその妥当性を検討する。

まず、自己回帰モデルの次数に着目すると、いずれの場合も次数 L が5から25までの間で収束したことが確認された。また、(3-22)式で同定される制御対象の推定周波数応答を設定値と比較したところ両者がほぼ一致することも確認された。以上のことからデータ解析プログラムの妥当性が確認された。

次に、3.2で述べた雑音源の独立性について確認するために2次元及び3次元で解析した各々の場合の雑音源相互の推定相関を調べた。その結果すべての場合に相関が小さく、自己回帰モデルが有効に得

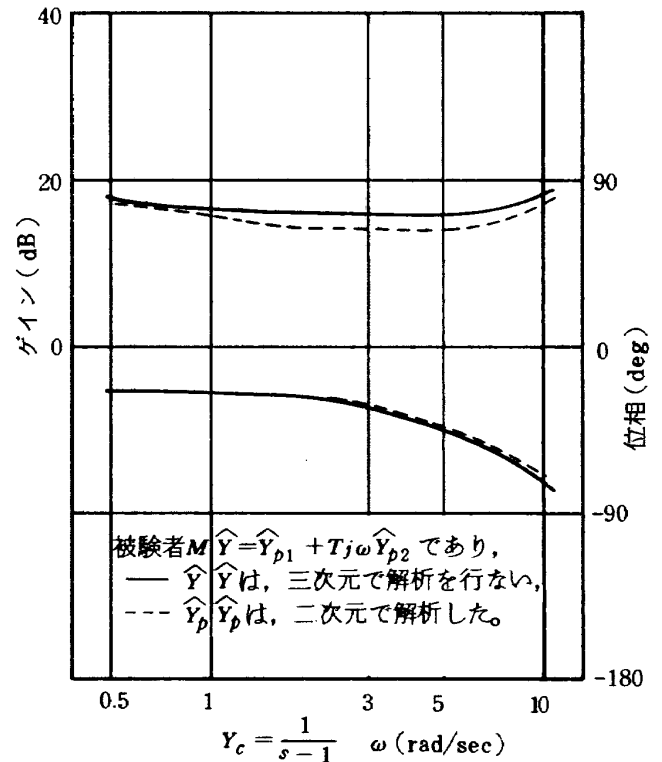


図4-5 \hat{Y} と \hat{Y}_p との比較の一例

られていることがわかった。

さらに、3次元の解析で求めた \hat{Y}_{p1} と \hat{Y}_{p2} を利用して $\hat{Y}_{p1} + Tj\omega\hat{Y}_{p2}$ ($T = 0.5$ [sec]) を計算し、これと2次元の解析で求めた \hat{Y}_p とを比較したところ、図4-5の例の様に両者が合致していることがわかった。

以上より、本解析で得られた自己回帰モデルが以後の検討を進めるにあたりほぼ妥当であると考えられる。

4.3.4 オペレータの周波数特性について

第3章で述べた様に、時系列解析によって2次元及び3次元の自己回帰モデルを同定し、これからオペレータの記述関数を求めた。実験では同一のケースについて二度繰り返したが、2回目の試行について解析した。図4-6-1～図4-6-12はボード線図で示した記述関数である。図中で、○印は α 表示、△印は β 表示を示す。また、 r 表示はその解析法が異なるため実線で結び、オペレータの記述関数を Y_p で表わし別の図とした。

まず、被験者別に α 及び β 表示におけるゲイン特性に着目して整理した結果を表4-1に示す。表中で、>印はゲインの大小を示し、>>印は差が大きい場合、=印はゲインにはほとんど差の見られない場

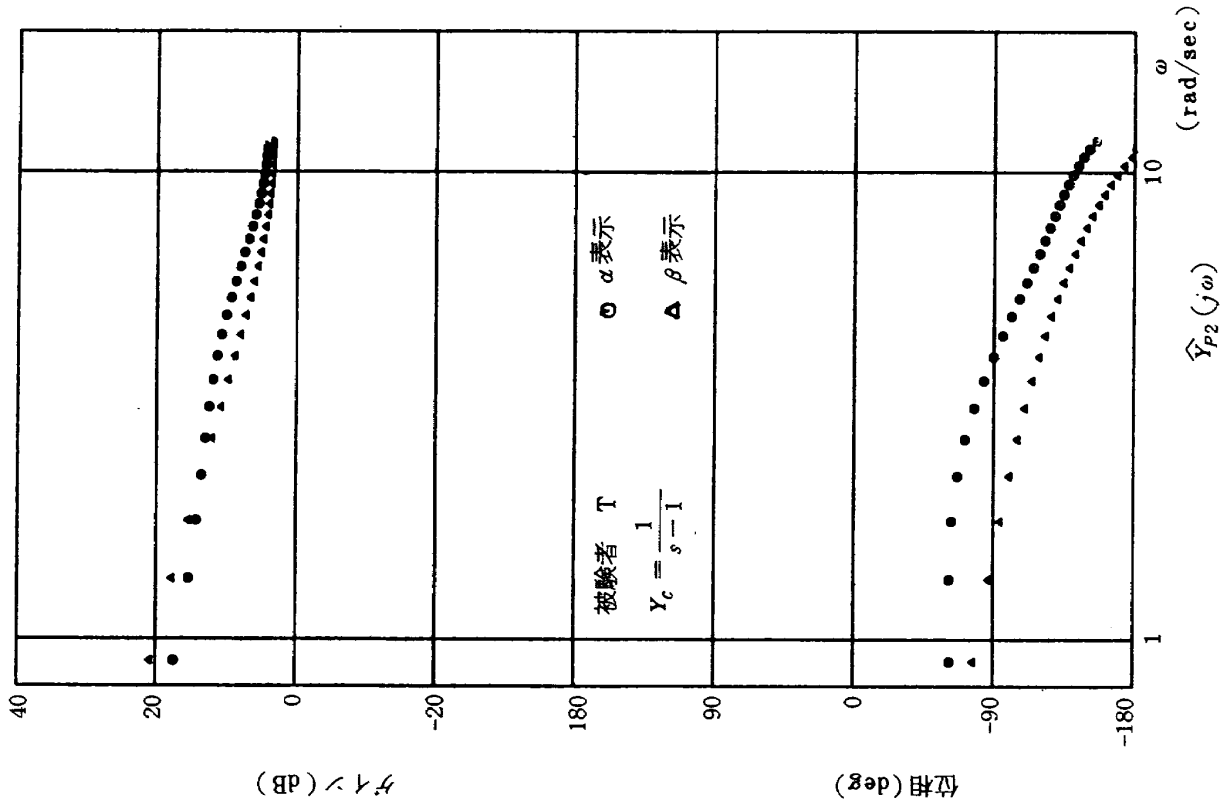


図 4-6-2 オペレータの記述関数

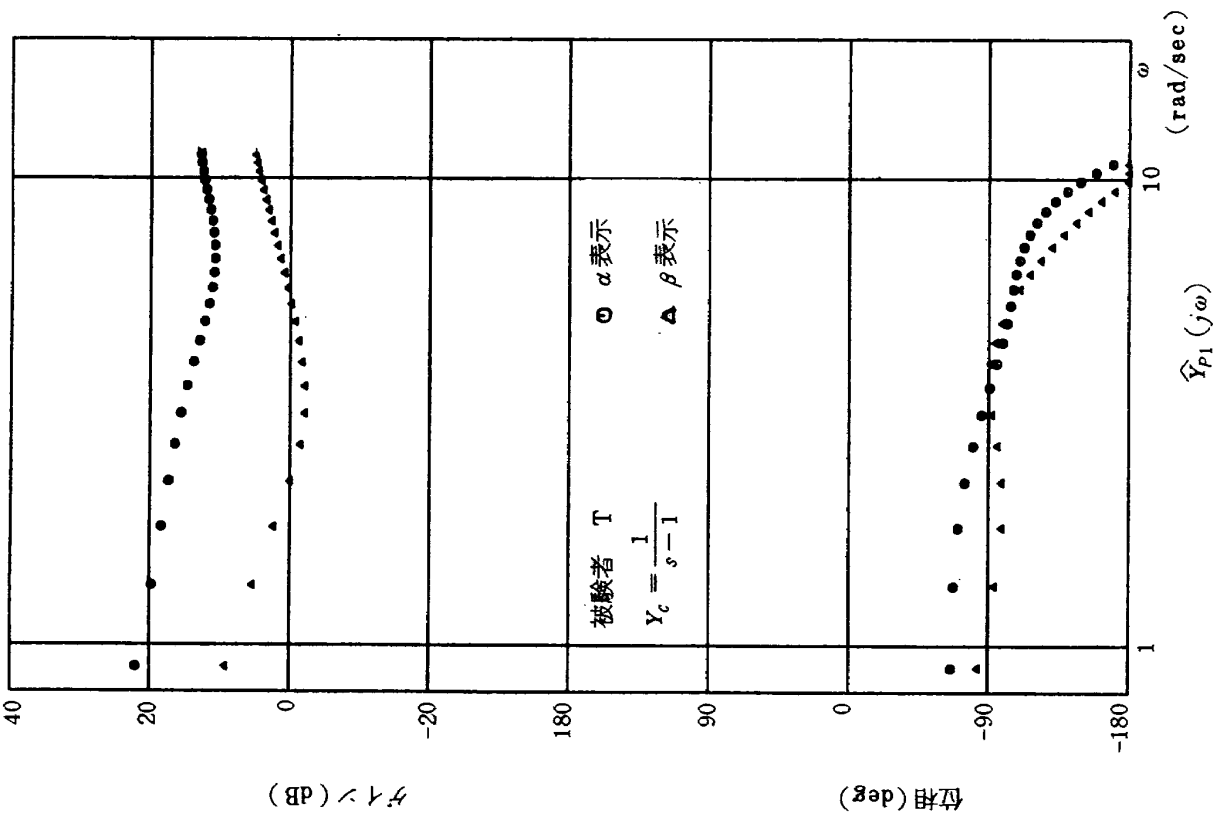


図 4-6-1 オペレータの記述関数

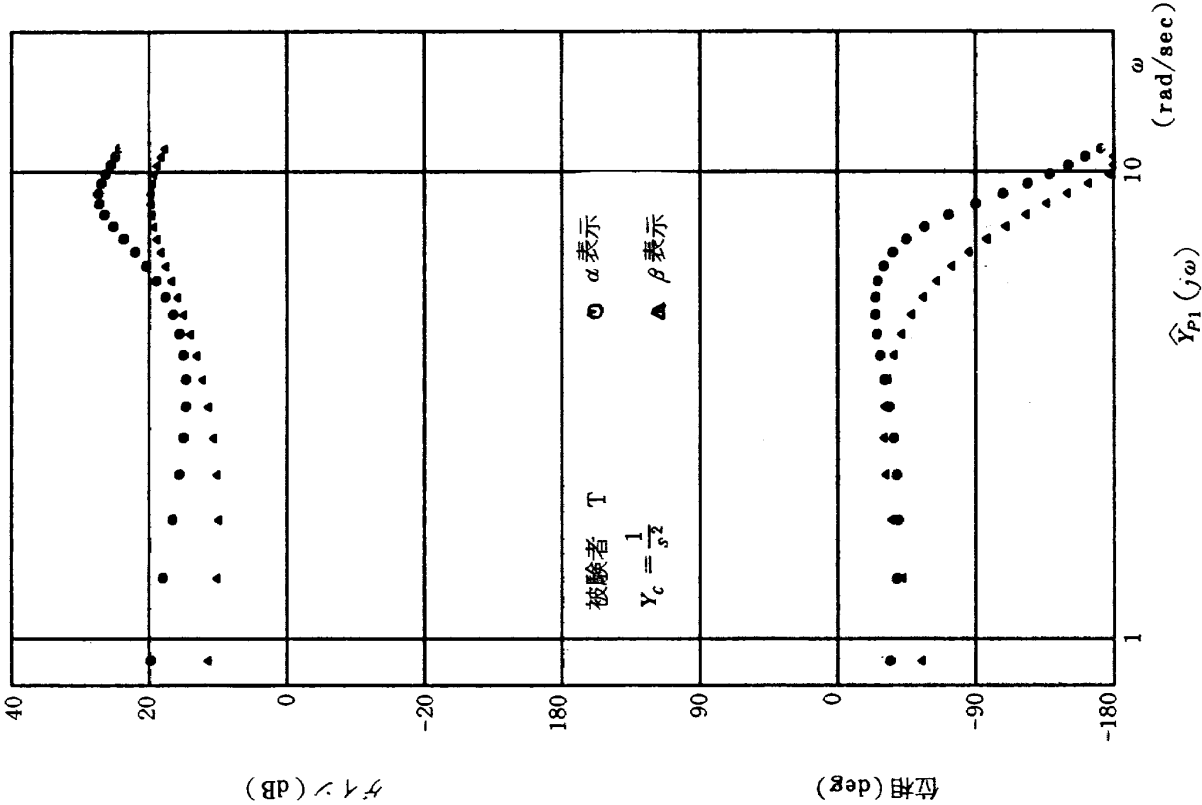


図 4-6-4 オペレータの記述関数

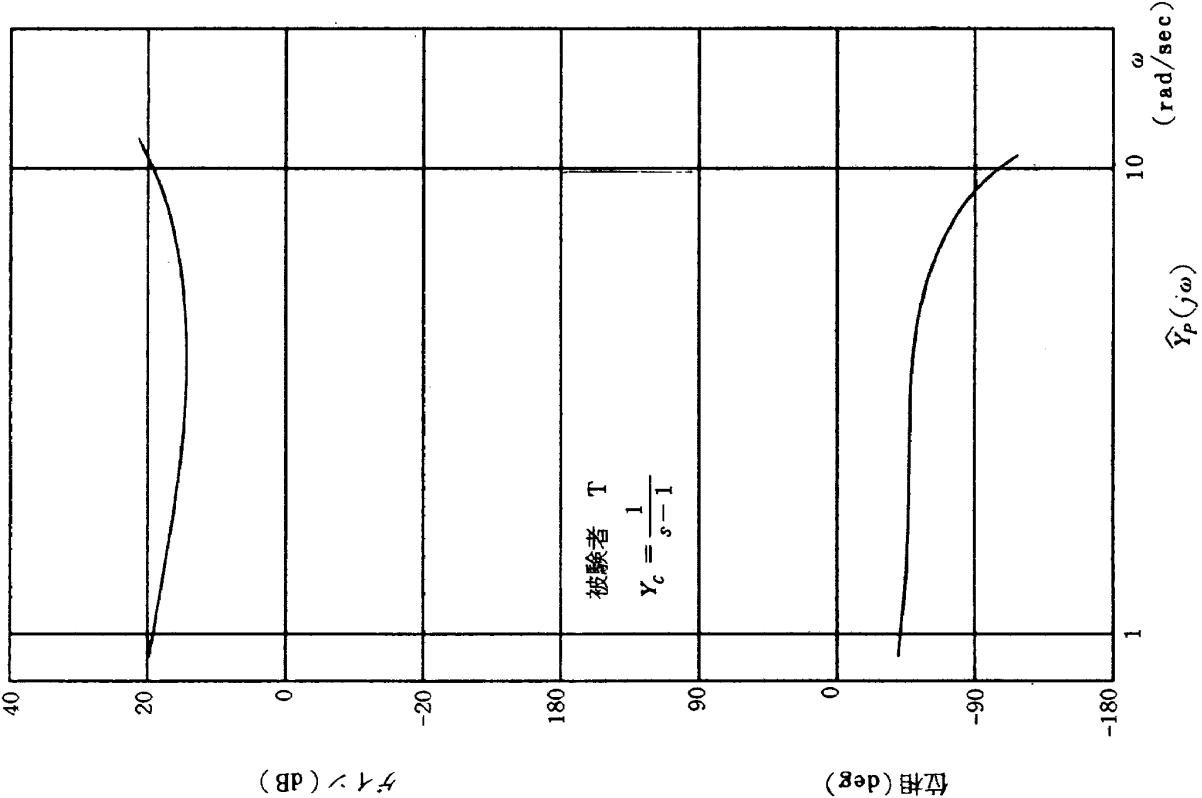


図 4-6-3 オペレータの記述関数

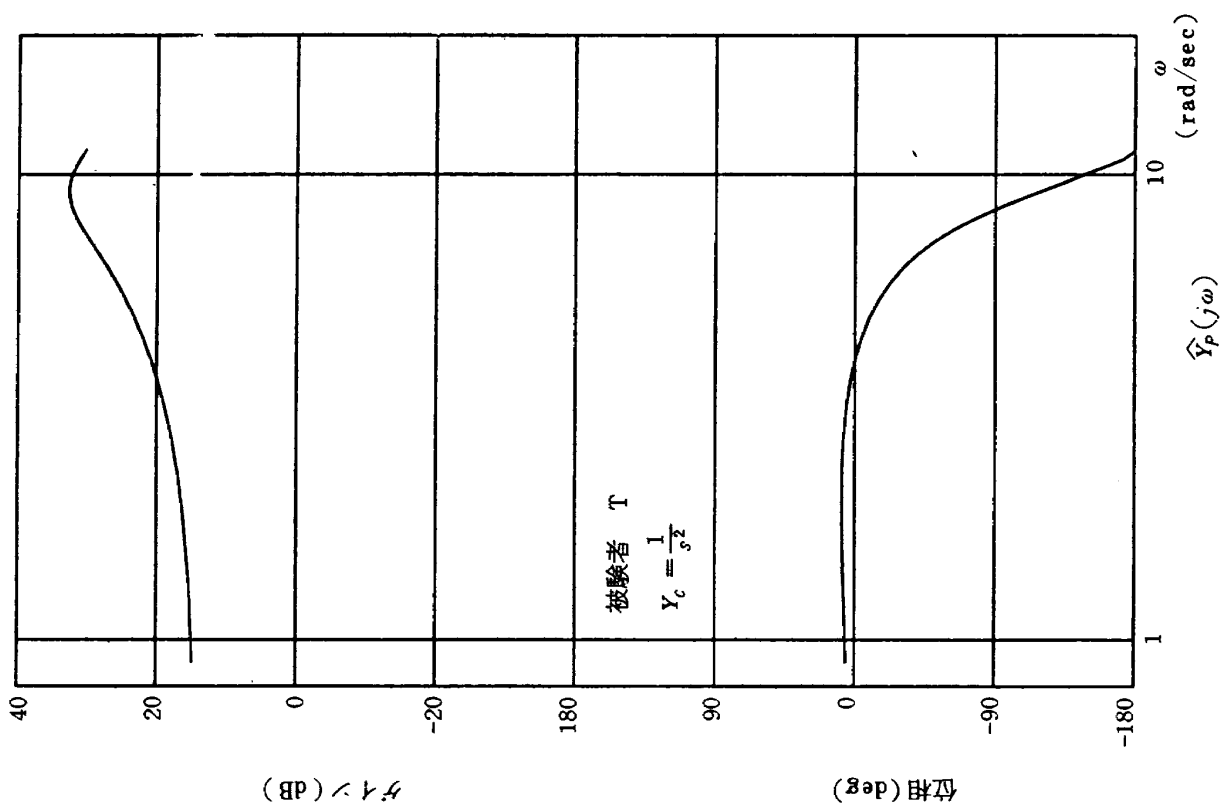


図 4-6-6 オペレータの記述関数

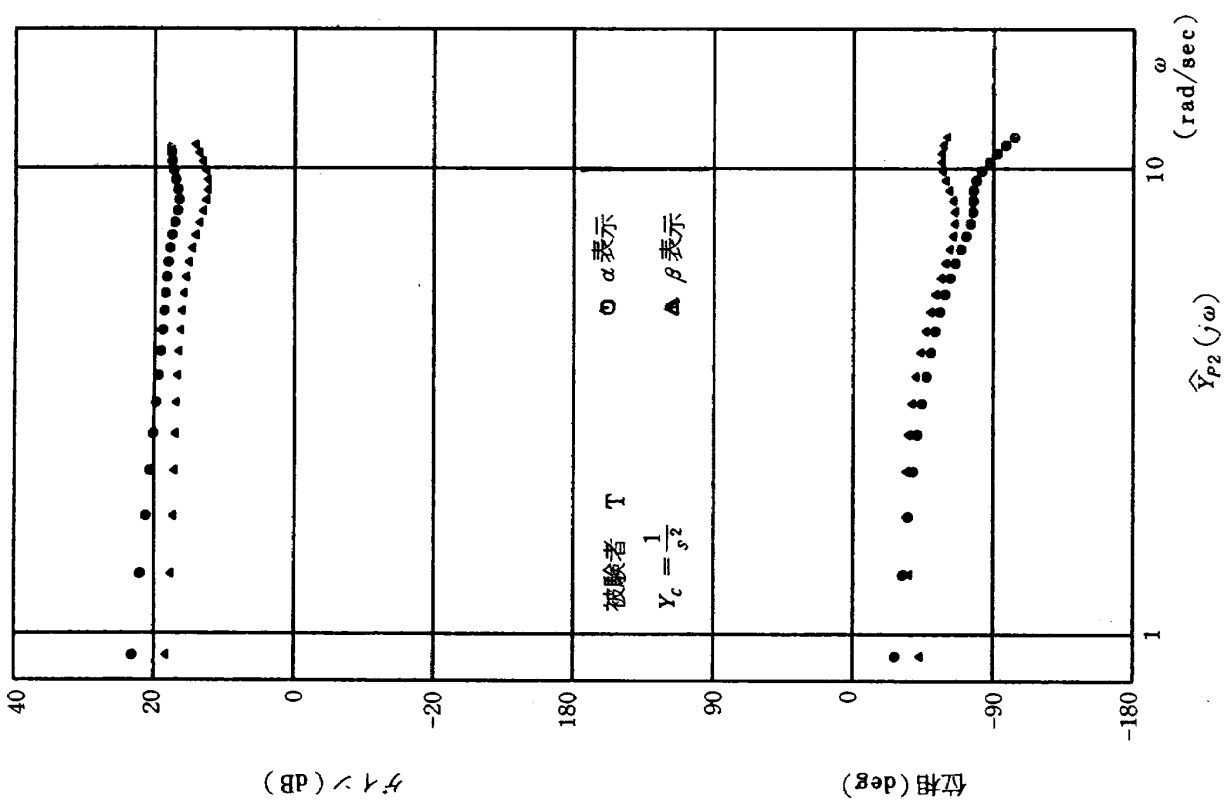


図 4-6-5 オペレータの記述関数

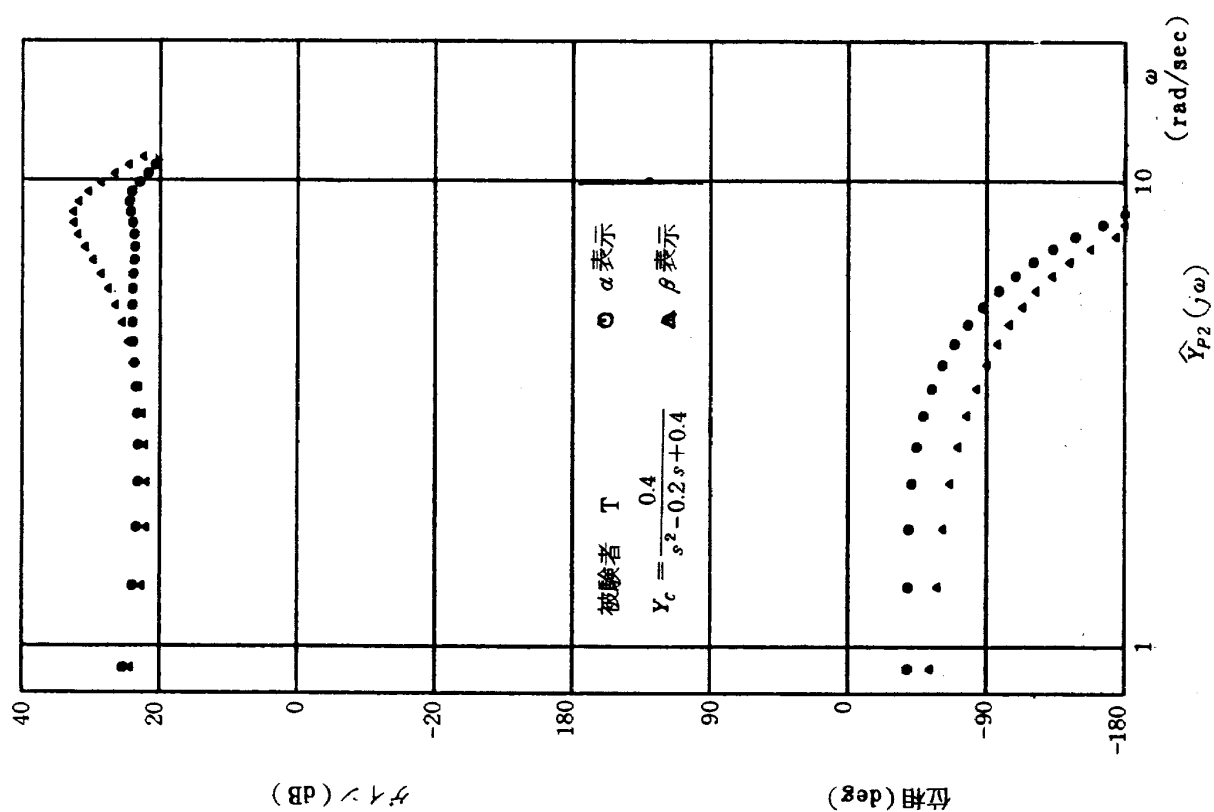


図 4-6-8 オペレータの記述関数

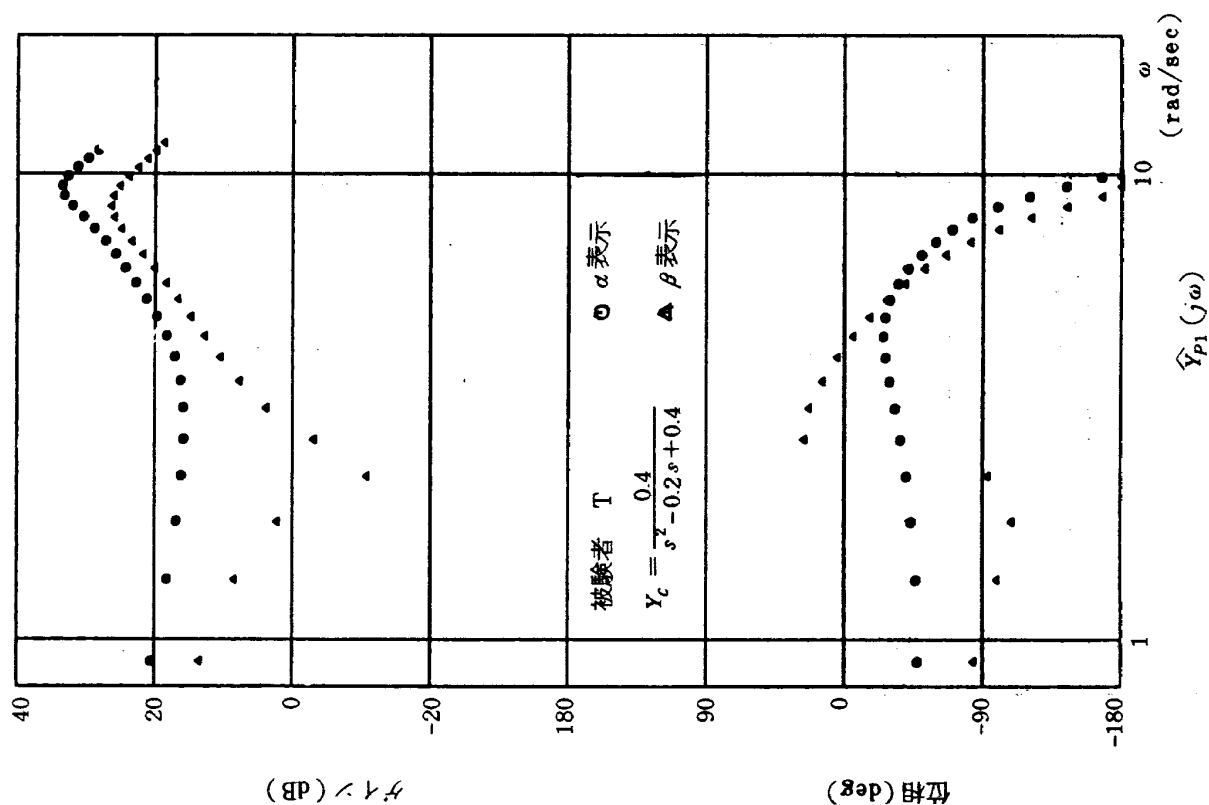


図 4-6-7 オペレータの記述関数

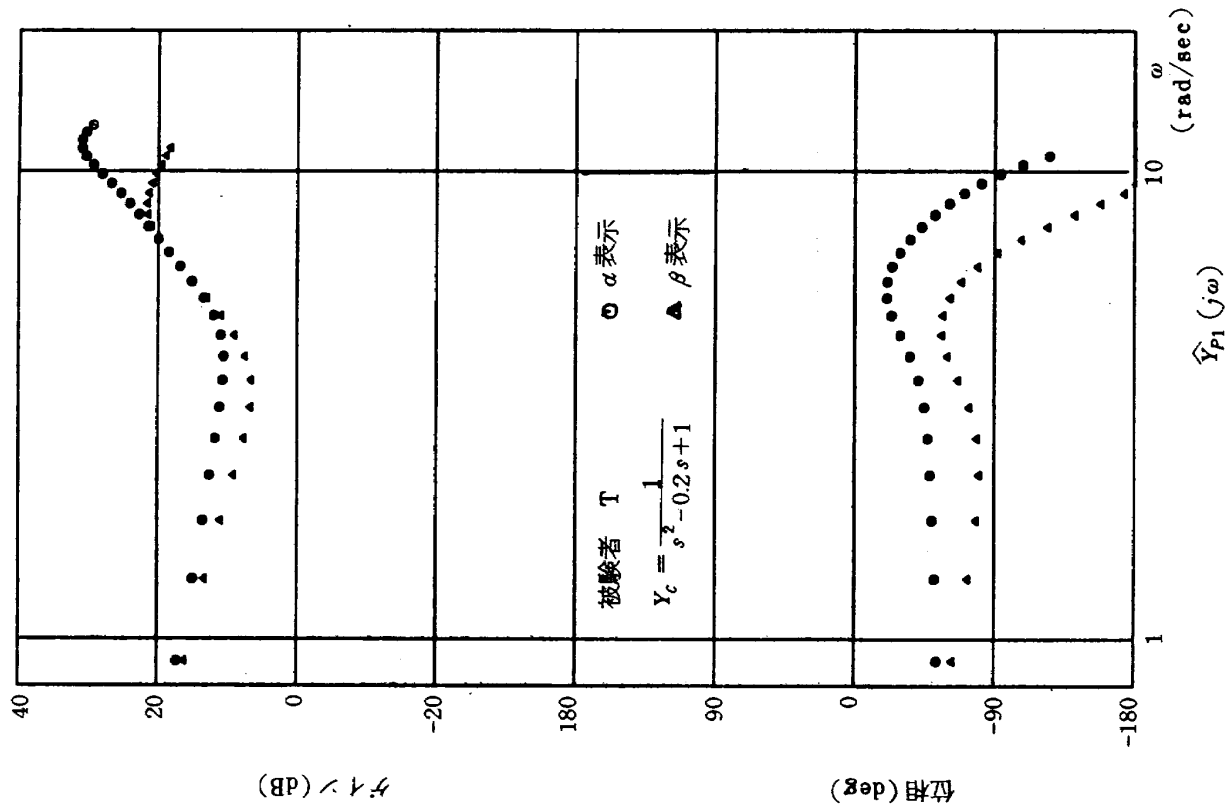


図 4-6-9 オペレータの記述関数

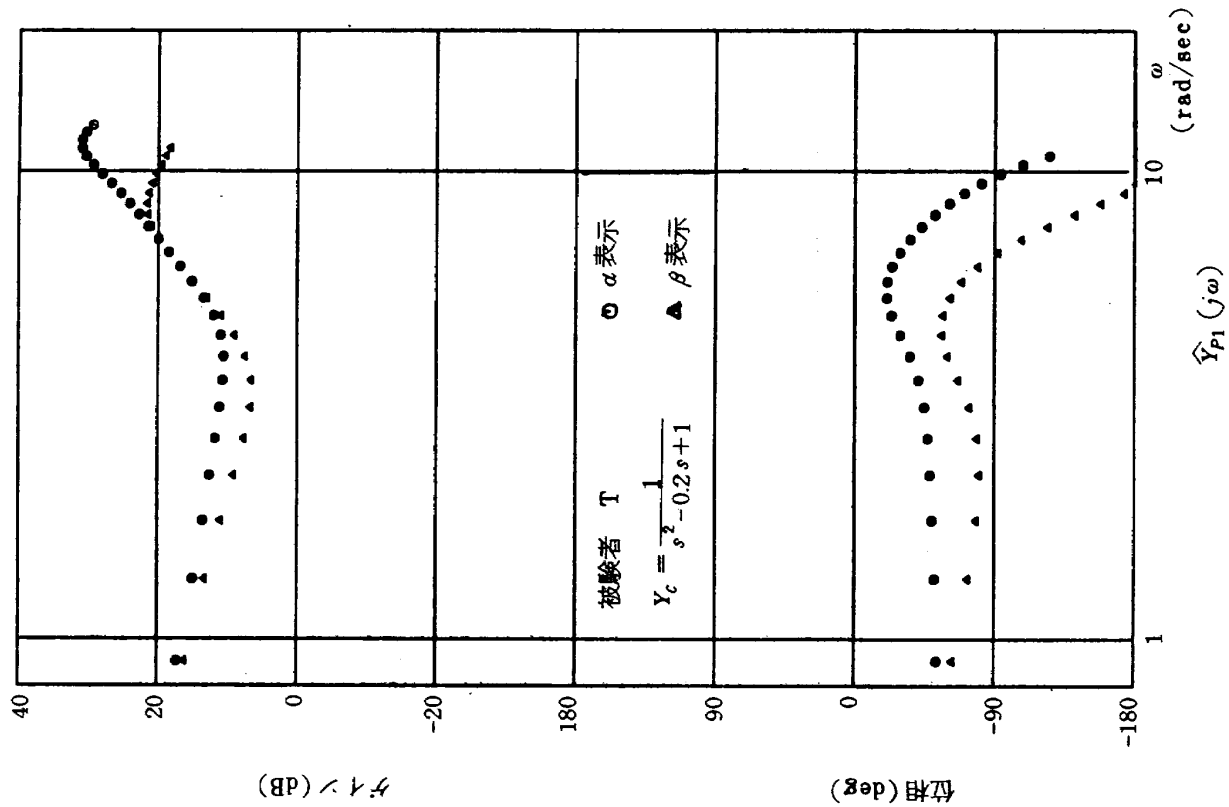


図 4-6-10 オペレータの記述関数

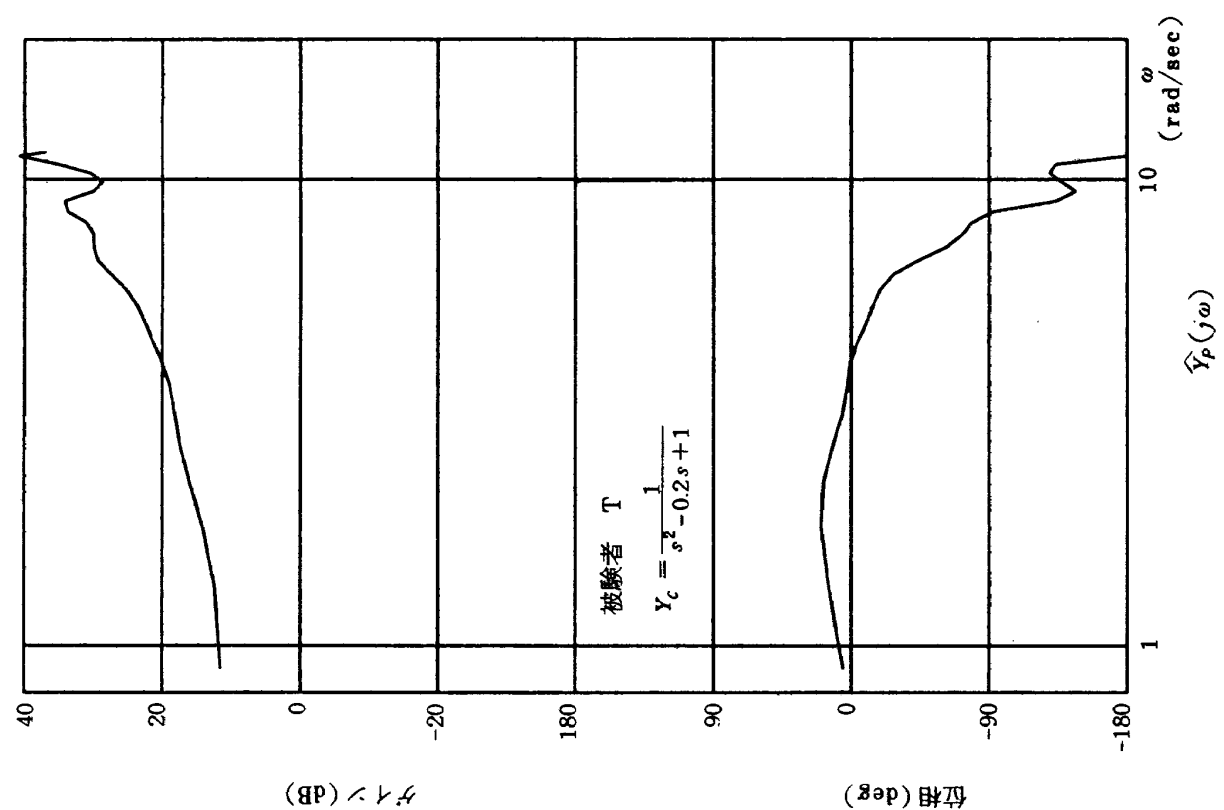


図 4-6-12 オペレータの記述関数

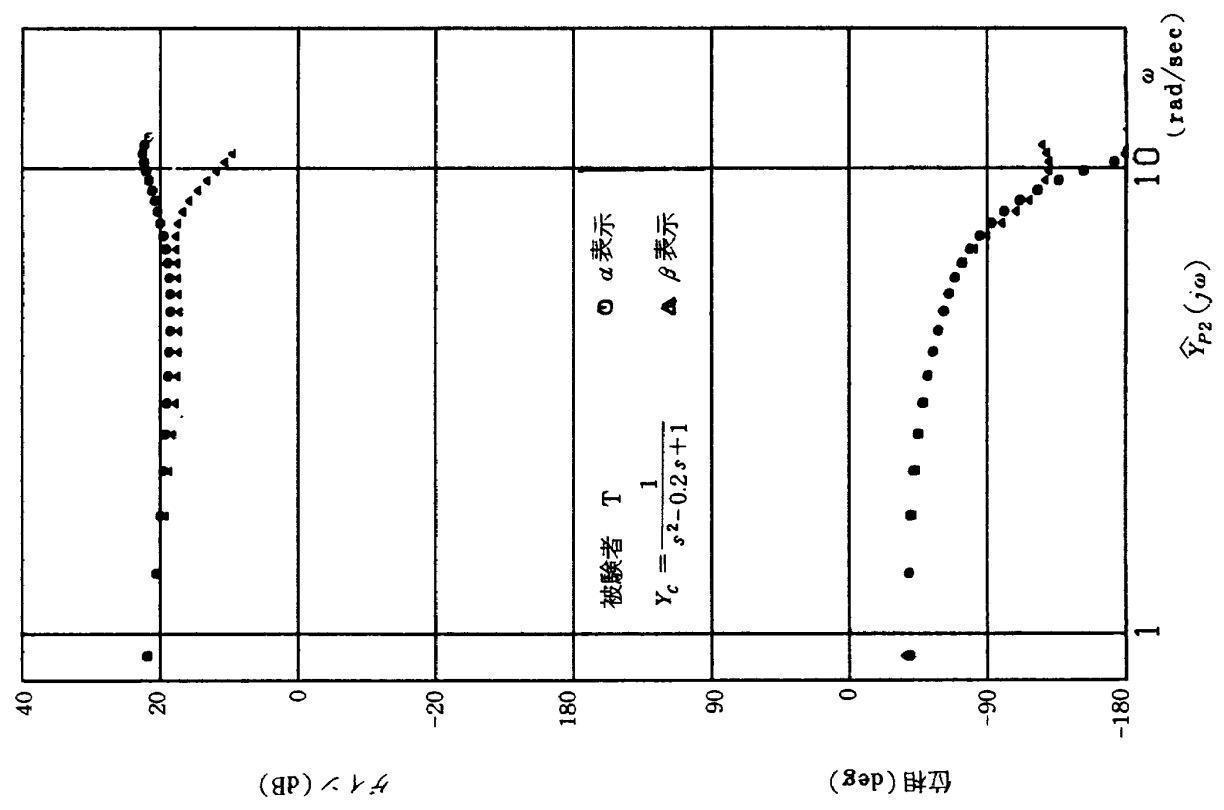


図 4-6-11 オペレータの記述関数

表 4-1 α 及び β 表示に関するゲインの比較

記述関数		Y_{P1}	Y_{P2}
制御 対象	被験者		
Y_{c1}	M	$\alpha < \beta$	$\alpha \gg \beta$
	T	$\alpha \gg \beta$	$\alpha = \beta$
	O	$\alpha > \beta$	$\alpha > \beta$
Y_{c2}	M	$\alpha \ll \beta$	$\alpha \gg \beta$
	T	$\alpha > \beta$	$\alpha > \beta$
	O	$\alpha \gg \beta$	$\alpha = \beta$
Y_{c3}	M	$\alpha < \beta$	$\alpha > \beta$
	T	$\alpha > \beta$	$\alpha = \beta$
	O	$\alpha > \beta$	$\alpha > \beta$
Y_{c4}	M	$\alpha < \beta$	$\alpha > \beta$
	T	$\alpha > \beta$	$\alpha = \beta$
	O	$\alpha > \beta$	$\alpha = \beta$

合を示す。ここで、比較した周波数範囲はオペレータが制御していると思われる $0.5 \sim 5$ [rad/sec] とした。この表から、M以外の被験者では Y_{P1} 、 Y_{P2} とも α 表示の場合のゲインが β 表示に比べ高くなっている。これは、 α 表示では f 及び g の両者に容易に注目でき、これらの情報を有効に利用して大きなゲインで制御できたことを意味する。このことは、4.3.2の制御成績において、 α 表示の方が良かったことと合致する。次に被験者Mに着目すると、 Y_{P1} におけるゲインは全ての制御対象について、 α 表示より β 表示の方が大きい。これは β 表示では f により注目した制御を行ったことを意味すると考える。一方、Mでは β 表示での Y_{P2} のゲインが非常に小さい。これらのことから、被験者Mは α 表示では f 、 g の両者を利用して制御したが、 β 表示では f と g が個々に表示されているため、 g にはほとんど注目せず、その分 f に注目して制御したと考えられる。このことは、 β 表示の制御特性の内、 Y_{P1} が r 表示の場合の Y_P に類似していることから確かめられる。しかし、制御成績からも明らかな様に、結果的には α 表示の成績の方が β 表示の成績よりも良好である。これは、Mが f に注目して制御し、その分 g に対するゲインが低下し、その結果が成績に反映されたから

であると思われる。このことは次節でさらに考察を進める。

4.3.5 クロスオーバー周波数について

前節で考察した様に、制御成績の差がゲインの差で表われることが明らかになったので、それぞれの場合についてクロスオーバー周波数を求めた。ここで、 α 及び β 表示方式の場合のオペレータ側の周波数応答は前節までの記述関数 \hat{Y}_{P1} 、 \hat{Y}_{P2} を用いて次式の様にとまとめて扱った。

$$\hat{Y}(j\omega) = \hat{Y}_{P1}(j\omega) + j\omega T \hat{Y}_{P2}(j\omega) \quad (4-1)$$

ここで、 T は実験3で設定した 0.5 [sec] である。

クロスオーバー周波数 (ω_c) は、開ループ伝達関数のゲイン特性が 0 [dB] であるときの周波数であり、閉ループ系のピーク周波数あるいはバンド幅にほぼ比例する。表示方式の違いによる ω_c の変動を図4-7-1～図4-7-4に示す。これらの図よりまず α 表示と β 表示の比較を行うと、全ての場合に右下がりの傾向が見られる。前節で述べた様に、M以外の被験者では全ての制御対象について Y_{P1} 、 Y_{P2} とも α 表示の方が β 表示に比べゲインが高くなったことから、上記の結果は当然であると言える。さて、クロスオーバー周波数が高い程入力信号に対して高い周波数までオペレータが追従でき得ることを意味する。従って上記の結果は、 α 表示の方が β 表示よりも高い周波数まで制御し得たことになる。

4.3.2で示した制御成績の差は、この結果を表わしたものと考えられる。被験者Mの場合、前節で示した様に α 表示での Y_{P1} のゲインが他の表示方式に比べ低いので、 α 表示では f に対する注目の程度が比較的少ないと言える。しかし、この場合でも Y_{P2} のゲインが大きいことにより全体としてのゲインは他の表示方式よりも大きくなっている。即ち、被験者Mでは、 α 表示において g に基づいた補償が非常に効果的であり、その結果が成績に表われたと考える。まとめると、全ての被験者は、 α 表示という一種の統合表示によって、 Y_{P1} のゲインの大小にかかわらず労せず g を見ることができ、全体としての開ループ特性のゲインを上昇させることができた。この結果と4.3.2で求めた制御成績とは同傾向である。即ち、 ω_c が大きい程成績が良くなる。このことは、オペレータが f を制御するにあたりその予測値であ

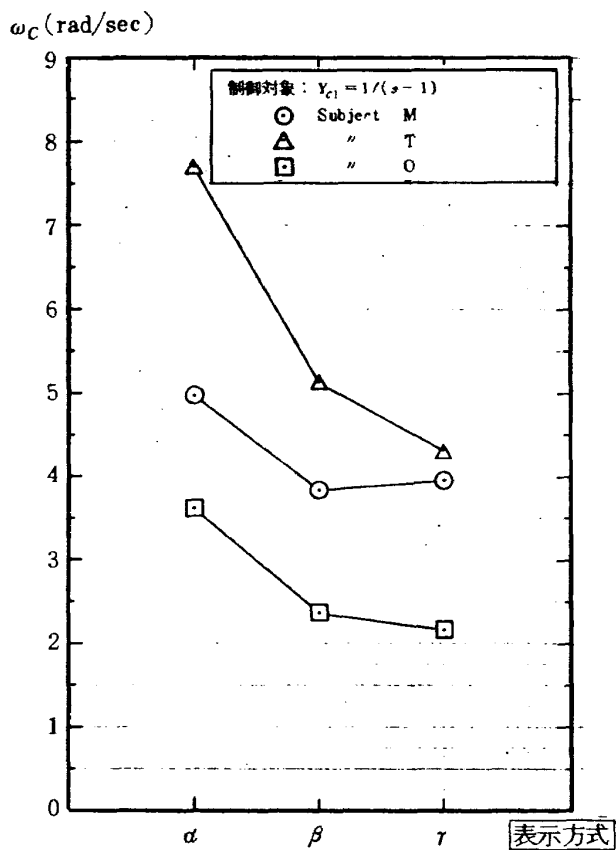


図 4-7-1 表示の相違によるクロスオーバー周波数の変動

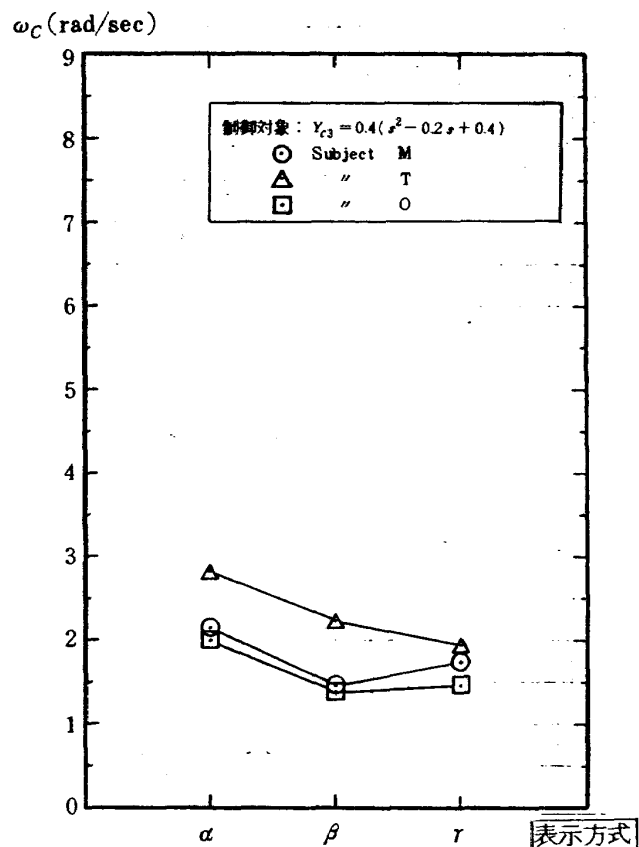


図 4-7-3 表示の相違によるクロスオーバー周波数の変動

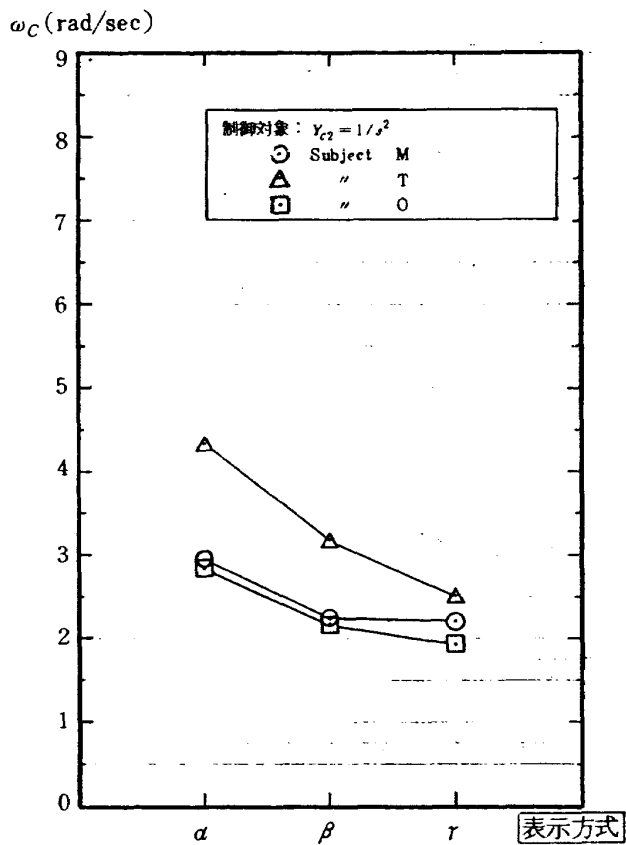


図 4-7-2 表示の相違によるクロスオーバー周波数の変動

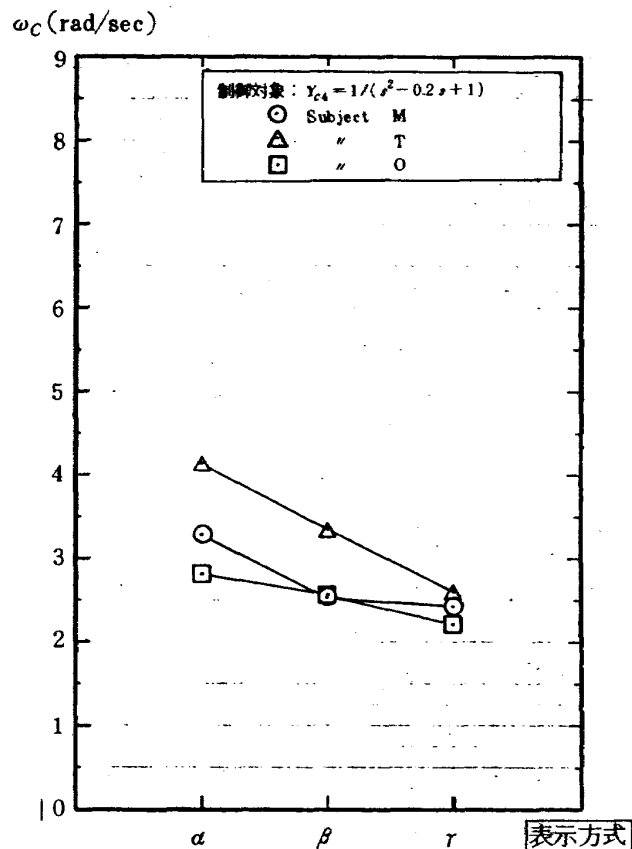


図 4-7-4 表示の相違によるクロスオーバー周波数の変動

る g が効果的に表示されていれば、それが非常に有効な情報であることを意味する。一方、 β 表示では f 、 g の両者に着目して制御することが α 表示に比べて困難となり、 f を中心にして制御している。従って g に対するゲインが低下し、結果的に ω_c が α 表示よりも小さくなったと考えられる。

次に β 表示と r 表示とを比較する。まず、 Y_{C4} では全ての被験者において β 表示の方が r 表示よりも ω_c が大きい。しかし、他の制御対象では一定の傾向は得られない。これも4.3.2で得た制御成績の傾向と一致する。即ち、比較的制御の容易な Y_{C1} 、 Y_{C2} 、更には Y_{C3} では、 β 表示で視線を移し換えて g を利用するよりも f のみに注目することで充分効果的に制御できたと思われる。しかし、比較的制御の困難な Y_{C4} では、予測情報を利用せずに制御することが難しく、 β 表示の方が r 表示よりも成績が良くなったと考えられる。実験後、被験者より、「 β 及び r 表示では、 g のない方が f に集中でき、かえって良い制御成績をあげることができる場合がある。」とのコメントが得られている。このコメントからも上記の推論が妥当であると思われる。

以上、 ω_c の値と制御成績とが同一の傾向を示したことから、 ω_c が成績を示す一指標になり得ることがわかった。さらに、予測情報が制御成績の向上に効果のあることが確認できた。従って、今後同様の手法に基づいて情報の統合の効果を ω_c によって評価することが可能と考える。

5. 結 論

補償制御作業を行なっているオペレータに、現在位置とその予測値という2種の表示情報を、表示方式を変えて与えることにより計器統合の効果を調べた。その結果得られた統合の効果は次の様に整理される。

- 1) 実験1の練習曲線より、表示を統合すると初心者にとっても制御が容易であり、慣熟も容易であることが得られた。
- 2) 実験3の時間経過図及び制御成績から、表示を統合すれば精度良く制御できることがわかった。そして制御成績が著しく改善された。
- 3) 統合表示の場合、一般的にそれぞれの表示情報

に対するオペレータの応答ゲインの増加等によりクロスオーバー周波数が増しており、この場合の情報取得の容易さが記述関数の検討結果から確認された。

また、表示方式の違いによる制御成績の差がクロスオーバー周波数の差と同一傾向であるので、表示の統合の効果をクロスオーバー周波数で調べ得ることがわかった。

以上の様に、本実験では表示情報統合の効果を主にオペレータの制御特性の側面から明らかにした。その結果、表示統合の効果を定量的に把握する方法を確認した。今後、航空計器の評価に関する研究においてこの種の手法が有効であると思われる。さらに、以上の結果は航空計器だけでなく、一般的な表示装置の設計の際の有用な基礎資料となり得ると考える。

あ と が き

本論で記した研究は、中沢が当所、計測部、人間工学研究室において昭和52年度～54年度にわたる研修期間中、田中、川原の研究に参画し、実施したものである。この間種々の助言をいただいた佐貫亦男日本大学名誉教授並びに岡部正典研究室長に感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 岡部、川原他：ジェット輸送機のタスク・アナリシス、航技研報告TR-215 (1970)。
- 2) Beyer, R. : Wirksamkeits Untersuchungen von Anzeigen für die Flugführung, DLR Forschungsbericht 73-03 (1973)。
- 3) Wilkens, V. : Improvements in Pilot/Aircraft-Integration by Advanced Contact Analog Displays, Proc. of 9th Annual Conference on Manual Control (1973), pp.175-192。
- 4) 岡部正典：カラー統合計器の評価試験，第17回飛行機シンポジウム講演集(1979) pp. 206 - 209。
- 5) 赤池弘次，中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御，サイエンス社(1972)。
- 6) 田中敬司：手動制御時の人間オペレータの進

み動作に関する実験的検討, 航技研報告 TR
- 485 (1977).

- 7) 田中敬司: 予測を必要とする手動制御実験,
航技研報告 TR - 554 (1978).
- 8) 抽原直弘, 清水雅己: 手動制御系における予
測情報の効果について, 第 16 回 飛行機シン
ポジウム講演集 (1978) pp. 314 - 317.
- 9) 岡部正典, 川原弘靖, 田中敬司: 統合航空計
器の研究試作, 航技研報告 TR - 608 (1980).
- 10) 田中敬司, 中沢一夫: ディスプレイの統合化
の効果に関する基礎実験, 第 17 回 飛行機シン
ポジウム講演集 (1979) pp. 198 - 201.

航空宇宙技術研究所資料 443 号

昭和 56 年 9 月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町 1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社 三興印刷
東京都新宿区信濃町 12 三河ビル
