

昭和47年度 日本体育協会スポーツ科学研究報告

No. VII 巧緻性の解明

—第1次研究—

財団法人 日本体育協会

スポーツ科学委員会

目 次

巧緻性の解明——第1次研究 1

班長 東京都立大学 飯 塚 鉄 雄

巧緻性プロジェクトのために行つた実験 3

班員 横浜国立大学 渡 辺 俊 男

巧緻性解明のための各種運動の力学的考察 15

班員 順天堂大学 小 林 一 敏

トレース動作の動特性からみた巧緻性の検討 23

班員 東京都立大学 永 田 昊

動作の制御理論的研究 32

班員 東京都立大学 増 山 英 太 郎

巧緻性の解明——第1次研究——

班長 東京都立大学 飯 塚 鉄 雄

1. 本研究に関する経過

「巧緻性」そのものについての研究要望が直接各スポーツ連盟のコーチ、あるいは、選手強化担当者から出されたのではなかったが、多くの要望事項を総合するといわゆる、「巧緻性」の解明が期待されていることが推測できた。これはスポーツ科学委員会が実施した調査によるものであり、特にラグビーに関して大西氏の指摘する事項；

- (1)神経系発達促進に対する運動方法論的研究
- (2)スポーツ種目別による適性判別法の研究

バスケットボール遊津氏による、調子のよい時悪い時およびその原因の究明など主題に関連するものがみられた他更にバレーボールについて前委員長前田氏の指摘する、同等な体格、体力、技術のスペイカーでも、レシーブについて難易あるいは重いボール、速いボールなどがあり得点に関連しているようであるなどの事もふくめて本研究課題設定がなされた。

本委員会発足以来、この種の課題を見るに「あがり」の研究が現在最も関連性が高いと思われるが、ここでは単に人の心理的側面だけでは解明できるとは考えられないことは無論であるが、たとえば「あがり」の現象を人の経験的対応に止めず更にそれを「外乱」Disturbanceと捉え又外乱されるもの、すなわちその「因子」を見出すことを指向しようとする。したがって「体育科学センター」で実施中の「調整力の研究」のように、先ずそれを定義し、次にテーマを決めて実験するという方法ではなく、「調整」の対象となる因子をそのまま暗箱に置いて探ろうとすることになった。とはいいうものの、スポーツ技術学習の体験者が主体となって本プロジェクトを推進すべきであろうとの意見を尊重し、飯塚が課題担当委員に指名された。

因みに体育科学センターによる調整力の定義は次の通りである。

「調整力とは Mental な要素をふくんだ動きを規定する Physical-Resource である」又英語では “Co-ordination and Integration of Human Movements” である。

巧緻性とは「たくみ」で「きめがこまかい」とであるが、器用でうわべがうまいことだけでなく、内容的にも縦横の目がきちんとととのっている質を表現する言葉のようである。「調整力」といえば、人体の各部分を調節しうまく合目的的にととのえる能力を言い、手足の調整や、目耳口の調整とか、どちらかといえば現象的なニュアンスがあるが、巧緻性はそれらの調整機能そのものを見ようとするところに、相異を認めるべきであろう。このような考え方から、これら巧い、拙ないことの決定因子を模索すべく生理、心理、力学、修辞学的アプローチを以て対応しようとした。

したがって初年度の研究分担者は次のような観点で依頼することとした。

| | |
|------------|-------|
| 生理学的アプローチ | 渡辺 俊男 |
| 心理学的アプローチ | 増山英太郎 |
| 力学的アプローチ | 小林 一敏 |
| 自動制御的アプローチ | 永田 晨 |

勿論これらの研究者はクレアカットに分担するのではなく、情報、制御論等もふまえた上で進めることとした。

2. 本研究の基本的立場

既述のように定義することは特に意図的にさけ各人がそれぞれの立場と現在までの研究理論および方法の中に、あらためて巧緻性そのものに焦点を絞って研究のレビューをしてみようという立場からスタートした。

本研究が特に未開拓分野であり且広範な科学的

外延性を持つことから、当然のことながら継続的研究として位置づけ徒らに急がずに本質的解明をすることとした。このことは、当分の間本研究の成果そのものが直ちに現場に活用できるものではないであろうとの認識を再確認し、たとえば次のような具体的指針を準備した。

すなわち第1年ではテーマとしては、「巧緻性のファクターについて」とし、各自独創的な工夫をもって方法論を開拓することとした。その一例として；

- 1) 巧緻性を高めるため、またはスキル上達のために有効な情報とは何か。
- 2) 無駄な情報を捨て、有効な情報を選択するメカニズムとは？
- 3) 最大体力ではなく、至適応答のための体力レンジ、すなわち Optimal Range として測定できるかどうか？
- 4) ある場における外乱の処理方法について
- 5) 体力と巧緻性との関係とそれぞれのトレーニング時期について
- 6) Inhibitory 因子（抑制因子）は何かのために巧緻性プラス因子と別なマイナスあるいは阻止因子を求める。
- 7) 巧緻性の因子を脊髄レベル、脳幹レベル、受容器、効果器レベルでそれぞれ求める。
- 8) 視覚、聴覚、筋覚等の感覚の有効な使い方を調べる。

等をあげた。

以上のような考え方方に立って、6回の研究会議を開催しその都度各人の研究結果、考え方の変化などくりかえし論議を重ねることにより、できるだけ既成観念や概念にとらわれないように努力した。

3. 研究分担者による研究

従来から関連する研究を進めていた人に本課題を分担して頂いたので、このため特に進行中のものを大きく変えないで検討できるよう次のテーマによることにした。

各研究者の研究テーマ

- (1) 渡辺俊男「巧緻性の研究に関する中間報告」
- (2) 小林一敏「巧緻性解明のための力学的考察」

- (3) 永田 晟「トレース動作の動特性からみた巧緻性の検討」

- (4) 増山英太郎「動作の制御理論的研究」

4. 今後の研究方針

初年度の研究成果に基いて更に検討を加えることにより Feed-back や Feed-forward 理論による従来の学習理論である、連合学習、条件反射理論、再強化理論等の R-S 理論への検討を続けなければならない。つまり、R-S の Open-loop から自動制御理論および情報理論を総合する人の技術習得における Closed-loop 理論による検討を進める必要がある。

同じスポーツ技術の指導や、最良結果導出への示唆でもコーチによって異なり、又同じコーチでも対象により変化するほどの経験論にその背景となるべき理論体系を与えるために、修辞学的な整理や、誤認されている事項の解明も指摘して行かなければならぬ。具体的には、スポーツコーチ用語の合理化、総大集が必要である。

これからのおおよその在り方については次のような合意に達した。

“巧緻性”という言葉は技術上の言葉であって、学術上の科学用語ではないとする。“うまい”“巧みな”という表現と同意義と考えるが、“調整力”とは異なるとし、同意語として使わない。

現在、巧緻性をいかなる方法で測定するのか不明であり、その本質も漠然としている。しかし、巧緻性を構成している因子を取り出し、その決定パラメーターも抽出できるようにと研究を進める。

その結果、フィールド分野への応用を高め、その具体的方法を確立し、スポーツ技術の習得、早い熟練、スランプからの脱出、プレイヤーの精神・身体的リズムへの応用等への便宜を図る。

主な方法として、(1)生体の中枢、受容器、効果器、神経伝達関節等のメカニズムより運動生理学的に解析する、(2)複雑な選択反応や反射を中心にしてスポーツ心理学的に解析する、(3)ヒトの追跡調節機能を中心に、情報理論や、制御理論を適用し分析する、(4)スポーツ技術のコーチ学やキネシオロジーの面から解析し、現場で使い易いような資料を提示する、(5)コーチ、トレーナー等および研究者のために従来用いられている用語について分類し、またそれを集約する、等である。

巧緻性プロジェクトのために行った実験

横浜国立大学 渡辺俊男

I 緒 言

われわれの動作は最大の可能性を求めることが必要であるが、日常の行動はそれぞれ目的をもっているので、最適行動をとり得る能力もまた必要である。

ある目的に合致した動作を遂行するためには、行動の効果器である随意筋が適当な収縮を、要求された時点において発揮しなければならない。すなわち神経筋単位の空間的、時間的加重が適当であることが必要である。このことは、同時に協同筋、拮抗筋についても同様である。

動作はまた神経系の関与によって、随意動作、衝動動作、反射動作に分けることもできるが、現実の行動はこれらの動作の複雑な統合によって遂行されている。

これまで体育に関する研究の多くは¹⁾²⁾³⁾、最大筋力発揮について指向されていたが、近年ようやく動作の巧緻性について関心がもたれてきた。

小林⁴⁾は100m走、垂直跳び、走幅跳びなどのテスト記録を潜在的運動能力の断片的現象であるとし、身体の動特性について制御工学系からの解析を試み、最近池浦⁵⁾は視覚情報に基く正確な能力発揮について論じている。猪飼⁶⁾はまた、Maximum performanceは生理的能力として測定されながらも、内部に心理的な抑制機構を想定し、何らかの方法によって、この抑制を排除すれば実現される performanceは増強されると報告した。

われわれは動作を筋収縮の現われとみなし、その量は皮質運動野、間脳レベル、脊髄レベルの神経系の興奮と抑制によって決定されるものと仮定し、その中に巧緻に関するメカニズムがあると仮定した。

本報においては最大跳躍力のあるパーセントの跳躍力を発揮して、目標線に正しく着地するよう

な跳躍動作を行わせ、跳躍動作の調節機構の探索を試みたものである。

II 実験方法

踏切動作は、Fig. 1-i のように踏切位置より目標線まで、出来る限り正確に踏ぶことである。すなわち目的に適合するために、自己の有する最大跳躍の幾分かを発揮するための調節能力を検出しようと試みた。

目標として指示された跳躍距離は、40~52cmであり、最大跳躍幅の $1/2$ ~ $1/4$ にすぎない。

被検者の最大跳躍距離は一定ではなく、実験日ごとに、また試行の度ごとに相異する。ここでは各被験者に対して同様の「重み」をとらしめるために、目標線までの距離を簡単に身長の $1/3$ 程度のところで選んだ。本実験においては跳躍幅そのものが問題なのではなく、これによって測定の価値を阻害するとは考えられない。

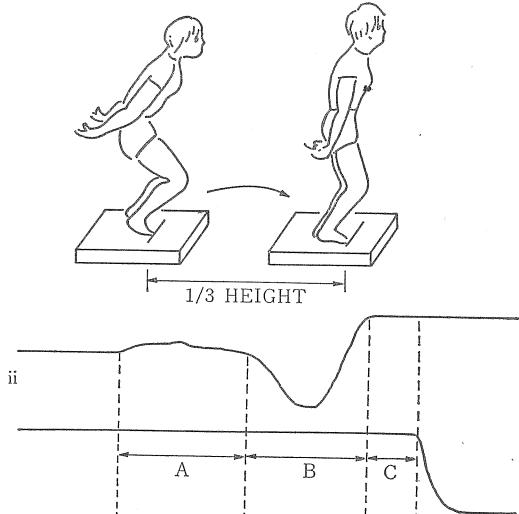


Fig. 1-1 i: Performance of standing jump on the recording board.

ii: Recorded curve through the strain gauge;

A : Duration of knee sinking

B : Duration of knee stretch

C : Duration of flight

実験はペーパーストレングージをはった踏切板から着地板まで跳躍させ、このときの諸パラメーターを測定した。

着地板にある目標線は、白色の線で示し、つま先を揃えて目標線に接した場合が適正な跳び方である。

跳躍動作は、跳躍の準備姿勢を整えた後、

- (1) 被検者が任意の時点で跳ぶこと（以下自由跳びと略記）
- (2) 検者の合図（ブザー音）によって跳躍すること（以下合図跳びと略記）

の2通りを行った。

後者の場合、合図は準備姿勢が整えられた後、2~5秒の時間間隔をランダムにとり与えられた。このときの準備姿勢は被験者の最も跳躍しやすい軽度の屈膝姿勢である。

跳躍動作の適合度は、

目標線を跳びこえた場合はプラス (+)

目標線に到らなかった場合はマイナス (-) の符号を付して実測値を表わすこととした。

跳躍動作は疲労の影響を避けるために(1)(2)とも10回づつ連続試行せしめ、(1)(2)の順序は交互した組み合せで試行させ、学習効果を均一にした。

踏切板から着地板まで跳躍したときに記録された歪曲線は Fig. 1-ii の如くである。

Fig. 1-iiにおいて上の curve は踏切板から、下の線は着地板からの誘導である。跳躍動作の時間経過を A, B, C の3部に分け、

A = 沈み込み時間一跳躍準備の軽い屈膝姿勢から、さらに沈み込む跳躍直前の動作のための時間。

B = 跳ぶために膝を強く伸展して板を離れるまでの動作時間。

C = 足底面が板を離れ着地（板上）するまで体が空中にある時間である。

跳躍動作はつま先を目標線に合せて着地することを要求し、誤差は、(-), (+) 着地の場合とも、つま先と目標線との距離を計測した。なお、両足が揃わずに着地した場合は左右足の誤差の平均を誤差量とした。

跳躍に際して目標線に合致しての修正を行うには、視覚からの情報が、いかにその役割を果すか

を検討するために、同じ跳躍動作を、閉眼位で行い、その際の動作時間、誤差量を同様な方法で測定した。

跳躍は閉眼位、閉眼位で交互に各10回行い、両動作とも練習効果が均一になるように組合せた。

被検者は（6~11歳）—（小学校1~6年）まで（12~14歳）—（中学校1~3年）まで、（15~17歳）—（高等学校1~3年）まで、（18~21歳）—（大学生1~4年）までの女子であり、各群とも5~10名を各学年より無作為に抽出した。なお視覚による跳躍動作の調整に関する実験のみは、19~23歳の男子大学生6名を被験者として用いた。

III 実験結果

標準として指示された線に適確に跳ぶ動作の内容は、興奮系と抑制系の組み合せから成り立つものと仮定した。興奮系と抑制系の相互の働き方は暗箱の中にある。ここで要求されている跳躍は、十分に跳躍可能な距離のものであり、跳躍の調節能は、抑制する系の強さに依存するものと仮定した。この場合、神経系の高位中枢より、脊髄、末梢神經までの間、いずれの部位で調整されたかを問うことはできないとしても

(+) 着地は、抑制量の不足

(-) 着地は、過剰な抑制

によるものであると考えられる。

(1) 年令による誤差量の変化

跳躍動作によって生じた誤差を Table 1-1 および Fig. 2 に示した。図のAは自由跳び、Bは合図跳びの場合である。自由跳びの場合も、合図跳びの場合も、年令のすすむにつれて誤差量は減少する。この減少は15歳を境にして特に著しく、調節のよくなることを物語っている。

年令に対する着地誤差の回帰は、次の通りである。

年令と着地誤差量との関係

(+) 着地誤差

$$\hat{Y} = -0.28 \times +6.97$$

$$\hat{Y} = -0.36 \times +19.92$$

(-) 着地誤差

$$\hat{Y} = -0.45 \times +11.9$$

$$\hat{Y} = -0.20 \times +13.66$$

また自由跳びの場合、(+)着地の誤差量は年令のすすむにつれて着実に減少しているが、(-)着地の場合は変動しながら減少している。このことはまた、合図跳びの場合もほぼ同様である。

(2) 自由跳びと合図跳びの比較

自由跳びと合図跳びにおける誤差量を比較したものがFig. 1-3 のA, B, Cである。

Fig. 1-3 のAは、

自由跳びの(+)着地 自由跳びの(-)着地

合図跳びの(+)着地、合図跳びの(-)着地を年令順にプロットしたものである。

図にみられるように、(+)着地の場合は何れの年令においても1より小さく、(-)着地では1より大きい。(+)着地では合図を受けることによって(+)に跳び過ぎる量が多く、(-)着地では合図を受けることによって跳びたりない量が減少している。

このことは(+)着地、(-)着地の双方の場合、合図されることによって、

抑制量
興奮量

の値が減少していることを意味している。この減少は主として興奮量の増強によってたらされるものであろう。

Fig. 1-3 のBでは目標線(Y軸座標0点)よりの誤差距離を棒グラフで表わしたものである。

自由跳びの場合も合図跳びの場合も、年令の進むにつれて誤差量は減少している。また合図跳びの場合は自由跳びに比して棒グラフの下端、上端とも上昇している。

またFig. 1-3 のCに示されるように、(+)着地/(-)着地は合図跳びの場合の9歳、18歳を除けばほぼ平行していることを知る。すなわち、この関係は自由跳び、合図跳びとも同様である。

これらのことから考えると、合図跳びの場合は跳躍に際して参与する筋線維量の多いことでありひいてはより多くの神経筋単位の参加が多いことになる。このことは合図の音響情報が視床を介し

Table 1-1. Width of gap by jumping with voluntary take-off and instructed take-off

| | | voluntary take-off | | | | | | | | take-off with buzzer | | | | | | | | voluntary buzzer | |
|-----|----|--------------------|------|------|-------|-------|------|-------|------|----------------------|------|------|------|-------|------|-------|-----|------------------|---|
| age | N | + | | - | | (+) + | | (+) - | | + | | - | | (+) + | | (+) - | | + | |
| | | m | s | m | s | (+) | (+) | (+) | (+) | m | s | m | s | (+) | (+) | (+) | (+) | + | - |
| 6 | 5 | 9.6 | 6.12 | 15.0 | 6.00 | 24.6 | 0.64 | 13.4 | 9.85 | 9.0 | 8.51 | 22.4 | 1.49 | 0.72 | 1.67 | | | | |
| 7 | 8 | 8.0 | 8.18 | 19.4 | 8.77 | 27.4 | 0.41 | 11.9 | 7.54 | 14.0 | 8.54 | 25.9 | 0.85 | 0.67 | 1.39 | | | | |
| 8 | 5 | 4.8 | 5.30 | 20.0 | 11.06 | 24.8 | 0.24 | 7.4 | 5.78 | 15.6 | 9.81 | 23.0 | 0.47 | 0.65 | 1.28 | | | | |
| 9 | 5 | 5.7 | 4.49 | 16.0 | 7.25 | 21.7 | 0.36 | 14.0 | 6.38 | 7.0 | 3.26 | 21.0 | 2.00 | 0.41 | 2.29 | | | | |
| 10 | 7 | 4.6 | 5.42 | 22.6 | 14.67 | 27.2 | 0.20 | 6.7 | 7.23 | 15.0 | 8.66 | 21.7 | 0.45 | 0.69 | 1.51 | | | | |
| 11 | 6 | 7.3 | 3.64 | 11.2 | 2.96 | 18.5 | 0.65 | 9.3 | 4.11 | 11.0 | 5.13 | 20.3 | 0.85 | 0.78 | 1.02 | | | | |
| 12 | 10 | 2.5 | 2.94 | 21.8 | 11.85 | 24.3 | 0.11 | 6.4 | 5.08 | 12.5 | 8.79 | 18.9 | 0.51 | 0.39 | 1.74 | | | | |
| 13 | 10 | 2.4 | 1.56 | 23.6 | 11.11 | 26.0 | 0.11 | 3.6 | 3.77 | 17.7 | 9.92 | 21.3 | 0.20 | 0.67 | 1.33 | | | | |
| 14 | 10 | 1.5 | 1.62 | 25.9 | 7.82 | 27.4 | 0.06 | 2.6 | 2.87 | 20.7 | 8.33 | 23.3 | 0.13 | 0.58 | 1.25 | | | | |
| 15 | 10 | 5.4 | 3.38 | 10.0 | 5.57 | 15.4 | 0.54 | 6.0 | 3.10 | 10.3 | 5.92 | 16.3 | 0.58 | 0.90 | 0.97 | | | | |
| 16 | 10 | 1.8 | 1.53 | 18.5 | 7.78 | 20.3 | 0.10 | 4.5 | 3.44 | 10.4 | 4.94 | 14.9 | 0.43 | 0.40 | 1.78 | | | | |
| 17 | 10 | 2.3 | 3.06 | 14.6 | 5.29 | 16.9 | 0.16 | 4.6 | 9.87 | 12.9 | 6.22 | 17.5 | 0.36 | 0.50 | 1.13 | | | | |
| 18 | 10 | 6.7 | 3.29 | 8.0 | 4.62 | 14.7 | 0.84 | 9.8 | 4.73 | 6.2 | 3.43 | 16.0 | 1.58 | 0.68 | 1.29 | | | | |
| 19 | 10 | 5.5 | 4.06 | 10.1 | 5.99 | 15.6 | 0.54 | 6.4 | 3.83 | 9.1 | 5.56 | 15.5 | 0.70 | 0.70 | 0.86 | | | | |
| 20 | 10 | 2.2 | 2.56 | 16.9 | 12.46 | 19.1 | 0.13 | 3.0 | 3.79 | 10.5 | 8.28 | 13.5 | 0.29 | 0.73 | 1.61 | | | | |
| 21 | 10 | 3.2 | 3.40 | 16.2 | 8.23 | 19.4 | 0.20 | 6.7 | 5.33 | 9.5 | 5.55 | 16.2 | 0.71 | 0.48 | 1.71 | | | | |

+ : landing beyond the required line

- : landing in short to the required line

て脳の興奮をたかめ抑制量が変化なくしても、下
行するインパルスの加重量の多いためと考えられ
る。しかし、合図跳びによって生じる着地誤差と

自由跳びによるそれとは、Table 1-1, Fig. 1-4 に
示すように、相関係数は $r=0.8218^{**}$ であり、高
い相関を示し、両者の誤差は、興奮のレベルの相

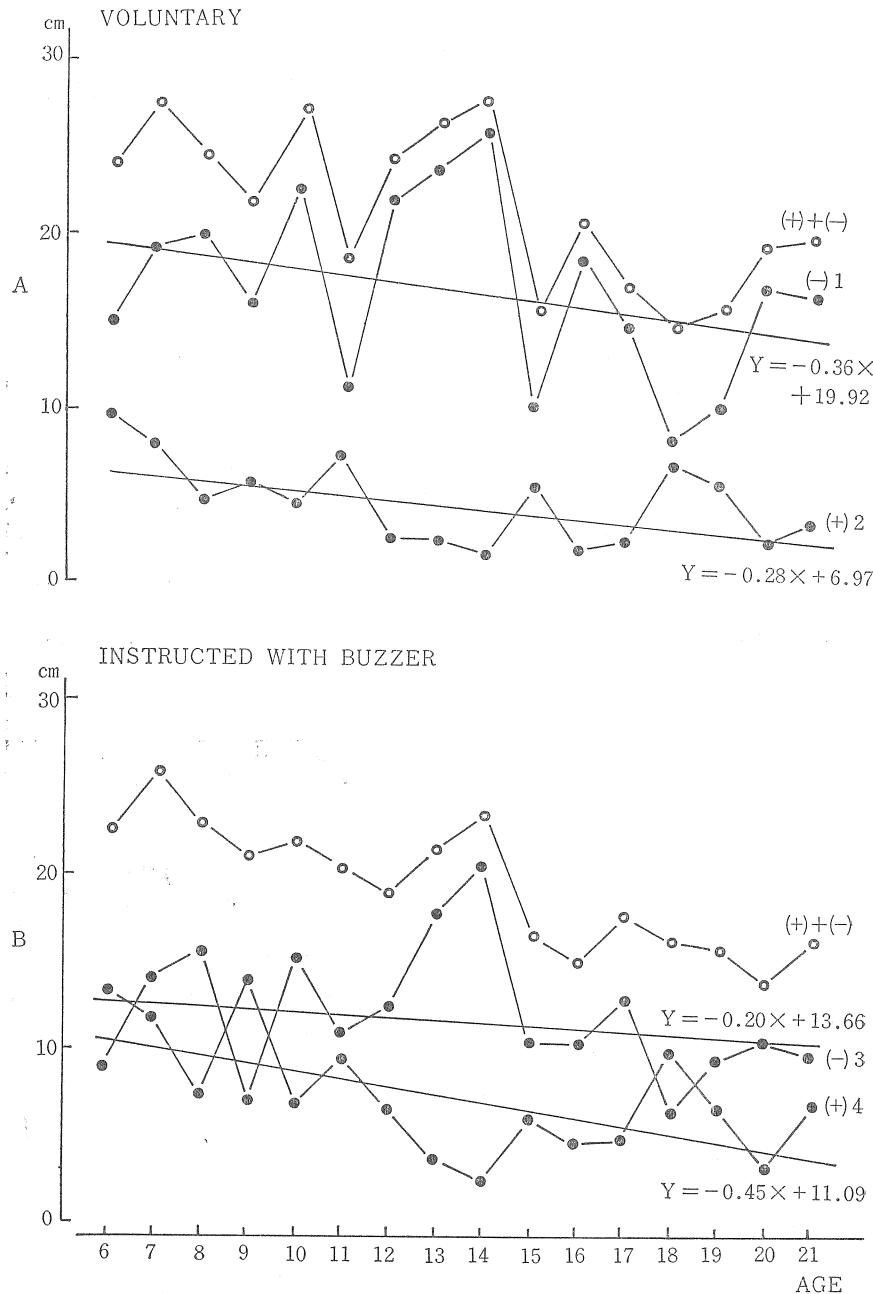


Fig. 1-2 Changes by age group in width of gap.

- (-) 1 ; }
 - (-) 3 ; }
 - (+) 2 ; }
 - (+) 4 ; }
- landing in short to required line.
- landing beyond the required line.

異によって生じた差異であって、抑制力の減少すなわち脱抑制からくる動作の調整力によるものではないと考えた方がよい。

(3) 跳躍動作におけるパターンの相異

跳躍動作を行うにはまず準備姿勢をとる。この姿勢は体重をやや先方に移し、軽く屈膝した姿勢である。跳躍するにあたってはさらに屈膝を深めひきつづき足跡で踏台を蹴ると同時に膝関節を伸

展する。Table 1-2 及び Fig. 1-5においては、自由跳びの場合の一連の動作の時間関係を検討したものである。

Fig.1-5 の A は目標値に対する(+)着地、(-)着地の誤差の絶対値の和の年齢による変化である。ここで明らかなように15歳を境としてこの誤差量は明らかに減少している。ここで、巧緻性の獲得は15歳位ではないかと推定することもできよう。

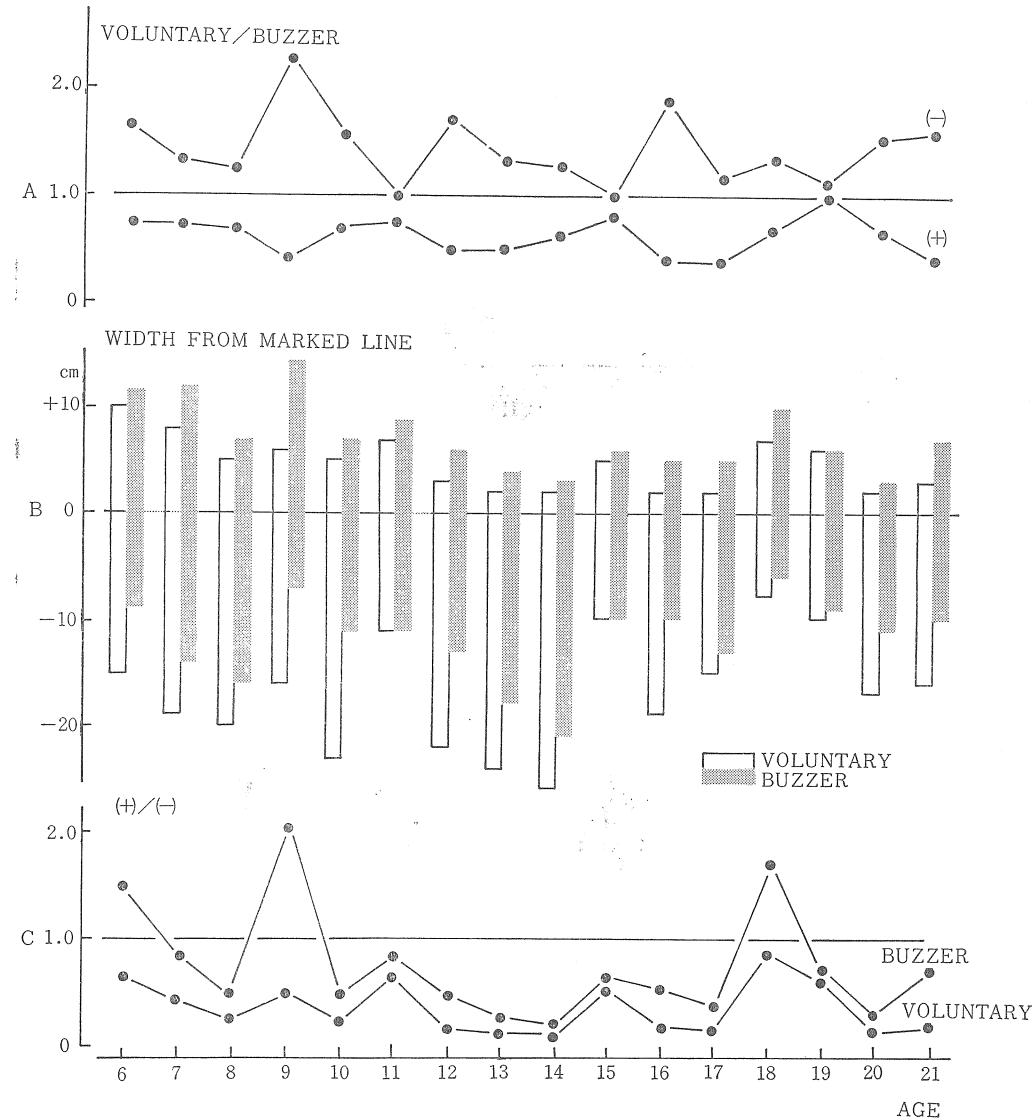


Fig. 1-3 Changes by age group in width of gap.

A : The ratio of width between both take-off.

B : Width from required line.

C : The ratio between width of both landings.

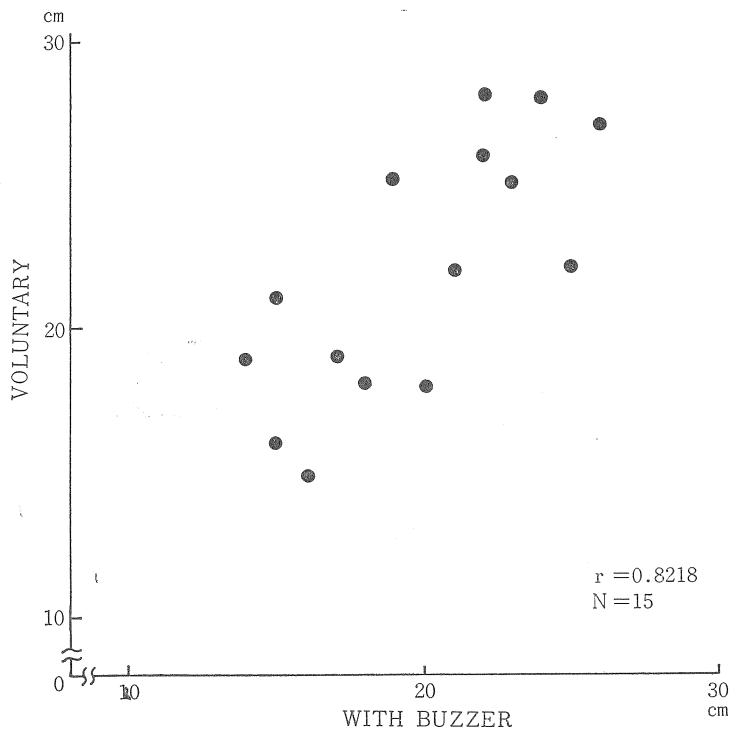


Fig. 1-4 The relation of difference in width between both take-offs.

Table 1-2 The changes by age group in duration of each movement

| age | N | voluntary take-off | | | take-off with buzzer | | | voluntary/buzzer | | |
|-----|----|--------------------|-----|-----|----------------------|-----|-----|------------------|------|------|
| | | A | B | C | A | B | C | A | B | C |
| 6 | 5 | 404 | 238 | 191 | 466 | 241 | 186 | 0.86 | 0.99 | 1.03 |
| 7 | 8 | 345 | 221 | 190 | 325 | 223 | 203 | 1.06 | 0.99 | 0.94 |
| 8 | 5 | 433 | 230 | 197 | 427 | 209 | 182 | 1.01 | 1.00 | 1.04 |
| 9 | 5 | 388 | 230 | 207 | 305 | 204 | 182 | 1.27 | 1.12 | 1.14 |
| 10 | 7 | 507 | 256 | 216 | 356 | 217 | 197 | 1.47 | 1.18 | 1.09 |
| 11 | 6 | 459 | 242 | 200 | 349 | 223 | 192 | 1.31 | 1.09 | 1.04 |
| 12 | 10 | 363 | 242 | 182 | 347 | 208 | 170 | 1.07 | 1.16 | 1.07 |
| 13 | 10 | 400 | 242 | 199 | 340 | 219 | 190 | 1.18 | 1.11 | 1.05 |
| 14 | 10 | 382 | 234 | 198 | 317 | 209 | 188 | 1.20 | 1.12 | 1.06 |
| 15 | 10 | 400 | 307 | 221 | 398 | 260 | 214 | 1.00 | 1.18 | 1.03 |
| 16 | 10 | 363 | 284 | 195 | 383 | 239 | 180 | 0.95 | 1.19 | 1.08 |
| 17 | 10 | 389 | 297 | 227 | 345 | 263 | 204 | 1.13 | 1.13 | 1.11 |
| 18 | 10 | 404 | 265 | 179 | 294 | 221 | 155 | 1.37 | 1.20 | 1.15 |
| 19 | 10 | 404 | 280 | 224 | 335 | 243 | 201 | 1.20 | 1.15 | 1.11 |
| 20 | 10 | 347 | 289 | 191 | 277 | 276 | 183 | 1.25 | 1.05 | 1.05 |
| 21 | 10 | 364 | 273 | 167 | 273 | 264 | 156 | 1.40 | 1.03 | 1.07 |

A : Duration of knee sinking

(msec.)

B : Duration of knee stretch

C : Duration of flight

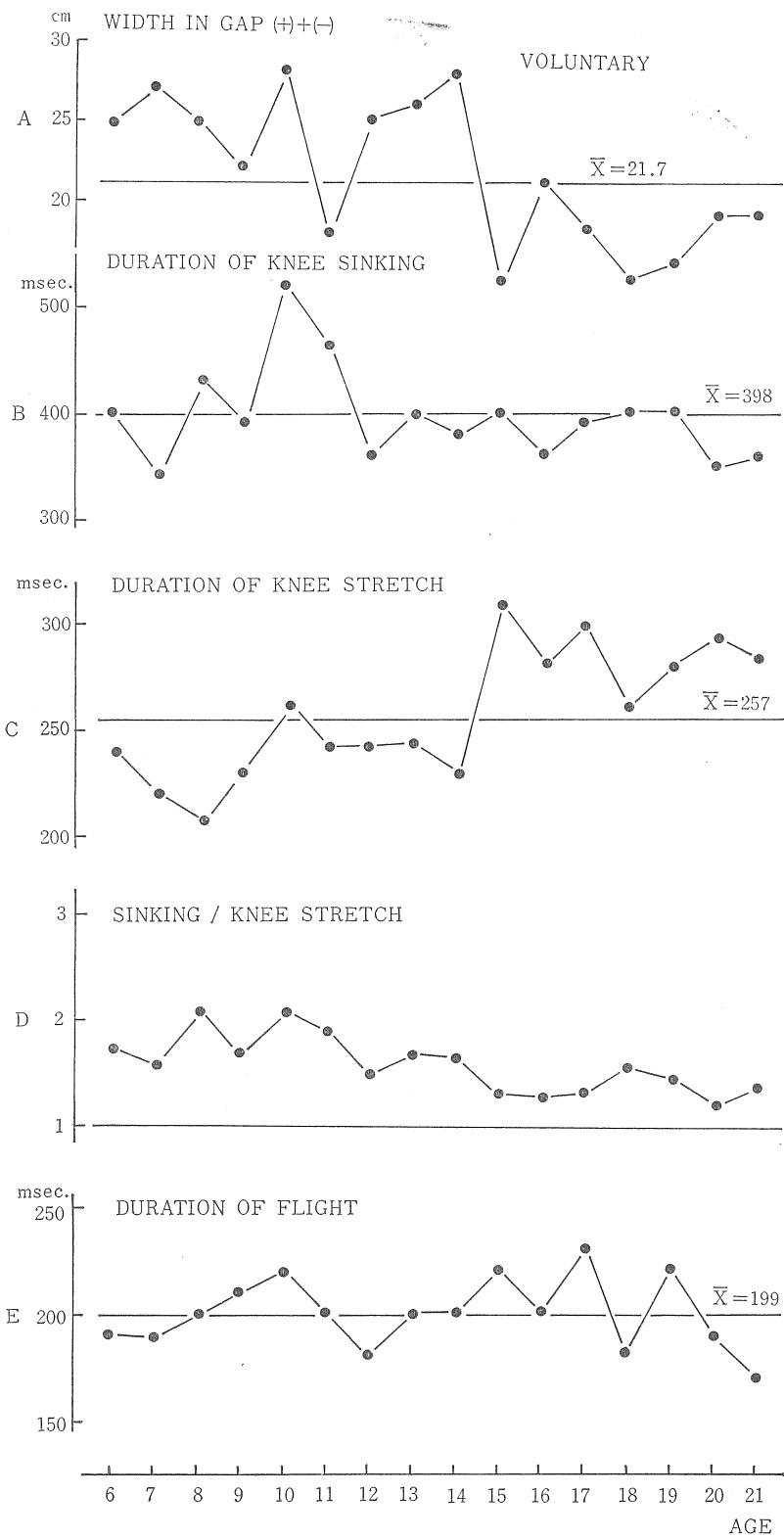


Fig. 1-5 The changes by age-group in duration of each movement.

Table 1-3 Width in gap and duration of movement in voluntary jumping with opened and closed eyes.

| Sub. | width of gap | | | | duration of knee sinking | | | | duration of knee stretch | | | | duration of flight | | | |
|------|--------------|------|--------|------|--------------------------|-------|--------|------|--------------------------|------|--------|------|--------------------|------|--------|------|
| | opened | | closed | | opened | | closed | | opened | | closed | | opened | | closed | |
| | + | - | + | - | + | - | + | - | + | - | + | - | + | - | + | - |
| T. K | 6.7 | 5.5 | 15.0 | 4.7 | 341 | 322 | 347 | 324 | 224 | 230 | 231 | 224 | 211 | 219 | 208 | 211 |
| R. K | 3.8 | 9.5 | 14.8 | 9.1 | 316 | 268 | 299 | 285 | 230 | 264 | 246 | 274 | 318 | 287 | 246 | 259 |
| S. N | 5.1 | 5.6 | 15.7 | 10.5 | 202 | 170 | 257 | 236 | 238 | 229 | 233 | 286 | 263 | 269 | 254 | 271 |
| M. T | 8.6 | 14.0 | 22.2 | 0 | 392 | 434 | 487 | — | 225 | 202 | 222 | — | 239 | 241 | 246 | — |
| M. K | 2.9 | 2.6 | 6.7 | 4.4 | 430 | 492 | 430 | 395 | 221 | 268 | 242 | 251 | 220 | 212 | 220 | 203 |
| Y. M | 4.0 | 9.7 | 7.3 | 4.4 | 192 | 247 | 234 | 288 | 285 | 292 | 259 | 261 | 243 | 231 | 253 | 260 |
| m | 5.2 | 7.8 | 13.6 | 5.5 | 312 | 322 | 342 | 306 | 237 | 248 | 239 | 259 | 249 | 243 | 238 | 241 |
| s | 1.94 | 3.70 | 5.31 | 3.47 | 89.1 | 110.4 | 90.9 | 52.7 | 22.1 | 30.0 | 11.9 | 21.2 | 35.1 | 26.8 | 17.5 | 28.0 |

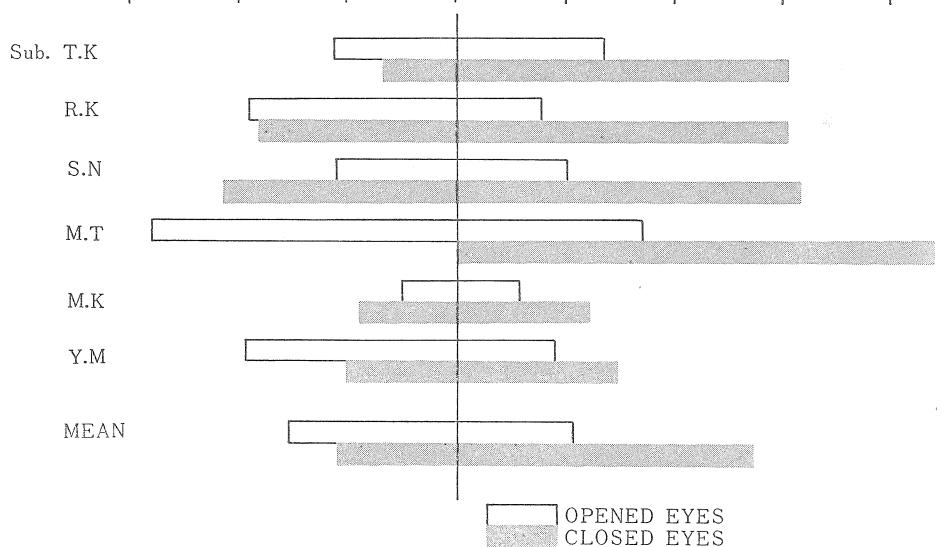


Fig. 1-6 Ranges of resulted gaps in voluntary jumping with opened and closed

同図のBは、跳躍動作直前の沈み込み動作時間、すなわちFig. 1-iiのA時間の年令別に示したものである。この時間は12, 13歳までの年令では変動し易いが、これ以後の年令では概して短縮し変化が少い。

Fig. 5 の C は、跳躍のための膝伸展時間、すなわち Fig. 1-ii の B の時間を年令順にプロットしたものである。この時間は年令の若い群、すなわち 13, 14 歳までは短く、その値は平均 257 msec. より短いのに反して、それ以後の年令ではつねに

延長されている。しかもこの年令は誤差量の減少する年令に相当している。のことから目標線からの誤差の減少は、より長い時間をかけて、伸膝動作をすることによって、時間的加重を減少しているものと考えられる。

これに反して(6~11)歳、(12~14)歳では伸膝時間が短く、Fig. 5 B にみるように沈み込み時間がやや延長している。

沈み込み時間と伸膝動作時間との比を年令別に示したものが、Fig. 5 Dである。この値は、年令

の進むにつれて、沈み込み時間に対して伸膝動作時間が長く、若年者ではこれと反対の傾向を示している。

このことは、目標線に適合するための調節の仕方が年令によって異なることを示しており、年令の進むにつれて、膝の伸展する時間を延ばし、これによって跳力を減少させている。このことは単位時間あたり与えられるインパルス 数を減少せしめていることを意味している。適合は一定の張力を短時間で放出するか、長い時間をかけて調節しながら放出するかの相異によるものであり、後者の方が、飛び過ぎを抑えるものである。Fig. 1-5 のEは跳躍中の時間をみたものであるが、誤差量の減少と空中にある時間との関係は、この実験では不明であった。

(4) 閉眼位での跳躍動作の調整

目的に合致したか否かを検し、さらに目的に対して動作の修正を加えるには、視覚からの情報が重要な役割を果している。

跳躍動作時に視覚からの情報を断ち、すなわち閉眼位で動作を遂行させ、その際の誤差量、および動作時間を測定し、視覚の影響を検討した。跳躍動作は自由跳とした。

開眼跳躍時および閉眼跳躍時の誤差量及び動作時間は Table 1-3 および Fig. 1-6 に示す通りである。

誤差量については、開眼跳躍時では、目標線の前方に着地する(+)着地に比して(-)着地の方が多く、目的動作に対して抑制の働きかけがやや大きくなっている。これに対して閉眼跳躍時では着地の誤差は開眼時に比して多くなる。また着地点も着地は開眼時に減少し、(+)着地が開眼時の 263% に増加している。すなわち閉眼動作によって、明らかに、目標線の前方に着地する割合が増している。

このことは、目標線を見つめて跳躍する場合、視覚からの情報が、動作の抑制に働きかけ、余分な興奮によって飛び過ぎることのないような修正がなされているためである。しかも閉眼によって視覚情報が断たれると、動作への抑制不足によって、目的動作以上の興奮量が投入されるものと思われる。

IV 考 察

実験で設定された動作を遂行する効果器は下肢筋であって、脊髄におけるニューロンプールを介して発射される運動神経のインパルス量によって決定されるものである。この場合、実際の動作は協同筋、拮抗筋の働きの和となって現れる。動作が随意運動として遂行されるためには、錐体路系、錐体外路系の司令を受け、この司令は脊髄レベルにおける神経路を通して統合されている。

随意動作は、主として大脳レベル、新小脳レベルの閉鎖回路で、反射動作は脊髄レベル、旧小脳レベルでの閉鎖回路で調節されている。

本実験の動作は、まず皮質運動領において設定された動作の発令が錐体外路によって調節され、さらに脊髄における反射回路で調節されて奏効するものである。

実験の設定として指示された線に対して正しく跳躍するという動作は、必ずしも複雑なものではない。巧みな随意運動のためには錐体外路及び小脳の関与は重要な意味をもっている。ある条件に適合した動作を行うためには、最大出力の動作を遂行するより、より多くこの調節回路の働きが大となる。

課せられた動作の内部機構は、ミクロな研究方法によらなければならない。本実験においては、調節機構の内部は、すべて暗箱の中に包まれているものと考えなければならない。

自動調節作用は反射性の外乱作用、随意動作に対する外乱作用が随意加えられるが、内部機構を暗箱として取りあつかうためには、これに加わる外乱を、できる限り少くしなければならない。本実験ではこのような外乱をできる限り避けるために、極く単純な跳躍動作を設定したものである。

ここでの動作は、姿勢保持、平衡保持に関与する迷路一古小脳の機構の相異は、必ずしも大きいとは考えられないもので、これに対する配慮は省略されてもよい。

出力の回路は

I 脊髄レベル閉鎖回路

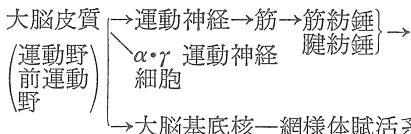
運動神経細胞→筋→筋紡錘→運動神経細胞

腱紡錘 レンショーカ細胞

II 旧小脳レベル閉鎖回路

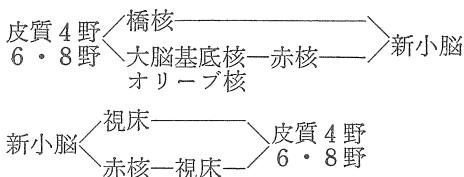
網様体→レンシヨー細胞→運動神経細胞→筋→筋紡鍼腱紡鍼→旧小脳→網様体

III 大脳レベル閉鎖回路



→視床→感覚領野→大脳皮質運動関係領野

IV 新小脳レベル閉鎖回路



に分けられ、閉鎖回路 I・II・III はその回路の中に効果器筋を含んでおり、output-informed feed back circuit である。これに対して回路IVは筋を含まず、input-informed feed back circuit である。

指示された線からの誤差は、年令のすすむにつれて減少していく。同一な動作の out-put は強い興奮を強い抑制で抑えている場合と、弱い興奮にわずかな抑制がかかっている場合とがあろう。両者の相異は、フィードバック回路の作動量に関係し、巧緻性の 1 つの考え方とは、この作動量を少なくして、所期条件を満足せしめることでもある。

幅跳の跳躍能力は筋の発達に比しているが、跳躍能力を接分して、ある目的動作量に適合させる能力は13～15歳頃になって、より高度に発揮されるものである。

走り幅跳の筋力は、男子では14～15歳までは急激に伸び、その後緩徐な伸び方を示している。上昇の勾配は男子のように急激ではないが、この傾向は女子においてもほぼ同様である。

求められる目標線に合致して跳躍するか否かは運動の力学的物理量で決められ、それは筋収縮量に還元されると考えてよい。15歳をこえると誤差量は著しく減少していく。

着地誤差の減少する15歳以上の被験者においては、伸膝時間が長くなっている。このことは筋に対する空間的、時間的加重量を減少することによ

り、仕事率を低減せしめるものである。

したがって、自己の持っている最大能力の $x\%$ を接分して、目的に合致した筋力を発現する調節能力は、筋力自身の発育勾配の低下時期から、その発達が著明になり、ある期間年令とともに発達してゆくものである。

ザーの合図によって跳ぶ場合は、各動作時間にも短縮がみられる。このことは、ザー刺激により大脳レベルおよび新小脳レベルの閉鎖回路など、視床網様体賦活系を介して、脊髄のニューロンプールにおける興奮の高まりを思わせる。しかしながら、これらの事実は、いまだ錐体路、錐体外路系の根源に調節のパターン形成があるという保証にはなりえない。

動作の巧みさは興奮量全体ではなく、抑制による興奮回路の按分が問題であることを思はせている。

誤差の補正能力は年令のすすむにつれて学習されてゆくようみえるが、この過程は跳躍動作のパターンの変化としてあらわれてくる。跳躍動作は、屈曲した下肢の伸展によって遂行されるが予備動作である沈み込み時間と伸膝時間との関係は Fig. 7 の如く、6～12歳の群と、18～21歳の群では異った関係を示している。

6～12歳までの者では沈み込み時間と伸膝時間の間に一定の関係はみられず、適合するための動作の統一が生じていない。これに対して、18～21歳の群では、沈み込み時間の長い者は伸膝時間も長く、前者の短かい者は、後者の時間も短い。すなわち沈み込み動作から伸膝動作への一連の動作に、各個人による時間の長短はあっても、その時間配分の間に直線関係がある。

このことは、適正な動作の発意にさいして動作の設計化が行なわれ、脊髄、旧小脳レベルの反射回路を含んだ一連の動作パターンが形成されたことを意味している。そのためには、まず筋を介しての out-put informed feed back circuit が十分に働くなければならない。

さらに所期の条件に適合した動作をするためには、in-put informed feed back circuit である新小脳レベルの自動制御回路と大脳皮質レベルの回路とが相互に関係して働くなければならない。

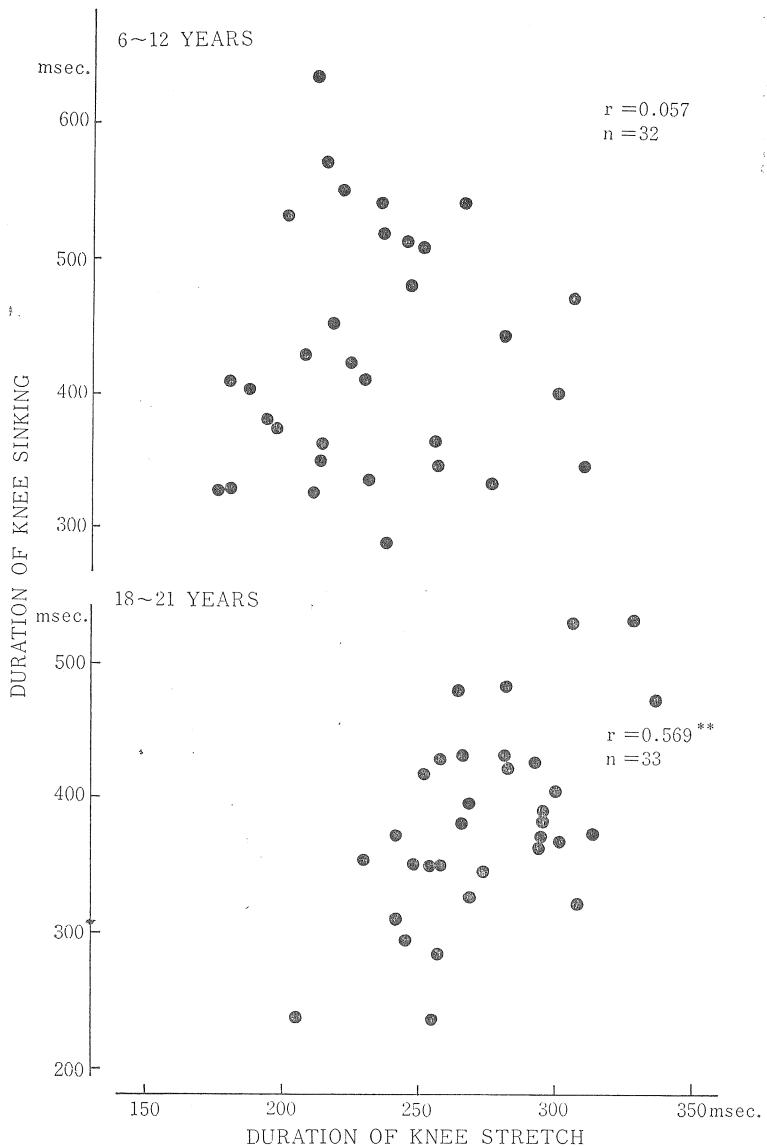


Fig. 1-7 The relation between duration of knee stretch and duration of knee sinking.

この実験では、18歳を過ぎると両者の間の疎通が容易となっている。

目的をもった随意動作としての目標跳びの訂正には、視覚によるフィードバックが極めて重要な位置を占めている。これらの訂正回路は、視床・大脳皮質感覚領を介して行なわれるものである。

実験の結果は、閉眼で跳躍した場合は、開眼した場合に比してより遠くに跳ぶことになる。このことは閉眼によって視覚を介しての回路からくる抑制量の減少することを意味している。しかしな

がら、伸膝時間および滞空時間をみると、伸膝時間では開眼時および閉眼時とも跳躍が(+)着地時の方が(-)着地に比して短く、前述の実験と同じ傾向を示す。このことは閉眼、閉眼の差はすでに反射化した動作に対しては、大きな変化をきたしていないことを示している。

すなわち目的に適合した動作をなしうるのは、全体の興奮レベルの上下によるものではなく、むしろ各回路が相互に関連し統一されることによつて動作パターンをつくることによるものである。

V 結 語

自分のもっている跳躍力を調節して、目標線まで正確に跳ぶ動作を行わせ、その時の誤差量および、動作時間の年令に伴う変化を測定し、次のような結果を得た。

(1) 目標線からの誤差量は、年令がますにしたがい減少する。

(2) 跳躍動作の開始にあたって、伸膝動作時間は、誤差の減少が著明になる15歳頃より、延長する傾向がみられる。低学年児では、予備動作の沈み込み時間がやや長く、伸膝時間は短い。

(3) 沈み込み動作時間と伸膝動作時間との関係は、6～11歳では相関はみられないが、18～21歳では相関 ($r=0.569^{**}$) がみられる。

(4) ブザーを与えて跳躍する合図跳びは誤差は任意に跳ぶ自由跳びと同様に、年令とともに減少するが、その誤差は、目標線より手前に着地する割合が、自由跳びに比して合図跳びでは減少し、目標線の前方に着地する割合が増加する。

自由跳びと合図跳びの誤差量には相関 ($r=0.822^{**}$) がみられる。

(5) 合図跳びでは予備動作としての沈み込み時間および伸膝動作時間は、自由跳びに比して短縮する。

(6) 跳躍動作を行う際、閉眼位にし、視覚から情報が断たれた場合、着地は目標線をこえた前方になされる割合が増加する。しかし、この際の動作時間には閉眼時と開眼時の差異は認められなかった。

以上の実験において、巧みさの部分要素を含むと考えられる極めて単純な跳躍によるマッチング動作を行わせた結果、巧みさの調節は、はじめは部分的に行われるが、やがて興奮抑制の系が組合され、一つの統一したパターンができるものと考えられる。

文 献

- 1) 金原勇他 (1964-6) : 跳躍力を大きくする基礎的研究 (その I～III), 東京教育大学体育学部スポーツ研究所報 2～4 報。
- 2) 渋川侃二他 (1965, 1969) : 垂直跳の力学 (第 1 報, 第 2 報) 東京教育大学体育学部スポーツ研究所報 3 報および 7 報。
- 3) 浅川正一他 (1969) : 跳躍力の分析的研究, 垂直跳, 立巾跳, 走巾跳, 三段跳に関して, 東京教育大学体育学部紀要 8 卷。
- 4) 小林一敏 (1954) : 動作のキネシオロジー的分析 「跳」 日本体育学会第 15 回大会シンポジウム体育学研究第 9 卷 5 号。
- 5) 池浦敏子 (1972) : 反復当揮筋力の変動, 人類動態学研究会々報第 8 号。
- 6) 猪飼道夫 (1960) : 体力の生理的限界に関する実験的研究 東京大学教育学部紀要 5。

巧緻性解明のための各種運動の力学的考察

順天堂大学 小林一敏

はじめに

巧緻性を解明するには、動きの巧みさについての、身体内の要因にたいする分析と、身体の外部にあらわれた現象にたいする分析の両者が必要であろう。

運動現象を記述し、分析するには、物理学とともに力学的分析法が有力な手段となる。巧緻性といわれるような内容を力学的に考察するには、身体の関節の相対的位置関係にもとづく、筋の神経支配の特性や、身体の内部相互で作用し合い打ち消し合っている内力のはたらき、身体が外部と作用し合っている外力の大きさ等を調べることになる。このような力の作用と運動とを関連づけるには、加速度の測定が多くの場合に必要となる。

このような観点から、本研究では、まず身体の運動の加速度の測定法の開発と、その面からの分析を試みた。

実験方法と結果

加速度は、加速度計により直接測定する方法と位置の時間変化から微分により求める方法がある。両者は、それ長所と欠点があるので、場合により使い分けることになる。

ここでは、加速度計と高速度カメラ、力量計を同期用タイマーで同期する方法により、跳躍運動における、身体部分の細かな加速度を測定した。

巧みな動作は全身的な調和のもとに行なわれることが多いと考えられるので、各部の細かな動きを知ることは、課題の解明に役立つと予想したのである。しかし、加速度計の性質として、それからの出力が、検出軸の方向が重力や加速度の方向とずれると、出力が減少するので、身体の運動のように検出軸が大きく変動している対象には、出

力結果の補正が必要となる。

本実験では、加速度計の軸の補正を高速度映画を用いて行ない、身体各部の加速度から推定した慣性力の合成値を、身体から外部に作用する外力を力量計によって測った値と比較した。

この分析法の精度をためすのに都合よく、かつ今後の研究の基礎として役立つ動作として、垂直跳びを調べたものが、図 2-1, 2, 3, 4 である。

結果の考察

垂直跳びは、動作の中では最も単純なもの一つと思われている。図 2-4 の地面反力の値からみてもわかるように、重心の運動としては、2~3 G程度のものであるにもかかわらず、身体の部分には大きな加速度があらわれていて、たとえば、ひざや足首には 10G 以上の加速度があらわれている。

さらに興味深いことは、身体各部の間に生ずる加速度に位相差があることであるが、詳細な検討は今後の分析にまたねばならない。

身体の加速度からみた 運動の巧緻的現象

運動には、重心の上下動という加速現象が必ずともなる。体重計にのり、急に身体を沈めながら目盛りを読む。感じとしては、下に勢いをつけたのだから、秤りには大きな力が加わるよう思えるのだが、実際は一瞬軽くなる。

身体の重心はどんなに速く沈めようとしても、石を落したときの落下速度より、大きくなれない。これは人間の意志では自由にできない物理法則である。しかし筋肉を思いきり縮めれば、意志により、脚を落下速度の大きさよりも速く縮めることができる。

このとき、足の縮まる速さが、自由落下の速さに近づくにつれ、足が床をおす力は小さくなり、いわゆるスキーにおける抜重の現象がおきる。さきにあげた秤りの目盛りが軽くなった例は抜重の現象なのである。

体重計による実験をもう少し調べてみよう。身体が沈みはじめた直後、ほとんど0になった目盛が、再びすぐに、体重よりもずっと大きな値になることがわかる。すなわち身体を沈める動作には抜重作用を示す位相と、加重作用を示す位相があるのである。

同じことは、重量計の上で、縮めた状態から伸び上がる動作をしたときにもあらわれる。このようにして、抜重作用は落下速度の増加中と上昇速度の減少中に生じるし、加重作用は落下速度の減少中と上昇速度の増加中に生じることがわかる。

スキーでは、方向を変える瞬間に姿勢を低くして、そのときに生じる抜重効果によって雪面からスキーを浮かし、摩擦が小さい状態でスキーの方向を変える技術がある。だが、体重計による実験のところで述べたように、この抜重効果がおきるのは沈み込み動作の前半で、後半になって縮む速度がおそくなり、やがて止まるようになると、姿勢は低くても逆に雪面への圧力は強くなり、方向転換のためのきっかけ動作は困難になる。

沈み込み動作の中の上下動そのものは直線的な並進運動であるから、それほど強い負荷の動作ではないが、これと同時に行なうスキーの方向を転換する動作は、回転の慣性が大きいために、強い負荷の動作である。そこで未熟のうちは、同じように力を出しているつもりでも、沈み込み動作の位相に比べて、方向転換の動作の位相が遅れることが多く、皮肉にも、最も転換しにくい加重状態にぶつかってしまうことになる。

身体の動作には、その部分の質量と筋力の関係から、加速性能の大きい動作と、小さい動作がある。それがいくつか組み合わさって全体的動作が構成されているときには、この例のように動作に位相差が生じてしまう結果、熟達者と一見して同じような動作をしていても、うまくできない場合が多い。

すもう勝負の大部分は相手を土俵の外に出して

決める押しである。その押しの力をうみだすものは、体重によって足と土俵の間に生じる摩擦力である。はげしく動きまわりながらの押しや四つ身では、移行動作のために重心の上下動が生じる。「さあ押してやろう」と思うと、一瞬身体を縮めるものだが、その瞬間に抜重現象があらわれ、摩擦力が小さくなるから、機を逸せず相手を押すと勝負になる。すもうや柔道では、すり足で動き抜重効果が起きないように心がけており、逆に相手に生じた抜重効果は有効に利用している。

走り幅とびでは、踏み切り中に重心を引き上げる距離を大きくする必要がある。そこで踏み切りにはいる2、3歩前から後傾姿勢に変えながら低めていくが、このとき、踏み切り直前にあまり急に低めすぎると、抜重効果が強く表われて脚が浮くので、十分なキックができなくなる。助走速度も大きく、踏み切りに低い姿勢ではいっているのに、跳躍距離が短いときなどには、この例がよく見られる。このような現象が起きないようにするために、走り幅とびの助走は「這うように走れ」ということが強調されている。

ここにあげたのは、姿勢を低めることが有効な技術であるはずのものが、ちょっとしたタイミングのズレで、かえってマイナスの効果が生じた例であるが、一見したところ、標準的な動作をやっているだけに、かえって誤りの発見が遅れ、長い間苦労する場合が多い。

ある運動の目的を達成するために、さまざまな動作が意識的、無意識的に行なわれる。このときに、たくみな動作を行なうためには動作によって実現しようとしている主観的意図が、現実の運動の自然法則性と一致していることが重要である。

図 2-1 足首, ひざ, 腰, 頭の付近の加速度の鉛直成分

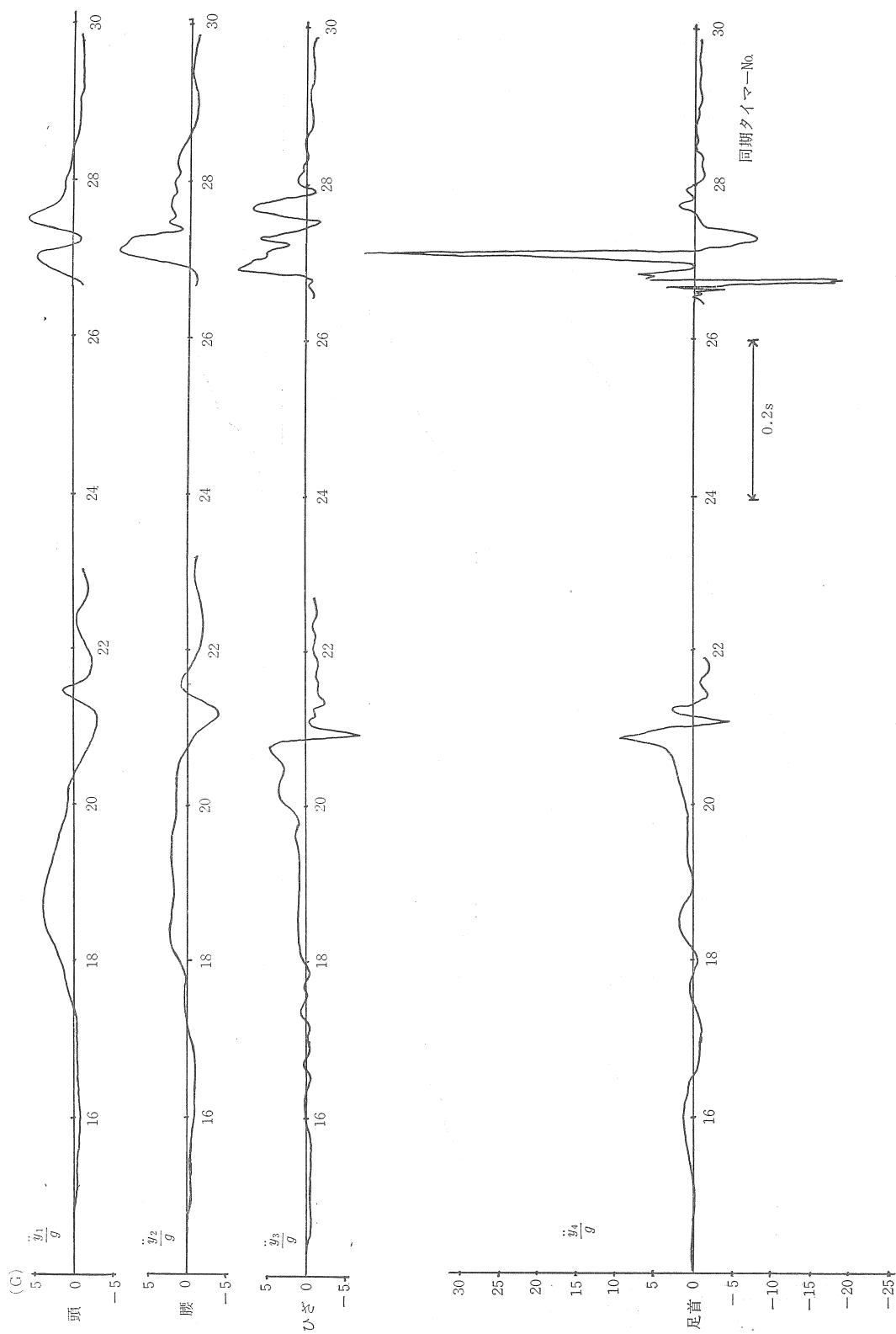


図 2-2 足首, ひざ, 腰, 頭部の速度

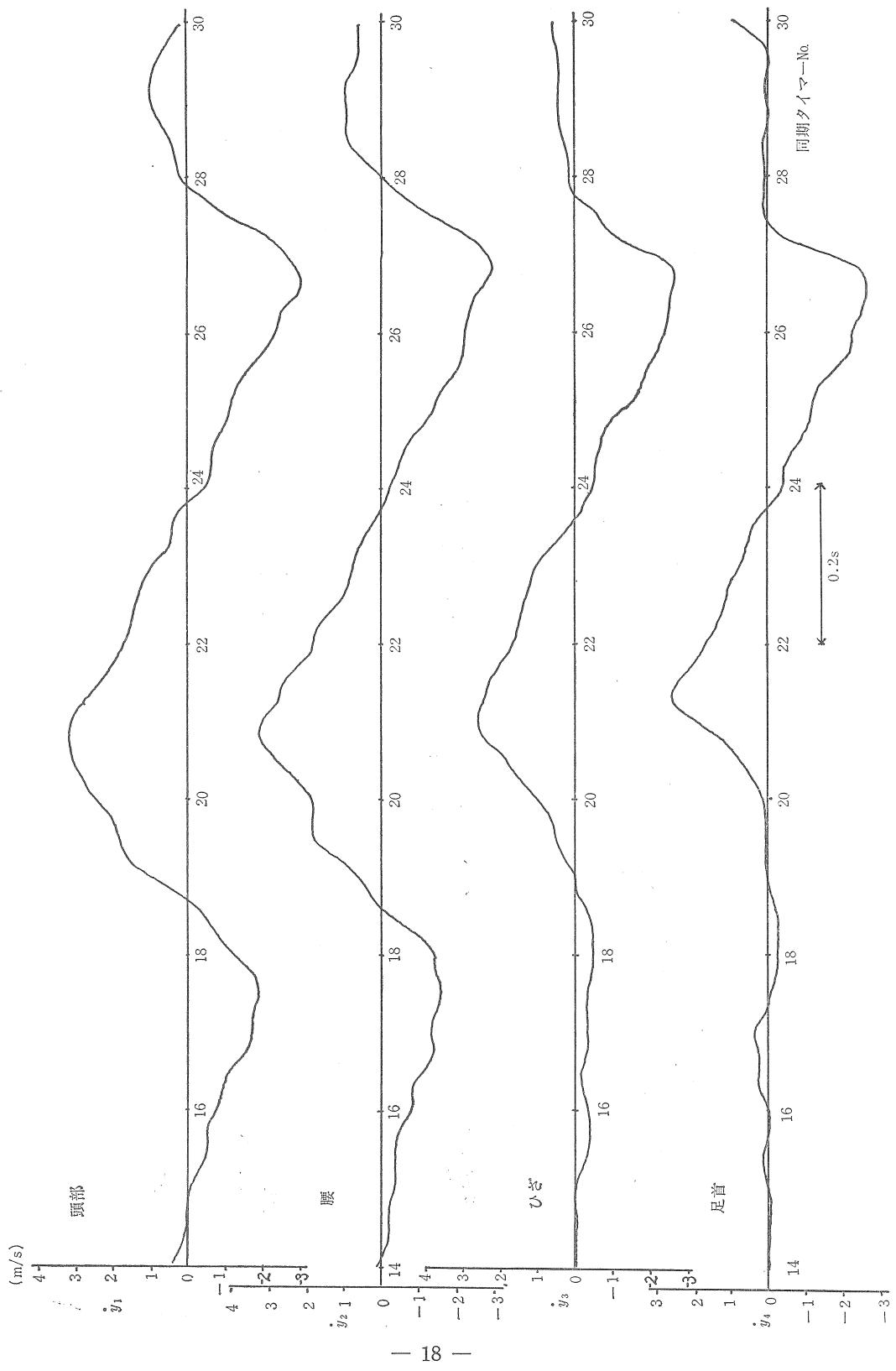


図 2-3 頭、腰、ひざ、足首の高さの変化

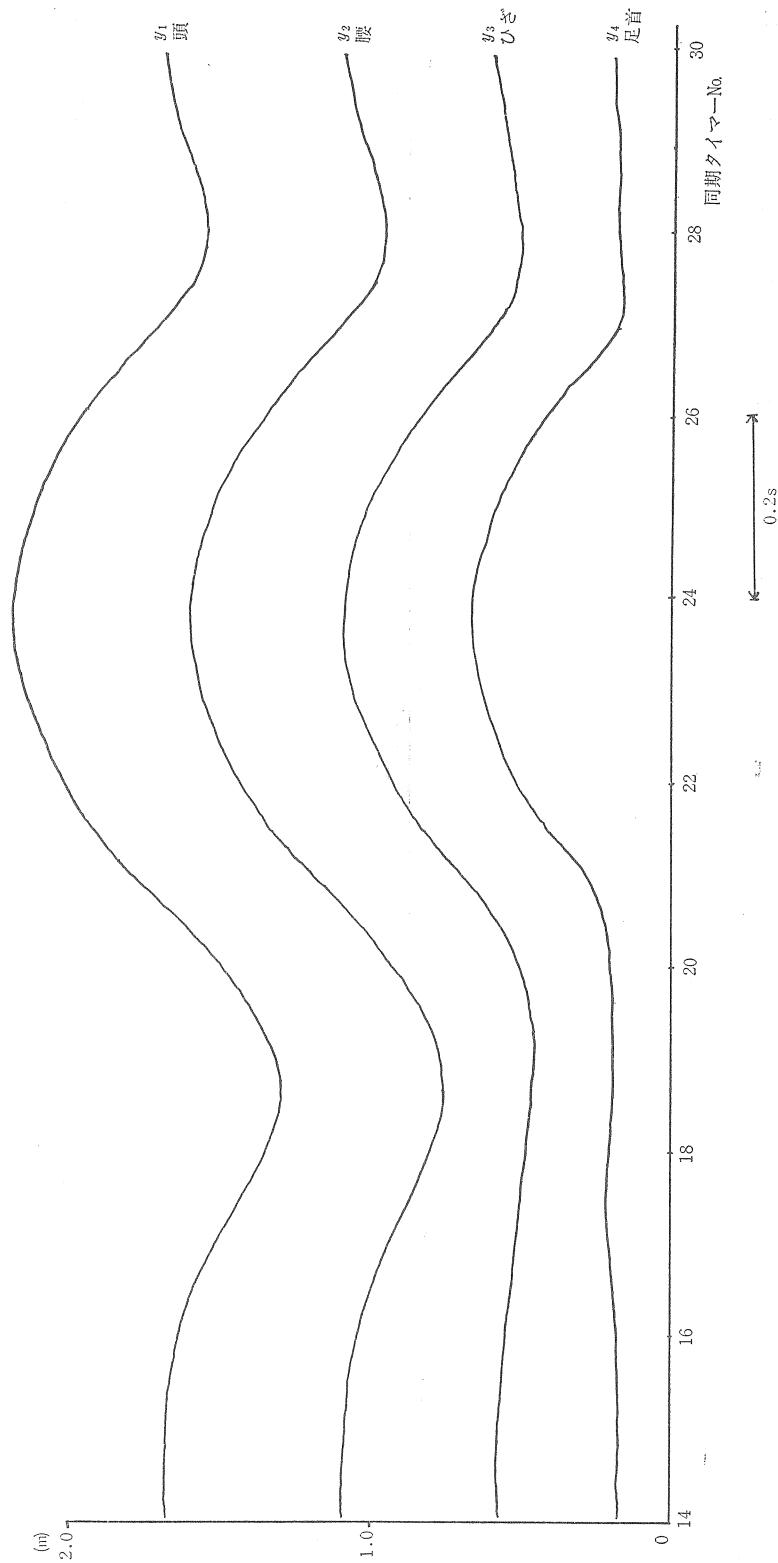
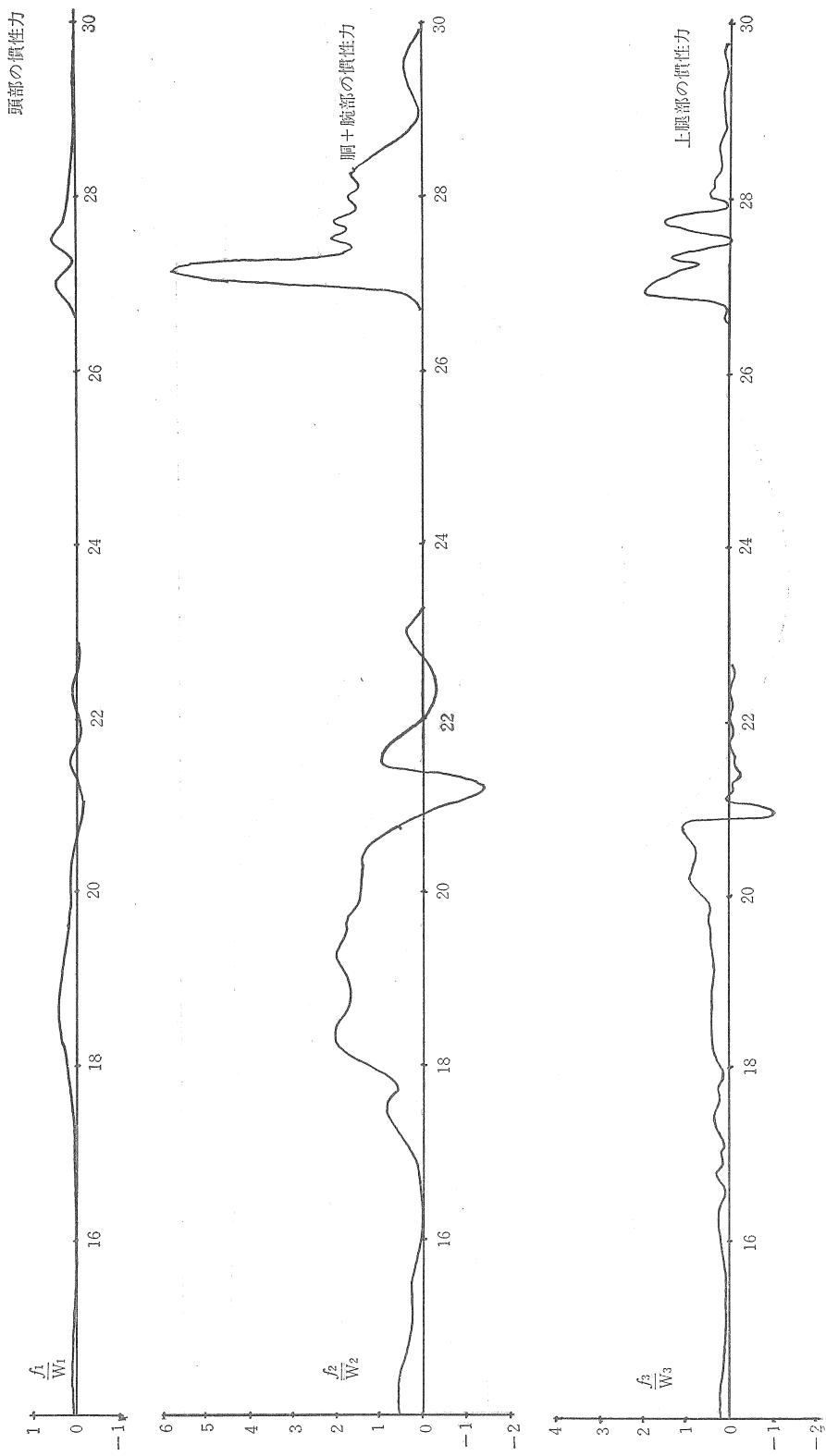
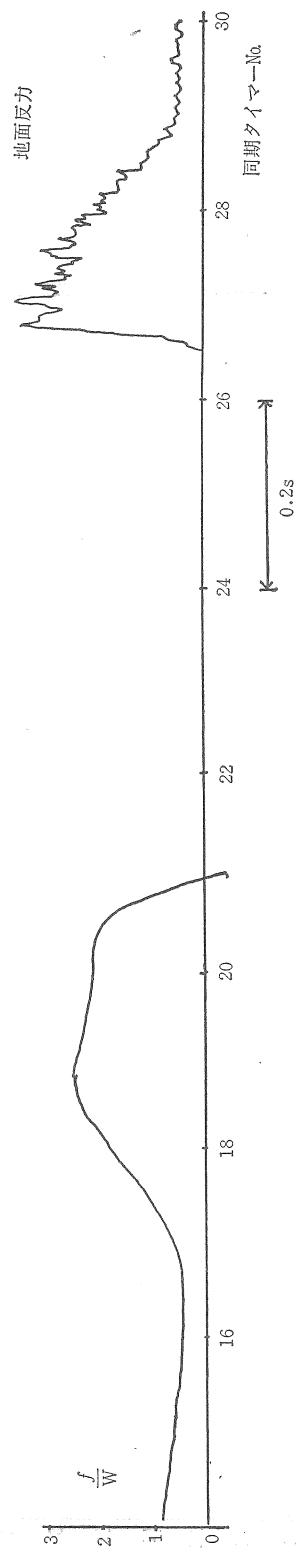
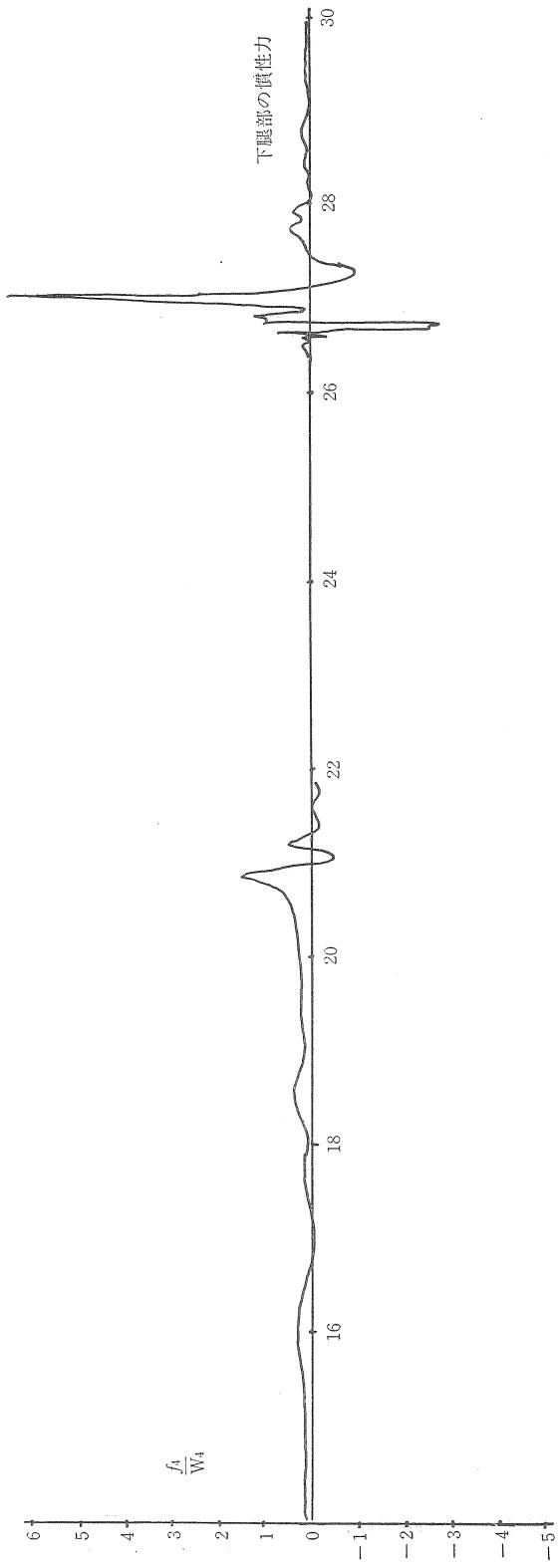
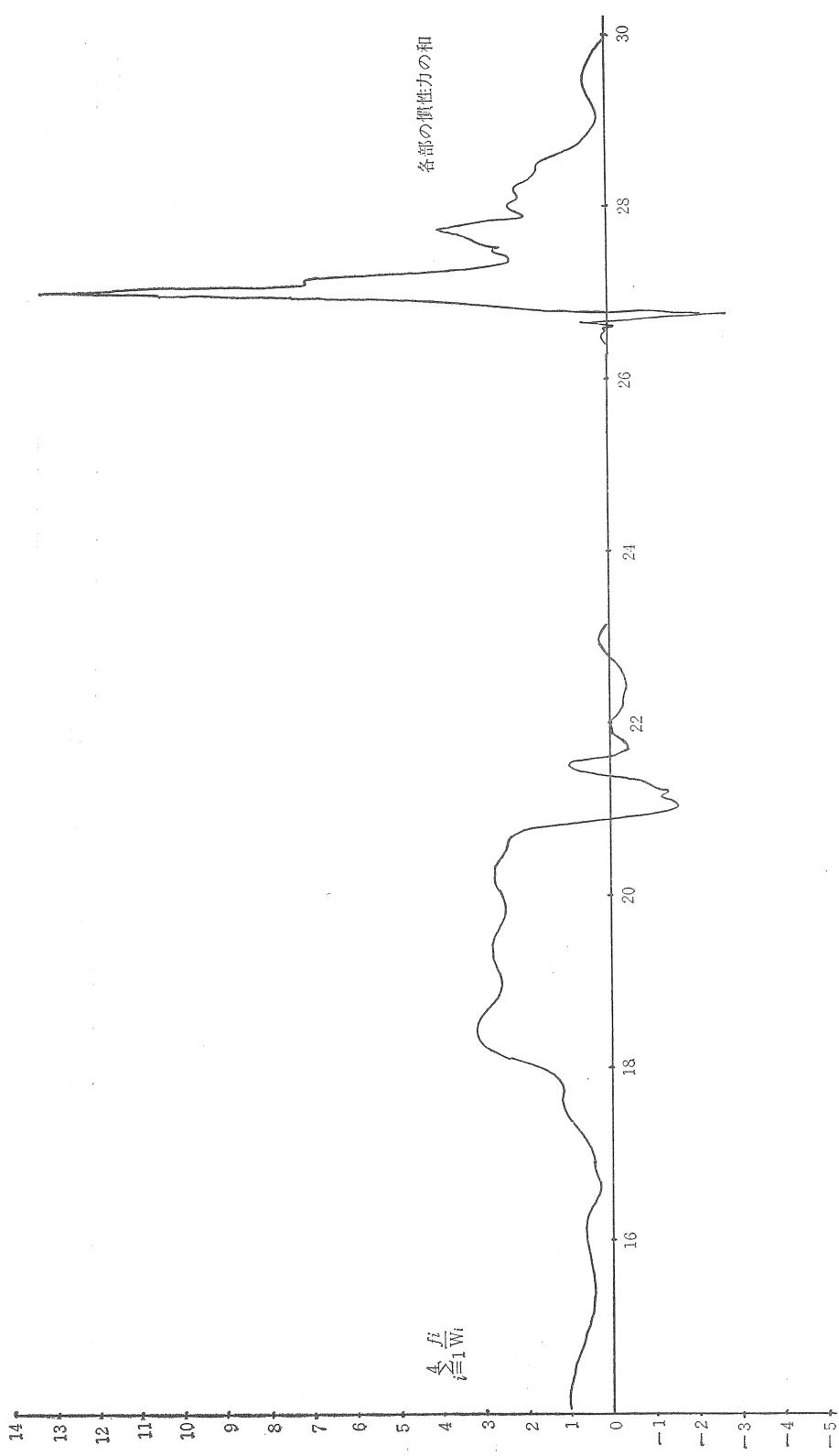


図 2-4 頭、胸+腕、上腿、下腿の慣性力の和と地面反力の比較







トレス動作の動特性からみた巧緻性の検討

永 田 晟

1. はじめに

巧緻性の本質を解明するには、なにかの動作（試技）をおこなわせた時の現象結果のみに注目測定しては解決にならない。たとえば、ボールをなにかの目標に的中させる動作で、その成績が良いか悪いか、その時のパワーがどのくらいであったとか等、従来のエネルギー論的な追究の方法では限界があると思われる。もっと本質を探究するためには、その結果が表出されるまでの課程が重要であり、たとえば筋肉内の収縮状態、神経インパルスの伝達状態、中枢神経の調節状態等の生体の内部機能を究明する必要がある。

さらに付言すると、巧緻性とはいかなるものかという定義を打ち立てて、その仮説を証明していく演繹的研究方法では、その結果には限界があり疑問視されよう。なぜならば、その定義仮説は余りにも不明な点が多く不定の事項が存在するからである。最初の研究発端は雲をつかむが如き状態であっても、いくらかの関係があると思われる事柄について総合的に研究を進めていけば、即ち一種の帰納法的研究を用いればその途上において判明することも多いと思う。学習、習熟課程の問題でも、その結果成績のみに注目するのではなくそのプロセスを評価しなければ、そのラーニングの本質は解明できないと同じである。

巧緻性の動きのうち、スムーズな動作とか、リズミカルな動きとか、調和のとれた動きとかは各種の物理量の釣り合いとも考えられる。それらの力をオプティマル（optimal）に調節している大脳の新皮質との関係でも追究できるし、旧・古皮質の動物的な本能的な動きをうまく阻止し、調節している新皮質の作用の状態でも把握される。巧緻的な動きは、諸機能の総合されたものであるが、

時間（Time）と空間（Space）の次元に分析すると一定の規則性や巧みな機能発揮のメカニズムも容易に把握できそうである。動作の発現は時系列やサンプリング理論からみて、微小時間に発揮される認識の仕事であるし、どのようなパラメーターで空間間隔に変換しているのかそのモデュレーターする能力の問題もある。そして行動者は時々刻々に空間動作のフィードバック情報をとり入れて調節運動をおこなっている。

2. 研究方法とその理論的な背景

巧みさを調べるには、最も精巧な動きを示す手とか指の操作運動を対象として調べ、その運動が発生するところの中核系、神経系、受容器系、運動器系を生理学的に探究すると同時に、これらの機能の統合された結果としての力学的な特性を調べるのが先ず第一歩の分析であると考えた。そこで各種各様の図形のトレス動作を被検者に課した。Fig. 3-1 のように10cm幅、20cm幅の横線分、それぞれの往復線分、一辺10cmの正三角形、一辺10cmの正方形、直径10cmの円、半径13cmから3cmに小さく変わる5重渦巻き弧の8種類の図形を使用した。自動制御理論の基礎から言えば、これらの図形は制御対象群であり、目標値はなめらかにトレスすることである。被検者の手と道具としてのペンは操作部で、ヒトの最終的な調節部でもある。手とペンは人間と道具との結びつきが検討される。制御量として発現されるのはトレスされた軌跡や振動であって、検出部は各種のトランスデューサーであり、視覚、筋覚は生体の中核制御部へ入る前段の受容器でもあり調節部でもある。これらは Fig. 3-2 のように一つのクローズループを形成した運動システムと考えられる。これらを分析するときも古典的な自動制御理論を適用し得る。

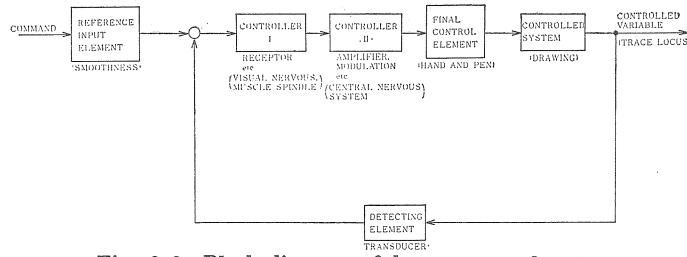


Fig. 3-2 Block diagram of human control system

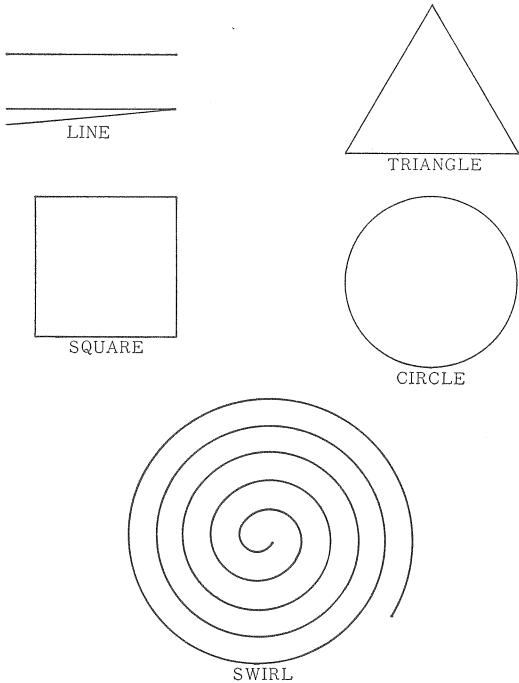


Fig. 3-1 Various kinds of drawing

ただ、人間の運動系は非線型部分が多いので、微分方程式をたてたりラプラス変換やフーリエ展開することが無理なように思われる。しかし、これらの非線型性と線型性の関連は自動制御装置の工学機械系の方でもくわしく検討されているように、先ず線型理論で解析してそれから非線型の方へ展開するのが常道である。この点、生体独特の現象でもない。非線型理論の展開の基礎として、線型制御理論を適用し運動現象を検討すれば有意義な結果が得られるだろう。従来不明であったり分析不能として放置されていたデータも上記制御理論を応用して、分析も可能となり、あいまいなものもすっきりする事象も多い。

本実験のトレース動作も運動システム、フィードバック制御系と考え、一種の生体調節系を形作

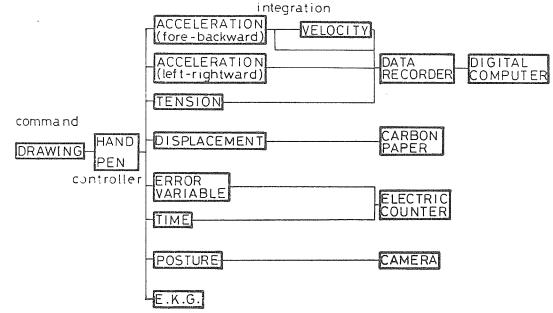


Fig. 3-3 Measurement items

っているとする。これを模式的にブロック線図で示したもののが Fig. 3-2 で、機械系のフィードバックシステムと類似しているので、ほぼ同一の原理で解析できるとする。各要素に該当するものをカッコで示した。

これらを検討する測定項目は、Fig. 3-3 のように 8 項目を設け、データレコーダーに集録し、ミニ・コンピューターでフーリエ変換、相関関数、パワースペクトル分析等をおこなった。被検者は成人男子 5 人で特別な手運動の経験者ではない。

加速度計はフィリップ製で手に接着した。張力はペン先に半導体ゲージを張り付け測定した。速度は前後方向の加速度を積分して得た。トレース変位はカーボンペーパーに描かせ、時間要素はエレクトリック・カウンターで読み取った。所定のトレース範囲からはずれたエラー軌跡（偏差）の測定は、3, 2.5, 2, 1.5cm 幅に狭く変化していく軌道の周囲に高さ 1.5cm の壁が設けられて、それにペンが触れた場合のみカウントするようにしてある。

なお、円や正方形や渦巻き形图形のトレース動作と合わせて、全身の回転運動を与えて、その影響も合わせて検討した。この回転運動は图形のまわりを出来るだけ速く 1 ~ 4 回転するもので、手

と全身運動の協応性やコーディネーション能力、そして外乱の影響が測定できる。

3. 結果と検討

記録の一部をデータレコーダーから取り出し、ペンオッショロに再生し描かせたものが Fig. 3-4 である。一見してランダムな不規則な波形を示しているのが加速度曲線で、一種の粒子のブラウン運動や煙などの散乱現象と似ている。

測定結果を以下の順でまとめた。

1) 図形トレースの難易度と測定値

Fig. 3-5 のように横軸の左側から順に、トレースするのに難しそうに思える图形を配列し、縦軸に生体の循環系の変化示標として心拍数変化、トレース動作の時間的単位として速度変化、時間の微分的要素として前一後方向と左一右方向の加速度変化、時間的要素に加え空間的変化を考慮した総合的結果として張力変化（ペン圧）等をまとめた。心拍数は图形の難しさとともに上昇し、生体

への負担度が増加していることを示す。その逆に張力や速度は減少傾向を示し、图形の難しさは動作の、緩慢と力の配分に影響を与えている。あまり力を加えすぎると敏捷な動きは不能となるだろう。加速度変化は無規則性に変化しているようだ。

2) 時間的な張力変化

正方形と渦巻き图形を例として、トレース图形動作中の時間的な張力変化をまとめたものが Fig. 3-6 である。他の图形については省略するが、これらと同じように图形のコーナー及びターンする箇所で必ず張力の減少がみられる。特になめらかな動きと最小時間の仕事遂行とは相反する面がみられるが、現代の最適制御理論や Bung-Bang 運動の原則からみて、中庸の力でトレースするのが、最小時間になめらかなトレース動作の完了がみられる。また張力変化にはリズミカルな変化もみられ、時間軸に対して正弦波状の波がみられるとなめらかな動作のようだ。

3) トレース時間とエラー時間

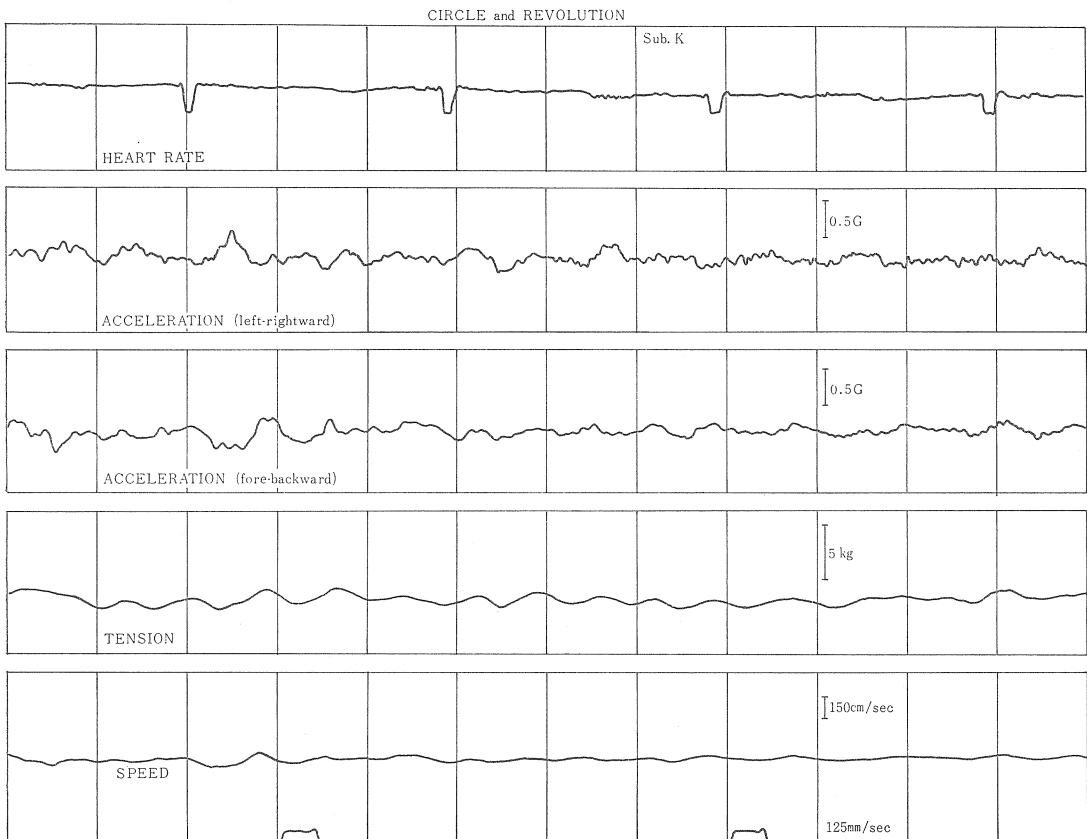


Fig. 3-4 A example of results

トレス動作の制御成績としては課題を遂行するのに要した時間（4回の試行を平均した値）と軌道からそれたエラー時間との比によって評価さ

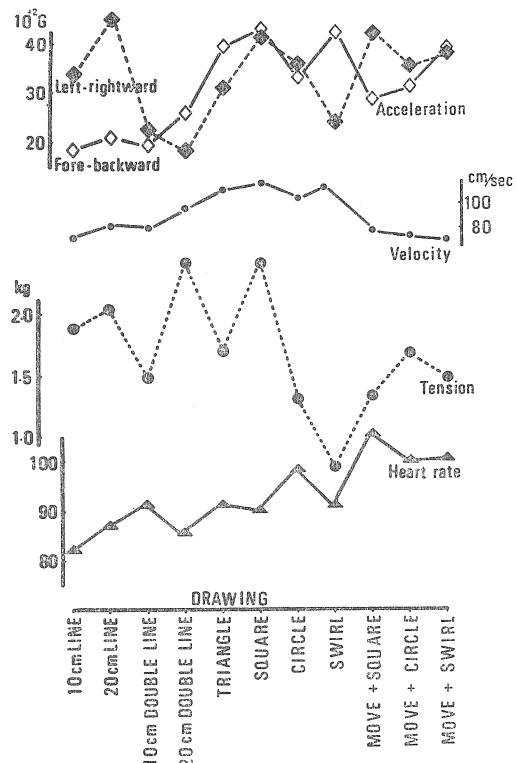


Fig. 3-5 Heart rate, tension, velocity and acceleration changes of drawing

れる。これは W. Oppelt が提案した“制御係数”の考え方である。Fig. 3-7 は各種図形のうち渦巻き形のみを取り上げ、人の被検者ごとに縦軸の上段には所要時間、下段にはエラー時間がまとめられている。そして右隣りに並列している棒は回転運動を与えた場合の変化である。

半径の大きな渦巻きから小さな半径へと変化する弧の場合とその逆の場合と両方実施したが、被検者ごとの個性がみられ、一定のパターンはみられなかった。得意、不器用が出ているようだ。回

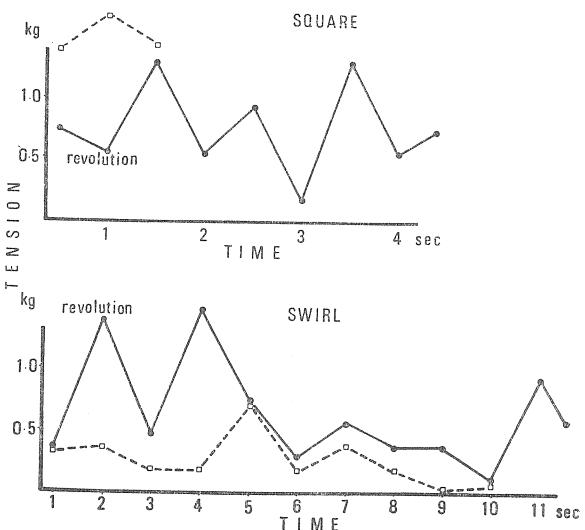


Fig. 3-6 Tension-time change

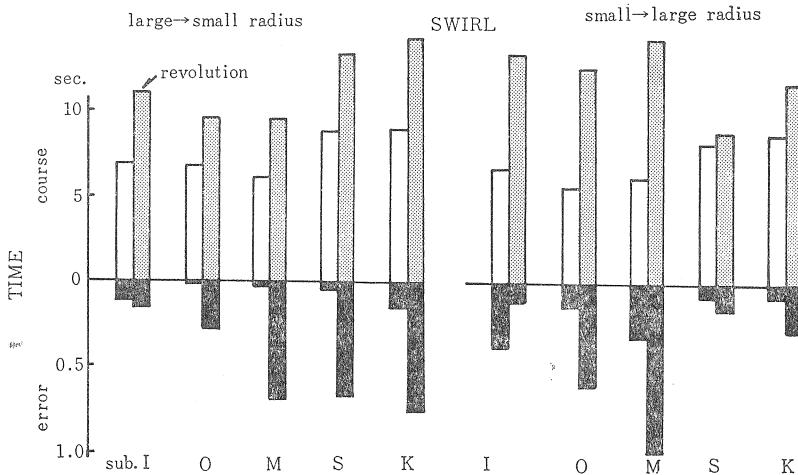


Fig. 3-7 Course and error times of hand tracing

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

$$X(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp\left(\frac{2\pi i n t}{T}\right)$$

$|\bar{A}_n|^2$: POWER : FOURIER TRANSFORMATION

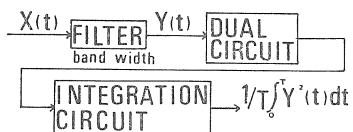


Table 3-1 Fourier transformation and power spectrum circuits

転走運動を与えると当然のことながら所要時間もエラー時間も延長されるが、巧みな被検者はその変化量が少なく、大きい半径から出発する場合の被検者 I や S、小さい半径から出発する場合の S や K が典型的な巧みな動作を示していると言える。

4) パワー・スペクトル分析

時間的に不規則に、確率的な変化をする量 $x(t)$ があるとすると、その確率課程は定常であるとする。ある時点 t_1 から (t_1+T) の間の観測された加速度の変化 $x(t)$ を Table 3-1 のように Fourier 展開し、その係数 A_n の絶対値の自乗平均値 $|\bar{A}_n|^2$ を求めておく。勿論 $|\bar{A}_n|^2$ は $T \rightarrow \infty$ とし

た場合は極限関数に収束する予定で、定常確率課程におけるパワー・スペクトルと名付けた。

ミニ・コンピューターで Table 3-1 の下段の回路のようにフィルターを通して、自乗回路に入れ、それを積分したものをとり出して、レコーダーで記録した。加速度データ分析入口の周波数バンプ幅は 1 Hz で、処理される信号の長さ 0.1 sec とした。これらの結果をまとめたものが Fig. 3-8, 3-9, 3-10 である。図形はそれぞれ正方形、円形、渦巻き形で、横軸に加速度周波数、縦軸に加速度振幅の自乗の平均値がとっている。実線はトレース手運動のみの場合、破線はトレース手運動と回転走運動を与えた場合で、それぞれの曲線パターンが容易に比較できる。加速度の前後、左右方向によって周波数帯域ごとのパワースペクトルパターンは異なる。これらの図は、5人の被検者中3人に類似してみられたパターンを代表的にとり出したものである。一般に回転走運動を与えた場合のパワー密度は濃くなり、高周波成分があらわれている。即ちロー・パスよりもハイ・パス・フィルターが生体内に存在するようだ。

4. 論 議

1) 生体調節系の成立と制御理論の応用

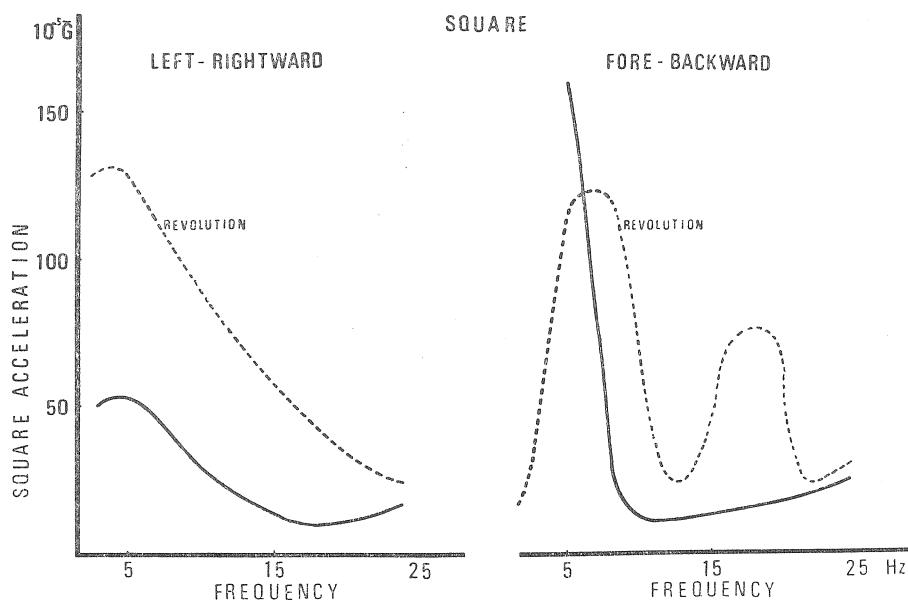


Fig. 3-8 Power spectrum density (square)

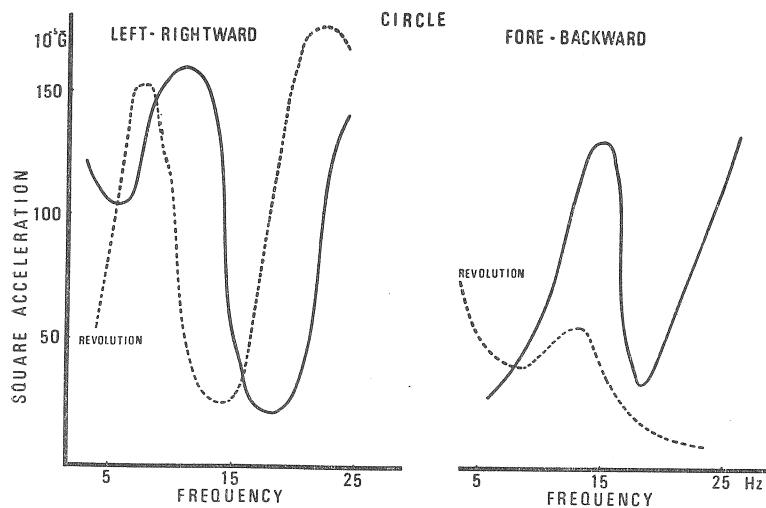


Fig. 3-9 Power spectrum density (circle)

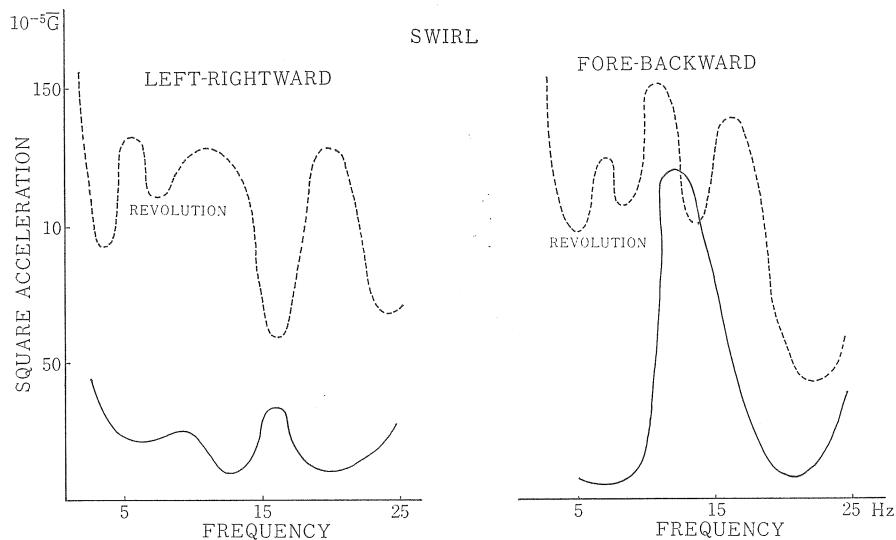


Fig. 3-10 Power spectrum density (swirl)

巧緻性をとらえる方法としては、仮りの定義を立ててそれを証明していくやり方もあるが、もつと具体的な事実に注目して、それらを組み立て、総合統一していく方法がより客観的なデータが利用できる。その一例として、各種図形のトレース手動作中の各種の物理学的な資料は、すべて生体が刺激を受け、中枢神経で調節命令し、その結果を動作として発現している。そしてその制御量は時々刻々負のフィードバック情報として生体の受容器や効果器へ返されている。こうした一種のクローズループが成り立った生体調節系の解析によ

って、手動作が分析される。機械系に類似した生体調節系の検討によって動作の巧みさ、巧緻性解説の資料が得られるので、身体運動を機械系のシステムと同一と考え、Fig. 3-2 のようなブロック線図で示した。各要素がすべて最適に活性化されなければならないが、その状態分析は、制御理論からみた目標値に対する過渡応答、定常応答、周波数応答の様子を分析し、動作の巧みさや技術の程度が安定性や制御成績（係数）や速応性の面から解明できる可能性が出てきた。

2) なめらかな動きと加速度

巧緻性の本質は不明であっても、これを構成している要素として各種の物理量の調節がある。先ず、動作の力学的なコントロール状態に注目する。巧みに力を調節し、適度に力が発揮されると“なめらか”な動きがあらわれ、力のバランスがとれたリズミカルな動きが、発現されると思う。Fig. 3-11 に示すように紙とペンとの間の摩擦力、手の慣性力、粘性力、弾性力の4つの力が拮抗し調節コントロールされて、なめらかな動きがあらわれる。この動きをみるとためには動作中の振動を測定すれば、評価関数としても妥当であるし、簡易に測定可能である。本実験では特殊な人体加速度計（超小型）によって2方向の振動が測定された。そしてこれらの変化は、フーリエ解析（周波数分析）し、パワー・スペクトル密度を抽出することによって、より一層動作の特徴となめらかさが明瞭となった。たとえば各種図形のうち Fig. 3-8 の正方形では低周波成分のパワー密度が大きく表われていて、生体の中枢調節部には、ロー・パス・フィルターが働くメカニズムが存在することを示している。渦巻き形の難しい図形や円形のトレース動作になると、左右方向の加速度においてパスする周波数帯域が2つ以上あらわれ、スペクトル曲線においても波動状態を示した。

Table 3-2 にパワー・スペクトル密度の比較的大きな周波数帯域をまとめた。これからもわかるように、トレース動作が難しくなると周波数の大きい成分が多くあらわれ、振動の大きさ、即ちなめらかな動きの破綻がみられた。なめらかな動きであれば、低周波数成分に集中することが多く、巧緻性の解明には、動きの周波数成分、帯域で評価できる妥当な資料を提供したことになる。

また回転運動を与えたことによって周波数帯域が変わるような被検者は、運動の可動幅やレンジを大きく所有する者であるが、巧みなスキルの持主であるとはいえない。

3) 回転運動の影響

Fig. 3-2 をまとめてしまうと Fig. 3-12 のようになる。この場合、直結フィードバックとして考えたが、生体の場合フィードバック要素を持つという説もある。Fig. 3-12 のブロック線図を数式化すると ($G_2(s)$) は生体調節系 I, ($G_1(s)$) は調

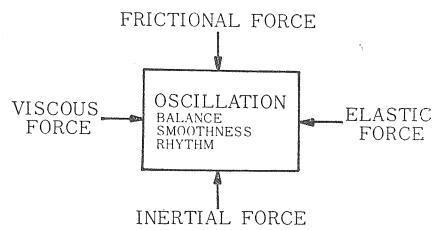
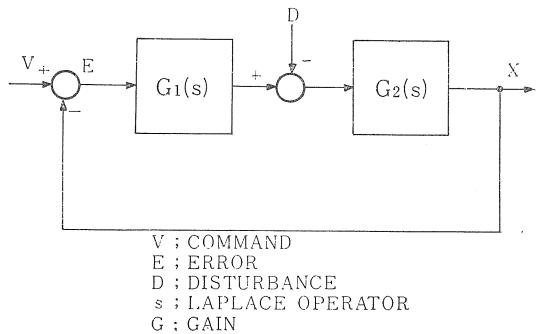


Fig. 3-11 Balance of four forces

| | | FREQUENCY BAND | |
|--------|-----|----------------------|--------------------|
| | | LEFT-RIGHTWARD (Hz) | FORE-BACKWARD (Hz) |
| SQUARE | T | 5 | 4~5 |
| | T.R | 5 | 7~8, 17~19 |
| CIRCLE | T | 10~11, 23~25 | 15, 25 |
| | T.R | 7~8, 20~22 | 3~4, 12~13 |
| SWIRL | T | 3~4, 15~16~16, 24 | 12~13 |
| | T.R | 2~3, 6, 11~12, 20~21 | 2~3, 6, 12, 16 |

T : TRACE
R : REVOLUTION

Table 3-2 Frequency bands of power spectrum density



V : COMMAND
E : ERROR
D : DISTURBANCE
s : LAPLACE OPERATOR
G : GAIN

Fig. 3-12 Block diagram of disturbance

節系 II のゲイン)

$$E(s) = \frac{1}{1+G(s)}V(s) + \frac{G_2(s)}{1+G(s)}D(s) \dots \dots \dots (1)$$

となる。ただし $G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s)$ である。

ここで外乱として付加したものが回転運動であるが、主に生体調節系(II)即ち運動系に影響し、調節系(I)即ち視覚や筋覚等の受容器や中枢系の後に挿入されると考える。外乱がブロック線図のどこに入っていくのか、その場所はコントロール結果に重大な影響をもち、数理的に解析する上でも大切なことである。(1)式の右辺の前項は、

目標値即ちなめらかなトレース動作のみに関係したもので、外乱に関係する項は、 $\frac{G_2(s)}{1+G(s)}$ のみでこれを検討すればよい。制御理論上、偏差 $E(s)$ を小さくすることが調節系がうまく働いたことになるし、トレース動作も巧みであったとすれば、 $\frac{G_2(s)}{1+G(s)}$ の $G_2(s)$ を最小限に留め、 $G(s)$ を大きくした方が値は小さく保てる。即ち外乱の影響は最小限にいくとめられる。回転運動が付加されると当然 $G_2(s)$ は大きく変化するので、 $G(s)$ という生体の一巡伝達関数を大きくすればよいことになる。そのためには、 $G_1(s)$ に比例して $G_2(s)$ 即ち調節部 (I) のゲインを大きくする必要がある。単純な計算であるが、このような機能の持主こそ巧緻性ある被検者で、外乱というストレスが入るとそれに協応して生体調節系 (I) が増幅され、受容器関係の機能の重要性が再認識される。

4) 張力の周波数分析

従来の時間系列からみた張力変化のみから動きを分析(参照 Fig. 3-6)する方法に加えて、周波数系列からみた張力変化をまとめてみると、動きの特徴があらわれ、器用さと不器用さの差が明らかとなる。これは加速度曲線のスペクトル分析を模擬した方法である。その一例として Fig. 3-13 に渦巻き形のトレース動作中の張力変化を示した。外乱を与えないときは、17Hz に最大の張力

がみられるが、回転運動を与えると 5Hz 以下と 27Hz 以上の 2 カ所に大きな張力値があらわれる。個人差はあるが、外乱付加によても、なめらかな指数曲線様の変化パターンを示す被検者が巧みであるようだ。凹凸ある曲線を示す被検者は、Fig. 3-7 の制御係数分析からみても、悪い成績を示している。

5) 今後の問題点

スポーツ・スキルに秀れている人と未熟な人の差を明らかにする必要がある。対象群を抽出し本実験をおこなう必要がある。

また生体調節系のなかを各要素、ブロックに区分し、それぞれの機能を明らかにして、巧緻性制御への関与と統合化のメカニズムを追究する必要がある。そのため薬物や外乱等の代入法、挿入法を取り入れ、コンピューターと生体系のハイブリッドシステムを作り、自由可変できる実験が必要となる。神経系の麻酔や疲労状態を人工的に作り、トレース動作への影響を調べてみるのも面白い。Fig. 3-12 の制御部 (I) と (II) とを完全に区分して、それぞれに外乱ストレスを与え、その影響度が客観的なデータで定量化できるシステムを作るべきである。

巧緻性の本質解明にいくらかの接近がみられたら、マステストやフィールドテストに留まらず、

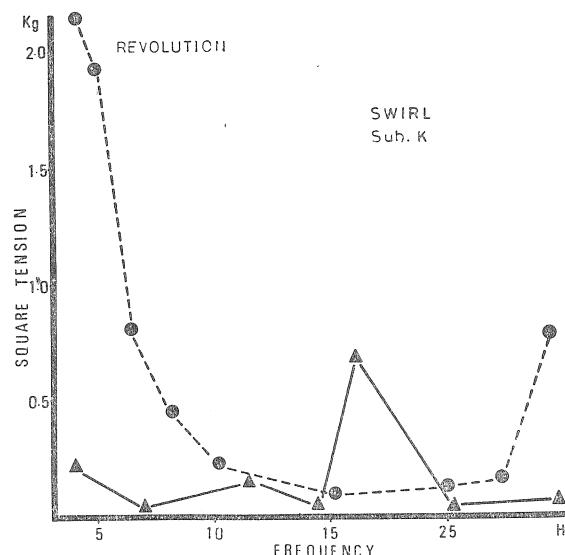


Fig. 3-13 Tnsion-frequency change

一般スポーツマンやコーチへの応用が必要で、競技技術の向上と習熟時間の短縮に貢献すべきである。

5. まとめ

(1) 巧緻的な動きを考察するのに、なめらかな動きに注目して、その動作現象を制御理論的に分析すると有意義なデータを得る可能性を知った。

(2) なめらかな動きは、各種力のバランスがあるので、それぞれの力のリズミカルな発揮現象を力学的に検討する必要があり、加速度現象（慣性力）をフーリエ解析し、パワースペクトル密度曲線を描いた。その結果、低域周波数のパワー成分が大きいほど、なめらかな動きが強調された。

(3) 2～3の周波数帯域のパワー成分を所有する者は、難しい運動への可能性と適応能力を示し、能力の余裕度が大きいと思われる。

(4) ある運動中に、外乱に入った場合、うまくその影響を最小限に組み止める能力の持主は、巧みな動作をおこなう人のようだ。それには、受容器系の生体調節器官が增幅される必要がある。

その一例として、張力の周波数分析の結果、指數曲線状に変化する張力発揮者が、巧みな人のようだ。

参考文献

- 1) Wiener, N. : Cybernetics or control and Communication in the animal and the machine, John Wiley and Sons, (1961)
- 2) 加納、永井：確率課程論、情報科学講座、A.5, 2, 共立出版 (1966)
- 3) 磯部編：相関函数およびスペクトルーその測定と応用一、東京大学出版会 (1966)
- 4) 北川：情報科学の構想、情報科学講座、A.1, 2, 情報科学の動向、I, 第1章、共立出版 (1968)
- 5) Yasuhara, M. : Handwriting analyzer and analyses of human handwriting movements, J. Psycho, R. Vol. 11, No. 3, (1969)
- 6) 伊沢：自動制御入門、OHM文庫、オーム社(1962)
- 7) 高橋：システムと制御、岩波書店 (1968)
- 8) 江藤：医学と生物学のための物理学、共立全書59 共立出版 (1971)
- 9) 須田訳：生体制御理論テキスト、医学書院(1969)
- 10) 岩瀬、玉重、古河編：生物電気、南江堂 (1970)
- 11) 真島：生理学、文光堂 (1971)
- 12) Stark, L.: Neurological control systems studies in bioengineering, Pleum Press, (1968)

動作の制御理論的研究

増山英太郎

前置き

筆者は、巧緻性を、制御成績と速応度と安定度とが、うまく調和した状態と考える。人間は柔軟なので、種々の教示や、種々の困難度の課題を与えると、それ等に適した巧緻性を発揮するもののように思える。ここでは、教示と課題の困難度が巧緻性に及ぼす影響を、トラッキングの実験を通じて検討したい。

実験目的

制御対象の無視出来る事態における Compensatory Tracking では、目標値たるランダム波を作成するために通すフィルターの折点周波数（一種の困難度を表わす、要因1）と教示（要因2）とが、目と手の協応動作にどのように影響するかを、制御理論の立場から、実験を通じて検討すること。

実験手続

実験事態のブロック図は図1の通りで、表示部たるスクリーン上を、水平方向に光点がランダムな動きをし、これを目標値 $x(t)$ とよぶ。ランダム波を作成する際に通した低域滯波の伝達関数は $1/(1+TS)^4$ によって表わされ、その折点周波数 $\omega_i = 1/T$ （要因1）は、1.5, 2.5, 4.0, 6.0, 15.0 rad/sec と変化させた。被験者は、目で目標値を見て、操作部たる手中に入る軽いツマミを、目標値をうち消すように回転し、操作量 $y(t)$ を与える。なお、ツマミの $\rightarrow\leftarrow$ 方向の回転を、各々 $\rightarrow\leftarrow$ 方向の変位に対応させた。一旦ツマミ回転が始まると、表示部上の動きは、目標値ではなく、それと制御量の差 [$x(t) - y(t) = e(t)$ ……(1)] たる偏差を与える。偏差を注視している目は眼球運動を行うので、その生理的メジアとしての EOG を記

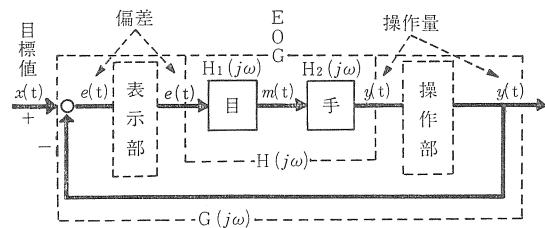


図1 実験事態を表わすブロック図

録し、それを $m(t)$ とよぶ。つまり、目と手は、機能的に見ると、図1の通り直列結合されていると考えた。各条件で制御動作が行われる前に、次の二種類の教示（要因2）のいずれかが与えられた。

第1教示は「普通にトラッキングして下さい」であり、第2教示は「目も手も光点を追いかけて下さい」であった。要するに、要因1の ω_i は5水準、要因2の教示は2水準で、繰り返しほんなかった。

被験者は男子成人1名(Sa)で、1条件の1連続制御動作の時間は約4分であった。スクリーン位置は目の直前約90cmで、目標光点の最大振れ幅は、そこより左或は右に約27.4cmであったがツマミの回転にはそれより余裕を持たせて、左或は右に約36.5cmの振れが可能なように設定した。

実験データとしては、図1の $x(t)$, $e(t)$, $m(t)$, $y(t)$ を磁気記録と紙記録し、

$$\int_{-T/2}^{T/2} \{x(t)\}^2 dt \text{ と } \int_{-T/2}^{T/2} \{e(t)\}^2 dt$$

を紙記録した。

は分散を表わすと考えられるからである。

紙記録した $x(t)$, $e(t)$, $m(t)$, $y(t)$,

$$\int_{-T/2}^{T/2} \{x(t)\}^2 dt, \quad \int_{-T/2}^{T/2} \{e(t)\}^2 dt$$

の, 教示 1 のもとでの $\omega_i = 6 \text{ r/s}$ 条件の結果を図示すると図 2 の通りである。二乗積分値がコンパレーターの働きによって 2 cm の間隔を折り返しつつ積分されていく様子がわかるであろう。

手順 2) 自己相関 $R_{ee}(\tau)$, $R_{mm}(\tau)$, $R_{xx}(\tau)$ 及び相互相関 $R_{me}(\tau)$, $R_{ym}(\tau)$, $R_{yx}(\tau)$ を計算するが, 例えれば $R_{ee}(\tau)$ と $R_{ye}(\tau)$ では:

$$R_{ee}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t+\tau) e(t) dt \dots \dots \dots (4)$$

$$R_{ye}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(t+\tau) e(t) dt \dots \dots \dots (5)$$

であり, $R_{mm}(\tau)$, $R_{xx}(\tau)$, $R_{me}(\tau)$, $R_{ym}(\tau)$, $R_{yx}(\tau)$ の式も, 添字と変数との関係から明らかで, いち

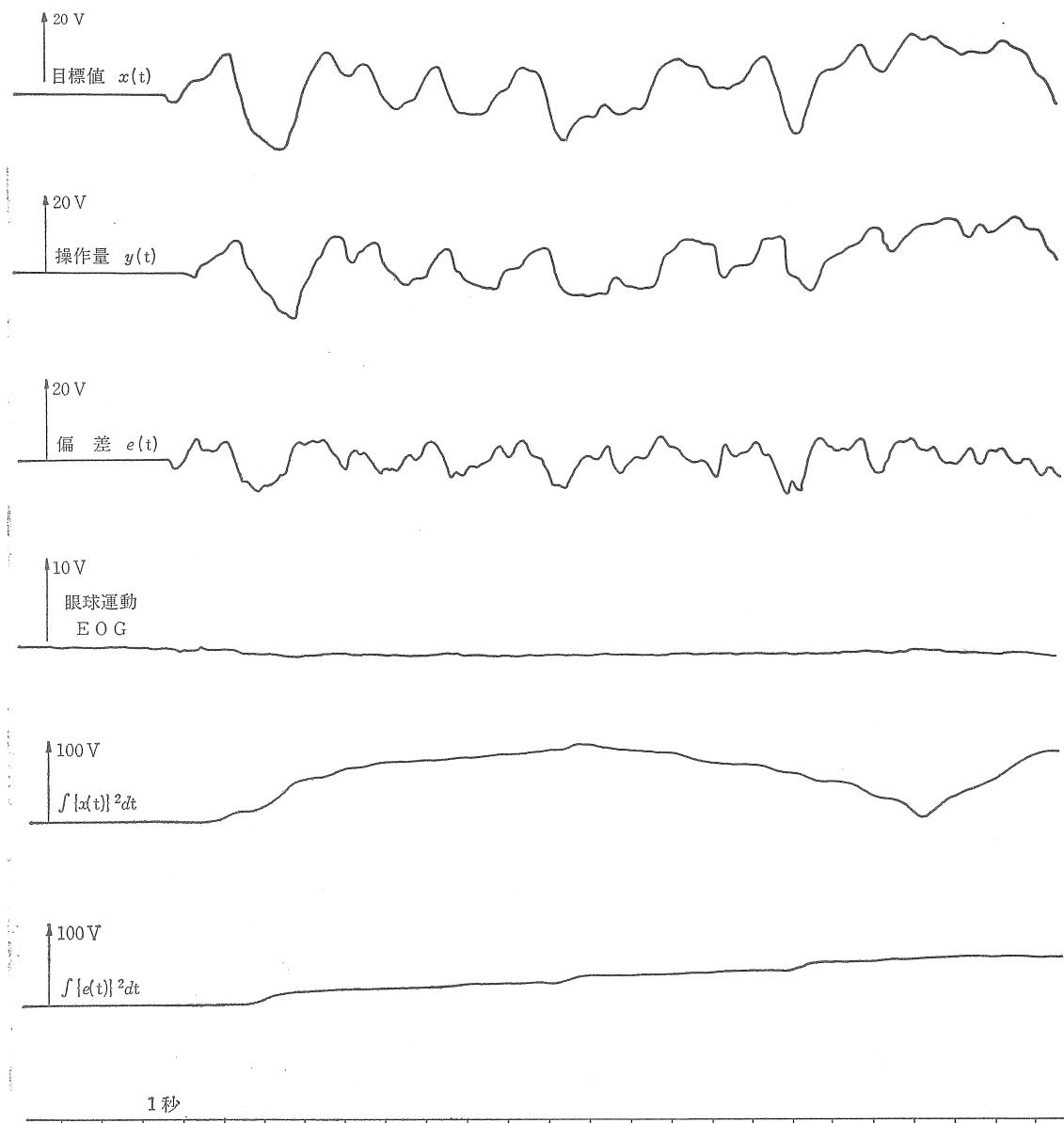


図 2 教示 1 のもとで $\omega_i = 6 \text{ r/s}$ の目標値のトラッキングで得られた実験データとしての紙記録

いち書くに及ばないであろう。いずれもハイブリット・コンピュータによって、分析時間Tは200秒、A-D変換の際の時間きざみを0.1秒として計算した。図2の $e(t)$ と $y(t)$ から計算された $R_{ee}(\tau)$ と $R_{ye}(\tau)$ を図3として示す。前者は偶関数であるので左右対称であるのに対して、後者は奇関数であるので左右非対称であることがわかる。前者の縦座標が最大のところが $R_{ee}(0)$ であることともわかる。

手順 3) 相関からスペクトル密度の計算の仕方を $S_{ee}(\omega)$ と $S_{ye}(\omega)$ を例として述べる。

先ず Hanning Lag Window $D_3(\tau)$ を $-4.5 \leq \tau \leq 4.5$ 秒で計算する：

$$D_3(\tau) = 0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{\pi\tau}{4.5}\right) \dots \dots \dots \quad (16)$$

このウインドウをかけてスペクトル密度を計算すると、

$$S_{ee}(\omega) = \int_{-4.5}^{4.5} D_3(\tau) R_{ee}(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad \dots \dots (17)$$

$$S_{ye}(\omega) = \int_{-4.5}^{4.5} D_3(\tau) R_{ye}(\tau) \cos \omega \tau d\tau -$$

$$j \int_{-4.5}^{4.5} D_3(\tau) \sin \omega \tau d\tau \dots \dots \dots \quad (18)$$

これ等の比として周波数伝達関数 $H(j\omega)$ を求める事に關しては、上述の通りである。

手順 4) 図3の実験条件から得られた7種類の相関関数より計算された4種類の周波数特性 H_1

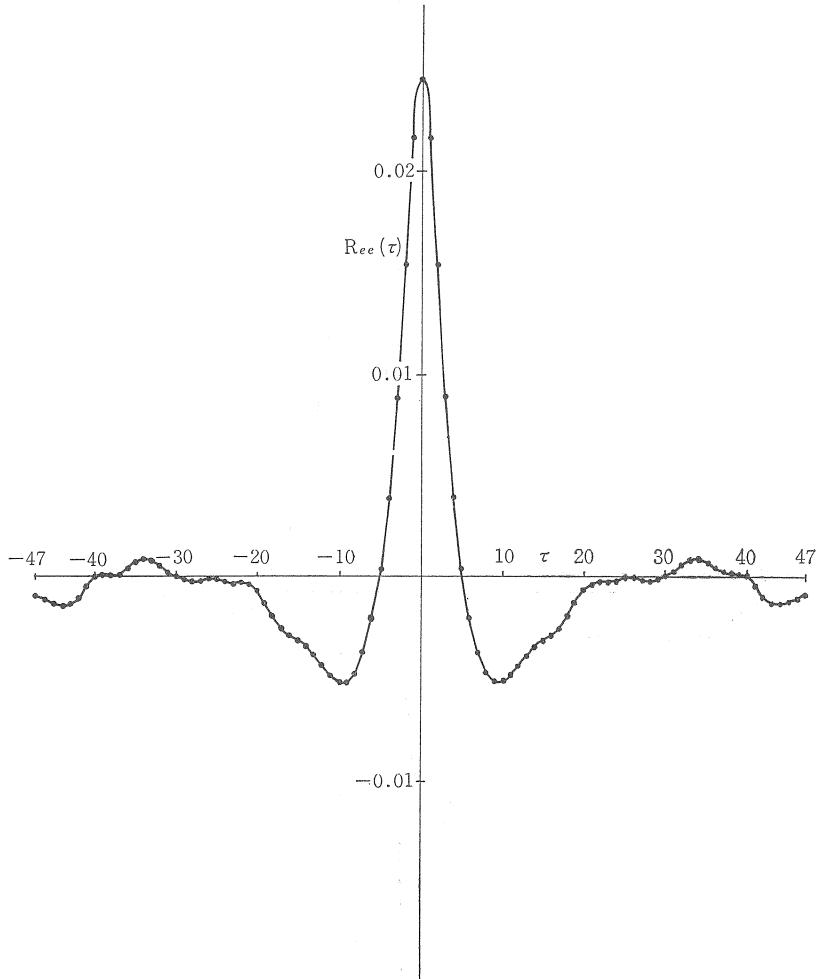


図 3-1 教示 1 のもので $\omega_i = 6 \text{ rad/s}$ の目標値のトラッキングで得られた偏差 $e(t)$ から求められた自己相関

$(j\omega)$, $H_2(j\omega)$, $H(j\omega)$, $G(j\omega)$ を表わすボード線図は図 4, 図 5, 図 6, 図 7 の通りである。図 6 には位相余裕 P_m とクロスオーバー周波数 ω_c と $-20db/dec$ の(6)式を表わす直線が点線で書き込まれている。

手順 5) 不規則信号 $x(t)$ の自己相関関数のラグが 0 の値 $R_{xx}(0)$ と時間二乗平均値

$\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \{x(t)\}^2 dt$ の間には

の関係があると言われている。自己相関と二乗平均値の計算に際しては、精度が落ちないように、そのつど入力電圧を調整しているので、完全な意

味で上式の成立を期待することは出来ず、両量間に充分高い相関関係が得られれば、満足せねばなるまい。

計算の結果、目標値に関しては 0.9992、偏差に関しては 0.9989 という高い相関が得られ、このことは、自己相関 $R_{xx}(\tau)$ 、 $R_{ee}(\tau)$ の計算が少くとも $\tau=0$ の箇所では、充分高い精度で行われたことを示していくよう。

手順 6) ω_i の変化について、 ω_b , ω_c , τ_c , P_m , $R_{ee}(0)/R_{xx}(0)$ が各々どのような値をとるか、(6) 式の成立する周波数範囲はどうか、を示したのが表 1 である。

ω_c が ω_i の変化について、上に凸の 2 次関数的

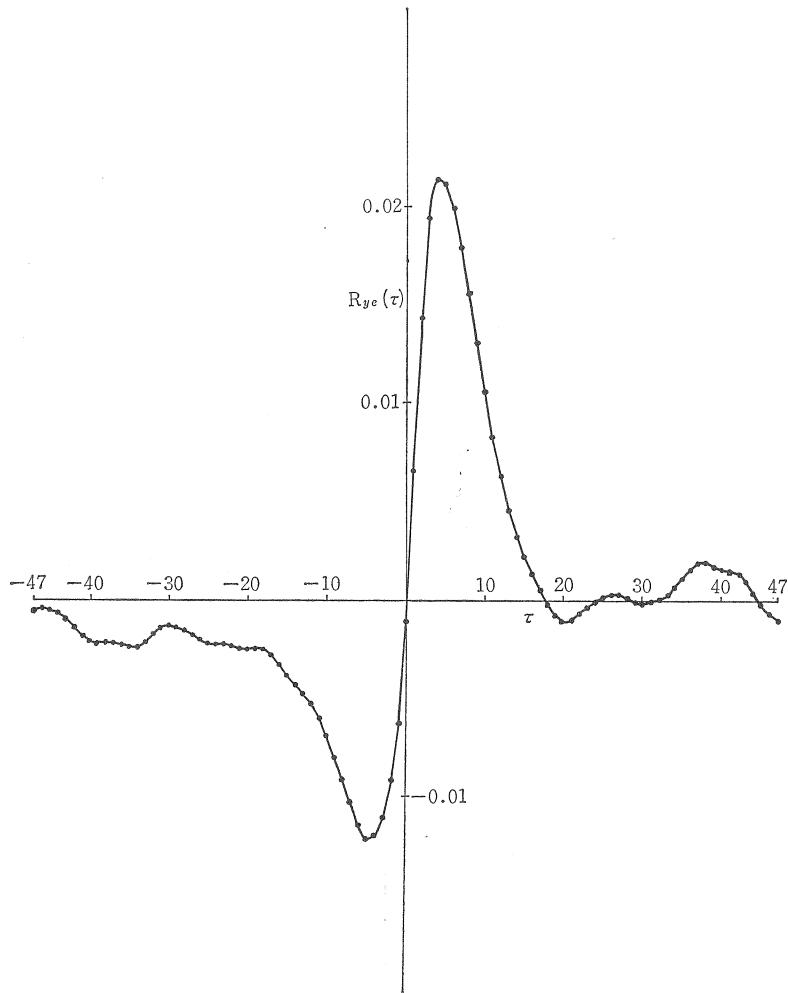


図 3-2 教示 1 のもとで $\omega_i = 6\pi/s$ の目標値のトラッキングで得られた偏差 $e(t)$ 操作量 $y(t)$ から求められた相互相関

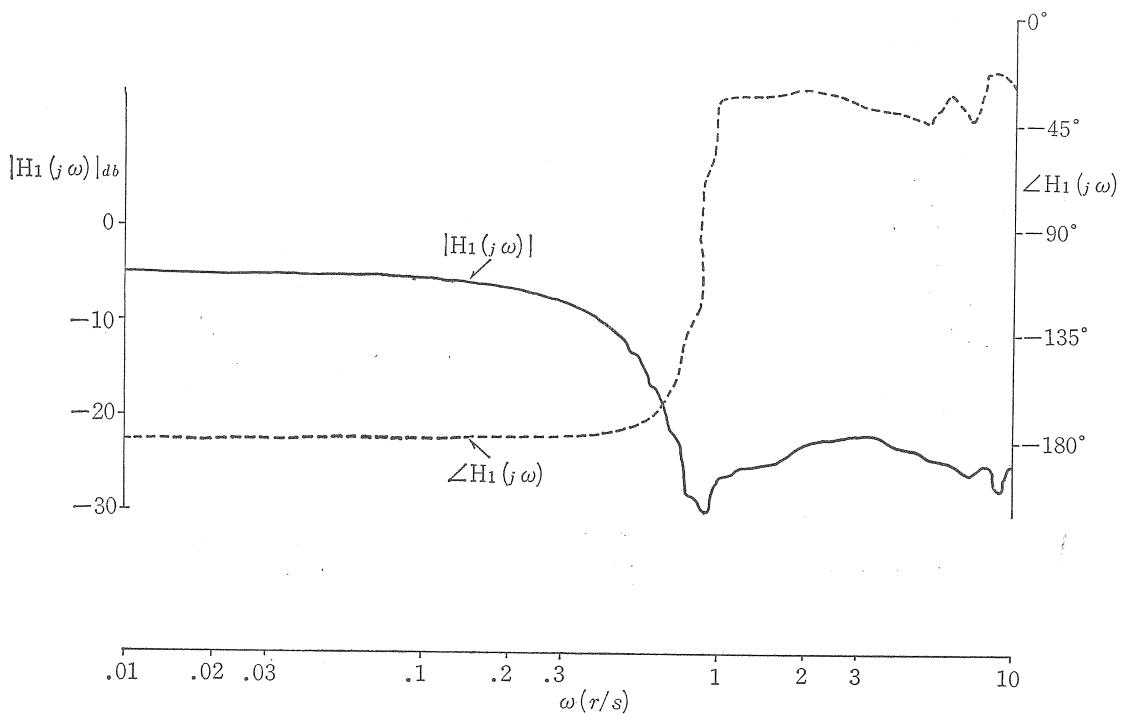


図 4 表示 1, $\omega_i = 6 \text{ rad/s}$ 条件で得られた眼球運動の開ループ周波数特性

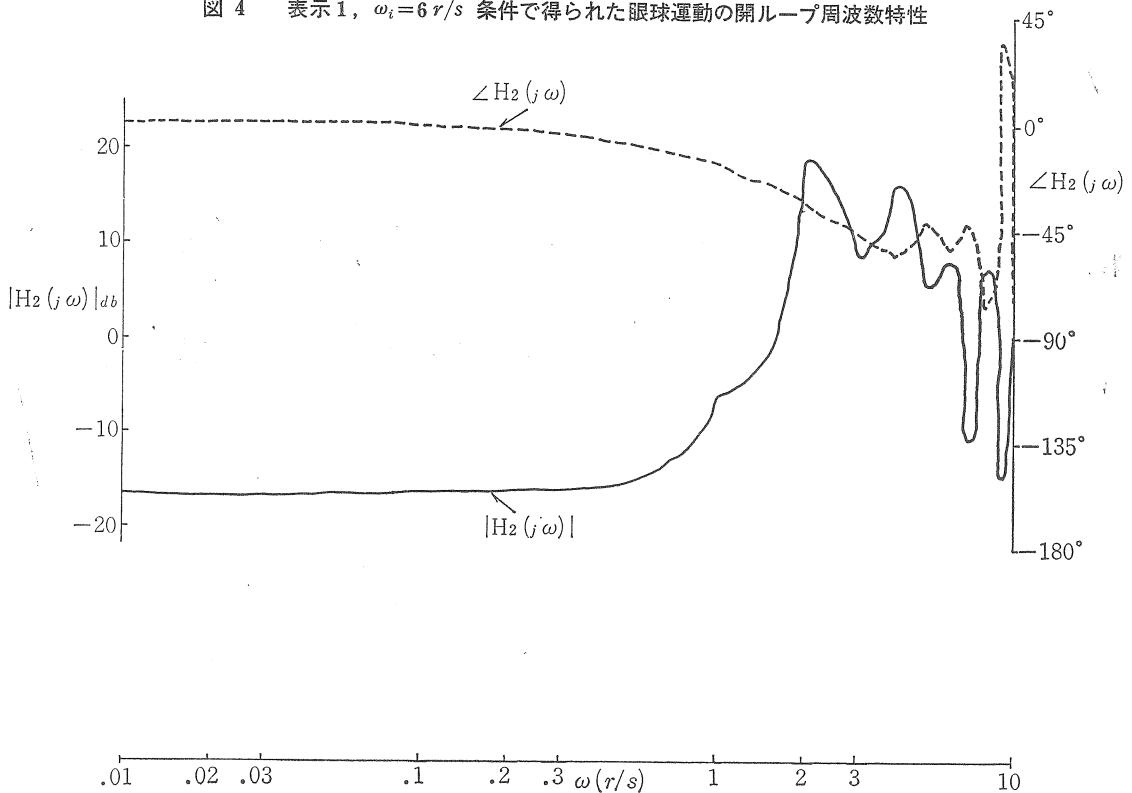


図 5 表示 1, $\omega_i = 6 \text{ rad/s}$ で得られた手の動作の開ループ周波数特性

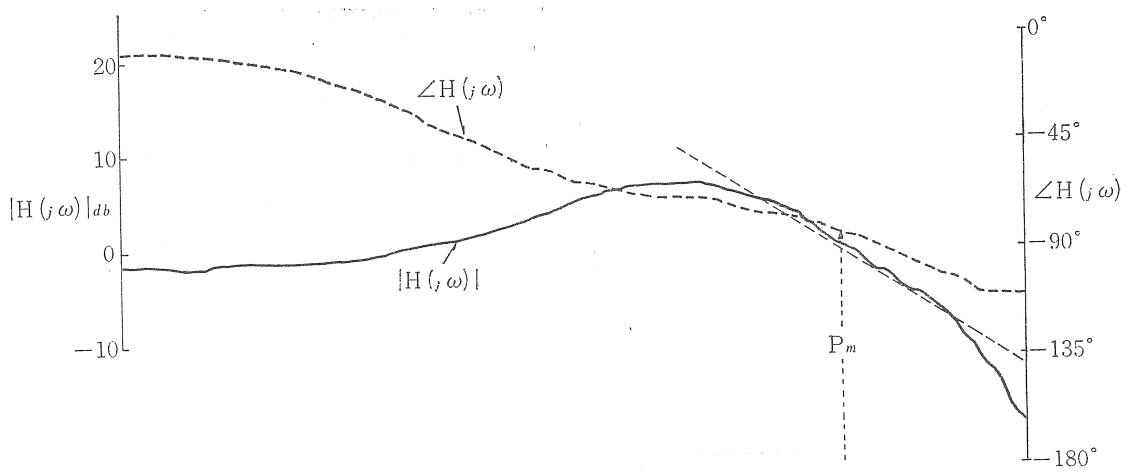


図 6 教示 1, $\omega_i = 6 \text{ r/s}$ 条件で得られた人間の開ループ周波数特性

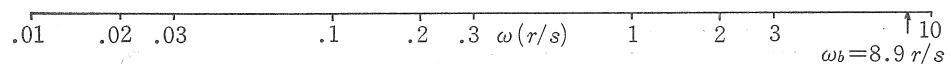
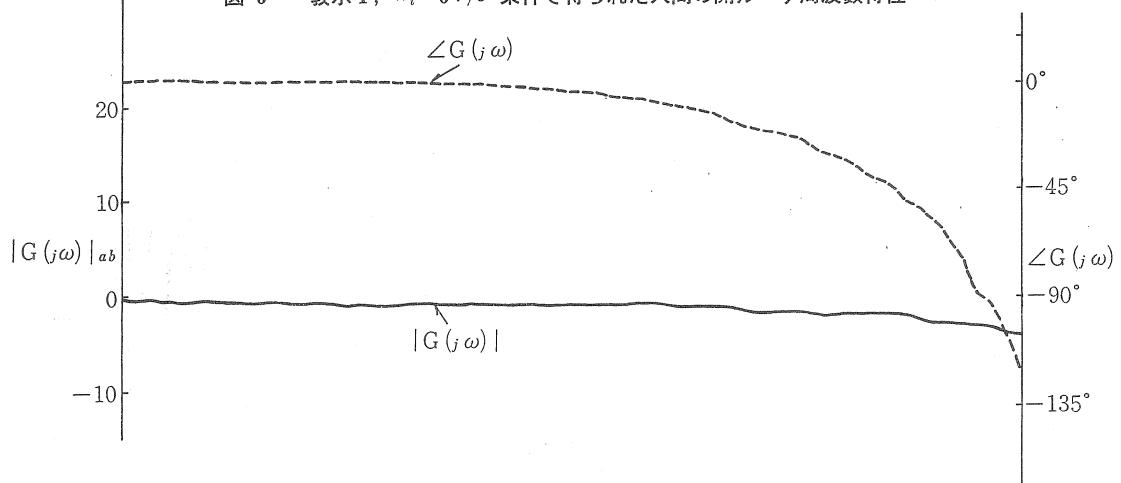


図 7 教示 1, $\omega_i = 6 \text{ r/s}$ 条件で得られた人間の閉ループ周波数特性

表 1 ω_i の変化についての ω_b , ω_c , τ_e , P_m , $R_{ee}(0)/R_{xx}(0)$ の変化と(6)式の成立範囲

| ω_i | 教示 1 | | | | | | 教示 2 | | | | | |
|------------|------------|------------|----------|----------|-------|-----------------------|------------|------------|----------|----------|-------|-----------------------|
| | ω_b | ω_c | τ_e | (6)式成立範囲 | P_m | $R_{ee}(0)/R_{xx}(0)$ | ω_b | ω_c | τ_e | (6)式成立範囲 | P_m | $R_{ee}(0)/R_{xx}(0)$ |
| 1.5 | 5.8 | 3.1 | .4054 | 1.5~3.0 | 18 | .060893 | 10.0 | 4.2 | .3075 | 3.0~5.0 | 16 | .026037 |
| 2.5 | 8.0 | 4.6 | .1897 | 3.0~5.0 | 40 | .068337 | 9.0 | 5.0 | .02096 | 3.0~5.0 | 84 | .343116 |
| 4.0 | 10.0 | 4.0 | .1047 | 2.0~5.0 | 66 | .168795 | 7.0 | 3.8 | .08258 | 2.5~5.0 | 72 | .217666 |
| 6.0 | 8.9 | 2.5 | -.04888 | 1.5~6.0 | 97 | .332187 | 1.2 | 2.0 | -.06960 | 2.0~9.0 | 98 | .511073 |
| 10.0 | 0.0 | — | — | — | — | .888530 | .34 | — | — | — | — | .934159 |

な変化を示しているようなので、最小二乗法による当てはめを行ってみると、

$$\omega_c = 4.441 - 0.2555(\omega_i - 3.023)^2 \dots \dots \dots (20)$$

となり、相関比は $\eta^2 = 0.8051$ と高いので、折点周波数が中程度 ($\omega_i = 3.023 \text{ rad/s}$) で、クロスオーバー周波数が最大値 ($\omega_c = 4.441 \text{ rad/s}$) をとるのではないかと考えられる(図 8 参照)。

この式は、McRuer 等の言う「 ω_i が大きくなると、 ω_c が減ってくる」との事実とも一致する。

次に ω_i (要因 1) と教示(要因 2) とが $R_{ee}(0)/R_{xx}(0)$ に及ぼす影響を調べてみた。手順 5) より明らかに通り、 $R_{ee}(0)/R_{xx}(0)$ は、目標値によって規準化された偏差二乗平均値たる

$$\int_{-T/2}^{T/2} \{e(t)\}^2 dt / \int_{-T/2}^{T/2} \{x(t)\}^2 dt$$

を近似している。

$R_{ee}(0)/R_{xx}(0)$ は ω_i の増大について直線に増しているように見えるので、共分散分析によって教示の効果たる級間(A)の要因と ω_i の効果たる回帰(R)の要因の有意性を調べたところ、表 2 に

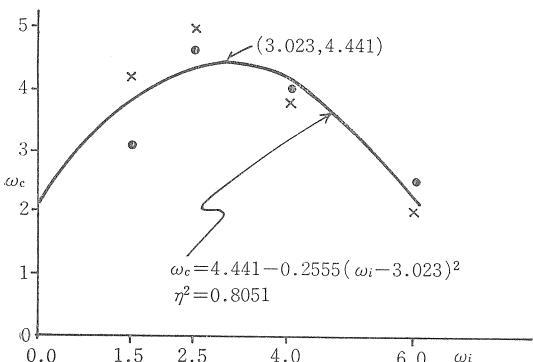


図 8 ω_i 変化についての ω_c の二次曲線的変化

表 2 教示(A要因)と ω_i (R要因) が $R_{ee}(0)/R_{xx}(0)$ に及ぼす効果の共分散分析

| 要因 | 平方和 | 自由度 | 不偏分数 | F ₀ |
|-------|--------|-----|--------|----------------|
| 級間(A) | .02634 | 1 | .02634 | 2.814 |
| 回帰(R) | .88366 | 1 | .88366 | 9.441 * |
| 級間 | .06552 | 7 | .00936 | |
| 総計 | .97552 | 9 | | |

見る通り、後者のみ 5% 危険率で有意であった。図示すると図 9 の通りで、有意差はなかったが、「目も手も光点を追いかけて下さい」と言われた時の方が誤差がやや大きい。

手順 7) 目と手の動特性を分離し得たので、要因 1 か 2 によって、それ等が何か特徴的な影響を受けるか否かを調べた。その結果、目と手の開ループのゲイン $|H_1(j\omega)|$ と $|H_2(j\omega)|$ の $\omega=0$ の値、いま各々を x_1 と x_2 と表わす、を直交座標の 2 つの軸で表わすと、第 1 教示の結果(丸印)と第 2 教示の結果(バツ印)とは、図 10 の如く、ズレた位置をとる。

$$x_2 = 2.9675 x_1 + 6.6213 \dots \dots \dots (21)$$

が、2 つの位置を分ける判別閾値であり、「目も手も光点を追いかけて下さい」との第 2 教示を与えると、目のゲインは上るが、手のゲインはむしろ下がる(目に気をとられて、手が留守になる)ことが示されており、興味深い。

手順 8) (6)式の二定数である ω_c と τ_e 及び (6)式の成立する周波数範囲は、表 1 の通りである。

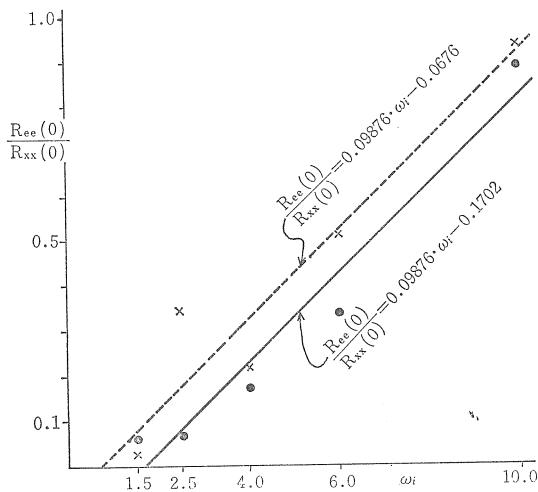


図9 表2の図示。印は教示1, ——はその回帰直線。×印は教示2,はその回帰直線

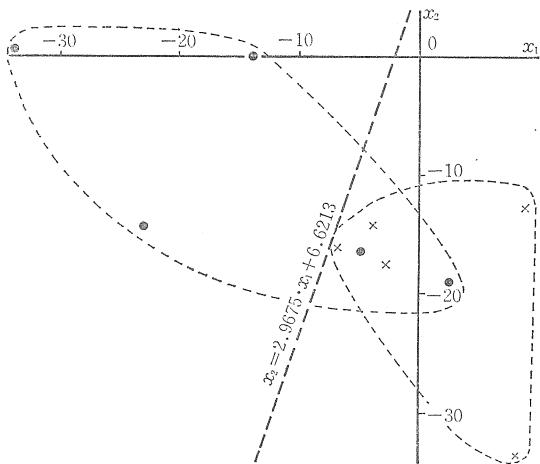


図10 教示1の布置(●)と2の布置(×)とそれらを分ける判別関数

原論文の比例要素が制御対象の場合には、1.5~15 r/s の範囲でよく適合しているのに対して、本論文では、せいぜいで1.5~7 r/s の範囲でしか適合していない。

(7)式の検討を、回帰直線によって行ってみると

$$y=0.4968x+0.6051 \dots \dots \dots (22)$$

$r=0.5964$ となり、(7)式の関連性がないとは言えないという程度の関連性にとどまる。

(8)式の検討を行ってみると、

$$y=0.1247x+0.1236 \dots \dots \dots (23)$$

$r=0.8147$ であり、この関連性は、かなり有望なものと言えよう。

(9)式の検討を(2)式に従って行うと、

$$\tau_e=0.3827-0.0739 \cdot \omega_i \dots \dots \dots (24)$$

$r=-0.7981$ であった。原論文の比例要素の制御対象の場合にも、

$$\tau_e=0.33-0.070 \cdot \omega_i \dots \dots \dots (25)$$

と非常に似た回帰直線が得られているので、(9)式の関連性は、少くとも制御対象が1の場合には、全面的に認めてよいであろう。

結 論

実験の範囲内では、巧緻性が最もよく発揮されるのは、中程度の困難度のところにおいてであり「目で対象をよく見なさい」と言うことは、かえって巧緻性をそこなうことになる、ということが言えよう。

参 考 文 献

- 増山英太郎 (1973) 「トラッキング動作の人間工学的研究」—その15— 日本心理学会第37回大会発表
 McRuer, D.N. & Jex, H.R. (1967) "A Review of Quasi-Linear Pilot Models IEEE. Human Factors in Electronics. Vol. HFE-8. No. 3. Sept. 231—249.

