

外乱条件を含む神経階級制御系の フィードバック補償に関する研究

Feedback compensated nervous hierarchy control
systems including disturbing functions

秋葉光俊 宮本芳文
Mitsutoshi Akiba Yoshifumi Miyamoto

The aim of our study is to examine the effectiveness of biofeedback control on the human nervous systems including external or internal disturbing functions, such as visual, somesthetic or psychologic stimuli. In audio-alpha-feedback training, a subject is used to sit in a chair with eyes closing, but in our study, the subjects were given instructions, "open your eyes", "stand quietly" and "walk quietly". The results of the experiments show that visual and somesthetic disturbances inhibit alpha activities strongly, but biofeedback training can enhance alpha activities in the disturbed systems.

As for psychologic disturbance, we designed to examine the effects of intentional feedback signals on alpha biofeedback training. The threshold level of the feedback signals to the subjects was varied according to the experimenter's intention, and subjects were not told that fact. When the threshold was set downward, alpha activities were enhanced, and when it was set upward, alpha activities were inhibited. By the results, it was supposed that the subjects has misgivings about that feedback signals. It is considered that the feedback signals to the nervous control center include not only the signals transmitted from the biofeedback instruments, but the subjects' psychological estimated values. Therefore, by the results of our experiments, it was concluded that "self-persuasion" played important role in alpha activity increasing when the nervous system was disturbed psychologically.

1. 緒言

生体内神経線維回路は皮質連合を最高次制御中枢とする階級制御系を構成している。ある生体現象を連続的に検出し、視覚・聴覚などによって最高次制御中枢にフィードバック（バイオフィードバック）するという外的フィードバックが、自律系に対する随意制御を促進することは、研究的にも実証的にも衆知である。聴覚バイオフィードバックでは、閉眼・腰かけ正姿勢を基本的な被験条件として設定している。この条件は神経系制御回路に加えられる外乱（筋緊張、感覚刺激など）を最少に制限する。本研究では、聴覚バイオフィードバックの被験条件として、開眼、直立位、歩行運動などの身体的外乱入力を導入した。また、フィードバック

ク信号に疑惑を起させる作為的信号を用いて心理的外乱入力を導入した。視覚、平衡感覚、運動感覚あるいは心理思考などの外乱入力に神経系に投入される過程を制御回路的観点から検討し、これらの外乱が制御性に及ぼす影響を実験的に検討することを本研究の目的とした。最高次制御中枢としての統合システムには学習機能を含んでいるので、外乱入力の心身平衡に及ぼす影響は学習により漸減すると推定できる。外的フィードバック回路を付加することによるこの漸減効果の促進についても実験により併せ検討した。外的フィードバック信号としては脳波を検出し、 α 波出現率を心身平衡の評価対象とした。

2. 外乱に対する神経系階級制御機能の対応

W. Penfield (1938)¹⁾ は、新皮質の機能区分は、古い脳幹内にある分野が外部へ生長するか投射したものであることを臨床的に実証した。Penfield が高位脳幹と指摘した視床の入出力について Fig. 1 にまとめた。すなわち、前核群 (A) は Papez's 回路の経路、背内側核

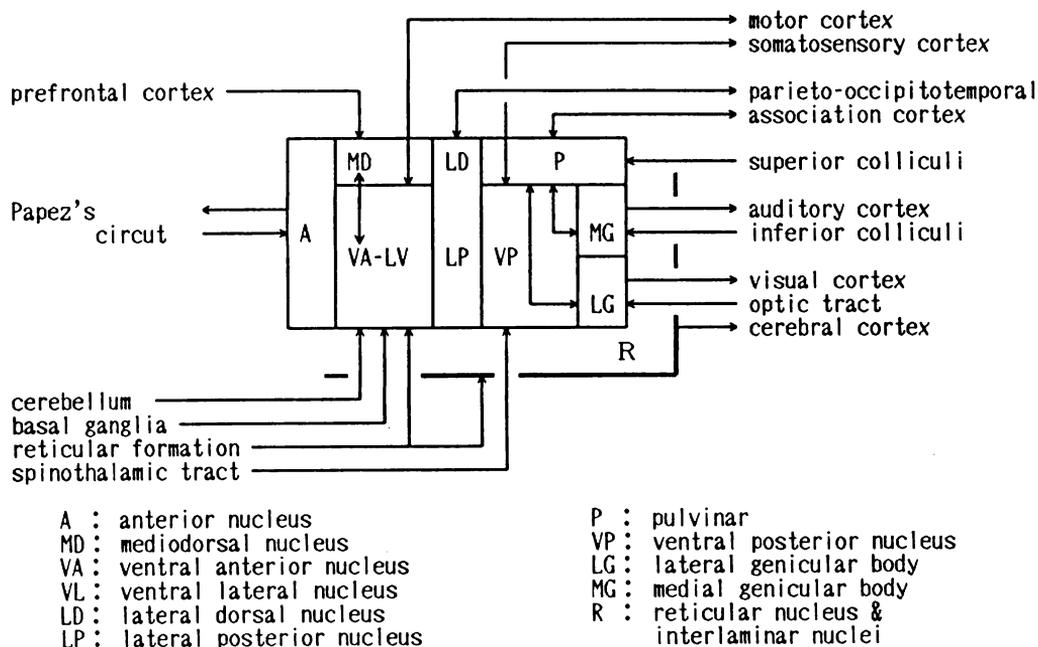


Fig.1 Thalamus : anatomical connections to the cortex including the afferent nervous system.

(MD) は前頭前野との連絡、腹側核群のうち (VP) は体性感覚、(VA-VL) は小脳・基底核などを経て運動系情報が皮質へ投射する径路の中継、側核群(LD), (LP)は頂・側・後頭連合皮質への連絡、膝状帯群 (LG)、(MG) はそれぞれ視覚と聴覚との情報中継の役割を司る。その他、視床枕 (P) は皮質下組織と連合皮質との広範囲な相互連結を統合し、網様核 (R) は視床を囲んで視床の各群の相互間および皮質—視床間に線維配置を行う。²⁾³⁾⁴⁾ これらの機能から視床—皮質系が神経系の階級制御の最高位中枢と考えられる。

なお、視床内の細胞間で形成される回路網によって、視床が皮質のペースメーカーとしての

機能をもつと仮説されている。⁵⁾ また、視床内のニューロン相互間は同期して活性化しやすい連絡を構成し、網様核の軸索は、活性細胞と抑制性細胞とに結合して、回路の活性化を抑制するようなフィードバック回路を構成する。これら視床内ニューロンの発火は脳幹網様体上行性賦活系および抑制系の作動に支配される。

本研究においては、バイオフィードバックの条件として、閉眼、腰かけ正姿勢以外に、開眼、直立位、歩行を命じた。これらの条件では、視覚および平衡・運動に伴う体性感覚が心身制御への外乱として加えられる。

視覚情報は視交叉から外側膝状体を経て皮質の視覚野に至るが、一部は視交叉から網様体・上丘・視床枕へ、その他視蓋前域、視床下部などにも連絡をもっている。

直立位、歩行については、先ず重力に対し身体を支持する必要がある。この機能は脊髄の伸筋突伸反射機能が司る。身体各部位の筋緊張は平衡機能系によって制御される。歩行による手足の律動運動は、対重力支持と平衡性が安定すれば、脊髄の相反抑制反射に移管される。神経系制御回路のうち、直立位、歩行運動に係るものを Fig.2 に括めた。筋あるいは前庭器官

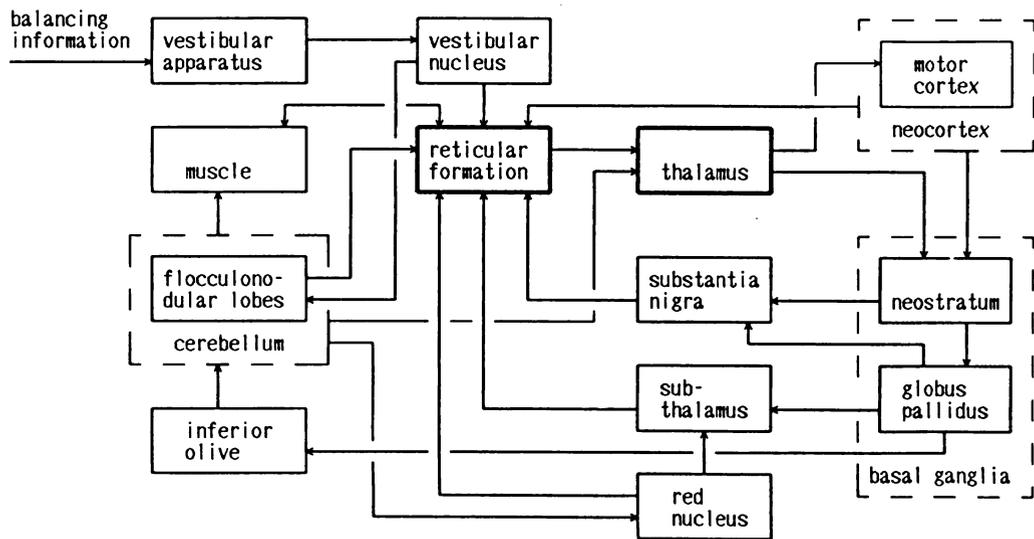


Fig.2 Interconnections of nervous mechanisms of body support against equilibrium and gravity

の受容信号は脳幹網様体—視床—運動皮質の上行径路をとるが、その他、直立姿勢、運動の予測およびプログラムに関して小脳、意識下運動に関して基底核、歩行に関して視床下核、動きのリズムに関して黒質などが制御機能を分担している。⁶⁾

視覚、平衡維持何れの場合も外乱入力には網様体から W. Penfield の所謂“中心脳系の統合野”である視床に上行し、入力信号の解釈、記憶想起による識別、意識決定などの思考変化が皮質各領野の連合システム回路によって行われる。同時に視床—辺縁系—視床下部の情動回路にも変化を生ぜしめる。これらの各部位間の連絡システムの要点を Fig.3 として括め、この機能的連絡として Fig.4 に示す。

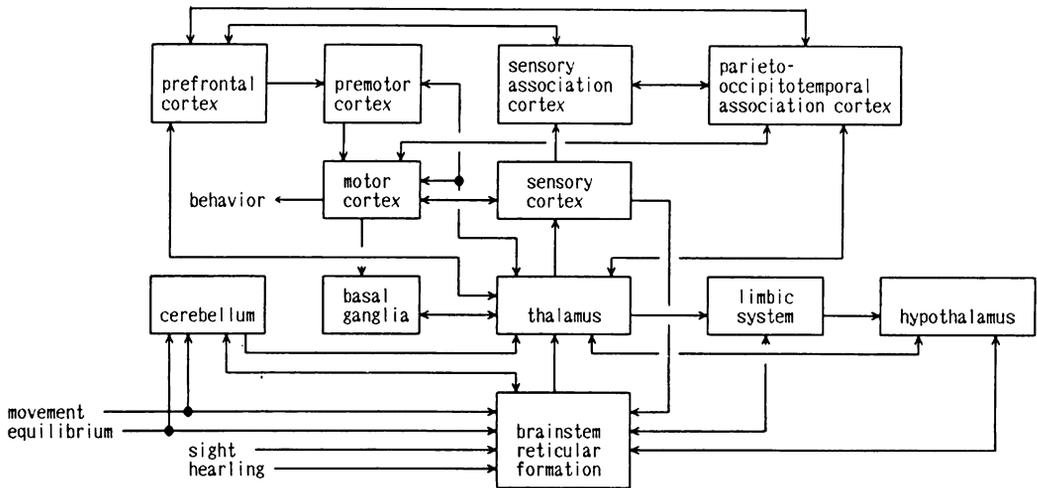


Fig. 3 Brock diagram of afferent and efferent anatomical connections in the nervous control system.

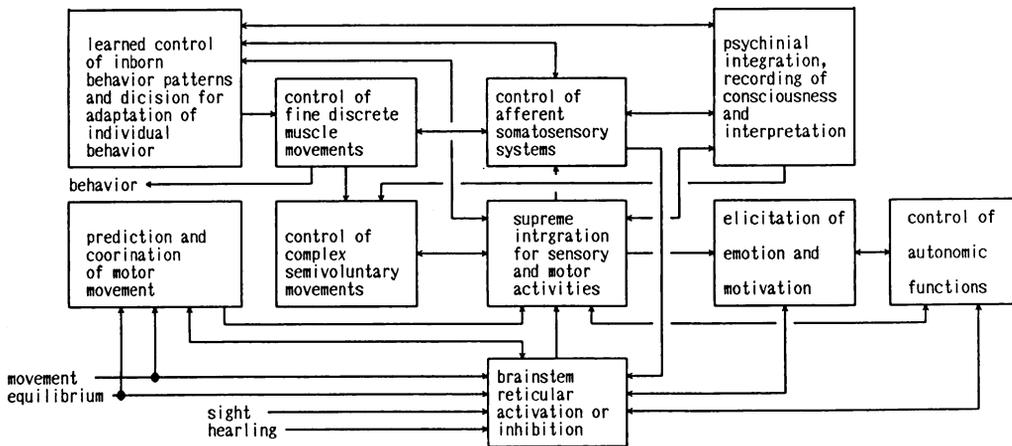


Fig. 4 Block diagram of afferent and efferent functional connections in the nervous control system.

視床—皮質系のインパルス周期は前述のごとく視床内ニューロンの発火によるものであり、視床網様核の機能による細胞間フィードバック結合により、心身平靜時には視床内細胞は70-150 msecの発火周期をもつといわれている。⁷⁾ 従って、外乱入力により網様体—視床系細胞が活性化すれば、視床—皮質系内のニューロン回路のリズムを破るので、脳波測定時には α 波の脱同期化現象が記録される。

聴覚フィードバックでは、フィードバック信号である聴覚入力聴覚神経系を經由して高次中枢に至り、中枢はその時点の心身状態を認識する。聴覚情報は前庭器官から脳幹網様体・視床を上行し皮質聴覚野に至り、さらに皮質連合系に入る。聴覚連合野では音の意味を判断し、側頭葉、前頭前野の連合系との連結で、貯蔵されている記憶との対比により思考が決定され、網

様体—視床系にフィードバックされる。また視床—辺縁系—視床下部の系による情動への影響も考えられる。

3. 実験方法

被験者 21～22才男子健常者8名。

実験装置 聴覚による α 波フィードバック伝送システムを次の機器を用いて構成した。

被験室：脳波電極付きベルト、接地電極、脳波検出FM波発信器（携帯型）、FM波受信器（携帯型）。被験室は薄暗く静寂とし、被験者は後頭部と前額部とに電極が位置するよう電極ベルトを装着し、耳朶に接地電極をとりつけた。

測定室：FM波受信器、バイオフィードバック装置（前置増幅器、60Hz用ハムフィルタ、バンドパスフィルタ、閾値設定、整流、変調）、波形記録計、パーセントタイムデジタル表示器、FFTアナライザ、FM波発信器。バンドパスフィルタは、4～8Hz（ θ 波）、8～13Hz（ α 波）、13～200Hz（ β 波およびEMG）の3帯域に周波数分別し、それぞれ400Hz、800Hz、1600Hzの音に変調しフィードバックした。測定室は被験室の隣室とした。

実験内容 視覚および体性感覚に与える外乱（実験Ⅰ）と、心理的外乱（実験Ⅱ）とを計画した。本実験では、開眼・直立位・歩行などすべて筋電位の混入する姿勢を用いるので、実測の事前に13～200Hz帯域のフィードバック訓練を命じ、併せてFFTアナライザで監視して、それぞれの姿勢において筋電位が閾値（15 μ V）以下であることを確認した後 α 波の出現率（閾値20 μ V）を実測した。

(1) 実験Ⅰ

予備実験として、全員腰かけ正姿勢、開眼で安静な状態での α 波出現率を実測し、続いて聴覚フィードバック機器を用いて α 波出現率を向上させるような努力をすることを命じて推移を調査した。実測は1試行各被験者2分間を原則とし、筋電位の混入が見られたときには実験を中止した。また実験は隔日7回試行して予備実験を終了した。本実験は先ず対重力支持、平衡維持を含めた体性感覚外乱の影響を検討する目的で、開眼・歩行状態、閉眼・直立位、閉眼・腰かけ正姿勢の順位でそれぞれ7回の実測を行い、平均値を算出した。歩行状態は筋電位が閾値を超えない程度の静かな徐行歩行とした。次に視覚外乱の影響を検討する目的で、開眼・歩行状態、開眼直立位、開眼・腰かけ正姿勢の順位での実測を行った。

(2) 実験Ⅱ

本実験は開眼状態で行った。歩行、直立位、腰かけ正姿勢の順序で実測した。この実測過程終了後作為的フィードバック過程の実測を行った。測定者は被験者に通知しないで、フィードバック信号の閾値を変更し、従前の20 μ Vから15 μ Vに減少させた。その時 α 波出現率計測回路の閾値は従前通り20 μ Vに保持した（Fig.5）。この設定条件で歩行、直立位、腰かけ正姿勢の順序で実測し、次の過程では閾値を25 μ Vに上昇させた。閾値減少（増加）の場合は、信号音が閾値20 μ Vの状態に比べて急激に増加（減少）することになるので、被験者に心理的な何らかの反応が誘引されることが期待できる。

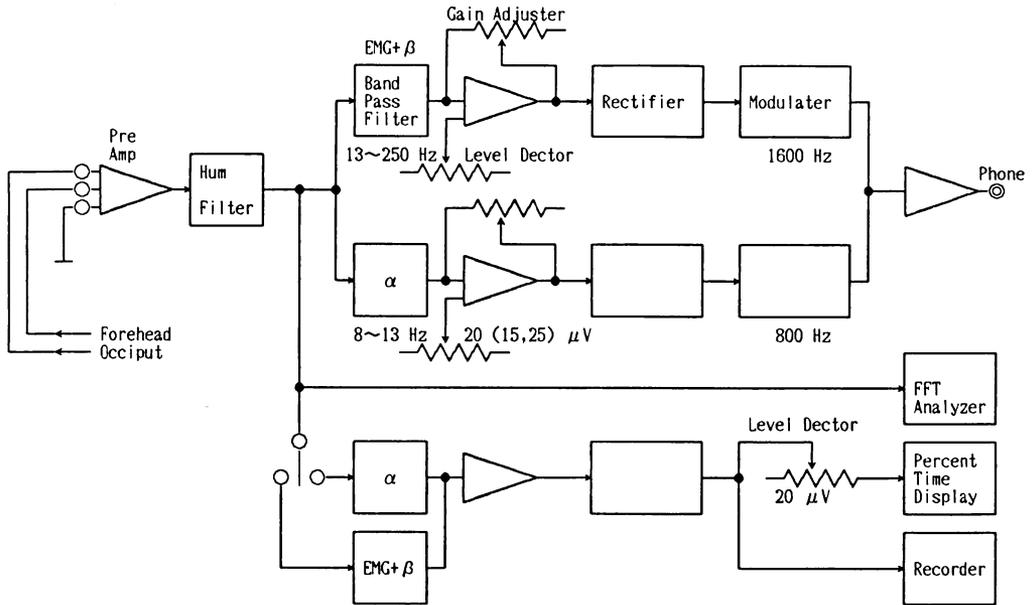


Fig.5 Intentional biofeedback system configuration

4. 実験結果および考察

実験Ⅰ、実験Ⅱの結果をそれぞれ Fig.6~7、8~10に示す。各期間のα波出現率平均の初期値を y_0 、最終到達値を y_s とし、 t 回目のα波出現率 $y(t)$ を、

$$y(t) = y_s - (y_s - y_0)e^{-\lambda t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

なる学習曲線によって向上推移するものと考え、回帰曲線を求めて、それぞれのデータに併記した。図中実線はフィードバックのない場合、点線はフィードバック機器を用いた場合の回帰曲線を示す。α波出現率の値はパーセントタイムデジタル表示器の表示値である。

(1) 実験Ⅰ

Fig.6は開眼での腰かけ正姿勢、直立位、歩行状態におけるα波出現率の比較、Fig.7は腰かけ正姿勢、直立位、歩行状態での閉眼時と開眼時との比較を括めた結果である。これらの各実測は、同一被験者群を追時的に測定したもので並列な実測ではないので、各セッション間には訓練の多寡があるため、データの定量性には問題があるが、定性的に次のような考察をした。

(1) Fig.6によると、直立時の平衡感覚外乱に対する抑制機能は大きく、腰かけ時と直立時とのα波出現率の差は小さい。しかし、訓練による学習効果、とくに聴覚フィードバック効果が腰かけ時より劣るのは、連合野からの意志指令の多目的分散によるものと考えられる。以上の考察は Fig.7の開眼直立位においても同様である。

(2) Fig.6によると、歩行運動時には平衡感覚以外に運動機能操作の筋運動制御系の制御機能が加わるため、直立位との差が大きくあらわれた。しかし学習効果は期待できる。

(3) Fig.7によると、視覚による外乱は何れの姿勢の場合にも大きく影響している。視覚外乱を抑制することが容易でない事実は、“瞑想”を価値づけるものであるが、開眼での環境へ

の適応は心身制御にとってさらに重要なものと考察する。

(4) 本実験ではフィードバックの有無それぞれの実測を行ったが、フィードバックなしの場合でもその前回までのフィードバック経験を記憶しているので、間接的にはフィードバックの影響を受けている。フィードバックによる学習を重ねることによる効果は(1)式の λ の数値から理解できる。実験Iの結果の(1)式の各係数についてはTable 1に示す。Fig. 7の開眼、歩行の場合では、視覚外乱と歩行による外乱と重畳し、 $\lambda = 0.07, 0.08$ と小さな数値を示した。この場合にはフィードバック音への注意集中を外乱が抑制している。

(2) 実験II

Fig. 8, 9, 10にそれぞれ歩行状態、直立位、腰かけ正姿勢の場合の結果を括め、各図においては、フィードバック信号閾値を実験I通

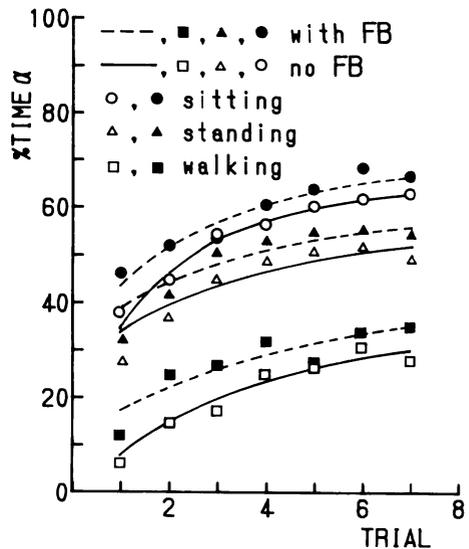


Fig. 6 Mean percentage time alpha changes during feedback training with eyes closing in 3 postures (sitting standing and walking).

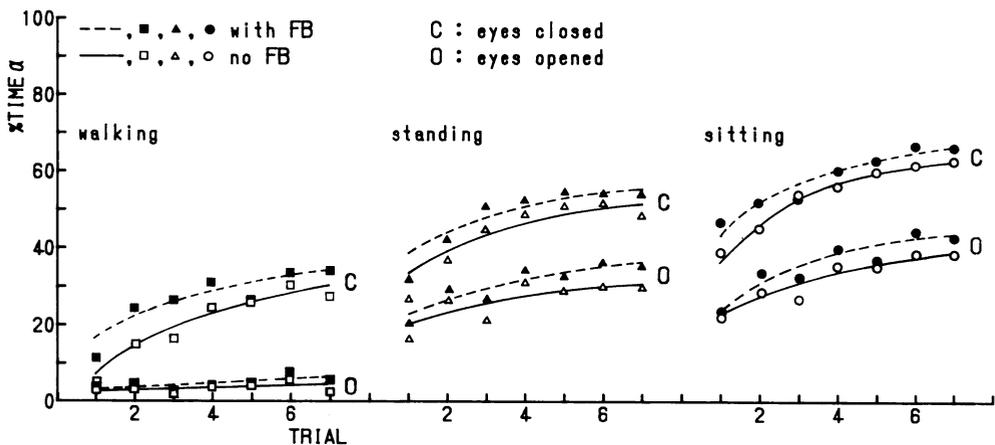


Fig. 7 A comparison of mean percentage time alpha between "eyes closed" period and "eyes open" period

り $20 \mu V$ と設定した場合、作為的に $15 \mu V$ に設定変更した場合、作為的に $25 \mu V$ に設定変更した場合の3セッションを順にプロットした。作為的フィードバックの実験については、被験者は、 $15 \mu V$ の実験では爽快感、機器への不信など、 $25 \mu V$ の実験では体調への疑惑、焦燥感、機器への不信などの心理変化を来したことを内省報告している。この実験結果によると、何れの姿勢においても閾値を下げフィードバック音を増加させた場合は、 α 波出現率は勾配の大き

		walking	standing	sitting	
C	---	$y=40-29.3 e^{-0.25t}$	$y=60-27.3 e^{-0.28t}$	$y=70-37.2 e^{-0.35t}$	Fig.6
	—	$y=35-36.9 e^{-0.30t}$	$y=55-29.6 e^{-0.33t}$	$y=65-44.2 e^{-0.33t}$	
O	---	$y=10-6.7 e^{-0.08t}$	$y=40-24.9 e^{-0.32t}$	$y=45-33.3 e^{-0.40t}$	Fig.7
	—	$y=10-8.1 e^{-0.07t}$	$y=35-26.1 e^{-0.37t}$	$y=10-29.0 e^{-0.21t}$	

Table 1 Functional equations used in Fig.6&Fig.7

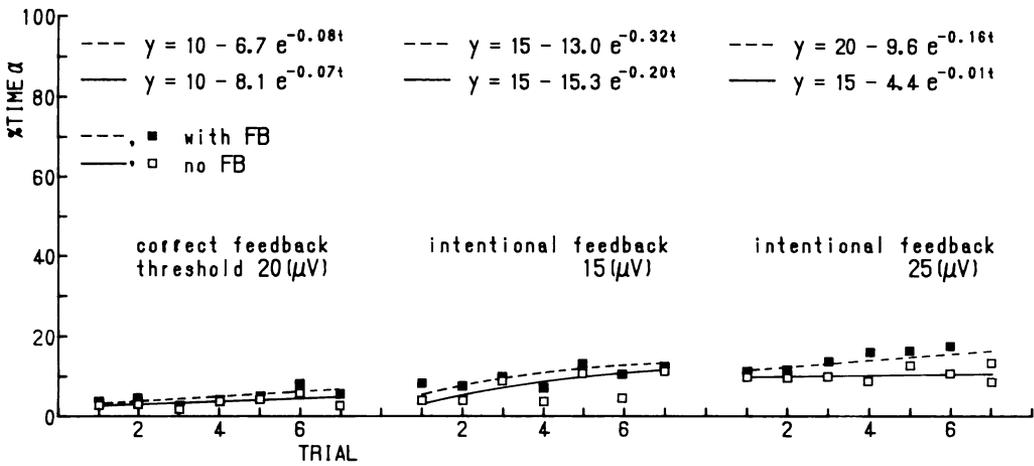


Fig.8 Mean percentage time alpha changes during feedback training maintaining arousal (eyes open). —walking.

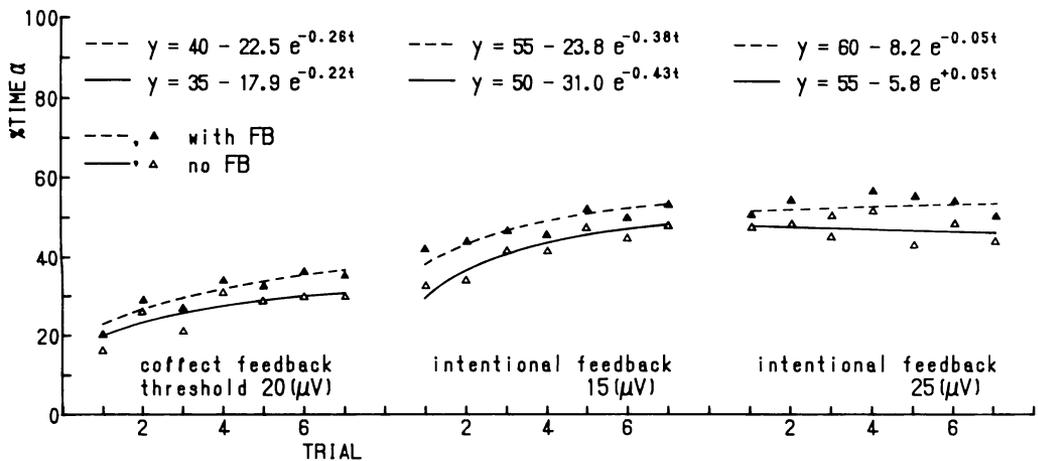


Fig.9 Mean percentage time alpha changes during feedback training maintaining arousal (eyes open). —standing.

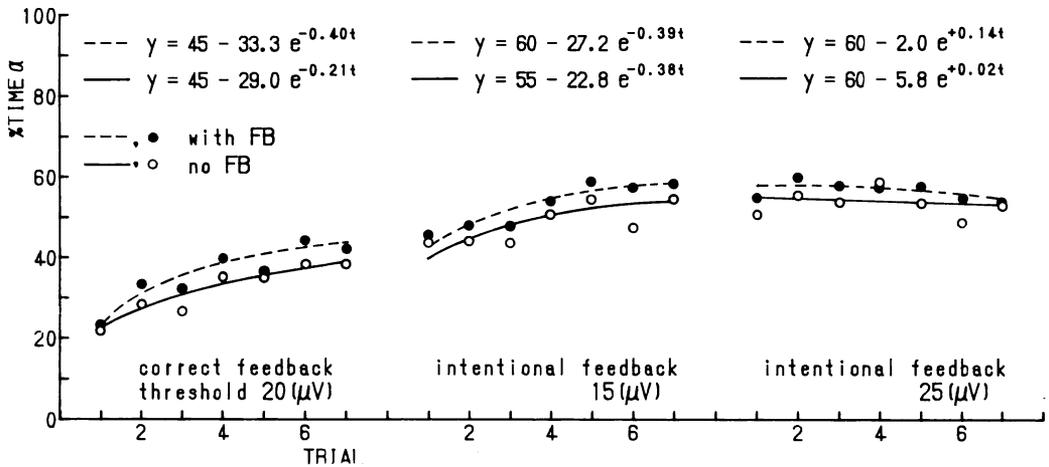


Fig. 10 Mean percentage time alpha changes during feedback training maintaining arousal (eyes open). —sitting.

な上昇傾向を示し、閾値を上げフィードバック音を抑制した場合は平坦に近い特性かむしろ下降傾向を示した。

本実験についての制御系の主要部のみを線形化して Fig. 11 のように考えた。階級制御系を圧縮して、自律系と随意系とから成るカスケード系とし、随意系フィードバック回路にフィードバック機器が挿入されているとする。制御変数である α 波は機器を通して聴覚系を經由して高位フィードバック制御中枢に至るが、その間に心理推測要素を通過する。なお制御系はフィードフォワード制御機能により補償されており、フィードフォワード、フィードバック何れの制御系の制御パラメータも、皮質統合野に形成されている適応モデルからの出力により可変である。また本実験における心理推測要素のパラメータも可変であると考えられる。今 Fig. 11 の実線部分に限定して考え、作為的信号 $I(s)$ が加えられた場合でも α 波出現率を理想目標に向かって向上せしめるためには、目標 $R(s)$ との偏差 $E(s)$ を小さく保持することが望ましい。図の K の値が存在する場合と零の場合との $E(s)$ に及ぼす値の差 $E_I(s)$ は、

$$E_I(s) = KHaa(s)Hp(s)I(s) \dots\dots\dots (2)$$

となる。Haa(s) は聴覚系であり不変と考えると、 α 波出現率は本実験においては、作為的に操作した閾値の変化量 K の影響のほか、この信号を聴取したときの心理推測要素 $Hp(s)$ が影響する。また心理推測の値は前述のごとく中枢モデルの記憶・認識出力によって可変であるので、被験者によってのばらつきが認められた。

5. 結言

本研究では動的状態での自己適応制御系が系を阻害するような入力を含んでいる場合の制御性の改善について検討した。運動知覚および視覚による外乱が心身平衡に及ぼす影響は大きく、直立位のとときの平衡感覚による外乱はさほど影響を与えなかった。これら個々の入力の影響については、聴覚フィードバック学習を重ねることによって制御し得ることが確認できた。外受容感覚や固有感覚は、環境条件によって異なるので、フィードバックによって感覚入力の

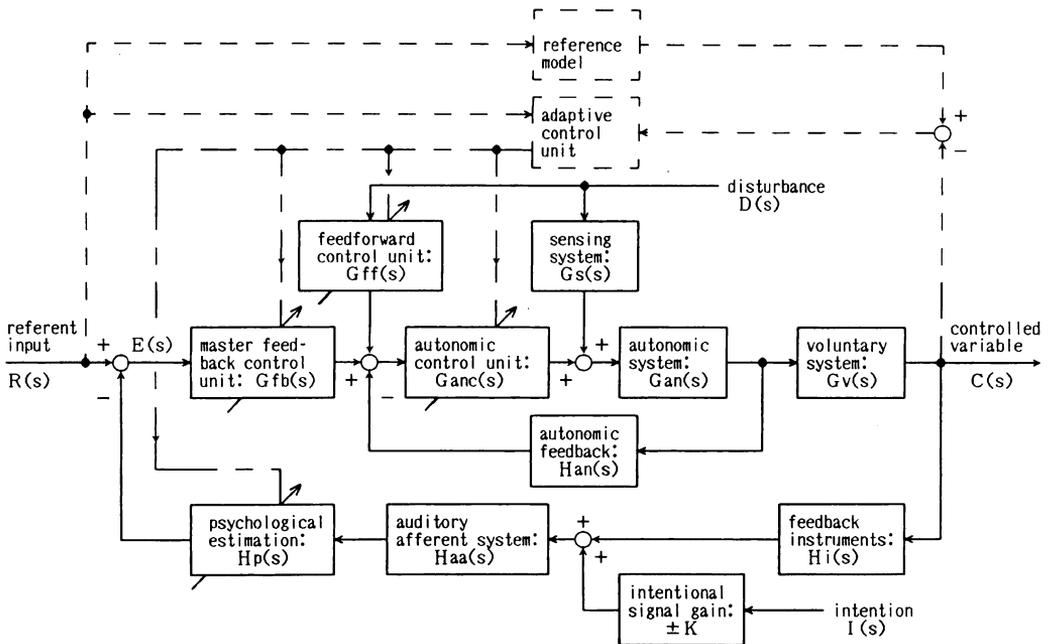


Fig. 11 Block diagram of nervous adaptive control system.

影響を抑制することの可能な環境条件の限度があると推測される。この点については今後の研究課題と考える。

フィードバック信号に心理的疑念を抱かせるような信号を用いた実験研究は従来数件の発表がある。例えば Budzynski ら⁸⁾は頭痛を訴える被験者群に他の被験者群のフィードバック音をカセットテープに記録した偽示信号を与え、正フィードバック群と比較した実験結果を発表した。この筋電位フィードバックの実験は、自己の症状とフィードバック音との不一致に対する不信から不安定症状に陥ったと報告されている。われわれの実験結果によっても、フィードバック信号と自己の生体現象予測値との間に否定的な疑議を生ずる場合には、フィードバックは有効に働かない。この点に関して Valins S.⁹⁾は、偽示フィードバックによる情動変化は自律反応が変化したとの認知によってのみ生ずると論じている。本実験からも、Valins S. の所謂 “Self-Persuasion” を助成するよう条件においては、心理的外乱も有利なフィードバック信号として作用することが確認できた。

終りに、本研究にあたり、大阪産業大学産業研究所特別研究費の助成をいただきましたことに対し、謝意を表します。

参考文献

- (1) Penfield, W. , Roberts, L. : Speech and Brain Mechanisms, Princeton University Pyess. ,1959. 12-37.
- (2) Schmidt, R. F., Thews, G. : Human Physiology, Springer-Verlag, 1983, 199-203.
- (3) Heimer, L. : The Human Brain and Spinal Cord, Springer-Verlag, 1983, 331-352.
- (4) House, E. L. , Pansky, B. , Siegel, A. : A Systematic Approach to Neuroscience, McGraw-Hill, 1978, 445-459.
- (5) Martinez Martines, P. F. A. (水野・岩掘・小西訳) : Neuro-anatomie, 南江堂, 1982, 256-258.
- (6) Guyton, C. : Physiology of The Human Body, CBS Colledge Publishing(1979)176-189.
- (7) Schmidt, R. F., Thews, G. : Human Physiology, Springer-Verlag, 1983, 148-149.
- (8) Budzynski, T. H. , stoyva, J. M. , Adler C. S, & Mullaney D. J. , : EMG Biofeedback and Tension Headache. In Birk, L. (Ed.) Biofeedback : Behavioral Medicine, Crune & Statton, 1973, 37-50.
- (9) Valins, S. : Cognitive effects of false heart-rate feedback, Journal of Personality and Social Psychology, 4, 1966, 400-408.