

(9)

電気刺激フィードバックを用いる補償型手動制御系の特性

(機械技術研究所) 谷江 和雄・館 暲・小森 谷 清
井口 英雄・高部 正男・阿部 稔
(電気通信大学) 坂井 良広

1. ま え が き

Tustin 以来, 視覚フィードバックを含む手動制御系の制御工学的研究が各方面で行なわれている^{1)~4)}。一方, 最近は感覚障害者のための感覚機能補綴装置の実現, あるいは人間・機械系の高性能化をはかるなどの立場から, 視覚以外の生体への情報の入力チャンネルを開発しようとする試みが生まれ, 多様な感覚フィードバックを含む人間・機械系を想定しうる状況にある。その結果として聴覚^{5),6)}, 皮膚機械振動刺激^{7)~10)}など視覚以外の感覚フィードバックを含む手動制御系の研究例も若干ではあるが見受けられるようになった。本研究はこのような状況にかんがみ, 人間への情報入力の一手段としての皮膚電気パルス刺激に注目し, これを含む人間・機械閉ループ系の特性を補償型手動制御系を対象として検討するものである。

皮膚電気パルス刺激情報伝達とは, 生体に電極を装着し, それに微小なパルス状の電流を流したときに生ずる感覚を利用して生体に情報を伝達しようとするものである。この刺激方式は皮膚感覚を利用する情報伝達方式のなかでも比較的感覺順応の少ない安定な感覚を与えると同時に, エネルギー消費量の少ない小型軽量な情報伝達手段を提供しうるなどの特徴があり, その有効性はこれまでに多くの研究者により指摘されている^{11)~13)}。

また電気刺激条件の検討¹¹⁾や情報をのせるパラメータの選定¹⁴⁾, さらには情報伝達特性の評価^{11)~13)}など基礎的レベルの研究も種々行なわれてきた。その結果, 電気刺激の主な情報次元としては, 強度, 周波数, 空間の3次元があること, また空間次元を除く各次元での伝達情報量は 3.0~4.0[bit/symbol] であることなどが明らかにされている。これらの基礎データをもと

に, とくに周波数次元は実用動力義手の手先圧力感覚のフィードバック手段にも利用されている。ところで, これら従来の電気刺激研究を概観すると, 外部から人間に情報を一方的に提供した場合の人間の情報に対する識別能力を評価することを主眼とする研究がほとんどである。電気刺激を含む閉ループ系を取り扱っているものは, H. P. Schmid らの研究¹⁵⁾があるにすぎず, 視覚はもとより, 聴覚, 皮膚機械振動刺激等に関する研究と比べても非常に少ない。Schmid らの研究も操作者としての人間の挙動からその人間が有する障害を診断することを目的としており, 必ずしも電気刺激を含む閉ループ系の特性の解明に重点を置く研究とはいえない側面がある。

本研究では閉ループ系での電気パルス刺激フィードバックの基本的特性を明らかにするという観点から, 補償型手動制御系における操作者の挙動を, 種々の制御系のパラメータとの関連のもとで, 制御工学的手法を用いて検討した。さらにまた閉ループ系での電気刺激の性能および有効性を他の刺激形態と対比しつつ評価している。

電気パルス刺激情報伝達における上述の3次元に対応するパラメータは, パルスの「強度(エネルギー)」, 「周波数」および刺激部位数であることが知られているが^{11),14)}, これらのどの次元を用いるかによって刺激・情報変換方式は種々の形態をとり, それに伴って閉ループ系の特性も異なる傾向を示すと考えられる。ここでは研究の第1ステップとして, まず強度, 周波数次元を用いる場合に注目し検討を行なった。

2. 実験システム

図1に補償型手動制御系の実験システムのブロック図を示す。全システムは白色雑音発生器, 低域通過フ

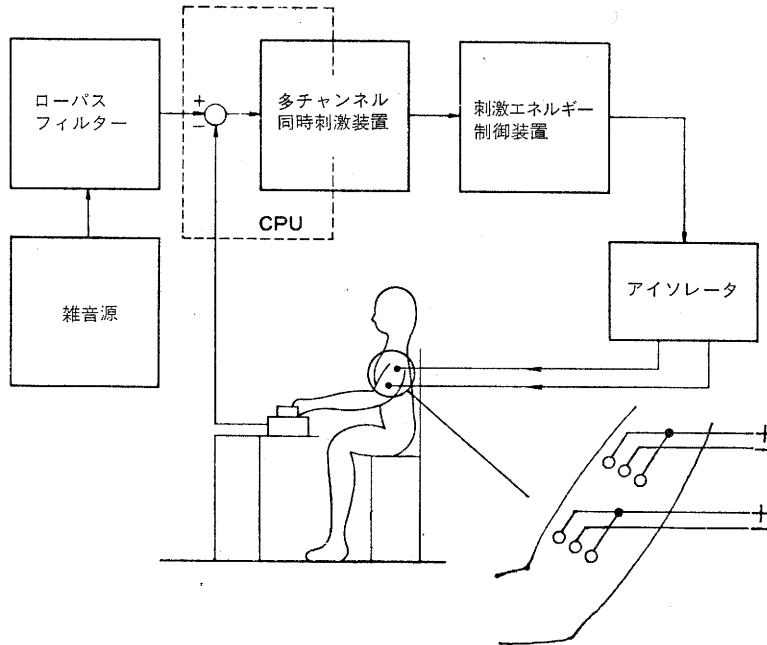


図1 実験装置.

フィルター、多点同時刺激装置、刺激エネルギー制御装置、アイソレータ、電極、操縦桿、電子計算機などから構成されている。実験に際しては、白色雑音を低域通過フィルターに通して得た信号が目標値として出力される。この目標値は操作者が操作する操縦桿の出力と比較され、その偏差が電子計算機で処理された後、多点同時刺激装置¹⁶⁾、エネルギー制御装置¹⁷⁾、アイソレータを経て、強度（エネルギー）あるいは周波数変調されたパルス列に変換されて電極上に送られる。刺激部位は上腕二頭筋上とし、刺激電極（湿式、Beckman型 Ag-AgCl 8 [mm] 径）は筋方向にそって2組配置した（肩側・肘側、間隔約 80 [mm]）。偏差の極性に応じてそれぞれの電極に刺激パルスが送られる。操作者はいずれの電極に刺激がきているかにより偏差の方向を、またそのときの刺激強度あるいは刺激パルス頻度により偏差の大きさを判断し、これらの情報をもとに偏差を零にする方向に操縦桿を操作するよう要求される。

上腕二頭筋上に装置した各電極の組は3個からなり、それぞれ筋方向と直角に 20 [mm] 間隔で1列に配置し、両側2つを共通とした。パルスは定電流パルスとし、その極性は両側の2つに対し中央が負となるよう

に定めている。

被験者はこの種の実験に経験を有する健常男子1名である。

3. 強度次元電気刺激フィードバックを用いる手動制御系に関する実験

強度次元電気刺激情報伝達は、情報を刺激の強度すなわち刺激1パルス当りのエネルギーに対応させて人間に提示するものである。このような情報伝達形態を含む手動制御系は、制御系自身のパラメータ以外にも、強度次元電気刺激に固有の現象や刺激パラメータの影響を受ける。本節では最適刺激条件を定めるという立場からまず予備実験によって、感覚の適応と刺激パルス周波数の選定について検討した後、種々の制御系パラメータに対する操作者の特性を評価した。

3.1 予備実験

a) 適応の評価 一般に皮膚感覚は閾値下より次第に増加する電氣的刺激を加えられると適応を生じ、その感覚閾値を上昇させることが知られている。この適応現象は間欠的な信号よりも直流信号を刺激として用いる場合に最も生じやすい。提示される信号を零に

するように操作者は機能するという補償手動制御系の特質を考えると、安定で精度のよい制御動作を保证するためには、適応の発生の有無の確認は重要であり、もしそれが発生する場合には適当な対策を講じなければならない。適応の生じやすい条件を考慮すると、補償手動制御系における適応効果は、パルス状の刺激を用いる場合にはその周波数が高く、かつ極低速の変動目標値に対し最も強く表われると考えられる。

このような条件のもとで順応が生じないならば、ほぼ一般的な使用条件のもとでも順応は生じないとしてよいであろう。

そこで図1において、白色雑音発生器、低域通過フィルタのかわりに極低周波三角波発振器を接続し、0.003[Hz]の三角波を目標値とする補償制御動作を操作者に行なわせることを試みた。制御偏差は閾値以上の刺激パルスエネルギーに比例的に対応させて提示し(図4(a)), また刺激パルスの周波数は10[pps], 100[pps]の2種を使用した。

図2に実験結果の1例(刺激周波数 100[pps])を示す。図中(a)は目標値, (b)は制御量, (c)は偏差のRMS値を示している。この結果から操作者は非常に良好な追従特性を示していることがわかる。刺激周波数 10[pps]でもほぼ同様の傾向が得られた。これより補償型手動制御系における適応効果は実用上は無視しようと判断した。

b) 刺激パルス周波数の選定に関する実験 電気パルス刺激情報伝達ではパルス波を用いるという性格上、強度次元情報の提示密度はパルス周波数によって変化する。極端に低い周波数をもつパルス列の使用は、

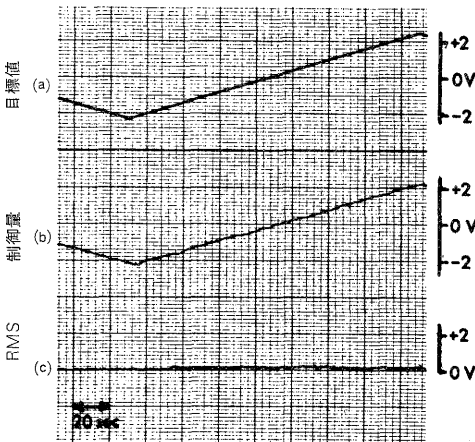


図2 極低周波三角波に対する応答(刺激周波数 100[pps])

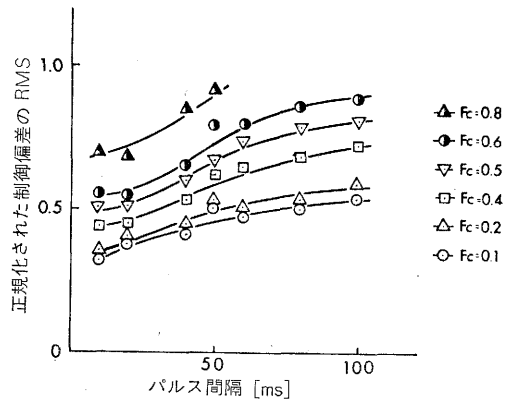


図3 刺激のパルス間隔と制御偏差 (F_c は目標値をろ波するフィルタの遮断周波数)。

目標値の速い変動成分に対する操縦者の制御性を悪化させる原因となることが予測される。このようなことから本実験では種々の刺激パルス周波数を有する電気刺激に対する操作者の特性を目標値の帯域と関連させつつ評価した。すなわち図1のシステムにおいて、種々の帯域制限された白色雑音発生器出力を目標値とする補償動作を、刺激パルス周波数をパラメータとして操作者に行なわせ、その制御成績を制御偏差のRMS値で評価した。制御偏差の表示法は上述 a)と同様である。

図3に実験結果を示す。横軸は刺激のパルス間隔(1/周波数), 縦軸は目標値のRMS値で正規化した制御偏差のRMS値, 各プロットは白色雑音の最高周波数すなわち目標値の帯域に対応する。 F_c は低域通過フィルタの遮断周波数を示している。この結果からまず予測されるころではあるが、目標値の帯域がせまいほど、すなわち目標値の変動速度が小さいほど制御成績はよいこと、さらに刺激パルスの間隔が大きくなるにつれて制御成績は低下することがわかる。とくにパルス間隔が大きくなると目標値の帯域が広がるにつれて一層成績が低下する傾向が認められる。図中で $F_c=0.8$ [Hz]の曲線は 50[ms]のところで切断されているが、これは操作者の動作がそれ以上のパルス間隔では発散してしまったため表示しなかったものである。パルス間隔 50[ms] (20[pps])以上では目標値の変動の高速化に伴う制御成績の低下は非常に顕著である。

刺激パルス間隔を広げることにより制御成績が低下する原因は、①感覚のホールド時間の有限性、②2点

弁別閾の低下による偏差方向の知覚能力の減少、の2つが考えられる。H. F. Seeley⁷⁾、田村ら⁵⁾は皮膚機械振動や聴覚を用いる補償動作実験において、制御偏差方向の明瞭な提示は制御成績に重大な影響を及ぼすことを指摘しているが、本実験の被験者も制御成績が悪化したとき、とくに②の原因を訴えることが多かった。そこでこの点を確認するために、上記実験手続に LED によって偏差の方向をより確実に、視覚的に表示する機能を付加し、再度実験を試みた。その結果、パルス間隔 10[ms] についてはほぼ図 3 と同様の制御成績を得た。しかし、パルス間隔 100[ms] のそれは図 3 中のパルス間隔 10[ms] と同程度まで改善され、パルス間隔 10[ms] では偏差方向の認識は確実にこなされる反面、100[ms] ではそれがかなり曖昧になることが裏づけられた。

以上の諸結果より、刺激パルス周波数は少なくとも 20[pps] とし、かつ許される限り高く設定すること、また比較的低周波数パルスを用いるときは制御偏差の方向の明瞭な知覚が保証されるような刺激提示形態を選定することなどが重要であるとの結論を得ることができる。これらの検討と従来の研究で示されている周波数の上限に対する条件より¹⁰⁾、以下の強度次元を用いる実験では、パルス周波数は 100[pps] を用いている。

3.2 操作者の特性の評価

3.2.1 実験内容与方法

補償型手動制御系において操作者の制御特性に影響を及ぼすパラメータとしては、表示方法、表示ゲイン、制御対象、目標値の帯域などをあげることができる²²⁾。ここでは制御対象は 1 とし、それ以外のパラメータを変化させて操作者の特性を調べた。

まず表示法としては、J. W. Hill の皮膚機械振動刺激に関する実験¹⁰⁾を参考にしつつ、強度次元で想定しうるものとして 2 つのタイプを選定した。1 つは図 4 (a) に示されるごとく、偏差と閾値以上の刺激パルスエネルギーを比例的に対応させるもの、またもう 1 つは図 4 (b) に示すごとく、偏差がある値を超えると適切な方向に一定パルスエネルギーの刺激を提示するものである。後者は前者の簡易型ともいふべきものであり、以後図 4 (a) を比例型、図 4 (b) を閾値型と呼ぶことにする。

表示ゲインは比例型では偏差・エネルギー間の傾き

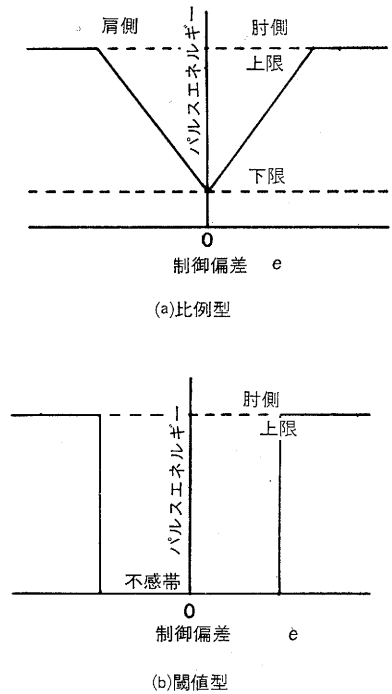
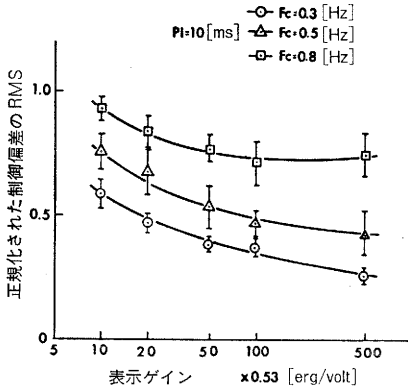


図 4 制御偏差の表示法。

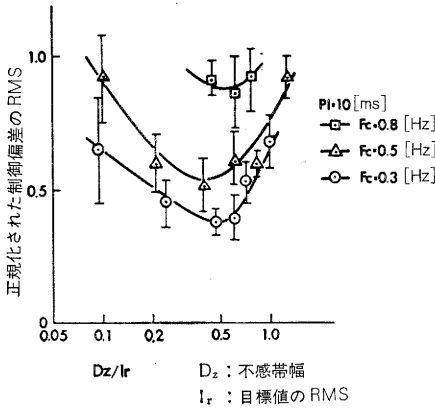
に対応する。この傾きを種々変えて実験を行なった。一方閾値型表示では表示ゲインは無限大であるが、不感帯幅が制御系の安定性に影響を及ぼすことから、その大きさを比例型における表示ゲインに相当するパラメータとした。

目標値の周波数帯域は、従来の視覚系の実験ではほぼ 1[Hz] 程度で操作者の能力が限界になる¹⁸⁾ことから、1[Hz] 以下で 3 点選択した。

実験は次のような手順で行なったが、白色雑音の最高周波数を 0.3[Hz]、0.5[Hz]、0.8[Hz] として得た目標値に対し、表示ゲインあるいは不感帯の大きさと制御成績(目標値の RMS で正規化した偏差の RMS)との関係をそれぞれの表示法において測定する。次にこの測定結果から制御成績が最適な値を示す表示ゲイン、不感帯幅を見出し、その条件のもとで操作者の特性を各帯域の目標値について測定して、それを伝達関数法によって評価する。実験時間は各パラメータに対し 3.5 分とし、また本実験に入る前には十分な学習時間を設けた。学習時間の長さは操作者の任意とし、とくに規定はしていない。実験データはすべていったんデータレコーダに記録した後、電子計算機 (PDP 11/40) で処理した。



(a) 比例型



(b) 閾値型

図5 表示ゲインあるいは不感帯幅と制御偏差 (PI: パルス間隔, F_c : 目標値をろ波するフィルターの遮断周波数)

3.2.2 実験結果と考察

a) 表示ゲインと制御成績 図5(a),(b)に実験結果を示す。(a)は比例型,(b)は閾値型の結果を示している。それぞれにおいて横軸はゲインおよび不感帯の幅(目標値のRMSで正規化されている)に、縦軸は正規化された偏差のRMS値に対応する。また各プロットは目標値の帯域の相違を示す。これらの結果から比例型では全体的にゲインが増加すると制御成績が良好になる傾向は認められるものの、とくに比較的高いゲインの領域では平坦な特性を示すことがわかる。このような特性は比例型の電気刺激フィードバックを含む手動制御系の成績が、順応などの内部的要因による表示ゲインの変動に対しても割合安定であることを示唆する。一方、閾値型は比例型と異なり、U字型の特性を示す。これは閾値型では、不感帯が小さいと実質的にゲインが無限大になるため制御系が不安定

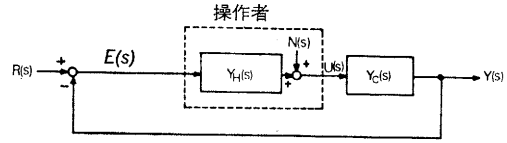


図6 手動制御系。

になること、また不感帯が広い領域では偏差の検知分解度が低下することの2点に原因があると推測される。比例型と閾値型の特性はその絶対値を比較すると前者の方がすぐれている、とくにその差は目標値の帯域が広がるにつれて著しくなる。この事実は電気刺激フィードバックが比例型で提示される場合、方向の情報のみでなく刺激の強さも実際に認識していることの裏付けを与えるものであり、刺激の大きさの表示が有意義であることを示唆するものである。しかし比例型でもゲインの選定を誤ると不感帯を適切に選んだ閾値型の特性に及ばないこともあることが示されている点は注意を要するところである。

b) 操作者の特性の伝達関数による評価 図1に示した補償型手動制御系は古典制御理論の立場から見ると図6のように表わすことができる^{19),22)}。ここで Y_H は操作者の線形部分の伝達関数、 Y_c は制御対象の伝達関数、 N は操作者の非線形成分と等化なノイズ成分を示す。 R, E, U, Y はそれぞれ目標値、制御偏差、操作者出力、制御量に対応する。本実験では $Y_c=1$ としているので、 $U=Y$ である。このような系における操作者の伝達関数 Y_H は次のようにして求めることができる¹⁹⁾。すなわち R と N が無相関とすると、 R と U, R と E の相互パワースペクトルを $\phi_{ru}(j\omega), \phi_{re}(j\omega)$ とすれば、

$$Y_H = \phi_{ru}(j\omega) / \phi_{re}(j\omega) \quad (1)$$

以下に示す伝達関数はすべてこの式によって算出した。具体的計算にはFFTを用いた。FFT 1回当たりのデータ数は512点、データのサンプリング周波数は目標値の帯域の2倍としている。また1データずつシフトして500回のFFT処理を行ない、それらの平均値を最終結果とした。データウィンドウとしてはHanningを使用した。

図7に比例型および閾値型に対する操作者の伝達関数 Y_H のボード線図を示す。これらの各結果の表示ゲインおよび不感帯幅は、前項a)の実験に基づき決定した。その値はそれぞれ53[erg/volt], 0.5である。

比例型および閾値型の伝達関数を相互比較すると前

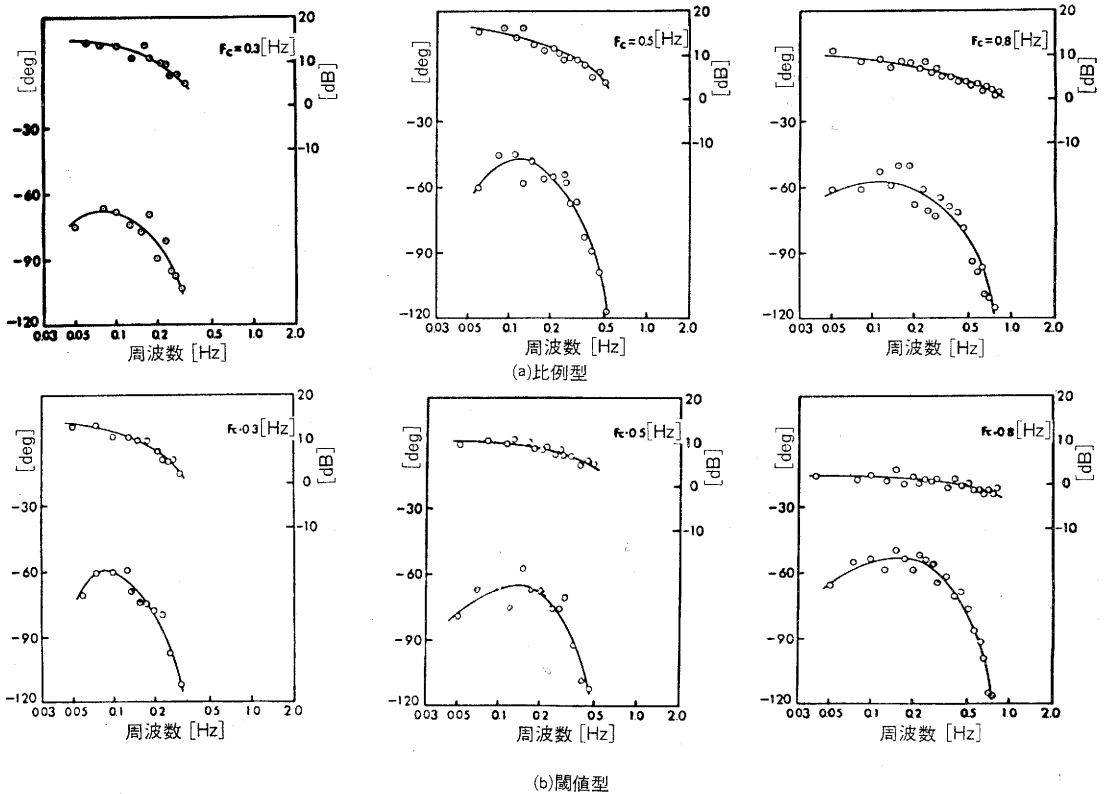


図7 操作者の伝達関数 (パルス間隔 10[ms], F_c : 目標値をろ波するフィルターの遮断周波数)。

者の方が一般にゲインが高いことがわかる。また双方ともおおむね目標値の帯域が広がるにつれてゲインが低下するとともに、その減少の傾きがゆるやかになる傾向も認められる。これらの傾向は、まず制御性において比例型が閾値型に勝ることを示すものである。さらに、目標値の変動速度がおそいときは目標値に比較的忠実に追従することができること、その反面目標値の変動が高速になると追従が困難になり、結局全体的にゲインを落として高速の変動にまで対応しようとするなど操作者のもつ一般的特性をも示唆するものといえる。ゲインを落とす行為は操作者の目標値に対する一種の適応性を示すものであるが、それによって結果的には制御精度は低下する。

比例型と閾値型の相違は目標値の帯域がせまい場合にはそれほど目立たない。しかし目標値帯域が広がるとその差は顕著になる。これは閾値型では情報の提示が2値的であり、制御偏差の挙動が比例型のごとく、微妙に操作者に提示されないことなどに1つの原因があると思われる。

4. 周波数次元電気刺激フィードバックを用いる手動制御系に関する実験

周波数次元を用いる情報伝達とは、外部信号を周波数変調し、一種のピッチ感覚の変化として生体に提示するものである。この方式は、単一部位刺激を基本とする情報伝達手段のなかでは強度次元を用いる手法と並ぶ有力な手法とされている¹¹⁾。本節では強度次元の場合と同様の手順で、この方式を用いる手動制御系の特性を評価した。

4.1 実験内容与方法

実験パラメータは基本的には強度次元の場合と同様であるが、表示法は図8に示すごとく偏差に応じて刺激のパルス間隔を比例的に変化させる比例型1種類とした。閾値型はその情報・刺激変換の形態をみれば明らかのごとく、実質的には実験内容が強度次元の場合と同一になるためここでは省略した。図8において、パルス間隔の範囲は過去のデータ¹⁰⁾を参考にして、人

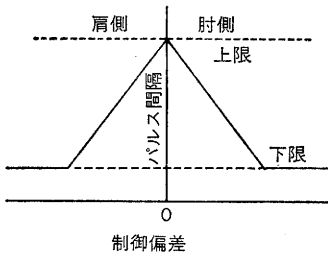


図 8 制御偏差の表示法.

間が比較的すぐれた周波数弁別能力を示すといわれる 10[ms]~100[ms] (周波数 100[pps]~10[pps]) とし、最低レベルは常に 10[pps] に固定した。

実験手順としては、はじめに表示ゲイン (刺激パルス間隔/制御偏差電圧) に対する制御性を調べ、次にその最適な表示ゲインに対し、目標値の帯域を種々変えて操作者の特性を伝達関数を用いて調べた。実験時間、データの記録・処理方法等は強度次元の場合とまったく同様である。なお、刺激のエネルギーレベルは、操作者が適当と判断する範囲内で任意に定めた。

4.2 実験結果と考察

a) 表示ゲインと制御成績 図9に表示ゲインに対する目標値の RMS で正規化された制御偏差の RMS 値を示す。目標値の帯域は DC~0.3[Hz]、刺激エネルギーレベルは 42.4[erg] である。表示ゲイン変化に対する制御成績は強度次元に比べて低く、かつU字形特性を示すことが認められる。一方最適ゲインに対する制御成績は強度次元の最良の成績にはほぼ等しい。低表示ゲインでの制御性の低下の原因は、比較的低い周波数の刺激を介して情報の認知が行なわれるようになるためと考えられる。また高い表示ゲインでの低下は、周波数弁別特性の飽和性に依存するものと推測される。

従来電気刺激に関する情報認知能力の実験では、強度次元と比較して周波数次元の方が刺激に対する絶対判断は容易であることが指摘されている^{11),19)}。そして感覚も比較的安定していることから実用機への適用例は周波数次元に関するものがほとんどである。しかし本節の実験結果は補償型手動制御系に関しては周波数次元の適用が必ずしも強度次元に勝る結果を与えないことを示している。用途に応じた情報次元の選定の重要性が指摘されるところである。

b) 操作者の特性の伝達関数による評価 図 10

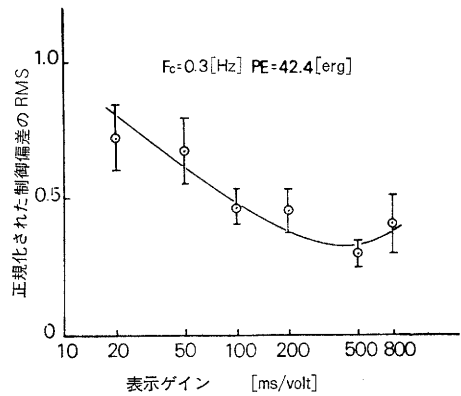


図 9 表示ゲインと制御偏差 (F_c : 目標値をろ波するフィルターの遮断周波数, PE : 刺激パルスのエネルギー, 表示ゲインは制御偏差電圧に対する刺激パルス間隔の変化量の比)

に目標帯域 DC~0.3, DC~0.5, DC~0.8[Hz], 表示ゲイン 300[ms/volt] における実験結果のボード線図を示す。これらの結果は目標値の帯域がせまいときには強度次元の場合と比較的類似の傾向を示している。しかし広帯域の目標値に対してはとくに強度次元 (比例型) などに比べ、極端にゲインが低下する現象がみられる。

手動制御系における目標値の周波数成分の増大は一般に作業負荷の増加に対応する。追跡作業において、目標値の周波数成分が増大しても作業負荷が操作者の能力の範囲内にあれば、操作者は従来のゲインを維持しつつ目標値の帯域に対応するように自己の動特性を改善することはよく知られている。一方その能力をこえるとゲインを落とし、帯域を獲得する傾向を示す。図 10 の結果は比較的小さい F_c で操作者能力の限界が表われることを示しており、周波数次元電気刺激を用いる追従作業が操作者にとってより作業負担の大きいものであることを示唆している。この原因の 1 つには周波数次元が有する情報表示構造の特質が関与するものと考えられる。すなわち強度次元では刺激パルスの瞬時値が情報を与え、かつそれが一定のタイミングで提示されるのに対し、周波数次元ではパルスの間隔が情報を与えるため、偏差の大きさによって情報提示のタイミングが変化する。このような表示法に含まれる固有の性質が、広帯域目標値に対する操作者の制御能力の減少を顕著にするものと思われる。周波数次元の情報表示構造のこのような性質に留意すれば、偏差の少ない領域でパルス間隔がせまくなるような表示法

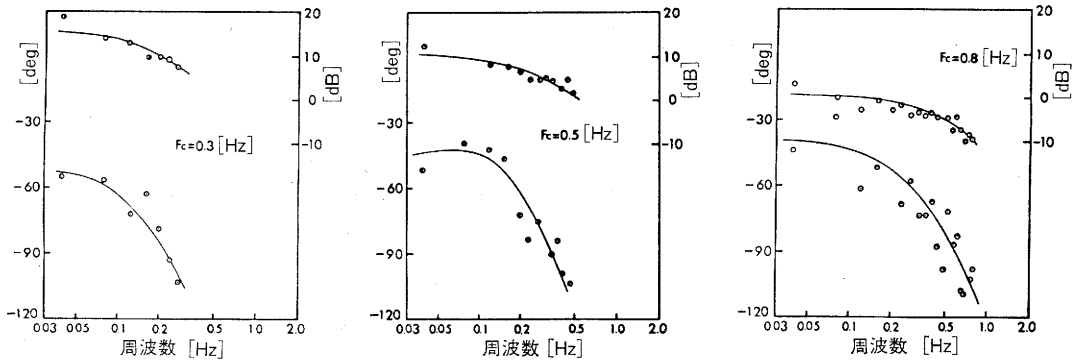


図 10 操作者の伝達関数 (F_c : 目標値をろ波するフィルターの遮断周波数, 刺激パルスのエネルギー 42.4[erg]).

を用いることによって、制御性は改善されることも予測される。ただしこの場合には偏差が増加した時点での制御性が低下し、それが全体的な制御性の悪化を招くことも考えられる。周波数次元の最適表示法はさらに詳細な検討を要する課題である。

5. 刺激表示法の比較評価

本節では、操作者の伝達関数に注目して、これまでに検討してきた電気刺激や視覚、皮膚機械振動刺激などの種々の情報表示法を含む手動制御系の特性を比較評価する。

操作者の伝達関数を相互比較するためには、それを定量的なモデルで表現しておくのが便利である。人間操作者の伝達関数の数式モデルは種々提案されている。そのなかで操作者の特性を簡便に表現しようという点で比較的好く用いられているものはいわゆるクロスオーバーモデルである^{20),21)}。ここでは J. W. Hill の方法¹⁰⁾に従い、拡張されたクロスオーバーモデルの1つである、

$$Y_H = (K/j\omega)e^{-(j\omega\tau - \pi/2)} \quad (2)$$

を用いて種々の表示法における操作者の伝達関数を整理する。ただし人間の制御動作は一般に複雑であり、例えば広帯域の目標値に対する補償動作の場合のごとく、(2)式のようなモデルにのらない結果を生ずることも少なくない¹⁸⁾。それで以下の検討では、ゲイン特性が -20 [dB/dec] に近い傾斜をもつデータを抽出し、それに対し(2)式のモデルをあてはめるとともに、比較考察を加えることとした。

クロスオーバーモデル中の K および τ は、それぞれ操作者のゲイン、時間遅れを示すパラメータである。

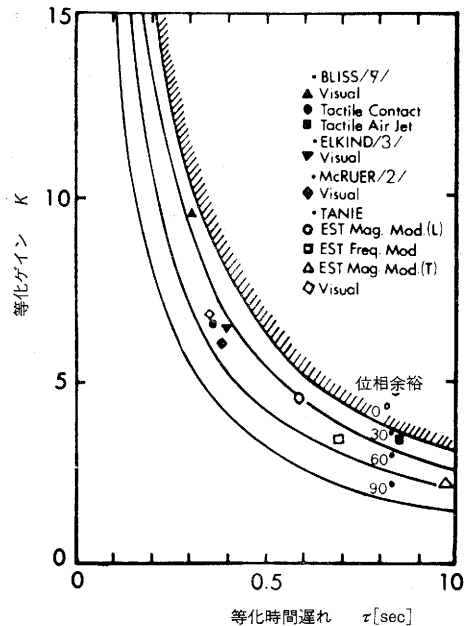


図 11 刺激表示法の比較評価 (// 内は文献番号, EST Mag. Mod. (L) は電気刺激強度次元 (比例型), EST Mag. Mod. (T) は電気刺激強度次元 (閾値型), EST Freq. Mod. は電気刺激周波数次元を意味する)。

制御系の安定条件を適たす範囲内で前者が大きくかつ後者がより小さいとき、制御の精度は向上する。なお、 e の指数のなかの $\pi/2$ は比例制御対象を制御する操作者の位相特性をよりよく近似するための補正定数である。

本実験で得た伝達関数について K, τ を計算し、それを K, τ 平面上に他の刺激表示方式とともに表示した結果を図 11 に示す。クロスオーバーモデルをあてはめた電気刺激の実験結果は、強度次元の比例型 (F_c)

$=0.5[\text{Hz}]$), 閾値型 ($F_c=0.3[\text{Hz}]$), 周波数次元 ($F_c=0.3[\text{Hz}]$) である. 他の刺激方式としては, J. C. Bliss の空気圧パルスおよび小型振動子による皮膚機械刺激に関するデータ⁹⁾と, Bliss⁹⁾, Elkind³⁾, McRuer²⁾ や著者ら²³⁾の視覚に関するデータを示した. これらはいずれも本研究の実験と同じく比例制御対象を含む手動制御系の実験から得られたものである. 一方, Bliss の皮膚機械刺激と視覚刺激および著者らの電気刺激と視覚刺激のデータは, それぞれ同一被験者1名のデータである. また図中の曲線群は等位相余裕を示しており,

$$\pi - \{(\omega\tau + \pi/2) - \pi/2\} = \alpha \quad (\alpha : \text{位相余裕}) \quad (3)$$

によって記述されるものである. 斜線を付した部分は不安定領域を示す ($\alpha \leq 0$).

この図から, 前節でも指摘したごとく, 電気刺激の表示法としては強度次元の比例型が最もよく, 以下周波数次元, 強度次元の閾値型の順であることがわかる. 他の刺激方式との比較では電気刺激は空気圧パルス型 (Air Jet) よりもすぐれているが, 視覚や小型振動子による皮膚機械刺激よりも劣ることが認められる. しかしこのような刺激方式の優劣の最終結論を下すには, Bliss の視覚データが他の研究者のものとは異なる特性を示していることに注目する必要がある. すなわち, Elkind, McRuer, 著者らの視覚のデータはほぼ同一レベルの特性を示しているのに対し, Bliss のそれはとくにゲインが高く, 非常にすぐれた制御性を示すものである. これは Bliss の被験者が補償動作に対して, 標準以上にすぐれた能力を発揮する人物であることを示唆する. Hill は Bliss のデータを標準的データと比較するためには, 30% 減とすべきことを主張している¹⁰⁾が, このような配慮を加えたとすれば, 電気刺激の強度次元比例型は小型振動子を用いる皮膚機械刺激とほぼ同等ないし若干すぐれたものとなる. 過去の研究で明らかにされている通信容量に対する電気刺激と機械刺激の相互比較結果などから類推しても, この結論は妥当と考えられる¹³⁾.

電気刺激が視覚に劣ることは, 皮膚感覚と視覚間における刺激に対する検知分解度の相違や日常生活における利用形態の相違などから当然予測されるところである. しかし電気刺激フィードバックを含む手動制御系における操作者の特性が視覚を用いる場合と類似していることは, 両方式の操作者伝達関数が同一型式の

クロスオーバーモデルで記述できることから明白である. また電気刺激を用いる系は比較的困難な条件のもとでの特性の低下が激しいという特質を有する反面, 限られた条件のもとではより視覚のレベルに近い特性を示すことも, これまでの実験結果から指摘される. このようなことから, 用途を限定すれば電気刺激は補償型手動制御系における実用的な情報フィードバックの一手段となりうると思われる.

6. むすび

強度次元および周波数次元電気パルス刺激フィードバックを含む補償型手動制御系における操作者の挙動特性を制御工学的手法を用いて検討し, 最適な操作者の挙動を得るための刺激パラメータ条件や制御系のパラメータ条件を明らかにした. また種々の刺激表示方式との比較考察をもとに, 電気刺激は補償型手動制御系における実用的な情報提示手段となりうることを指摘した.

人間・機械系の操作者の特性は, 制御系の各種パラメータはもとより, 学習時間等によっても複雑に変化する. 電気刺激の実用の可能性を一層明確に把握するためにも, 長期的な学習効果などを考慮した操作者の制御能力の評価などが今後の重要課題となろう.

終わりに, 平日頃ご指導いただく加藤一郎早稲田大学教授, また本研究に対し多大のご支援をいただいた望月仁電気通信大学教授, 藤村貞夫東京大学助教授, 清水嘉重郎機械技術研究所システム部長, 曾田長一郎同機械部長, 谷和男同機械部メカニズム課主任研究官に対し謝意を表する.

参考文献

- 1) A. Tustin ; "The Nature of the Operator's Response in Manual Control and Its Implication for Controller Design, *J. IEE*, Vol. 94, Part IIA, No. 2, (1947), 190-202.
- 2) D. McRuer, D. Graham, E. Krendel and W. Reiser, Jr. ; "Human Pilot Dynamics in Compensatory Systems—Theory, Models, and Experiments with Controlled Element and Forcing Function Variables, Air Force Flight Dynamics Laboratory, Air Force Systems Command, Wright-Patterson AFB, Ohio, Tech. Rept., 115-1, AFFDL-TR-66-15, Contract AF 33 (616)-7501, (1965).
- 3) J. I. Elkind ; "Characteristics of Simple Manual Control Systems", *MIT*, Lincoln Laboratory TR-11, (1956).
- 4) 井口 ; 手動制御の研究, 東京大学工学部博士請求論文,

- (1962).
- 5) 田村, 鹿嶋, 松岡; 聴覚フィードバックによる手動制御, システムと制御, 16-4, (1972), 72-80.
 - 6) 高島, 吉沢, 南雲; 聴覚入力手動制御系における人間の動特性, 医用電子と生体工学, 18-5, (1980), 341-346.
 - 7) H. F. Seeley and J. C. Bliss; "Compensatory Tracking with Visual and Tactile Displays", IEEE Trans. on Human Factors in Electronics, Vol. HFE-7-2, (1966), 84-90.
 - 8) J. C. Bliss; "Tactual Perception: Experiments and Models", Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif., Final Rept., Tech. Rept AFAL-TR-66-242, Contracts AF 33 (615)-1099 and NAS 2-2752, SRI Projects 4719 and 5438, (1966).
 - 9) J. C. Bliss; "Tactual Perception: Experiments and Models", Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif., Final Rept., Contract NAS 2-3649, SRI Project 6070, (1967).
 - 10) J. W. Hill; "Describing Function Analysis of Tracking Performance Using Two Tactile Displays", IEEE Trans. on Man-Machine Systems, Vol. MMS-11-1, (1970), 92-100.
 - 11) 恒川, 加藤; 電気刺激に対する人間の情報処理能力, 人間工学, 6-4, (1970), 181-187.
 - 12) 市川, 山本, 三淵, 阿部; 皮膚電気刺激による情報伝達の基礎的特性, バイオメカニズム 4, (1978), 東京大学出版会, 17-24.
 - 13) 谷江; 電気刺激による生体への情報伝達に関する基礎的研究, 機械技術研究所報告, 106, (1980).
 - 14) 館, 谷江, 阿部; 経皮電気刺激の強度感覚に対するパルス高とパルス幅の効果, 医用電子と生体工学, 15-5, (1977), 315-320.
 - 15) H. P. Schmid and G. A. Bekey; "Tactile Information Processing by Human Operators in Control Systems", IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-8-12, (1978), 860-866.
 - 16) 谷江, 館, 谷, 前田, 大野, 藤川, 阿部; 多点同時刺激装置の開発, 機械技術研究所所報, 31-2, (1977), 104-116.
 - 17) 谷江, 館, 小森谷, 阿部, 三浦; 刺激エネルギーを強度次元パラメータとして用いる定エネルギー型電気パルス刺激情報伝達装置, 医用電子と生体工学, 18-1, (1980), 40-42.
 - 18) T. B. Sheridan and W. R. Ferrell; *Man-Machine Systems*, (1974), MIT Press.
 - 19) 谷江, 館, 小森谷, 阿部; 電気パルス刺激情報伝達における周波数次元の検討, 機械技術研究所所報, 33-4, (1979), 159-170.
 - 20) D. T. McRuer, D. Graham and E. S. Krendel; "Manual Control of Single-Loop Systems: Part I", *J. of Franklin Institute*, 283-1, (1967), 1-29.
 - 21) D. T. McRuer, D. Graham and E. S. Krendel; "Manual Control of Single-Loop Systems: Part II", *J. of Franklin Institute*, 283-2, (1967), 145-168.
 - 22) 井口; 人間機械系, (1970), 共立出版.
 - 23) 小森谷, 谷江, 館, 井口, 高部, 坂井; 人間-機械系における表示ゲインに対する操作者の特性, 生体システムシンポジウム・バイオメカニズム学術講演会前刷, (1980), 66-67.