

## 人間の制御行動

林 喜 男\*

人間の制御動作は制御する対象の特性によって変化する。そこで人間の制御動作を微分動作、比例動作、積分動作の3要素動作からなると仮定し、制御対象の変化によりこの3要素動作の組み合わせがどのように変化して来るかを考察する。その結果、制御しにくい制御対象を制御するときには微分動作が大きくあらわれ、生理的・心理的負担も大きくなる。制御対象を安定してうまく制御するための条件についての示唆を与えた。

## Man's Control Behavior

Yoshio HAYASHI\*

Man's control behavior varies depending on the characteristics of the controlled element. Assuming that this behavior is represented by differential, proportional and integral behaviors, this study analyzes how the variations in the controlled element affect each of these behaviors. Results of the experiment show that the differential behavior tends to appear conspicuously and the psycho-physiological load tends to increase when we try to control an element that is difficult to control; they also present hints at the conditions that would enable stable and effective control of the elements to be controlled.

## 1. まえがき

環境の変化、技術の進歩、安全性・快適性への追求といった世の中の変化に対応して人間にとって最も安全でかつ快適に操作できるシステムの設計への要望が高まってきた。特に航空機の巡航速度は以前とは比べようもない変化である。また自動車の走行速度にしても道路の整備によって飛躍的に上昇してきた。船舶にしても船舶の大型化にともない、その操縦性を高めるため制御機構の大幅な改善が要望されている。プラントの制御にしてもプラントが複雑、大型化し、その制御も自動化の方向に動き出してきた。さらにこれらを取りまく環境が以前にましていちじるしく変化してきた。交通の高密度化がそれである。プラントの場合はその大型化によりいったん事故をおこすと大事故につながり、住民への影響が大きいので、より安全性を重視する必要が生じている。このため人間の制御行動にともなった安全操作のためのシステム作りが必要となってきたのである。

この論文では主に乗物、たとえば自動車の制御行動を中心とした人間工学的な観点から議論を進めて行くことにする。

自動車の高速化に伴って考えなくてはならない人間と車について調べてみる。車の運転ではまず安全

が第1である。人間が車を安全に運転できるような車を設計するためには、車の動特性、人間の制御行動と道路環境の3つの要素を考える必要があることは論をまたない。人間工学的設計というのは人間-機械-環境の3つの要素の有機的なつながりの中で人間にとって最も操作しやすいシステムを設計することである。この考え方にしたがってお互いの関係を調べていく。Fig. 1は人間と機械との情報の流れを示したものである。これからわかるように人間と機械との境界点は感覚器-表示器、筋力-操作機器の間で、その間の情報伝達が人間にとって容易になるよう設計をしてやる必要がある。この図からこの人間の特性、機械(車)の特性、それに境界の情報の伝達しやすさという3つの点がこのシステムを設計するにあたって考えなくてはならない点である。

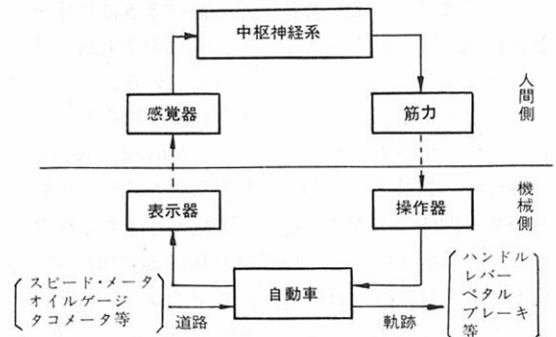


Fig. 1 自動車を例とした人間・機械システム  
Man-machine system of automobile

\* 慶應義塾大学教授 (管理工学)  
Professor, Keio Univ.  
原稿受理 昭和52年9月30日

しかもお互いの関連において最良なものをさぐっていかなくてはならない。従来の研究ではハンドル特性、ブレーキ特性、車の動特性といったハードの特性の研究、更には視界の最小視距離、後方視界等の問題は個々に研究されてきたが、運転者と車との相互関係における操縦性能といった研究はあまり多くはない。研究はされていても主観的評価がすくなくない。

Segel, Beauvais, Nielson<sup>1),2),3),4)</sup>等は車を安全かつ容易に操縦できるためには人間にとって何が一番最良であるかを見つける事と考え、人間の制御特性について研究した。彼等はまた最良とは「最も正確に最も安全に車を制御できる車の特性」とし、車がどんな人にもすぐ適応し運転できるようにとの観点から研究して次の結論を得た。

1. 軽すぎるハンドルは正確な位置の制御が困難となる。

2. 軽すぎるハンドルは車輪の変位を大きくする。このようにハンドルの操作力に最適値があることを示している。

Olson<sup>5)</sup>は車の長軸と回転軌跡との交点をリアレンス・ポイントと命名して、この点の位置とドライバーの目の位置との関係と運転のしやすさについて研究している。

Forbes<sup>6)</sup>はステアリング比の違いが操縦性にどのようにきいてくるかを研究し、ステアリング比が22の時が一番よかったと報告している。

Hoffmann<sup>7)</sup>とJoubertは1966年にドライバーのハンドル性能に影響する変数を調べ、最短視距離がその中で大きな影響を与えることを示した。すなわち視距離が大きくなればなる程操縦はしやすくなる。このほか車の応答時間が操縦性能に影響し、応答時間が0.21秒の時が最適値となることを示した。またステアリング比の値は2から28までの値のときには操縦性能に大きな影響を与えないが、その中でも24の値のときが一番よいようであるといっている。

車の運転のしやすさに振動がどのように影響するかといった研究も少なくない。Mozell<sup>8)</sup>とWhiteは1958年に振動下のトラッキング特性を調べ、振動数が8～23Hzまではその特性に変化がみとめられなかったと報告している。1957年のBoeing<sup>9)</sup>の実験では、最大加速度1.5gの15Hzの振動の下ではトラッキング特性に多少の影響を与えないといっている。我々は人間に低周波正弦波状上下振動を与えたときの反応時間と視機能を調べ、振動数の増加にともなってい

ちじるしい反応時間の増加と視野の縮小をみたが、この場合の振幅が10mmであったが、振幅が4mmのときには振動数の増加とともに反応時間の多少の増加、振幅1mm以下では振動数が1～10Hzまでは反応時間に影響がみられなかった。

Buckhoul<sup>10)</sup>は1964年に全身振動が人間の運転パフォーマンスにどのように影響するかを調べ、胸骨に加わる力の増加(6～10g)と共にトラッキング誤差が増加し、また水平方向のトラッキングより垂直トラッキングの方がより大きな影響を与えるという結果を得ているが、この振動実験では縦振動を用いたので、その影響とも考えられる。その実験で用いた振動は人間の胸郭の固有振動数約5Hz、心臓の固有振動数7Hzと顔筋の固有振動数11Hzの3つの振動数下で実験を行ない、その中で5Hzと11Hzとが7Hzよりトラッキング誤差が大きく出たと報告している。

Simons<sup>11)</sup>等は一般に振動は操縦性を悪くさせ、特に1.5Hzと2.5Hzの縦・横振動ともにその効果が大きいといっている。

以上のように、人間のトラッキング特性は制御対象の特性の変化、環境条件によってかわってくる。そのため、いろいろな人の実験結果を比較することが困難である。そこで一般的に人間の制御特性を論ずることはできないので、入力や制御対象を数式で記述し、その条件下で人間の制御特性を伝達関数の形で表現することにより、人間の制御特性を計量化し、種々の条件下にその伝達関数を比較し制御のしやすさ、人間の制御行動などを論じようとするのがこの論文のひとつの目的である。

1947年Tustin<sup>12)</sup>が自動制御理論を人間-機械系の解析に導入して以来、この種の研究が数多く見られるようになった。

Tustinは正弦波の合成波を入力刺激として用い、人間の伝達関数を次式で示した。

$$H(S) = K \left( \frac{a}{S} + b \right) e^{-LS} \quad (1)$$

ここでSは複数数、K、a、b、Lは定数である。この式から人間は積分動作と比例動作とむだ時間からなる系であることを示した。人間の制御特性を伝達関数で示した文献は数あるがその基本形は

$$H(S) = \frac{K(T_3S + 1)}{(T_1S + 1)(T_2S + 1)} e^{-LS} \quad (2)$$

あるいは

$$H(S) = K \left( \frac{a}{S} + 1 + bS \right) e^{-LS} \quad (3)$$

の形で表現しているものが多い。

(2)式は自動制御でよく用いられる形で、 $(T_3S + 1)$  は *lead* 項を示し、人間が制御するとき入力的时间変化から先を予測することを示している項で、 $(T_1S + 1)$ 、 $(T_2S + 1)$  は *log* 項で、人力の人間の積分的な動作、すなわち入力のある時刻からある時刻までの積分された値に比例した大ききで動作する項である。

(3)式は Ragazini が用いた式で、人間の制御動作を一階の積分 (I) と比例 (P) と一階の微分 (D) とむだ時間 (L) よりなると考えて出した式である。人間の制御動作がこれで表現できれば、すなわち人間の動作を PID 動作として表題できれば機械の制御動作との比較が容易であり、また人間の動作の解析も容易となる利点がある。

1-1 人間の制御特性の伝達関数表現

今までの研究によって人間の制御動作を線形の微分方程式系で表現できることが示された。井口等<sup>13)</sup>は制御対象に高階の微分要素、あるいは高階の積分要素を用い、人間がその制御対象を安定に制御できるかといった実験から人間の制御動作は 1 階の微分動作と 1 階の積分動作までしか行なえないことを示した。

Birmingham<sup>14)</sup> は制御者の制御動作は系の一巡伝達関数が近似的に 1、あるいは  $\frac{1}{S}$  になるように制御するといっている。

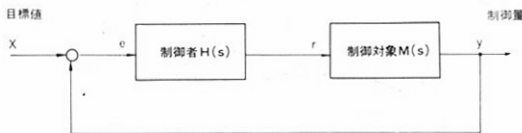


Fig.2 人間・機械系の制御ブロック図  
Block diagram of man-machine control system

Me Ruer<sup>15)</sup> 等は Fig. 2 に示される制御系で制御対象の特性  $M(S)$  が大きくかわっても一巡伝達関数のゲインが 1 に近い周波数の近くで一巡伝達関数は次式で示されることを見出した。

$$\left[ \begin{array}{l} |M(j\omega)H(j\omega)| \cong 1 \\ \text{をみたす周波数 } \omega e \text{ の近傍で} \\ M(j\omega) \cdot H(j\omega) \cong \frac{\omega e e^{-jt\omega}}{j\omega} \end{array} \right]$$

ここで  $t$  はむだ時間、 $\omega$  は角周波数をあらわす。いいかえれば Birmingham の結果と同じように制御対象に微分要素があればそれをうち消すように人間は積分動作を、制御対象に積分要素があればそれをうち消すように微分動作をし、また人間は系の一巡伝達関数  $M(S)H(S)$  伝達関数が 1 あるいは 1 階の積

分になるように制御をするということになる。実際我々の実験においても Me Ruer、井口等と同じ結果を得ている。

実際人間の制御特性を(2)あるいは(3)式であらわすことの妥当性はシミュレーションにより明らかにすることができる。Fig. 3 は(3)式で示された人間の制御伝達関数をアナログ計算機上でシミュレートして実際の人間の制御量と比較したものである。これらのことから、人間の制御特性を伝達関数で近似することができることがわかった。しかし伝達関数で示されるためには、筋生理学上、運動が線形に行なえる範囲内で制御動作、たとえばハンドル操作などが行なえるような構造になってなくてはならない。

たとえばハンドルツマミをつかう場合は、手首の運動回転範囲が  $90^\circ$  以上になると手首の運動が円滑に行なわれず飽和特性があらわれてくる。そこで運動回転範囲が  $90^\circ$  以上の場合には、人間の筋肉運動系に非線形動作が入ってくる。そこで今回の論文では人間の筋一運動系が線形でおさまる範囲内での制御動作に限定して議論をすすめて行くことにする。

1-2 本論文の位置づけ

一般にある目標物を追従させる制御方法は、4 つある。補償制御、追跡制御、予見制御、予覚制御の方法である。Fig. 4 にその違いを示す。補償制御は

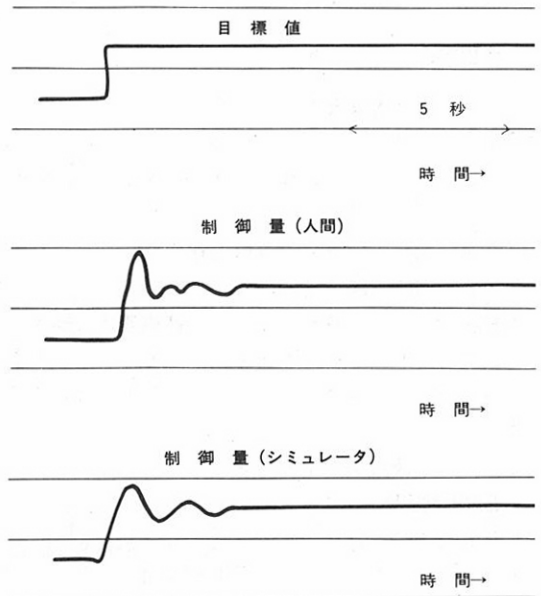


Fig.3 人間の制御量とシミュレータ出力  
Comparison of human tracking and simulator's output

目標値と制御量との差をなくすように制御する方法、追跡制御は目標値と制御量とが一致するように制御する方法である。いかえると制御するのが人間であれば、補償制御であれば人間は目標値と制御量との偏差だけを見て制御するのに対して、追跡制御は目標値と制御量とを見て制御する方法である。従来の方法は補償制御による人間の制御特性の研究が多い。これは実験的にも理論的にも取り扱い方が容易のためであるが、ある種の特例、潜水艦の制御や航空機のある一部の制御といったものを除けば、自動車、クレーン、航空機、その他の乗物の制御の大部分は追跡制御である。正確にいえば、予知予覚制御である。したがって人間の追跡制御特性を調べる目的で、まずはじめに追跡制御を主として行ない比較のため補償制御の実験を行なった。次に予見制御と追跡制御との人間の制御特性への影響のちがいを調べる。人間の制御は厳密にいうと予覚制御で、常に頭の中で従来からの経験を覚えていてそれが制御結果にあらわれてくる。実際の制御、自動車の制御は、予見予覚制御である。予覚制御に関する実験はまだ不十分なので、ここでは述べないことにする。

人間の制御特性は、別の見方をすると、適応性の機能をもった適応制御系である。この適応性については追跡制御の場合で考察する。

人間には多変数を制御する機能があるが、その機能については文献を参照していただきたい。

2. 実験方法ならびに結果

2-1 主な実験装置

実験装置は表示部と操作部よりなり、表示部は二現象のブラウン管を、操作部は円形つまみと復元力を可変できる自動車ハンドルを使用した。

制御対象はアナログ計算機で作った。

2-2 実験方法

Fig. 4 - b に示されるように、被験者は目標値の時間的変動を見て、目標値と制御量とが一致するように操作部を手でうごかし、ブラウン管上の2点の輝点を一致させる。

2-3 実験結果とその考察

(1) 追跡制御実験

制御対象に  $1, \frac{1}{S+1}, \frac{1}{S^2+S+1}, \frac{1}{S^2-S+0.25}$  を用いたときのむだ時間は Table 1 に示される。むだ時間というのは、刺激が入ってから人間が行動を起こすまでの時間をいう。この表から、制御するのにむずかしい制御対象ほど、むだ時間が長くなることが分か

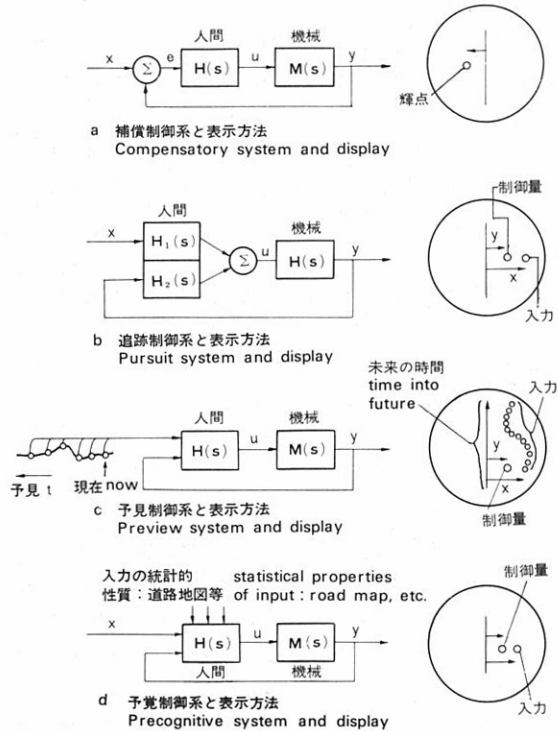


Fig. 4 各種制御方法によるシステム図と表示 (Hs:人間の伝達関数 Ms:機械の伝達関数) System diagrams and displays corresponding to different classes of inputs to the human operator

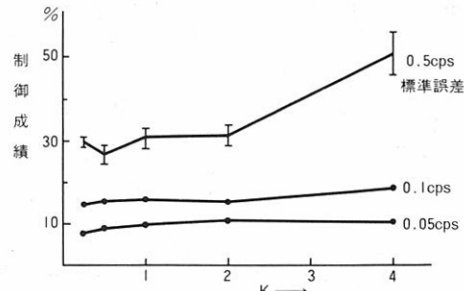


Fig. 5 制御対象の比例特性の変化による制御成績への影響 Effects of proportionality characteristics variation of the controlled element on human performance

る。制御対象が不安定な制御ほど、むだ時間が長い。一般に人間のむだ時間は0.2~0.4秒程度と考えてよい。

人間の制御動作は制御対象が変わると変わる。制御対象が比例特性でそのゲインが増加すると、人間の制御動作はどのように変化するかを考察してみる。ゲインが増加すると人間のゲイン定数は補償的に作用し、小さくなる。制御成績を偏差の面積対目標値の面積比であらわすと、Fig. 5 に示されるように、制御対象の比例定数が大きくなると制御成績が悪くなる。また目標値の動きのはいいほど、比例定数の増

Table 1 人間のむだ時間  
Human's lag time

制御対象	平均のむだ時間
1	0.26秒
$1/(s+1)$	0.33秒
$1/(s^2+s+1)$	0.37秒
$1/(s^2-s+0.25)$	0.41秒

Table 2 制御対象  $1/(Ts+1)$  の時定数の変化による人間の制御特性の挙動 (目標値: 矩形周波数0.3Hz)

Human tracking behavior for controlled element  $\frac{1}{Ts+1}$

時定数 T (秒)	人間の制御伝達関数
0.1	$2.82(0.15s+1)e^{-0.35s}$
0.4	$2.78e^{-0.35s}$
1.0	$0.29(0.19s+1)e^{-0.35s}$
4.0	$0.50(0.67s+1)e^{-0.35s}$

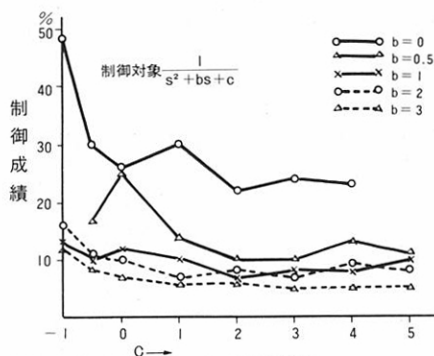


Fig. 6 Cの値の変化による制御成績  
Human performance for changing the natural frequency ( $\sqrt{c}$ )

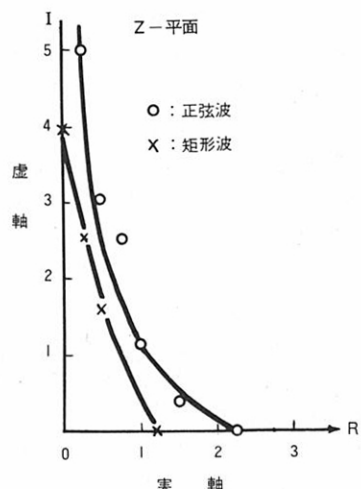


Fig. 7 人間の制御限界  
The limit of stable for Man-machine system

加と共に制御成績が悪くなっている。このことは、車でいうとハンドルの回転角に対して車の回転が大きいほど、制御の結果が悪くなることを示している。

次に制御対象が  $\frac{1}{TS+1}$  の形で T が変化したときの人間の制御動作について考察する。

制御対象が一次おくれ系の場合、人間伝達関数は一般に  $h(Tos+1)e^{-LS}$  で示される。実験結果を Table 2 に示す。Table 2 から、制御対象の時定数が大きくなると人間は微分動作を大きくするようになる。このことは制御対象の時定数が大きくなると操作入力に対する制御量の挙動の予測がむずかしくなるため目標値にうまく追従するために人間は予測をして操作していることがわかる。

次に制御対象が二次おくれ系の人間制御動作を考察する。

制御対象の二次おくれ系を  $\frac{1}{S^2+bs+c}$  で表現し、この b、c の値が変化したときの人間の制御動作をみると、c の値が増加すると、制御対象の系が不足制振の場合には、人間の伝達関数はそのゲインと微分動作を増加させる傾向にある。制御成績は Fig. 6 に示されるように固有振動数  $\sqrt{c}$  が増加しても大きな変化はないが、減衰係数  $\xi = \frac{b}{2\sqrt{c}}$  が小さくなると制御成績も悪くなることを示している。過制振  $\xi > 1$  の場合は成績が最もよい。このことから  $\xi$  の値が 0 に近づくにしたがって人間の微分動作が大きくなり、制御の成績もわるくなることがわかる。以上のことより制御対象が不足制振の場合にはなるべくその値が 1 に近くなるような系がのぞましい。

制御対象が二次のおくれ系でその系が不安定な場合、人間はどの範囲まで制御できるかを Fig. 7 で示す。この図から、人間は系が不安定でも人間・機械系として見るとある程度まではそれを安定に制御できる特性をもっている。

人間の制御動作を伝達関数であらわすことができるかどうかは、シミュレーションの結果からある程度妥当であることが示された。目標値や制御対象が変わっても人間の制御動作が変化するので、一般に人間は適応制御系であるとみた方がよい。しかし目標値の性質や制御対象が一定していれば人間の制御動作は一定している。このことは適応制御系をアナログ回路で作成し、人間の伝達関数を  $\frac{1}{TS+1}e^{-LS}$  として瞬間瞬間の T の値を計算すると、その変動は少なくなく、約 0.13 秒となり、他の研究者の値と一致していることから、人間の制御パラメータの値 T はほぼ実験条件が一定の場合には一定であることが示さ

れる。

制御対象が一次おくれ系の場合、人間の制御動作は微分動作と比例動作とむだ時間とよりなり、特に時定数が0.4秒前後で人間は微分動作をしなくなる。このことは後の人間の制御動作の生理学的考察の中で述べるように、人間は微分動作をしなくてもすみ時が最も精神的肉体的負荷が小さいので、制御対象が一次おくれ系で近似できるものはその時定数が0.3~0.4になるよう設計するとよい。

人間の制御動作をPID動作で仮定すると、制御対象が一次おくれ系のときは理論的\*にも微分動作をきかせた方が制御成績がよくなる。制御対象が二次おくれ系のときには、 $\xi$ の値が0.1と小さい値のときは理論的には積分動作をきかせた方が有効であるのに、人間は微分動作をきかせているようである。

以上の結果から、人間は制御対象がだんだん制御しにくくなると微分動作をきかせてくることは理にかなっているが、人間は積分動作をあまりきかせないので制御成績の上でかなり損をしている。

次に追跡制御と補償制御との比較をしてみよう。

人間の追跡制御における制御特性を求めるのに1入力-出力よりなる系として考えると、理論上では補償制御の場合と同じ処理をすることになる。ただ求まる人間の伝達関数の係数の値がことなるだけである。そこで制御対象が比例要素だけからなっているときの追跡動作を求めて、補償動作とことなる点を明らかにする。

目標値はランダム波を用い、制御対象は比例と一次おくれ要素について実験を行なった。この解析はFig. 8に示されるように、人間の動作を、入力を直接追いかけて制御する項 $K(s)$ と、偏差を見て制御する項 $G(s)$ とに分けて解析すると、実験結果より、人間は目標値を直接追いかける制御を主として行ない、従として偏差を見て制御していることが分かる。

このことは、目標値の変化の速い $\omega_c = 4$ を制御する場合とより制御しやすい $\omega_c = 1$ と比較すると、 $K(s)$ ではその微分動作のきかせ方が前者の方が強く、 $G(s)$ ではさほど変化がないことからわかる。

人間が自分自身の制御結果を見せないで制御する開ループ実験では、その制御動作は前の実験結果と本質的な相違はなく、ただ平均位置がずれるが、これは補償制御動作がされないためと考えられる。

以上のことは高速道路で前の車を高速で追跡しているとき、その主動作は追跡をする動作 $K(s)$ がは

\*人間が最適制御をしたと仮定したときの動作

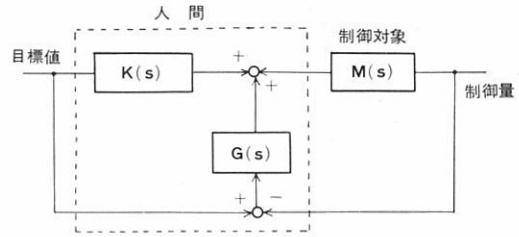


Fig. 8 追跡制御のモデル  
Model of pursuit tracking

Table 3 人間の制御動作の心理生理学的考察  
Psychophysiological consideration of human tracking

dの値	人間の伝達関数 $\times e^{-0.3s}$	筋力スパイク数 コ/40秒	脈博数 コ/分
2	$1.1(0.25s + 1 + 0.5/s)$	6.0	68.0
1	$1.1(s + 1 + 0.5/s)$	7.0	67.0
0.5	$1.1(1.5s + 1 + 0.5/s)$	9.5	69.6
0.2	$1.1(1.75s + 1 + 0.5/s)$	32.0	70.5
0	$1.1(2s + 1 + 0.5/s)$	477.5	72.0

たらし、車の速度がおそくなると車との相対距離で制御していることに対応する。

(2) 労働生理学的・心理学的側面からの人間の制御動作の考察

人間が長時間制御動作を行なっていると、肉体的・心理的な疲労のため制御特性が変化してくる。また作業意欲や注意力の減退により制御成績もだんだん悪くなる。人間が微分動作、比例動作や積分動作の中でどれが一番疲労に結びついているかを考察し、その結果から制御系の設計の指針を与えることができる。

今までの実験から、人間の制御動作は制御対象を変化させた方が人間の制御動作が大きく変化することが分かったので、制御対象を $\frac{ds+1}{s^2}$ とし、このdの値を変化させたときの人間の制御動作とそれに対応する生理学的応答を調べた。その結果をTable 3に示す。この表からdの値が小さくなるところで急激に筋電スパイク数ならびに脈拍数が増大する。と同時に微分動作もふえてくる。このことから、人間は微分動作をきかせると肉体的精神的負担が大きくなるものと思われる。この結果、人間にはなるべく微分動作をしなくてもよいような制御系を設計すれば、人間も長時間の制御作業に耐えることができる。

最後に、自動車のように手のみならず足によっても制御器を操作しなくてはならないので、そこで手、足の制御特性のみならず制御するときその操作力をどのくらいにした時が一番制御しやすいかも調べる

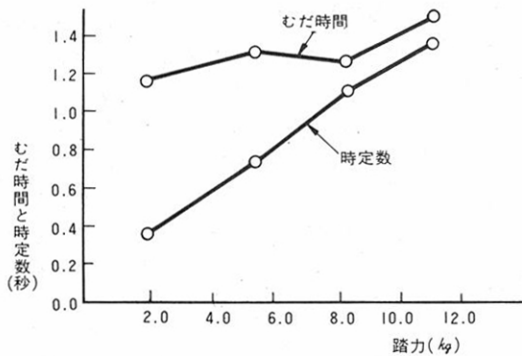


Fig. 9 足の力とむだ時間、時定数との関係  
The effect of the foot power on the relation trial delay and the time constant

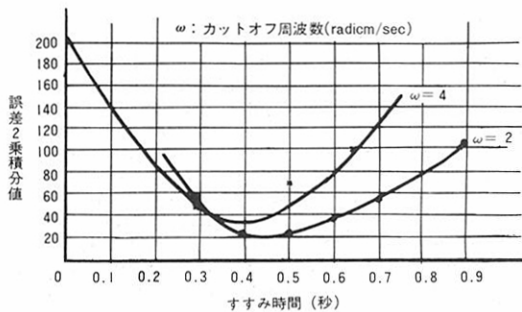


Fig. 10 予見制御のすすみ時間と偏差との関係  
Effect of preview time on human performance

必要がある。

操作部にレバーを用いそれにストレン・ゲージを貼り、レバーに加えた力が記録できるようにした。入力にステップ状の波を与え、手の応答を調べた。椅座姿勢でのレバー作業で大きな力を出さなくてはならない作業は、制御対象を比例としたときの人間の制御伝達関数を  $\frac{K}{TS+1}e^{-LS}$  としたとき、手に加える力が  $0 \sim 2 \text{ kg}$  の範囲内では時定数  $T$  が大きくなり、レバーを押す方が引く時より時定数は一般に大きい。このことは引く動作の方が敏捷であることを示す。しかしむだ時間  $L$  は逆に大きな力を出すほど小さくなる。手の場合大体むだ時間と時定数の和の値はほぼ一定で  $0.5 \sim 0.6$  秒である。

足の特性は足踏みペダルにストレン・ゲージを貼り、その出力を記録する。制御対象を比例として前と同じように実験すると、足に加える力が  $0 \sim 12 \text{ kg}$  の範囲内では足の制御動作も  $\frac{1}{TS+1}e^{-LS}$  で近似でき、人間の踏力が大きいとむだ時間も時定数も共に大きくなる。Fig. 9 は踏力の変化によるむだ時間と時定数の値を示した。これから分かることは足の制御においては、軽いタッチのペダルが速い応答を必

要とする制御ではのぞましい。

手と足の制御動作を比較すると、むだ時間は前者が平均  $0.36$  秒、後者は  $1.7$  秒、時定数はおのおの  $0.23$  秒と  $0.90$  秒である。このことより手の方が足よりかなり速く操作ができることを示している。

### (3) 予見制御

車を運転する場合、運転者にとって道路はある程度先まで知られているし、クレーンの運転でもあらかじめどこからどこまで物を運ぶかといった経路はわかっているように、目標値があらかじめわかっている場合が少なくない。そこでこれらの問題を解明するためにつぎのような実験を行なってみた。

1) 現在より少し未来の情報を与え、現在の時点の制御を行なう場合。

実験的にはブラウン管上に時間的に変動する輝点の現在より先の動きが表示されていて人間がそれを見て制御対象を制御する方法である。すなわちブラウン管に表示されている目標値の変化は、時刻が現地地点より  $\tau$  時刻先の情報を与え、偏差値は目標値の現在の時点  $t$  時刻の制御値との差を取る。これによって  $\tau$  時刻先の情報が制御にどのように影響するかを考察する。この結果を図示したものが Fig. 10 である。これよりあまり先の情報を与えても成績はよくならないし、現時点のみでも制御成績はよくならない。

一般原則として人間を含めた系のむだ時間、あるいは時定数だけ先の情報を与えたときがいちばんよい制御成績を示すようだ。追従実験の場合にはこの原理があてはまるようである。そこでもう少し実験を精密にし、今までは未来のある時点の情報のみ与えたが、未来から現在の値を与えたらどのように制御成績が変わるかを調べてみた。

2) 現在から未来までの情報を与え、現在の値を制御する場合。<sup>17)</sup>

この実験では、未来の値をどれだけ予知させると制御成績がよくなるかをみたものである。1) の実験と異なる点は、1) の実験では未来の一時点のみを表示したのに反して、2) の実験では未来から現在までの道筋を示したものである (Fig. 4-c 参照)。このような実験において目標値にステップ関数を入れるとステップ関数に追従する追従遅れ、すなわちむだ時間と予見時間 (未来情報) とに Fig. 11 で示される。ここで予見時間  $t$  というのは目標値の現時点から  $\tau$  時間未来の情報まで予見される時間のことをいう。

すなわち予見時間を大きくするとむだ時間が減少

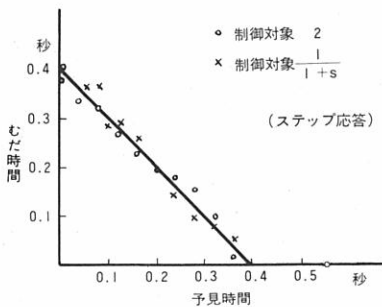


Fig. 11 むだ時間と予見時間との関係  
Relation between the preview time and relaxation time

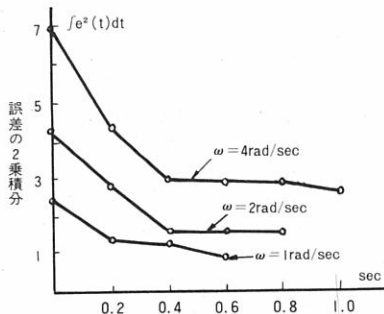


Fig. 12 予見時間と誤差積分値(行待)  
Effect of preview time on human performance

し、予見時間が0のときむだ時間が0.4秒であったものが、予見時間を0.4秒にするとむだ時間が0になることが制御対象のいかにかわらず成立することが示される。すなわち人間の応答のむだ時間は、予見時間が0.4秒以上あればむだ時間がなくなるので、予見情報を与えると制御成績が非常によくなる。すなわち人間のステップ応答の伝達関数を  $\frac{1}{TS+1}e^{-LS}$  と近似すると、予見時間が0.4秒以上であれば  $L=0$  となる。

3) つぎに目標値にランダム波を与えて前と同じ実験を行なう場合。

制御成績と予見時間との関係を示したものがFig. 12で、予見時間が長いと成績はよくなるが、約0.4秒以上見せても成績がよくなることが示される。このことは、前のステップ入力を用いたときの結果であるむだ時間をゼロにする予見時間は、0.4秒以上であればよいという実験結果と一致している。

先の情報の空間的パターンが制御成績にどのように影響するかを調べた結果、先の時刻の目標値そのものが制御をする上で重要で、かえって空間的パターンは操作に悪影響を及ぼしていると考えられる。

要するに予見情報は主として人間が反応する際のむだ時間を減少させるのに役立つもので、したがって0.4秒より先の情報はあまり必要としない。たとえていうなら高速道路で120km/hで走っている車では秒速が約33mだから、0.4秒は約13mとなり、この程度先が見えていれば正常な動作にあまり影響がないことが分かる。実際の場合ブレーキ性能など車の特性や精神的なものも入ってくるのが、もう少し先の情報が必要である。

自動車为例にとった室内実験では、予見時間を0.5秒程度までは制御成績がよくなることを示している。

以上これらの結果を、車の安全設計のための指針につながるよう研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) Segel, L.: Theoretical prediction and experimental substantiation of the response of the automobile to steering control, Proc. Inst., Mech., Eng. 7, 310~330, 1956.
- 2) Beauvais, F.N., et al.: An improved analog for vehicle stability analysis, Paper presented at 1961 SAE International Meeting, Detroit, SAE paper 295-C, January, 1961.
- 3) Nielson, I.D.: The simulation of car behavior using a digital computer programme. D. S. I. R., Road Research Laboratory, Lab. Note No. LN/714/1DN, BV 546, 1964.
- 4) Segel, L.: An investigation of automobile handling as implemented by a variable steering automobile., Human Factors, 6, 333~341, 1964.
- 5) Olson, P. L.: The drivers reference point as a function of vehicle type, direction and radius of turn. Human Factors, 6, 319~325, 1964.
- 6) Forbes, L. M.: A human factor evaluation of steering gear ratios for the 196X Ford. Detroit: Ford Motor Company, Report M-795-622, 1962.
- 7) Hoffmann E. R. et al.: The effect of changes in some vehicle handling variables on driver steering performance, Human Factors 8, 245~263, 1966.
- 8) Mozell, M. M. and White, D. C.: 1958 Behavioral effects of whole body vibration. J. S. Naval Air Development Centre Report NADC- MA- 5803, J. Aviate. Med. 29, 716~724, 1958.
- 9) Boeing.: Boeing Human Factor Unit, Boeing human Vibration facility, Boeing document D-3, 3301.
- 10) Buckhoul, R.: A working bibliography on the effects of motion on human performance, Final Rep. MRL TDR 62-77, 1962.
- 11) Simons, A. K. et al.: Effects of the vibration environment in mobile systems on human performance, Ergonomics 5, 321~324, 1962.
- 12) Tustin, A.: The nature of the operators response in manual control and its implication for controller design, J. IEE (London) vol 94 pt. II A, 190~202, 1947.
- 13) 井口 雅一: 人間-機械系, 共立出版, 1970.
- 14) Birmingham, H. P. and Taylor, F. V.: A design philosophy for man-machine control system, Proc. IRE, 42, 1748~1758, 1954.
- 15) Me Ruer, D. T., and Tex, H. R.: A Review of Quasi-Linear Pilot Models, I. E. E. Trans. Human Factors in Electronics H F E-8, No. 3, 231~249, 1967.
- 16) 福田陽: 複合表示および複合操作を使用する二変数手動制御, 人間工学11 No. 5, 6, 149~155, 1975.
- 17) 行待武生: 速度可変な手動予知制御の研究, 人間工学12, No. 6, 211~219, 1976.