



Title	脳の適応・学習機能に関する制御工学的研究
Author(s)	田口, 英郎
Citation	大阪大学, 1984, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/63
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

脳の適応・学習機能に関する制御工学的研究

田 口 英 郎

内 容 梗 概

人間をはじめとする動物は感覚器—脳—効果器のたくみな連携動作によって体外の環境変化にうまく適応した随意運動を実現することができる。

本論文は随意運動の形成に深くかかわっているとみられる脳の適応・学習機能の解析とこれらの機能同定を目的として行なった研究の結果をまとめたものである。本論文では解剖学的にかつ生理学的にみた脳機構とその機能を踏まえて「脳はひとつの機能単位であり、かつ感覚入力を得て運動指令を発現する座である」とみなす考え方が基盤となっている。この前提のもとに手・腕の動作を介しての各種制御作業をとりあげ、脳の入出力関係に制御論を適用し、脳の制御機能の解析を行なう。また脳機能再現のためのアプローチとして構成的手法が本論文全般にわたって採用されている。すなわち脳機能の解析結果や生理学・心理学的な知見にもとづいて脳の機能仮説をたて数学的に記述し、計測された生体现象と照らして機能の再現をはかり機能仮説の是非を検証する。本論文は6章からなる。

本論文の第1章は緒論である。脳機能研究の現状を示すとともに行動面から脳の適応・学習機能をとらえ、制御工学的な解析を行なう本研究の意義を明らかにする。

第2章では脳神経系の巨視的な機構について概観し、随意運動における脳神経系の働きについて述べる。また行動を分析するうえで必要な適応・学習の機能が心理学・生理学の分野でそれぞれどのように解釈されているのかを紹介する。

第3章では視覚情報を得て腕運動を行なう場合に脳で起る一連の過程を制御工学的見地から解析する。また脳系の巨視的な働きを表現できる脳モデルを構成し、生体现象に照らして脳モデルの検証を行なう。

第4章では単純な手作業における脳の適応機能の役割を論じる。まず人間の制御要素としてのふるまいが制御対象の特性の違いによって二つの動作モードに大別できることを確かめる。つぎに動作モードの切換えによって人間はより広範囲な対象の制御を可能にしているとの見解について検証を行なう。

第5章では生体の構造はブラック・ボックスと考え、機能面から脳の学習機能を論じる。すなわち不慣れな制御対象に対して手動操作を繰り返し行なわせる。この実験を通じて制御者の動作が習熟に至る過程を段階的にとらえ、解析する。また人間は強化によって制御策を学習し、習熟後はその動作をパターン化できることをモデルによる現象の再現により示す。

第6章は本論文で得られた結果を総括したものである。

目 次

第 1 章	緒 論	1
第 2 章	脳のメカニズム	5
2-1	緒 言	5
2-2	脳神経系の巨視的機構	5
2-3	適応・学習の生理・心理学的解釈	10
2-4	結 言	13
第 3 章	腕運動制御における脳機能	15
3-1	緒 言	15
3-2	前腕運動制御における脳機能	16
3-2-1	前腕運動特性の計測	16
3-2-2	前腕運動制御における中枢モデル	19
3-2-3	モデル構造と中枢構造との対比	20
3-2-4	前腕運動特性のシミュレーション	24
3-3	上肢運動制御における脳機能	25
3-3-1	上肢運動特性の計測	25
3-3-2	上肢運動制御における中枢モデル	31
3-3-3	上肢運動特性のシミュレーション	35
3-4	結 言	37
第 4 章	適応行動における脳機能	40
4-1	緒 言	40
4-2	適応制御における動作モード	41
4-2-1	適応制御実験	41
4-2-2	バングバング動作モード	42
4-2-3	グラジュアル動作モード	45

4-2-4	デュアル動作モード	46
4-3	動作モードからみた適応特性の評価	49
4-4	結 言	54
第 5 章	学習行動における脳機能	56
5-1	緒 言	56
5-2	学習システムの形態	56
5-3	応答特性の段階的評価	58
5-4	強化形式による学習モデル	62
5-5	学習過程のシミュレーション	66
5-6	結 言	68
第 6 章	結 論	70
	謝 辞	

第1章 緒 論

脳は知覚—思考—行動からなる随意運動を統御するうえで重要な器官である。脳が随意運動の発生過程において神経情報をどのように処理しているのかについては生理学・心理学・数学・工学など広範な分野にまたがる関心事であり、それぞれの分野で独自の方法と技術を用いて探求されてきた。

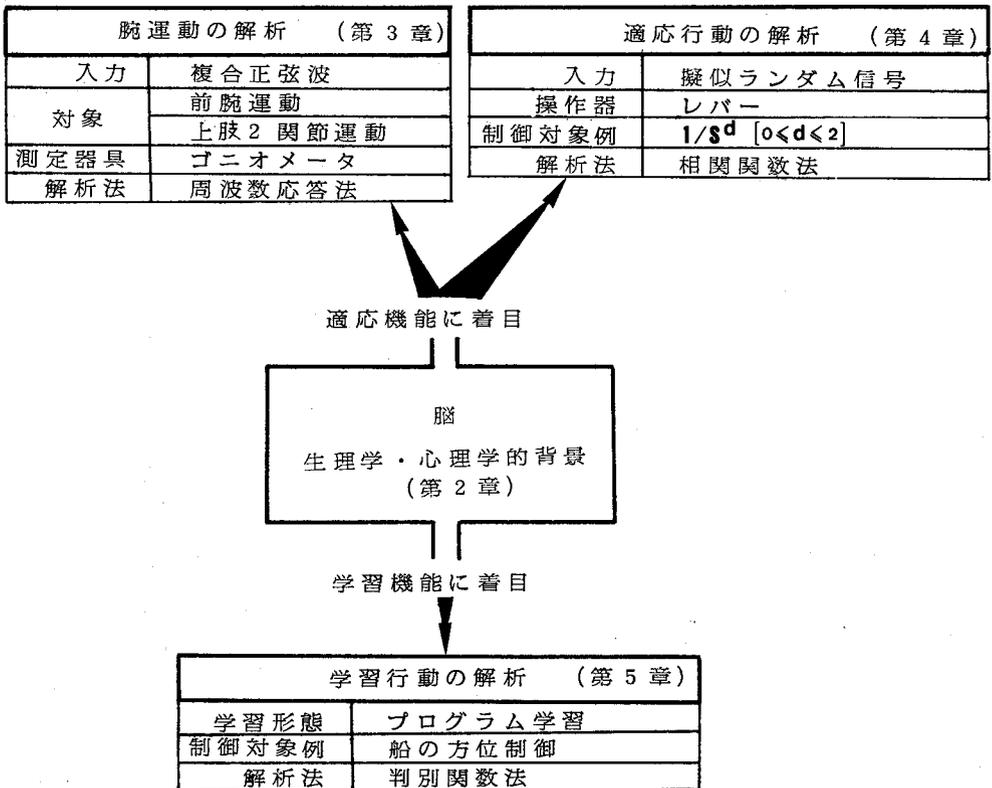
とくに大脳生理学・解剖学の分野ではエレクトロニクスの急速な進歩により、脳の検索技術が近年飛躍的に向上した。^{1)~3)} 無麻酔の動物を用いて運動時の脳細胞の電気活動が記録され、脳細胞間の神経線維連絡が各種の形態学的検索法で明らかになった。脳のある機構がどのように働き、いかに脳の諸機能に参与しているのかという脳のメカニズムが細胞レベルで急速に理解されつつある。また脳の細胞レベルでの理解が進むにつれて、記憶、学習、認識など随意運動に関連する高次脳機能への関心がこれまで以上に高まり、工学者らを交えて高次脳機能にアプローチするための方法論が検討されている。^{4)~7)} 方法論には微視的な方法と巨視的な方法がある。高次脳機能は脳全体の振舞としてとらえなければならない。それだけに入り組んだ複雑な神経回路網からなる脳全体の振舞を単一細胞の現象の集積とみる微視的な方法による洞察はきわめて困難である。巨視的な方法ではまず脳に関する知見をもとに大まかな脳の機能仮説をたてる。つぎに高次脳機能による生体现象がこの機能仮説にもとづいて模擬できるか否かで脳の機能仮説の是非を検証する。現在のところはこのような構成的接近法が高次脳機能の理解には有効であるとみられている。

高次脳機能は工学の分野においても興味ある研究対象である。これまでも脳の構造と機械系との類似点を見つけ出すことで脳の仕組みを理解し、脳機能を機械設計に役立てることが考えられてきた。^{8)~10)} しかし現在なおも機械系は人間の融通性と同等な能力を発揮するまでに至っていない。知能ロボットの研究分野では体内外の環境変動に適應する生体の振舞に近い機械性能の達成をめざしており、脳研究の成果が注目されている。

このような背景のもとに本論文では巨視的な立場から「脳は適應・学習機能を備えた高度な情報処理によって身体の運動を制御する機械である」とみなし、随意運動を制御する脳のメカニズムを解析し、同定する。なお本論文では随意運動を外界の環境とのかかわりの多少で単純な運動と行動とに区別し、それぞれ異なる構成的接近法により解析する。したがって本論文の内容は運動解析と行動解析

の二つに大別できる。まず外界の環境と関連の少ない単純な運動をとりあげ、脳の知見を生かし脳を含む中枢系の巨視的な運動支配の構造を推論する。推論した中枢系の機能構造は上肢運動制御を例にとりて確かめる。つぎに適応・学習など高次脳機能の働きで、外界の環境変化に応じてどのような行為の再生や発達過程がおこるかを調らべる。ここでは外界の環境と関連の深い行動として制御作業をとりあげる。行動解析にあたっては適応・学習機能に関する脳の生理学的知見がまだまだ乏しいため、脳構造とは無関係に適応・学習の脳機能を実現するうえで有利なアルゴリズムを採用する。

本論文の主要部分は4章からなり、その構成は第1・1図に示すとおりである。



第1・1図 論文の構成

第2章では脳のメカニズムに関する生理・解剖学的な考え方を巨視的な観点から再編成する。さらに“反射”の考えが末梢の神経系のみでなく高度な意識過程をも含む脳機能にまで拡張できると解釈する。この解釈をもとに脳神経系が巨視的にひとつの機能単位であるとしてその働きを考察する。また本論文を通じて対象とする適応・学習機能に関する生理・心理学的な解釈についても概説する。第3章では感覚器-脳-効果器のたくみな連携動作を実現する制御のしくみを解析する。すなわち絶えず変動する視標を前腕運動あるいは上肢運動によって追従させる実験を行ない、人間の視覚的な随意運動の時間応答特性を計測する。つぎに時間応答特性から周波数応答特性を推定し、構成的手法により中枢系の制御機能構造を明らかにする。ここで類推される中枢機構は運動生理・解剖学的知見にもとづいた中枢系の巨視的な機構とも対応づけられている。この中枢機能構造を介して中枢制御の仕組みを概観することができる。

第4章では制御作業に習熟した人間の適応特性を解析し、同定する。人間は十分な訓練を積み重ねば種々の特性をもつ制御対象を制御できる。それは人間が訓練を積み重ねることで制御状態のパターンを識別し、パターンに応じた適切な動作モードを選択できるようになるからであろう。そこで人間の適応特性を動作モードの観点から解析する。動作モードはオンオフ的に操作入力を切り換え、切り換え時には零を切る操作を示すバングバングモードと緩やかな漸近的操作を行なうグラデュアルモードの二つに大別する。また適応特性がこれら二つの動作モードの切り換えで実現されるとみられるデュアルモードについても触れる。人間の適応能力は対象の周囲環境の変化の認知や対象に対する“学習”という手段による先験的な知識の蓄積に負うところが大きい。そこで第5章では学習の基礎概念を明らかにしたうえで学習行動を解析する。ここでは人間と機械とが共存する人間-機械系の例として船の操舵実験システムをとりあげる。操舵に不慣れな被験者を選び、操舵に習熟するまでの経過を学習初期、中期、後期の三段階に分け、それぞれの制御動作を別個に解析して行為の発達過程を考察する。

第6章は結論で、本研究による成果を総括する。本論文は脳機能の生理・心理学的記述にはじまり、巨視的な立場から運動や行動を統御する脳機能の工学的イメージを形成するまでを記述している。本論文による脳機能の工学的表現は現在脳機能の生理学的知見がまだ乏しいため脳のある特定の仕組みについての基礎的な記述にとどめざるを得ない。しかし日々増加しつつある新たな脳機能の知見を加え、より進歩した理論体系によってこの基礎的な記述をさらに発展、拡大させ、複雑な行動を説明づけていくことは可能であろう。

第 1 章の参考文献

- 1) 時実利彦編：脳と神経系，岩波書店（昭51）
- 2) 昭和52年度文部省科学研究補助金特定研究「脳の統御機能」総括班研究報告書3，4
- 3) 田口・藤井：脳の運動制御機能，システムと制御，Vol.26，No.9，pp.36-45（昭57）
- 4) 伊藤・島津編：高次脳機能と中枢プログラミング，現代の神経科学3，産業図書（昭51）
- 5) 甘利俊一：神経回路網の数理 - 脳の情報処理様式，産業図書（昭53）
- 6) 伊藤正男：脳の設計図，中央公論社（昭55）
- 7) M.A.Arbib：The Metaphorical brain，John Wiley and Sons，
（金子隆芳訳：脳 - 思考と行動の源をさぐる，サイエンス社（昭55））
- 8) F.Rosenblatt：Principles of neurodynamics，perceptrons and the
theory of brain mechanisms，Spartan Books，Washington D.C.（1961）
- 9) D.Marr：A theory of cerebellar cortex，J.Physiol.，202.
pp.437-470（1969）
- 10) 藤井・田口：制御理論の立場からみた学習，数理科学，特集“学習するコンピュータ”，
Vol.8，No.3，pp.38-46（昭45）
- 11) 中村嘉平：制御における人工知能，システムと制御，Vol.18，No.12，pp.665-672
（昭49）
- 12) J.S.Albus：Brains，behaviors，and robotics，BYTE
Publications Inc.（1981）

第 2 章 脳のメカニズム

2-1 緒 言

本章では行動や行動にともなう脳の適応・学習機能に関する具体的な問題を取りあげるうえでの予備的知識を記述する。まず脳と行動との関係について述べる。行動とは随意運動を個体と環境との相互関係においてとらえることである。そこで2-2では脳神経系の巨視的機構について概観するとともに“反射”の考え方にもとづいて随意運動における脳神経系の働きを述べる。反射は幾つかの部位によって構成される神経回路網への入出力関係を扱うものである。したがって制御論を適用し、伝達関数で神経回路網の機能を表現しようとする本論文の試みにならう考え方といえる。反射学はC.S.Sherringtonによって集大成された思想であり、現在生体の行動を考えるうえでの基盤とされている。随意運動における脳機序についてはJ.C.Ecclesによって小脳—大脳連関構造を重視するいわゆる“dynamics loop hypothesis”が提唱されている。ここではこの脳反射を頂点とする多くの反射機構が中枢神経系において有機的に組織化され、統合されることで、随意運動の機序を説明づける。行動を分析するうえで必要な適応・学習といった概念については、元来心理学においてその内容の記述と分析に重点をおいた研究がなされてきた。生理学の分野においても最近では適応・学習の神経系のしくみが考えられるようになった。しかしながら行動に関する生理学的な理解はまだきわめて初歩的な段階にあるから行動が複雑となり、適応・学習の機能を問題とするようになるとどうしても心理学的な解釈が必要になってくる。そこで2-3では適応・学習が心理学・生理学の分野でどのように解釈されてきたのかについて述べる。

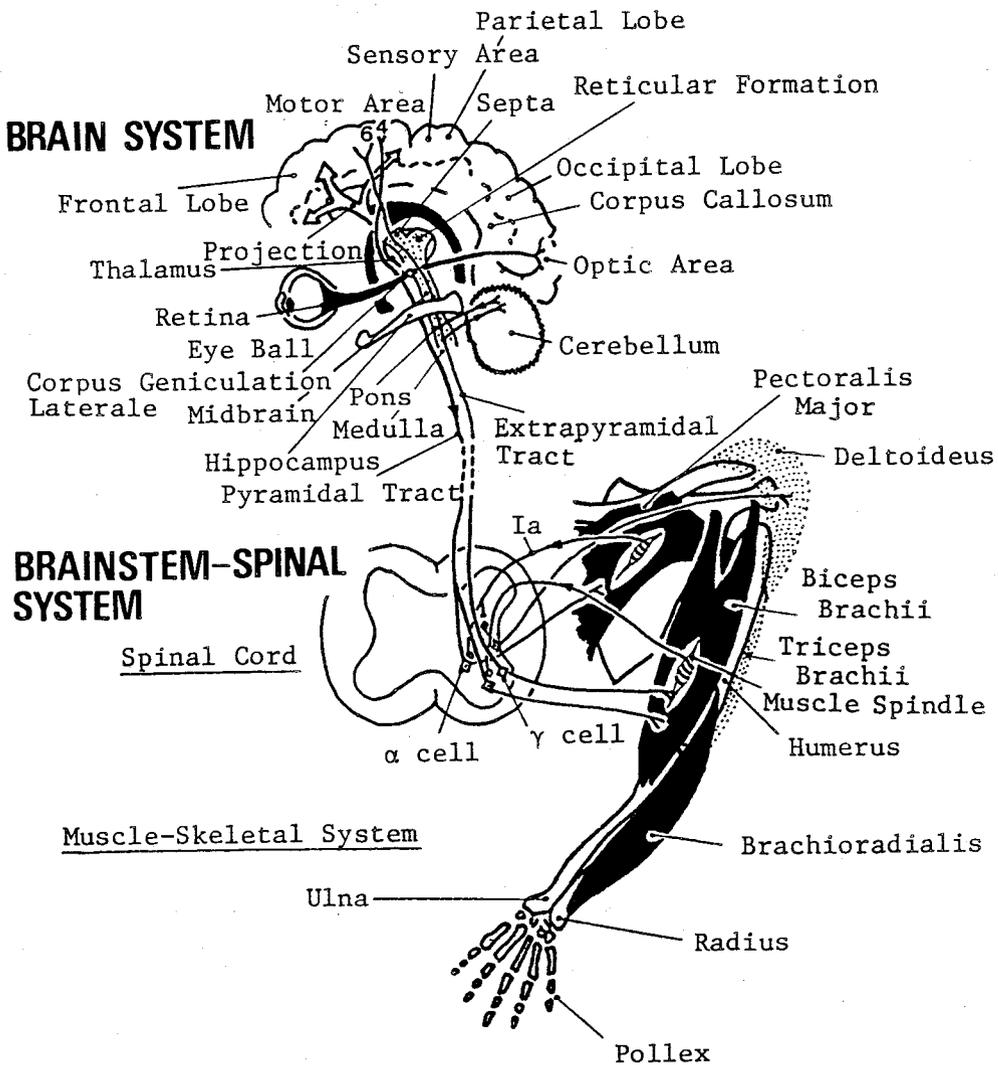
2-2 脳神経系の巨視的機構

行動とは個体と環境との相互関係においてとらえた随意運動であるが、その基礎となるのは脳を含む中枢神経系である。中枢神経系への入出力装置である受容器(receptor)や筋などの効果器(effector)については情報の取り込み、その変換、伝達などに驚くべき巧緻な機能がみられることから早くから注目を集め、その変換特性は定量的な記述にまで進んでいる。^{1)~3)} いまや残された中枢神

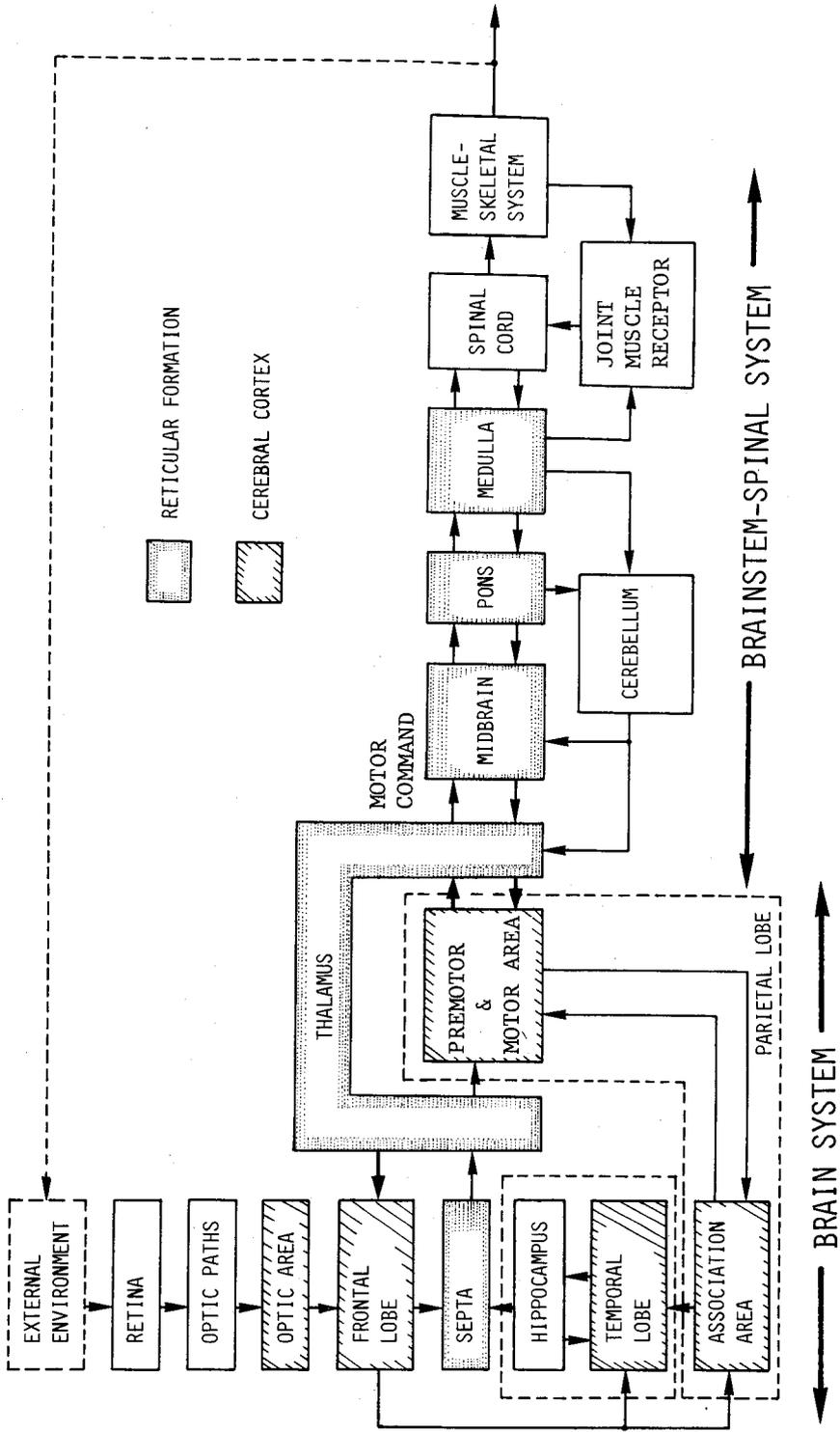
経系の働きを把えるための条件がととのったと考えられている。いち早く行動面から中枢神経系を研究する道を拓いたのは I.P.Pavlov と C.S.Sherrington である。Pavlov は随意運動とは効果器を筋肉とする条件反射であり、任意の刺激によって定型的に引き起こされる反射であるとした。また動物実験によって随意運動の最初の徴候が運動の停止すなわち定位反射であることを見出した。今日ではこの定位反射が運動の契機であると仮定されている。一方 C.S.Sherrington は生体が刺激 (stimulus) によって反応する (response) という特異な性質に着目し、この因果律が生体行動の基礎であると考えた。この考えにもとづいて行動を知覚—運動の連鎖すなわち反射の連鎖が一定の順序で生起するものとみなし、現在の反射学を体系づけた。これらの条件反射学・反射学が今日まで脳研究の二大思想となっている。これまでもこれらの思想の裏付けのもとに、脳の破壊実験や刺激実験が行なわれてきた。脳の破壊実験とは脳のある部位を破壊して問題としている行動に及ぼす効果を調べる方法であり、冷却などによる機能的破壊 (可逆的破壊) も行なわれている。刺激実験では脳のある部位を電氣的・化学的に刺激してどのような行動が出現するかあるいはどのような変化が行動上におこるかが調べられている。このようにして積み上げられてきた脳を含めた中枢神経系の実験的研究も次の段階に入り、既存の知識を集約し、システムの観点からマクロな中枢神経系の性質を理解し、定式化しようという方向に向かいつつある。以下では中枢神経系を階層構造からなるシステムとみなし、中枢神経系の構造と機能の両面から随意運動の発現の仕組みについて概観する。

運動発生の中枢機序について考えるとき、その基盤となるのは反射の考え方であり、その協調的な組み合わせ過程が中枢の統合作用 (integrative action) を生む。^{5),6)} そこで反射の考えが末梢の神経系のみでなく、階層を遡って高度な意識過程をも含む脳機能にまで拡張できるとの解釈をもとに中枢神経系の巨視的な機構とその働きを考察する。反射の考え方は中枢神経系の形態学に負うところが大きい。幸い、近年生理学の分野で微細形態学的手法、微小電極法などの神経生理学的手法が採用され、中枢各部位の神経回路とその線維連絡についてかなりの程度まで解析が行なわれるようになった。そこでこれらの知見をもとにした視覚—上肢運動系における中枢部位およびその間の主要な神経線維連絡の模式図を第 2・1 図に示す。また第 2・2 図には運動中枢における信号の流れ図を示す。運動中枢制御機構は階層構造をなし、大脳皮質 (cerebral cortex)、中脳 (midbrain)、延髄 (medulla) などの上位中枢からの指令が下降路により脊髄 (spinal cord) に伝えられ、下位レベルの反射系が操られている。J.C. Eccles は動物実験から大脳皮質→橋核→小脳プルキンエ細胞→小脳歯状核→視

床 VL核→大脳皮質運動野とつながる経路をインパルスが通ることによって運動が起こり、またその調整が行なわれると考えた (dynamic loop hypothesis)。ここではこの大脳-小脳連関構造が随意運動の中枢機序の要と考え、脳を一つの機能単位ととらえる。すなわち中枢系は基本的には脳系 (brain system) と脳幹・脊髓系 (brainstem-spinal system) の二つの神経系の反射の複合によって機能しているとみなす。上位中枢である脳系は運動を外界の状況と結びつけ、合目的な運動とするために必要な“運動指令の発現機序の座”であるとみる。また下位中枢である脳幹・脊髓系はこの運動指令を受けて直接筋骨格系 (muscle-



第2・1図 運動中枢神経系の模式図



第 2 ・ 2 図 運動中枢における信号の流れ図

skeletal system)を制御し、滑らかな手先の運動として実現する役割を担うサーボメカニズムとみなす。この考え方にしたがえば視覚情報を得て手先の位置決めを行なうまでの体性感覚情報の統合過程はつぎのように形成されると推論できる。

脳系 視覚信号は網膜 (retina) 上に投影され、一次視覚路を通り、外側膝状体 (corpus geniculation laterale) を経て大脳皮質視覚領 (17野～19野) に伝達される。さらにこの視覚情報は前頭皮質 (frontal lobe)、連合皮質 (association area) など他の領野に伝達される。大脳前頭皮質に伝搬された情報は前頭皮質と密接な神経線維連絡を有する脳幹網様体 (reticular formation) の上位組織 (中隔部; septa) を経て脳幹に伝えられる。中隔部は情報の選択的な記銘・再生に関与するとみられる側頭皮質・海馬系 (temporal lobe・hippocampus system) から抑制的な調節機能を受けている。またその出力は視床 (thalamus) を介する広汎性投射の関与によって大脳皮質にもどされ皮質内情報が調整される。一方、連合皮質では視覚系からの情報、関節・筋受容器などによる自己受容性感覚 (位置および運動の感覚) の情報など体性感覚情報の統合によって身体像形成にかかわる制御情報を生み出すとみられている。連合皮質からは脳系での出力機序を司る運動前野 (premotor area, 6野)、運動野 (motor area, 4野) のうち、主に運動前野への線維投射がみられる。このことから運動前野は体性感覚情報の運動野への取り込み方を制御する機構とも考えられている。運動野には小脳 (cerebellum) から視床 (thalamus) を介する線維投射があり、この小脳・大脳連関によっても運動野は出力調節を受けている。

脳幹・脊髄系 上位の中枢からの指令は脊髄を下行していく線維群によって下位中枢に伝えられる。大脳皮質を発する下行路を錐体路 (pyramidal tract)、他の下降路を総称して錐体外路 (extrapyramidal tract) と呼ぶ。錐体路としては運動時の Betz 大細胞を起源とするものがよく知られている。錐体路線維は脊髄節にある四肢の運動ニューロン (α cell) の樹状突起に直接興奮性に結合する。錐体路は大脳皮質が直接主働筋を制御するための経路であり、随意運動において手先の細かい運動など精巧な制御を達成するのに必要であるとみなされている。一方、錐体外路には網様体脊髄路、前庭脊髄路、赤核脊髄路などがあり、主働筋への直接作用と主働筋の筋紡錘 (muscle spindle) にはたらきかける作用などが知られている。網様体脊髄路の一部が屈曲反射を、前庭脊髄路の一部が伸張反射、筋平衡反射を増強することから下行路間の平衡によって脊髄反射を調節しているとみられている。脊髄反射自体による運動は外界の状況との結びつき

がなく、外界の状況に対する適応性を欠いている。したがって脳幹・脊髄系は脳系において外部環境因子との絡みで発生した運動指令を手先の運動として円滑かつ巧みに実現するために脊髄に働きかけ、基本的な脊髄反射機能を修飾する役割をもつと考えられている。

このように視覚情報を得て腕運動制御を行なう場合には、これらの二つの神経系の反射の統合によって制御目的に合致した関節の屈伸運動が生じ、手先の位置制御が達成されるとみなされている。

2-3 適応・学習の生理・心理学的解釈

適応・学習の脳機序は具体的には行動面から研究されている。脳と行動に関する研究は問題提起の仕方の相違からこれまで二つに大別されてきた。第一に行動を効果器活動と規定し、身体内部の効果器やそれを統御する脳の物質過程として、物理的タームによって理解しようとする生理学的立場である。第二に行動選択として規定し、身体内部の物質過程とは無関係に、必ずしも物理的タームによらず日常語によって理解しようとする心理的立場である。

まず生理学的立場について述べる。生理学的には動物実験を通じて学習行動と神経活動との関係が調べられている。すなわち経験によって生じた行動の適応過程を学習と呼び、学習によって獲得した行動を学習行動と定義する。学習行動を感覚刺激によって誘発される反応の一つとみて、刺激-反応形式にもとづいて行動の発達過程がとらえられている。生理学において適応・学習など意識に関する神経系のしくみが研究されはじめたのはごく最近のことである。はじめは脳への入力（刺激）をあたえ、脳からの出力（反応）を見て間接的に脳の働きを探ろうとする暗箱解析から出発した。しかしながらこのような間接的な調べ方では飽き足らず、現在では無麻酔・無拘束下で動物が行動しているときの脳の各部位の神経構造の働きを電気活動としてとらえ、その反応様式から学習行動が調べられている。⁷⁾ 学習行動に関する生理実験の結果、刺激を受けてから反応が生じるまでに遅れがあることが明らかにされている。この遅れは行動が達成されるまでに、脳内に一定期間ある種の興奮が持続する過程が存在することを示す。しかもこの中枢過程は特定の感覚入力の選択と特定の反応パターンとを結びつけるのに役立っているのではないかと考えられている。

学習行動が調べられているとはいえ、生理学的に理解することは依然として困難な問題である。Eccles の言葉を借りればいまだ「暗黒の領域」であることにかわりはない。これまでのところ学習は中枢神経系の何らかの変化としてとらえら

れてはいるが、どのような変化によるのかという本質的な問題に関してはあくまで仮説であり、直接的な証拠はあきらかにされていない。ただし神経細胞の間に新たな機能的結合ができる仕組みに関しては次のような諸説が考えられている。⁸⁾

a) 新しい神経経路の形成 (Pavlov説) — Pavlovは皮質における条件刺激と無条件刺激の両分析領野間に機能的な連絡ができることが条件づけ(学習)の形成であるとみなした。すなわち条件刺激の皮質分析部(中枢)の興奮にくらべて、無条件刺激の皮質分析部(中枢)の興奮の方が強いために後者は前者を引きつける。そこで両者の間に皮質内結合を生じ、条件刺激のみで無条件刺激を与えたときと同様な効果を生むと考えられている。

b) シナプスにおける変化 — 学習をシナプスにおける何らかの変化として説明づける考え方である。すなわちシナプス抵抗の減少によってシナプスにおける情報伝達がより容易になることが学習の本質ではないかとみる。またこれを示唆する現象も報告されている。この機序に関する仮説として次のものがある。

i) シナプス棍状体の膨張説 ii) 化学的伝達物質の分泌説

iii) グリア細胞の関与説

また中枢神経系のニューロンは再生能力を備えていないので、損傷をうけるとそのニューロンは死滅するが、一方で健全なニューロンから側枝が伸びて新しいシナプスが形成される発芽現象が見い出されている。この発芽現象は学習研究の新たな視点として注目されている。⁹⁾

c) 蛋白質分子の構造的変化 — 神経細胞の細胞質を組み立てている蛋白質分子の構造的な変化とする考えがある。すなわち神経細胞がインパルスを受けると神経細胞の細胞質の中の蛋白質分子の構造的配列が変わる。この点に関しては学習によって細胞質の中で蛋白質合成の鋳型としてふるまうリボ核酸(RNA)が量的・質的に変化するという報告がある。

つぎに心理学的立場からのアプローチについて述べる。心理学において行動を対象とすべきだと主張したのはJ.B.Watsonである。彼の主張は行動主義と呼ばれ、その後の心理学に科学性を付与するうえで重要な役割を果たした。心理学で扱う行動のなかにも反射的行動など筋の活動電位や肢の屈曲の測度が利用でき、いわゆる物理的タームによって記述されるものもある。しかし行動が複雑になり、生体と環境とのかかわりあいがないし相互作用を取り扱うようになると、もはや物理的タームのみによっては記述しきれなくなる。心理学では行動を選択と規定し、行動分析にもとづいてさまざまな心理学的概念が構成されてきた。¹⁰⁾ 適応・学習もその概念である。

心理学では伝統的に生体の環境へのかかわりあいを経験への適応という名で呼ぶ。また「学習は一定の刺激事態において先行の過程に依存して生じる行動の変容である」と定義されている。心理学においては学習の事実に対する解釈の相違から連合説、認知説の二つの学習説がある。^{11), 12)} 連合説は刺激と反応の結合に重点をおく。すなわち学習とは刺激に対して新しい反応を連合させることであると考えて、連合を促進したり、妨げたりする条件を分析して客観的な法則を見出す。これらの法則には学習効果に影響を及ぼす賞罰についての E.L.Thorndike の効果の法則 (law of effect) をはじめ、習慣の形成に働くものとして E.R.Guthrie の頻数の法則 (law of frequency)、近時性の法則 (law of recency) などがある。この連合説に対して認知説は問題解決学習のような比較的複雑な事態における学習の事象を基礎として理論構成される。認知説は問題事態の構造の認知が優先すべきであり、この認知に影響する諸条件を分析しようとするものである。認知説では学習目標達成のために必要な機能的価値をもった手段を問題事態のなかから発見することを重視する。現在は連合説から認知説への漸近的な移行がみられる。以上は学習の定性的モデルといえる。一方、学習曲線に適合する数式を経験的に求めようとする試みも行なわれており学習の定量的モデルとして活用されている。¹³⁾ ここでは 5-4 で述べる学習モデルに R.R.Bush と F.Mos-teller による演算子モデルを用いる関係で、この演算子モデルについて簡単にふれる。

このモデルは学習のための確率論的モデルとも呼ばれている。ある反応が反復されるたびに、反応の生起確率が次第に変化していく過程を比較的少数のパラメータによって定まる数式で表現している。いま簡単な例として反応カテゴリーが 2 種 (A_1, A_2) の場合を考える。まずある試行における反応 A_1, A_2 の生起確率をそれぞれ $P, 1-P$ とする。また反応生起にともなって生じる事象 E_i の作用に対して演算子 Q_i を対応させる。すなわち P が第 n 試行でのある反応の生起確率とすれば、 $Q_i P$ は第 n 試行で事象 E_i が生じたとした場合の第 $n+1$ 試行における反応の生起確率となる。

$$Q_i P = \eta_{1i} + \eta_{2i} P \quad (\text{勾配切片形式}) \quad (2 \cdot 1)$$

(2・1) 式に $\eta_{2i} = 1 - \eta_{1i} - \eta_{3i}$ を代入して

$$Q_i P = P + \eta_{1i} (1 - P) - \eta_{3i} P \quad (\text{得失形式}) \quad (2 \cdot 2)$$

が得られる。

また $\eta_{1i} / (1 - \eta_{2i}) = \lambda_i$ とおけば (2・1) 式より

$$Q_i P = \eta_{2i} P + (1 - \eta_{2i}) \lambda_i \quad (\text{不動点形式}) \quad (2 \cdot 3)$$

が得られる。

(2・1) 式～(2・3) 式はそれぞれ目的によって使い分ける。この Bush-Mosteller 形の学習モデルは人間の二者択一学習における確率的強化に適用すれば有効であることが報告されている。

2-4 結 言

ニューロン活動の仕組みについては微小電極法によりニューロンの活動を電氣的に調べるという方法によって研究され、神経生理学の大きな成果となっている。しかし現状ではその成果を心理学の分野で問題にされる適応・学習などマクロな生体现象と関係づけるには大きなギャップがある。このような神経系の働きを明らかにするにはより巨視的なアプローチが必要であろう。巨視的アプローチとはニューロンの集まりを単位として神経系の構造を明らかにし、それらの個々の機能が神経系全体の働きへと統合される仕組みを明らかにすることである。本章では中枢神経系を脳系と脳幹脊髄系に大別し、巨視的な観点から反射の考えにもとづいて運動中枢神経系の統合作用について概観した。この運動中枢神経系の統合作用と適応・学習の現象とを生理・心理学的解釈をふまえて照合すれば次のように説明づけられるであろう。まず適応とは脳において保持されている合目的な行動が再生する現象、学習とは適応に至る時間的な過程と定義づける。この定義づけによって適応の現象は反射にもとづく中枢神経系の統合作用によると規定され、一方、学習の現象は中枢神経系の特定の部位の可塑的な変化としてとらえることができるであろう。学習における変化の本質は何かという問題については本章で述べたが、変化の本質は何であれ、脳内のどこで生ずるのかという問題、換言すれば学習の座の問題には本文では触れなかった。学習の座の問題は脳の破壊実験によって、また最近では脳の各部の活動状況を電氣的に記録する方法によっても研究されている。現在のところ a) 大脳皮質における皮質間の一時的な結合、b) 網様体賦活系による皮質の選択的な賦活作用、c) 辺縁系の強化による大脳皮質での情報の保持などの説がある。いずれにせよ学習には多くの種類があり、それらのいろいろな側面が脳の各部位の働きと関係しているので問題は非常に複雑である。学習の神経機構の解明にはやはり神経系の変化の本質と学習の座の同定の二つのアプローチがうまく噛み合うことが必要である。しかし現状では

まだその段階には至っておらず、表面的な生体现象をとらえ数学的な学習理論によって説明づけが試みられているに過ぎない。

第 2 章 の 参 考 文 献

- 1) 塚原仲晃：神経性制御，システムと制御，Vol. 16，No. 6，pp. 434-440（昭47）
- 2) 人間工学ハンドブック編集委員会編：人間工学ハンドブック，Ⅵインプットチャンネル，pp. 225-246，金原出版（昭41）
- 3) 江橋節郎：筋収縮の制御，科学，Vol. 50，No. 1，pp. 2-14（昭55）
- 4) 大島知一：随意運動の発現機構，科学，Vol. 47，No. 4，pp. 237-243（昭52）
- 5) 伊藤・島津編：高次脳機能と中枢プログラミング，現代の神経科学3，産業図書（昭51）
- 6) 島村宗夫：運動の反射生理学－その基礎と臨床的応用－，真興交易医書出版部（昭51）
- 7) 鈴木寿夫：行動とニューロン活動－生理学的立場から－，科学，Vol. 47，No. 4，pp. 219-225（昭52）
- 8) 二木宏明：学習と記憶－そのメカニズム－，数理科学，Vol. 6，No. 3，pp. 20-24（昭43）
- 9) 塚原仲晃：学習の神経機構－シナプス結合の可塑性－，科学，Vol. 46，No. 6，pp. 357-363（昭51）
- 10) 今村護郎：行動と脳－その生理学と心理学－，科学，Vol. 47，No. 4，pp. 194-197（昭52）
- 11) 藤井・田口：学習のアルゴリズムと制御系，システムと制御，Vol. 16，No. 1，pp. 25-33（昭47）
- 12) 波多野・依田・重松監修：学習心理学ハンドブック，pp. 10-33，金子書房（昭44）
- 13) 梅岡・大山：学習心理学，pp. 183-236，誠信書房（昭42）

第 3 章 腕運動制御における脳機能

3-1 緒 言

人間は視覚情報や生体内部の運動情報など体性感覚情報を脳において統御し、適切な運動指令を効果器に与えることで合目的な運動を行なっている。このような脳を含めた中枢系の働きを解明するには中枢系の神経機構とその機構に由来する統御機能を把握することが必要である。幸い、近年中枢各部位の神経回路とその線維連絡についてはかなりの程度まで解析が行なえるようになった。しかし中枢の体制と機能とは、技術や工学の分野での自動制御のメカニズムと対比させて考えられており、神経系の疾患は自動制御系の故障とさえみなされるに至った。このような背景のもとに本章では、制御工学的な見地から腕運動における中枢の統御機能を論じる。すなわち視覚情報によって感覚系に与えられる入力運動系に切り換えられて、手先の位置ぎめを行なうとき中枢で起る一連の過程を考察しそのモデル化を試みる。ここで“運動指令の発現機序”の座を脳系とみて、腕運動を脳反射を含む中枢の各部位での“反射”の協調的な組合せ過程（統合作用）による運動と定義づける。この定義により視覚情報を得て腕運動制御を行なう場合の制御情報処理過程は 2-2 で述べた中枢系の巨視的機構をもとに次のようにして形成されると考えられる。

視覚信号はまず網膜上に投影され、外側膝状体を経て大脳皮質視覚受容野（17野）に伝達される。さらにこの視覚情報は外部環境因子として大脳皮質に伝達され蓄えられる。脳系においては脳皮質から外部環境情報を引き出し、適切な運動指令があたかも脳での反射（brain reflex）の形で形成され、最終的には前頭葉にある運動野（4野）、運動前野（6野）から末梢系へと指令が伝達される。この運動指令は錐体路・錐体外路を下行し、脊髄反射を制御する。その結果は錐体外路を上行し、小脳において下行路の信号とつきあわされて再び下行路の信号が調整される。最後に下行路の信号によって制御目的に合致した関節の屈伸運動が生じ、手先の位置制御が達成される。

この中枢系の巨視的な機構を念頭におき、3-2 では前腕運動制御系、3-3 では上肢運動制御系について視覚誘導による運動特性を周波数領域で計測する。つぎにこれらの周波数応答特性を比較的広い帯域にわたって説明付けができ、しかも先の中枢系の巨視的機構をも満足するモデルを構成する。ただし上肢運動制

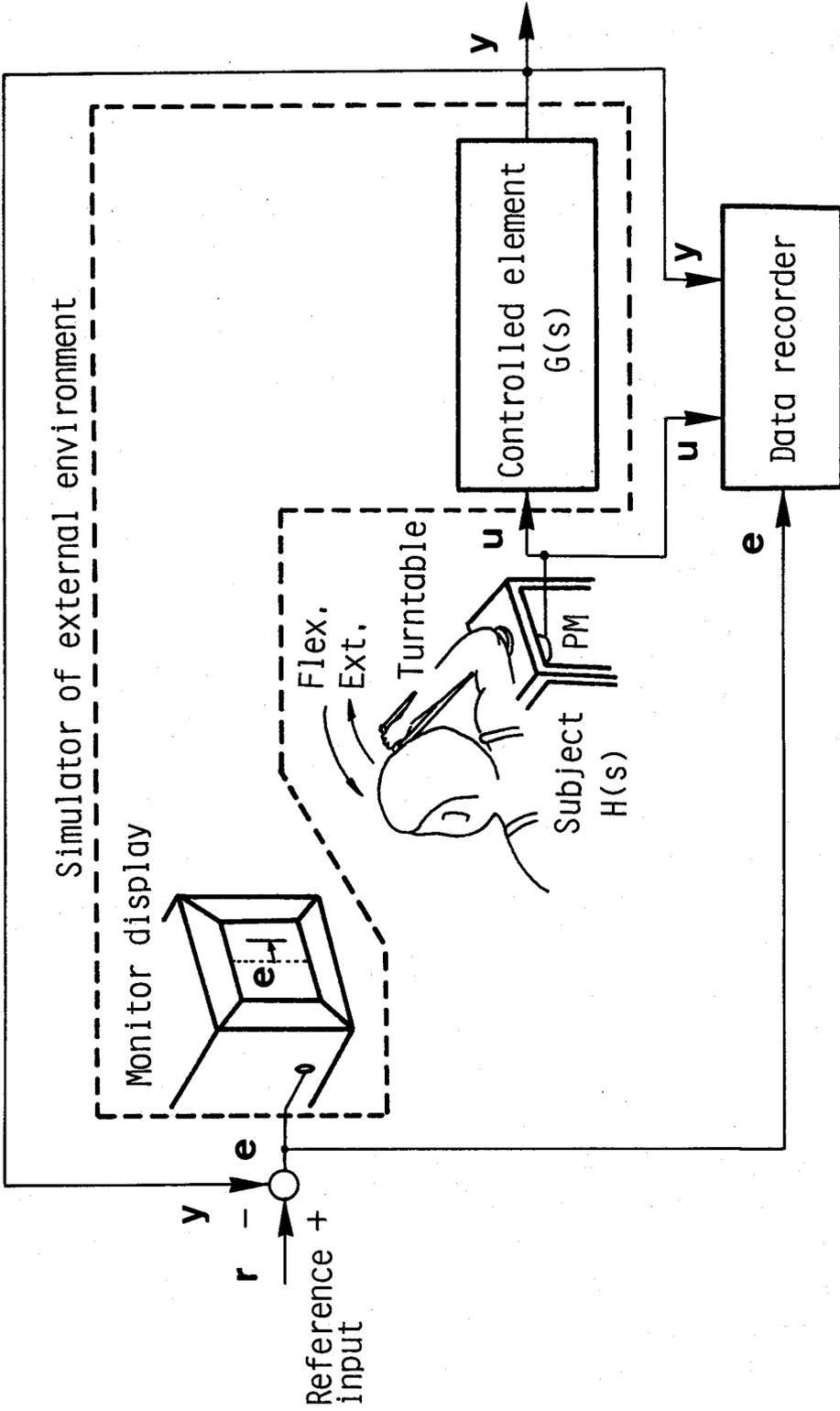
御の場合には空間的な手先の位置や運動方向を知るという空間知覚の機能表現にも留意する。このようにして構成されるモデルを本章では中枢機能モデルと呼ぶ。提案モデルは外部環境に対する生体内部の制御情報処理機構および機能を表わし、中枢神経系における上位中枢、すなわち主に脳系の働きを表現している。またモデルの各構成要素はそれぞれ伝達関数によって表現されており、これらの構成要素の機能と巨視的にみた中枢系の各構成要素の働きとを対応づけることができ、モデルを通して中枢制御の仕組みを概観できる。

3-2 前腕運動制御における脳機能

3-2-1 前腕運動特性の計測

中枢神経系の統御機能を知るには、外部環境系のダイナミクスが筋骨格系の運動特性にどのように影響を及ぼすかを調べるアプローチが有効であろう。そこで本節では筋骨格系の運動として肘関節まわりの拮抗筋群による前腕の屈伸運動に着目した実験を行なう。¹⁾

計測システムの構成を第3・1図に示す。計測システムは椅子、回転台座および外部環境系のシミュレータからなる。台座には回転角度が検出できるようポテンシオメータ(PM)が取り付けられている。操作感度は0.1[volt/deg]である。外部環境シミュレータは11インチ型モニタスコープ、制御対象(アナログ計算機で模擬)および目標信号発生装置で構成されている。モニタスコープの表示感度は1.5[cm/volt]である。制御対象の伝達特性 $G(j\omega)$ が1の場合、実験システム全体のサーキットゲインは1.5cm(ブラウン管面上の位置偏差)/10deg(台座の回転角度)となる。目標信号 $r(t)$ としては0.15~13[rad/s]の帯域で10種類の周波数を選び、これらの周波数成分からなる複合正弦波を用いる。実験に先立ち、 $r(t)$ をデータレコーダに記録しておき必要に応じてその都度データレコーダより再生させる。実験では $r(t)$ と制御対象の出力 $y(t)$ との制御偏差 $e(t)$ をブラウン管面上に垂直な輝線の水平位置で示し、被験者には肘関節角度を変えて常に輝線を基準位置に保持させる。目標信号 $r(t)$ 、対象出力 $y(t)$ などの時間応答をデータレコーダに記録し、これらのデータから一巡伝達系の周波数特性 $\phi_c(j\omega)/\phi_o(j\omega)$ を求める。データは $r(t)$ 、 $y(t)$ の観測時間 $[0, T]$ における打ち切り波形しか得られない。そこで次のRunning Computationによるスペクトル解析²⁾を行なえば



第 3・1 図 前腕運動の計測システム

$$\phi_r(j\omega) = \int_0^T r(t) \cdot W(T-t) e^{-j\omega t} dt \quad (3 \cdot 1)$$

$$\phi_y(j\omega) = \int_0^T y(t) \cdot W(T-t) e^{-j\omega t} dt \quad (3 \cdot 2)$$

$$\phi_{rr}(\omega) = |\phi_r(j\omega)|^2 / T \quad (3 \cdot 3)$$

$$\phi_{ry}(j\omega) = \phi_r(-j\omega) \phi_y(j\omega) / T \quad (3 \cdot 4)$$

$$\frac{\phi_y(j\omega)}{\phi_e(j\omega)} = \frac{\phi_{ry}(j\omega) / \phi_{rr}(\omega)}{1 - \phi_{ry}(j\omega) / \phi_{rr}(\omega)} \quad (3 \cdot 5)$$

となる。ただし $\phi_r(j\omega)$ 、 $\phi_y(j\omega)$ はそれぞれ $r(t)$ 、 $y(t)$ の打切り波形に対するフーリエ変換（複素スペクトル）を表わす。 $\phi_e(j\omega)$ は $e(t)$ のフーリエ変換である。 $W(t)$ に関しては本論文では

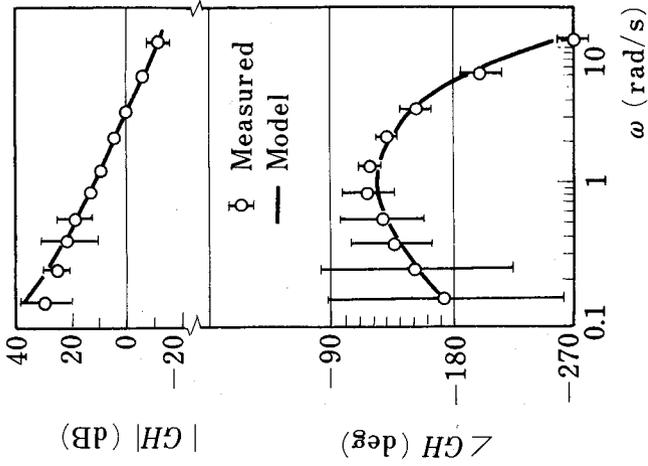
$$W(t) = (t/T_1) e^{-t/T_1} \quad (\text{ただし } T_1 : 40 \text{ s}) \quad (3 \cdot 6)$$

を用いた。(3・5)式によってデータ処理（データサンプリング間隔 40 ms、データ総数 2,250 個）を行ない、第 3・2 図の計測結果 $\phi_y(j\omega)/\phi_e(j\omega)$ 、すなわち $G(j\omega)H(j\omega)$ [$G(j\omega)$, $H(j\omega)$: 制御対象および人間の周波数応答] を得た。第 3・2 図(a), (b)および(c)は、それぞれ $G(j\omega)$ が 1 , $2/(1+j\omega)$ および $2/j\omega$ の場合に対する結果である。これらのデータは 5 人の被験者による各々 2 回ずつの試行、計 10 試行の平均応答であり、平均と標準偏差を $\bar{\phi}$ 印で示す。

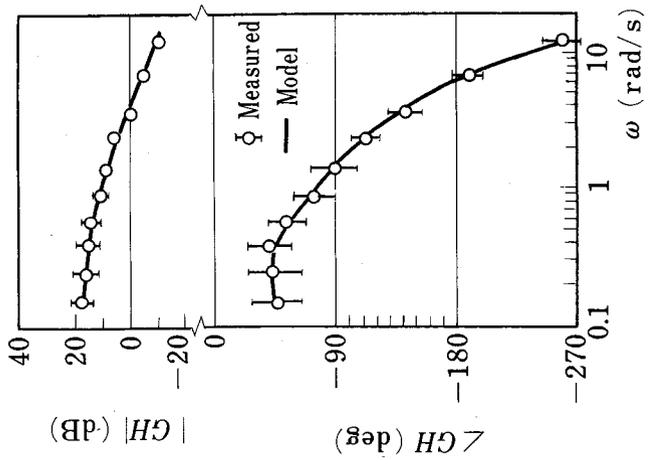
3-2-2 前腕運動制御における中枢モデル

第 3・2 図に示す一巡伝達系の周波数応答 GH をもとにして人間の中枢機能モデルを作成する。まず計測された周波数帯域を 1 [rad/s] を境に低域と高域とに区分する。各帯域での人間の伝達特性の特徴は次のとおりである。

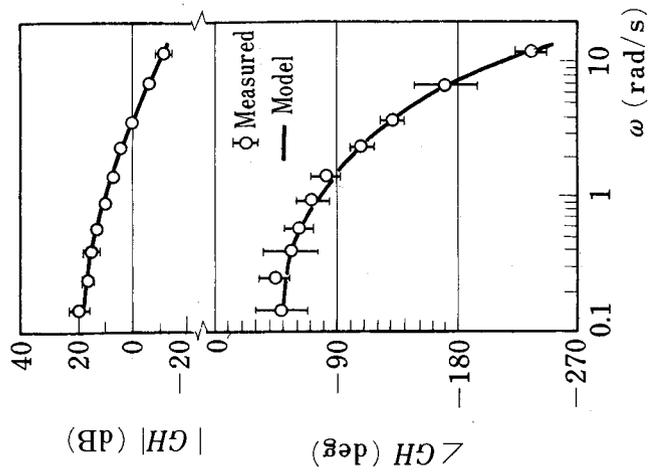
(1) 低域特性 計測した一巡伝達特性によれば、 0.1 [rad/s] の近傍では一般に制御対象の特性にかかわらず高ゲインで位相遅れの傾向が現れる。 $0.2 \sim 0.3$ [rad/s] 程度の範囲を見ると、周波数が高くなるにつれてゲインは減少し、位相遅れは解消される傾向がみられる。また 1 [rad/s] の周波数近傍においては制御対象の特性がそのまま現れる傾向が強い。以上のことから人間の低域における伝達特性は P I 制御動作であるとみなす。⁸⁾



(c) $G(S) = \frac{2}{S}$



(b) $G(S) = \frac{2}{1+S}$



(a) $G(S) = 1$

第3・2図 一巡伝達特性GHの周波数応答と中極機能モデルによるシミュレーション

(2) 高域特性 高域での一巡伝達特性は制御対象の特性によらず

$$GH \simeq \omega_c e^{-j\omega L} / j\omega \quad (3 \cdot 7)$$

となる。この法則性は D.T. McRuer らによって見いだされた。⁴⁾ (3・7)式はクロスオーバー周波数 ω_c の近傍で成り立つとしている。クロスオーバー周波数とは一巡伝達系のゲイン特性が零 dB ラインを横切る周波数である。

このような低域、高域での特徴をもとにすれば第 3・3 図(a)の構成過程を経て、計測した周波数帯域全般 (0.1~10 [rad/s]) にわたる人間の伝達特性は第 3・3 図(b)に示すモデルにより表現できる。⁵⁾ モデルの伝達関数は帯域 0.1~10 [rad/s] において $K \gg 1$ とすることで

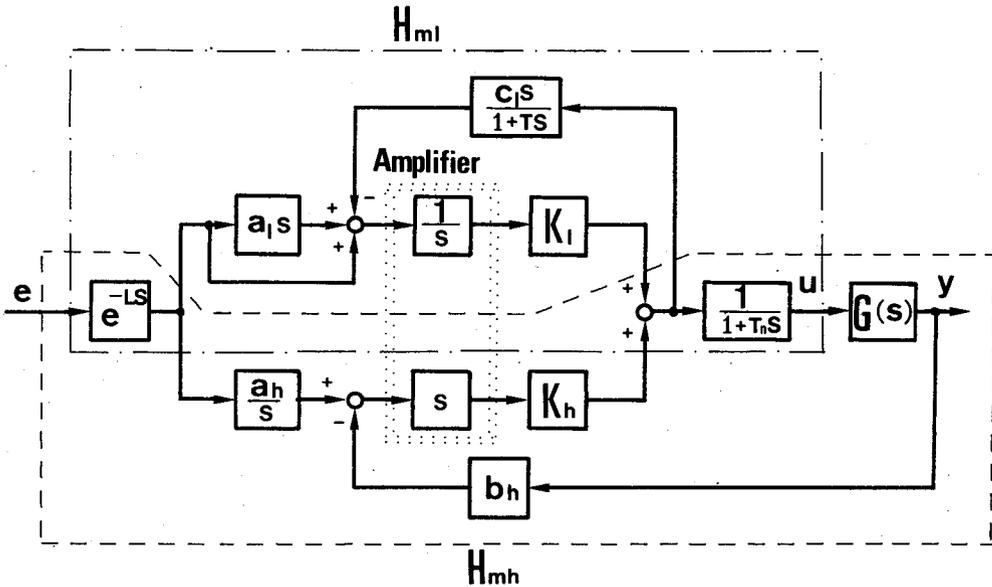
$$\begin{aligned} H_m(j\omega) &= U(j\omega) / E(j\omega) \\ &= \frac{(1+j\omega a)(1+j\omega T) e^{-j\omega L}}{j\omega [c(1+j\omega T_n) + j\omega b G(j\omega)(1+j\omega T)]} \end{aligned} \quad (3 \cdot 8)$$

で記述できる。

3-2-3 モデル構造と中枢構造との対比

第 3・3 図に示すモデルの各構成要素と第 2・2 図に示す中枢神経系の各部位の機能とを対比させる。まず次の前提をおく。

- (1) 中枢神経系の働きを脳系と脳幹・脊髄系とに分けて考える。
- (2) 小脳・大脳連関を脳系における重要なフィードバック機序として取り上げる。この小脳・大脳連関の機能的意義は小脳が脳幹・脊髄および筋骨格系のシミュレータ機能をもっていることで、これらの系の運動を監視しかつ外部環境に適合した運動指令の発生を容易にしていると考ええる。
- (3) 脳幹・脊髄系は脳系から運動指令を受け、この指令を内部環境に照らして筋骨格系の運動として実現するためのサーボメカニズムである。
- (4) 運動の形態により多少の違いはあるが、訓練の度合によって運動に関与する生体内部機構が異なる。訓練初期では主に脳系支配による運動が発生し、習熟とともに下位レベルの脳幹・脊髄系支配によるものへと移行するいわゆるサブルーチン化が起るとみられている。サブルーチン化の現象を説明するために、脳系と脳幹・脊髄系とは機能的に等価であると考ええる。
- (5) モデルの高ゲイン要素 K を生体内部の拮抗作用を表わすリレー要素で置き換える。リレー要素は入力小さければ記述関数法により高ゲイン要素となる。⁶⁾

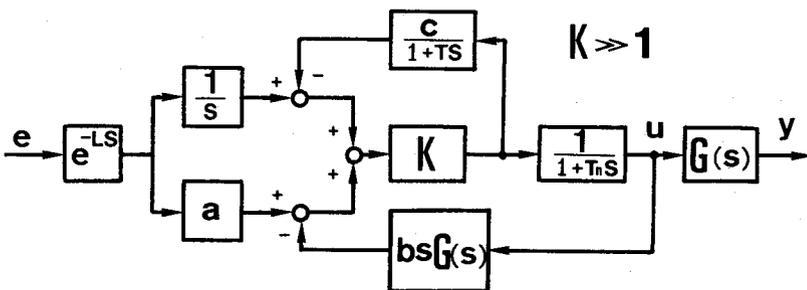


e^{-Ls} : Reaction time delay

$G(s)$: External environment dynamics

$1/(1+T_h s)$: Dynamics of brainstem-spinal
and muscle-skeletal systems

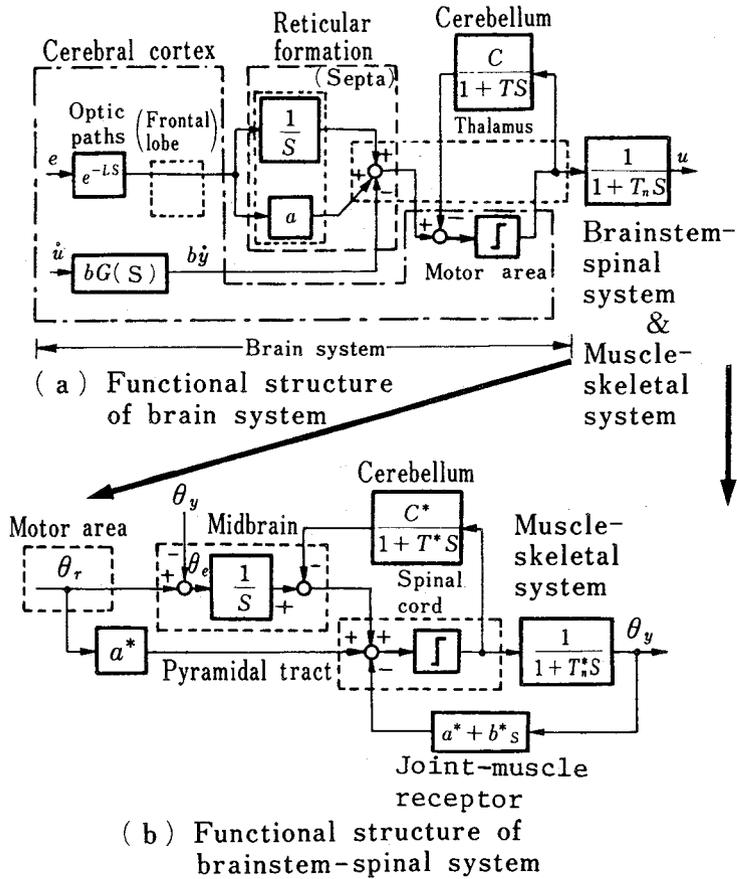
(a) Combination of low-frequency submodel H_{ml}
and high-frequency submodel H_{mh}



(b) Simplified form of H_m

本論文で記述したモデルの機能構造は制御対象の特性いわば外部環境因子との
 かかわりから得たものであり、前提(1)、(2)に従えばモデルの機能構造から脳系の
 機能構造を同定できる。結果を第3・4図(a)に示す。さらに前提(4)にしたがえば、
 モデルは脳幹・脊髄系の機能構造の同定にも役立つ。脳幹・脊髄系は主に生体内
 部の体性感覚情報に基づいて機能していることを考慮して、外部特性の認知をと
 く必要としない $G(j\omega)$ が1でのモデル機能構造から脳幹・脊髄系の機能構造
 を推定した。結果を第3・4図(b)に示す。(a)図から(b)図への矢印は(b)図のマク
 ロな特性が(a)図の $1/(1+j\omega T_n)$ に相当することを示す。以下に第3・4図(a)、(b)
 の構成に当たっての論拠を示す。

(A) 脳系の機能構造 (第3・4図(a)参照)



第3・4図 中枢機能構造の同定

- (a) 外部環境とかかわりのない状態で発生した手先の運動には 20 [rad/s] まで減衰が認められないことから、前提(3)にしたがい脳幹・脊髄-筋骨格系のマクロな伝達特性を $1/(1+j\omega T_n)$ ($T_n=0.05$) と定めた。
- (b) 大脳皮質にいったん蓄えられた外部環境情報の辺縁系への取り込みは主に前頭皮質-中隔部および側頭皮質-海馬・中隔部間での多シナプス性の線維連絡を経ている。ここで情報の取捨選択が行なわれているものと考えられている。⁷⁾ この部位での可塑性をモデルではパラメータ a , b で表現した。
- (c) 前提(2)に基づき小脳は脳系においてフィードバック要素的な役割を果たしているとする。また小脳には身体内外のパラメータの変化に適応して反射系の動特性を修正する働きがあるとされている。そこで小脳をゲイン調節可能なフィードバック要素 $C/(1+j\omega T)$ とみなした。
- (d) 中隔部は網様体の一部であり、網様体には不完全積分機能があるとみられていることから、中隔部の機能を比例・積分特性 $a+1/j\omega$ とした。
- (e) 大脳皮質運動野の近接した二つの部位で、脊髄節での関節の屈伸と同様、拮抗的に応答するニューロン活動が観察されており、⁸⁾ この現象を前提(5)によってリレー要素で表現した。

(B) 脳幹・脊髄系の機能構造 (第3・4図(b)参照)

- (a) 外界の状況との結びつきのない運動を表現する場合、第3・3図で $G(j\omega)$ を1とおけばよい。こうして脳幹・脊髄系は $1/(1+j\omega T_n^*)$ で表わされる筋骨格系⁹⁾ を制御対象とするコントローラとなる。
- (b) 腕の位置感覚や力感覚は皮膚や筋・関節の受容器によって得られる。とくに筋紡錘は筋長および筋長の微分値を脊髄にフィードバックする機能を持つ部位であるといわれている。そこで筋紡錘の作用から推して、位置感覚機能をフィードバック要素 $a^*+j\omega b^*$ として表現した。¹⁰⁾ a^* , b^* は r 系支配によって変化するパラメータとなる。
- (c) 脊髄での相反性神経支配をリレー要素で模擬した。
- (d) 小脳は脊髄から筋骨格系へ与えられる指令のコピーを入力とし、その出力は錐体外路系の働きを抑制するとみられている。¹¹⁾ そこで小脳は筋骨格系のシミュレータ機能をもつとみて $C^*/(1+j\omega T^*)$ で表現した。
- (e) 中脳網様体では末梢からの感覚情報を感覚皮質から送られてくる解釈と比較するだけでなく、小脳核からの信号を受け、その出力は赤核脊髄路を構成し、皮質脊髄路(錐体路)と共に脊髄反射を制御している。これらの神経連絡をモデル

で模擬した。

以上の脳系および脳幹・脊髄系の機能構造の考察を総合すれば次のようにいえる。すなわち中枢系においては筋骨格系の運動が脳幹・脊髄系で制御され、さらにこの機能体系が脳系で統御されている。この階層構造の存在によってあたかも脳系が直接筋骨格系の運動を支配しているようにみえるのであろう。

3-2-4 前腕運動特性のシミュレーション

(3・8)式の表現によるモデルが人間の周波数応答をどの程度模擬できるのかを最小二乗推定法によって調べ、モデルの妥当性を検証する。時間領域における人間とモデルの応答の一致度は、パーセバルの定理を用いて周波数領域における一致度に変換することができる。すなわち、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{h_d(t) - h_m(t)\}^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H_d(j\omega) - H_m(j\omega)|^2 d\omega \quad (3 \cdot 9)$$

ただし、 $H_d(j\omega)$: 人間の周波数応答

$H_m(j\omega)$: モデルの周波数応答

h_d, h_m : H_d, H_m のインパルス応答

(3・9)式の右辺から人間とモデルとの周波数応答の一致度は評価関数

$$\hat{Q}_0 \triangleq \sum_{i=0}^{\tilde{p}-1} |H_d(j\omega_{i+1}) - H_m(j\omega_{i+1})|^2 \Delta\omega_i \quad (3 \cdot 10)$$

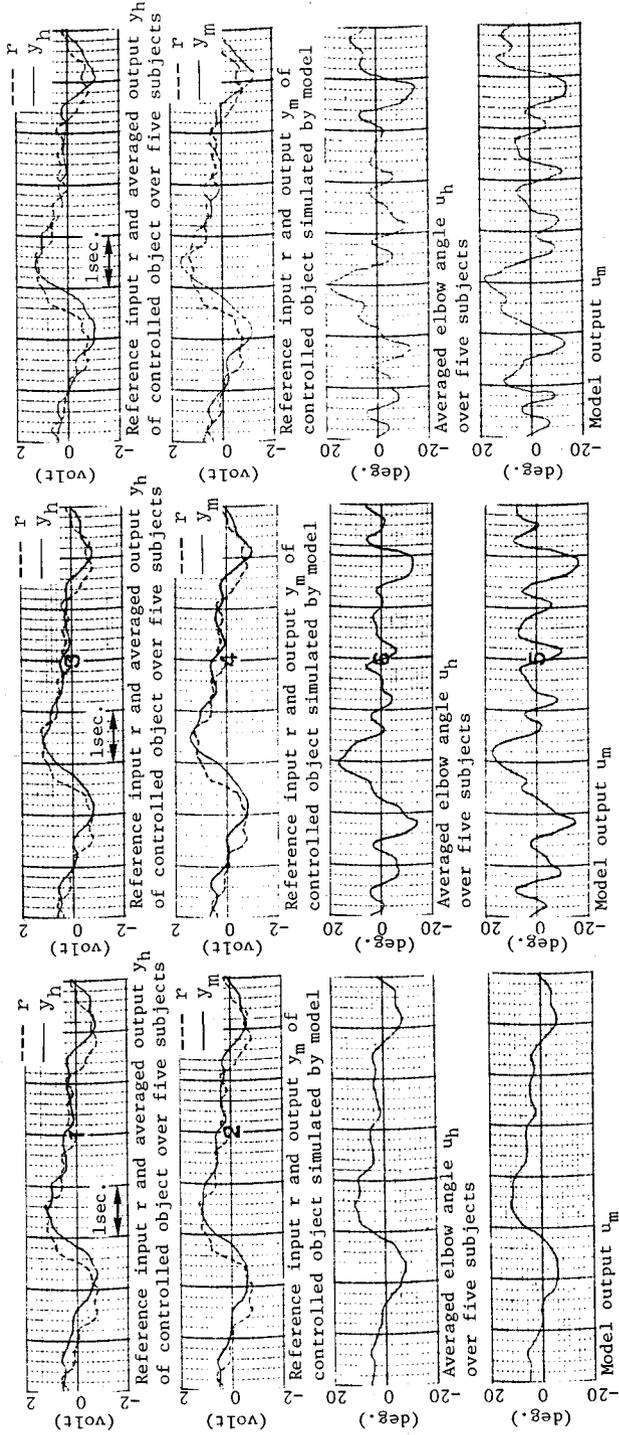
ただし、 \tilde{p} : 周波数応答の測定点数

$$\Delta\omega_i = \omega_{i+1} - \omega_i \quad (\omega_i < \omega_{i+1})$$

で表現できる。¹²⁾ここで周波数応答の測定点が等間隔でないことから、経験的に式(10)に加重 $1/\omega_i^3$ を付加し、測定周波数帯域での人間とモデルとの応答特性の適合度の改善をはかった。すなわち評価を次のように改めた。

$$\hat{Q} \triangleq \sum_{i=0}^{\tilde{p}-1} |H_d(j\omega_{i+1}) - H_m(j\omega_{i+1})|^2 \Delta\omega_i / \omega_i^3 \quad (3 \cdot 11)$$

パラメータ推定は(3・11)式の $H_d(j\omega_i)$ に測定データをあてはめ、各パラメータに関して \hat{Q} を最小化することで得られる。このようにして求めたモデルのパラメータ値を第3・1表に示す。ただしモデルのパラメータのうち T, T_n は 0.05 s に定めた。第3・1表の結果に対する周波数応答の一部が第3・2図の実線で示されている。時間応答については第3・5図(a),(b),(c)に $G(j\omega)$ が $1, 2/(1+j\omega), 2/j\omega$ の場合に対する人間の応答とモデル応答との比較を示す。



(c) $G(s) = \frac{2}{s}$

(b) $G(s) = \frac{2}{1+s}$

(a) $G(s) = 1$

第3・5図 時間領域における応答特性の比較
 (表示感度: 1.5 cm/volt)
 (サーキットゲイン: 1.5 cm/10 deg)

第3・1表 モデルパラメータの推定値

$G(s)$	a	b	c	$L[s]$	$\hat{Q}(\times 10^{-2})$
1	10.2	2.90	1.58	0.20	0.55
3	6.80	1.46	3.23	0.14	0.91
-1	11.7	3.47	-1.26	0.16	0.45
$\frac{2}{1+s}$	11.5	0.86	3.57	0.24	0.20
$\frac{2}{s}$	2.58	0.64	0.08	0.24	1.85
$\frac{-2}{1-0.5s}$	13.7	0.48	8.64	0.19	21.9
$\frac{8}{s(1+s)}$	3.06	0.95	-0.18	0.33	3.37
$\frac{8}{(1+s)^2}$	-1.75	-0.58	0.34	0.42	3.54

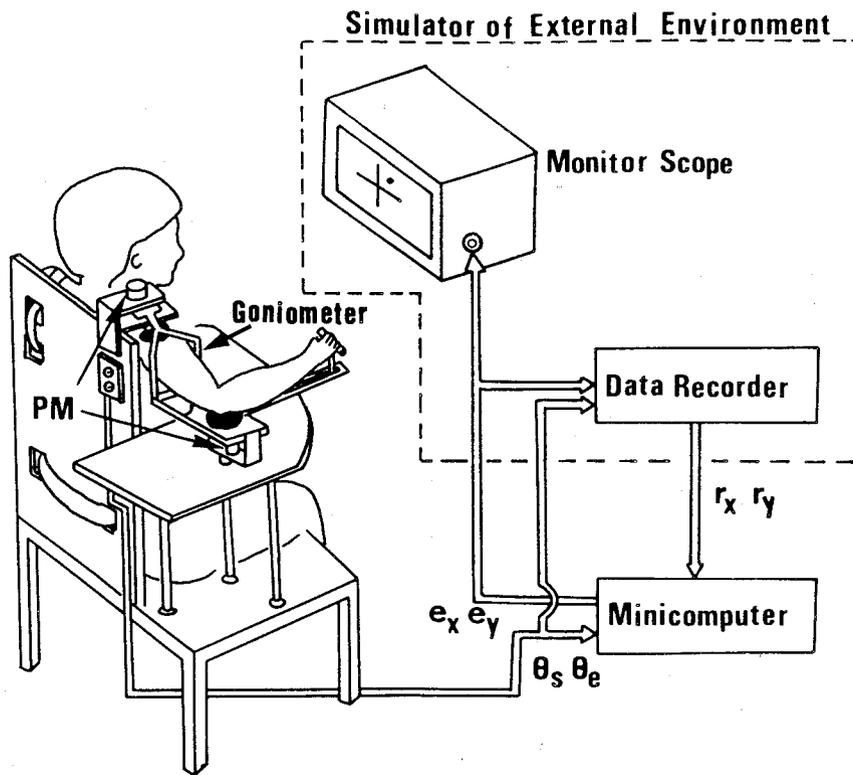
3-3 上肢運動制御における脳機能

3-3-1 上肢運動特性の計測

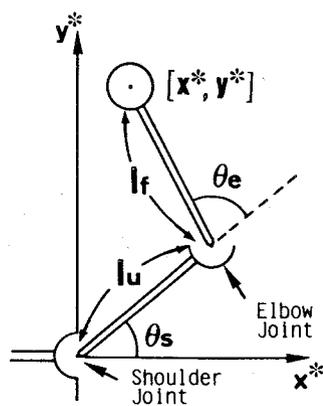
視覚入力による上肢2関節水平運動の時間特性および周波数特性を計測する。第3・6図に計測システムを示す。図中の上肢運動測定用ゴニオメータを使用すれば手先の位置を実時間で連続的に計測できる。ゴニオメータは2リンク機構からなっており、上肢の水平運動にともない、ゴニオメータの肘関節にあたる部分がテーブル面上をスライドする。このように上肢運動を水平面内での運動に限定したうえで、運動時の肩関節角度 θ_s 、肘関節角度 θ_e とをポテンシオメータ (PM) で検出する (mechanogram)。さらに第3・7図に示すように肩峰の位置を原点とし、左右-奥行方向からなる $x^* - y^*$ 直角座標系を考える。この直角座標系での手先の位置を θ_s, θ_e を用いて実時間で座標計算機 (ミニコンピュータ) により算出する。前腕の長さを l_f 、上腕の長さを l_u とすれば手先位置 (x^*, y^*) は

$$x^* = l_u \cos \theta_s + l_f \cos (\theta_s + \theta_e) \quad (3 \cdot 12)$$

$$y^* = l_u \sin \theta_s + l_f \sin (\theta_s + \theta_e) \quad (3 \cdot 13)$$



第 3・6 図 上肢水平運動の計測システム



第 3・7 図 ゴニオメータの座標系

となる。本実験では手先位置座標系をつぎの写像関係によってモニタスコープ管面上での座標系に移す。

$$x = \alpha (x^* - \delta_1) \quad (3 \cdot 14)$$

$$y = \alpha (y^* - \delta_2) \quad (3 \cdot 15)$$

ただし、 $\alpha = 5/16$ 、 $\delta_1 = -2.1 \text{ cm}$ 、 $\delta_2 = 45.5 \text{ cm}$

モニタスコープ管面座標系で水平-垂直方向の目標位置 (r_x, r_y) を与え、目標の動きを上肢水平運動により追従させる。 r_x, r_y は $0.15 \sim 15 \text{ [rad/s]}$ の範囲内でそれぞれ 10 種類の異なる周波数成分からなる複合正弦波とし、あらかじめデータレコーダに記録しておく。

実験に先立って被験者の上肢寸法に応じ、ゴニオメータのリンク長、前後位置およびスライド用テーブルの高さを調整しておく。実験ではモニタスコープ管面上に輝点で水平面内での目標位置 (r_x, r_y) とスコープ管面上に写像された手先位置 (x, y) との偏位 (e_x, e_y) が表示される。目標信号はデータレコーダより出力される。手先位置の操作感度は $1/16 \text{ [volt/cm]}$ 、表示感度は 5 [cm/volt] である。被験者には上腕の水平屈曲・水平伸展と前腕の屈曲・伸展とからなる上肢運動によって偏位 (e_x, e_y) を零の位置に保持するように指示し、90 秒間制御させる。被験者が充分操作に習熟したのちに、手先位置 x^*, y^* 、偏位 e_x, e_y 、関節角度 θ_s, θ_e の各時間応答をデータレコーダに記録する。

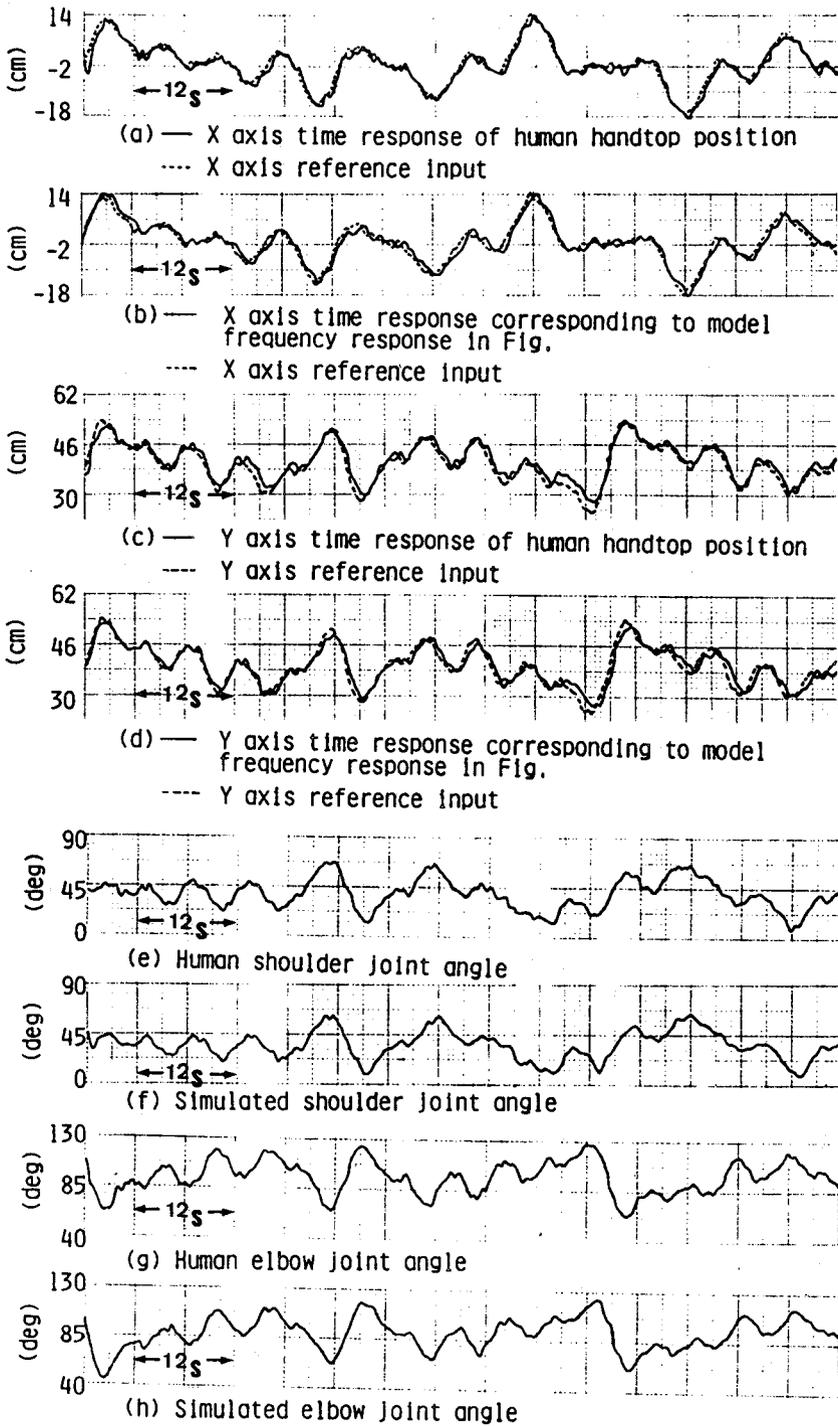
第 3・8 図に 5 人の成人男子による 2 回ずつの試行、計 10 試行の時間領域における平均応答を示す。(a), (c), (e), (g) の各図はそれぞれ手先の位置 x^*, y^* 、関節角度 θ_s, θ_e の平均応答である。視覚入力による上肢運動制御実験で得た時間応答は十分に習熟した人間のデータであるから定常確率過程とみることができ、時間応答から周波数応答が推定できる。周波数応答を次の手順で推定する。¹³⁾

ここで取り扱っている視覚-上肢運動系は e_x, e_y を入力に、 x, y を出力とする系であるから 2 入力 2 出力系となる。一般に 2 入力 2 出力系のブロック図は第 3・9 図で表現できる。 $x(t), y(t), e_x(t), e_y(t)$ の時間 $[0, T]$ における打ち切り波形に対するフーリエ変換をそれぞれ $X_T(j\omega), Y_T(j\omega), E_{x_T}(j\omega), E_{y_T}(j\omega)$ と定義すれば第 3・9 図のブロック線図は次式で表現できる。

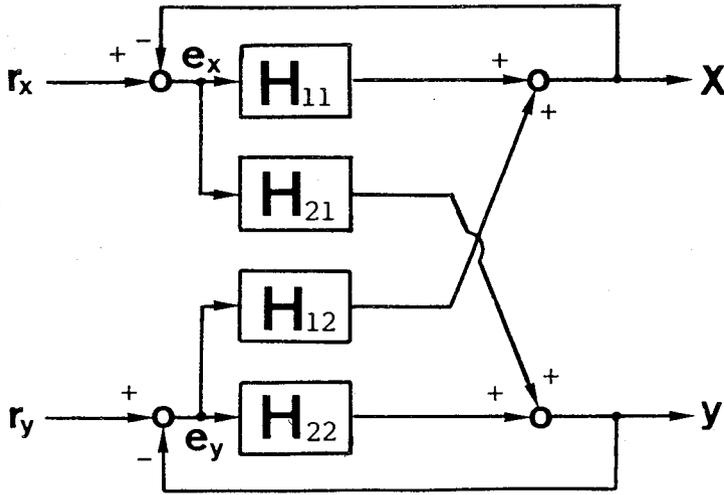
$$X_T(j\omega) = H_{11}(j\omega) E_{x_T}(j\omega) + H_{12}(j\omega) E_{y_T}(j\omega) \quad (3 \cdot 16)$$

$$Y_T(j\omega) = H_{21}(j\omega) E_{x_T}(j\omega) + H_{22}(j\omega) E_{y_T}(j\omega) \quad (3 \cdot 17)$$

r_x, r_y の周波数成分を ω_x, ω_y とし、相互スペクトル密度 S を用いて $H_{11} \sim H_{22}$ を記述すれば



第 3・8 図 時間領域における 5 人の平均応答と
 そのシミュレーション



第 3・9 図 2 入力 2 出力系のブロック線図

$$H_{11}(j\omega_x) = \frac{S_{r_x x}(j\omega_x) S_{r_y e_y}(j\tilde{\omega}_x) - S_{r_x e_y}(j\omega_x) S_{r_y x}(j\tilde{\omega}_x)}{S_{r_x e_x}(j\omega_x) S_{r_y e_y}(j\tilde{\omega}_x) - S_{r_x e_y}(j\omega_x) S_{r_y e_x}(j\tilde{\omega}_x)} \quad (3.18)$$

$$H_{12}(j\omega_y) = \frac{S_{r_y e_x}(j\omega_y) S_{r_x x}(j\tilde{\omega}_y) - S_{r_y x}(j\omega_y) S_{r_x e_x}(j\tilde{\omega}_y)}{S_{r_y e_x}(j\omega_y) S_{r_x e_y}(j\tilde{\omega}_y) - S_{r_y e_y}(j\omega_y) S_{r_x e_x}(j\tilde{\omega}_y)} \quad (3.19)$$

$$H_{21}(j\omega_x) = \frac{S_{r_x y}(j\omega_x) S_{r_y e_y}(j\tilde{\omega}_x) - S_{r_x e_y}(j\omega_x) S_{r_y y}(j\tilde{\omega}_x)}{S_{r_x e_x}(j\omega_x) S_{r_y e_y}(j\tilde{\omega}_x) - S_{r_x e_y}(j\omega_x) S_{r_y e_x}(j\tilde{\omega}_x)} \quad (3.20)$$

$$H_{22}(j\omega_y) = \frac{S_{r_y e_x}(j\omega_y) S_{r_x y}(j\tilde{\omega}_y) - S_{r_y y}(j\omega_y) S_{r_x e_x}(j\tilde{\omega}_y)}{S_{r_y e_x}(j\omega_y) S_{r_x e_y}(j\tilde{\omega}_y) - S_{r_y e_y}(j\omega_y) S_{r_x e_x}(j\tilde{\omega}_y)} \quad (3.21)$$

となる。ここで例えば $S_{r_x x}(j\omega_x)$ とは r_x, x との相互スペクトル密度を表わす。実験では $r_x - r_y$ 間の相互干渉をできる限り避ける意味で異なる周波数成分 ω_x, ω_y を用いた。しかしこの配慮は $H_{11} \sim H_{22}$ の計算において S の周波数成分が不揃いになるという結果を招く。そこで便宜上二つの隣り合った測定点間では ω に関して $|S(j\omega)|$ が線形であると仮定し、補間法を用いて任意の $\tilde{\omega}$ での $S(j\tilde{\omega})$ を推定することで $H_{11} \sim H_{22}$ の計算を行なう。¹⁴⁾ (3.18) 式～(3.21) 式は補間法を適用するという前提のうえに成り立つ。すなわち (3.18) 式～(3.21) 式において $S(j\tilde{\omega}_x)$ は $S(j\omega_y)$ に補間法を適用し、周波数 ω_x で得た相互スペク

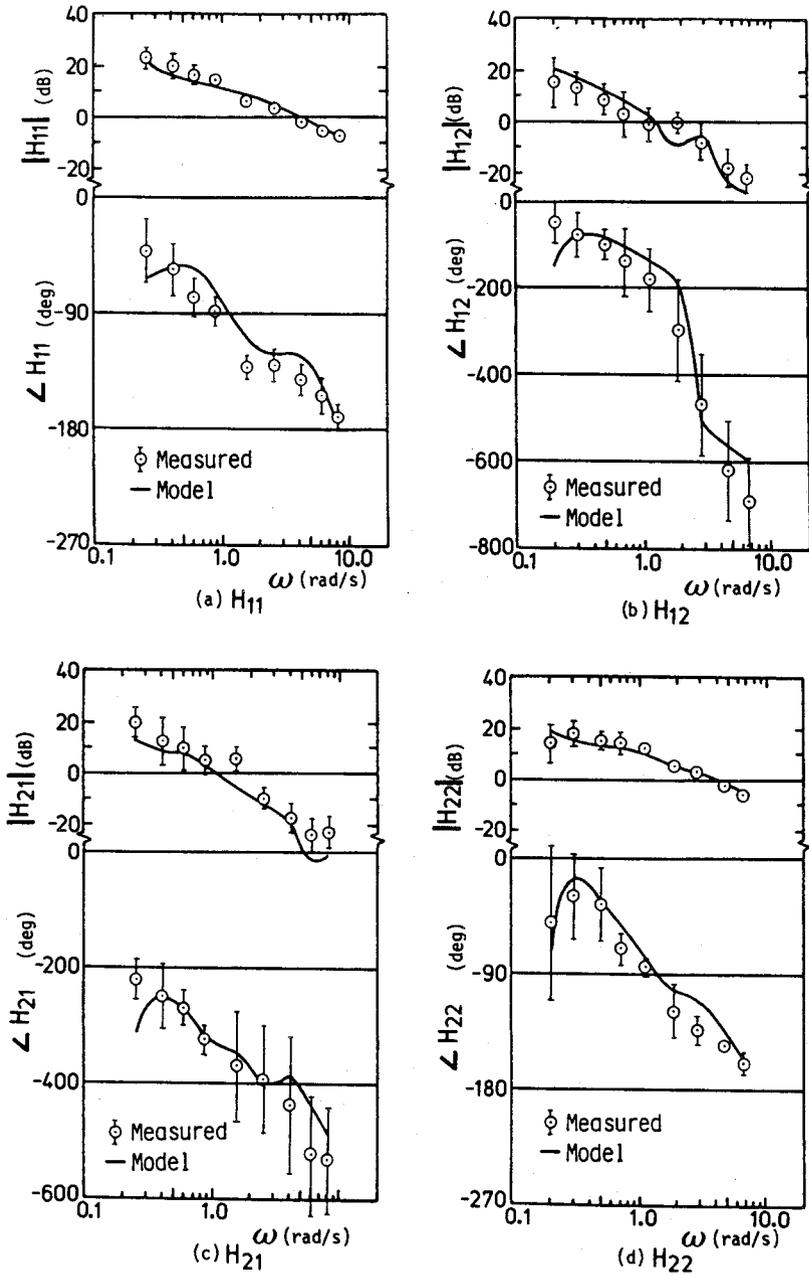
トル密度の推定値であり、一方 $S(j\tilde{\omega}_s)$ は $S(j\omega_s)$ に補間法を適用し、 ω_s で得た推定値である。ミニコンピュータを用いてアナログデータの処理（サンプル周期 40 ms、データ総数 2,250 個）を行ない、 $H_{11} \sim H_{22}$ のゲインおよび位相を 5 人の被験者ごとに算出した。

第 3・10 図に 5 人の被験者による周波数領域における平均応答を示す。

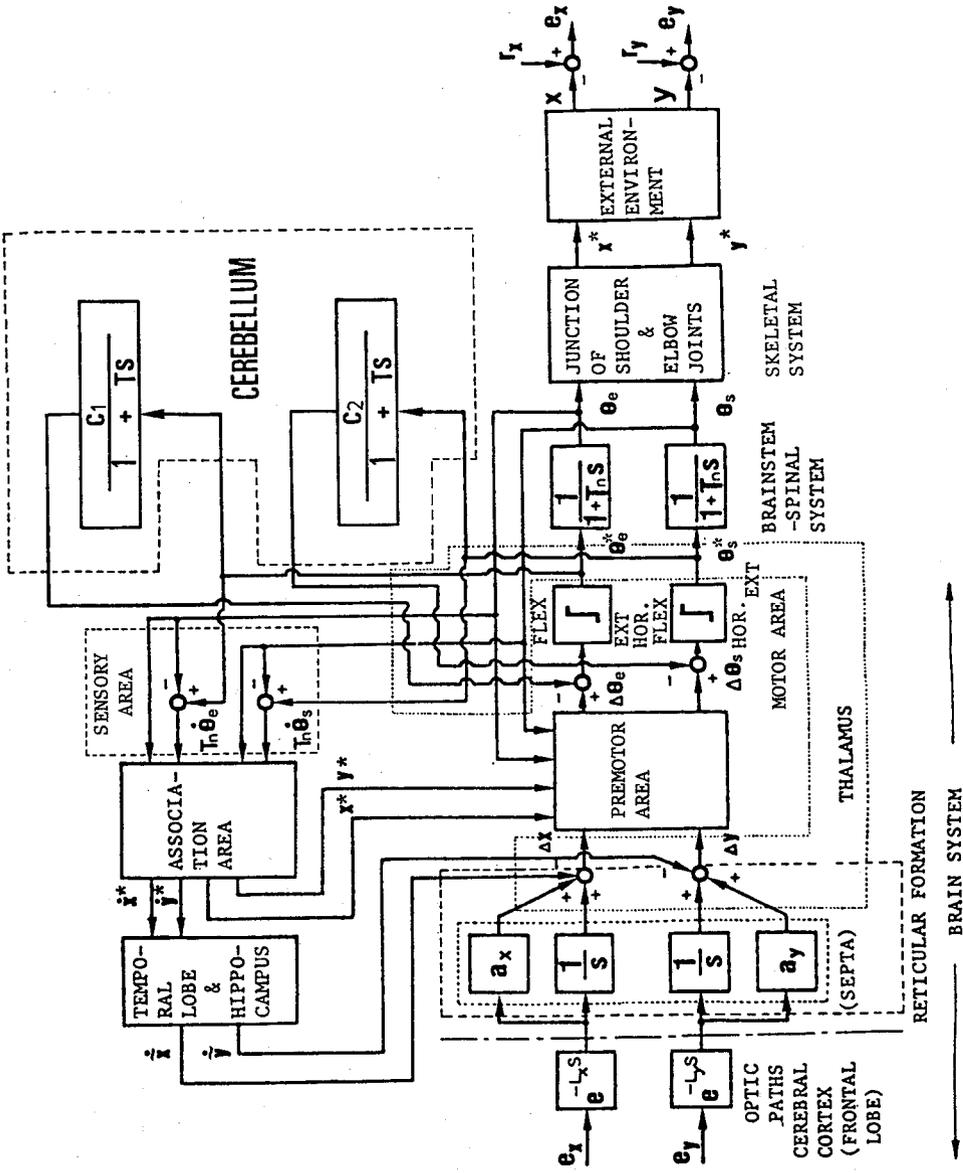
3-3-2 上肢運動制御における中枢モデル

3-2 では中枢の生理学的知見および前腕運動特性の両面からの考察をふまえたうえで前腕運動に関する中枢モデルについて記述した。ここでは上肢 2 関節水平運動における中枢機構とその働きが記述できるように先の中枢モデルを拡張した。第 3・11 図に空間知覚をも考慮した中枢モデルの機能構造を示す。この中枢モデルは第 2・2 図に示す運動中枢における信号の流れ図にもとづいて構成されており、全体構造は脳系 (brain system)、脳幹・脊髄系 (brainstem-spinal system)、骨格系 (junction of shoulder and elbow joints) 外部環境系 (external environment) からなる。また脳系は脳幹・脊髄系、筋骨格系および外部環境系からなる合成系を制御し、視覚入力に基づいて運動指令を出力する機能体系として描かれている。また脳幹・脊髄系は巨視的な観点から 1 次遅れ要素で表現した。このモデルの特長は連合皮質 (association area) には身体像形成にかかわる空間知覚機能があるとの生理学的な仮説を取り入れ、この空間知覚の機能を小脳の推尺機能と併せ脳系の主要な調節機能としてみなしていることである。第 3・11 図に示す中枢モデルの機能の詳細はつぎのとおりである。

- (a) 通常、外部環境座標系（ここではモニタスコープ管面上の座標系を指す）と手先位置座標系とは異なる。手先位置座標系 $x^* - y^*$ と外部環境座標系 $x - y$ との間には (3・14) 式、(3・15) 式の写像関係を設定した。
- (b) モニタスコープ上に表示された手先位置の偏位 e_x, e_y が網膜に投影され、一次視覚路、視覚受容野を経て前頭皮質に伝達される。これらの経路を通過し、信号を検知するのに要する時間を無駄時間要素 $e^{-j\omega L_x}, e^{-j\omega L_y}$ で表現した。
- (c) 網様体は網目構造をなし、この部位が不完全積分の機能の役割を果たしているとみられていることから、網様体の一部である中隔の機能を比例積分特性 $a_x + 1/j\omega, a_y + 1/j\omega$ で表現した。
- (d) 連合皮質では肩と肘の関節の特定の動きの組み合わせに反応する関節組合せニューロンが観察されている。このことから空間知覚の機能すなわち環境の中で周囲の空間的配置を知り、自己の位置や運動方向と対象の距離や動きを判断する



第 3 ・ 1 0 図 周波数領域における人間とモデルとの
応答特性の比較



第3・11図 空間知覚を考慮した中枢モデル

能力を有しているといわれている。^{15),16)} この知見に基づき連合野においてはフィードバックされた体性感覚情報 θ_e, θ_s が入力され、(3・22)式～(3・25)式に基づき手先の位置 x^*, y^* および手先の運動速度 \dot{x}^*, \dot{y}^* が出力されるとした。

$$x^* = l_e \cos \theta_e + l_f \cos (\theta_e + \theta_s) \quad (3 \cdot 22)$$

$$y^* = l_e \sin \theta_e + l_f \sin (\theta_e + \theta_s) \quad (3 \cdot 23)$$

$$\dot{x}^* = -l_f \dot{\theta}_e \sin (\theta_e + \theta_s) - y^* \dot{\theta}_s \quad (3 \cdot 24)$$

$$\dot{y}^* = l_f \dot{\theta}_e \cos (\theta_e + \theta_s) + x^* \dot{\theta}_s \quad (3 \cdot 25)$$

また外部環境で可感度 $\hat{\alpha}_x, \hat{\alpha}_y$ が学習により側頭葉・海馬系において記録され、(3・26)式および(3・27)式によって $x-y$ 座標系での運動速度の推定値 $\dot{\hat{x}}, \dot{\hat{y}}$ が出力されるとした。

$$\dot{\hat{x}} = \hat{\alpha}_x \dot{x}^* \quad (3 \cdot 26)$$

$$\dot{\hat{y}} = \hat{\alpha}_y \dot{y}^* \quad (3 \cdot 27)$$

(e) 運動前野は連合野などからの投射を受け、運動野の体性感覚情報の取り込み方を制御する前処理機構とみられている。そこで脳幹網様体(中隔部)において修飾を受けた視覚情報(第3・11図で $\Delta x, \Delta y$ と表記)や関節角度の情報が入力され、(3・29)式、(3・30)式によって異質な関節角度情報 $\Delta \theta_e, \Delta \theta_s$ に変換され、出力されるものとした。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_e \\ \dot{\theta}_s \end{bmatrix} = J(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad \text{ただし } J(\theta) : \text{ Jacobian 行列} \quad (3 \cdot 28)$$

$$\Delta \theta_e = -[x^* \Delta x + y^* \Delta y] / \hat{\alpha}_x l_f \zeta \quad (3 \cdot 29)$$

$$\Delta \theta_s = [\Delta x \cos (\theta_e + \theta_s) + \Delta y \sin (\theta_e + \theta_s)] / \hat{\alpha}_y \zeta \quad (3 \cdot 30)$$

ただし Δ : 差分演算子

$$\zeta = x^* \sin (\theta_e + \theta_s) - y^* \cos (\theta_e + \theta_s)$$

(f) 小脳は脊髄を伝わる“運動指令”を、錐体路側枝から橋核を経て受けとるとともに、小脳・大脳連関によって運動野と密接な線維連絡をもっている。したがって小脳は脳系におけるフィードバック要素としての役割を果たしているといえる。また小脳破壊によって推尺異常が生じることから、小脳は生体内の制御機構のゲイン調整を担っているといえる。そこで小脳は脳幹・脊髄系のシミュレータを備えたフィードバック要素であり運動野の出力調整を果すものとして構成した。その巨視的な特性は脳幹・脊髄系と同じ時定数 \hat{T} ($\hat{T} = T_n$) をもつゲイン

調整可能な一次遅れ要素 $c_1/(1+j\omega\hat{T})$, $c_2/(1+j\omega\hat{T})$ で表現した。

(g) 運動野の近接した二つの部位で脊髄節での関節の屈伸と同様、拮抗的に応答するニューロン活動が観察されることからこの現象をリレー要素で表現した。

(h) 脳幹・脊髄系については運動指令を筋骨格系の運動として実現するためのサーボメカニズムと考え、その機能を一次遅れ要素 $1/(1+j\omega T_n)$ で模擬した。また外部環境とかかわりのない状態で発生した手先の運動には 20 [rad/s] まで減衰が認められなかったことから、時定数 $T_n = 0.05$ と定めた。

(i) 上肢 2 関節の連結を (3・22) 式、(3・23) 式によって表現した。

3-3-3 上肢運動特性のシミュレーション

上肢 2 関節運動特性が第 3・11 図に示す中枢モデルによってどの程度模擬できるのかを調べ、モデルの妥当性を検証する。この場合、中枢モデルの応答が単に人間の応答特性と一致するばかりでなく、推定されたモデルパラメータも妥当なものでなければならないであろう。この要求を満たすパラメータ推定法としてつぎの手法を採用する。

まずモデルのパラメータベクトル \mathbf{P} を

$$\mathbf{P} \triangleq (a_x, a_y, \hat{\alpha}_x, \hat{\alpha}_y, C_1, C_2, L_x, L_y) \quad (3 \cdot 31)$$

と定義する。つぎにパラメータ \mathbf{P} でのモデル応答 $x_m(t, \mathbf{P})$, $y_m(t, \mathbf{P})$ と人間の平均応答 $x_h(t)$, $y_h(t)$ との差をそれぞれ Z_x, Z_y とし、評価関数 \tilde{Q} をスペクトル密度 $S_{z_x z_x}$, $S_{z_y z_y}$ を用いて構成する。

$$\tilde{Q} = \sum_{i=1}^{10} \frac{S_{z_x z_x}(\omega_{y_i})}{S_{x_h x_h}(\omega_{y_i}) \omega_{y_i}^2} + \sum_{i=1}^{10} \frac{S_{z_y z_y}(\omega_{y_i})}{S_{y_h y_h}(\omega_{y_i}) \omega_{y_i}^2} \quad (3 \cdot 32)$$

$$\text{ただし } Z_x(t, \mathbf{P}) = x_h(t) - x_m(t, \mathbf{P}) \quad (3 \cdot 33)$$

$$Z_y(t, \mathbf{P}) = y_h(t) - y_m(t, \mathbf{P}) \quad (3 \cdot 34)$$

(3・32) 式において $S_{z_x z_x}$, $S_{z_y z_y}$ をそれぞれ $S_{x_h x_h} \cdot \omega_{y_i}^2$, $S_{y_h y_h} \cdot \omega_{y_i}^2$ で正規化することで \mathbf{P} に関する \tilde{Q} の形状を選択性のよい単峰性とすることができる。 \tilde{Q} を最小とする最適パラメータを選択するためにつぎの探索法を用いる。¹⁷⁾

いま、 n 回探索で得たパラメータベクトル \mathbf{P}_n に対する評価関数値を \tilde{Q}_n とする。ベクトル \mathbf{P}_n のうち任意の要素 A_n を選び、パラメータ A_n を $-\Delta$, $+\Delta$ だけ変化させた時の評価関数値をそれぞれ \tilde{Q}_n^- , \tilde{Q}_n^+ とする。 \tilde{Q} は A に関して 2 次関数であると近似すれば \tilde{Q} を最小とする A^* は

$$A^* = A_n - C_0 \cdot \frac{\tilde{Q}_n^+ - \tilde{Q}_n^-}{2\Delta} \quad (3 \cdot 35)$$

ただし $C_0 = 0.5D$

$$D = 0.5 \cdot (\tilde{Q}_n^+ + \tilde{Q}_n^- - 2\tilde{Q}_n) / \Delta^2$$

A^* における \tilde{Q} の値を \tilde{Q}_{n+1} とすれば $\tilde{Q}_{n+1} < \tilde{Q}_n$ ならば $A_{n+1} = A^*$ 、 $\tilde{Q}_{n+1} > \tilde{Q}_n$ ならば $A_{n+1} = A_n$ とし、順次 Δ を小さくしていけば最終的には \tilde{Q} を最小とするパラメータ A_{opt} を決定できる。この手法を $a_2, a_1, \dots, L_2, L_1$ というように順次適用する。探索は条件

$$(\tilde{Q}_n - \tilde{Q}_{n-1}) / \tilde{Q}_n < 0.1 \quad (3 \cdot 36)$$

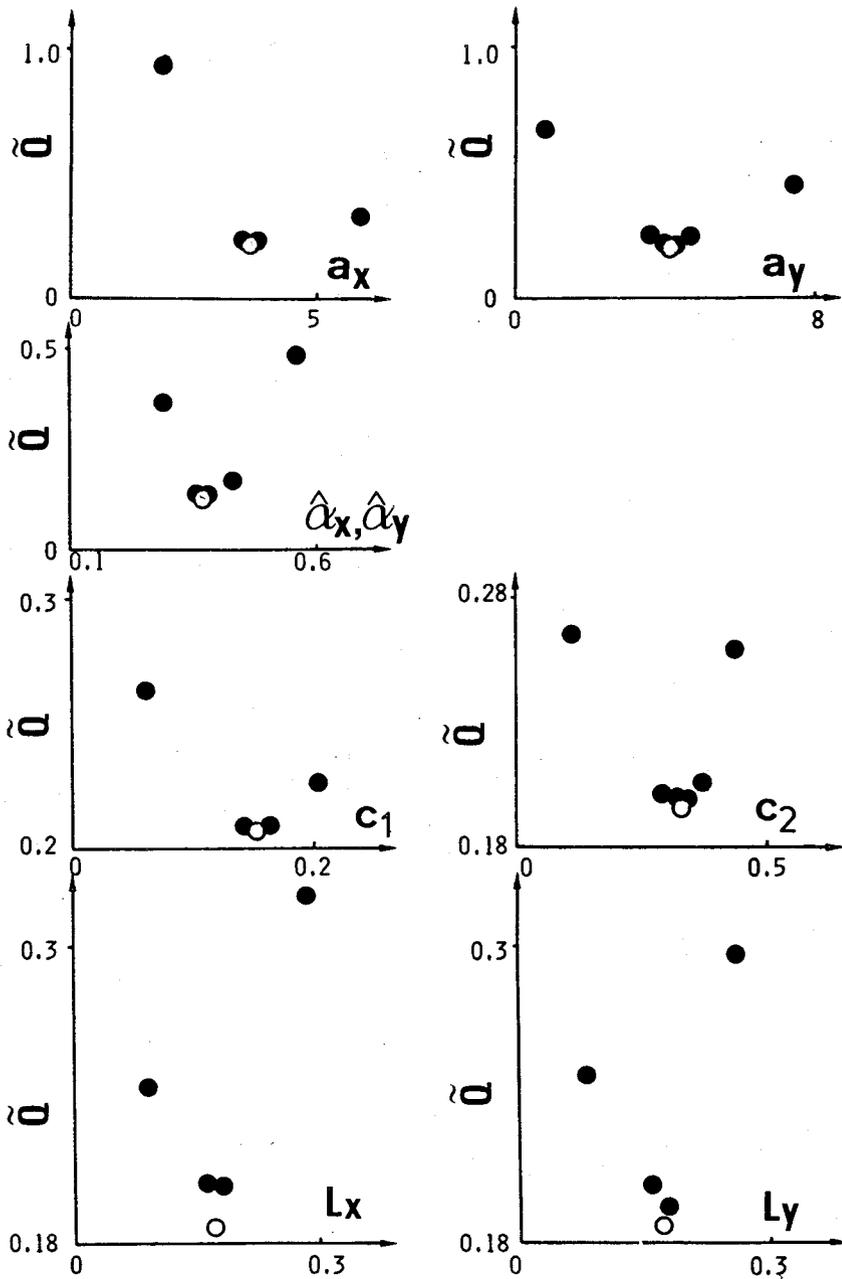
が満たされる時終了する。この手法をNEAC2206—MODEL900の端末装置を用い会話形式で行なった。本探索法を適用した結果、 $n=2$ で(3・36)式の条件が満たされ

$$P_{opt} = (4.5, 5.1, 0.37, 0.37, 0.15, 0.33, 0.17, 0.17)$$

と決定された(第3・12図参照)。また P_{opt} による中枢モデルの時間領域における応答特性を第3・8図(b), (d), (f), (h)に、周波数領域における応答特性を第3・10図の実線で示す。このシミュレーションをみると応答特性が一致しているだけでなく、例えば α の値をとりあげても、 α_2, α_1 の推定値は0.37で設定値5/16に近く、また無駄時間においても生理学的に妥当な値170msが得られている。

3-4 結 言

運動中枢における制御情報処理機能はN.Wienerのサイバネティクスの提唱以来、主に情報工学的アプローチによる解明が試みられており、現在、バイオニクスの柱のひとつとなっている。情報処理の研究は下位中枢から次第に高位中枢へと及び、とくに近年大脳皮質における情報処理の研究は目覚ましい進歩を遂げつつある。今までいわゆる内観法でしか研究できなかった随意運動の問題も客観的にとらえる道が開けてきたといえる。本章では運動中枢神経系を脳幹・脊髄系と脳系とにわけて考えた。筋肉と筋肉を神経支配している脊髄さらに上位の脳幹を合わせた単一機能系を脳幹・脊髄系と総称し、筋骨格系を操作して運動を実行するためのコントローラとした。また脳幹・脊髄系を自発的に働かせるための指令が大脳皮質、大脳辺縁系、小脳などからなる脳系より発し、円滑な運動を可能にするものとみなした。これまで最もよく解明されているのは脳幹・脊髄の反射系である。反射運動は除脳し、脳幹・脊髄だけを残した動物でも十分に発現することから基本的な神経機構は脳幹・脊髄系に備わっているとみられている。脳系の構造に関してはかなり明らかにされてはきたが、その働きについての理解はまだ



● Search point
○ Optimum point

第 3・12 図 評価関数 \tilde{Q} を最小とする最適なモデルパラメータの推定

乏しい。そこで本章では脳系の巨視的機構および機能に関する生理学的知見をできるかぎり整理し、運動脳の工学的イメージを描いてみた。さらにモデル応答と上肢運動制御における計測結果とを照合し、中枢モデルの検討を行なった。このように脳と機械系との接点をもとめていけばやがては運動の随意性の問題を明らかにすることができるであろうし、工学的には人間の融通性と同等な能力をもつ機械の開発という問題につながるであろう。

第 3 章 の 参 考 文 献

- 1) 田口・藤井：前腕運動制御における中枢系の統御機能モデル，電子通信学会論文誌A，Vol. J. 64-A, No.1, pp. 47-54 (昭56)
あるいは H.Taguchi and K.Fujii：Integration function and modeling of the central nervous system in forearm movement control, Electronics & Communications in Japan, Vol. 64, Jan., S/P Scripta Publishing Company (1981)
- 2) T.B.Sheridan：Experimental analysis of time-variation of the human operator's transfer function, Proc. First Int. Fed. Autom. Control. Congr., Moscow (1960)：Butterworths, pp. 1681-1686
- 3) R.Gawronski：Bionics-The nervous system as a control system, pp. 192-196, Elsevier Publishing Company (1971)
- 4) D.T.McRuer and H.R.Jex：A review of quasi-linear pilot models, IEEE Trans. Hum. Factors Electro., Vol. HFE-8, No.3, pp. 231-249 (1967)
- 5) H.Taguchi and K.Fujii：A model for central integration function in arm movement control, ICCS. Tech. Sess. 1-8, 2 (1978)
- 6) 日本機械学会編：オンオフ制御, pp. 5-14 (昭43)
- 7) J.R.Smythies：Brain mechanism and behavior, Blackwell Scientific Pub. (1970)
- 8) 大島知一：随意運動の発現機構, 科学, Vol. 47, No.4, pp. 237-243 (昭52)
- 9) D.T.McRuer, R.E.Magdaleno and G.P.Moore：A neuromuscular actuation system model, IEEE Trans. Man-Machine Syst., Vol. MMS-9, No.3,

pp. 61-71 (1968)

- 10) H.P.Schwan : Biological Engineering, Inter-Univ, Electronic Series. 9, pp. 109-113, New York, McGraw-Hill Inc. (1969)
- 11) 時実利彦編 : 脳と神経系, pp. 302-311, 岩波書店(昭51)
- 12) Y.Suzuki, K.Yamashita and K.Fujii : A method to find transfer function from frequency response data based on least-squares principle, Tech.Rep. of Osaka Univ., Vol.21, No.984, pp. 143-162 (1971)
- 13) H.P.Schmid and G.A.Bekey : Tactile information processing by human operator in control systems, Proceeding of the 1977, JACC, pp. 1392-1398 (1977)
- 14) 田口・酒井・藤井 : 上肢運動制御における中枢機能モデル, 電子通信学会論文誌A, Vol. J. 65-A, No.12, pp. 1286-1293 (昭57)
あるいは 酒井・田口・藤井 : 上肢運動制御における空間知覚の役割, 信学技報, MBE 80-71 (昭56)
- 15) 酒田英夫 : 空間知覚の神経機構 I, 科学, Vol.45, No.6, pp. 322-329 (昭50)
- 16) 酒田英夫 : 空間知覚の神経機構 II, 科学, Vol.45, No.7, pp. 434-441 (昭50)
- 17) 藤井・西村・田口 : 最適化制御における最大傾斜法の改善, 制御工学, Vol.11, No.1, pp. 38-43 (昭42)

第4章 適応行動における脳機能

4-1 緒 言

人間は内部に感覚、行動選択・判断能力そして運動能力を司る器官として感覚器官、大脳の中樞、運動器官を備えている。人間はこれらの器官で構成される信号伝達経路を状況に応じて変更したりあるいは経路の構成要素の特性を修正し、行動面での適応性を保つことができる。制御工学の分野では早くから人間の行動面での適応性に注目し、この能力を学びとって豊かな多様性をもつ情報処理装置を開発しようとしてきた。すなわちフィードバックの概念にはじまり、適応・学習など人間の行動を観察することで見い出された諸概念を制御設計にとり入れ、制御技術面での進展を図ってきた。これまでは人間の制御システム内での制御要素としてのふるまいがシステム論の立場から解析されており、その工学的対応をも考えられてきた。人間の単純作業における制御動作の規則性を線形伝達関数で表現する試みは A. Tustin をはじめ多くの研究者らにより古くから行なわれており、^{1)~5)} D. T. McRuer および H. R. Jex によって集大成されている。⁶⁾ こうした努力は人間を含めた制御システムの工学的な効率と安全性を追求するためのものであった。しかしながら現在では人間の制御能力をはるかに越えているとみられる機械が出現し、突発的な事故でもおこれば人間にはもはや対処し切れないまでにシステムが複雑化する傾向が現われはじめた。このような背景のもとにこれまではノイズという形で処理されてきた人間の非線形動作の理解をも深め、人間の適応機能の表現をより確かなものとする必要性が生じた。

因に制御システム内での人間の特性は

1. 視覚性、聴覚性、触覚性のいずれの感覚系が関与しているか。
2. 記憶をもとに入力信号を再現したり、入力を知ってその信号の未来値を推定できるか。
3. 制御目的の教示はいかにして与えられるか。
4. 制御対象のダイナミクスはどのようなものか。
5. 制御応答に再現性はあるか。

など感覚の特性、予測、最適化、同定、動作のパターン化機能のかかわり方によって左右される。本来は第3章での運動解析と同様、中枢内部の制御機構に注目して、制御特性を論じるべきであろう。しかしながら現在のところこれらの諸機

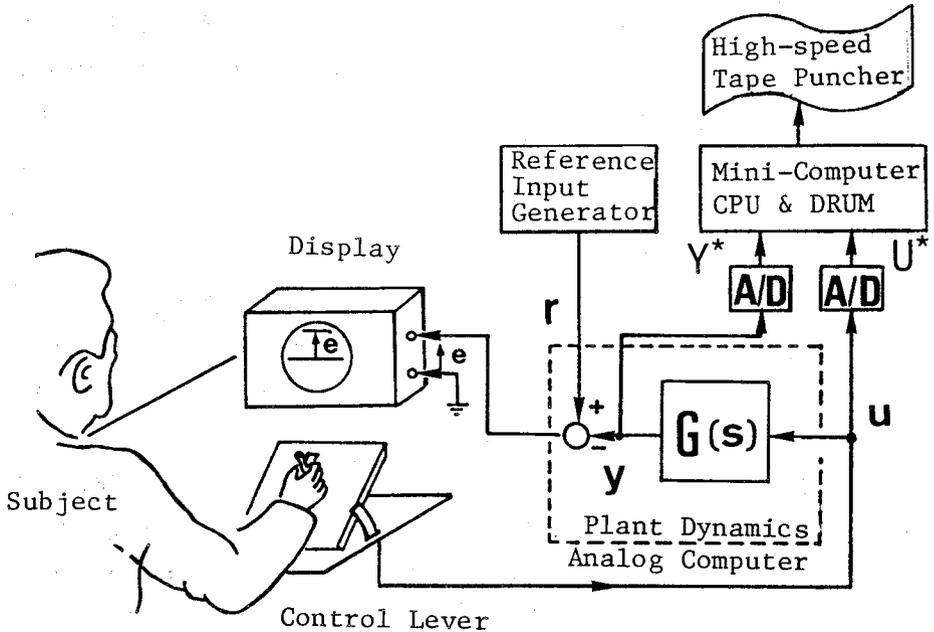
能が関与しているいわば複雑反応に類する動作を生体内部機構と対応づけるほどには残念ながら現在の生理学は進展していない。そこで本章では手動制御動作におけるモード変化という非線形性の中に脳で営まれている動作選択の判断基準が隠されているとの観点から動作モードの法則性をしらべる。4-2では動作モードをバングバングモード（Bモード）、グラジュアルモード（Gモード）に大別し、それぞれ4-2-2、4-2-3でその特徴と動作評価についてふれる。すなわち適応制御実験を通じて操作法が異なるとみられる操作波形を抽出し、その自己相関関数を計算により求め、相関関数の形状の相違からBモードとGモードに分ける。また各動作の特徴をふまえたBモード制御則、Gモード制御則の工学的対応を考え、人間の応答と比較することでその妥当性を検証する。また4-2-4では「人間は本質的には動作モードの切り換えによって適応機能を伸張し、より広範囲な対象の制御を可能にしているのではないか」との考えを拠り所にデュアルモード制御則を工学的に実現し、その可能性を探る。また4-3では各モードによる応答特性の評価を行なう。

4-2 適応制御における動作モード

4-2-1 適応制御実験

第4・1図に示す実験システムを用い、手動制御における動作モードを調べる。表示装置は管面8 cm × 10 cmのブラウン管オシロスコープとし、被験者から約50 cm離して管面をほぼ目の高さに設置する。ブラウン管面上には目標信号 r と対象出力 y との偏差 e を水平な輝線の垂直位置で示す。その動きに合わせて操作し易いようにストローク付きのスライド抵抗からなるレバーを約30度の傾きをもつ操作盤に取りつける。したがってレバーの変位が電気信号に変換され、制御対象に入力される。被験者はレバーを操作し、ディスプレイから読みとった偏差 e を零近傍に保持するように教示される。

あらかじめ操作の未経験な5名の成人男子を被験者に選び、目標入力信号の性質および対象特性に関する知識は与えない。また入力信号は被験者が入力予測を働かせて操作するのを防ぐ意味で、加算 M 系列信号を低域濾波器（遮断周波数1 [rad/s]）に通した擬似ランダム信号を用いた。1回の試行時間を2分30秒に限定し、繰り返し試行させる。被験者の制御成績は試行ごとに自乗平均偏差であらわし、デジタル・ボルトメータに呈示し、教える。さらに試行を重ねても制御成績の向上がみられない場合に操作慣れに達したものとみとめ試行を打ちきる。

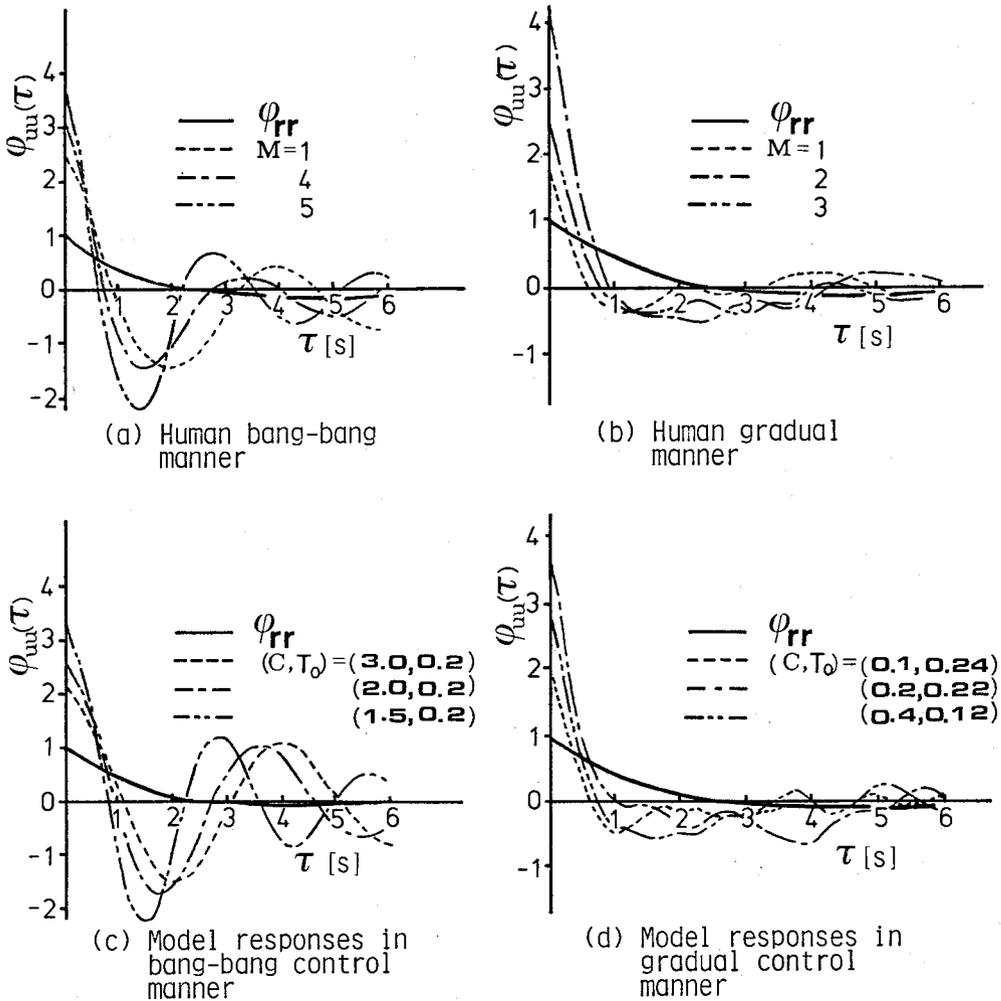


第 4・1 図 偏差表示による適応制御実験

操作法が異なるとみられる被験者の操作入力の自己相関関数 φ_{uu} の試行ごとの典型的な変化過程を第 4・2 図(a)、(b)に示す。ただし φ_{uu} はサンプル周期 50 ms、2600 点のサンプルデータから計算した。 M は試行回数をあらわす。本論文では φ_{uu} の形状から、第 4・2 図(a)のように $\varphi_{uu}(0)$ にくらべてきわめて大きな $\varphi_{uu}(0)$ と負のピーク値をもつ操作特性をバングバング動作 (B 動作モード)、第 4・2 図(b)のように緩やかな漸近操作をグラジュアル動作 (G 動作モード) と呼ぶ。

4-2-2 バングバング動作モード

第 4・2 図(a)の形状からみて明らかなように B 動作モードにはいわゆる反転操作 (control reversal) がみられ、操作量を正値から負値にあるいは負値から正値に切り換え、そのタイミングを問題とする動作といえる⁸⁾。一般に人間は G 動作モードより B 動作モードを選択しようとする傾向がみられる。その理由は B 動作モードによれば操作入力の動作時間のみから操作量の mental integration が容易に演算でき、進み補償制御を実現できるという利点によると考えられている⁹⁾。そのため制御対象の極性が明らかでその応答に遅れが生じる場合とか高次の制御対象に対してはこの操作傾向がとくに顕著にみられる。B モード制御則は予測的な制御偏差に対する操作入力の極性を判定することで実現できる。



第 4・2 図 操作入力の自己相関関数 φ_{uu} による動作モードの比較
(ただし $G(s) = 1/s$)

Bモード制御策¹⁰⁾ Bモードによる制御策は予測偏差にもとづく動作であり、予測偏差はつぎの手順で推定できる。まずサンプル周期を τ とし、時刻 $k\tau$ での制御対象の出力 $y(k)$ と制御偏差 $e(k)$ との結合関数すなわち一巡伝達特性をつぎの2階差分方程式

$$h_1 \Delta^2 y(k) + h_0 \tau \Delta y(k) = \tau^2 e^*(k) \quad (4 \cdot 1)$$

ただし Δ 、 Δ^2 は1階および2階差分演算子

$$e^*(k) \triangleq e(k\tau - L) \quad (L: \text{無駄時間})$$

であらわす。ここでパラメータ h_0 、 h_1 は最小2乗推定法によって求める。パラメータ推定は次式が成立する n_i 個のサンプルデータによって繰り返し行なう。

$$\left| \sum_{i=0}^{n_j-1} \{ e^*(k) - e^*(k-i) \} \cdot \tau \right| \simeq C_T \quad (C_T: \text{閾値}) \quad (4 \cdot 2)$$

(4・2)式によれば偏差面積の変化が閾値 C_T で判定されることになり、偏差速度の速いときには短時間での推定となる¹¹⁾。3-2-2で述べたように、人間の伝達特性 $H(j\omega)$ と制御対象の特性 $G(j\omega)$ とからなる一巡伝達特性 $G(j\omega) \cdot H(j\omega)$ に関して、 GH がゲイン1となる周波数 ω_c (crossover frequency)近傍で(3・7)式のMcRuer法則が成り立つことが知られている。(4・1)式の間係を(3・7)式の間係に近づけるためには(4・1)式に含まれる遅れ要素 $1/(1+j\omega|h_1/h_0|)$ の特性を打消さなければならない。そこで推定値 \hat{h}_0, \hat{h}_1 を用いて予測時間 $T_{p,j}$ および予測偏差 e_p^* を設ける。

$$e_p^*(k) \triangleq e^*(k) + T_{p,j} \dot{e}^*(k) \quad (4 \cdot 3)$$

$$\text{ただし } T_{p,j} \triangleq |\hat{h}_1 / \hat{h}_0|_j$$

(4・3)式の予測偏差 e_p^* を零に保つための制御評価を

$$V = |e_p^*| \quad (4 \cdot 4)$$

と定める。(4・4)式の V を零に近づけるための条件は $V \geq 0$ であることから $\dot{V} < 0$ あるいは $\ddot{V} < 0$ で与えられる。ここで2次系の制御対象までを制御するものとすれば $\dot{V} < 0$ では不十分で $\ddot{V} < 0$ を採用する。 $\ddot{V} < 0$ の条件は

$$\text{sign } e_p^* \cdot \text{sign } \ddot{e}_p^* < 0 \quad (4 \cdot 5)$$

と書き表わせる¹²⁾。B動作モードの判断は断続的で、判断に要する時間は(4・2)式で定まる $(n_j - 1)\tau$ とする。 $(n_j - 1)\tau$ の時間内では目標信号 r をランプ状変化とみなせば $\ddot{r}, \ddot{\ddot{r}} \simeq 0$ となり、また制御対象が2次系であると仮定しているので $\ddot{y} \simeq 0$ となる。したがって(4・5)式の間係は

$$\text{sign } e_p^* \cdot \text{sign } \ddot{y}^* > 0 \quad (4 \cdot 6)$$

となる。一般に対象の操作極性は $\text{sign } \ddot{y}^* \cdot \text{sign } u > 0$ と考えられる。したがって操作入力 u の極性は

$$\text{sign } u = \text{sign } e_p^* \quad (4 \cdot 7)$$

として定まり、Bモード制御策による操作入力 u_b は

$$u_b = A \operatorname{sign} e_p^* \quad (A: \text{最大操作量}) \quad (4 \cdot 8)$$

となる。第4・2図(c)はBモード制御策による第4・2図(a)の模擬結果である。

4-2-3 グラジュアル動作モード

G動作モードは第4・2図(b)に示す $\varphi_{n..}$ の形状からも明らかなように適切な操作量へゆるやかに漸近させる操作法である。したがってG動作モードは速応性が必要とされる制御対象には適さないが、探索的な操作によって時々刻々適切な操作入力を決め、これに近づけることができるという利点がある。Gモード制御策は次のアルゴリズムによって実現できる。

Gモード制御策¹⁸⁾ Gモード制御策では制御対象の動特性を推定することが先決である。そこでまず特性未知な制御対象に対して次の $M_1 \sim M_3$ の三つの差分方程式が用意されているものとして、このうちからもっとも適合度のよいものを対象特性とみなし選択する。

$$M_1: \hat{y}(k+1) = a_{11} \hat{y}(k) + a_{12} \hat{y}(k-1) + b_{11} u(k-1) \quad (4 \cdot 9)$$

$$M_2: \hat{y}(k+1) = a_{21} \hat{y}(k) + b_{21} u(k) \quad (4 \cdot 10)$$

$$M_3: \hat{y}(k+1) = b_{31} u(k) \quad (4 \cdot 11)$$

ここで \hat{y} は制御対象の予想出力である。(4・9)式～(4・11)式の係数を(4・2)式で決まる時間間隔 $(n_j - 1)\tau$ で最小2乗法により近似的に求める。つぎの時間間隔 $(n_{j+1} - 1)\tau$ では M_l ($l = 1, 2, 3$) の各予想出力 $[\hat{y}]_l$ を算出し、実際の対象出力かあるいは偏差表示のように実際の対象出力が直接検知できない場合には(3・7)式にもとづく対象出力の推定値 y との照合で $M_1 \sim M_3$ のいずれかを選択する。選択基準には重相関係数 R_l^2 を用い、 R_l^2 が1に近い M_l をとる。

$$R_l^2 = 1 - \frac{\sum_i \{ y(k-i) - [\hat{y}(k-i)]_l \}^2}{\sum_i \{ y(k-i) - \bar{y} \}^2} \quad (l = 1, 2, 3) \quad (4 \cdot 12)$$

ただし $[\hat{y}]_l$: 差分方程式 M_l による予想出力

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=0}^{n_j-1} y(k-i)}{n_j} \quad (n_j = T_j / \tau)$$

M_l が決まれば(3・7)式の関係を満たす操作入力は逆関数補償方式によって

決定できる。例えばいま M_1 が採用されているとする。対象出力として目標信号 r と等価な信号を得るために必要な操作入力を u_g と定義すれば (4・9) 式を用いて

$$r^*(k+1) = a_{11} r^*(k) + a_{12} r^*(k-1) + b_{11} u_g(k-1) \quad (4 \cdot 13)$$

$$\text{ただし } r^*(k) \triangleq r(k\tau - L)$$

を得る。(4・9) 式で無駄時間を考慮し、(4・13) 式の左右両辺との引算を行なえば

$$e^*(k+1) = a_{11} e^*(k) + a_{12} e^*(k-1) + b_{11} \{ u_g(k-1) - u^*(k-1) \} \quad (4 \cdot 14)$$

を得る。一方、時刻 $(k+1)\tau$ における予測偏差は

$$e_p^*(k+1) = e^*(k+1) + T_{p,j} \dot{e}^*(k+1) \quad (4 \cdot 15)$$

であらわされるから、(4・14) 式を (4・15) 式の右辺に代入し

$$\begin{aligned} e_p^*(k+1) &= a_{11} e_p^*(k) + a_{12} e_p^*(k-1) + b_{11} [u_g(k-1) + T_{p,j} \dot{u}_g(k-1) \\ &\quad - \{ u^*(k-1) + T_{p,j} \dot{u}^*(k-1) \}] \end{aligned} \quad (4 \cdot 16)$$

を得る。ここで

$$u_g(k-1) = u^*(k-1) + T_{p,j} \dot{u}^*(k-1) \quad (4 \cdot 17)$$

$$e_p^*(i) = e_p^*(i-1) + \tau \dot{e}_p^*(i-1) \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (4 \cdot 18)$$

であることを用いれば (4・16) 式は

$$\begin{aligned} b_{11} T_{p,j} \dot{u}_g(k-1) &= \tau^2 \ddot{e}_p^*(k-1) + \tau(2-a_{11}) \dot{e}_p^*(k-1) \\ &\quad + [1-a_{11}-a_{12}] e_p^*(k-1) \end{aligned} \quad (4 \cdot 19)$$

と変形できる。(4・19) 式の G モード制御策は PID 調整系に他ならない。同時に (3・7) 式の関係を満たす逆関数補償形の制御方策にも相当する。(4・10) 式、(4・11) 式による操作入力も同様な手順で求めることができる。第 4・2 図(d) は G モード制御策によって第 4・2 図(b) に示す人間の G モード特性を模擬した結果である。

4-2-4 デュアル動作モード

人間は B 動作モードと G 動作モードを対象ダイナミクスに応じて適宜使いわけ

ている。例えば制御対象が純粋ゲインであればG動作モードで制御し、純慣性系であればB動作モードを示す。ここでは人間はいかなる制御状態でB動作モードあるいはG動作モードを選択しているのかを検討する。さらに二つの動作モードを制御状態のパターン識別によって使いわけ、より広範囲な対象ダイナミクスに適応できるデュアル動作モード(Dモード)を確立する。まず動作モード識別に先立ち、特徴空間をつぎのように考える。人間の微分能力は精々2次までとみなし、制御偏差 e^* を2次の時間関数で近似し、その変化に応じてモード選択を行なう。すなわち

$$e^*(k-i) = \mu_0 + \mu_1(i\tau) + \mu_2(i\tau)^2 \quad (4 \cdot 20)$$

$$\text{ただし } i = 0, 1, 2, \dots, n_j - 1$$

とおき、さらに

$$t_1 = i\tau - (n_j - 1)\tau/2$$

$$t_2 = (i\tau)^2 - (n_j - 1)i\tau^2 + (n_j - 1)(n_j - 2)\tau^2/6$$

を用いれば(4・20)式は次式となる¹⁴⁾

$$e^*(k-i) = \beta_0 + \beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 \quad (4 \cdot 21)$$

$$\text{ただし } \beta_0 = \mu_0 + \mu_1(n_j - 1)\tau/2 + \mu_2(n_j - 1)(2n_j - 1)\tau^2/6$$

$$\beta_1 = \mu_1 + \mu_2(n_j - 1)\tau, \quad \beta_2 = \mu_2$$

いま $\sum t_1 = \sum t_2 = 0$, $\sum t_1 t_2 = 0$ となるから $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ に関する正規方程式は

$$\left. \begin{aligned} n_j \beta_0 &= \sum e^*(k-i) \\ \sum t_1^2 \beta_1 &= \sum t_1 e^*(k-i) \\ \sum t_2^2 \beta_2 &= \sum t_2 e^*(k-i) \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 22)$$

となり $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ の推定量は

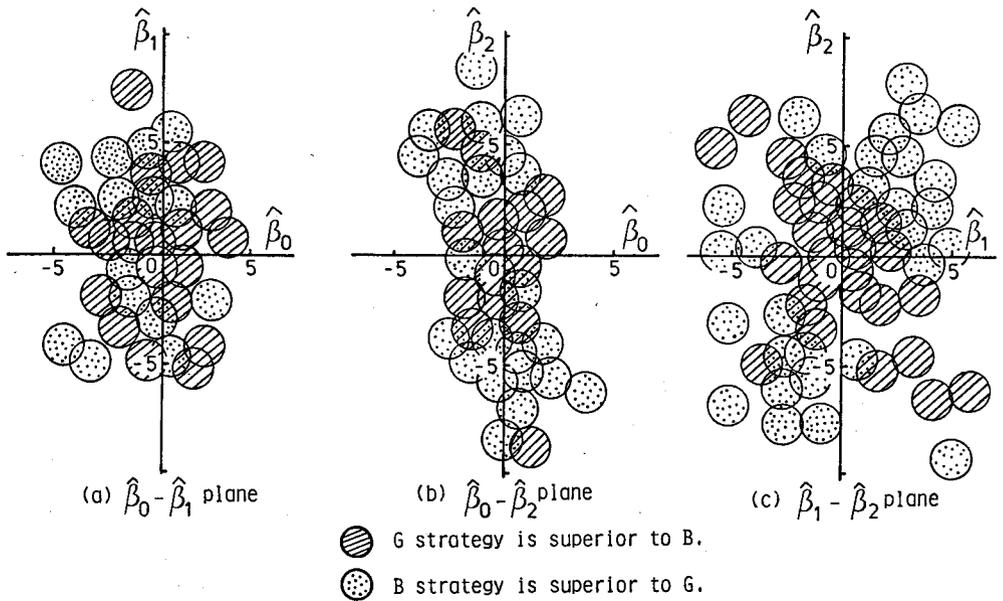
$$\left. \begin{aligned} \hat{\beta}_0 &= \sum e^*(k-i) / n_j \\ \hat{\beta}_1 &= \sum t_1 e^*(k-i) / \sum t_1^2 \\ \hat{\beta}_2 &= \sum t_2 e^*(k-i) / \sum t_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (4 \cdot 23)$$

となる。ここで $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ はそれぞれ e^* の移動平均、 \dot{e}^* の移動平均、 \ddot{e}^* の移動平均に相当する。これらの変数 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ を特徴変数として構成される特徴空間を動作モード識別に用いる。

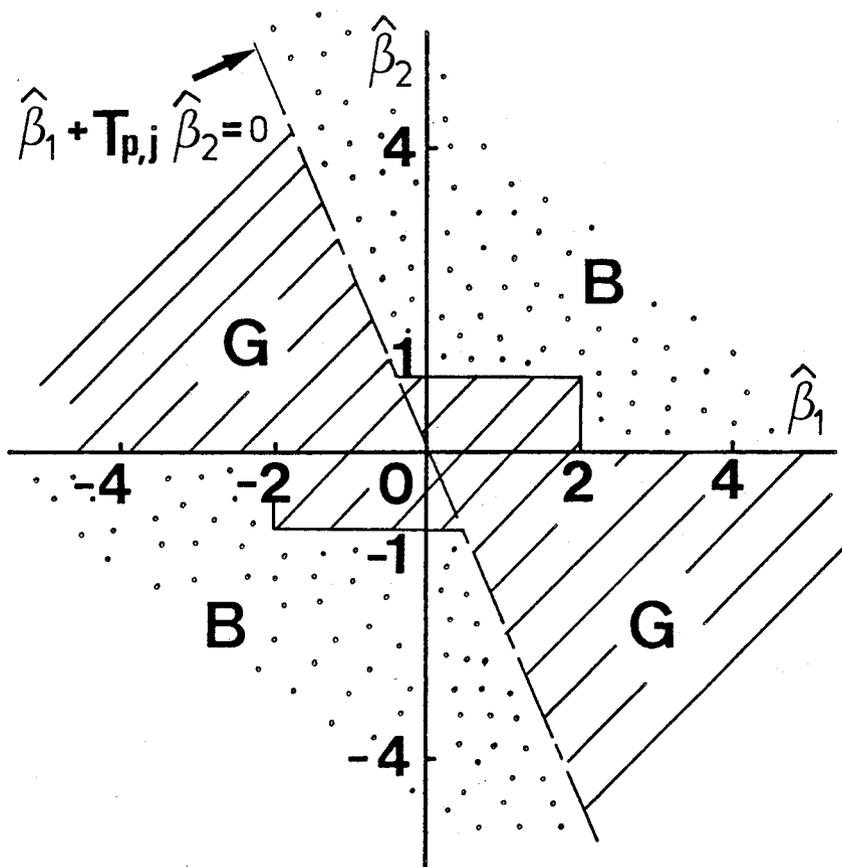
Dモード制御策¹⁵⁾ 1次の積分系を制御対象とする場合、人間の応答特性にはBモードとGモードが混在していることが多い¹⁶⁾そこで人間は状況に応じて最適な行動選択を行なっているものとみなし、1次の積分系を対象に制御状態に応じて4-2-2で述べたBモード制御策あるいは4-2-3で述べたGモード制御策のいずれを選択するのが有利かを調べる。ただし目標信号は擬似ランダム信号とし、応答評価はITAE¹⁷⁾(Integral of Time multiplied Absolute Error)と定めた。ITAEは選択性に優れ、系のパラメータ変化に対して整定時間を小さく抑える効果がある。

$$ITAE = \sum_{i=0}^{n_i-1} i \tau^2 |e^*(k-i)| \quad (4.24)$$

ITAEを評価に $\hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1$, $\hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_2$, $\hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2$ の各平面上でSebestyenの方法¹⁸⁾を用いて両制御策の有効性を比較した結果が第4・3図(a), (b), (c)である。第4・3図で斜線域はGモード制御策がBモード制御策に対して優位であり、点線域は逆の領域である。この結果 $\hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2$ 平面上では他に比べて制御策の決定領域が顕著であり、モード識別は $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$, $\hat{\beta}_2$ 空間で考えなくとも $\hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2$ 平面上で充分可能であることがわかった。したがって $\hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2$ 平面を用い、制御策の選択は第4・4図に示すように



第4・3図 ITAE評価によるBモード制御策とGモード制御策の比較(ただしG(s) = 1/s)



第4・4図 パターン識別による動作モードの選択

- (a) 原点近傍ではGモード制御策
 (b) 原点近傍を除いては

$\text{sign}(\hat{\beta}_1 + T_{p,j} \hat{\beta}_2) \text{sign} \hat{\beta}_2 < 0$ ならばGモード制御策、

$\text{sign}(\hat{\beta}_1 + T_{p,j} \hat{\beta}_2) \text{sign} \hat{\beta}_2 \geq 0$ ならばBモード制御策、

と定めればよいことがわかった。第4・4図の決定面によれば $\hat{\beta}_0$ が零あるいは或る値に収束する傾向にある場合にはGモード制御策、 $\hat{\beta}_0$ が正または負の方向に発散する傾向にある場合にはBモード制御策を選択することに相当する。

4-3 動作モードからみた適応特性の評価

制御システム内に対象ダイナミクスの変遷など何等かの変化が生じたとする。この場合に対処しようとする人間の適応動作は制御状態の異常検知、対象ダイナミクスの同定、操作入力の調整の三つの段階で形成されるとみられている²⁾。そこ

で人間の適応動作の形成には系の異常検知、偏差の予測、動作モードの選択などの機能が必要であるとみなす。そのうえで、これらの機能を実現するための機構とさらに生理学的にみて不可欠な無駄時間要素および手・腕の遅れ要素を兼ね備えたモデルによって人間の適応動作を再現する。モデルの構成図を第4・5図に示す。このモデルの特色は異常検知機構と動作モード識別機構を備えていることである。動作モードとその識別については4-2で述べたのでここでは異常検知の機能と機構について触れる。

人間は操作に習熟すると系に異常が生じてても“慌て”操作といった情動反応が消え、新たな状況が把握できるまで注意深く操作入力を保持できる。この機能は保持機能 (retention function) と呼ばれており、この非線形動作は対象ダイナミクスの変化など変化直後の異常信号による誤動作がおこることを未然に抑止するのに役立つ。系の異常検知機構はこのような保持機能を模擬するための機構であり、次の考え方をもとに設計する。

- (a) 系の異常を逸速く検知するための指標として偏差速度を利用する。
 - (b) 偏差速度の異常からそれが自らの誤った操作によるものかあるいは対象特性変化によるものかを明確に見極める。
- (a), (b)の工夫を構じた機構が第4・5図に示すRL機構 (Retention Logic) である。RL機構にはサンプル値 $e^*(k)$ が視覚情報として入力され、この値を用いて偏差速度 \dot{e}^* を新たに推定する。推定値 \dot{e}^* の偏差予測機構への伝達の有無はスイッチ S の開閉によって制御する。すなわち

$$| \dot{e}^*(k) / \dot{e}^*(k-1) | > \epsilon_1 \text{ のとき } S \text{ はオフ状態。}$$

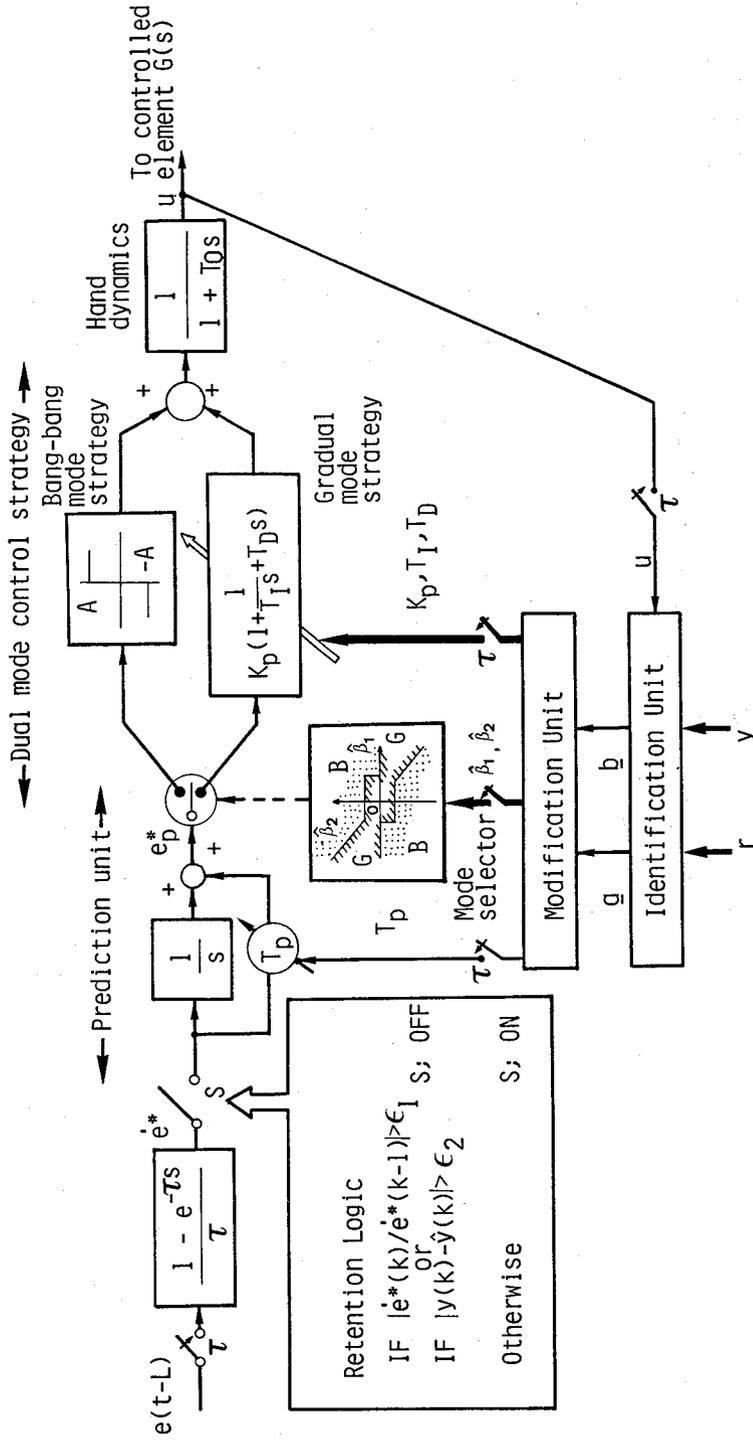
$$| \dot{e}^*(k) / \dot{e}^*(k-1) | \leq \epsilon_1 \text{ のとき } S \text{ はオン状態。}$$

さらに実際の対象出力 y とその予想出力 \hat{y} とのずれを利用し、ずれが大きければ対象特性の変化が生じたものとみなし、 S をオフ状態にする機構を設けた。すなわち

$$| y(k) - \hat{y}(k) | > \epsilon_2 \text{ のとき } S \text{ はオフ状態。}$$

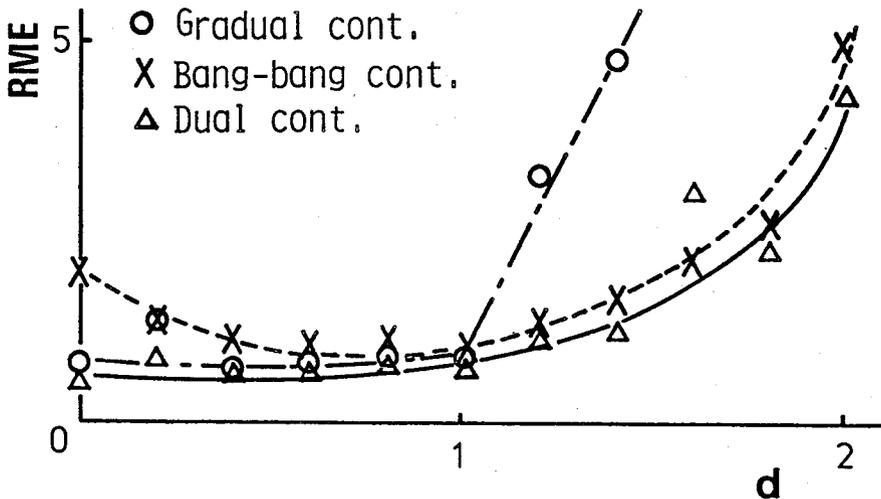
$$| y(k) - \hat{y}(k) | \leq \epsilon_2 \text{ のとき } S \text{ はオン状態。}$$

この異常検知機構をはじめ、動作モード識別機構などを備えたモデルによれば、つぎのような適応動作を実現できる。

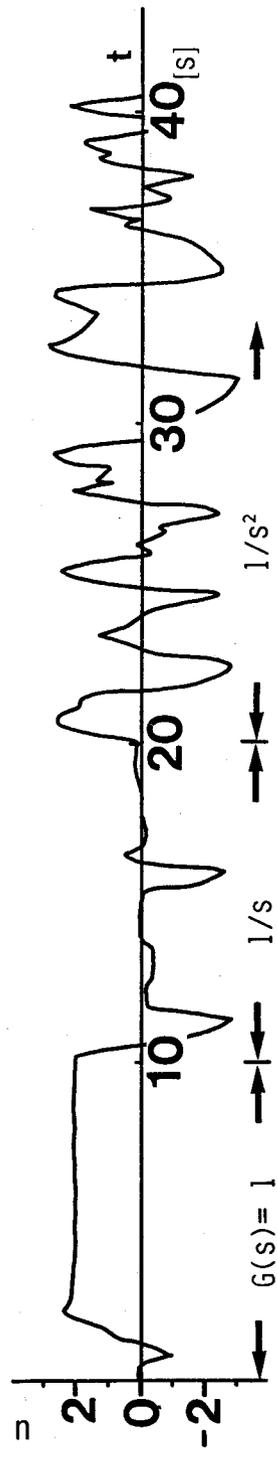
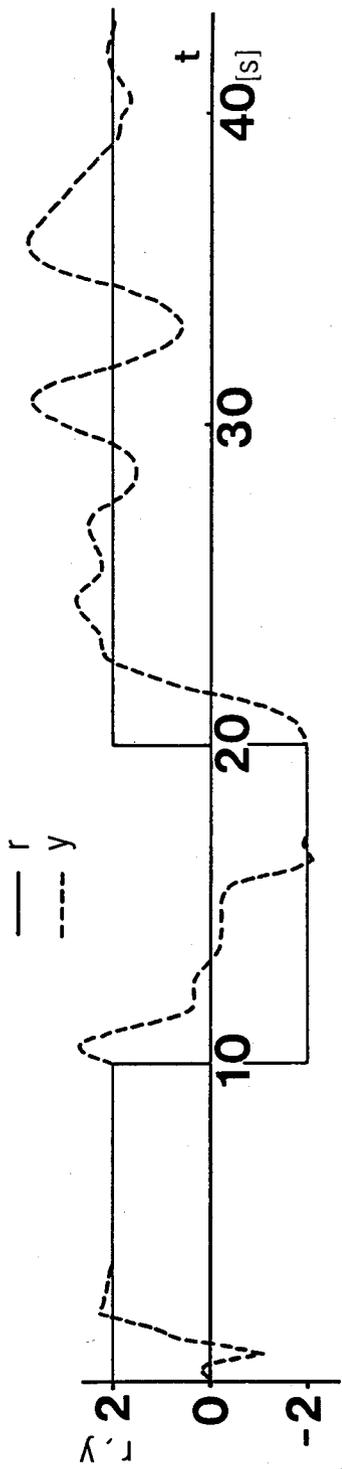


対象特性の突変とともに偏差に異常信号が現われる。異常検知機構が信号を検知すれば直ちに適切な制御動作が決定されるまで操作入力を保持し、操作入力が異常信号に誘導されるのを防ぐ。つぎに制御モード識別機構においてB動作モードかG動作モードかを適宜選定し、選定された制御モード策による調整を行なって系を安定化する。

以下では各動作モードによる特性評価について述べる。すなわち制御対象を $1/s^d$ ($0 \leq d \leq 2$) に選び、Bモード制御策、Gモード制御策による単独の応答および両制御策を切り換えるDモード制御策による応答について評価関数をRMEと定め、応答評価を行なった。結果を第4・6図に示す。第4・6図の応答評価からBモード制御策では $0 \leq d \leq 1$ 、Gモード制御策では $1 \leq d \leq 2$ で制御成績が劣化している。一方Dモード制御策によれば $0 \leq d \leq 2$ で安定した制御が達成される。また $d=1$ 付近ではBモード制御策、Gモード制御策のいずれでも評価値は同じであった。この結果は人間が1次積分系の対象に対して両モードを示すことと合致し、両制御策が人間の制御特性の特徴の一面をとらえていることを示している。第4・7図には対象特性が $1 \rightarrow 1/s \rightarrow 1/s^2$ の順序で10秒ごとに突変する場合の適応制御モデルの時間応答を示す。第4・7図の操作波形からみて、 $G(s)=1, 1/s, 1/s^2$ に応じてGモード、Dモード、Bモード制御策が選択されていることは明らかであろう。



第4・6図 Gモード制御策、Bモード制御策およびDモード制御策による各応答特性のRME評価 (ただし $G(s)=1/s^d$ ($0 \leq d \leq 2$))



第4・7図 Dモード制御策を備えた適応制御モデルによる時間応答特性
 (ただし $G(s) = 1 \rightarrow 1/s \rightarrow 1/s^2$)

4-4 結 言

人間の制御特性が注目され計測されるようになったのは1950年以後であるが、その内容は技術の進歩に伴って変容をとげている。当初は人間の制御特性を表現するにも、単純な工学的表現にとどまっていた。すなわち人間を線形伝達要素とみなし、制御工学的手法を用いて表現することが試みられた。その後これらの成果をふまえ、人間が行なう制御のための演算能力の限界、過誤、個人差さらには適応、学習、認識、判断能力など非線形特性が注目されている。いわばよりサイバネティクスな対象の研究へと進みつつある。しかしながら工学分野でこれらの研究成果を役立てるほどには人間の非線形特性の理解は進んでいない。人間の適応動作をとりあげても感覚の特性、予測、最適化、同定、動作のパターン化機能のかかわり方によってその特性が変化するなどあまりに複雑である。やはり現状ではさまざまな観点から人間の諸特性を把握し、できるかぎり総合的な配慮のもとに適応モデルを構築し、人間の適応特性と比較してみる必要があるであろう。本章では手動制御にみられる適応特性に対する定式化を試みた。すなわち人間の適応制御能力には信号の異常検知、操作保持、同定、調整の機能とともに動作モードの選択機能が大きな役割を果しているとの認識のもとにモデル構成にあたってこれらの機能を重視し、取り入れた。このモデルによれば対象特性突変時においても人間の適応動作と同様な応答特性が得られることを確かめた。このことからこの適応制御モデルは比較的限定された条件下ではあるが、人間の適応機能を代行する機械としての能力を備えているといえる。このような人間の適応制御モデルを工学分野の実用に供するにはなお十分な検討を必要とするが本章で取り上げた一連の試行実験によって一応の目処を得ることができる。

第 4 章 の 参 考 文 献

- 1) 人間工学ハンドブック編集委員会編：人間工学ハンドブック，pp. 64-80，金原出版株（昭41）
- 2) L.R.Young：On adaptive manual control，IEEE Trans on MMS，Vol. MMS-10，No.4，pp.292-331（1969）
- 3) 明石 一：人間-機械系における人間の制御特性に関する研究の動向，人間工学，Vol. 8，No.6，pp.41-48（昭48）

- 4) T.B. Sheridan and W.R. Ferrell: Man-machine systems, pp. 171-246
The MIT Press(1974)
- 5) 藤井・田口: マンマシンシステムにおける人間の制御機能, システムと制御, Vol. 25,
No.6, pp. 328-335(昭56)
- 6) D.T. McRuer and H.R. Jex: A review of quasilinear pilot models,
IEEE Trans. Hum. Factors Electron, Vol. HFE-8, No.3, pp. 231-249
(1967)
- 7) 田村 博: 手動制御における動作モードに関する一考察, 計測自動制御学会論文集, Vol.
8, No.4, pp. 26-33(昭47)
- 8) 田口・藤井: バング・バングモードによる制御者の学習制御過程とそのモデル, 人間工学,
Vol. 9, No.2, pp. 59-69(昭48)
- 9) L.R. Young and J.L. Meiry: Bang-bang aspects of manual control in
high-order systems, IEEE Trans on AC, Vol. AC-10, No.3, pp. 336-
341(1965)
- 10) 管村・田口・藤井: 人間のバング・バング制御モデルによる倒立振り子の姿勢制御, 第4回
バイオメカニズム・シンポジウム前刷集, pp. 56-63(昭50)
- 11) 土屋和夫: Biodics-1の機能について, JAACE, 第12期通常総会学術講演会, No.212
(昭44)
- 12) H.L. Oestreicher and D.R. Moore: Cybernetic problems in bionics,
pp. 158-163, Gordon and Breach Science Pub. Inc.(1968)
- 13) 竹歳・田口・藤井: 手動制御系における人間のPID制御モデル, 第19回自動制御連合講演
会(前刷), No. 3033(昭51)
- 14) 竹内 啓: 数理統計学, pp. 322-323, 東洋経済新報社(昭52)
- 15) 田口・藤井: 対象特性変化時における手動制御動作のモデル, 計測自動制御学会論文集,
Vol. 17, No.8, pp. 851-858(昭56)
- 16) 原・田口・藤井: 人間の手動制御モードを模擬したデュアルモデルの検討, 第17回自動制
御連合講演会前刷, No.1113(昭49)
- 17) 増淵正美: 最適制御入門, pp. 11-23, オーム社(昭39)
- 18) G.S. Sebestyen: Classification in decision in pattern recognition,
Tech. Rep. 381, M.I.T. (1960)

第5章 学習行動における脳機能

5-1 緒言

先験情報が少ないとか、前もって予測することができない要素があるという状況下では、人間の学習動作と同様な法則性にもとづいて動作する制御則を達成することがシステム最適化を図る一手段として考えられている。このように学習の手段を必要とする問題は従来学習解析の研究を担ってきた心理学、生理学と工学との間のひとつの境界領域問題とみなすことができる。2-3で述べたように心理学では条件づけを主体とした一連の学習実験に基づいて学習を確率的事象と認め、学習の定量的モデルがいくつか報告されている。また生理学では学習は生化学的な物質的事象とみなされている。一方、必ずしもそのような行動をしているとはかぎらないが工学的立場からは工学的に有利な手段を考えることによって得られる結果と学習事象とをつき合わせて生体における学習のメカニズムを解明することが考えられている。そこで本章では一応生体の構造はブラックボックスとし、生体の機能面から学習のメカニズムについて考察する。まず5-2で述べた心理学における学習理論の助けを借りて、学習システムのシンセシス(概念形成)を行なう。ところで工学とくに制御工学の分野では過去10数年にわたり、人間-機械系の研究テーマを通じて手動制御における学習過程の解明に取り組んできた。すなわち制御動作の習熟過程が心理学的手法で導かれた学習の定量的モデルで説明され、これによって学習機能を工学的に実現しようと努めてきた。本章においても5-3で学習制御実験の例として船の操舵を取り上げ、手動制御における習熟過程を計測する。5-4では心理学での強化学習法に則って学習制御方を概説する。5-5ではこの方策によって操舵実験における操作習得の過程を段階的に模擬する。

5-2 学習システムの形態

学習研究をになうさまざまな研究分野の共通の関心事は「未知環境下におかれた人間の行動を観察し、把握すること」である。すなわち人間が未知環境から刺激を受け、合目的な行動を獲得するに至る行為の形成過程を研究対象とする。人間は周囲環境より刺激を受けると既成の思考様式にまず混乱をきたし、この混乱を回復するために経験の積み重ねによる学習行動、すなわち反応をおこすと考

えられている。心理学者 J. Piaget の言葉を借りれば「人間は同化と調節の両者の均衡によって環境に適応し、行為の発達過程をたどることができる」と述べている。同化とは環境に働きかけてこれを内に取り入れる機能であり、調節とは人間がみずからを变革する機能である。制御工学の用語に置きかえてみれば同化とはオブザーバ機能あるいはシミュレータ機能、調節は自己組織・自己修復機能にあたるのであろう。このような人間の学習動作と同様な法則性にもとづく学習システムを実現するには、まず人間が知識を獲得する際の基本的な学習形態を明らかにし、学習形態と学習システムのシンセシスとの関連性を追求することが必要であろう。

2-3で述べたように現在、心理学では学習理論の構成において刺激と反応の結合に重点をおく連合説と与えられた問題事態の構造の認知が優先すべきだとする認知説とに体系づけられている。しかし連合説から認知説へと漸近的に移行しているといえる。この流れの中でのさらに大きな特徴はこれまで純粋に心理学としての学問的な興味からのみ研究されてきた学習理論が教育現場に適用され、その結果受容学習、プログラム学習、発見学習などの実践的な学習形態が問題視されるようになることであろう。

本節では各学習形態の概要を記述すると同時に、これらの学習形態が制御工学的にみて、どのような学習システムに相当するののかについて考察する。⁷⁾

a) 受容学習 学習されるべき一連の内容が最終形態として教師によって学習者に呈示され、学習者はただ呈示される材料を将来の必要なときに再生し、活用できるように内面化(記憶)することだけを要求される。すなわち対象とする問題に十分な認識をもつ教師によって学習者が訓練を受け、学習終了後において学習者みずからが与えられた問題の処理にあたる方式である。この学習形態を制御システムに対応づければ、習熟した制御者あるいはすでに設置されたコントローラが教師の役割を果たす。また教師の制御則を学習者である機械の記憶装置に与えることで忠実に教師の応答の再現を図るシステムに相当する。このような学習システムの実例としてはデジタル・メモリを備えたNC工作機械やプレイバック型産業用ロボットなどがある。まだ実用化はされていないが、学術報告には Adaline や ϕ Machine など学習機械をアナログメモリに用いた例がある。

b) プログラム学習 教師がまず知識の習得に必要な行為の具体的な内容と行為の獲得過程を学習者に示す。そのうえで学習者に“プログラム”を与え、学習者みずからの努力によって特定の学習目標まで無理なく到達させるための手法である。プログラム学習では対象に対する認識に力点がおかれているのではなく、刺

激と反応との連合の成立過程を対象とする学習法であるといえる。この学習方式による制御システムは決定機構と評価機構からなり、学習者の役割を決定機構に教師の役割を評価機構にそれぞれ受け持たせるシステムにあたる。この系では設定された決定機構と評価機構との間で相互に試行が幾度も繰り返され、やがてこの制御経験を生かして最終的には系の状態値（感覚量）と制御動作との対応づけが達成される（連合の形成）。すなわち制御則が明らかとなりコントローラは決定理論的な動作をするようになる。プログラム学習方式に当てはまるアルゴリズムの報告例は多い。たとえば試行錯誤的なアルゴリズムに着目して、狭義に解釈すれば摂動法あるいは極値探索法による学習システムがこれにあたる。一方連合の形成といった結果を重視した広義の解釈によればマルコフ連鎖理論や統計的決定理論（Bayes 戦略など）による学習システムもプログラム学習の範ちゅうに入るが、いずれも実用化された例は少ない。

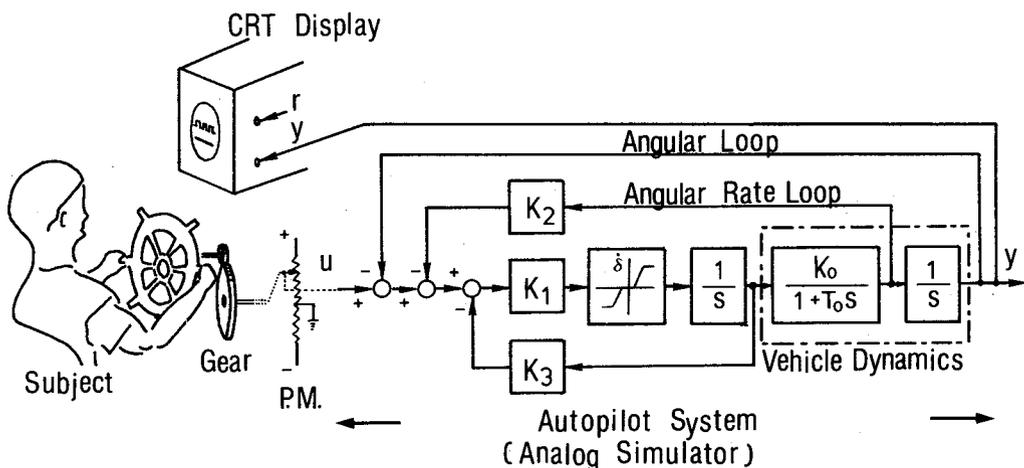
c) **発見学習** 発見学習とは学習者の探究的な思考能力（方法）の形成を目標とする一種の探究工程である。外界からの刺激に対して一つの見通しや仮説を立てて観察し、学習者みずからが直面した場合の合法則性や関連性を深究していく学習法である。いわば仮説—検定という思考の工程を基本骨格とし、問題解決のしかたをパターン化する学習法といえるであろう。したがって複雑な問題においてあらかじめ計算手順を与えることができないなど、ある程度機械の思考にまかさねばならない問題にはとくに有効な手法である。このような発見学習の過程を典型化することは容易ではないが、おそらく発見学習を必要とするシステムとは次のような制御課題であろう。すなわち制御則を見い出すまでの途上には多くの分れ道がありそれらの中から最適と思われる道をいち早く選びそれを正確に検定しなければならない系であろう。現在発見学習の工学的意義が認識され、主に人工知能の分野で Heuristic Programming として大いに活用されている。

以上基本的な学習形態を取り上げ、学習システムとの関連性について論じた。ところで手動制御における学習機能をとらえ解析するといった場合には被験者（学習者）に制御課題を与え、実験者（教師）が動作の習得に必要な知識を教示する。したがって学習形態はプログラム学習といえる。そこで本章ではプログラム学習の観点からこの課題に取り込む。すなわちプログラム学習方式に則り手動制御における学習機能を解明する。

5-3 応答特性の段階的評価

実在のシステムにおいては人間がシステム内にいて、人間のもっている適応および学習機能を活用してシステムの信頼性を高めている例は数多い。たとえば

船舶や航空機などの自動操縦系をみても不測の事態の発生が予測される状況下では融通性のある適応能力が必要で、人間が制御要素的役割をもって制御系内に介入している。ここではこのような人間の制御行動における学習過程の手掛りを得るために第5・1図に示す学習制御実験システムを取り上げる。



第5・1図 学習制御実験システム

第5・1図の系は船舶の方位制御における自動操縦系を表わしている。ここでは安定な自動操縦状態〔安定条件 $T_0 > K_2$ かつ $K_3 > K_0(T_0 - K_2)$ あるいは $K_2 > T_0 > 0$ かつ $K_3 > 0$ 〕にある船のオートパイロットのループの一部 (angular rate loop) を切って、偏差 e が振動的に増大する事態を設定する。被験者は事故によって増大する偏差を零に保つ補償制御作業をプログラム学習に則って行なう。

ところでプログラム学習法に基づく行為の段階的形成は

第1段階——準備的段階で教師が学習者にこれから行なう行為についてのオリエンテーションを行なう。

第2段階——学習者が実際に対象に取り組み対象のもつ特性を見つけ出し、対象にあった行為を形成する。

第3段階——学習者はみずから行なう操作を一つずつ意識して行ない、その正誤は教師が判定する (強化スケジュール)。

第4段階——一般化した能力が形成される段階で最終的には行為は自動化し短縮される。

からなるであろう。そこでこの手順をふまえてつぎのような実験設定を行なった。

(1) 被験者は操作法に関して未経験な者を選び対象の特性に関する情報は知らされない。

- (2) 機械から人間への主要な情報伝達は視覚を通じて行なわれる場合が多い。したがってアナログ計算機で模擬した制御対象の出力および目標値を CRT ディスプレイに 2 本の輝線で提示する。ディスプレイ感度は 0.1 [cm/volt] とした。
- (3) 実験者は被験者に表示された 2 本の輝線を一致させるように指示する。被験者の操作の決定結果 (意志) を伝達するための操作部として複元力のない無定位性比例ハンドルを設ける。ハンドル感度は 10 [volt/turn] とした。
- (4) ディスプレイ上で偏差を認め、ハンドル操作を始める時刻を操作開始時刻と定める。1 回の試行時間はこの開始時刻を基準とし、2 分間に限定して繰返し試行させる。これは長時間試行に伴って被験者の疲労と緊張が増しデータの定常性が失われるのを避けるためである。
- (5) 各試行ごとの被験者の制御成績は IAE (Integral Absolute Error) によってデジタル・ボルトメータに提示し、教える。またこの制御成績によって段階的な学習効果を考察できる。さらに試行を重ねても制御成績の向上がみられない場合に被験者が操作慣れしたものと認める。

被験者のうち顕著な学習効果を示した例を第 5-2 図に示す。(a) は操作入力 u (b) は対象出力 y の時間経過を示す。数字 (i) ~ (iii) は学習の進行経過を、 M は試行回数を表す。(i) の段階では偏差は時間経過につれて振動的に発散し、ほとんど制御されていない。(ii) の段階では偏差は振動してはいるが振幅はほぼ一定で発散の傾向はみられない。(iii) の段階では偏差の振動もみられず十分に制御されている。つぎに (i) ~ (iii) の各段階でどのような制御策が取られたかを考察する。

いま二者択一的な応答判定基準として

$$Z \triangleq - \text{sign } e \quad \text{sign } \ddot{e} \quad (5 \cdot 1)$$

ただし e は目標信号 r と対象出力 y とを比較して得られる偏差信号を設ける。すなわち $Z > 0$ なら正の強化、 $Z < 0$ なら負の強化と定める。さらに操作入力 u の変化の極性と Z の符号とを考慮して被験者の操作基準を

$$v \triangleq \text{sign } Z \cdot \text{sign} \{ u(t) - u(t - \tau) \} \quad (5 \cdot 2)$$

と仮定する。いま一例として第 5.3 図には第 5.2 図に対応する被験者の制御方策を (5.2) 式の評価で解析するため、操作入力 u を横軸に、対象出力 y を縦軸を選んでプロットした。第 5.3 図は実測データを 2 秒間隔でサンプルし示した ($\tau = 2s$)。○印は $v \geq 0$ に、×印は $v < 0$ に対応するサンプルデータの座標位置 (u, y) を表わしている。図中の g_1, g_2, g_3 は (i), (ii), (iii) でのそれぞれのサンプルデータを $v \geq 0, v < 0$ の二つのカテゴリーに分類するための

判別関数であり、判別関数法を適用して求めた。ここでは判別関数の形状を次式とする。

$$\hat{w}_0 = \hat{w}_1 y(t) + \hat{w}_2 u(t) \quad (5.3)$$

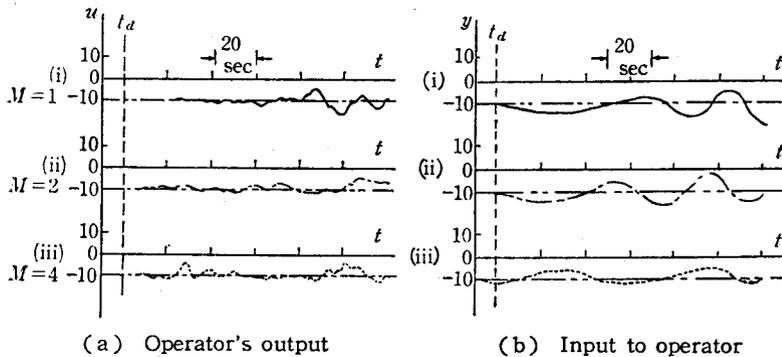
(5.3) 式の直線が $u-y$ 座標上での目標点 $(-10, -10)$ を必ず通ることから

$$\hat{w}_0 = -10 \hat{w}_1 - 10 \hat{w}_2 \quad (5.4)$$

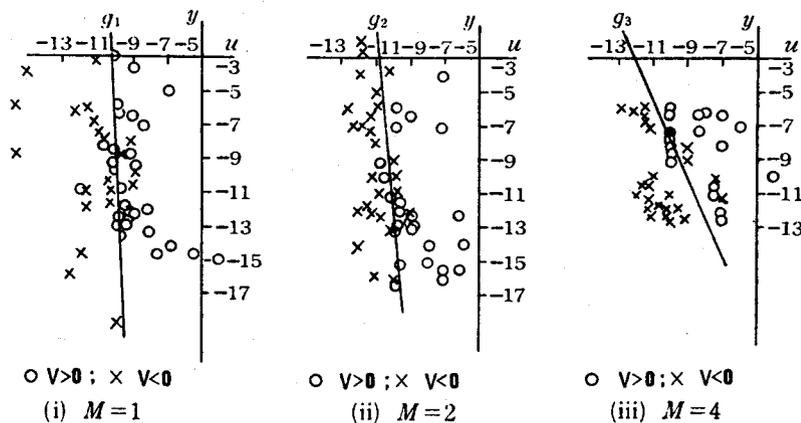
なる関係を得る。したがって (5.3) 式は

$$u(t) = -10 + \left(\frac{\hat{w}_1}{\hat{w}_2}\right) e(t) \quad (5.5)$$

と書き換えられる。したがってこの例では被験者は (5.5) 式で表わされる u



第 5.2 図 学習制御実験における被験者の応答例



第 5.3 図 サンプル値 (u, y) の分布と判別関数

に基づいて操作していると考えることができる。

5-4 強化形式にもとづく学習モデル

手動制御における学習過程を強化形式にもとづく制御方式で模擬するためにつぎの仮定をおく。

- (1) 実測データから検出、同定および調整といった段階的形成を個々に分析・評価することは困難であるが、それぞれモデル構成に必要な概念として取り入れる。
- (2) 人間は間欠的な情報を利用していると考えられるため、サンプル値情報によるモデル化を行なう。
- (3) 操作に不馴れな被験者の学習過程をモデル化するには操作端に現われるディザ信号を有意とみなし、これを対象の出力方程式の学習同定のために活用する。
- (4) 対象出力 y , 操作入力 u を座標軸とする特徴平面上で人間は $u-y$ の関連性をパターンとしてとらえ、さらに線形判別関数を強化学習法によって構成することで対象の特性および制御策を学習するものとみなす。

以上の(1)~(4)の前提のもとで強化学習に基づくモデル構成を行なう。モデルに備える機能としては最適化のための探索・評価に加えて、最適操作条件の追跡速度を速める意味において y と u との関連性を学習して常に動作点の位置をこの特徴空間上で確認するための記憶・認識の機能が不可欠である。これらの四つの機能を取り入れたモデルをここでは強化学習形式モデルと呼び、そのブロック線図を第5・4図に示す。モデルは探索、評価、記憶、認識の各機能に応じて**確率的論理機構、動作評価機構、記憶機構および判別機構**の四つのサブシステムからなっている。1入力1出力としてのモデルの動作原理はつぎのとおりである。

制御対象の出力のサンプル値 $y(N)$ を動作評価機構および記憶機構に与える。つぎに制御目的に応じて動作評価機構より(5・1)式の強化信号 Z を得る。確率的論理機構では量子化された操作量間の遷移を促がす確率が Z の正負の頻度に応じて修正され、その確率分布に応じて操作入力に微小な変化を与える。一方判別機構では過去のデータ群すなわち対象の出力および操作入力のサンプル値列 $\boldsymbol{y} [y(N), y(N-1), \dots]$, $\boldsymbol{u} [u(N), u(N-1), \dots]$ の情報を記憶機構により得て、(5・2)式の信号 v の正負に応じてこれらの情報を $v \geq 0$ あるいは $v < 0$ の二つのカテゴリに分類するための判別関数が構成される。つぎに必要な操作入力の推定はこの判別関数を利用して行なう。この推定操作入力による場合に操作入力に飛躍現象がみられ追跡速度が速められる。しかし判別関数の構

成条件が満たされない場合には確率的論理機構のみによって操作量の修正を行なう。以上の強化スケジュールによって制御策が次第に学習される。つぎに各機構に関する動作原理を示す。

動作評価機構は制御動作の傾向が制御目的を達成するために望ましいか否かを判定する機構である。システムの動作評価がいま

$$PI \triangleq \sum_{k=0}^f \int_{t_k}^{t_k + \tau} F(t) dt \quad (\text{ただし } F \geq 0) \quad (5 \cdot 6)$$

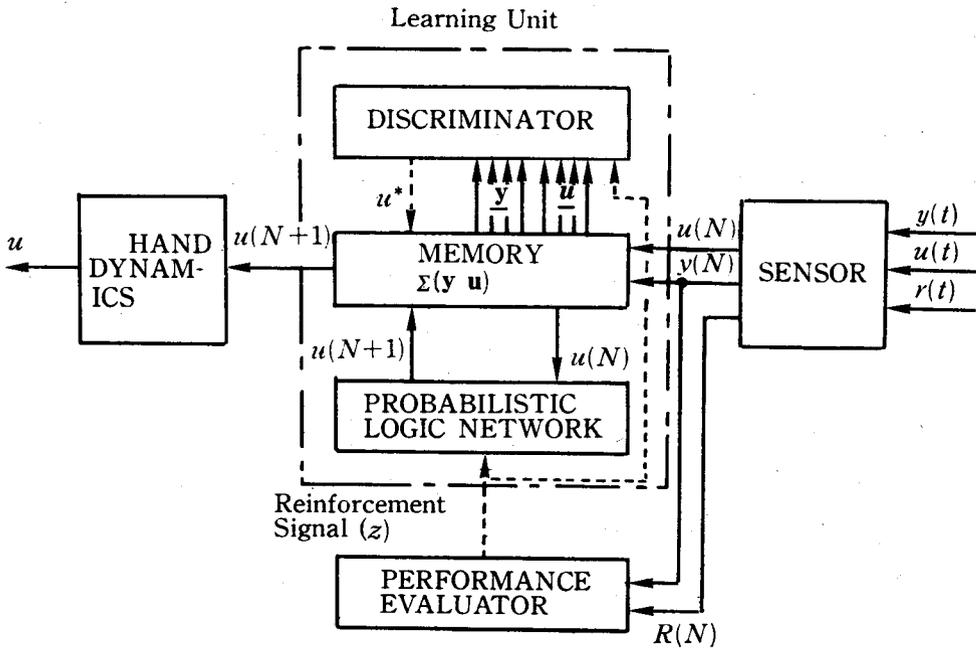
で定義されているものとする。ところで人間はせいぜい2次の微分能力しかもたないと考えられているので、 $F(t)$ のTaylor展開によって(5・6)式は

$$PI = \sum_{k=0}^f \left[F\tau + \left(\frac{dF}{dt}\right) \frac{\tau^2}{2!} + \left(\frac{d^2F}{dt^2}\right) \frac{\tau^3}{3!} \right]_{t=t_k} \quad (5 \cdot 7)$$

したがって $\frac{d^2F}{dt^2}$ は強化形式モデルがある任意な動作時刻 $t = t_k$ で変化させうる最も高次の微分項となる。ここで5-3で述べた操舵実験では評価関数 PI が IAE であることを考慮して $F = |e|$ とおけばこの場合には不等式

$$Z = -\text{sign } e \cdot \text{sign } \ddot{e} > 0$$

が $\text{Min}[PI]$ を達成するための十分条件となる。したがって動作評価機構は



第5・4図 強化学習形式モデルの構成図

$Z > 0$ あるいは $Z < 0$ にのみ基づいて応答の成否を判定する二者択一的な判定機構となっている。

確率的論理機構は応答評価を与える強化信号 Z に基づいて特性未知な制御対象の動特性の認知に必要な探索および最適化を漸近的に促進し、判別関数の発見を容易にする役割を果たす。したがってディザ信号に相当した操作端の微小変化は最適化の過程でこの機構によって得る。(5・1)式の Z に応じて操作量の変動を考慮するには $\text{sign } Z$ と $\text{sign}[u(t) - u(t - \tau)]$ との関連性すなわち対象の極性を明らかにすることが必要である。いま操作入力を選択空間を Ω_u とすれば量子化された各操作量 u_i ($i = 1, 2, \dots, q$) は

$$u_i \in \Omega_u \quad \text{ただし} \quad u_i < u_{i+1} \quad (5 \cdot 8)$$

となる。 u_i から u_j への操作量間の遷移確率を p_{ij} とし、この確率にしたがって操作量の遷移を行ない最適化を促進する。すなわち engram p_{ij} (ただし $j = i + 1$ でなければ $p_{ij} = 0$) を用いて学習進行率 dp_{ij} / dt を定め、つぎの強化スケジュールを用いる。

$$dp_{ij} / dt = \tilde{C}_1 (1 - p_{ij}) \theta(Z) - \tilde{C}_2 p_{ij} (1 - \theta(Z)) \quad (5 \cdot 9)$$

$$\text{ただし} \quad 0 < \theta(Z) < 1, \quad \tilde{C}_1, \tilde{C}_2 : \text{定数}$$

(5・9)式において $\tilde{C}_1 = \tilde{C}_2 = \tilde{C}_0$ とおき、さらに差分方程式で表わすと(5・9)式は簡略化され、Bush-Mosteller 形学習モデルである(2-3)式に相当する

$$p_{ij}(N) = e^{-\tilde{C}_0 \tau} p_{ij}(N-1) + (1 - e^{-\tilde{C}_0 \tau}) \theta(N-1, Z) \quad (5 \cdot 10)$$

が得られる。 $\theta(N, Z)$ は強化確率とよび、 $p_{ij}(N)$ の学習目標で、 $N \rightarrow \infty$ に対して $p_{ij}(N) \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \theta(\infty, Z)$ となる。 $\theta(N, Z)$ は各サンプル時刻での信号 Z の正值の頻度とした。(5・10)式によって定まる確率分布に従う操作量間の微小遷移により、(5・7)式の評価値が漸次、減少傾向を示すようになる。

記憶機構では制御経験として時刻 N までに得た対象出力および操作入力のサンプル値列 y, u の組 $\Sigma(y, u)$ が記憶されている。これらの記憶内容は時間の経過に伴い順次新しいサンプル値と入れ替える。

判別機構は対象に対する同定機能の役割を果たすとともに、動特性に応じた制御方策を実行して、最適操作条件の追跡速度を改善する¹¹⁾。まず未知な制御対象に対し、人間はつぎの出力方程式を想定すると仮定する。

$$y(N+1) \triangleq f \{ y(N), y(N-1), \dots, y(N-m+1), u(N), u(N-1), \dots, u(N-n+1) \} \quad (5.11)$$

(5.11)式は Moore type finite memory automaton と呼ばれる。ここでは制御対象を線形系に限定する。(5.11)式は

$$y(N+1) = \tilde{\alpha}_1 y(N) + \tilde{\alpha}_2 y(N-1) + \dots + \tilde{\alpha}_m y(N-m+1) + \tilde{\beta}_1 u(N) + \tilde{\beta}_2 u(N-1) + \dots + \tilde{\beta}_n u(N-n+1) + \tilde{r} \quad (5.12)$$

となる。 \tilde{r} は y および u で表現しえない特性を補なうための補正項である。 $e > 0$ において (5.1) 式の強化信号 Z と対応づけて (5.12) 式の未知な定係数 $\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \dots, \tilde{\alpha}_m, \tilde{\beta}_1, \tilde{\beta}_2, \dots, \tilde{\beta}_n, \tilde{r}$ を決定するため、まず ξ を次式で定義する。(ただし、 $e > 0$ においても同様)。

$$\xi \triangleq 2y(N) - y(N+1) - y(N-1) \quad (5.13)$$

(5.13)式に(5.12)式を代入して、 $y(N+1)$ を消去すれば

$$\begin{aligned} \xi &= (2 - \tilde{\alpha}_1) y(N) - (1 + \tilde{\alpha}_2) y(N-1) - \tilde{\alpha}_3 y(N-2) \\ &\quad - \dots - \tilde{\alpha}_m y(N-m+1) - \tilde{\beta}_1 u(N) - \tilde{\beta}_2 u(N-1) \\ &\quad - \dots - \tilde{\beta}_n u(N-n+1) - \tilde{r} \end{aligned} \quad (5.14)$$

となる。(5.14)式において

$$\begin{aligned} w_0 &= \tilde{r} \\ w_1 &= 2 - \tilde{\alpha}_1, \quad w_2 = -1 - \tilde{\alpha}_2, \dots, \quad w_m = -\tilde{\alpha}_m \\ w_{m+1} &= -\tilde{\beta}_1, \quad w_{m+2} = -\tilde{\beta}_2, \dots, \quad w_{m+n} = -\tilde{\beta}_n \end{aligned}$$

とおけば

$$\xi = \sum_{i=1}^m w_i y(N-i+1) + \sum_{j=1}^n w_{m+j} u(N-j+1) - w_0 \quad (5.15)$$

を得る。ところで制御動作の適否をきめる強化信号 Z の正負は第 5.2 図に示すように目標値 r が一定の場合 ξ の正負に対応する。したがって u の変化も考慮して (5.2) 式の v の正負に応じた $\Sigma(y, u)$ のデータ群を観測空間上で二分する。換言すれば $\xi = 0$ を満たす判別関数 g すなわち

$$\hat{w}_0 = \sum_{i=1}^m \hat{w}_i y(N-i+1) + \sum_{j=1}^n \hat{w}_{m+j} u(N-j+1) \quad (5 \cdot 16)$$

の係数 $\hat{w}_0, \hat{w}_1, \dots, \hat{w}_{m+n}$ は判別関数法によって求まる。(5・16)式を用いて現在の操作入力 $u(N)$ に対する対象の出力の未来変化を考慮し、つぎに与えるべき操作入力 $u(N+1)$ の調整すなわち動作点の変更を行なう。(5・16)式の関係は制御対象の伝達関数の分子の次数に比べ、 m, n が十分大きければ予測されるいかなる動作点においても成り立つ。ここで(5・16)式の $y(N-i+1), u(N-j+1)$ の項にそれぞれ目標動作点(y_i^*, u^*)を代入することによって

$$u^* = \frac{\hat{w}_0 - (\hat{w}_1 y_1^* + \hat{w}_2 y_2^* + \dots + \hat{w}_m y_m^*)}{\hat{w}_{m+1} + \hat{w}_{m+2} + \dots + \hat{w}_{m+n}} \quad (5 \cdot 17)$$

ただし $y_i^* = r_i + k_0 \Delta e_i$ ($i=1, 2, \dots, m$)

$r_i, \Delta e_i$: 時刻 $N-i+1$ における目標値と偏差の中心差分

k_0 : 零または正の実数

u^* : 操作入力 u の予測値

(5・16)式を(5・17)式に代入し、 \hat{w}_0 を消去すれば

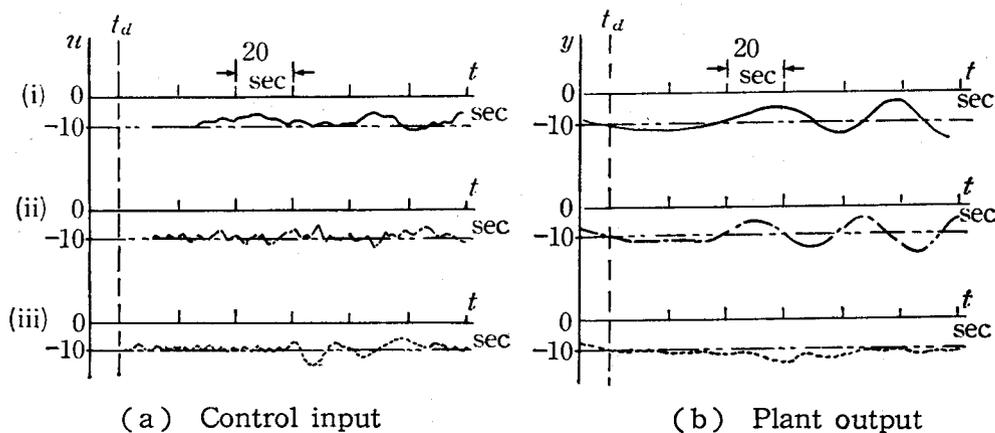
$$u^* = \frac{\hat{w}_{m+1} u(N) + \hat{w}_{m+2} u(N-1) + \dots + \hat{w}_{m+n} u(N-n+1)}{\hat{w}_{m+1} + \hat{w}_{m+2} + \dots + \hat{w}_{m+n}} \\ = \frac{\hat{w}_1 (e_1 + k_0 \Delta e_1) + \dots + \hat{w}_m (e_m + k_0 \Delta e_m)}{\hat{w}_{m+1} + \hat{w}_{m+2} + \dots + \hat{w}_{m+n}} \quad (5 \cdot 18)$$

となる。したがって u^* は $\hat{w}_1 \sim \hat{w}_{m+n}$ が得られれば操作量の加重平均と予測偏差の加重和で計算できる。さらに手・腕のダイナミクスを一次遅れ要素に通せば、手動による操作入力 u が得られる。

5-5 学習過程のシミュレーション

強化形式モデルの動作を被験者の制御動作と比較するため、モデルのデジタル・シミュレーションを行なった。第5・2図(i)~(iii)に示した被験者の制御動作を強化形式モデルによって模擬したのが第5・5図(i)~(iii)である。まず第5・2図(i)に示す被験者の u の変化に着目すると、対象の出力に合わせて操作端に微小

変化を加えながら操作を行ない、動作点を漸近的に移行させる制御策がとられていることがわかる。したがって被験者の学習初期(i)の応答に対応するモデル応答を実現するため、確率的論理機構のみによる制御を行なわせた。その結果、被験者の応答特性と同様、不安定な系を制御し対象出力の発散を防ぎとめるほどにはゲイン調整が十分でなく、また速応性に欠けているために制御成績も悪い。つぎに被験者の過程(ii)について言えば(i)より応答が改善されているといえる。これは被験者自らのゲイン調整による学習効果の現われであろう。被験者の学習中期(ii)に対応するモデル応答を実現するには試行途中で記憶されているデータ群より判別関数の成立条件が満たされるごとに u^* を求め、 u^* をハンドダイナミクス(一次遅れ要素)に通してモデル応答とすればよい。このようにして得たモデル応答は(i)に比較して改善されてはいるが、 u の u^* への追従性が悪くかつ用いた判別関数 g の推定結果が不十分なために十分な制御成績が得られていない。被験者の過程(iii)は(i), (ii)に比べ制御成績の向上がみられる。被験者の過程(iii)の応答をモデルで実現するには十分なデータにもとづいて正確な判別関数を用いることが必要である。そこで制御対象の特性を既知とし(5・11)式~(5・16)式の手順を用いて理論的に判別関数を求める。この理論式によって定まる u^* を(5・18)式によって算出し、ハンドダイナミクスを通してモデル応答(iii)を得た。



第5・5図 強化学習形式モデルによるシミュレーション

- (i) 確率的論理機構のみによる応答例
- (ii) 不完全情報にもとづく判別関数を利用した応答例
- (iii) 理想的な判別関数を利用した応答例

5-6 結 言

制御工学の分野においては過去10数年にわたって自己調整系、自己組織系および学習制御系などの研究テーマを通じ、人間のもっている高度な知的能力である学習機能を取り入れた制御則の達成を目指してきた。この目的を達成するためのひとつのアプローチとして人間と機械が共存する人間-機械系での人間のふるまいから学習機能を学びとることが考えられている。何故なら人間-機械系の例として船舶や航空機などの自動操縦系をみれば明らかなように、これらの系では不測の事態の発生に備えて人間がコントローラの役割をもって制御系内にとどまり、融通性のある適応能力を発揮してきたからである。さらに大きな理由は人間の学習機能が機械特性とのかかわりでとらえられるからであろう。そこで本章では船の操縦システムをとりあげ、オートパイロットの故障によって系が不安定に移行する事態を模擬回路で実現し、被験者が行なう安定化のための補償作業を通じてその学習機能を解析した。すなわちプログラム学習に則って実験を実施し、学習者すなわち被験者の段階的な習熟過程を判別関数法によって解析した。さらに解析結果にもとづいて判別関数を利用した強化形式モデルを提案し、モデルの時間応答性と被験者の試行結果との比較をおこなった。こうして人間は例えば制御策を判別関数の形で記憶し、これを適切なものへと近づけることで自らの応答改善に役立てているのではないかとの考え方を示し、検証した。今後とも制御工学的な立場から人間の学習機能の解析をさらにすすめ人間の学習機能に匹敵する機能を備えた学習制御装置の開発に役立てなければならない。学習制御装置の実現が叶えば系に未知な要素が含まれているためにあらかじめ制御装置の設計が十分に行なえない場合にも、人間の判断能力と類似な手段を提供することができるであろう。

第 5 章の参考文献

- 1) 川端・辻：手動制御系の適応特性，電気試験所彙報，Vol.28, No.6, UDC 651-51(昭39)
- 2) L.R. Young：On adaptive manual control, IEEE Trans on MMS, Vol. MMS-10, No.4, pp. 292-331(1969)
- 3) D.McRuer and D.H.Weir：Theory of manual vehicular control. IEEE Trans on MMS, Vol. MMS-10, No.4, Part II, pp. 257-291(1969)
- 4) 小畑・磯部：手動制御系の適応性，計測自動制御学会論文集，Vol.6, No.3, pp.221-227(昭45)
- 5) 田口・藤井：ヒューマン・コントローラの学習モデル化について，第2回バイオメカニズム・シンポジウム前刷集，No.16, pp.211-223(昭46)
- 6) D.L.Kleinman and A.V.Phatak：Current status of models for the human operator as a controller and decision maker in manned aerospace systems. Paper No. TA3-3, Proceedings of the 1972 IEEE Conference on Decision and Control, or 11th Symposium on Adaptive Processes, pp. 266-271(1972)
- 7) 藤井・田口：学習のアルゴリズムと制御系，システムと制御，Vol. 16, No.1, pp.25-33(昭47)
- 8) R.L.Barron：Self-organizing and learning control systems, Cybernetic Problem in Bionics(H.L.Oestreicher and D.R. Moore, editors) Gordon and Breach, pp. 158-163(1966)
- 9) 竹内 啓：数理統計学—データ解析の方法—，東洋経済社，pp. 349-354(昭38)
- 10) 田口・藤井：ヒューマン・コントローラの学習過程とそのモデル化，計測自動制御学会論文集，Vol. 10, No.5, pp. 32-40(昭49)
- 11) H.Taguchi and K.Fujii：An application of heuristic programming to reinforcement learning control systems, Tech. Rept. of the Osaka Univ, Vol. 20, No.961, pp.698-710(1970)

第 6 章 結 論

本研究では行動面における適応・学習の脳機能の制御工学的な解析を拠として脳機能の同定を試みた。

第 2 章では適応・学習の脳機能が生理学、心理学それぞれの立場から現在どのように解釈されているかを整理し述べた。またこれらの機能が視覚入力を得て運動指令を出力するまでの脳機構にいかに関与して行動面で豊かな多様性を生み出しているかを概観した。さらに反射の考え方にもとづき脳をひとつの統合系とみて、その入出力を制御工学的思考を加味して取り扱い脳機能を解析できるとの見解を示した。第 2 章での考え方をもとにして第 3 章以下では具体的な問題として、身体運動と脳機能のかかわり、人間が機械系を駆使して外部環境系と協調を保つしくみを取り上げた。これらの各問題において脳の適応・学習機能がいかに中心的役割を果たしているかを計測データの解析とシミュレーションによって確かめた。

第 3 章においては脳による身体運動制御のしくみを制御工学的に説明づけた。すなわち脳の解剖学的・生理学的な知見および機能仮説を紹介し、これらの知識と実験結果から推定される視覚-運動特性とを矛盾せず結びつけ、運動脳の工学的イメージを描いた。この手順によって開発された脳モデルは脳の各部分がいかに有機的に結びつき、運動の制御にかかわっているかを説明づけてくれる。

第 4 章、第 5 章においては各種制御作業における適応・学習機能を取りあげた。人間が機械を介して外部環境と情報交換を行ない、相互関係を保っている状況では脳内機構と対応づけて機能同定することは困難であった。そこで脳をブラックボックスとみて脳の適応・学習機能を数学的に分析し組立てることで機能を再現し、脳のしくみの理解に努めた。その結果人間の制御動作にはいくつかのパターンがあり状況に応じて適宜使い分けたりあるいはその制御動作を環境情報と組み合わせることで記憶することで適応・学習の機能を発揮しているのではないかと推論づけた。

本論文の主目的は人間行動を機械的な動きとみてその行動原理を把握し、理論構成することであった。本研究を進めることで人間行動と機械動作との類似性と特異性を再認識し、その波及効果として新たな機械設計が望めると考えた。しかしながら人間行動の巧緻性と多様性をみるとき本研究で得た成果はあまりにも限られた条件下でのものにすぎず人間行動の特長でもある柔軟性を十分に表現するまでには至らなかった。その理由のひとつは本論文では人間の比較的単純な動作を対象としたためであろう。今後は本論文を礎としてさらに高度な身体運動の脳メカニズムの解明をめざすことで人間行動の本質にせまることが必要である。

謝 辞

本論文は筆者が大阪大学工学部電気工学教室において行なった研究の結果をまとめたものである。

本研究の遂行にあたり終始懇篤なる御指導、御鞭撻を賜わった藤井克彦教授に深甚なる謝意を表します。また西村正太郎名誉教授および鈴木 胖教授には本研究の端緒より御指導ならびに御助言を賜わった。ここに衷心より感謝の意を表します。

本論文の作成にあたり、木下仁志教授、山中千代衛教授、犬石嘉雄教授、児玉慎三教授、横山昌弘教授には多くの有益なご助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

また本研究の過程においてご教示を賜わった基礎工学部 桜井良文教授、辻三郎教授、須田信英教授、鈴木良次教授、田村 博助教授、大阪府立大学工学部 畑 四郎教授、浅居喜代治教授、津村俊弘教授ならびに広島大学工学部 西村行雄講師の各先生方に心から御礼申し上げます。

健康体育部 黒田英三教授、笠井 健教授、工学部電気工学教室 村上吉繁助教授、森田龍彌助教授、赤沢堅造助手には本研究を通じて有益な御討論やご助言を頂いた。また藤井研究室、鈴木研究室および旧西村研究室の諸兄より数限りない御援助を戴いた。ここに厚く御礼申し上げます。

最後に本学工学部あるいは工学研究科の卒業研究として本研究に参加され、よき共同研究者となって頂いた諸氏に心より感謝の意を表しますとともに厚く御礼申し上げます。