

[文献紹介]

サーボ・システム要素としての 人間操作者⁽¹⁾ (続)*

ジュアン・T・マックリユール 共著
エズラ・S・クレンデル

紹介者：増山英太郎

Ⅶ 制御対象が存在する場合の補償的トラッキングに おける操作者の記述関数

$Y_e=1$ の場合での研究がし尽されたならば、目標波の条件をそのままにしておいて、制御対象をだんだん複雑なものにしていった時に操作者の記述関数はどのようなものになるだろうか、というのが論理的に当然行きつくべき研究の次の段階である。

未だ実験データが完全にそろったわけではないが、これ迄に成された制御対象がある場合の実験的研究の主なものは、Tustin (1947), Russell (1951), Goodyear Aircraft (1952~1957), Hall (1957), Franklin Institute (1954, 1957) のものである。

Tustin の研究は先駆的なものではあるが、極めて短く、視野がせまかった。三種類の制御対象が使用されたが、それ等は問題とする周波数範囲では、非常に類似した周波数特性を示した。彼はレムナントという概念を導入し、それについていくらか情報を提供したが、全体としてのレムナントの像を比較的不完全なままにしていた。Tustin の考えのある部分を論理的に延長させたものである、Russell の研究は、制御対象を次第に複雑にしていくと、操作者の記述関数はどのようなになるかを実験的に考察している。スペクトラムの形態でのレムナントの特性は完全には研究しつくされていないが、その特性の持つ効果は、ある場合にはある程度まで、全レムナント・パワーとエラー・パ

* 原稿受領 1970 年 1 月 21 日

(1) Duane T. McRuer and Ezra S. Krendel: The human operator as servo system element. J. of Franklin Inst., 1959, June, 22-49. 同名の文献紹介(「商学討究」19巻3号)の続篇。

ワ、データによって明らかにされた。Franklin Institute の F-80 シミュレーター研究は、記述関数とレムナント特性との両方によって完全に提供されている。この研究においては、制御対象は F-80 船空機及び標的で、一定の範囲で連続的なトラッキングを行なうものであり、今日迄の研究状況のうちでは最も複雑なものである。最後に、Hall のデータは、種々の制御対象間にあった多くのギャップをうめ、簡便な短期間での機体特性の検査の仕方を記している。(後者は本報告の中に含まれてはいない。)彼のデータは最近こよみの順に集められたが、種々の制御対象に対するパイロットの意見評定とともに、以前には測定されなかったいくつかのシステム・パラメーターを含んでいる。

以前に記述されたのと類似の標準を用いて、他の適切な情報とともにこれ等のデータへ当てはめた結果は表4と5に示されている。制御対象の伝達関数は広い周波数帯域にわたって正確であるが、人間操作者の記述関数はそうではない、何故なら数ヶの特定周

表 4: 種々の単純な制御対象, ランダムに見える目標波を用いての補償的トラッキングにおける操作者記述関数の総括

制御対象 $Y_c(S)$	人間操作者の記述関数 $Y_p(S)$	研究者, 目標波, 制御課題, 備考
$\frac{1}{(S+1)}$	$\frac{20e^{-.15s}\left(\frac{S}{.7}+1\right)}{\left(\frac{S}{.1}+1\right)}$	Russell; 4つの成分正弦波 $\omega_i = .66, 1.68, 2.87, 4.27$ rad/sec. の合成波。振巾の包絡線は $.85$ rad/sec. のコーナーを持つ一次二項フィルター; 操作部たるハンドルには全然拘束がない。
$\frac{1}{\left(\frac{S}{2}+1\right)}$	$\frac{8e^{-.15s}\left(\frac{S}{.9}+1\right)}{\left(\frac{S}{.15}+1\right)\left(\frac{S}{25}+1\right)}$	
$\frac{1}{\left(\frac{S}{.2}+1\right)}$	$\frac{10e^{-.15s}\left(\frac{S}{2}+1\right)}{\left(\frac{S}{3}+1\right)\left(\frac{S}{15}+1\right)}$	
$\frac{15}{(S+1)}$	$\frac{1.5e^{-.2s}\left(\frac{S}{1.5}+1\right)}{\left(\frac{S}{.35}+1\right)}$	Hall; 1 rad/sec. のコーナーを持つ三次二項フィルターを通したホワイト・ノイズ。スプリングの拘束づきの航空機のハンドル制御では模擬航空機の縦方向の制御と横方向の制御とを行なうことになった。 測定範囲は $.5$ から 3 rad/sec. 平均 ρ は, 周波数増大につれて $.4$ から, $.4$ rad/sec. に下る。
$\frac{15}{\left(\frac{S}{.2}+1\right)}$	$\frac{4.0e^{-.2s}\left(\frac{S}{.4}+1\right)}{\left(\frac{S}{.1}+1\right)}$	
$\frac{15}{\left(\frac{S}{.1}+1\right)}$	$\frac{4.0e^{-.2s}\left(\frac{S}{.3}+1\right)}{\left(\frac{S}{.08}+1\right)}$	

(表4—続き)

制御対象 $Y_c(S)$	人間操作者の記述関数 $Y_p(S)$	研究者, 目標波, 制御課題, 備考
$\frac{1}{S}$	$\frac{3e^{-.15S}\left(\frac{S}{.35}+1\right)}{\left(\frac{S}{.2}+1\right)}$	Russell; 4つの成分正弦波 $\omega_i = .66, 1.68, 2.87, 4.27$ rad/sec. の合成波。振巾の包絡線は .85 rad/sec. のコーナーを持つ1次二項フィルター; ハンドル制御には全然拘束がない。
$\frac{1}{S}$ $\frac{5}{S}$ $\frac{15}{S}$	$\frac{3e^{-.2S}\left(\frac{S}{.3}+1\right)}{\left(\frac{S}{.07}+1\right)}$ $\frac{1e^{-.2S}\left(\frac{S}{.3}+1\right)}{\left(\frac{S}{.07}+1\right)}$ $\frac{.6e^{-.2S}\left(\frac{S}{.3}+1\right)}{\left(\frac{S}{.06}+1\right)}$	Hall; 1 rad/sec. のコーナーを持った三次二項形フィルターを通したホワイト・ノイズ。スプリングの拘束ぶきの航空機のハンドル制御では, 模擬航空機の縦方向の制御と横方向の制御とを行なうことになった。測定範囲は .5 から 3 rad/sec. 平均 ρ は周波数増大につれて .85 から .45 と減っている。
$\frac{(S+1)}{S}$ $\frac{\left(\frac{S}{2}+1\right)}{S}$	$\frac{120e^{-.2S}\left(\frac{S}{45}+1\right)}{\left(\frac{S}{.05}+1\right)}$ $\frac{250e^{-.2S}\left(\frac{S}{20}+1\right)}{\left(\frac{S}{.3}+1\right)}$	Russell; 4つの成分正弦波 $\omega_i = .277, .741, 1.21, 1.80$ rad/sec. の合成波。振巾の包絡線は .36 rad/sec. なるコーナーを持つ一次二項フィルター。ハンドル制御には全然拘束がない。
$\frac{5S+10}{5S+1}$ $\frac{20S+10}{20S+1}$	$\frac{K_{high}e^{-.2S}\left(\frac{S}{.2}+1\right)}{\left(\frac{1}{\omega_{small}}+1\right)\left(\frac{S}{.6}+1\right)}$ $\frac{K_{high}e^{-.2S}\left(\frac{S}{.15}+1\right)}{\left(\frac{S}{\omega_{small}}+1\right)\left(\frac{S}{.45}+1\right)}$	平均 $\rho = 0.7$ 平均 $\rho = 0.9$

波数かせまい周波数帯域かのいずれかが後者の決定には用いられたからである。

測定結果をもっと正確に述べるために, 表4と5は, 人間の反応データによってカバーされる周波数範囲における制御対象近似特性を示している。表5に示されている

表 5: 種々の複雑な制御対象, ランダムに見える目標波を用いての補償的トラッキングにおける操作者記述関数の総括

制 御 対 象 $Y_c(S)/K_c$	人間操作者の記述関数 $Y_p(S)$	研究者, 目標波, 制御課題, 備考
$\frac{1}{\left(\frac{S}{\omega_{n1}}\right)^2 + \frac{2\zeta S}{\omega_n} + 1}$ $\omega_{n1} = 7.8\zeta = .371$ $\omega_{n2} = 16\zeta = .371$	$Y_{p1} = \frac{5e^{-.2S}\left(\frac{S}{7} + 1\right)}{\left(\frac{S}{.4} + 1\right)}$ $Y_{p2} = \frac{15e^{-.2S}\left(\frac{S}{20} + 1\right)}{\left(\frac{S}{.2} + 1\right)}$	<p>Russell; 4つの成分正弦波 $\omega_i = .66, 1.68, 2.87, 4.27$ rad/sec. の合成波。振巾の包絡線は .85 rad/sec. にコーナを持つ一次の二項フィルター。ハンドルの制御には拘束がかからない。平均 $\rho = .75$</p>
$\frac{1}{S\left[\left(\frac{S}{55}\right)^2 + \frac{2(.25)S}{55} + 1\right]}$	$\frac{200e^{-.15S}\left(\frac{S}{.4} + 1\right)}{\left(\frac{S}{.05} + 1\right)\left(\frac{S}{2.5} + 1\right)}$	<p>Tustin; 低速入力としては3つの成分正弦波 $\omega_i = .113, .34, .68$ rad/sec. の合成波。高速入力としては $\omega_i = .17, .49, .98$ rad/sec. の合成波。スピード型取っ手付ハンドルによる模擬戦車の銃によるトラッキング。 $Y_c(S) = 1/S$ 平均 $\rho = .95$ 示された伝達関数は Tustin によって与えられたものと正確には一致せず。</p>
$\left(\frac{S}{3} + 1\right)$ $S\left[\left(\frac{S}{20}\right)^2 + \frac{2(.8)S}{20} + 1\right]$	$\frac{200e^{-.15S}\left(\frac{S}{.4} + 1\right)}{\left(\frac{S}{.07} + 1\right)(S+1)}$	<p>Tustin; 上と同じだが, ρ の推定は行なわれなかつた。</p>
$\left(\frac{S}{1.37} + 1\right)$ $S\left(\frac{S}{1.67} + 1\right)\left(\frac{S}{2.50} + 1\right)$	$\frac{.4e^{-.25S}\left(\frac{S}{.3} + 1\right)}{\left(\frac{S}{5} + 1\right)}$	<p>Goodyear; 2 rad/sec. のコーナを持つ三次の二項フィルターを通じたホワイト・ノイズに, 目標波がほぼ等しいように四正弦波が合成された。パネによる拘束つきの模擬航空機の操縦桿による縦方向の制御。記述関数はアナログ計算機の回路によって近似された。</p>

$\frac{\left(\frac{S}{1.4}+1\right)}{S\left(\frac{S}{2.4}+1\right)\left[\left(\frac{S}{4.2}\right)^2+\frac{2(.52)S}{4.2}+1\right]}$	$\frac{K_p e^{-.6S} \left[\left(\frac{S}{\omega_n}\right)^2 + \frac{2\zeta S}{\omega_n} + 1 \right]}{[T_N S + 1]} K_T \left(\frac{aT}{\sigma T}\right)$	<p>Goodyear; .33 rad/sec. のコーナーを持つ一次の二項フィルタを通し、次に 4 rad/sec. のコーナーを持つ一次の二項フィルタを通してホワイト・ノイズ。慣性と減衰性を持った操縦桿による模擬航空機の縦及び横方向の制御。記述関数はアナログ計算機の回路によって近似された。</p>
$\frac{\left(\frac{S}{.24}+1\right)\left(\frac{-S}{2.9}+1\right)}{S^2\left(\frac{S}{.0017}+1\right)}$	$\frac{.2e^{-.15S}\left(\frac{S}{.2}+1\right)}{\left(\frac{S}{2.5}+1\right)\left(\frac{S}{10}+1\right)}; \omega_{c0}=1 \text{ rad/sec.}$ $\frac{.3e^{-.15S}\left(\frac{S}{.3}+1\right)}{\left(\frac{S}{3}+1\right)\left(\frac{S}{10}+1\right)}; \omega_{c0}=2 \text{ rad/sec.}$ $\frac{.5e^{-.15S}\left(\frac{S}{.2}+1\right)}{\left(\frac{S}{1.5}+1\right)\left(\frac{S}{10}+1\right)}; \omega_{c0}=4 \text{ rad/sec.}$	<p>Franklin Institute; 3つのコーナー周波数 $\omega_{c0}=1, 2, 4$ rad/sec. を与える3次の二項フィルタを通してホワイト・ノイズ。バネによる拘束つきの操縦桿による模擬航空機の横方向の制御。縦方向にも同時に制御可能。測定範囲は、.6から 3.6 rad/sec. 平均 $\rho \approx 5$</p>
$\frac{\left(\frac{S}{.28}+1\right)\left(\frac{S}{1.58}+1\right)}{S^2\left[\left(\frac{S}{3.98}\right)^2+\frac{2(.56)S}{3.98}+1\right]}$	$\frac{.6e^{-.15S}\left(\frac{S}{4}+1\right)}{\left(\frac{S}{40}+1\right)\left(\frac{S}{10}+1\right)} \approx .6; \omega_{c0}=1 \text{ rad/sec.}$ $\frac{.6e^{-.15S}\left(\frac{S}{6}+1\right)}{\left(\frac{S}{20}+1\right)\left(\frac{S}{10}+1\right)} \approx .6; \omega_{c0}=4 \text{ rad/sec.}$	<p>Franklin Institute; 目標波と測定範囲は上と同じ、操縦桿へのバネの負荷は異。縦横に制御可。平均 $\rho \approx 6$ $\omega_{c0}=1, 2$ rad/sec. については、符号関係もよく当てはまるし、$\omega_{c0}=4$ rad/sec. については、$Y_p = .6e^{-.25S}$ が『最も良く』当てはまる。</p>

Goodyear の結果は事実アナログ計算機を用いて得られた。これ等は、外から得られたデータと比較可能なように、ガウス型入力での記述関数に変換された。

表1から5は数学的術語による記述関数結果の完全な概括である。制御対象の特性が操作者に及ぼす影響をよりよく評価するために、我々は三つの最も簡単な制御対象の形態に対するデータに関して、一般的な注釈と観察を行なうことが出来る。

1. 制御対象のゲイン $Y_c=K_c$ 変化の効果

目標量としてのある関数に対して、表示部或は操作部での試行中か試行間かのいずれかにおけるゲイン変化の効果は、操作者によって殆んど完全に補償されるのだが、彼は全体としてのループ・ゲインをある一定値に保つかのように、自己のゲインを設定する傾向がある。ループ・ゲインの増加は、『もっと一生懸命やれ』との教示の結果であるとも言える。

2. 単純な遅れ $Y_c=1/(TS+1)$ の挿入効果

単純な遅れが制御ループに入れられると、操作者の伝達関数がかなりな程度変化する。どの事例においても、主要な効果は、導入された遅れを補償する傾向のある仕方で操作者が進み項を発展させ、ゲインの減少を行ない、恐らく一次遅れの時定数を変化させることであった。

次のことにも注意が払われるべきである；

a. 遅れの時定数が約0.05秒以下の時には、挿入された遅れが記述関数に全く影響を与えなかった。その上、操作者は遅れが挿入されたということについても、殆んど気づき得なかった。

b. 制御対象の時定数が0.05秒以上に増すと、操作者は系の応答がのろくなったことにそれと気付くようになった。このことは時定数の増加とともにだんだんと顕著になり、時定数 T の値が2秒或はそれ以上になると、操作者にとって制御対象があたかも純粋な積分器であるかのように思われるようになった。

c. 遅れが初めてループの中に挿入されると、操作者はある程度の訓練を積む迄は、いくらかオーバー・シュートしたり、時には系の不安定点にまで至ったりする傾向がある。一分かそこらの訓練の後には、適当な安定性を獲得する迄に適応を示す。

d. 遅れが挿入されたばかりの時のループ・ゲインの減少は、安定性を維持するに要するループ・ゲインの減少よりも大きい。

3. 純粋な積分 $Y_c=K_c/S$ の挿入の効果

簡単な純粋積分器から成る制御対象では、操作者は自己のゲインを低め、一般に $e^{-\tau s}$ を補償する傾向のある進みを導入する。この変化は全体としての系を安定化するが、又トラッキングの平均平方偏差を制御対象なしの場合以上に増大する方向でもある。閉ループでの低周波応答は S^{-1} 項による低周波数での全体としての高振巾比の故に改良される。 K_0 を変化させると、操作者は交叉点周波数（或は開ループ・ゲイン）を実質的に一定に保つように自己のゲインを修正する。

VIII 操作者のレムナント・データ

定義によれば、レムナントとは、目標量と相関々係にない、即ち系への入力に対する線型な演算の結果としては『説明され』得ない操作者の出力の部分のことである。使用可能なデータの殆んどものは、目標量としてのランダムに見える関数についても考えられるから、レムナントをパワ・スペクトル密度 Φ_{nn} によって表現するのが便利である。ある状況においては、 Φ_{nn} という成分は次のようなところから生ずるものなのだろう；

1. 想像される目標量とは違った入力に対する操作者の反応。これ等の反応には二種類のもの存在し得る；
 - a. 操作者による、これ等の入力に対する線型な操作の結果、
 - b. これ等の入力に対する非線型操作の結果、
2. 操作者による、想像される目標量に対する非線型操作。
3. 目標量と完全に無相関な、即ち線型相関によつては説明されない、或は非線型の相関のある『ノイズ』をループに挿入すること。

このノイズは、システムを表わすブロック図において、操作者の『ブロック』内のどの位置にでも挿入され得る。だが、ノイズを、ブロックへの入力或はブロックからの出力のところにまとめて挿入されると考えるのが普通は最も便利である。

4. 測定の際中に、操作者の線型な伝達関数が増加すること。必然的に、記述関数を実験的に見出すためには、かなり長時間の実験、例えば2分～4分の実験を行なう必要がある。操作者は、実験のある部分ではある線型の仕方では反応するが、他の部分では別な線型の仕方では行動するように変化するか、或はずっと短い時間間隔で殆んど連続的に自分の特性を変化させているのかもしれない。実測記述関数は、勿論、これ等総ての特性のある種の『平均』であり、それ故、実測出力パワの総てを説明しつくすことは出来

ない。この種の行動は『非定常』と名付けられよう。

これ等の可能性はいずれも、現存のレムナント・データの説明に対してはそれぞれ長所を持っている。

そこで、我々は一連の可能なレムナント『モデル』を誘導してみた。但し、それらのモデルは、総てのレムナントを総括的に説明するように作られている。詳細にわたっての解析は、ここでの範囲を越えているが、ここ迄に誘導してきた種々のレムナント・モデルを概括することが出来るし、又図5の様の形で記述することも出来る。

A. ノイズ挿入モデル

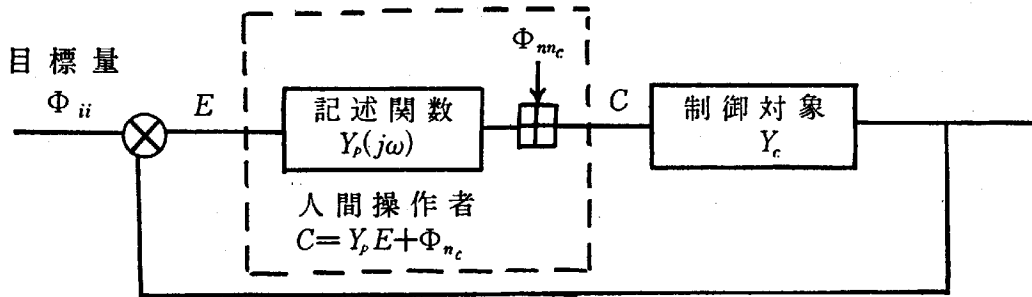
1. 入力部分へのノイズ挿入

視覚器（或は操作者への入力に近い他の位置）に誤差が生ずる可能性が実際にあり、そのことがレムナントの原因の一つにもなっているのだが、実測のレムナント・データに当てはめるために用いられるような先験的モデルを発展させることは困難である。だが、Elkind や Franklin Institute によって成された測定で得られたレムナント・データは入力へのノイズ挿入という仮定と一致した形に変換され、それから何か適当なモデルを示唆する傾向があるかどうかを調べられた。この手続は如何なる明了な発見をももたらさなかった、もっとも、Elkind の矩形スペクトルの目標量でのテストで得られるレムナント、 f_{co} の値は 0.64 cps に至るまでである、は入力のところに入れた『ホワイト・ノイズ』によって等価的に表現され得ることに注意がなされた。

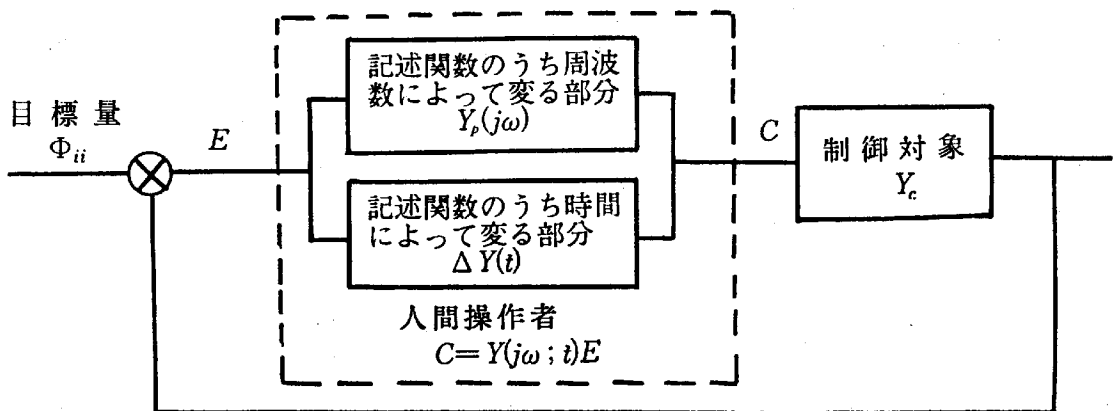
2. 出力部分へのノイズの挿入、このレムナント発生の可能性は図5aによって表わされる、但し、『ノイズ』或は誤差は、操作者の線型出力の上に重ね合わされ、効果的に系に挿入される。ある種の先験的モデル (McRuer and Krendel (1957), Elkind (1956)) は、人間の出力反応 $c(t)$ が、一連の不連続的階段波によって近似され得るという仮定に基づいて導出され得る。各階段波は、だから二つの構成要素から成ろう、即ち、

- a. 目標量と線型な関係にある部分；
- b. 目標量とは線型な関係になく、他の総ての出力階段波とは独立な、ランダムな誤差或はノイズを表わす部分 $n_c(t)$

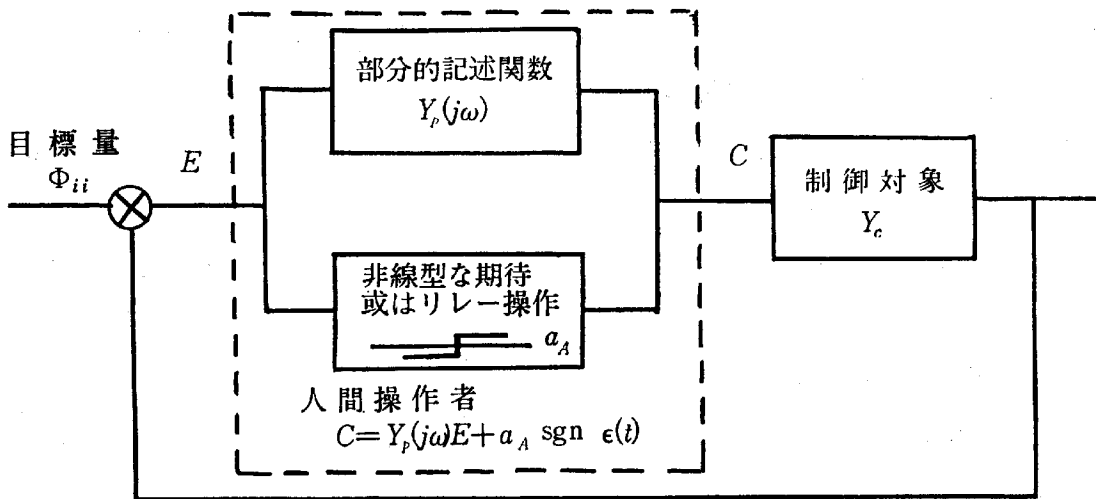
以上の仮設の数学的な結果は、出力に挿入されたノイズが以下に与えられるスペクトル密度を持つであろうということである。



a. 出力部分でのノイズ挿入レムナント・モデル



b. 非定常な操作者行動レムナント・モデル



c. 符号関数と並列つなぎの線型と線型関係にある操作者の記述

図5: 操作者モデルの可能な形態

$$\sigma_{nc}^2 = 2T\sigma_c^2 \left(\frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} \right)^2$$

(19)

但し, T は出力階段波の変化から変化までの平均時間であり, σ_c^2 は挿入されるノイ

ズの平均平方値である。もしこの形の式が、曲線を Elkind の矩形の目標量のスペクトルをしたデータに当てはめるのに用いられると、曲線の当てはまりは望んでいたほど正確には行なわれないが、一般的傾向としては当てはまっていると見てよいことがわかる。以上のことは、このレムナント・モデルが受け入れられるなら目標量のバンド巾の増加につれて、出力階段波の変化から変化までの時間は増加し、平均平方ノイズは少しだけ減少するというを示している。

B. 非定常な操作者の行動モデル

この概念は、操作者の伝達特性が本質的には線型であるが、目標量と線型な関係にな
いある ランダムな仕方で時間的に変化するという考えに基づいている (McRuer and
Krendel (1957))。使用できる先験的モデルがないが、Elkind の閉ループ・レムナン
ト・データは、閉ループ伝達関数の時間的に変化する部分、 $\Delta H(t)$ から生じるものと

解釈されるなら、 $\left[\frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} \right]^2$ 曲線によく当てはまる。これ等が当てはまるということ

は、もし非定常的行動がレムナントの主たる原因であるなら、閉ループ伝達関数のラン
ダムに時間的に変化する部分、 $\Delta H(t)$ は有蓋車様時間構造 boxcar-like time structure
を持つだろうことを、意味する。その平均平方値は目標量のバンド巾にほぼ比例して増
加するだろうし、 $\Delta H(t)$ の時間的経過における 階段間の時間は平均約 0.25 秒であろ
う。等価な開ループの時間的に変化する特性、 $\Delta Y(t)$ は、目標量の特性に徹底して依存
しているとはいえない rms 値を持つだろうし、恐らくほぼ一定であろう。このような
非定常的伝達特性は、図 5b に示されるような、周波数によってだけ変化する記述関数
と並列的に動作するだろう。

C. 非定常な伝達特性モデル

Elkind と Franklin Institute との両方のデータにおいては、入力振巾が変化して
も記述関数の測定値は殆んど変化していない。このことは、検査された条件の範囲内
では、非線型要素が直列つながりの場合は重要な効果を持っていないということを示して
いる。他方、Goodyear のアナログ計算機による研究はシステムの線型要素と直列につ
ながった閾要素を使用する必要があると述べた。この閾は、知覚閾等のせいにはされ得る
ものよりかなり大きく、明らかに操作者の無関心、或はある水準以下の信号を無視しよ
うとする傾向によるものであった。Elkind の結果にあらわれている記述関数における
小変動は、この閾の存在と矛盾しない。

だが、全体としての効果は非常に小さく、それがレムナントの重要な原因であるとは考えられない。

だが、非線型要素が線型記述関数と並列になると、事情は違ってくる。Goodyear の研究は、現実の操作者とアナログ計算機による近似操作者との間の良い対応を得るために、丁度このような要素を必要とした。そこで用いられている形は、準線型記述関数と並列的に作用している予想、或は符号関数であった(図5c)。もし並列的符号関数或は完全なりレー関数という記述関数が、準線型の記述関数に比べて小さいなら、完全なりレーとしての反応に主として貢献しているのはレムナントであろう。

更に、レムナントの時間的経過は、出力部分へのノイズ挿入モデルと非定常操作者レムナントモデルとの結果として既に注意された有蓋車の矩形状のものであろう。Goodyear によって用いられている特殊な目標量については、階段から次の階段までの平均時間値は、前述の概念によって導出される値とうまく一致する。又、Elkind の矩形スペクトルの目標量でのデータの殆んどのは、符号関数の仮定によって説明され得る。

不幸なことに、Franklin Institute の F-80 のシミュレーターのレムナント・データは制御対象の効果によって著しくよごされており、上述の三つのレムナント・モデルが妥当するか否かをうまく位置づけ得ないような、高い周波数帯域にまでわたって測定が行なわれた。だが一般に、Franklin のデータは三つのモデルのいずれとも一致している。又、縦方向の制御の場合においては、操作者の記述関数は、1 及び 2 ラジアン/秒のコーナー周波数については、純粋なゲインとしてかなりうまく表わされる。線型相関は 4 ラジアン/秒のコーナー周波数の場合にはやや高かったし、この場合には Y_p の位相特性は単に $e^{-0.25S}$ よって近似され、符号関数はそれほど支配的ではない。F-80 シミュレーターの縦方向の制御課題の場合は、対応する横方向の制御課題の場合よりも高い線型相関であるが、両者とも本論文で考察された総ての課題の中で最も低い線型相関であった。

上述の主なレムナント・特性に加えて、Goodyear の検査で観測された震えの現象も、ある状況下での可能な人間の出力であると考えられねばならない。この震え動作は、例えばクーロン摩擦の効果を減少するための線型化手法として自動制御系において用いられる動作と類似的である。Goodyear の検査に現われた外にも、震え動作は、このような手法が操作者にとって適用可能な戦術であると思われるような、実験では操作

者によって使用されたことがある。震え動作は、いずれの場合にも意識的動作であって、必要な場合には操作者によって除去され得るものである。データについて、ここで批評してみた。

1. Elkind の検査には震えがあらわれなかったが、それは多分操作部に対して全く拘束が加えられていなかったからであろう。

2. 震えは恐らく Russell の実験のうちのいくつかのものでは在存していただろう、何故なら 1.23 cps での鋭いピークは測定されたレムナント・スペクトラムにだけ見出されたからである。Russell の制御ハンドルのスポークは、かなり高水準のクーロン摩擦をもって装置にじかに取付けられているため、震えはのぞましかったのかもしれない。

3. Franklin Institute の一連の検査においては、数人の被験者は訓練期間の間に震え信号を使用しようと一生懸命試みたが、実験期間に移る前にそれをやめてしまった。これは、震えの導入がシミュレーターを操作するために不適切な手法であったからではなくて、これ等のパイロットが震え導入を正常な操縦スタイルにはないものと考えたからである。

IX 補償的トラッキング課題の際の

人間操作者の仮説的モデル

表1から5に示されているデータから、もっともらしい操作者のモデルを仮定することを試みてみよう。仮説的モデルを構成するに際して、先ず伝達特性を一項一項考えていこう。

A. 仮説的伝達関数或は記述関数

1. 反応時間遅れ $e^{-\tau j\omega}$ の項で表わされる反応時間遅れは、ある程度の子測不可能性或は『ランダムネス』を含む目標量を使用した場合の操作者を表わす伝達関数には、総てあらわれる。又、操作者の入力ランダムに見えるような、総てのトラッキング課題において、 $e^{-\tau j\omega}$ 項が存在することはあり得ることである。もっとも、ランダムに見える入力と言言可能な入力との間の現象的水準での境界線は現在のところよく定義されていないが……。

複雑で非正弦波的偏差信号（操作者への入力）を生む、操作者プラス複雑な制御対象への完全に言言可能な正弦波目標量の使用は、恐らくランダムに見える入力のクラスに分類されるだろう。だが、制御対象がより単純な形になると、言言可能な正弦波形を保

存する傾向があらわれ、操作者への入力は予言可能なクラスに分類されるようになる。

τ の値を導くために、ムダ時間以外には最も単純な伝達関数を当てはめるとすると、この最初に決められる純粋な時間遅れには、かなりの変動があることは明らかである。更に、安定性要求が主張され、当てはめられた伝達関数形の安定性が、測定されたバンド巾以上の周波数では高周波数遅れを導入することによって得られる時、ランダムに見える視覚的入力については結果としての τ の値は比較的せまい範囲内におさまり、中央値は約 0.15 秒位となる。また、 τ 値は、まばらに与えられた階段波入力では約 0.25 秒、もっと短い間隔で与えられランダムに見える不連続的な階段波入力では約 0.20 秒 (表 1 参照)、上述のランダムに見える入力の場合には 0.15 秒と、かなり定常的に減少していくように見える。目標量がランダム波で、一入力一出力系の場合にも、二入力二出力系の場合にも、 τ は目標量だけの明瞭な関数でも、制御対象だけの明瞭な関数でもないようである。 τ の値における変動性が存在するものとすれば、それは被験者内の原因によるものであろう。 τ は以前からよく研究が成された反応時間遅れと密接な関連性を持つから、 τ の変動性についても反応時間の実験を参考にして考察が出来る。

従って、視覚的入力を連続的に補償的にトラッキングする際の仮説的線型モデルは、記述関数の中に、反応時間遅れを説明するための $e^{-\tau s}$ 項を常に含んでいる、但し τ はほぼ次の通りの値である

$$\tau \approx 0.15 \text{ 秒} \quad (20)$$

2. 神経筋肉的遅れ $Y_c=1$ で階段波の目標量が与えられた場合のデータの動作部分 (表 1) と、 $Y_c=1$ での正弦波の目標量が与えられ、トラッキングが非同期的時期でのデータの動作部分 (表 1) とは、かなりの程度の類似性を持つており、恐らく人間の反応の動作 (神経筋肉的) 部分を示しているのだろう。

他の記述関数のデータにおいては、この動作部分はそれほど明瞭ではない、その理由は、測定した周波数範囲では、動作部分の効果は少なかったからであろう。だが、データの多くのは、系を安定させるために、測定したバンド巾以上の高周波数遅れをつけ加えることを最小限必要としたことが思い出されよう。

Elkind の目標量の高いバンド巾が神経筋肉的遅れのために非常に大きい値を許すことはめったにならう、何故なら、全体としての遅れから小さくはあるが τ の値を引いてやらねばならないからである。

真に神経筋肉系によって低周波数での遅れが生ずる可能性は極めてありそうもないこ

とである。

高周波数での証拠の多くのもの（階段波入力での証拠についてはなおさらのことだが）は、神経筋肉的遅れの存在を示しており、他の殆んどデータも神経筋肉的遅れの存在の可能性を示しているから、仮説的操作者モデルはその項を含むべきである。実際に神経筋肉系によるものであるなら、これ等の遅れ項は少なくとも二次遅れであるべきであるが、例えば Elkind の近似的ホワイト・ノイズをフィルターに通したものを目標量とした実験では、第一次近似として一次遅れが用いられている。

3. 無関心閾 Goodyear によって用いられ、Elkind のデータとも両立し得る『無関心閾』効果が存在するように思われる。それ故、この直列的效果は少なくとも原理的には考慮されるべきである。これには、他の伝達関数要素と直列に閾の記述関数 $K_T\left(\frac{a_T}{\sigma_T}\right)$ を用いればよい。例えばガウス型入力での記述関数では、これが以下のように近似される

$$K_T\left(\frac{a_T}{\sigma_T}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{a_T}{\sigma_T}\right) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{a_T}{\sigma_T} e^{-\left(a_T/\sqrt{2\sigma_T}\right)^2} = 1 - 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{a_T}{\sigma_T}; \frac{a_T}{\sigma_T} \ll 1 \quad (21)$$

但し、 a_T は閾値で、 σ_T は操作者への入力信号の rms 値で、 $\Phi(x)$ は誤差関数である。式(21)は、観測される a_T/σ_T の値が比較的小さいから、1 よりほんの少ししか小さくない。従って、これ迄の実験の範囲内では、それはあまり大きな効果を持っていないと考えられる。

4. 同等化 如何なる伝達関数形においても考え得る最重要な項は、操作者の同等化能力である。これは、場合によって、一次進みであったり、低周波数一次遅れであったり、（神経筋肉系の一部であろう）変化し得る高周波数遅れであったりする。

動かない実物大模擬装置を使用して、視覚的入力を与えての実験的研究だけを考えると、以下の総ての条件が当てはまる時には、単一の低周波数遅れ項が常に存在するように思われる：

- a. 低周波数一次遅れの導入が、低周波数での系の応答を改良するであろう時；
- b. 低周波数での系の応答が、入力のバンド巾が低い故に重要である時；
- c. 低周波数遅れの導入が、単一の一次進みによっては克服されないほどの高周波数での不安定効果をもたらさないような、制御対象の時；

以上の諸条件が当てはまらない時には、低周波数遅れは現われない。

進み項が系の安定性か低周波数での系の成績の観点かのいずれかから望ましいよう

に、操作者の『変化し得えない』反応時間遅れ項と結びついた制御対象の特性がなっている時には、操作者は一次進み動作を行なうだろう。

視覚的にランダムに見える入力に出くわし、比較的単純な制御対象を制御する時に、操作者が低周波数での二次遅れか二次進みかのいずれかの動作を行なうことは難しい。(表2～4参照)。研究されたいくつかの系では、このような項を有利に使用することが出来たが、これが存在するか否かの結論的なことはいえない。

だが、経験をつんだ操作者が系の安定性のために二次進みを行なうという事例が、もっと複雑な制御対象を持った系には存在する。又、二次進みは特別な状況下では可能のように思われる。例えば、動くシミュレーターに乗り込んでの Goodyear による実験で高度に訓練をつんだ海空軍ジェット・パイロットは二次進み動作を行ない得た(表5)。

数学的に表わすと、視覚的入力を与えられた場合に、操作者の同等化特性は一般に次の形をとり得る：

$$\begin{aligned}
 K_p \frac{\alpha T_I j\omega + 1}{T_I j\omega + 1} & \quad \alpha > 1 & \quad (\text{進み-遅れ}) & \quad (a) \\
 K_p \frac{\alpha T_I j\omega + 1}{T_I j\omega + 1} & \quad \alpha < 1 & \quad (\text{遅れ-進み}) & \quad (b) \\
 K_p (T_L j\omega + 1) & & \quad (\text{単純進み}) & \quad (c) \\
 \frac{K_p}{T_I j\omega + 1} & & \quad (\text{単純遅れ}) & \quad (d) \\
 K_p & & \quad (\text{純粹ゲイン}) & \quad (e)
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

周波数によって変化する同等化特性の形に適応させるこの能力は、操作者の適応的行動と言われる。伝達関数は操作者の訓練の程度に強く影響をうける。記述関数は訓練期間後には妥当なものとなる。それ故、操作者が特定の制成過程に精通した後に、彼が成し得ることを適応的行動という。勿論、最終的伝達関数形に到達するために必要な試行錯誤過程の長さは、目標量の種類と制御対象の特性と操作者の背景に完全に依存している。例えば、Russell の検査においては、一実験の間に制御対象の変化にうまく適応するのに数秒しか要しなかった；Franklin Institute F-80 シミュレーターでは、熟練したパイロットを被験者として用いた時ですら、シミュレーターになれるだけでもっと長くの時間を要した。Goodyear の報告では、非パイロットはシミュレーターを制御する際に適度の熟達をするのに 20 時間余が必要であった。

5. ゲイン調整と最適化行動 総てのデータから、操作者のゲインが高度に調整可能なパラメーターであることは明らかである。特定課題における個人的動機と訓練にはっきりと影響されるようにも思われる。

ゲイン調整に加えて、操作者が上に調整された荒い限界内で同等化関数の形態を選択する際に適応的であるばかりではなく、又適応された伝達関数内で定数のいくつかのものを値を調整さえするというを、手許にある総てのデータは示している。この行動についての洞察は、単純操作者のデータ⁽²⁾を目標量のバンド巾の関数と考えることによって得られる。Franklin の単純操作者(表2)から、バンド巾が増すにつれて進みの時定数 T_L がかなり減少するよう思われる。そして、そのことは、提示された情報がこのように増大を要するようになるにつれて、操作者が自分のバンド巾を増大しようとしていることを示している。類似の傾向は Russell や Elkind のデータにも見られるが、例えば Elkind のデータで、操作者が低周波数での遅れの時定数とゲインを $K \doteq 9.42 T_L$ なる関係で変化させているということは、例外的な事柄である。ゲイン調整と最適化行動とは、目標量に追従し、目標量以外の効果を最小にしようとして努力して自分のパラメーターを調整する操作者の側にある明確な傾向を示している。

この行動は、『最適化』自動制御系に期待される行動、即ち定数の値を入力関数としての最適行動条件に調整する行動に類似している。だから、人間操作者が(比較的固定した形態内で)『適応的』であり、(定義困難な基準へと)『最適化』を行なっているということが言える。事実、人間操作者は適応的最適化自動制御系の外ならぬ原型である。

人間の実際の内的基準というものは定義不可能なものであるが、操作の結果についてはかなりの洞察を得ることが出来る。図6は、測定される記述関数の点が開ループ・ゲイン 0 db をとるような事例について、手許にある総ての位相余裕(開ループ・ゲインが1になる時の開ループ位相を、 180° から引いたもの)を概括している。位相余裕が実測データから読みとられたのだが、その結果の実測データへの曲線の当てはめから推論される位相余裕とは必ずしも正確に一致はしていない。最後に調整されたものとしての、ゲインと同等化とは、位置余裕が 60° から 110° 近辺になるように行なわれる、ということを以上のデータは示している。これ等の位相余裕の値は、自動制御系の設計者によって用いられる値と非常に類似している。

(2) simple tracker の訳。

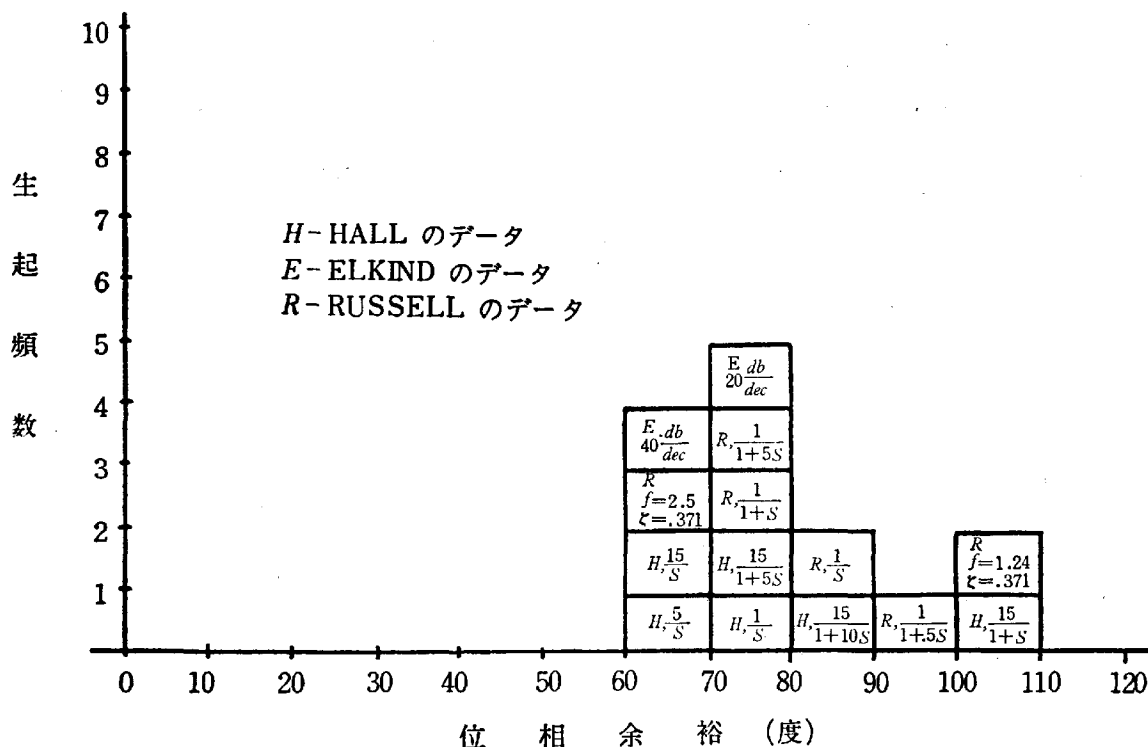


図6; 実測された位相余裕

要約すると、操作者は自分に提示された入力関数としてパラメータを調整するように見える。更に、彼は、自分はこの位だと思っている成能水準⁽³⁾か、或はおそらく自分の能力の極限を表わすと思われる水準かのいずれかを達成してしまうまで、自分の伝達特性を修正しつづける傾向がある。図6の位相余裕データが最初の方の可能性を支持する傾向があるが、実験者が操作者に行なうように促すのは後の方の可能性であるということは、指摘されるべきである。他の実験条件、例えば操作者に信号を表示部上の固定した一定範囲内にとどめておくように言う時は、上と類似の結果を生じはしないだろう。

6. 仮説的伝達関数モデル 上述の総てのことから、手許の総てのデータに一貫している、ランダムに見える視覚的入力と運動的出力に対して、人間操作者の線型な適応可能なモデルを仮定することが今や可能である。公式の形では：

$$Y_p = \frac{K e^{-\tau j\omega} (T_L j\omega + 1)}{(T_I j\omega + 1)(T_N j\omega + 1)} K_T \left(\frac{a_T}{\sigma_T} \right) = \frac{K_v e^{-\tau j\omega} (\alpha T_I j\omega + 1)}{(T_I j\omega + 1)(T_N j\omega + 1)} K_T \left(\frac{a_T}{\sigma_T} \right) \quad (23)$$

但し、反応時間遅れ τ は、 $0.12 < \tau < 0.20$ 秒。神経筋肉的遅れ T_N は課題毎に部分的調整可能。

(3) performance level の訳。

同等化 $\frac{(\alpha T_I j\omega + 1)}{(T_I j\omega + 1)} = \frac{(T_L j\omega + 1)}{(T_I j\omega + 1)}$ は、目標量と制御対象によって調整可能。

ゲイン K_p は全体としての系の安定性と低周波数での成績のために調整可能。

無関心閾 $K_t \left(\frac{a_r}{\sigma_r} \right)$ は、調整や未知の値によってあまり影響を受けない。

目標量が存在する場合に、操作者が最適の制御者制御対象系応答であると思うものを得るために、上式の制限内で、操作者は自分の伝達関数（遅れ—進み，進み—遅れ，純粹進み，純粹遅れ，或は純粹ゲイン）を適応させる。適応された伝達関数形は、いずれも全体としての系の安定性を持ち、低周波数で良い制御特性を持っている。諸定数は、自動制御理論の rms 最小基準と類似のある行動基準へと調整され、 60° から 100° の位相余裕については一致している。換言すれば、自動制御技術者が、もし『暗箱』とともに制御すべき要素を与えられたなら選ぶであろう伝達関数と、操作者伝達関数は非常に類似しており、その伝達関数内部には (23) 式で与えられる記述関数を作り上げる要素を持っており、外部に α , T_I , K_p 調整用の取手を持っている。

B. 仮説的レムナント・モデル

一次元での制御においてシステムへの目標量と線型関係にない、操作者の出力部分を説明するために、三つのモデルがこれ迄に提案された。解析的関数とこれ等の可能性の一般的帰結とが前節の図 5 に示されている。

これ等三つの考えはお互に殆んど優劣がつかない。操作者に無相関の出力のパワに関する現存のデータによれば、三つはいずれもお互に事実上は等価なモデルなのである。更に、いずれもが、少くともある程度は人間の応答の時間記録に観測される準周期的行動を『説明している』。

Goodyear のアナログ回路と実際のパイロットとの間の点毎での出力の照合のようにして、もっと詳細にわたる因子が調べられると、Goodyear の研究から導き出される、完全に並列的リレー記述は、非常に誘惑的となる。不幸なことに、この記述は、制御対象と目標量がある場合に限っているのである。他のレムナント・データは、この『予期』モデルによってかなりの程度説明され得るし、（その逆も又勿論成立するが）極限的な事例は、これが最良のモデルであると断言するのに我々を慎重にさせる傾向がある。操作者の課題が非常に必要な時に、この極限的な条件が生ずるのだから、その結果、並列的ではば線型な記述関数は、記号伝達特性の記述関数 $K_A \left(\frac{a_A}{\sigma_e} \right)$ に比べて非常に小さい。これ等の条件下では、全体としての操作者の記述関数は、反応時間遅れなし

の純粹ゲインである傾向がある。このことは、Franklin での F-80 シミュレーターの縦方向の制御では事実であったが、横方向の制御では事実ではなかった、その場合には出力パワの 25%かそこらだけが線型操作によって記述される。

それ故データに関する制限から考えて、一つのレムナントの形を他のものよりもっばら選択することの正当性が不十分である。だが、各モデルの特徴について、次のような論評が成されよう：

1. 非定常的モデルは、曲線の当てめが最もうまくいっているという観点からの『最良』である；
2. ノイズ挿入モデルは、系の安定性の予言と一般的な自動制御解析のために仮説的伝達関数を用いる際には、単純さの観点から『最良で』ある；
3. 並列的符号関数、或は完全なりレー・モデルは、操作者の出力の点毎での予言のために、と操作者の行動の直観的物理的見方を創造する際に『最良』である。

三つのモデルの近似的等価性の故に、また上記の諸点の故に、現在のデータ蓄積の水準では折衷の見方が最も実際的であると我々は感じている。この見方を受け入れることによって、どのレムナント・モデルを選ぶかは、手許にある特定の仕事を解析しつつある技術者或は心理学者にまかされる。モデルが作られた際の実験条件によって課されている限界を越えないように、十分な注意が払われるべきである。

レムナントと線型相関に関するいくつかの一般的要因も考察されるべきである。簡潔に言えば、ゼロ以外の目標量については、一般的要因は次の如きものである：

1. 最高の線型相関係数は最も少い rms トラッキング誤差と関連している。
2. 最高の ρ の値は最も少いレムナントに対応しているから、最小 rms 誤差は最も少いレムナントと関連している。
3. 最も小さいレムナントは制御対象 Y_c が 1 に近い時である。
4. 最も少いレムナントは最も小さいバンド巾の操作者への入力と関連している。

X 補償課題における好まれる操作者の形態 ——『理想的』手動制御系の決定

前節では、特定課題における操作者の動作に関して考察が成され、適応的最適化モデルが操作者の行動を特徴づけるために仮定された。このモデルによって、ある程度確信をもって、人間機械系の動作を量的に予言することが出来る。系の分析のために有用で

あることは明らかであるが、系の総合のためにも、もし手動制御系がある系の動作基準に基づいて理想的なものとされるなら、操作者が如何に動作するかを知ることは望ましい。更に、もし『理想的』系が全体的立場から見て最も実際の系でもあるなら、如何にして我々は人間をその様に行動させればよいだろうか。

恐らく操作者が採用するのに最良の動作特性を誘導するために、我々は二種類のデータを用いることが出来よう。勿論、第一のデータは記述関数と先に概括されたレムナントデータとである。これ等のデータから我々は、全体としての系の動作という見地から外のものよりも望ましい傾向のある、制御対象と目標量についていくつかの結論を引き出すことが出来る。

第二のデータは、好ましい操作者特性を見付ける際の手がかりを我々に与えてくれるが、制御対象や目標量の条件の関数として系の成能を表わす測度を実験的に決定することによって得られる、例えば rms 誤差、目標一致時間等。このアプローチは、制御対象の特性を特に強調しつつ、Birmingham と Taylor 及びその同僚 (1954~1956) によって大規模に行なわれた。彼等は操作者行動の望ましい形態を仮定した。

Birmingham-Taylor が設計上注意すべき諸点として挙げている事柄の多くは、実際に適用が可能であろう。

図5において、人間操作者が次の一般形で表わされることを指摘した：

$$C(j\omega) = Y_p(j\omega)E + N_c(j\omega)$$

$$\text{或は } C(j\omega) = Y_p(j\omega; t)E \quad (24)$$

$$\text{或は } C(j\omega) = Y_p(j\omega)E + a_A \operatorname{sgn} \epsilon(t)$$

閉ループでは、これ等はいずれも、(少なくとも準・線型法によって) より容易に測定され、この意味においてより基本的である、量に置きかえられる。式(11)を繰返すことになるが、出力パワ・スペクトル密度は

$$\Phi_{cc} = |H|^2 \Phi_{uu} + \Phi_{nn} \quad (25)$$

又、偏差量のスペクトル密度は

$$\Phi_{\epsilon\epsilon} = \frac{|H|^2}{|Y_p|^2} \Phi_{uu} + |Y_c|^2 \Phi_{nn} \quad (26)$$

(25) 式の $|H|^2 \Phi_{uu}$ なる項、即ち開ループ記述関数 $Y_p Y_c$ と目標量のスペクトル密度 Φ_{uu} とは系の安定性と動作を決める際に重要である。(26) 式の線型項 $\left(\frac{|H|^2}{|Y_p|^2} \Phi_{uu} \right)$ とレムナント項 ($|Y_c|^2 \Phi_{nn}$) は偏差量のスペクトル密度 $\Phi_{\epsilon\epsilon}$ の重要な成分であるが、 $\Phi_{\epsilon\epsilon}$

に主として貢献しているのは通常はレムナント項の方である。トラッキングの精度は、例えば $\epsilon^2 = \int_0^{\infty} \Phi_{\epsilon\epsilon} df$ のように、偏差量のスペクトルと直接に関係しているから、レムナント Φ_{nn} の減少は動作精度の主要な鍵なのである。

適当な安定性と制御を維持しながら、偏差量のスペクトルがある意味で最小化されるようなものとして、『最適』手動制御系が定義されるなら、このことは、レムナントも又最小値に近いであろうということを意味する。レムナントは開ループ記述関数に依存しているから、操作者の記述関数 Y_p の『最適』形は、 Φ_{nn} を最小化する傾向のあるものと言える。勿論、操作者の記述関数は目標量と制御対象の特性とに依存している。もし好ましい操作者の記述関数形が見出され得るならば、それが得られるように目標量と制御対象の特性の方を調整することも出来よう。

制御対象の伝達特性と目標量の条件とが課題の困難度の主観的でない定義の主要なものであることは明らかである。これ等の性質の一つ或は両方が困難になるほど、レムナントが大きくなることも明らかである。こういったことの総ては、操作者が最も弱い要求に従う時に最良であるという事実の証拠として引用が可能である。ここで、最も弱い要求とは何を意味するかを定義する問題が生じてくる。この定義が成されたなら、最良の系の動作を生ずる特性を人間に発生させるような合理的な設計案を発表することが出来る。

これ等二つの問題、即ち最初『最も少ししかしない』操作者の伝達特性の形を定義し、それから結果としての合理的な設計手続を作ることが Birmingham と Taylor によって行なわれた。Birmingham と Taylor (1954) によれば；

「それ故、人間への課題が複雑になるほど、人間がより正確でなくなり、より変動性を持つようになるということは、基本的な仮定となる。限界内では、人間に要求される積分或は微分の階数がふえるほど、彼の動作は貧弱となることが仮定されている。逆に、人間の操作が積分や微分という課題から解放されるほど、人間の出力はより規則的で正確になることが仮定されている。人間が次式に示すように(純粹時間遅れづきの)単純増巾器に類似するようになる時、彼の制御行動が最適なものとなると主張されている：

$$\theta_0(t+\tau) = K\theta_i(t)$$

或はフーリエ変換した形では

$$\theta_0(j\omega) = Ke^{-j\omega\tau}\theta_i(j\omega)$$

但し t は時間の値を表わし、 τ は人間の反応時間に等しい。」

上に引用された Birmingham-Taylor 論文は、Birmingham, Kahn and Taylor (1954) においてもある程度支持を得ている。そこでは、操作者が進み項か積分かを発生する必要がないように、自分自身の運動の結果についての即時的な知識を与えられるような、一連のテストの結果が報告されている。実際の実験では、制御対象は伝達関数 K/S^3 を持っていた。操作者によって見られたものとしての実効制御対象は同等化手法によって $\frac{K(T_1S+1)(T_2S+1)(T_3S+1)}{S^3}$ の形をとるように調整されるか、或はもとの形 K/S^3 にとどまるように調整され得た。この実験においては、4次元のトラッキングの課題が用いられた。操作者は二つの目標光点を二素子ブラウン管上の視野内にとどめておくように二本の操縦桿を操作した。各目標光点は垂直、水平方向のいずれにも自由に動くことが出来た。システム・ノイズ及び無関係な操作者の動作は目標光点を直に見えないところへ追いやってしまうが、特別な目標波は全然用いられなかった。

これ等のテストの結果は、制御対象に進み項が加えられると、殆んどどの操作者が課題を完全に行なうことが出来たということを示す。進み項がないと、同じ操作者が2次元的に一つの目標光点を制御することが出来なかった。もっとも、一定時間訓練を行なった操作者はそう光点を充分一次的に制御し、実質上得点を増すことが出来た。

この実験は、操作者をして単純増巾器と純粹時間遅れとして機能させるために、充分な外的同等化を与えることの一般的効果を示している。(記述関数は測定されなかったから、操作者が実際にこの通りしたかどうかはわからないが……) それ故それは、砲の制御系、航空機の制御系等の特別なトラッキングに関して得られたかなりの量のデータに加わる、但し(ここで導入された進み効果と類似の)“aided tracking”, “quicken- ing”, “null steering”, “zero reading”等の項は制御精度を上げるために用いられている。これ等の諸実験は総て、操作者が伝達関数 $Ke^{-\tau s}$ で動作するようにされるべきであるとの、以前に展開された Birmingham-Taylor 仮説を正統化する(或は少なくともそれに矛盾しない)傾向がある。この論文で批評された最近のデータに照してそのアプローチに対する可能な修正を論ずるのが適当であろう。

先ず Birmingham-Taylor の『最適』操作者形 $Ke^{-\tau s}$ に関してであるが、いくらか修正することが望ましいように思われる。操作者の伝達特性の中に進み項が必要であるとして存在していることがレムナントの増加と関連しており、それ故トラッキングの精度を減少させるということは殆んど問題にならない。この精度得点に関する直接の証拠

は Franklin と Russell のデータのうちに見出される。ある程度まで、Goodyear の定常的なシミュレーターの結果もこの陳述を確証している、何故ならばそれ等のテストに関しては、無関心閾特性は操作者の中に進み項が存在していることと関連していたからである。従って、これ等のデータに基づくと、『最適』操作者形は進みの形をとった同等化特性を含まないと結論することが出来る。

有限のバンド巾の目標波を使用する一般の場合において、低周波数での操作者遅れをなくすことが必要であるかどうかは疑問である。

例えば、rms トラッキング誤差による最良の動作は、(レムナント・パワーの高周波数を平滑化するために) 操作者の後に $1/(1+TS)$ なる伝達関数のフィルターを挿入し、それからその後部フィルターによって導入される遅れを消すために操作者の前に $(TS+1)/(TS+10)$ なる進み-遅れのフィルターを挿入する時に生ずる、ということ Russell のデータは示した。 $T=0.5$ 秒に対する正味の制御対象の伝達関数は $Y_c = 1/(0.05S+1)$ ⁽⁴⁾ であった。この制御対象の伝達特性は他のテストにおいて、実際は単純操作者の特性であることが示された。このような制御対象が存在する場合の人間の伝達特性は $Y_p = K_p e^{-\tau S} / (T_1 S + 1)$ ⁽⁵⁾ によって最もうまく表わせる。

更に Russell は、制御対象の中に遅れを挿入することが、制御対象の中に進みが存在してもしなくても、 $Y_c=1$ の場合よりもレムナント・パワーを増大させるし(それにもなって系の誤差を増大させる)ということをも示した。以上のデータから、次のようなことが言えよう：

1. 目標量が存在する場合には、低周波数の操作者遅れ項が存在し、のぞましい。
2. 制御対象の全体としての伝達特性の動作部分は、操作者には次の範囲内にあるように見えるべきである。

$$1 \leq Y_c \leq \frac{1}{0.05S+1} \quad (28)$$

3. 制御対象は高周波数のレムナント・パワーを減衰させるためのフィルターとして効果を持つことが出来る。これは、操作者によって与えられる震え信号がレムナントの

(4) (訳者注) $\frac{1}{0.5S+1} \times \frac{0.5S+1}{0.5S+10} = \frac{1}{0.05S+1} \times \frac{1}{10}$ ということなのかと思うが、ゲインが合わない。

(5) (著者注) この Y_p の形はもっともらしくて最も単純な形である。もっと一般的で、使い易い形が希望なら、 $Y_p = k e^{-\tau S} (\alpha T_1 S + 1) / (T_1 S + 1)$ か $Y_p = k e^{-\tau S} (\alpha T_1 S + 1) / \{(T_1 S + 1)(T_N S + 1)\}$ を使えばよい。だが、いずれに決めるかは大抵は趣味の問題である。

重要な面であるような場合に、恐らく最もびったりとしているだろう。

Birmingham-Taylor 論文は目標波が存在しないか 或は極度の低周波数成分から成る目標波を使用した実験に基づいたものであるが、目標波一般がレムナントに及ぼす効果を考察することになると、彼等の論文を大きく修正することが可能となる。人間が『単純増巾器』として動作するように、という彼等の設計概念は、目標波が高周波数成分をも含む場合に、どのように修正せねばならないかを考えてみよう：

1. 最良の動作は $Y_c=1$ の時に生ずるから、この制御対象の時の Y_p がのぞまれることになる。従って、好まれる操作者モデルは次の一つであるべきである：

$$Y_p = \frac{Ke^{-\tau_1 s}}{(T_I S + 1)}$$

或は

$$Y_p = \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_I S + 1)(T_N S + 1)}$$

2. Elkind は $Y_c=1$ に対する成能の上限を研究したから、我々は目標量の効果の最も楽観的測定値を得るために、彼の発見を直に用いることが出来る。

Elkind のデータから、(けん怠感におそわれることがなければ) 目標波のバンド巾は小さければ小さいほど望ましいことがわかる。更に、期待される rms 誤差は目標量のバンド巾にほぼ比例する (Elkind より引用した図7を参照)。もし基準として、目標波に対する低周波数での系の『良い』応答を打ちたてようと思うなら、即ち直流部分で高ゲインにしようと思うなら、目標波のバンド巾を制限し、目標波の矩形スペクトルの遮断周波数を 0.64 cps 以下にしたいものである。このことは、全体としての開ループ伝達関数 $Ke^{-\tau s}/(T_I S + 1)$ を持つ系に対して、15 db の直流ゲインかそこらが『良い』低周波数での応答を生ずるといふ、いくらか任意の基準に基づいている。とにかく、好ましい形態への上記の修正を受け入れることによって、最良の期待される系の動作というしつかりした考えを得るために、Elkind のデータを直接用いることが出来る。

設計手続は次のように概括される：

1. 低周波数での制御対象の伝達関数を単純操作者の伝達関数へと調整する、即ち(ゲインを除いて)以下の範囲内にする：

$$1 \leq Y_c \leq \frac{1}{0.05S + 1} \quad (29)$$

(6) (訳者注) 普通 rms は root mean square の略だが、ここでは relative mean square の略。

- a. この調整においては、操作者の高周波数レムナント・パワーをその状況内で出来るだけ多量に濾過するように、十分な注意が成されるべきである。
 - b. 最初の制御対象を上記の制御対象へと修正する際に用いられる同等化要素等の配置は、操作者への入力のパンド巾が実際に使用可能な程度に小さいように、すべきである。
2. 従って、人間の伝達特性は、近似的には次の形であろう：

$$Y_p \doteq \frac{K_p e^{-\tau s}}{(T_I s + 1)(T_N s + 1)} \quad (30)$$

- a. 実際のシステムへの目標波が、(ちょっとしたブロック図の代数の助けによって

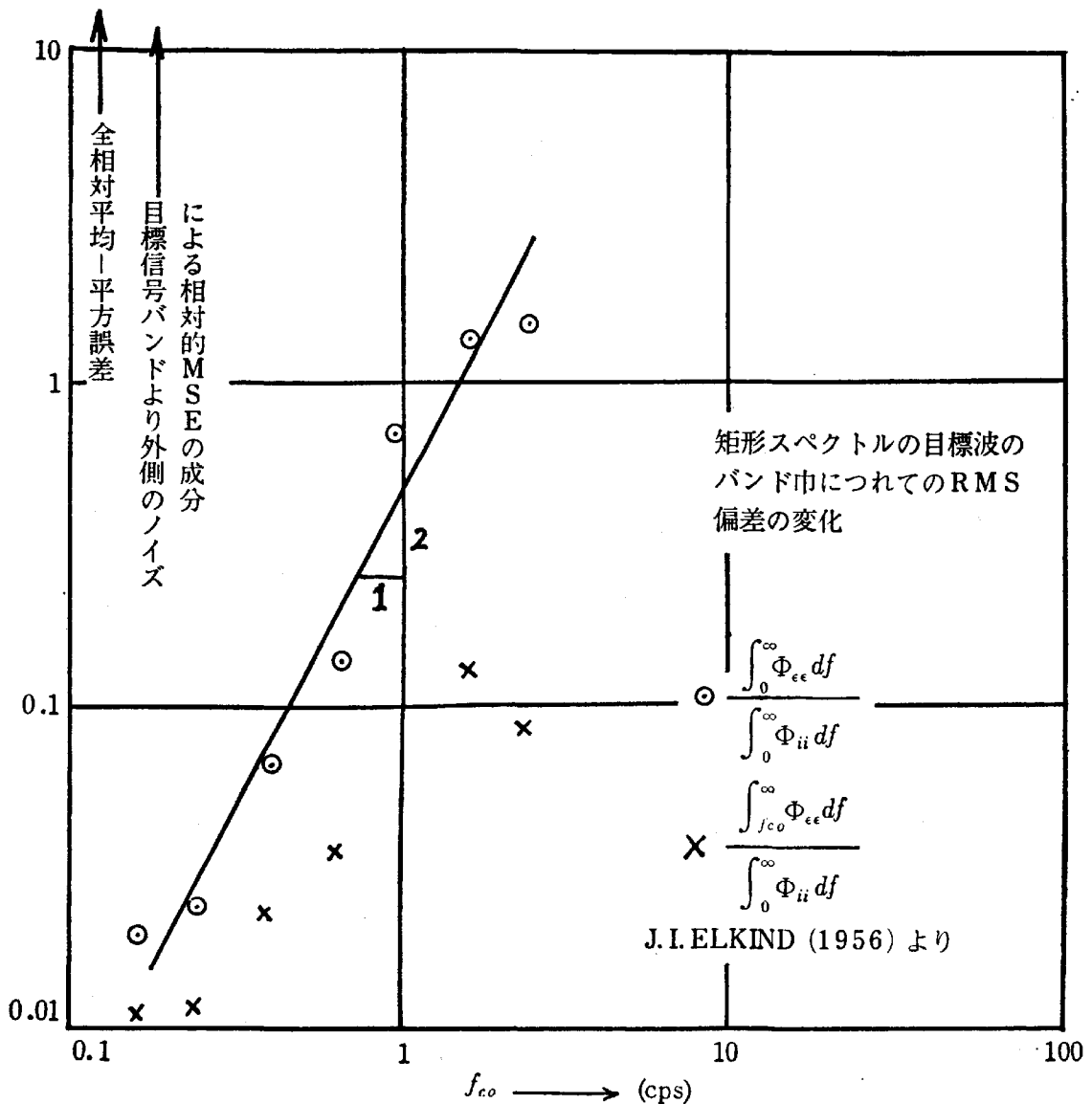


図7；目標波のスペクトラムの遮断周波数

成され得るところの) 単純操作者系に作用する『実効』目標波の形に変換されると、目標波の『実効』スペクトルが見出せる。この目標波に対する近似として Elkind のデータを用いるならば、目標波のスペクトル特性から K_p と T_I に対する推定が可能である。

b. 以前に Elkind のデータに当てはめられたレムナント・モデルのいずれかを用いて、レムナント特性も推定が可能である。

3. 以上の情報を用いて、『理想的』系の動作は正常の自動制御の方法によって詳細にわたって推定が可能である。図7に与えられている Elkind の rms トラッキング誤差は、この点でも助けになろう。得られた量は常に楽観的なものであろう、何故なら分析に用いられている (Elkind の) 基本的な操作者データは恐らく人間の動作の上限であろうから。

上に素描されたアプローチは『理想的』系に対する合理的設計手続を表現することを意図しているのだが、実際の系を設計するのに無差別に用いられるべきではない。だが、実際の系設計のための基礎として用いる場合には、二つの落とし穴に注意すべきである。第1の最も明瞭な落とし穴は、モデルを誘導するのに用いられている基本的仮設が妥当する範囲を越えた適用を行なうことである。例えば、系は、操作者が表示部上の視覚的入力だけを連続的に追従し、(過去経験によって操作者の中に効果的に『設定された』ものを含む) 他の入力は無視し得なければならない。第2の落とし穴は実際の自動制御系において普通に出っくわすものであり、系の信頼性と過度の複雑性の問題を含んでいる。例として、パイロット機体系の場合を考えよう。実効制御対象伝達関数、即ち等価的機体の伝達関数は、近似的には $Y_c \doteq 1$ の形に置くことが出来る。これは、人工的感覚系、安定性増加器、表示部における種々の補償の思慮分別ある設計によって成される。(もし第1の落とし穴も回避出来るなら) 設計布置は恐らく満足すべきものとなろう; そして比較的素朴な操作者が航空機を非常にうまく飛ばすことが出来よう。だが、補償系のある緊急用要素がだめになると、もはや実効制御対象を考えないわけにはいかず、全体としての効果は破局に直面する。

一般化すると、上記データに基づいて樹立された『理想的』系は常に可能な最良の自動制御系動作のための推定値を与えるのに用いられる。多くの系において、これが最も価値がある、何故なら、トラッキング動作以外の標準が重要である時には、ここで用いられている意味での『理想的』系は不適当な物理的機械化になり得るからである。それ

は、制御要素としての人間の長所——適応可能性——が本質的には抑えられるようなところまで、人間要素の役割を減少する；機械化が上記の如く複雑となり、技術習熟が殆んど利益とはいえなくなる。他方、設計者が容易に複雑さをさげ得て、変動可能性や適応可能性が望ましくなく、素朴な操作者が規準であるような事例においては、理論的に「理想的な」系は又望ましい物理的な解でもあろう。

参 考 文 献

1. D.T. McRuer and E.S. Krendel, "Dynamic Response of Human Operators" WADC TR 56-524, August, 1957.
2. "Handbook of Human Engineering Data," Tufts College Institute for Applied Experimental Psychology, Human Engineering Report SDC 119-1 (Nav Exos P-643), second edition, December, 1951.
3. R.G.E. Epple, "The Human Pilot," Northrop Aircraft, Inc., BuAer Report AE-61-4 III, August, 1954.
4. J.W. Senders and L.J. Fogel, "The Human as a Dual Mode Relay Servomechanism," Man-Machine Servo Conference, Franklin Institute, Feb. 14-15, 1955.
5. H.L. Platzer and E. S. Krendel, "Nonlinear Techniques for Studying Human Operator Performance," Man-Machine Servo Conference, Franklin Institute, Feb. 14-15, 1955.
6. H.L. Platzer, "The Phase-Plane as a Tool for the Study of Human Behavior in Tracking Problems," WADC TR 55-444, November, 1955.
7. H.L. Platzer, "A Nonlinear Approach to Human Tracking," Franklin Institute Report I 2490-1, Contract Nav 1571 (00), December, 1955.
8. J.R. Moore, "Combination Open-Cycle, Closed-Cycle System," Proc. IRE, Vol. 39, pp. 1421-1432 (1951)
9. N. Kryloff and N. Bogoliuboff, "Introduction to Nonlinear Mechanics," translated by S. Lepschetz, Princeton University Press, 1943.
10. R.C. Booton, Jr., "The Analysis of Nonlinear Control Systems with Random Inputs," Proc. Symp. Nonlinear Circuit Analysis, Brooklyn Polytechnic Institute, April, 1953.
11. R.C. Booton, Jr., "Nonlinear Control Systems with Random Inputs," Trans. IRE PGCT, Vol. CT-1, pp. 9-17 (1954).
12. H. Press and J. W. Tukey, "Power Spectral Methods of Analysis and Their Application to Problems in Airplane Dynamics," Part IV-C, Vol. IV, AGARD Flight Test Manual. pp. 1-41, June 1956 (reprinted as Bell System Monograph No. 2606).

13. H.M. James, N.B. Nichols and R.S. Phillips, "Theory of Servomechanisms," New York, McGraw-Hill Book Co., Inc., 1947.
14. J.I. Elkind, "Tracking Response Characteristics of the Human Operator," Human Factors Operation Research Laboratories Report HFORL Memo No. 40, PRP-2, September, 1953.
15. J. I. Elkind, "Characteristics of Simple Manual Control Systems," Technical Report No. 111. MIT Lincoln Laboratory, April 6, 1956.
16. Lindsay Russell, "Characteristics of the Human as a Linear Servo-Element," M. S. thesis, MIT, May 18, 1951.
17. E.S. Krendel and G.H. Barnes, "Interim Report on Human Frequency Response Studies," WADC TR 54-370, June, 1954.
18. A. Tustin, "The Nature of the Operator's Response in Manual Control and Its Implications for Controller Design," J. Inst. Elec. Engrs, Vol. 94, Part II A, pp. 190-202 (1947).
19. "Final Report: Human Dynamic Study," Goodyear Aircraft Corp., Report No. GER-4750, April 8, 1952.
20. "Investigation of Vestibular and Body Reactions to the Dynamic Response of the Human Operator," Final Report, BuAer Report AE-61-6 and Goodyear Aircraft Corp., Report GER 5452, November 25, 1953.
21. "Investigation of Control 'Feel' Effects on the Dynamics of a Piloted Aircraft System," Goodyear Aircraft Corp. Report GER 6726, April 25, 1955.
22. N.D. Diamantides and A.J. Cacioppo, "Human Response Dynamics; Geda Computer Application," Goodyear Aircraft Corp, Report GER 8033, January 8, 1957.
23. I.A.M. Hall, "Effect of Controlled Element on the Human Pilot," WADC TR 57-509, October, 1957.
24. H.P. Birmingham and F.V. Taylor, "A Human Engineering Approach to the Design of Man-Operated Continuous Control Systems," NRL Report 43333, April 7, 1954.
25. H.P. Birmingham and F.V. Taylor, "A Design Philosophy for Man-Machine Control Systems," Proc. IRE, Vol. 42, pp. 1748-1758 (1954).
26. H.P. Birmingham, A. Kahn and F.V. Taylor, "A Demonstration of the Effects of Quickening in Multiple-Coordinate Control Tasks," NRL Report 4380, June 23, 1954.
27. J.G. Holland and J.B. Henson, "Transfer of Training Between Quickened and Unquickened Tracking Systems," NRL Report 4703, February 3, 1956.
28. W.D. Garvey and L.L. Mitnick, "An Analysis of Tracking Behavior in Terms of Lead-Lag Errors," NRL Report 4707, February 16, 1956.

29. L.V.Searle and F.V.Taylor, "Studies of Tracking Behavior: I. Rate and Time Characteristics of Simple Corrective Movements," J.Exptl. Psych., Vol.38. pp.613-631 (1948).
30. D.G.Ellson and H.Hill, "The Interaction of Response to Step Function Stimuli: I. Opposed Steps of Constant Amplitude." AMC Memo Report No. MCREXD-694-2P, November 19, 1948.
31. R.Mayne, "Some Engineering Aspects of the Mechanism of Body Control," Elec. Eng. Vol. 70, pp.207-212 (1951).
32. D.C.Cheatham, "A Study of the Characteristics of Human Pilot Control Response to Simulated Aircraft Lateral Motions," NACA Report 1197, 1954.
33. D.G.Ellson and L.Wheeler, "The Range Effect," Air Force Technical Report 5813, May, 1949.
34. C.W.Slack, "Some Characteristics of the 'Range Effect'," J.Exptl. Psych., Vol. 46, pp.76-80 (1953).
35. "A Proposal to Study the Dynamic Characteristics of Man as Related to the Man-Aircraft System," Goodyear Aircraft Corp. Report GER-3006-A, May 2, 1950.
36. D.G.Ellson and F.Gray, "Frequency Responses of Human Operators Following a Sine Wave Input," Memo Report MCREXD-694-2N, USAF AMC, 1948.