

UDC 629.7.054.072:  
62-501.14:  
159.931

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-255

連続手動制御作業における人間のサンプリング  
周波数について

川 原 弘 靖

1974 年 5 月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 連続手動制御作業における人間のサンプリング 周波数について\*

川 原 弘 靖\*\*

## On the Input Sampling Frequency of Human Operator in a Continuous Manual Control Task

By Hiroyasu KAWAHARA

### Summary

As the first step of non-linear modeling of pilot control characteristics by means of the sampled-data control theory, it is needed to delineate human operator's input sampling characteristics in continuous manual control tasks.

This research was conducted to measure the visual information intake frequency (input sampling frequency) of the human operator.

As the experimental result, a clear distinction in the operator's performance was noted between the above and the below the forced input sampling frequency of 4-5 Hz. From this finding, it was estimated that the frequency of human operator's input sampling lies in the range of 4-5 Hz.

### 要 約

本研究はパイロットのサンプル値制御理論による非線形モデル構成の第一歩として、連続手動制御作業中の入力側のサンプリング特性、とくにパイロットの視覚情報の取入れ頻度（入力サンプリング周波数）を実験的に求めることを目的として行なったものである。

その結果、連続手動制御作業において、一般によく用いられる被制御対象、目標値を用いた本実験の範囲で入力サンプリング周波数 4~5 Hz を境いにパイロット（制御者）のパフォーマンス（制御成績）に顕著な変化を認め得ることから、視覚入力情報のサンプリング周波数が上述の範囲に存在することが推定された。

### はじめに

航空機の安全な飛行を確保するためのいくつかの要因として、航空機自体の安定性、操縦性およびパイロットの操縦特性、航空管制システムなどが考えられ、

これら諸要因の調和がとれ、かつ保たれることが必要とされる。

しかし機体に関する諸要因、諸問題は現在までに相当の研究、試験等が進められ、明確になっていると言っても過言ではないと思われる。ところがパイロットの諸特性、航空管制システム等に関しては未だ相当多くの問題が残されているといえよう。

とくに航空機事故の大半がパイロットの何らかのミスが主な原因といわれているおりから、航空機-パイロット系のあり方、パイロットの役割等を明確にする必要がある。それゆえ、パイロットの操縦特性、操縦限界、情報処理系としての解析、誤判断、誤操作などのプロセスの解明、コックピット、操縦系などの諸研究の必要性はいうまでもなく、人間-ビークル系として全体的な設計、計画がなされるように方向づけられねばならない。

そのためには、人間-ビークル系に組込まれる要素としての人間の特性を十分明らかにし、設計に有用な人間の予測的モデルの構成が必要とされよう。

人間-機械系における手動制御特性のモデル構成の研究は数多く行なわれ、擬似線形モデル (Quasi-

\* 昭和 49 年 2 月 5 日受付

\*\* 計測部

Linear Model) として体系化されつつあるが、より厳密なモデル構成を行なうには人間の感覚系-処理系-動作系に認められる非線形を考慮する必要がある。

本報告では先ず第1章においてパイロット・モデル構成に関する従来の研究を概観し、第2章において連続-軸手動制御中の制御者の視覚情報の取入れ頻度(入力サンプリング特性)を推定するための実験的検討について報告する。

## 1. 手動制御モデル

人間を制御アクチュエータとするシステムにおいて、その人間の特性を明らかにしようとする研究は20世紀初めごろから試みられてきた。当時はもっぱら心理学者らによる研究が主であり、人間の刺激-反応時間とか、作業中の疲労の研究、作業の難易度などの研究が主とされていた。

今日の自動制御論的な考え方ははじめて人間に適応したのは Tustin<sup>1)</sup>であった。彼は、人間の目に与えた刺激とそれに反応したハンドルの操作量との相関を調べることにより、その関係を伝達関数でもって表わせることを示した。その後の研究で人間の伝達特性を示す数学モデルとして広く用いられるようになった。

いま与えた入力  $i(t)$  と制御者の出力  $o(t)$  との関係を図 1.1 のように示すと、制御者の伝達関数  $H(s)$  は式 (1.1) で表わされる。

$$H(s) = \frac{O(s)}{I(s)} \quad (1.1)$$

ここで  $s$  はラプラス演算子である。

この  $H(s)$  についての研究はその後多くの研究者によっていろいろな形の伝達関数が提案されているが、その詳細については他書<sup>2)</sup>にゆだねることにする。

パイロットの制御モデルとして広く一般に用いられているものは McRuer & Krendel<sup>3)</sup> により提案され

た擬似線形モデル

$$H(s) = K \frac{1 + T_L s}{1 + T_I s} \cdot \frac{1}{1 + T_N s} e^{-\tau s} \quad (1.2)$$

をあげることができる。式 (1.2) の中の  $K$  はパイロットのゲイン、 $T_L$  はリード項、 $T_I$  はラグ項である。これらの項は共にパイロットの個人差、経験、熟練度などによって決定される可変項である。また  $1/(1 + T_N s)$  の項は神経筋肉系の特性を表わし、 $T_N$  の値は一般に 0.1 秒位の値をとる定数項である。また  $e^{-\tau s}$  は人間の反応の絶対的な遅れを示す項で、 $\tau$  は反応時間 (Reaction Time: RT) で一般に 0.1~0.4 秒の値をとることが知られている。

これまで述べてきた制御モデルは、あくまで制御対象が安定で定常状態における場合のモデルで、不安定や非定常な場合には、これら制御モデルの形はまた異なった形になることは言うまでもない。

つぎに、この擬似線形モデルで人間の制御動作を表わした場合、入力とは相関をもたないノイズ成分が人間の制御出力に重畳して現われることが知られている。

McRuer<sup>3)</sup> らはこれらをレムナント (Remnant) と呼んでいる。図 1.2 図は人間の制御出力にレムナントが重畳する場合を示すブロック図である。

このように人間の制御特性には線形モデルでは表わしきれない要素が多々ある。たとえば感覚刺激に対する閾値、制御の履歴特性、飽和特性などがあり、これらは皆非線形要素として取扱われるものである。これら非線形要素を考慮したパイロットモデルとして図 1.3 に示すようなモデルが Good Year Aircraft Inc.<sup>4)</sup> から提案されている。このモデルは一般にグッド・イヤーモデルと呼ばれている。

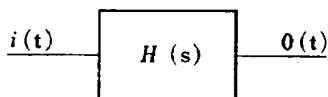


図 1.1 伝達関数について

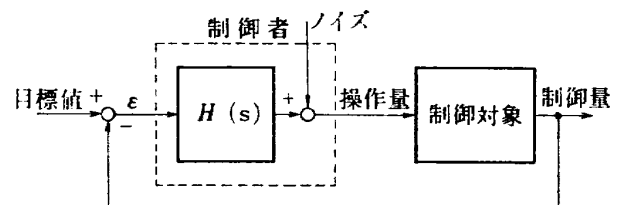


図 1.2 レムナントを考慮したモデルブロック図

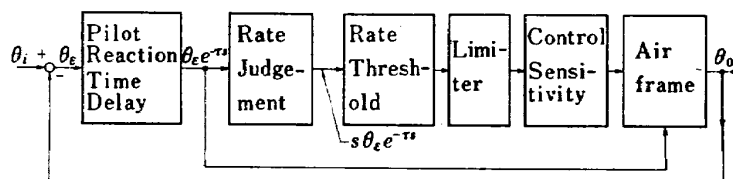


図 1.3 非線形要素を考慮して提案された Good year model<sup>4)</sup>

またパイロットの制御出力には意図的に操縦桿に加えられたと思えるディザー的な振動、制御対象が不安定であったり、制御限界に近い特性を持つ場合にあらわれるオン・オフ的な制御特性やバング・バング特性など、線形性制御特性とはいえないいくつかの事例が今までに示されている。これらは全て人間の非線形性を裏付けるほんの一例にすぎない。

ここではいくつか提案されている非線形制御モデルのうち、本報告に最も関連の深いサンプル値制御モデルについて述べる。

人間は同時にいくつもの計器を読み取ったり、多重の制御を行なうことは非常に困難である。特にパイロットの制御ループを考えると図 1.4<sup>5)</sup> に示すように沢山のループの制御を必要とする。しかし先に述べたよ

うに全ループの制御を同時に行うということは不可能に近く、必ずどれかのループがオープンになることが予想される。

また視覚情報を考えてみても操縦のための必要最少限の飛行計器だけでも十数個にもおよび<sup>5)</sup>、外部視界も加えて考慮すると操縦のために必要とする情報の取入れ方は自然、間欠的なサンプリングにならざるを得なくなる。

人間の制御行動が間欠的な行動であるという提案は、Hick (1947)<sup>6)</sup> や Craik (1948)<sup>7)</sup> らの実験心理学者によって歴史的にも古くから提唱されていた。Craik によると「明らかに連続的に変化する入力信号にもかかわらず、オペレータのトラッキング制御出力はほぼ 0.5 秒間隔にトリガーされる“Ballistic Responses”の連りから成る断続的出力である」と述べている。

以後、断続性に関する多くの研究はこれらを一層裏付ける結果をもたらし、特に Bekey<sup>8)</sup>、Young<sup>9)</sup>、Elkind<sup>10)</sup> らにより、人間の制御行動により良く合致したサンプル値制御モデルが提案されている。図 1.5 はサンプル値制御モデルを示すブロック図である。このモデルは従来提案されている擬似線形モデルに、サンプラーおよびホールド特性が挿入されていることがわかる。制御者は目標値をサンプリングして一担ホールドする。ホールドされた目標値をもとに頭脳は演算、判断等の処理をして神経筋肉系へ出力する。その結果、手または足などによりコントローラーを操作して制御行動をとる。

Bekey<sup>8)</sup> は Quasi-linear model  $G_C(s)$  にサンプラーおよび一次ホールド回路の伝達関数  $G_{S/H}(s)$  を導入してサンプル値制御モデル  $G_S(s)$  を実験的に同定した。式 (1.4) にそれを示す。

$$G_S(s) = G_C(s) \cdot G_{S/H}(s) \quad (1.3)$$

$$G_S(s) = \left( \frac{K}{1 + T_N s} e^{-\tau s} \right) \cdot \left( \frac{1 + T_S}{T} \right) \cdot \left( \frac{1 - e^{-Ts}}{S} \right)^2 \quad (1.4)$$

ここで  $T$  はサンプリングインターバル ( $T=1/f$   $f$ : サンプリング周波数)。

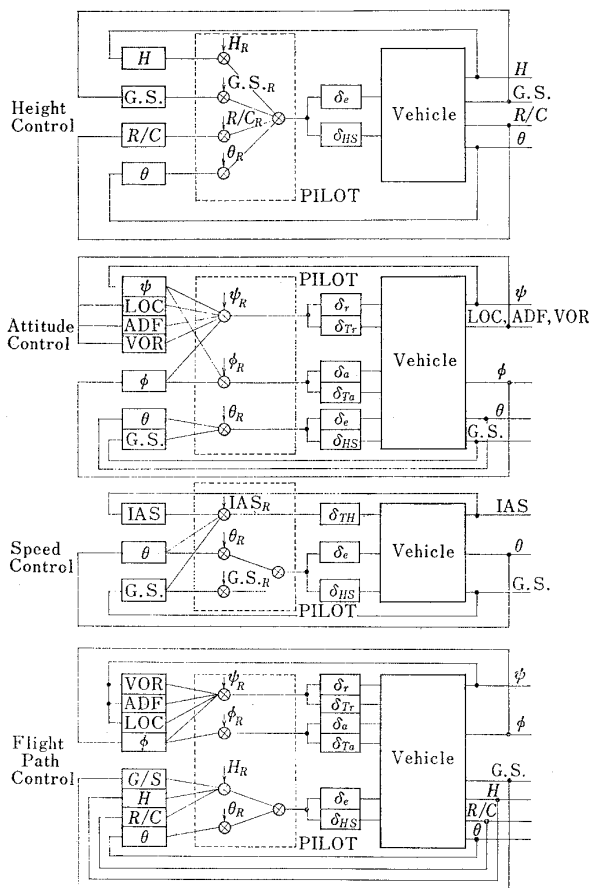


図 1.4 Pilot-Vehicle Control Loops (Final App)<sup>5)</sup>  
 (点線内がパイロットを示す)

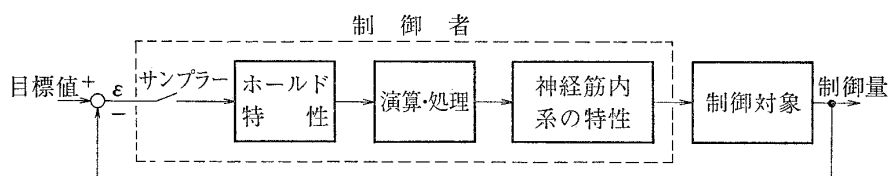


図 1.5 サンプル値制御モデル

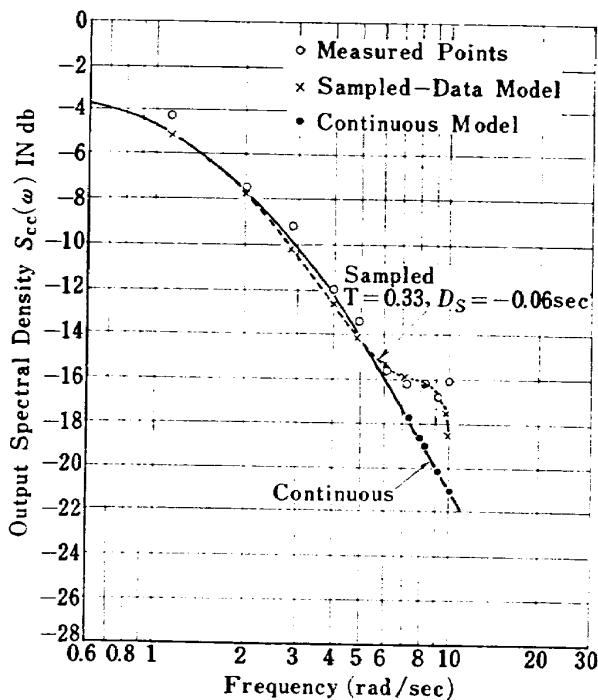


図 1.6 連続制御モデルとサンプル値制御モデルの比較 (Bekey)<sup>8)</sup>

図 1.6 は Bekey のモデルによるシミュレーション結果を示す。制御者が比例特性をもつ制御対象を制御したときの制御出力スペクトル (白丸) と連続モデルによる出力スペクトル (実線), サンプル値制御モデルによる出力スペクトル (破線) の比較をしている。これによるとサンプル値制御モデルの方が実際の人間の制御特性により合致していることが判る。

また, サンプル値制御モデルを用いたパーシュート・トラッキングや, コンペンセートリー・トラッキングの実験<sup>11)</sup>や, モデルをもってサンプリングインターバルを検証した論文<sup>12)</sup>, パイロットのスキanning行動の解析から, サンプリング行動の実態を明らかにした論文<sup>13)</sup>など多くの研究が行われてきた。

しかし, これらいくつかの研究は制御者を一つのアクチュエータと考えたときの, 全体的 (入力から出力まで) なサンプル値制御モデルとして表わそうとしたものが殆んどである。

ところが, 制御者の視覚情報処理系に関するサンプリング特性を明らかにした研究例は僅かにしかない。

本研究はパイロット (制御者) の視覚情報の取得処理過程の側面に焦点をしぼり, 視覚情報処理における情報取入れ頻度を実験的に推定し, 人間の視覚に関する入力サンプリング特性を明らかにした。

## 2. 実験的検討

### 2.1 目的

本研究の目的は制御者が「制御に必要とする情報を視覚を通して取得する場合の視覚情報処理における情報取入れ頻度 (入力サンプリング周波数とする)」を直接サンプリング表示方法により実験的に推定することにある。

### 2.2 仮説

デジタル計算機によるデータ処理過程と, 制御作業における人間の情報 (データ) 処理過程を比較考察すると図 2.1 のように考えることができよう。

この図から判るように両者はほぼ同様のプロセスによって情報を処理, 判断し出力していることが判る。

ここでは制御者に必要とする情報を視覚情報に限って考えることにする。

いま, 制御者の中に情報をサンプリングするサンプラを仮定する。このサンプラにより取入れられる情報の取入れ周期を  $T_h$  とする。つぎに表示装置の前にサンプラを挿入して, 表示をサンプリング的に行なうことにし, その周期を  $T_d$  とする (図 2.2 参照)。

$T_h = 1/f_h$   $f_h$ : 仮定したサンプラのサンプリング周波数

$T_d = 1/f_d$   $f_d$ : 表示用サンプラのサンプリング周波数

ここで  $T_d \leq T_h$  (図 2.3 (a)) ならば, 人間はサンプリングの位相を適当にずらすことにより, 制御に必要とする情報を十分に取入れることができ (黒丸印で指示), 連続的に表示された場合とほぼ同様の制御成績 (例えばエラー量) を示すであろう。いっぽう  $T_d \geq T_h$  (同図 (b)) ならば必要とする情報量の取入れが少なくなるので制御成績が悪くなる (例えばエラー量の増加など) のと思われる。

そこで, 制御者に連続手動制御作業を行なわせ, そ

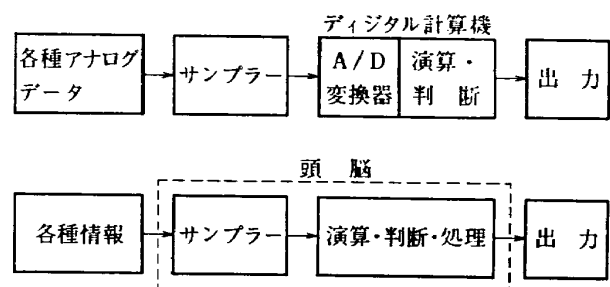


図 2.1 デジタル計算機 (上) および人間 (下) によるデータ処理過程の比較

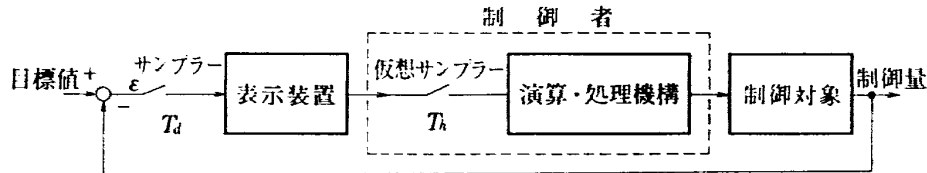
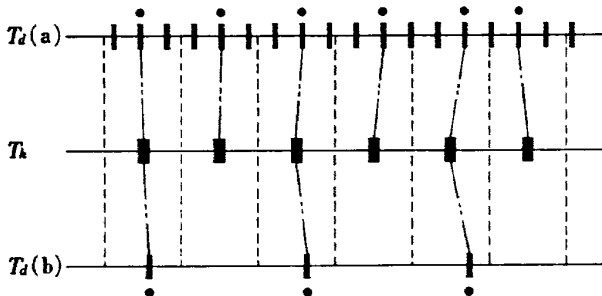


図 2.2 制御者に仮想サンプラーを考慮したサンプル値制御モデルブロック図

図 2.3  $T_h$  と  $T_d$  による情報の取入れ方

の目標値\*をサンプラーにより間欠的に表示し、さらに表示サンプリング周波数 ( $f_d$ ) を変化させることにより制御者のパフォーマンスに何らかの変動が生ずるものと予想した。

このパフォーマンスの変動をいかにして掌握することができるか、いくつかのケースについて予備実験\*\*を行なった。

その結果、制御エラーの絶対値積分  $\int |e| dt$  を評価関数 ( $J$ ) に選び、この  $J$  が急激に増加しはじめるときの折点に着目し、図 2.4 に示すようにこの折点をもって人間の視覚情報処理における情報取入れ頻度として推定することにする。

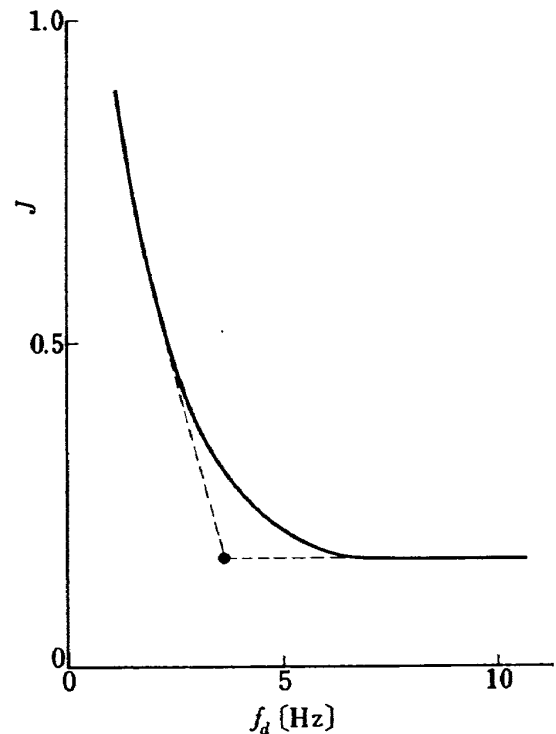
### 2.3 実験方法

実験ブロック図を図 2.5、各実験条件を表 2.1 に示す。

この実験に用いた制御対象および目標値については、マニュアル・コントロール・タスクに広く用いられているものを採用した。以下、詳細について述べる。

#### 2.3.1 制御対象

制御対象として積分特性をもつ  $1/s-1$ 、 $1/s$ 、 $1/s(s+1)$  と二次の振動系の  $\omega_n^2/s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2$  の  $\omega_n$ 、

図 2.4 表示サンプリング周波数 ( $f_d$ ) と出力エラーとの予想曲線 (黒丸印は折点周波数を表わす)

$2\zeta\omega_n$  を表 2.1 に示す 4 ケース、合計 7 種類を用いた。

#### 2.3.2 目標値

目標値は制御対象が  $1/s-1$  (一次発散系) の場合には用いず (発散量を提示)、 $1/s$ 、 $1/s(s+1)$  については表 2.1 に示す 3 種類のサイン波の合成波を、二次の振動系についてはホワイトノイズゼネレータの出力を  $1/(s+1)^2$  のローパスフィルタ(カット・オフ周波数  $\omega=1$  rad/sec)を通して、それを磁気データレコーダに記録して使用した。

#### 2.3.3 表示方法

目標値と制御量との差をサンプラーにてサンプリングし、零次ホールドして表示する。サンプラーはサンパルパルス発生器のパルス出力により、表 2.1 に示す表示サンプリング周波数によって駆動される。

表示サンプリング周波数の順序は、順序効果をなるべく少なくする意図から、ランダム数値表により、ラ

\* 予備実験、本実験ともコンペンセートリー・トラッキング作業を採用したのでエラー表示となる。

\*\* 予備実験において、入力信号 (目標値)、制御対象などについての予備的知識を得ることができた。

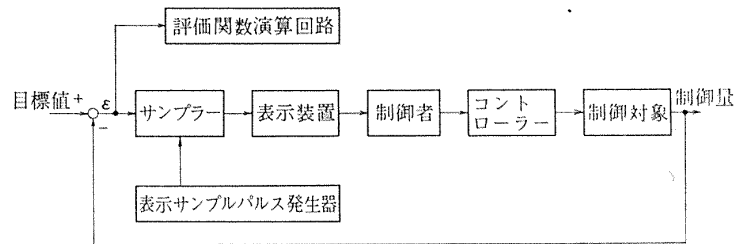


図 2.5 実験ブロック図

表 2.1 ヒューマンオペレータによる実験条件

制 御 対 象	目 標 値	試行回数	表示サンプリング周波数 [Hz]
$\frac{1}{s-1}$	—	5	1.5 2.0 2.5 3.0
$\frac{1}{s}$	サイン合成波 ① $2 \sin 0.07t$ ② $3 \sin 0.3t$ ③ $\sin t$	5	3.5 4.0 5.0 7.5 10.0
$\frac{1}{s(s+1)}$			
$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2}$	ホワイトノイズゼネレータ出力 を $\frac{1}{(1+s)^2}$ で Low pass filter したもの	5	2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 7.5 10.0
$\omega_n$	2 2 6 6		
$2\zeta\omega_n$	0.5 1.0 0.5 1.0		

ンダムに周波数を変えて行なった。

表示装置にはプラン管オシロスコープ (130 mm) を用いた。なお、表示装置には多くのツマミ、操作部などが表面にあるため、被験者の視線がそれらに移ったり、他の物へ移ったりするのをなるべく少なくする目的から前面を黒板を用いてマスクを施した (図 2.6 参照)。

#### 2.3.4 被験者

被験者には、トラッキング作業に十分訓練された成人男子 2 名 (24 才) を採用した。

被験者 (制御者) は、表示装置の前面約 70 cm のところに位置し、表示装置に示された輝線を零位置 (ヘア・ライン) に戻すようにコントローラーを操作する (コンペーンセトリ・トラッキング)。

#### 2.3.5 実験試行時間

実験中の“なかだるみ”をなるべく少なくする意図から 1 回の試行時間は  $1/s-1$ ,  $1/s$ ,  $1/s(s+1)$  については 60 秒,  $\omega_n^2/s^2+2\zeta\omega_n+\omega_n^2$  については 120 秒とし、実験インターバルを 60 秒とした。実験は午前、午後とも 1 時間づつ、延べ日 9 間に亘って行なわれた。

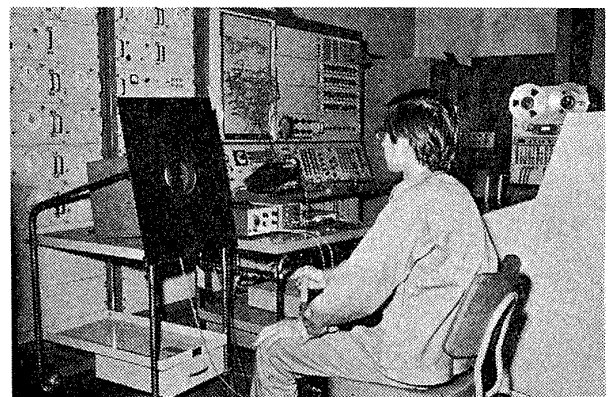


図 2.6 実験装置外観

#### 2.3.6 実験装置

##### 1) アナログ計算機 (トランジスタ式)

日本電気 A-300

アナログ計算機 (電子管式)

日 立 ALS-1000

##### 2) ブラウン管オシロスコープ

日 立 V-104

##### 3) ペン書オシロスコープ

渡 辺 RA-802B

##### 4) 磁気データレコーダ

TEAC R-51F

- 5) パルス発振器 YHP 3310A  
 6) ホワイトノイズゼネレータ 日立 NG-261  
 7) コントローラ 模擬操縦桿, 他  
 8) サンプラー 自作 (付録参照)

### 3. 実験結果および考察

実験の結果を図 3.1, 図 3.2 に示す。図 3.1 は積分性制御対象  $1/s-1$ ,  $1/s$ ,  $1/s(s+1)$  について, 図 3.2 は二次の振動系  $\omega_n^2/s^2 + 2\zeta\omega_n/s + \omega_n^2$  の結果について示している。各プロットされた点は試行5回の平均値である。

この実験の結果は下記の通りで要約できる。

- 1) 各試行毎のバラツキがかなり見うけられた。
- 2) 表示サンプリング周波数が 4~5Hz より以下では, エラー量の増加が急激になり, 5Hz 以上ではエラー量の変化はみられない。
- 3) 上述の傾向は, この実験の範囲では7種類の制御対象について一様であり, 制御対象の差による変動は認められない。
- 4) また同様に目標値による差も認められない。

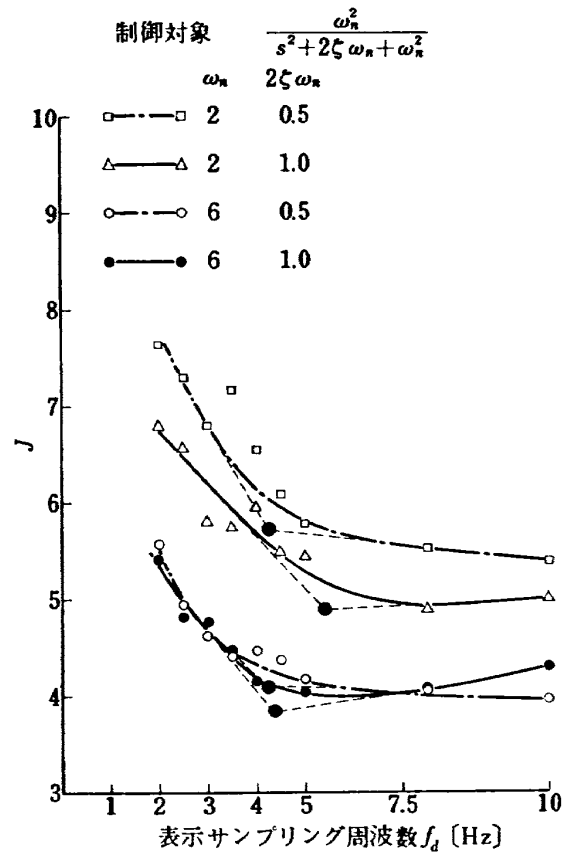


図 3.2 実験結果 (2)

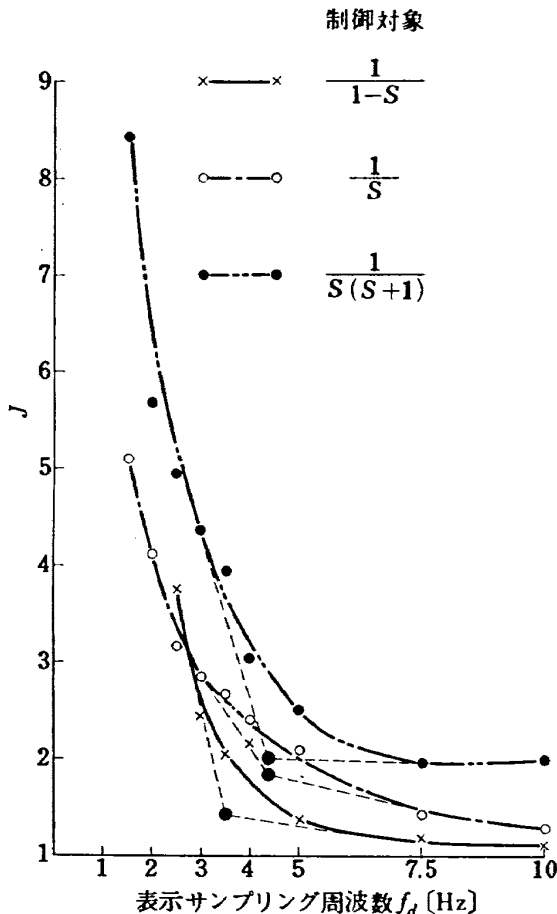


図 3.1 実験結果 (1)

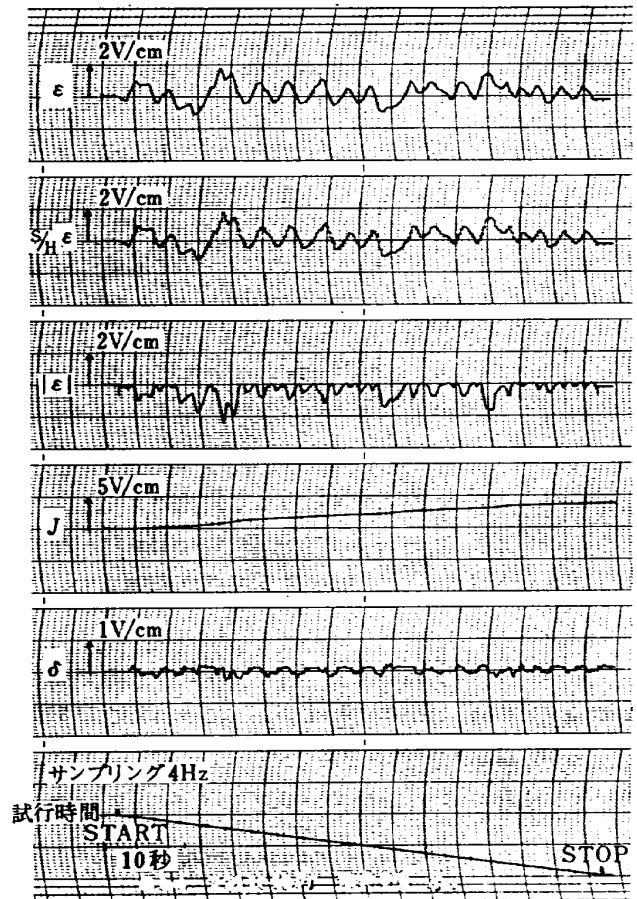


図 3.3 実験記録例 制御対象  $1/s-1$



表 3.1 結果の平均値・最大値・最小値

制 御 対 象			表示サンプリング周波数 (Hz)	10	7.5	5	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5
			制御偏差										
$\frac{1}{1-s}$	$\bar{X}$ (平均値)			1.09	1.18	1.39	—	2.16	2.04	2.46	3.78	制御不能	
	$X_{\max}$ (最 大)			1.39	1.42	1.82	—	2.75	2.75	3.51	5.33		
	$X_{\min}$ (最 小)			0.82	0.88	0.83	—	1.41	1.23	1.97	2.65		
$\frac{1}{s}$	$\bar{X}$			1.29	1.41	2.09	—	2.20	2.67	2.84	3.14	4.11	5.09
	$X_{\max}$			1.51	1.58	2.35	—	2.54	3.40	3.20	3.38	4.47	5.59
	$X_{\min}$			1.12	1.14	1.66	—	1.97	2.40	2.22	2.92	3.65	4.44
$\frac{1}{s(s+1)}$	$\bar{X}$			1.99	1.96	2.50	—	3.02	3.95	4.36	4.95	5.68	8.42
	$X_{\max}$			2.11	2.68	2.84	—	3.51	4.54	5.38	5.77	6.08	10.12
	$X_{\min}$			1.88	1.73	2.17	—	2.40	3.51	3.24	4.18	5.31	6.95
$\frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n+\omega_n^2}$	2	0.5	$\bar{X}$	5.40	5.51	5.81	6.08	6.56	7.18	6.79	7.29	7.65	—
			$X_{\max}$	5.97	6.22	6.63	6.58	8.02	8.88	8.22	8.61	8.75	—
			$X_{\min}$	4.85	5.23	4.98	5.57	5.54	6.40	6.07	6.18	6.96	—
	2	1.0	$\bar{X}$	5.02	4.89	5.48	5.52	5.98	5.75	5.82	6.58	6.80	—
			$X_{\max}$	5.62	5.76	6.25	5.99	6.40	5.91	6.20	6.96	7.23	—
			$X_{\min}$	4.25	4.30	4.90	4.99	5.03	5.52	5.40	5.96	6.16	—
	6	0.5	$\bar{X}$	3.95	4.06	4.18	4.38	4.48	4.43	4.61	4.96	5.57	—
			$X_{\max}$	4.10	4.18	4.52	4.81	4.73	4.78	4.89	5.43	5.91	—
			$X_{\min}$	3.64	3.83	3.92	3.70	3.96	3.82	4.23	4.69	5.34	—
	6	1.0	$\bar{X}$	4.31	4.04	4.03	3.89	4.14	4.46	4.76	4.82	5.43	—
			$X_{\max}$	4.77	4.25	4.62	4.16	4.47	4.97	5.22	5.10	5.69	—
			$X_{\min}$	4.08	3.79	3.66	3.64	3.79	3.91	4.39	4.56	5.20	—

以上のことが一連の実験を通して観測できた。

なお、表示サンプリング周波数 4~5Hz は付図 3 を見てもわかるように、原波形を十分に再現していることが伺える。

また実験記録例を図 3.3 に示す。図中  $\epsilon$  は目標値と制御量との差 (制御対象  $1/s-1$  については発散量),  $S/H\epsilon$  は  $\epsilon$  のサンプル・ホールド値,  $J$  は評価関数  $\left(\int |\epsilon| dt\right)$ ,  $\delta$  は操作量である。また表 3.1 に 5 回の試行による平均値, 最大, 最小値を示す。

以上の結果から、人間 (制御者) に提示する表示サンプリング周波数が 5Hz 以上の頻度で提示しても制

御成績には変化がみられないこと、また 4Hz 以下の提示になると制御成績が急激に悪くなる (エラー量の増加) ことから、「人間の視覚情報処理における情報取入れ頻度 (入力サンプリング周波数) は 4~5Hz の範囲にある」ものと推定できる。

過去に示された制御者の入力側に関するサンプリング周波数についての数少ない研究結果<sup>13)</sup>も、4~6Hz の値がクリティカルな値であることが示されている。

よって本実験の結果はほぼ妥当であると思える。

なお、一般に人間には予測的な制御動作を行なうとか指摘されている。よってこの実験で採用したサンプ

ラーの零次ホールド特性よりも、より高次のホールド特性を持たせたならば、1 サンプル値のもつ情報量（たとえば、方向、速度、加速度など）が増されるので、サンプリングインターバル  $T_h$  についてまた異なった知見が得られるのではないかとも思われる。

### あ と が き

この実験研究は、昭和 46 年度国内留学先である東京大学工学部産業機械工学科藤井研究室へ留学中に行なった実験と、その後航技研において行なった実験について報告したものである。

留学期間を通して研究および実験に関して適切な御助言と御指導を賜りました藤井澄二教授、吉本堅一助教授、井口雅一教授ならびに藤井研究室の皆様、本実験の被験者として積極的に協力していただきました中川一夫氏に心より感謝いたします。

### 参 考 文 献

- 1) A. Tustin: The nature of the Operator's Response in Manual Control, and its Implication for Controller Design. J. Inst. Elect. Engrs. Vol. 94, Part II A (1947)
- 2) たとえば  
T. McRuer & S. Krendel: The Human Operator as a Servo System Element. J. Franklin Inst. Vol. 267, Part I, II (1959)  
井口: 人間-機械系, 共立出版 (1970)
- 3) T. McRuer & S. Krendel: The Human Operator as a Servo System Element. J. Franklin Inst. Vol. 267, Part I, II (1959)
- 4) Northrop Aircraft, Inc.: The Human Pilot. AE-61-4 III (1954)
- 5) 樋口, 百名, 他: ジェット輸送機の操縦のタスク・アナリシス, NAL TR-215 (1970)
- 6) W.E. Hick: The Discontinuous Functioning of the Human Operator in Pursuit Task. Quart. J. Exp. Psych. Vol. 1 (1948)
- 7) J.W. Craik: Psychological & Psychological Aspects of Control Mechanisms with Special Reference to Tank Gunnery. Psychol. Lab. Cambridge. Part I, II (1948)
- 8) G.A. Bekey: The Human Operator as a Sampled-Data System. IRE, HFE-3 (1962)
- 9) L.R. Young: A Sampled Data Mode for Eye Tracking Movements. Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Science. Massachusetts Institute of Technology. (1962)
- 10) J.I. Elkind et al.: An Investigation of the Visual Sampling Behaviour of Human Observers. NASA-CR-434 (1966)
- 11) J.G. Kreifeldt: A Sampled Data Pursuit Tracking Model. IEEE. HFE-6 (1965)
- 12) たとえば  
G.A. Bekey: Identification of Sampling Intervals in Sampled-Data Models of Human Operators. IEEE. MMS-9, No. 4 (1968)  
C.A. Bennett: Sampled-Data Tracking: Sampling of the Operator's Output. J. Exp. Psych. Vol. 51, No. 6 (1956)
- 13) たとえば  
M.J. Merritt: The Application of Discrete Modeling Elements to Synthesis and Identification of a Deterministic Model for the Scanning Behavior of Human Operators. NASA-SP-192 (1968)

## 付録 サンプラーの設計、製作

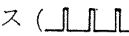
この実験を遂行するにあたり、サンプラーを必要とするために実験用サンプラーを設計し製作した。

サンプラーの特性要求条件として

- 1) サンプリング周波数は最低 0.5Hz 以上、最高 10Hz 以上とすること。
- 2) サンプラーの入力信号回路には 100 V 用アナログ計算機にも使用できるように適当なアッ

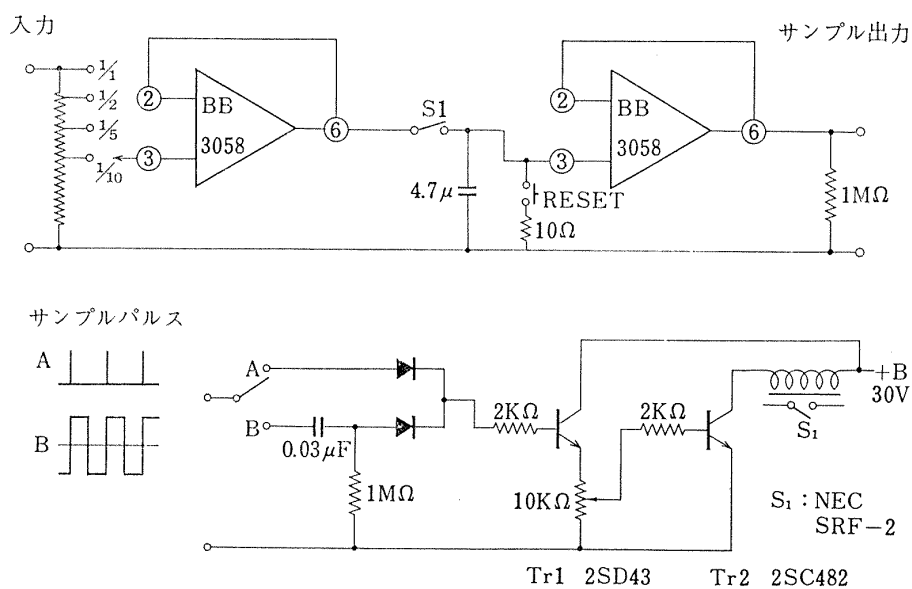
テネータを設けること。

- 3) ホールド特性は零次ホールド特性とする。

- 4) サンプリングトリガーは矩形波およびパルス (  ) で動作すること。

以上の要求条件を満足するように回路，部品等を選択し設計，製作を行なった。

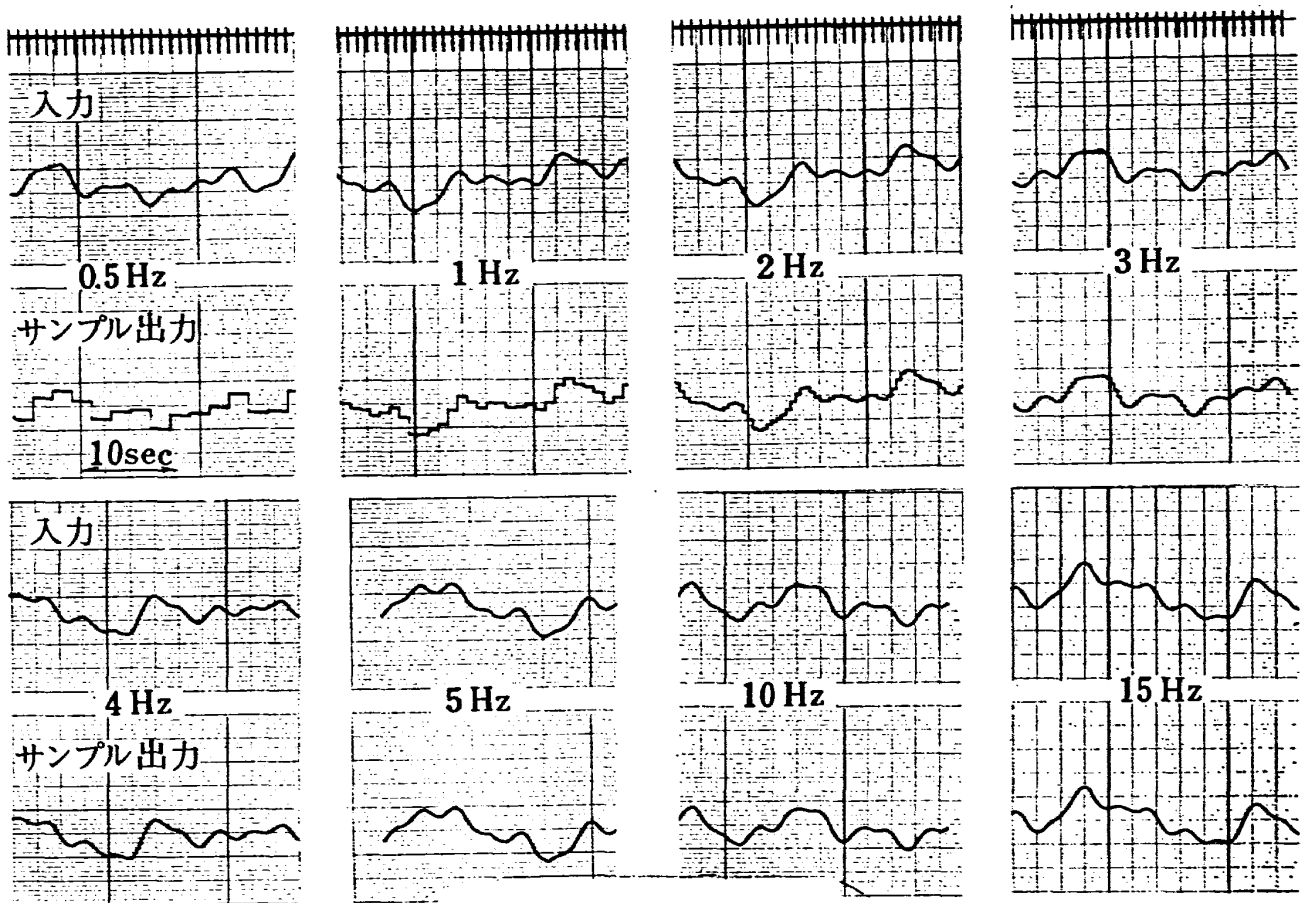
サンプラーの回路図，外観，特性をそれぞれ付図 1，付図 2，付図 3 に示す。



付図 1 サンプラー回路図



付図 2 サンプラー外観図



付図 3 サンプラー特性図

---

## 航空宇宙技術研究所資料255号

昭和49年5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 東京プレス  
東京都板橋区桜川 2~27~12

---

