



Title	ヒトのフィンガータッピングの研究 : 分散および位相遷移曲線による制御機構の解析
Author(s)	山西, 潤一
Citation	大阪大学, 1980, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/325
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

ヒトのフィンガータッピングの研究

—— 分散 および位相遷移曲線による制御機構の解析 ——

1980年2月

山西潤一

目 次

第1章	緒 言	1
第2章	タッピング間隔の分散と制御機構の考察	5
2.1	まえがき	5
2.2	実験方法	6
2.3	結 果	9
2.3.1	学習した時間間隔と自発的なタッピング時間間隔の関係	9
2.3.2	タッピングの平均時間間隔と標準偏差の関係	13
2.3.3	タッピングの平均時間間隔とウェーバー比	17
2.3.4	タッピング時のスイッチオン時間の測定	17
2.4	タッピング時の脳波測定	20
2.5	結 果	22
2.6	考 察	25
2.7	お ま け	34
第3章	位相遷移曲線によるフィンガータッピング神経機構の解析	35
3.1	まえがき	35
3.2	位相遷移曲線	36
3.2.1	位相遷移曲線の定義	36
3.2.2	位相遷移曲線の性質	38
3.2.3	位相遷移曲線の回帰	40
3.3	3種の課題に対する位相遷移曲線	43
3.3.1	課題と被験者	43
3.3.2	タッピング間隔の学習	45
3.3.3	位相遷移曲線の計測	45

3.3.4	結果	48
3.4	フィンガータッピングの位相遷移曲線の性質	50
3.4.1	課題と被験者	50
3.4.2	タッピング周期と位相遷移曲線の関係	51
3.4.3	学習効果による位相遷移曲線の変化	53
3.4.4	運動負荷の変化に対する位相遷移曲線の変化	53
3.4.5	位相遷移曲線における左右差	56
3.5	考察	59
3.6	むすび	62
第4章	両手タッピングの位相遷移曲線による解析	64
4.1	まえがき	64
4.2	両手タッピングのパフォーマンスの評価	65
4.3	2振動子の相互作用によるモデル	70
4.4	2振動子の相互作用モデルによる両手タッピングの解析	75
4.5	考察	80
4.6	むすび	82
第5章	結 言	83
	謝 辞	86
	参考文献	87

第1章 緒言

ヒトは単純な運動から非常に複雑な運動まで、種々の運動パターンを遂行することが出来る。このような運動パターンは特定の筋肉の協調活動によって発現される。そこで、ある運動の発現にはその運動に使用される筋肉群の活動のタイミングが重要になってくる。このタイミングの制御には脳内の何らかの神経回路が関与しているものと思われる。特に周期的な運動のタイミングの制御のためには、ある種の振動回路が存在することが考えられる。このような振動回路の性質やタイミング機構を研究するため、自発的なフィンガータッピングを用いた心理実験が多くなってきた。古く、Scripture (1897) はタッピング間隔の分散が最小になるタッピング周期があることを指摘している。

近年において Bartlett (1959), Wing (1973), Michon (1966) Getty (1976) らはタッピング運動における分散に注目して振動回路の性質について議論している。又、Treisman (1963) は分散の大小により被験者の意識水準を評価し、Michon (1964) は分散を指標として作業の難易度を評価している。

一方、臨床的にフィンガータッピングを応用した例もみられる。

例えば小脳疾患においては、タッピング速度の低下、規則性の

乱れなどがみられることが知られている (Babinski, 1902, Nakamura, 1975)。

又、ハートンリズムでは速度の低下はみられず、規則性は保たれることが知られている (Wertham, 1929)。又、タッコングを使って脳の特定部位の機能について推定した報告が多い。Luria (1969) は運動前野に病巣を持つ患者に強い2拍子と弱い3拍子を含むリズムでフィンガータッコングを行なわせると患者は個々の2拍子、3拍子はタッコングでできず、2拍子から3拍子へよどみなく転ずることからできなことから運動前野は個々の要素的運動とある時間構造へ統合する役割りを果たすものと推定している。

このようにヒトの振動的な神経回路の性質を調べたり、心理状態を評価したり、運動制御に与える脳の機能的役割を調べる手段として、簡単でかつ有効な方法としてフィンガータッコングが広く用いられてきた。

ところで、近年、無脊椎動物については、神経系からなる生物のリズム現象（心拍、呼吸、歩行、飛翔など）が内因的なリズム発生機構によって発現されていることが明らかになってきている (Kennedy & Davis, 1977)。つまり、1個または複数のニューロンから成る神経回路が互いのフィードバックによってリズム現象を制御できていることが明らかになっている。脊椎動物のリズム現象についてもこのような考えが適用されるようになってきている。

か (Shik & Orlovsky, 1976, Grillner & Zangger, 1979), その神経系の複雑性から考えて, リズム発生の神経回路は非常に多数のニューロンから成ると想像される。

一方, 日周期リズム, 生化学的振動子, パスメーカー細胞など生物の周期的現象の解析には位相反応曲線あるいは位相遷移曲線の計測が有効な手段となっている (Pittendrigh, 1957, Perkel, 1964, Pinsky, 1977)。Winfree (1970, 1977) はこれらの振動子について, 与える刺激の強さによって, 2つの型の位相遷移曲線が得られることを指摘している。また Kawato (1978) はこれをホモトピー論を使って数学的に証明している。

本論文はヒトのフィンガータッピングも前述のような内因的に振動する性質を持つ神経回路で制御されていると考え,

その性質について, 分散および位相遷移曲線を使って

心理学的手法やモデル解析により, その制御機構を明らかにするものである。本論文により明らかにした知見は, 運動のタイミング

機構や振動回路の性質に関する脳の役割を推定する上で何らかの示唆を与えかねるものとする。

以下に本論文のあらましを記す。

第2章では, タッピング時間間隔の分散に注目して, 200ms~1000msの時間間隔とその標準偏差とに特徴的な関係があることが調べられる。

また、タッピングの神経機構の概念モデルを考へ、それらの関係が2つの異なる制御機構、すなわちフィードフォワード制御とフィードバック制御とを反映していることを示した。

第3章では、周期的出力を出力した振動的な神経回路の発現として、フィンガータッピングを考へ、種々の課題で位相反応実験を行ない、その結果得られた位相遷移曲線から、タッピング運動を制御している神経回路と、課題を制御している神経回路との相互作用について考察した。

第4章では、両手による協調的なタッピングが考察された。両手による協調的なタッピングのモデルとして2つの振動的な神経回路が相互作用するモデルを考へ、左右それぞれのタッピング時に計測された位相遷移曲線を使ってこのモデル系の振舞いが解析され、両手による協調的なタッピングがどのような神経回路によって制御されているか考察された。

第5章では、本研究の結果、明らかにされた結果を要約して述べた。

第2章 タッピング間隔の分散と制御機構の考察

2.1 まえがき

運動の発現には、その運動に使用される筋肉群の活動のタイミングが重要であることが知られている (Vandell Gron, 1965, 1973)。このタイミングの制御は、何らかの神経回路によって行われ、特に周期的な運動のタイミングの制御のためには、ある種の振動回路が存在することが考えられる。このような振動回路の性質やタイミング機構を研究するため、自発的なタッピングを用いた心理実験が多くなっている。例えば、近年、Bartlett (1959), Wing (1973), Michon (1966), Getty (1976) らは、タッピング運動における時間間隔の分散に注目して、ヒトの振動回路の性質について議論している。しかしながら、これらによって明らかにされた結果は、実験条件の差異、タッピング運動肢の差異などによって必ずしも一致した結果が得られていない。標準偏差とタッピング時間間隔の関係においても、タッピング時間間隔の増加によって標準偏差が直線的に比例するもの、ほとんど変化しないものなどが見られている。

本章では、最初、同様の観点から、フィンガータッピングを用い、200~1000ms の時間間隔でタッピングを行わせ、その平均時間間隔と標準偏差との関係を調べた。次に対象がヒトであるので、頭皮エよりタッピング時間間隔の差異による脳波直流成分の変動を記録した。最後に、タッピング神経機構の概念モデルを提起し、これらの結果からどのような神経制御機構を反映したものであるかを考察した。

2.2 実験方法

予め設定した時間間隔で音信号 (20ms 継続) を発し、被験者には、音信号に同期してマイクロスイッチを押してもらう、タッピングの間隔を記憶してもらう (学習期)。音信号はヘッドホンを通じて与えた。マイクロスイッチは小さな板に固定し、タッピングしやすい位置に自由に移動できるようにしている。タッピングを行なう指としては利き腕の人指し指を指定した。マイクロスイッチを押すのに必要な力は最低 20g であつた。1回の学習期は、約 20 回のタッピングからなり、オンラインでこの学習期の時間間隔の平均値、その分散、時間間隔ヒストグラムを求め、結果の良悪も被験者には、前方に設置したランプボードのランプの点滅により、「良くできている」「設定時間間隔よりも長い」「設定時間間隔よりも短い」等の指示を与えた。2~3 回の学習期の後、被験者は今度は音信号を止めて、今覚えた時間間隔で「タッピング」を 40 回続けるよう指示された (自発的タッピング)。

設定時間間隔は 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000ms の 12 段階を設定した。

この 12 段階の時間間隔について学習期と自発的タッピングを行ない、それを 1 セッションとした。1 セッションを行なうのに要する時間は、約 20 分で、全部で 6 セッションの実験を行なった。時間間隔の提示順序は 6 セッションともランダムに行なった。

被験者がスイッチを押し損ねて、およそ 2 倍の時間間隔が記録される場合がある。又逆に、1 回のタッピングによってスイッチが 2 回も開閉する

為に、2個の時間間隔の記録される場合がある。このような場合は、時間間隔ヒストグラムの表示によってたやすく検出されるので、これらのデータを棄却して、同じ時間間隔でもう一度実験を繰り返してもらう。このようにして棄却されたデータは全体の5%未満であった。

こうして各設定時間間隔で得られた自発的タッピングの時間間隔のデータが後の解析に使われた。

被験者としては大学院学生5名(N.I., H.T., Y.O., J.Y., M.K.)を使用した。全員右利きであった。図1に実験システムの概要を示す。

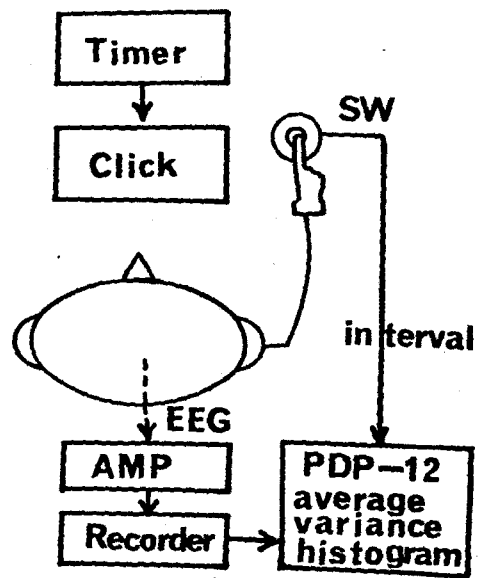


図 1. 実験システムの概要図

2.3 結果

2.3.1. 学習した時間間隔と自発的なタッピング時間間隔の関係

提示された時間間隔がどの程度正確に再現されるだろうかということは非常に興味ある問題である。図2に各被験者の学習した平均

時間間隔(AT_T)と自発的なタッピングの平均時間間隔(AT_S)の関係の6セッションでの平均の結果と5人の被験者について平均の結果を示す。

学習した平均時間間隔(AT_T)としては、練習中の連続した16個のタッピング時間間隔の平均値を2個求め、それを平均したものを採用した。自発的なタッピングの平均時間間隔(AT_S)としては、得られたタッピング時間間隔のうち、最初の32個と16個ずつ2組に分け、それぞれ平均値の平均を採用した。タッピング時間間隔の標準偏差(SD)としては、それぞれ16個のタッピング時間間隔の分散を2個求め、その平均値の正の平方根を採用した。

図2からわかるように、各被験者については、タッピングの平均時間間隔が設定時間間隔より長くなる傾向や短くなる傾向がみられる(図2中に一点鎖線を示す)。しかし、5人の被験者の平均としては、図2に示すように、非常に良い再現性を示している。各被験者の各設定時間間隔における、自発的なタッピングの時間間隔の平均値(AT_S)と設定時間間隔(IT)との間の差の有意差検定(t-検定)の結果と、5人の被験者の結果を70-ルに求めた AT_S と IT との差の有意差検定の結果を

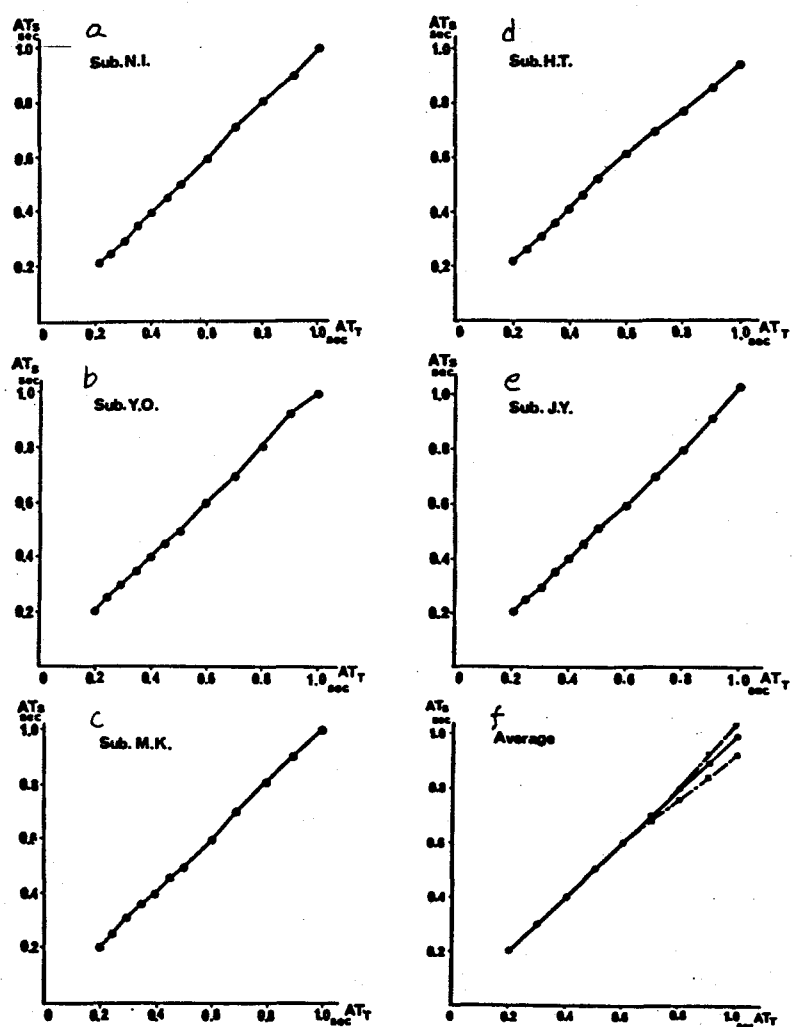


図2. 学習した時間間隔(AT_r)と自発的なクッキング時間間隔(AT_s)との関係

表 1 に示す。5人の被験者全体としては、 $IT=450ms$ の時間間隔を除いて、設定した時間間隔とタッチングの平均時間間隔の間には有意な差は認められなかった。しかし、各被験者については、有意な差がみられることが多くなる。特に $IT=300ms$ において、5人のうち4人の被験者で、差が有意になっているのが顕著である。 $IT=300ms$ において、提示された時間間隔の再現性が他の設定時間間隔に比べて困難であると思われる。5人の被験者のうち、H.T. は設定時間間隔の長い領域において、タッチングの時間間隔が短くなる傾向を示した。又、逆に、 $IT=500ms$ 以下の設定時間間隔においては、タッチングの時間間隔が長くなる傾向を示している。このような、設定時間間隔によって、短い時間間隔を長く感じ、長い時間間隔をより短く感じるという傾向は、時間知覚の実験においては頻繁にみられるものである。Treisman (1963) は、産出法、再生法、比較法等の種々の手法を用いて実験を行ない、このような傾向を明らかにしたが、又、逆に、長い設定時間間隔において、時間知覚が長い方向に偏る被験者も存在することと報告している。そして前者の71%の被験者は偏りの傾向が著しいのに対して後者の71%の被験者は偏りの傾向がそれ程著しくなっていることを示している。これは本実験で得られた結果と一致している。

IT subi.	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000
HT	7.25**	2.38	5.17**	2.04	3.85*	3.28*	3.68*	2.34	0.63	5.08**	4.78**	7.62**
JY	0.79	0.90	3.43*	0.98	0.45	0.66	1.17	1.64	0.08	0.07	1.62	2.91**
NI	3.48*	2.38	5.15**	0.93	0.14	0.29	0.09	1.72	0.67	0.57	0.98	0.04
MK	0.56	2.34	8.41**	4.24**	2.18	2.11	0.05	0.40	1.31	1.73	0.61	0.07
YO	1.44	0.92	0.00	1.79	0.18	0.27	2.58*	0.06	0.77	0.26	4.50**	0.09
TOTAL	1.44	0.72	0.41	0.93	1.45	2.45*	0.88	0.54	0.06	0.17	0.29	0.62

$t(5,0.05)=2.571$, $t(5,0.01)=4.032$

$t(29,0.05)=2.045$, $t(29,0.01)=2.756$

* : 5% 有意 ** : 1% 有意

表1. 自発的なタッチングの時間間隔の平均値と設定時間間隔との差の
有意差検定 (t-検定)

2.3.2. タッピングの平均時間間隔と標準偏差の関係

各被験者のタッピングの平均時間間隔 (ATs) と標準偏差 (SD) の関係の6セッションでの平均の結果と、これら5人の被験者について平均した結果を図3に示す。図3中における破線は、練習中のタッピングの平均時間間隔と標準偏差の関係を示したものである。

次に各設定時間間隔におけるタッピングの時間間隔の分散の被験者間の差異を調べるために、分散分析を行った。その結果を表2に示す。表から明らかなように、時間間隔が350ms、450msの場合には1%有意で被験者間の分散値に差が無いという帰無仮説は棄却され、タッピングのパフォーマンスには、かなりの個人差があることが認められる。このように、被験者によって分散のスタイルに差異がみられるが、その増減曲線にはかなり共通した特徴がみられる。すなわち、図3に示すように、時間間隔が200ms~350msの領域では、標準偏差は平方根的に増加する傾向を示す。350ms~500msの領域ではほとんど増加しない。500ms~1000msの領域では再び、時間間隔に比例して直線的に増加する傾向を示す。

表3に、5人の被験者について得られる分散値を7-1としたものについて相隣る設定時間間隔における分散値の有意差検定の結果を示す。

表より、200msと250ms、250msと300ms、300msと350msの間には

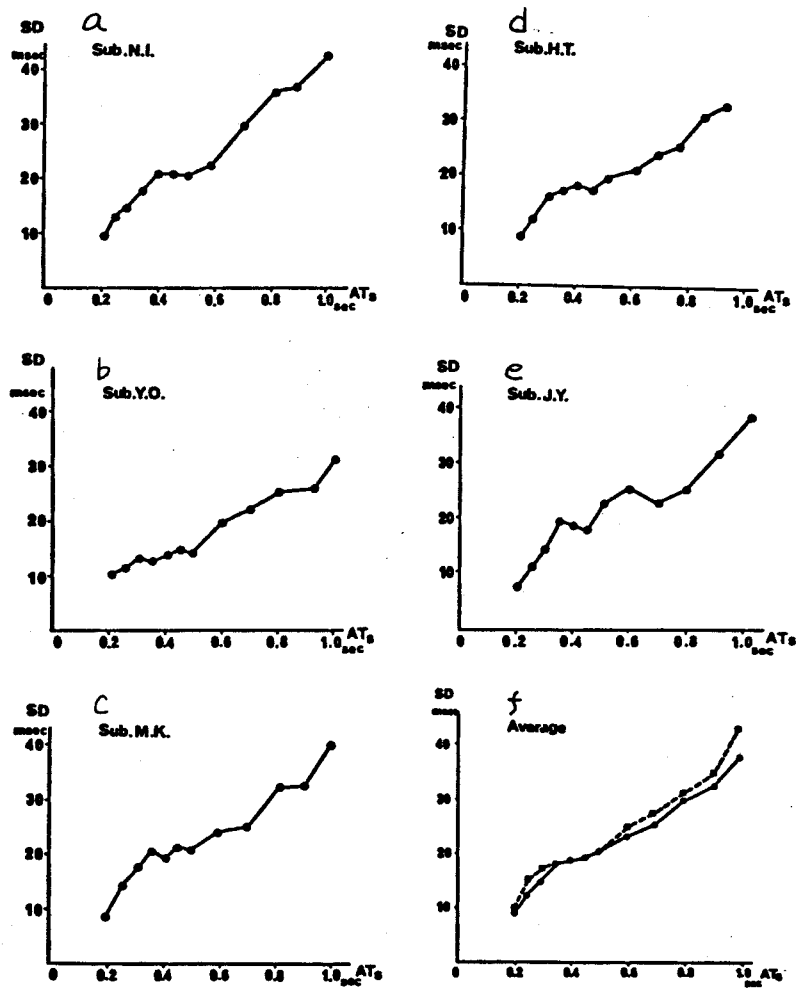


図3. 自発的なタッピングの平均時間間隔(ATs)と標準偏差(SD)の関係

IT (msec)	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000
Va	1127	7563	20286	75315	55155	63161	95619	75086	191657	533039	383913	752088
Ve	875	5582	8873	9749	13840	13220	27726	39781	50034	129429	171687	194357
F	1.29	1.36	2.29	7.73**	3.99*	4.78**	3.45*	1.89	3.83*	4.12*	2.24	3.87*

$F(4,25;0.05)=2.76$, $F(4,25;0.01)=4.18$

* : 5%有意 ** : 1%有意

Va : 被験者間の分散 Ve : 誤差分散

表2. 自発的なタッピングの時間間隔の分散の被験者間の差の検定(F-検定)

IT	200 -250	250 -300	300 -350	350 -400	400 -450	450 -500	500 -600	600 -700	700 -800	800 -900	900 -1000
t	5.14**	3.35**	2.85**	0.42	0.36	1.01	2.41*	1.86	2.39*	1.41	3.03**
P				> 0.5	> 0.5	< 0.4		< 0.1		< 0.2	

$t(58, 0.05) = 2.001$, $t(58, 0.01) = 2.663$

*: 5% 有意. **: 1% 有意.

表3. 相隣る設定時間における分散の有意差検定(t-検定)

顕著な差がみられた。-5, 350ms と 400ms, 400ms と 450ms, 450ms と 500ms の間には有意な差がみられなかった。500ms 以上の長さの時間間隔領域では, 350ms 以下の時間間隔における程ではないが, 有意な差がみられた。

2.3.3. タッピングの平均時間間隔とウェーバー比

図3に示された タッピングの平均時間間隔(AT_s)と標準偏差(SD)の関係と タッピングの平均時間間隔(AT_s)とウェーバー比(R)との関係に書き直したのが図4である。ここでウェーバー比(R)は次のように定義される。

$$R = SD / AT_s \times 100.$$

前述した タッピングの平均時間間隔に対する、そのばらつきの変化の様子の異なりがより明確にされた。図4f)における破線は練習中のタッピングの平均時間間隔とウェーバー比の関係を示している。

2.3.4. タッピング時のスイッチのオン時間の測定

タッピング時におけるマイクロスイッチのオン状態になっている時間(ONT)を測定した。図5に3セッションの平均の結果を示す。練習時のオン時間と、自発的なタッピングの際のオン時間との間には、どの被験者に対しても差違は認められなかったため、練習の際のオン時間と自発的なタッピングの際のオン時間の平均を示した。Bouisset (1974)とは前腕の水平方向の回転運動(示指で標的を指し示す運動)において、

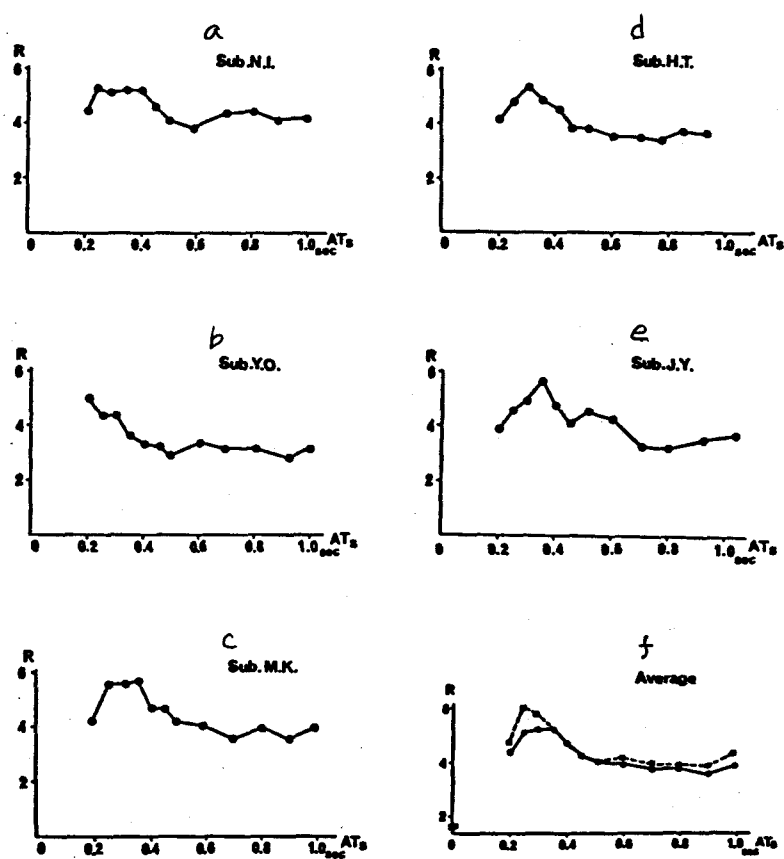


図4. 自発的なタッピングの平均時間間隔(ATs)とウェーバー比(R)の関係

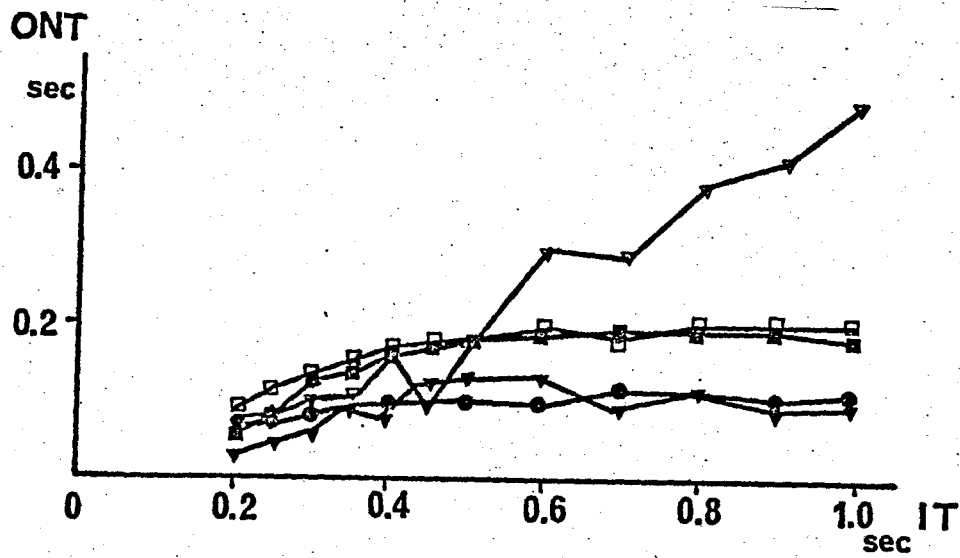


図5. フリップング時におけるスイッチオン時間(ONT)の平均値

▽: J.Y. □: H.T. ▼: Y.O. ●: N.I. ■: M.K.

運動の速度（特に最大速度 V ）が最も重要なパラメータであることが報告されている。本実験では、タッピングの速度を直接測定することは行なわれなかったがスイッチのオン時間が、タッピング速度に比例すると考え設定時間間隔ごとにこのオン時間の推移を調べた。この結果、被験者 J.Y. を除く他の 4 人の被験者においては、時間間隔が 400ms 以上の領域においてオン時間が直線的に増加する傾向が示された。

2.4. タッピング時の脳波測定

2.3 節で示した結果から、短い時間間隔のタッピングと長い時間間隔のタッピングでは機能している運動制御系の異なっていることが推察される。

Stark (1968) や 塚原 (1972) の視覚による追従実験でも、刺激周波数によって反応動作から予測動作へと制御モードが変化することが調べられている。特に塚原は頭皮上より誘発脳波を導出し、 1Hz の視覚刺激と M 系列の視覚刺激での振幅の差違から、中枢での処理過程の違いを想定している（図 6 参照）。

一方、近年、Walter (1964), McAdam (1969), Hillyard (1969) らによって、期待、動機、注意などの被験者の意識レベルの大小によって脳波の直流レベルに陰性変動がみられることが報告されている。

この電位変化は、実験条件の差異によって、随判性陰性変動、期待波、準備電位、運動電位などと呼ばれている。本節では、この脳波の直流レベルの変動がタッピングの時間間隔の差によってどのように変化するかと

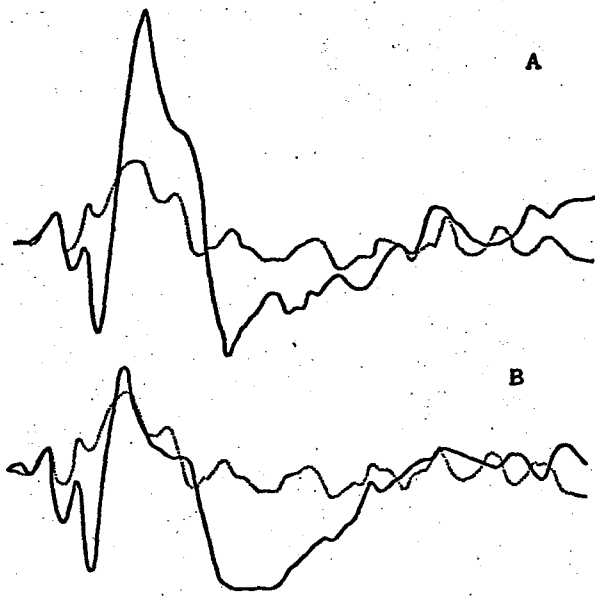


図6. 視覚刺激に対する加算誘発脳波

点線は1秒ごとの刺激, 実線Aは6秒ごと, 実線Bは
不規則な刺激に対する反応 (塚原, 1972より引用)

測定した。

実験システム および タッチングの手法は 2.2 節で述べたのと同様である。

脳波は自発的なタッチングの際にのみ計測した。脳波は、時定数 3.5 秒利得 80 dB, スカインコ-ダンス 10 M Ω の脳波計を用い、単極誘導で

導出した。関電極の装着に際しては、国際式 10~20 導出法の

Cz (頭頂葉), F₂ (前頭葉) を用い、不関電極は耳介 A₁ に装着した。

タッチングの時間間隔としては、250, 500, 750 ms の 3 段階を設定

した。被験者は 2 名 (Y.O., N.I.) で行った。タッチング実験の

終了後、各設定時間間隔について、波形の平均加算を行った。

タッチングによるマイクロスイッチのオン時刻と時刻の原点として、その前

後の波形を平均加算した。250, 500, 750 ms の設定時間間隔

について、それぞれ、時刻原点の前後 125, 250, 360 ms の脳波

記録の中から視察により、筋電位、眼電位等のアーティファクトのい

たまりを遠くけて平均加算した。加算回数は各時間間隔について

60 回であった。なお平均加算の処理には PDP-12 を用いた。

2.5. 結果

2 名の被験者についての平均加算の結果を図 7a, b に示す。

図 7 において横軸はタッチング時のマイクロスイッチのオン時刻の

前後の時間を示す。0 はマイクロスイッチのオン時刻を表す。

縦軸は不関電極に対する各部位での平均加算電位を示す。

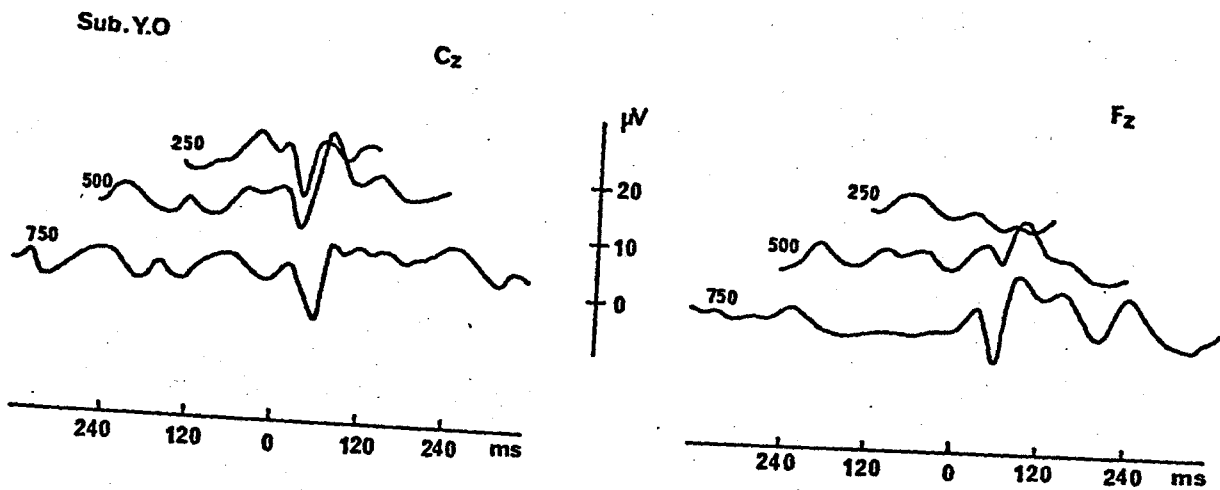


図7a. タッピング時の脳波測定記録 (被験者・Y.O.)

記録部位, Cz(頭頂葉), Fz(前頭葉), 不関電極はA₁(耳介).

平均加算回数 60 回. 横軸 0 はマイクロスイッチのオン時点を表わし,

図中の数字はタッピング間隔を表わす.

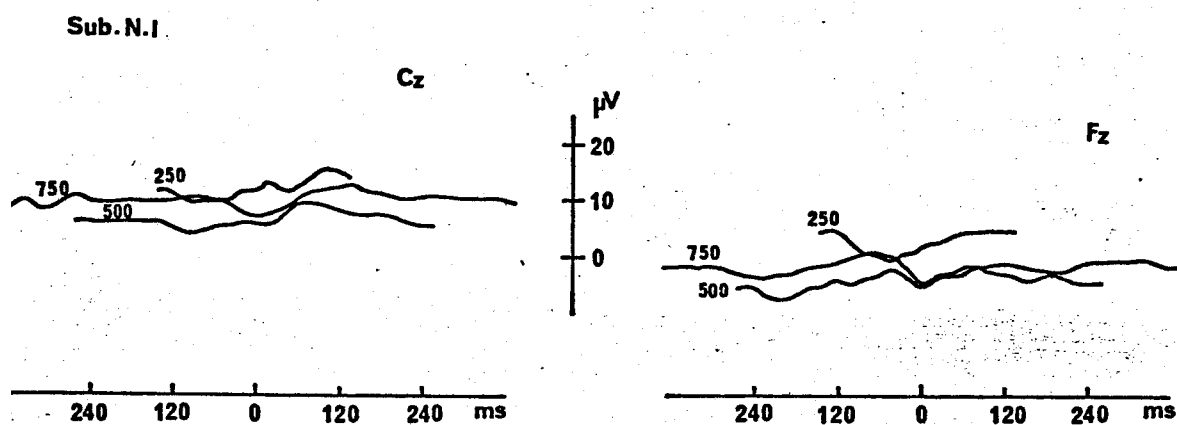


図7b. タッピング時の脳波測定記録(被験者.N.I.)

被験者 Y.O. については、運動性誘発脳波がみられるが、被験者 N.I. については、顕著には観測できなかった。また、被験者 Y.O. では設定時間間隔が 250ms から 750ms に変化することについて、 $20\mu V$ 程度の基線の変動がみられる。一方、被験者 N.I. については、250ms と 500ms では被験者 Y.O. と同様の基線の変動がみられるものの、750ms のタッピングにおいては異なる傾向を示している。導出部位 C_2 (頭頂葉)、 F_2 (前頭葉) による電位変化の違いは、2人の被験者共に明らかではなかった。

2.6. 考察

実験結果 2.3.2 において述べたように、タッピングの平均時間間隔と標準偏差との関係は 200 ~ 1000ms の設定時間間隔において、様相の異なる領域が明らかになった。すなわち、標準偏差がタッピングの平均時間間隔の増加に伴い、平方根的に増加する領域、平均時間間隔の増加に比べて標準偏差の増加が著しく小さい、あるいはほぼ一定となる領域、平均時間間隔の増加に伴い標準偏差が直線的に増加する領域である。一定時間間隔のタッピングにおいて、このような時間間隔のばらつきの差異はどのような神経制御機構を反映したものであるかを考察する。図 8 にタッピング運動の制御機構についての我々の考え概念的に示す。

モデル中の controller と neural oscillator は、生物のリズム現象が内因的なリズム発生機構によって制御されている可能性が強く示唆されている

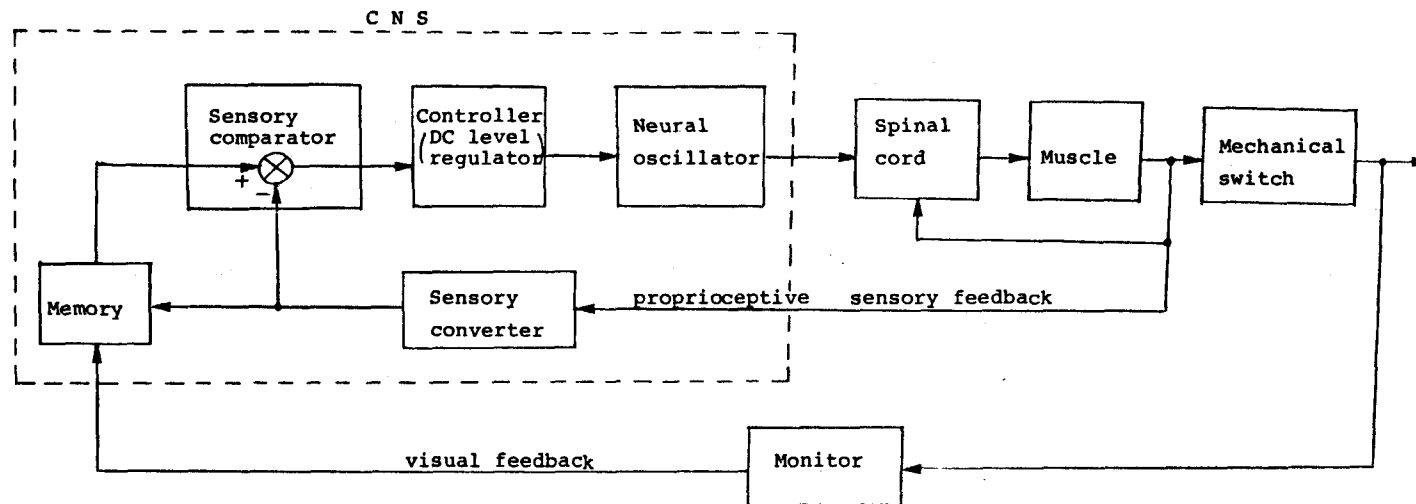


図8. タッピング制御機構の概念モデル

こと (Kennedy & Davis, 1977) を考慮して仮定したものである。

Controller は Memory から出される時間間隔信号を適当な直流信号に変換する働きを有し, Neural oscillator では, その信号レベルに応じて種々の周波数の信号出力を行なうものと仮定した。工学的には, このような機構を示す発振器として, 電圧制御発振器が知られている。またこの電圧制御発振器では, 中心周波数のばらつきが, 制御電圧のばらつきに比例することから知られている。このような機構は Reiss (1962) の相互抑制モデル, Stent (1979) のヒル遊泳の神経回路モデルなどにもみられるものである。

ところで, 一定間隔のタッピング学習時には Monitor を通して視覚フィードバックによって現在行なっているタッピング間隔(T)の良否を判断される。その結果, 良いとの判断がなされた時には時間間隔 T の記憶とその最適タッピング中に得られた自己受容器からの感覚性フィードバック信号の記憶がなされる。これは運動パターン発生モデルとして Hoyle (1974) によって提出された Motor tape と sensory tape と同様の概念である。伊藤 (1972) は運動学習のモデルとして, このようなフィードバック信号によって一連の運動のためのモデルが小脳内に形成されると考えている。しかしながらここではタッピングを制御している脳の特定部位の機能に関しては議論でない。あくまで, タッピング時間間隔のばらつきがどのような神経機構の働きによって生じているかと

いうことについて議論する。ところで、学習により記憶される時間間隔も実は正確な時間間隔を記憶しているわけではなく、誤差を含む。

ヘバーの法則に従い、時間間隔を T 、誤差を ΔT とすると

$$\frac{\Delta T}{T} = K \quad (K \text{ は定数})$$

の関係が成立する。熟練すれば、 ΔT が小さくなるので K の値も小さくなる。さて、自発的タッピングの神経機構について考える。

Memory に記憶された時間間隔 $T \pm \Delta T$ から controller で対応する直流信号に変換され、Neural oscillator により周期的な神経信号が出力される。この神経信号により効果器の筋肉活動が一定の時間間隔で行なわれ、タッピングが実現される。一定時間間隔のタッピングがこのような機構で成り立っていると仮定すると、その時間間隔のばらつきには2つの要素が考えられる。一つは Memory 自身の時間間隔のばらつきで、上述した $\Delta T/T = K$ の関係から標準偏差は時間間隔に比例して増加する ($SD = KT$)。一方、神経信号にはさまざまなレベルで雑音が入り込んでくると考えられ、これらの雑音の混入により時間間隔のばらつきが生じる。単位時間あたりの雑音の量を一定と考えると、時間間隔の増すに伴い、雑音の量が増加するので、その分散は比例して増加する。従って標準偏差は平方根的に増加する ($SD = \sqrt{KT}$)。

ところで、フィードバック機構の働きにより、これらの雑音による時間間隔の変動は sensory comparator により記憶された時間間隔 T との比較から

行なわれ、最適値に修正される。このように考えると、タッチング時間
間隔のばらつきの特性はフィードバック機構による sensory comparator
が働かずにいるか否かによって特徴的な2つの領域に分けられる。

フィードバック機構が働き始める時間は個人差があるが、反応時間から推測
して 300ms 前後と考えられる。そこでフィードバック機構の働かない
タッチング(フィードフォワードモード)では Memory 自身の時間間隔のばら
つきと雑音によるばらつきとが加算され、 $SD = \sqrt{KT} + KT$ の曲線となる。一方
フィードバック機構が働いているタッチング(フィードバックモード)では Memory 自身の
ばらつきだけとなり $SD = KT$ の特性を示す。これらの結果を図9
に示す。ここで K は被験者のパフォーマンスを表わす係数で熟練する
ほど K の値は小さくなると考えられる。

ところで、ウェバー-LL の曲線について上述した2つのモードでの関係から
 $R = \sqrt{KT} + K$ と $R = K$ の関係が得られ図10に示すような曲線が
描かれる。

さて、上述したような概念モデルで得られる理想的な結果と5人の
被験者について得られるデータとを比較すると、被験者 N.I. Y.O. M.K.
についてはこのような特性がみられた。中でも被験者 Y.O. については、
このような特性が顕著に示された。しかしながら、被験者 H.T. J.Y. には
ついては、このような特性の他に、H.T. では 200, 250ms, J.Y. については
200, 250, 300ms の早いタッチングで標準偏差の増加が $SD = KT^2$

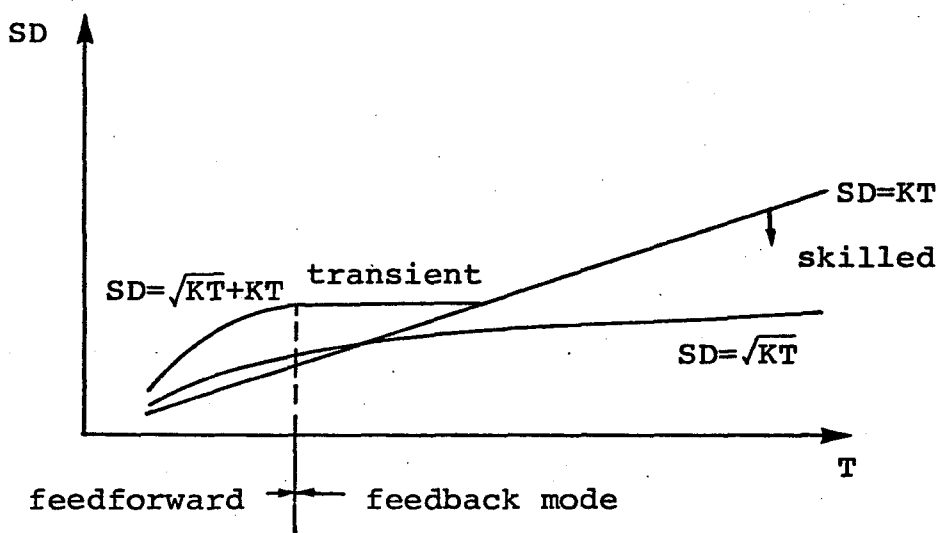


図9. 概念モデルによるタッピング間隔と標準偏差の関係

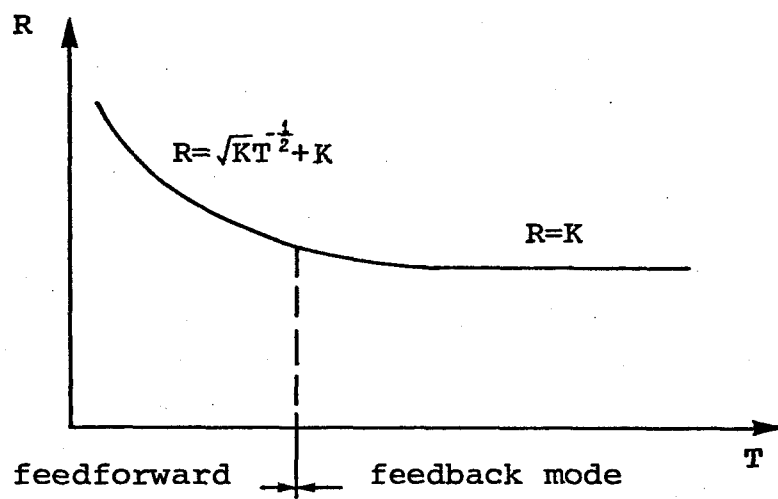


図10. 概念モデルによるタッピング間隔とウェーバー比の関係

になる領域がみられる。ウェーバー比の曲線の傾きが正になる領域である。この特性については、どのような神経機構を反映したものであるのか現在のところ明らかでないが、Wing(1973)らが非常に熟練した被験者を使って180~350msという短い時間間隔について我々と同様の計測をしたデータにおいては、このような領域はでてこない(図11参照)。また、図4fに示したように、練習時よりも実験時の方がこの領域の傾きが小さいことから、この領域は学習を繰り返すに従って消えていくと考えられる。

以上述べたように、タッピングの平均時間間隔とその標準偏差の関係から、短い時間間隔のタッピングと長い時間間隔のタッピングでは機能している運動制御系が異なっていることが推察される。次に脳波の測定結果からこの点について考察する。本実験では、平均計算された脳波にはタッピングによる誘発電位が重なり合っていることが考えられるので、波の形状からタッピングの際の脳波の特性についての詳しい議論はできない。しかしながら、基線の変動に注目してみれば、

単極誘導であるので運動時の局所的な電位変化が観測され、随伴性陰性変動と同様の議論が可能であると考えられる。

図7a, b に示したように、タッピングの時間間隔の変化に伴って基線の変動がみられる。時間間隔が長くなるに従って陰性の度合い

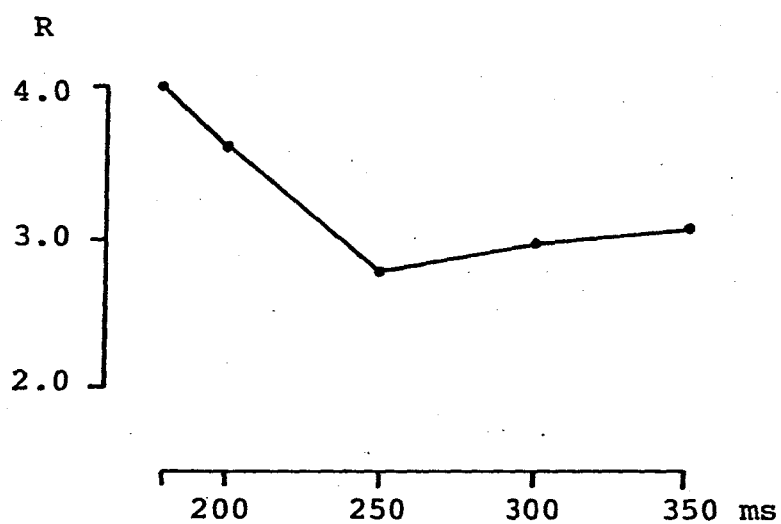


図11. 熟練した被験者での180ms~350msにおけるタッピング間隔とウェーバー比の関係 (Wing, 1973のデータより改変)

が強くなる。この傾向は被験者 Y.O. において顕著にみられた。

これらの結果と、250ms 間隔という短い時間間隔のタッチングは無意識的に行なえるが、750ms 間隔という長い時間間隔のタッチングでは注意の集中と緊張状態の維持が必要であったという被験者の内感報告を考えると、やはり一定時間間隔のタッチングにおいてフィードフォワード型の運動制御とフィードバック型の運動制御の2種の運動制御機構が働いているものと考えられる。

2.7. ひび

200ms ~ 1000ms の時間間隔のタッチングにおいて、タッチングの平均時間間隔とその標準偏差とに特徴的な関係のあることが調べられた。次にタッチングの概念を思い起こし、これらの関係が2つの異なる制御機構、すなわちフィードフォワード制御とフィードバック制御とを反映したものであることが示された。

第3章 位相遷移曲線によるフィンガー・タッピング神経機構の解析

3.1 まえがき

運動は、特定の時刻に特定の筋肉を活動させることにより発現される。つまり、ある運動の発現には、その運動に使用される筋肉群の活動のタイミングが重要であり、このタイミングの制御は何らかの神経回路によって行われる。特に周期的な運動のタイミングの制御のためには、ある種の振動回路が存在することが考えられる。

さて、最近、無脊椎動物については、神経系からなっている生物のリズム現象（心拍、呼吸、歩行、飛翔など）の内因的なリズム発生機構によって作り出されることが知られてきた。つまり、1個または複数個のペースメーカー細胞やバースト細胞、あるいは、10数個のニューロンから成る神経回路が未梢からのフィードバックを通してリズム現象を制御することが明らかになってきている (Kennedy & Davis, 1977)。

脊椎動物のリズム現象についてもこのような考えが支配的になってきている (Shik & Orlovski, 1976, Grillner & Zanggen, 1979) が、その神経系の複雑さから考えて、リズム発生の神経回路は非常に多数のニューロンから成ると想像される。このフィンガー・タッピングの場合、外乱を与えても周期がやがて元に戻ることを考えて、やはり安定な内因的に振動する性質を持った神経回路で制御されていると考えられる。

ところで、日周期リズム、生化学的振動子、ペースメーカー細胞等、生物の周期的現象の解析には位相反応曲線、あるいは、位相遷移曲線の計測が有効な手段となっている (Pittendrigh, 1957, Perkel et al, 1964, Pinsky, 1977)。Winfree (1970, 1977) はこれらの振動子について、与える刺激

の強さにより、二つの型の位相遷移曲線が得られることを指摘している。

Kawato ら (1978) は これを ホモトピー論を使って説明し、さらに 刺激強度が小さいと平均の位相が 1 の位相遷移曲線 (1 型) が得られ、刺激強度が大きくと平均の位相が 0 の位相遷移曲線 (0 型) が得られることを示した。

そこで我々は、フィンガータッピングの神経回路とこの位相遷移曲線を用いて研究した。すなわち、左右どちらかの指によるタッピング運動時に、合図に応じて諸課題を遂行させ、その時のタッピング運動の位相の変化を調べた。こうして得られた位相遷移曲線の形からフィンガータッピングの神経回路と諸課題を制御している神経回路との機能的な相互作用を解析した。

3.2 位相遷移曲線

3.2.1 位相遷移曲線の定義

図 12 に示るように 観測できる物理量 x が 周期 T で振動しているとする。

ある目印になるでき事 (例えば x の極大) の起る時刻を 時間 t の基準として、位相 ϕ を $\phi \equiv t/T \pmod{1}$ と定義する。この振動時に短い時間 T の刺激を位相 $\phi - T/T$ から与える。刺激終了時の位相 ϕ を 再び 1 日位相と呼ぶ。 i 番目の遅れ τ_i は、刺激によって i 番目の目印になる出来事からどれだけ遅れたか ($\tau_i < 0$)、進んだか ($\tau_i > 0$) を示す量とする。これから i 番目の新位相 ϕ_i' を次のように定義する。

$$\phi_i' \equiv \phi + \tau_i \pmod{1}$$

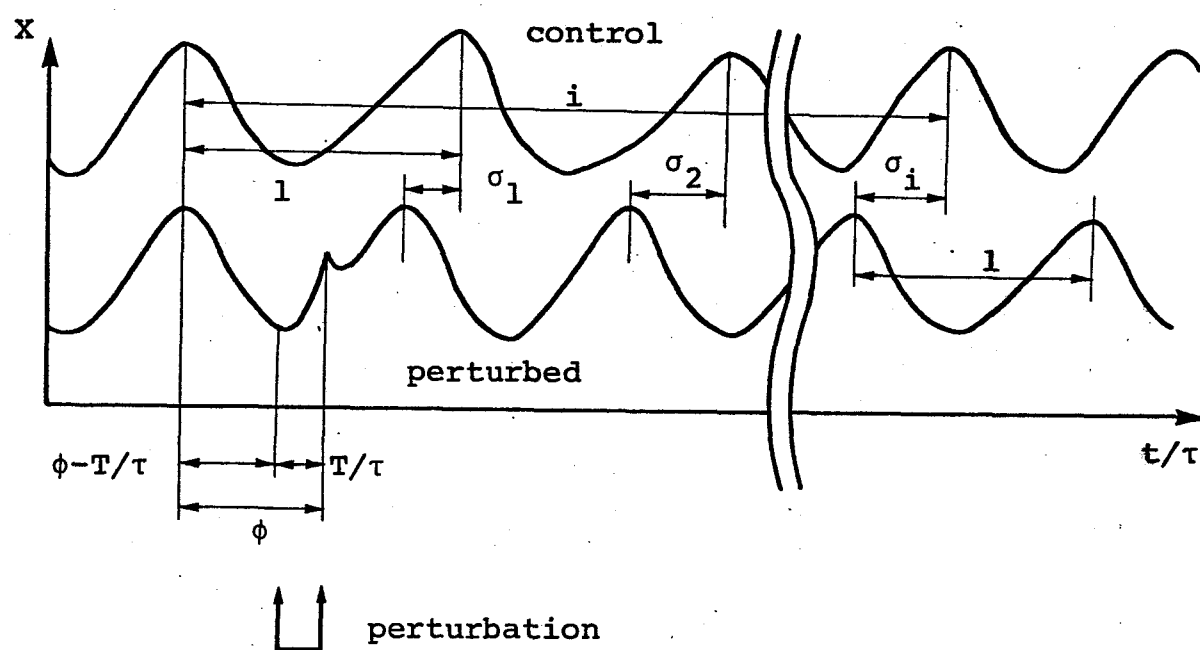


図12. 位相遷移曲線の定義

刺激の後、時間が経つと乱れた周期も正常に戻るから、 ϕ' は極限
 σ, ϕ' を持つ、これをそれぞれ遅れ、新位相と呼ぶ。 $\phi' = \phi + \sigma$

だから、新位相 ϕ' は旧位相 ϕ から刺激によって遷移した新しい位相を表わ
 している。 σ, ϕ' は ϕ の関数になっていて $\sigma(\phi)$ を位相反応曲線、
 $\phi'(\phi)$ を位相遷移曲線と呼ぶ。

3.2.2 位相遷移曲線の性質

位相遷移曲線、位相反応曲線は日周期の振動子、神経生理学の振動子、生化学的
 振動子など様々な対象について調べられているが共通の基本的性質がある。まず ϕ と
 ϕ' の 1 と法として定義されているから位相遷移曲線 $\phi'(\phi)$ は双周期的である。

また、位相遷移曲線は連続であるので ϕ が 0 から 1 まで変化する時、 ϕ' は
 整数分だけ増加または減少する。これまでに計測された位相遷移曲線は

ϕ が 0 から 1 まで変化する間に ϕ' が 1 だけ増加する場合と、変化しないかの 2
 種だけである。前者は 1 型、後者は 0 型と呼ばれる (図 13 参照)。

特に図 13 の (a) (b) の中に点線で示した位相遷移曲線は典型的な 1 型、0 型
 である。前者は $\phi'(\phi) = \phi$ で、刺激が最終的には振動子に全く影響を
 与えない場合である。後者は、いつ刺激が与えられるかによる振動子が
 一定の位相に遷移することを意味する。

Winfree (1970) は、生物の種々の器官の日周期リズムの振動子に対して、刺激として持続時間
 一定の可視光線の光パルスを用いた 14 の位相反応実験の論文から 16 個の位相
 遷移曲線を再構成して、それを上で述べた典型的な 1 型から 0 型へと

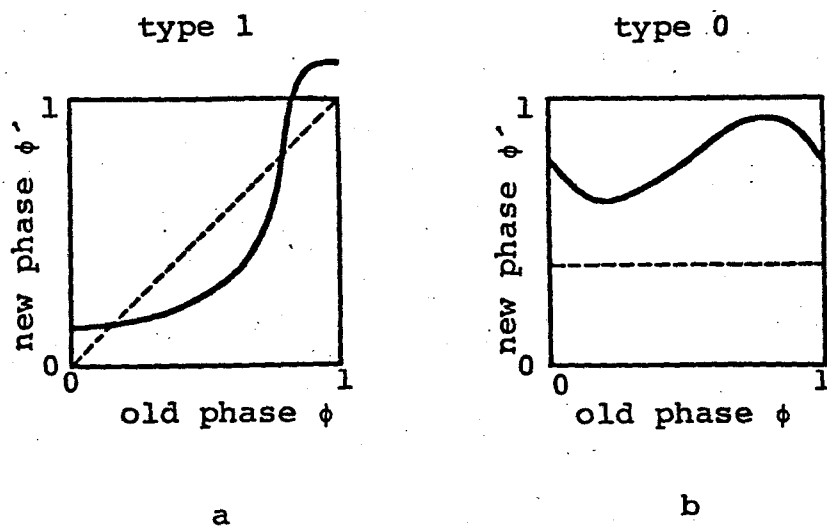


図13. 位相遷移曲線の2つの異なる型.

a は1型. b は0型 と表わす. 図中点線は典型的な1型, 0型 と表わす.

順に並べた。その結果を図14に示す。ただし、ここで T は旧位相に対応し、 θ は新位相に対応する。図中の (a) は 1 型と 0 型の境の特異な位相遷移曲線となっており、(a) より前のアルファベットの位相遷移曲線は 1 型、後のアルファベットの位相遷移曲線は 0 型となっている。又、(d) と (k) では、同じ対象に対して光パルス持続時間を変えることにより 1 型と 0 型の位相遷移曲線が得られている。Winfree (1975) はこの点を詳しく検討する為、西野田らの解糖振動系の実験で、小さな刺激強度では 1 型、大きな刺激強度では 0 型の位相遷移曲線が得られることを示した。また Kawato (1978) もはホミオ-論を援けて、数学的にこれを証明している。つまり、図 15 に示したように、刺激強度 m の変化によって、 $0 \leq m < m_1$ の時は 1 型、 $m_2 < m$ の時は 0 型の位相遷移曲線が得られ、 $m_1 \leq m \leq m_2$ では位相遷移曲線が得られないことを示した。

3.2.3 位相遷移曲線の回帰

実験では位相遷移曲線は限られた数の旧位相 ϕ についてしか計測できない。そこで、位相遷移曲線の型の分類や形の解析を容易にするため、この実験データから回帰曲線を求める。この場合、位相遷移曲線 $\phi'(\phi)$ は連続でしかも双周期的なので単なる直線回帰、多項式回帰では不適当である。そこで旧位相 ϕ が 1 の周期とすること留意して次のような Fourier 級数型の回帰式を求める。

$$\phi'(\phi) = a \cdot \phi + \sum_{k=0}^L \{ b_k \sin(2\pi k \phi) + c_k \cos(2\pi k \phi) \}$$

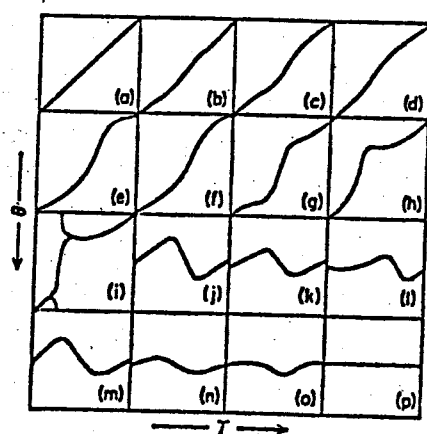


図14. 日周期リズムについて測られた位相遷移曲線の変化

T は旧位相, θ は新位相に対応する (Winfree, 1970より引用)

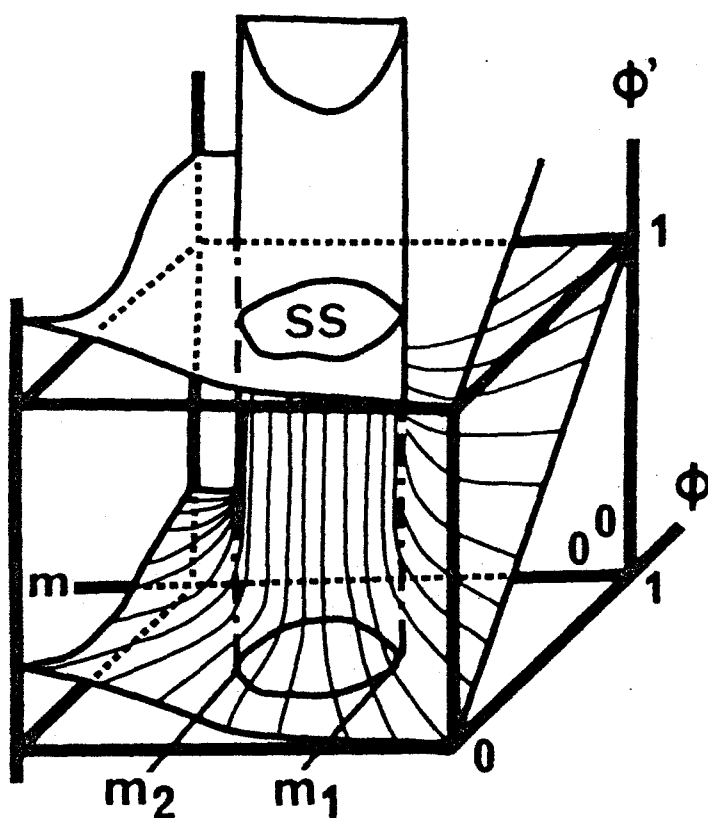


図15. 刺激強度の変化による位相遷移曲線の変化。

前後軸は旧位相 ϕ , 左右軸は刺激強度 m , 縦軸は
新位相 ϕ' を表れる。(Kawato, 1978より引用)

ただし、ここで ϕ は位相遷移曲線が1型か0型かにより、それぞれ値1, 0をとる。観測点を $\{(\phi_i, \phi'_i), i=1, \dots, N\}$ として、 a, b_k, c_k は二乗誤差

$$\sum_{i=1}^N \{dis(\phi'(\phi_i) - \phi'_i)\}^2$$

が最小になるように決められた。ただし、 ϕ' が1の周期とすることから

$$dis(\phi'(\phi_i) - \phi'_i) = \min(E_i, 1 - E_i)$$

$$E_i = \phi'(\phi_i) - \phi'_i \pmod{1}$$

である。回帰式の次数は4次とし、計算は極値探索法で行なった。

図16に実験値と回帰曲線の例を示す。

3.3. 3種の課題に対する位相遷移曲線

3.3.1. 課題と被験者

フィンガー タッチングを行なっている被験者に、各図に応じてあらかじめ指定した課題を遂行させた。そしてこの課題がタッチングに与える影響を位相遷移曲線を計測することにより解析した。課題としては次の課題を設定した。

課題1: 光信号に速やかに応答して、タッチングを行なっている手の対側の手で1回キーを押させる。キーを押すのに必要な力は20gである。光信号としてはモータースコア上に1辺5mmの正方形図形を20ms提示した。

課題2: 1と同じ光信号に速やかに応答して"s"音を発生させる。

課題3: 光信号としてサイズ5mmの○印と×印のどちらかを20ms提示し、それを判別させてタッチング終了時に報告させる。

被験者としては、正常の運動機能を有する大学院生4名 (T.F., H.T., N.K., Y.M.) を使用した。全員右利きであった。

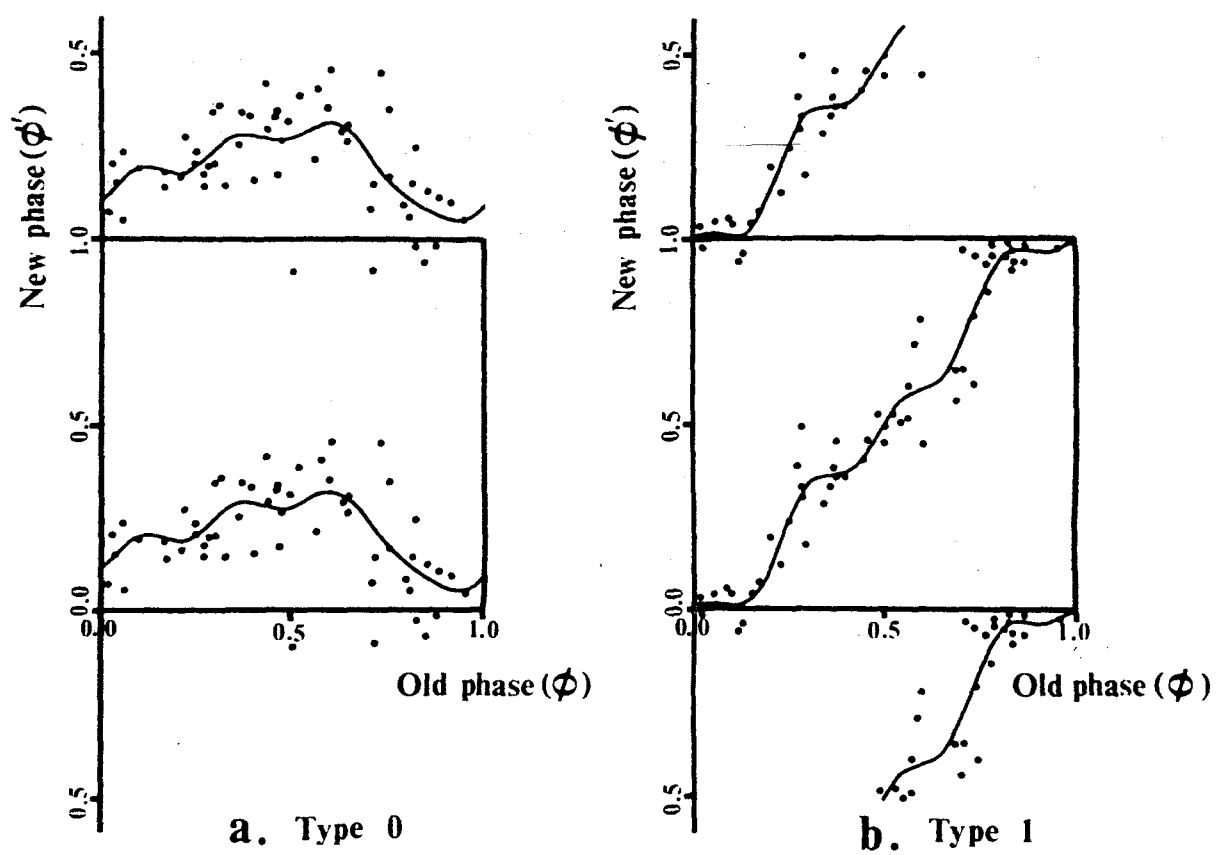


図16. 位相遷移曲線の回帰

3.3.2. タッチング間隔の学習

図17に実験システムの概要を示す。あらかじめ設定した時間間隔で光信号をモニタースコフ上に提示する。この光信号に同期して、被験者にマイクロスイッチを押させ、タッチング間隔を学習させる。モニタースコフと被験者の距離は約45cm、提示光信号は1辺5mmの正方形図形、提示時間は20msである。被験者の学習完了の合図で、今度は光信号の提示なしで今度は時間間隔でタッチングを約30回繰り返す。寺尾ら(1977)は十分学習がなされた場合は、自発的タッチングの間隔の標準偏差が平均時間間隔の約1/20になることを調べている。そこで、ある一定の標準偏差を求めておき、このばらつきの範囲で自発的タッチングが行なえる状態で位相遷移曲線の計測を行なった。タッチングの時間間隔は1000msとした。タッチングを行なう指は利き腕の人差し指を指定した。タッチングおよび課題用のマイクロスイッチは小さな板に固定し、タッチングや課題が行ないやすい位置に自由に移動できるようにした。特に人差し指以外の部分を避けてタッチングしないように注意した。

3.3.3. 位相遷移曲線の計測

30回の自発的タッチング中にモニタースコフ上に1~3回光信号が提示される。被験者はこの光信号に応じて、速やかにあらかじめ定められた課題を行なうよう指示された(図18参照)。光信号はタッチングによるマイクロスイッチのON時点からタッチング時間間隔の9/10, 1/10, ... 9/10の時間後、すなわち10段階の位相で提示した。30回の自発的タッチング中の何回目

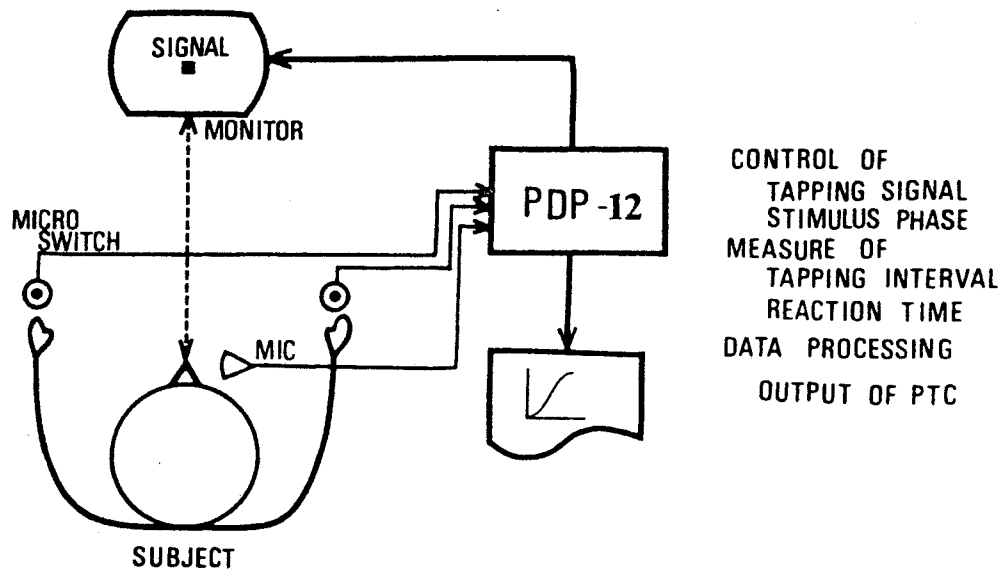


図17. 実験システム

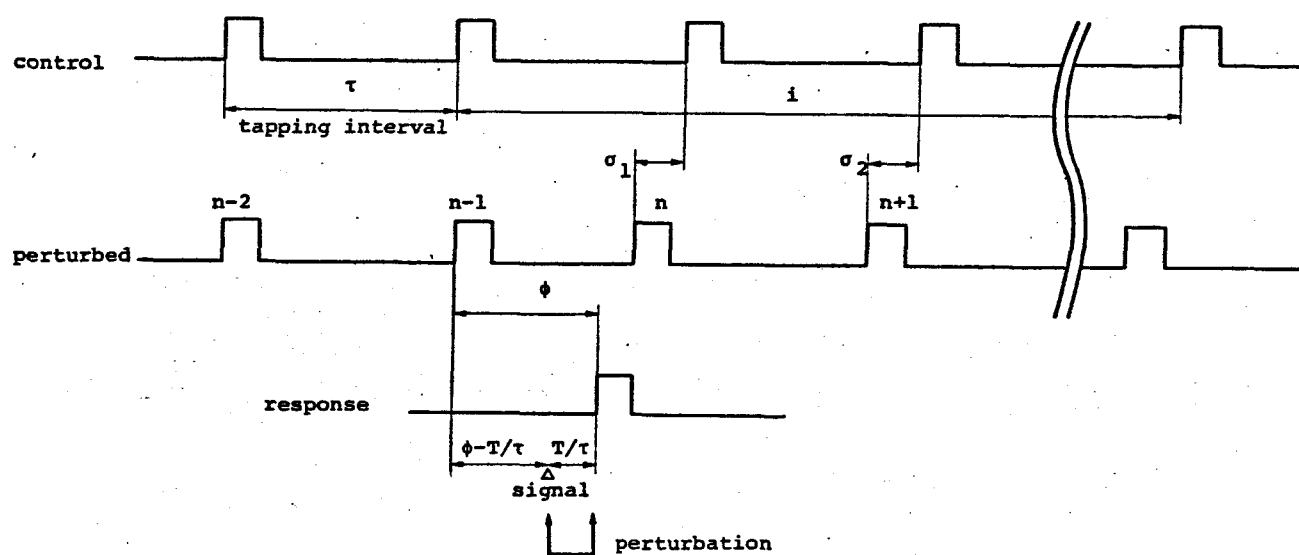


図18. フィンガータッピングにおける位相遅移曲線の計測法

どのような位相で光信号が提示されるかは被験者に予選りできないようにランダムに決めた。光信号の提示は各タッピング時間間隔で10段階の位相のそれぞれについて4回以上行ない、この合計約60回の光信号の提示とそれに応じての課題の遂行を1試行とした。1試行の実験時間は約1時間である。3課題に対する各1回の試行計3試行を1セットとし、学習による位相遷移曲線の形の多様性をみるための実験は5セット行なった。

光信号に応じての課題の遂行がタッピングに及ぼす影響は短い時間しか続かず、課題の遂行後2回目か、3回目のタッピングでタッピング間隔は一定周期に戻るため、遅れ τ はこの2番目か3番目の遅れ τ_2, τ_3 として新位相 ϕ' を計算した。

刺激の持続時間 T は、それぞれの課題について次のように決めた。課題1の場合は光信号に対する反応時間、課題2の場合は光信号の提示から"s"音の発声によって一定閾値の音声電圧が出るまでの時間、課題3では $T=0$ とした。現実には認識に要する時間 T が存在するはずであるが、 $T=0$ として位相遷移曲線 $\phi'(\phi)$ はグラフの右上45度方向に平行移動するだけで形は変わらない。

タッピング間隔の計測、種々の位相での光信号の提示、実験データの処理などは PDP-12 計算機を用いてオンラインで行なった。

3.3.4 結果

3種の課題に対する位相遷移曲線を図19に示す。実験結果は3.2.3節で述べた回帰曲線で表れる。図中の数字は典型的な1型の位相遷移曲線からのずれ(遅れ, 進み)の大きさを表れる指標として,

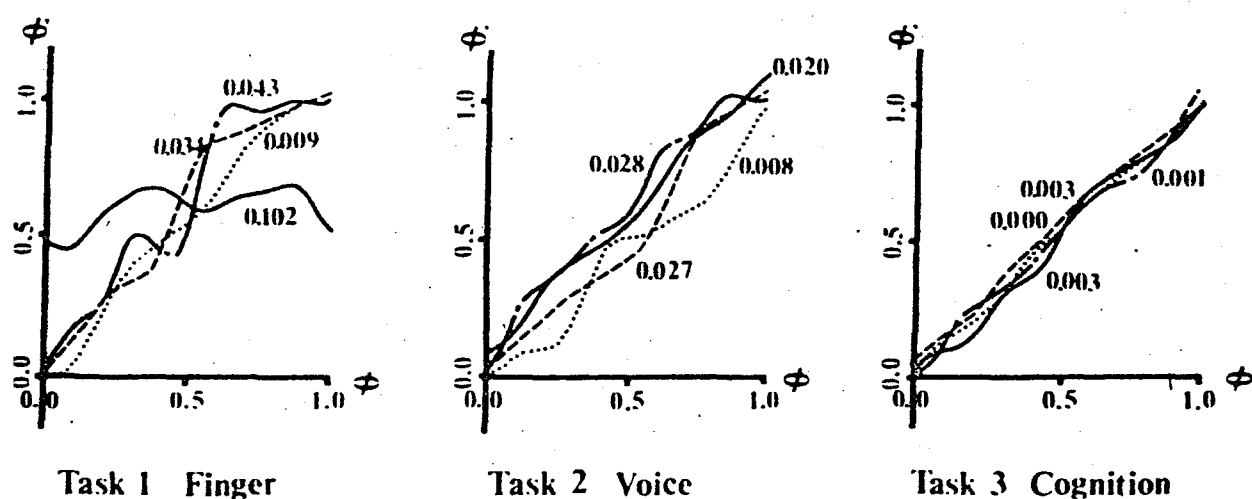


図19. 3種の課題(キー押し応答, 発声応答, 図形識別)に対する位相遷移曲線. 運動負荷 20g, タッピング肢は右手, タッピング間隔 1000ms, オ2セットの試行結果を示す. 実線, 破線, 点線および一点鎖線は各々, 被験者, T.F., N.K., Y.M.およびH.T.のデータを示す.

すなわち = 乗和の平均

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ \text{dis}(\phi_i - \phi(\phi_i)) \}^2$$

と示したものである。以下の実験結果も回帰曲線とこの指標 V で示す。

図19は、5セットの試行のうち2セット目の試行の結果を示したものである。5セットの試行のうち4つの場合で、課題2, 3では1型の位相遷移曲線が得られた。これに対して、課題1では0型を示す被験者と1型を示す被験者がみられた。課題1, 2, 3のすなわち指標 V はこの順に大きかった。又、試行回数が増えると共に V が小さくなる傾向がみられ、1型の位相遷移曲線を示す被験者では型の変化はみられなかったが、0型を示した被験者では1型への移行がみられた。課題1については、位相遷移曲線の型が被験者の過去の学習経験にかなり依存しているようで個人差が大きい。そこで次節では、学習経験の違いによって2つの被験者グループを設け、課題1について更に詳しく検討した。

3.4 フィンガータッピングの位相遷移曲線の性質

3.4.1 課題と被験者

実験システムならびに位相遷移曲線の計測方法は前節に述べたのと同様である。実験条件は次の10通りである。

まず、タッピング周期の影響を調べるため、負荷20gでタッピング周期を1000, 700, 400, 200msの4通りに設定した。

次に、運動負荷の影響を調べるため、周期1000msと400msにおいて運動負荷（キー押しに必要な力）を200および400gの2通り選んだ。

さらに、運動系の左右差について調べるため、周期1000と400msにおいて
負荷20gでタッチング手とキー押し反応手を交代させた。

以上10通りの実験を1セットとし、前節での実験と同様に全部で
5セット繰り返した。

被験者としては、正常の運動機能を有する大学生4名（グループ1；T.I.
Y.O., H.N., T.M.）とタッチング運動の習熟者と考えられる音楽大学コンピュータ科
学生5名（グループ2；K.M., T.T., E.M., Y.T., Y.M.）の2つの被験者
群を使用した。

3.4.2. タッチング周期と位相遷移曲線の関係

図20にタッチング周期を変化させた時の位相遷移曲線を示す。同図はオ1セット
の試行の結果である。上段はグループ1の被験者の例であり0型の位相遷移
曲線、下段はグループ2の被験者の例であり1型の位相遷移曲線が得られて
いる。グループ2の被験者の場合、11名の被験者も、どのタッチング
周期においても典型的な1型の位相遷移曲線が得られ、対側手の反応
がタッチングの神経回路にほとんど影響を及ぼさなかった。一方、このような
運動学習を経験したことのないグループ1の被験者においては、2人が
0型の位相遷移曲線を示し、対側手の反応が強い影響を与えていることが
わかる。この影響力はタッチング周期にも依存している。例えば、
400と1000msと比較してみると、400msでは全位相において対側手の
キー押し反応へのタッチング運動肢の強い引き込みがみられるが、1000ms
では位相0.6以上においてみられるのみである。この生理学的意味に

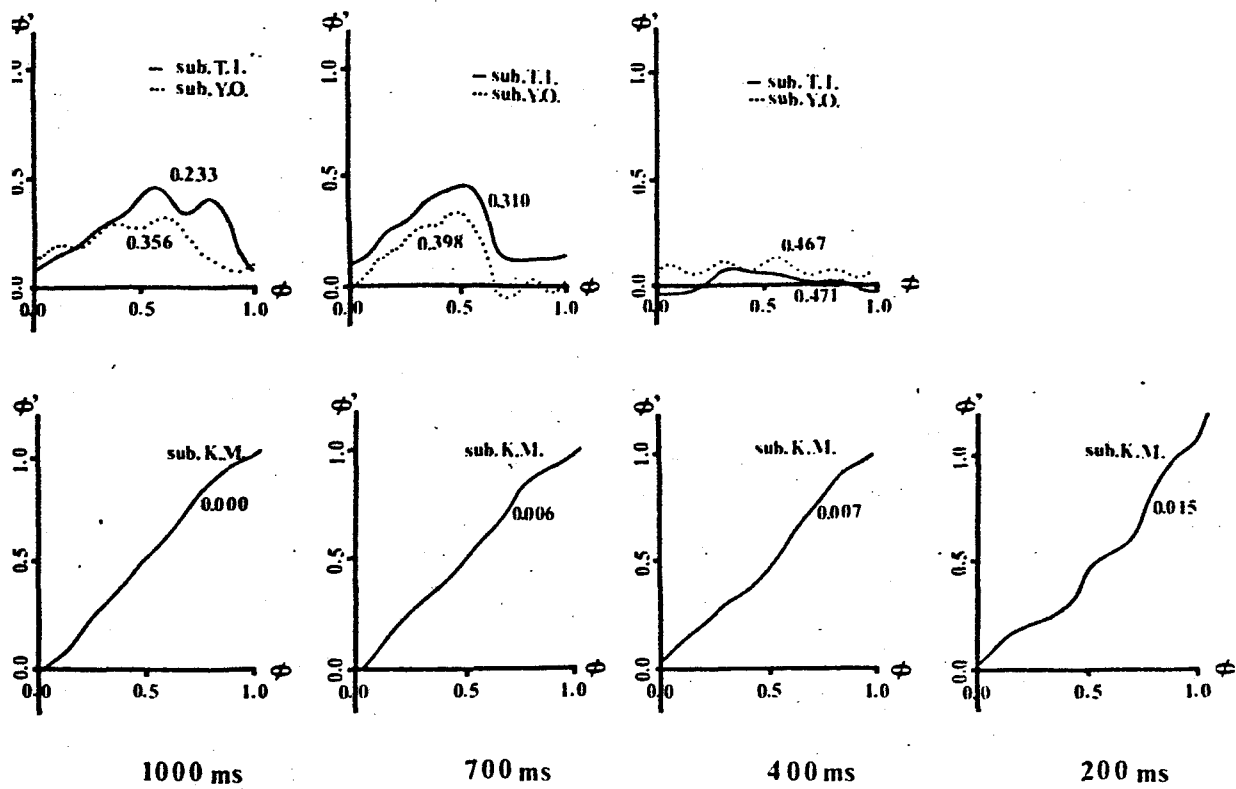


図20. 種々のタッピング周期に対するオ1セットの位相遷移曲線
運動負荷 20g, タッピング肢は右手, 上段はゲル-7°1の被験者,
下段はゲル-7°2の被験者の例を示す。

については不明確であるが、エロアノ上級者と普通の被験者とのタイロの
 違いから、学習経験の差によって左右運動系の分離度、すなわち、左右
 運動系を制御している神経回路間の結合強度が違ふことが予想
 され、それが位相遷移曲線の上での0型と1型の違いとなって現われ
 ていると考えられる。次節では、学習効果による型の変化を調べる
 ことでこの問題について検討した。

3.4.3. 学習効果による位相遷移曲線の変化

図21に0型を示した被験者の5セットの実験結果を示す。図から明らか
 なように1000および400msのどちらか1型へと変化して行く。400msの方
 が変化が速いことから、1000msに比べて400msの周期でトレーニングしている
 時の方がより強い影響を与えることがわかる。

ここで学習効果によって対側手の反応時間そのものが速くなるが、
 特定の位相に顕著な反応時間の短縮がみられるというとはなく
 (図22参照)、反応時間の変化が位相遷移曲線の型の変化に
 影響しているとは考えられない。左右の運動系の相互作用が学習
 によって弱まった結果が型の変化に反映したものと考えられる。

3.4.4. 運動負荷の変化に対する位相遷移曲線の変化

運動負荷の変化として、反応時のマイクロスイッチの重さを20gから10倍の200g
 に変えた時、被験者の反応時間は約20%程増えるが、位相遷移
 曲線における型の変化はみられなかった。そこで、マイクロスイッチの重さを

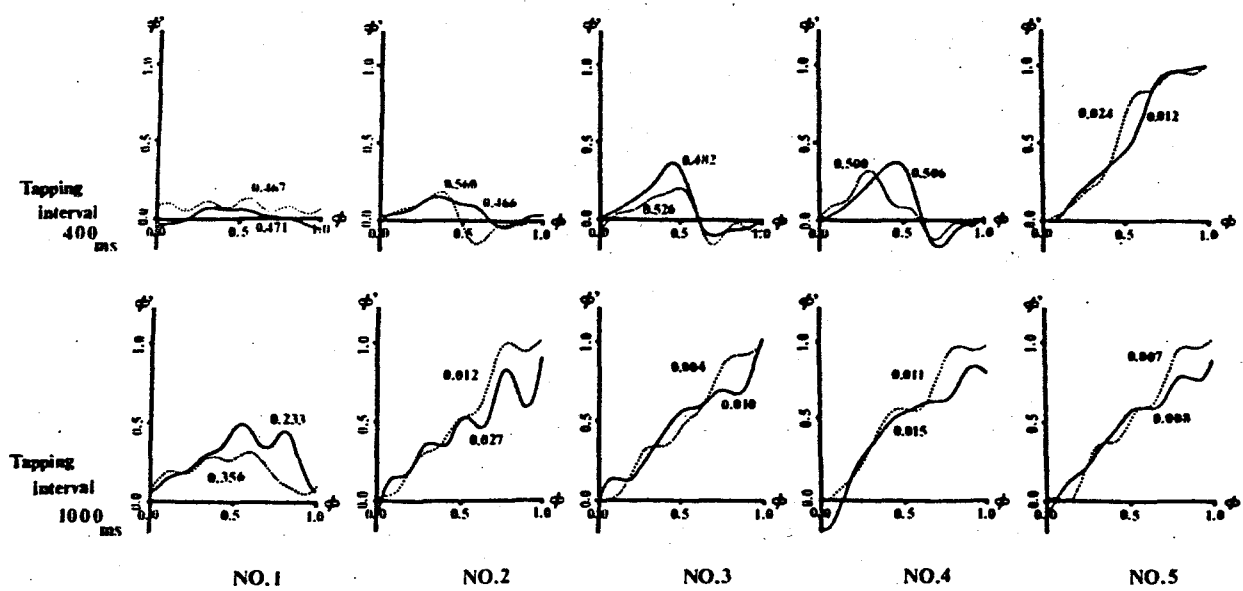


図 21. 学習効果による位相遷移曲線の変化

運動負荷 20g. タップ>7" 肢は右手, No. はセット数を表す。

実線は被験者(T.I.)の結果, 破線は被験者(Y.O.)の結果を示す。

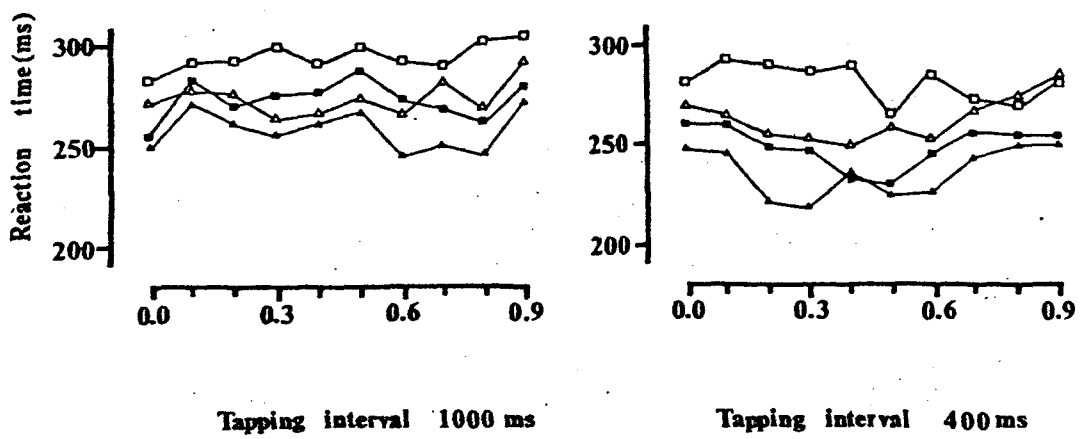


図22. 刺激位相による反応時間の変化

□・■ はそれぞれ被験者 T.I. のオ1セットとオ5セット,
 △・▲ はそれぞれ被験者 Y.O. のオ1セットとオ5セット
 の結果を示す。

さらに4倍の800gに上げて実験を行なった。図23(a),(b)に示すように型の変化というような顕著な変化はみられなかった。負荷の増大で1型から0型へと移行することか期待されたのであるが、逆に、負荷を増大することによって典型的な1型に近づくような傾向がみられる。このような運動負荷の変化は、被験者には、より規則正しい周期でタッチングしようという意識を働かせ、タッチングをより安定に持続させたように思われる。

3.4.5 位相遷移曲線における左右差

図23(a),(c)にタッチング運動肢と応答運動肢を交代させた時の位相遷移曲線を示す。カセットの結果である。グループ2の被験者の場合、右手左手ともタッチング運動に習熟しており、タッチング間隔の分散は小さかった。一方、グループ1の被験者では、利き手でなくとも指の運動は分散が大きく、一定間隔のタッチングの学習に時間を費やした。特に、速い周期のタッチングは難しかった。しかし、このような条件のもとで計測された位相遷移曲線は図23(a),(c)に示したように、1型を示す被験者の場合も、0型を示す被験者の場合もほとんど左右同じ特性を持っていた。この結果、周期的な出カと出る神経回路の応答特性は左右対称な構造を有していると推察される。図24に第5セットでの左右の位相遷移曲線を示す。グループ2の被験者の方が左右の対称性が良いことが示されている。

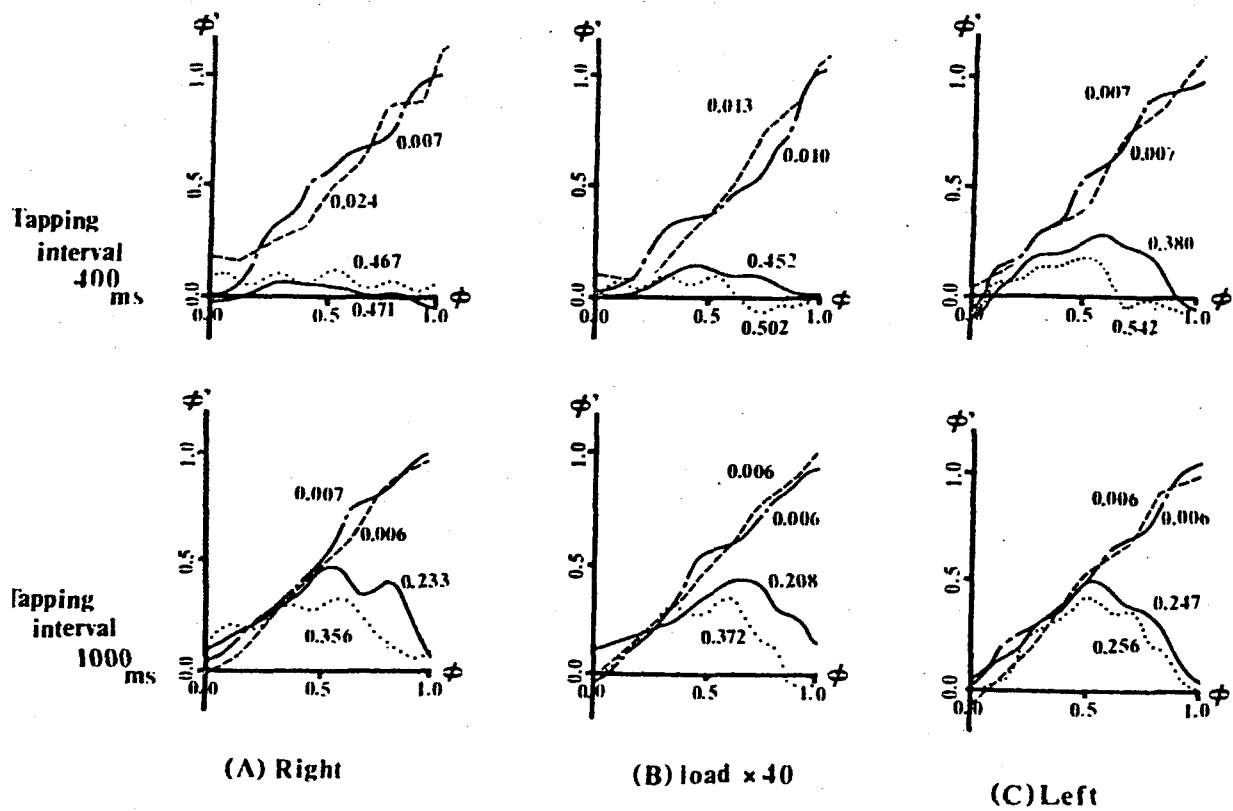


図23. 異なる負荷に対する位相遷移曲線と左右手の位相遷移曲線

(A) 右手タッピング, 負荷 20g. (B) 右手タッピング, 負荷 800g.

(C) 左手タッピング, 負荷 20g.

ゲル-701 のオ1セツの結果を示す。[T.I.(実線), H.N.(破線), Y.O.(点線), T.M.(一点鎖線)]

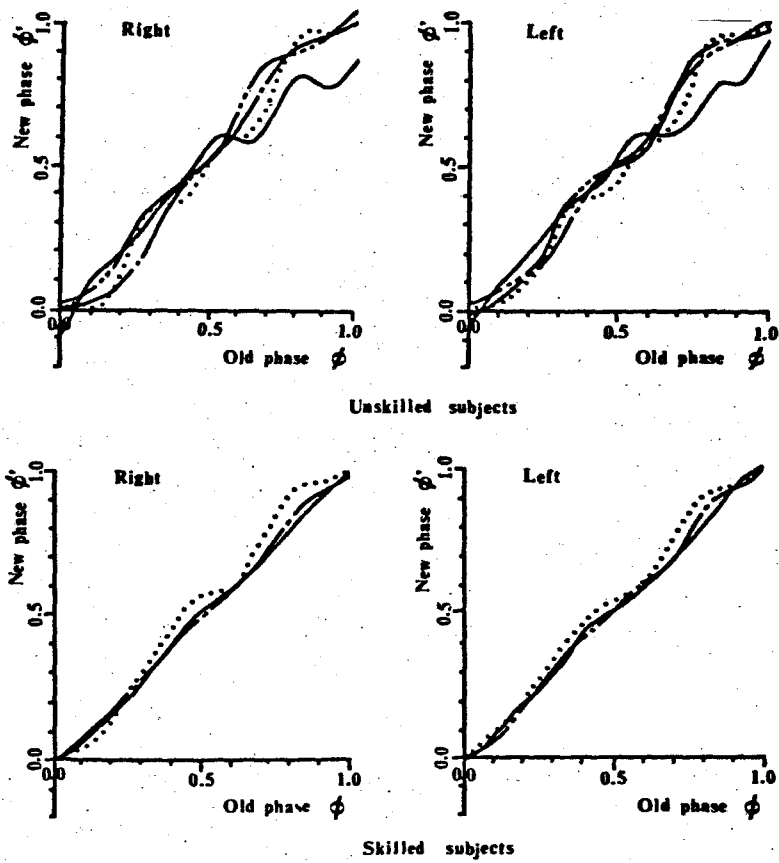


図24. 左右手の位相遷移曲線

上段はグループ1, 下段はグループ2の第5セットの結果を示す。

3.5 考察

従来、運動制御系の神経機構を調べる方法としては、神経生理学的手法、脳波や筋電位による方法、あるいは、心理学的手法などがあった。

本章で、我々が行った位相遷移曲線を計測する方法は、神経回路の構造については不明であるが、機能的な意味での神経回路間の相互作用を明らかにするという点では新たな方法となろう。

ところで、はじめにも述べたように生理学的には明らかではないが、我々は振動的な出力を出す神経回路が存在するものと考えている。タッピング機に諸課題を遂行させても位相の変化はみられるが、周期そのものの変動は少ないので、かなり安定な周期的出力を出す神経回路が存在するものと考えられる。そこで、フィンガー・タッピングに対する諸課題の影響の強さは、課題を制御する神経回路とフィンガー・タッピングを制御する神経回路との相互作用の大きさによるものと考えた。ここで実験により得られた結果をまとめてみる。

- 1) キー押し応答、発声応答、図形識別の課題に対して計測した位相遷移曲線では、キー押し応答で0型と1型の両方が得られるが、他の課題は1型のみしか得られなかった。特に図形識別では典型的な1型が得られた。1型から各指標 σ について、キー押し応答、発声応答、図形識別の順に大きかった。

- 2) 運動負荷の変化による位相遷移曲線の形の変化はみられなかった。
- 3) 位相遷移曲線の形は、被験者のタッピング運動に対する学習経験によってかなり異なることが示された。すなわち、熟練者では、典型的な1型のみで示されたが、未熟練者では、0型を示す被験者がみられ、Vも全体的に入ってきた。
- 4) 学習によって0型から1型へと位相遷移曲線が移行することが示された。
- 5) タッピング周期が短い程、0型の位相遷移曲線を示す傾向がみられ、位相遷移曲線の形はタッピング周期に依存することが示された。
- 6) 左右の手で計測した位相遷移曲線は非常に類似した特性を示した。

ここで、フィンガータッピングを制御している神経回路と課題を制御している神経回路とが、どのような関係にあるかを考察してみる。

図25にこのような神経回路の概念モデルを示す。図中の太線は、相互作用を示す。

キー押し応答、発声応答では図中の相互作用1, 2, 3とも存在すると考えられるが、図形識別では相互作用1のみである。結果(1)より、図形識別において典型的な1型が得られることから、この相互作用1は非常に弱いものと考えられる。結果(2)に示されたように、運動負荷の増大によっても位相遷移曲線の形が変化しなかったことから、相互作用3も非常に弱いものと考えられる。何故なら、負荷の増大によって、活動する

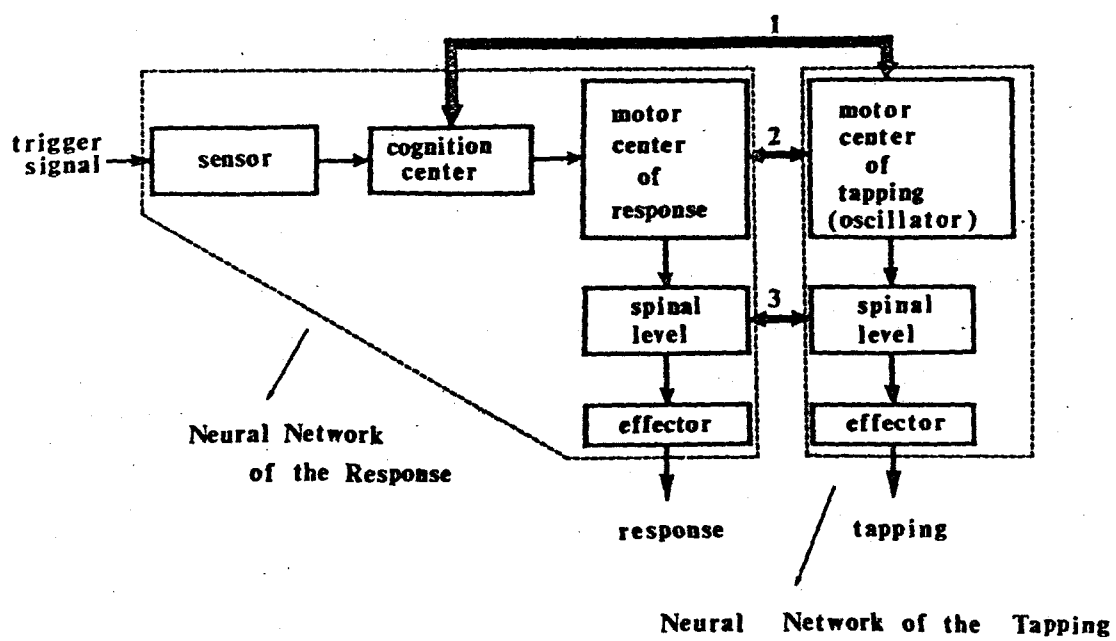


図25. フィンガー・タッピングと課題応答を制御している
神経回路のブロックダイアグラム

運動ニューロン数が増えたり、それらの運動ニューロンの活動度が増えたり
 することが考えられ、相互作用が存在すればそれらの影響が位相遷移
 曲線の形の変化となって表わされるはずである。結局、干-押し応答、
 発声応答などの運動課題を制御する神経回路とタッピングを制御
 する神経回路とは相互作用2によって関連していると考えられる。特に
 干-押し応答の場合、この相互作用2が非常に強い。以下、この相互
 作用2のみを問題とする。

3.2.2 で数学的には刺激強度を増大させていくことで、位相遷移曲線
 が1型から0型へと変化する事が明らかにされている。結果(3)より、学習
 経験の差によって相互作用の強さが異なることが示され、又、結果(4)より、
 学習によって0型から1型への移行が示されたことは、学習によって
 左右運動系の分離が進み、相互作用が弱まったものと解釈できる。
 さらに、結果(6)に示したように、左右の位相遷移曲線の形が類似
 していることから、周期的出力を出力する神経回路の応答特性は、左右
 対称な構造を有していると推察される。

3.6 むすび

周期的出力を出力する振動的な神経回路の発現として、
 フィンガータッピングをとらえ、諸課題に対する位相遷移曲線を計測し
 た。課題としては、タッピング運動肢の対側肢による干-押し応答、

発声応答，図形識別の3課題を設定した。位相遷移曲線の特性の変化からこの3課題をそれぞれ制御している神経回路の，タッピングを制御している神経回路に対する影響の強さについて検討した。

その結果，神経回路間の機能的な意味での相互作用のレベルは，キー押した応答，発声応答，図形識別の3員に強かった。タッピング同期性の变化の実験では，周期が短くなるにつれ，相互作用が強くなった。

又，同一課題に対する学習によるパフォーマンスの変化が位相遷移曲線の上では，0型から1型への移行として示された。運動負荷の変化によって位相遷移曲線の形の変化はみられなかった。次に，左右の位相遷移曲線の計測から，周期的な出力を出力神経回路の特性は，左右対称な構造を有していると推察された。

第4章 両手タッピングの位相遷移曲線による解析

1. はじめ

協調のついた運動を行なうには、使用される筋肉群の運動の空間パターンと時間パターンの制御が円滑に行なわれなければならない。これらの制御は何らかの神経回路によって行なわれるのであろうが、特に周期的な運動のタッピングの制御のためには、ある種の振動回路が存在することが考えられる。

我々は前章において、この周期的運動の制御の振動的な出力を持った神経回路において行なわれると想定し、フィンガータッピングについて位相反応実験を行ない、ある課題の遂行を外乱として与えた時に得られる位相遷移曲線の形状、タッピングを制御している神経回路とその課題を制御している神経回路との相互作用について議論してきた。

ところで、日常の運動の様子を考えると、左右の手や足の運動系の協調動作がよくみられる。タッピングに類するものとしては、ピアノやタイプライターの打鍵などがあげられよう。このような左右の運動系の協調による一連の運動はどのような神経回路で制御されるのであろうか？ 我々はガリガニの這泳泳がが相互作用する神経振動子によって制御されるように、この両手による協調的なタッピングも相互作用する神経振動子により制御されるのではないかと考えた。

つまり、片手のタッピングを制御する左右それぞれの振動的な神経回路が両手のタッピング時にも働き、この2個の振動子の相互作用が両手タッピングの制御に大きな役割を果たすと考えた。そこで本章では、被験者に対して一定の位相差を持ったタッピングを行なわせ、そのパフォーマンスを評価した。一応、前章で計測した左右の位相遷移曲線から2つの振動的な神経回路が相互作用するモデルを設定し、左右運動系の協調運動について考察した。

2. 両手タッピングのパフォーマンスの評価

実験方法 実験システムの概要, タッピング間隔の学習については, 前章で述べた方法と同様である。被験者はその方法で, 左右手のどちらでもタッピング間隔 1000ms の自発的フィンガータッピングが行なえるように訓練された。この被験者を用いて, 両手を使ってのタッピングも行なわせる(図26参照)。モニタースコアに2つの光信号(右側の光信号は右手のタップ, 左側の光信号は左手のタップ)が一定の位相差をもって周期的に30回提示される。光信号の提示時間は20ms, 周期は1000ms, 左の光信号の右の光信号に対する提示時間遅れは, 0, 100, 200, ..., 900msのこゝと100msこゝとに10段階を設定した。つまり, 左の信号の右の信号に対する位相差は, 0.0, 0.1, 0.2 ... 0.9の10段階である。この位相差を基準位相差と呼ぶ。被験者はモニタースコア上のこの光信号に合わせてタッピングし, 両手でこのタッピングを学習してもらう。左手のタップの右手のタップに対する位相差が基準位相差から ± 0.05 以上ずれる場合は, "位相差小さく"ある"は"位相差大きく"の警告表示がなされる。こうして, 光信号の提示によって一定の位相差の両手タッピングが行なえる状態まで練習を行なった。練習終了後, モニタースコア上に練習した10段階の位相差のうち一つの位相差で光信号が提示される。被験者はまず光信号に合わせて両手でタッピングを行なう。光信号は10回の点滅で終了するが, 被験者はそのまま両手のタップの位相差を保つようにしながら両手タッピングを続けるよう指示された(Self-paced coordinated tapping)。自発的両手タッピングが20回行なわれるとタッピング終了の合図が被験者に送られた。

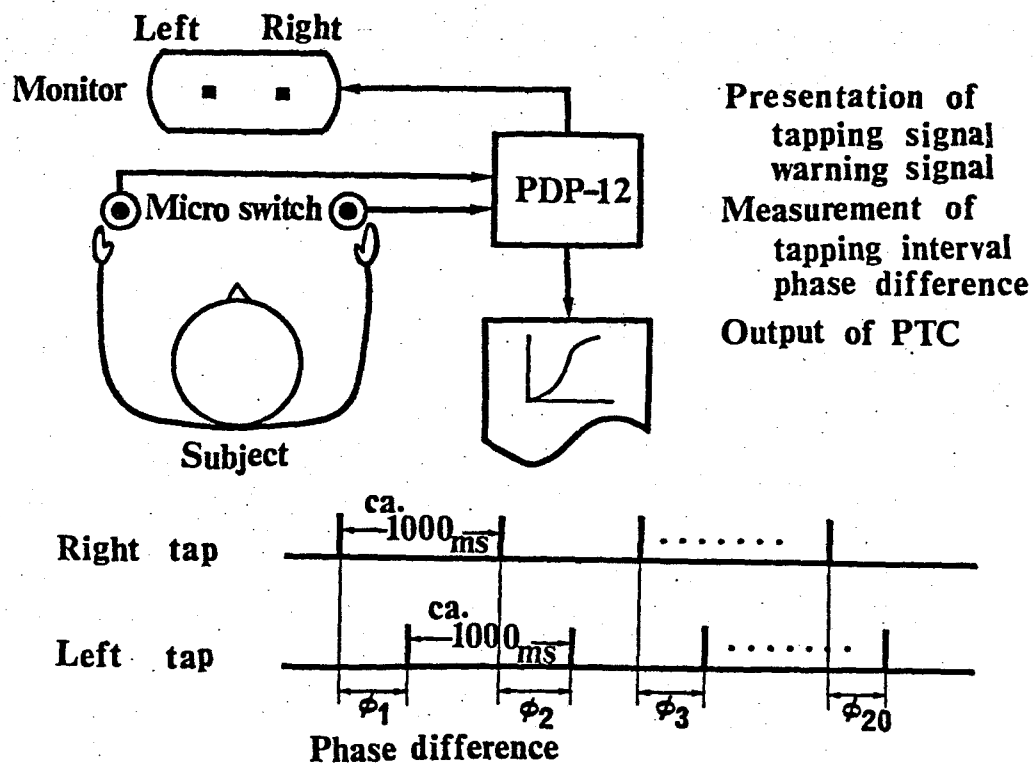


図26. 両手タッピングの実験システム

10回の自発的タッチングの間の左手のタッチの右手のタッチに対する位相差 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{20}$ は PDP-12 でオンラインで計算され処理された。10段階の位相差の光信号はランダムな順に提示され、各位相差はランダムに4回提示された。この40回の試行を一セットとし、全部で4セット実験を行なった。自発的両手タッチングがどのくらいの精度で持続されるか、特定の位相差にパフォーマンスの良いところがあるかを調べるため、自発的両手タッチング時の320個（20回のタッチ $\times$ 4回提示 $\times$ 4セット）の位相差のデータから各位相差の基準位相差からのずれの平均値（系統誤差）と標準偏差を求めた。被験者としては正常の運動機能をもつ学生4名（グループ1: T.I., Y.O., H.N., T.M.）とタッチング運動からみて両手による協調運動の熟練者と考えられる音楽大学ピアノ科学生5名（グループ2: K.M., T.T., E.M., Y.T., Y.M.）の2つの被験者群を使用した。被験者は全員右利きであった。

実験結果

図27に各被験者の自発的両手タッチング時の系統誤差（ A_0 ）と標準偏差（SD）を示す。横軸は基準位相差である。ただし、位相差0.0と1.0は同一である。図から明らかなように、左右手の位相差が0.0と0.5の場合が、他の位相差に比べてどちらの被験者グループも位相差の標準偏差が小さく、運動のパフォーマンスが良いことがわかる。これ以後、位相差0.0のタッチングを同相リズムパターン、位相差0.5のタッチングを交替リズムパターンと呼ぶ。グループ2の被験者のなかで、グループ1の被験者より位相のずれの標準偏差が小さく予想どおりであった。また系統誤差のグラフからも同相リズムパターンと交替リズムパターンのパフォーマンスが良いことがわかる。

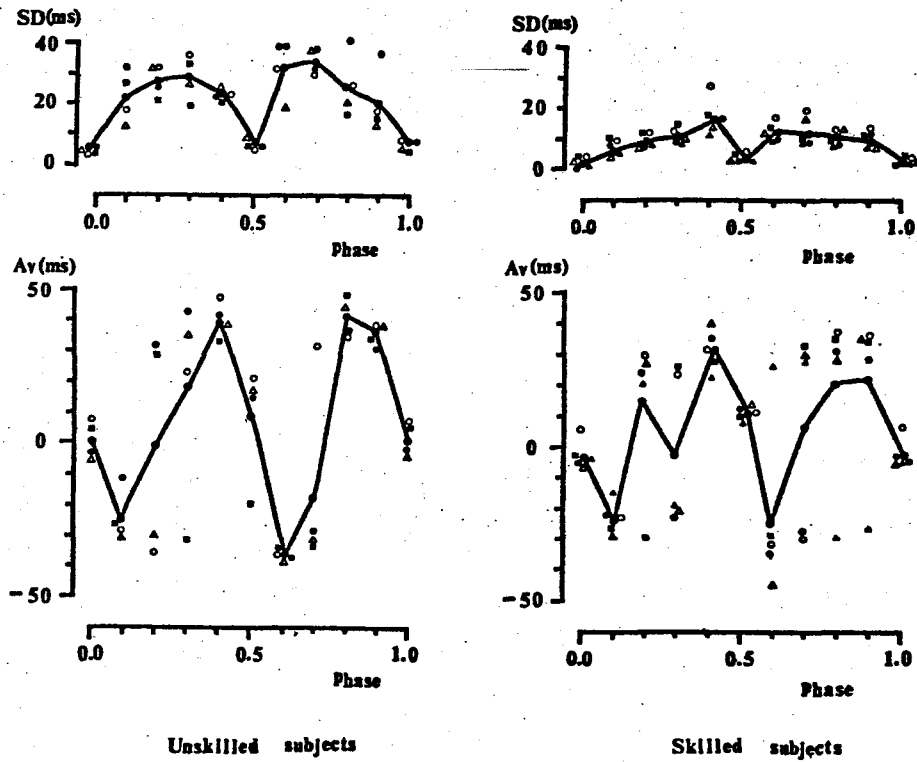


図27. 系統誤差 (A_v) とその標準偏差 (SD)

$$A_v = \frac{1}{320} \sum_{i=1}^{320} (\phi_i - \phi_s), \quad SD = \sqrt{\frac{1}{320} \sum_{i=1}^{320} (\phi_i - \bar{\phi}_i)^2}$$

ϕ_s は規準位相差を表わす。

左図は ケル-7°1 (○...Y.O., ●...T.I., ■...T.M., △...H.N.)

右図は ケル-7°2 (○...E.M., ●...T.T., △...Y.M., ▲...K.M., ■...Y.T.)

グール-7°1の被験者の系統誤差のグラフで説明しよう。例えば、基準位相差 0.1 (100ms) のタッチングでは、系統誤差が -30ms であるから、実際の位相差の平均値は 70ms であり、同相リズムパターンに近づく傾向がみられる。逆に、基準位相差 0.9 (900ms) では、系統誤差が 40ms で位相差の平均値は 940ms となり、やはり同相リズムパターンに近づく傾向がみられる。全体的に、同相リズムパターンに近い基準位相差 (0.1, 0.8, 0.9) では位相差が同相リズムパターンに近づくようにずれ、交替リズムパターンに近い基準位相差 (0.3, 0.4, 0.6, 0.7) では交替リズムパターンに近づくようにずれ。

グール-7°2の被験者では、基準位相差 0.2, 0.3 で少し乱れがあるが、全体的な傾向はグール-7°1の被験者と同様であった。

数学的に言えば、位相差 0.0 および 0.5 は、系統誤差の曲線の傾きが負であることから、安定な定常状態であると言える。グール-7°1の被験者においては、位相差 0.2 および 0.75 も又定常状態である。しかしながら、これは、曲線の傾きが正であるので不安定である。個々の被験者の系統誤差の結果を注意深くみると、位相差 0.0 および 0.5 では、平均値の回りにデータが集まっているが、他の位相差 (0.2, 0.3, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9) では、データは 2つの分布を示しているのがわかる。例えば、グール-7°2の被験者の位相差 0.7 の場合には、B, Δ, ▲ の 3人は正の系統誤差を示しているのに、●, ○ の 2人の被験者は負の系統誤差を示している。このようなデータの分布は通常の正規分布とは異なっていて、むしろ 2通りの分布特性をかついていると考えられる。これは、同相リズムパターンおよび交替リズムパターンの 2つの安定性: 起因するものと思われる。すなわち、位相差 0.7 の両手タッチングにおいては、次のような 2通りの傾向が示されているものと考えられる。1つは、位相差 0.5 の交替リズムパターンに引き寄せられる傾向で、この場合は系統

誤差が負になる。他の一つは、位相差1.0の同相リズムパターンに引き寄せられる傾向で、この場合は、系統誤差は正になる。

次に時間間隔1000msをタッチングするように指示された時、両手を使ってタッチした場合のタッチング間隔の標準偏差を図28に示す。様々な位相差について、時間間隔の標準偏差がどうなるかを示したものである。図中点線で示したのは、右手のみのタッチング時の時間間隔の標準偏差である。データは各グループの平均値で示してある。グループ2の被験者では、両手でタッチングした場合と片手でタッチングした場合での、指示されたタッチング間隔の再現性に差異はみられなかった。グループ1の被験者では、両手でタッチングした際の間隔が正確になることが示された。タッチング間隔の標準偏差が特定の位相差で小さくとか大きくとかという傾向は、どちらの被験者グループともみられなかった。

4.3. 2振動子の相互作用によるモデル

フィンガー タッチングを制御している神経機構は生理学的には明らかではないが、我々は内因的に周期的出力を出す神経回路が存在するものと考えている。片手のフィンガー タッチングを制御する神経回路の特性は前章で、位相遷移曲線を計測することにより調べられた。つまり、被験者にタッチングをさせながら発声応答をさせたり、図形識別を行なわせたり、対側肢によるキー押し応答を行なわせて位相のずれを計測し、タッチングを制御している神経回路と課題の遂行を制御する神経回路との相互作用を研究した。その結果の一つとして、右手のタッチングを制御する神経回路と左手のタッチングを制御する神経回路とは、ほぼ同じ性質を持つていることが明らかにされた。

さて、両手によるフィンガー タッチングを制御する神経回路と片手のフィンガー タッチングを制御する神経回路とは、どのような関係にあるのだろうか。

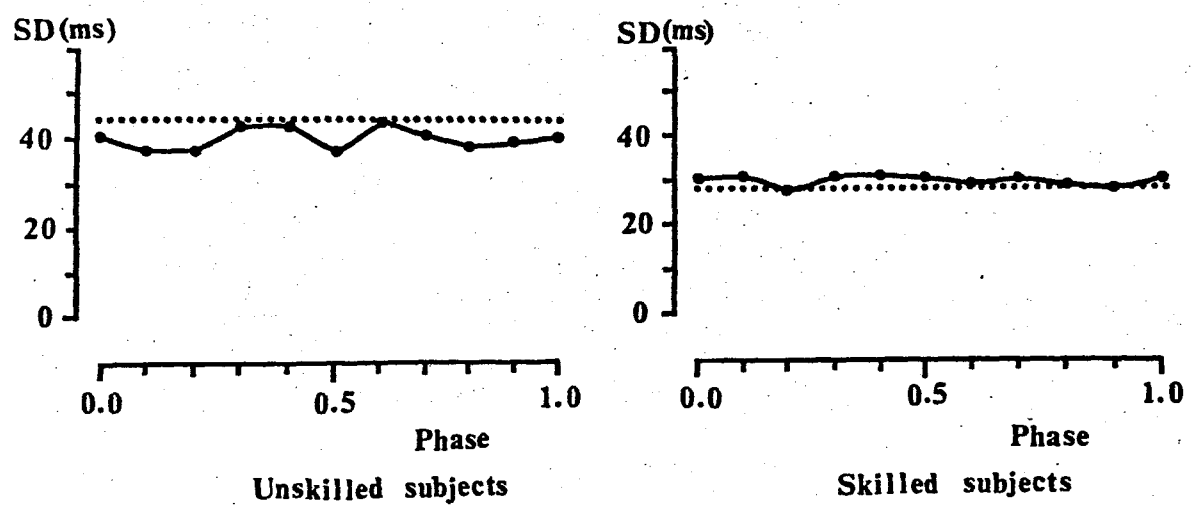


図28. 両手タッピングにおけるタッピング間隔の標準偏差
破線は片手タッピングのみの結果を示す。

両手タッピングを制御する神経回路は片手タッピングを制御する左右の神経振動子の結合系から成っているという作業仮説に基いて、本節では、左右それぞれの片手タッピングの位相遷移曲線を用いて、2個の振動子の結合系の振舞いを解析する。

複数の振動子の相互作用を位相反応曲線、位相遷移曲線により調べることは約20年前から行われてきた。例えば、Perkel (1964) は、ハースメーカー細胞の発火の周期的な IPSP でどのように影響される位相反応曲線から予測しているし、又、Stein (1974) は、サリカの腹部神経節内にある遊泳肢の運動を制御する神経振動子が前後の振動子と相互作用して、その結果協調した運動を支配していることを見出した。特に Stein の場合は、後の神経振動子から前の神経振動子への相互作用について位相反応曲線を計測し、その結果から遊泳肢の協調運動を理解しようとした。

これは2個の振動子の間に一方向性の相互作用だけがある場合の振動子の結合系の振舞いの解析である。これに対して、Daan & Berde (1978) は、ケツ歯類の日周期リズムハースメーカーを構成すると考えられる2個の振動子間に両方向性の相互作用があると考えて、その相互作用を仮想的な位相反応曲線で表わすことの振舞いを解析し、日周期リズムのシズル・シオンを行なっている。

さて、我々は、Daan & Berde の手法と左右の片手フィンガータッピングについて得られる位相遷移曲線を用いて、2個の片手フィンガータッピングを制御している振動回路の相互作用を示すには、どのような位相差の両手タッピングが可能かを調べる。右手のタッピングを制御する振動子 R と左手のタッピングを制御する振動子 L を考える。例えば、右手のタッピングを制御する振動子 R は周期 1000ms で興奮し、その1周期に1度、右手の筋肉系に信号を送り、タッピングを起こすものとする。 R と L は同じ周期 $T=1000\text{ms}$ で振動し、 R の左手の1回

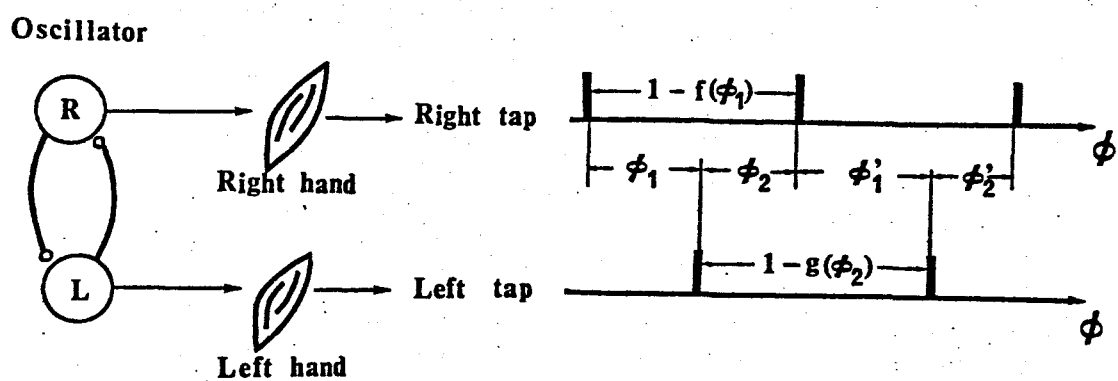


図29. 2振動子の相互作用モデル

キ-押しによる位相反応曲線を $f(\phi)$, L の右手の1回キ-押しによる位相反応曲線
 を $g(\phi)$ とする。図 29 に示すように, R と L が同時に振動すると両手はタツツ°
 するが, そのタツツ°の位相差 ϕ_1, ϕ_2 は R と L の相互作用によって次の漸化式に
 従って変化する。ただし, ϕ_1 は右手のタツツ°から左手のタツツ°の間の位相差,
 ϕ_2 は左手のタツツ°から右手のタツツ°の間の位相差である。 ϕ'_1 は次の回のタツツ°の
 位相差である。

$$\begin{cases} \phi_2 = 1 - f(\phi_1) - \phi_1 = 1 - (\phi_1 + f(\phi_1)) = F(\phi_1) & (1) \\ \phi'_1 = 1 - g(\phi_2) - \phi_2 = 1 - (\phi_2 + g(\phi_2)) = G(\phi_2) & (2) \end{cases}$$

$(\phi_1 + f(\phi_1))$, $(\phi_2 + g(\phi_2))$ はそれぞれ R , L の位相遷移曲線である。

前章で計測した $f(\phi)$, $g(\phi)$ はそれぞれ対側肢の1回のキ-押し応答に対する
 ものであった。本節でのモデルの場合, 左右のタツツ°が連続的に相互作用し合うの
 で $f(\phi)$, $g(\phi)$ の適用は必ずしも妥当とは言えないかも知れないが, 振動子 R
 および L の状態点は外乱を受けた後ただちにそれぞれのバットサイクルに戻ってくる
 と仮定のとおり, この $f(\phi)$, $g(\phi)$ を使用した。実験的にこの仮定を証明する
 ためには Winfree (1973), Pittendrigh (1974) による シリシロウバエで行なった
 2細胞実験のようなものを行なう必要がある。

定常な振動状態では, 右手と左手のタツツ°の位相差は一定になるので,
 $\phi'_1 = \phi_1$, $\phi'_2 = \phi_2$ となり, 定常な位相差 (ϕ_{1e}, ϕ_{2e}) は 2つのグラフ

$$\begin{cases} \phi_2 = 1 - (\phi_1 + f(\phi_1)) = F(\phi_1) & (3) \\ \phi_1 = 1 - (\phi_2 + g(\phi_2)) = G(\phi_2) & (4) \end{cases}$$

の交点として得られる。その定常な位相差が安定か不安定かは (1) と (2) へ

代入し、 ϕ_1 の漸化式

$$\phi_1' = G(F(\phi_1)) \quad (15)$$

の平衡点 (ϕ_{1e}, ϕ_{2e}) での線形化から

$$|G'(\phi_{2e}) \cdot F'(\phi_{1e})| < 1 \quad (16)$$

が安定性の条件であることが判る。平衡点 (ϕ_{1e}, ϕ_{2e}) での曲線の傾きは $F'(\phi_{1e}) = 1/[G'(\phi_{2e})]$ となるので、安定平衡点では $F(\phi_1)$ の傾きが $G(\phi_2)$ に比べてより水平に近くなるので、安定、不安定の判別は図式的に容易に可能である。

4.4. 2振動子の相互作用モデルによる両手タッチングの解析

さて、実際にある被験者(E.M.)のある試行の左右の位相遷移曲線を図30aに、そこから求めた(3)(4)のグラフを図30bに示す。図30bからわかるように4個の平衡点が存在する。平衡点の安定性は(16)式の条件で決まり、この被験者の場合、位相差 $\phi_1 = 0.45, 0.95$ の両手タッチングが安定となり、 $\phi_1 = 0.32, 0.70$ の両手タッチングが不安定となる。各被験者の5試行の位相遷移曲線から、このような安定平衡点、不安定平衡点の分布を調べるために、平衡点の位相差 ϕ_1 が、 $0.95 \leq \phi_1 < 0.05$, $0.05 \leq \phi_1 < 0.15$, $0.15 \leq \phi_1 < 0.25$... $0.85 \leq \phi_1 < 0.95$ の10区間のうちのどれに入っているかを調べる。ここで、 i 番目の被験者について、 $m_s(i)$, $m_u(i)$ を次のように定義する。
 $m_s(i)$ は平衡点の座標が i 番目の区間、すなわち $[i/10 - 0.05, i/10 + 0.05]$ に存在する安定平衡点の個数である。同様に $m_u(i)$ を不安定平衡点の個数とする。

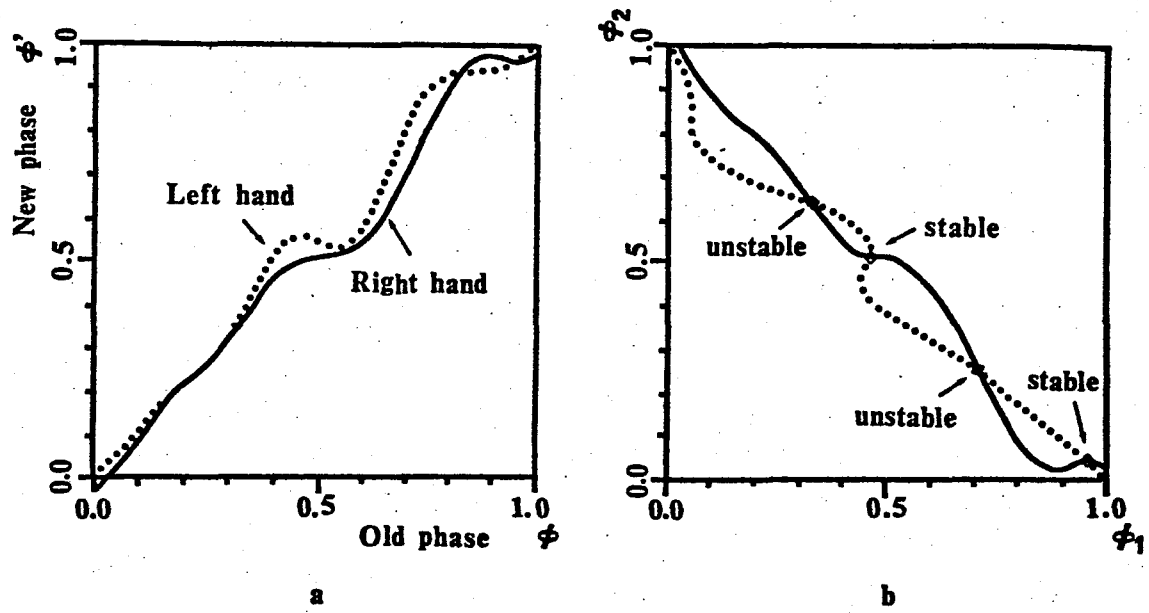


図30. 左右の位相遷移曲線による平衡点の図式解法

各グループごととデータは平均したため、それぞれのグループの安定平衡点、不安定平衡点の分布を次のように求めた。

$$\begin{aligned} m_u(j) &= 1/4 \sum_{\lambda=1}^4 m_{\lambda}(j), \quad n_u(j) = 1/4 \sum_{\lambda=1}^4 n_{\lambda}(j) \\ m_s(j) &= 1/5 \sum_{\lambda=1}^5 m_{\lambda}(j), \quad n_s(j) = 1/5 \sum_{\lambda=1}^5 n_{\lambda}(j) \end{aligned}$$

ただし m_u, n_u はグループ1の被験者の安定平衡点、不安定平衡点の分布を表わす。
 m_s, n_s はグループ2の同様の分布である。

これらの結果を図31に示す。実線は安定平衡点、破線は不安定平衡点の分布を示す。これらの結果より、両方の被験者グループ共に、位相差0.0と0.5に安定平衡点が多く、位相差0.2, 0.3, 0.7および0.8に不安定平衡点が多かった。又、両方の被験者グループのデータを比較してみると、グループ2の被験者では安定平衡点が多い位相差0.0と0.5に集まっているのに、グループ1の被験者ではその分布にかなりのばらつきがみられた。不安定平衡点についても同様の傾向がみられた。これらの結果は、グループ2の被験者のほうがグループ1の被験者に比べて、左右の位相遷移曲線の対称性が良いこと(図24参照)を反映しているのと思われる。位相差0.0と0.5に安定平衡点が多く分布することから、この位相差の両手タッチング(同相リズムハップンと交差リズムハップン)が他の位相差両手タッチングに比べて行なう易いと考えられる。

これらの結果は平衡点の分布のみを示したもので、次に各平衡点での安定性について検討を加える。

平衡点での(1)式、(2)式の線形近似の固有値を調べることにして、その平衡点の安定度、不安定度を調べることにする。たとえば、状態点 ϕ_i が平衡点で微小な擾動を受けた時、すなわち

$$\phi_i = \phi_{ie} + \delta$$

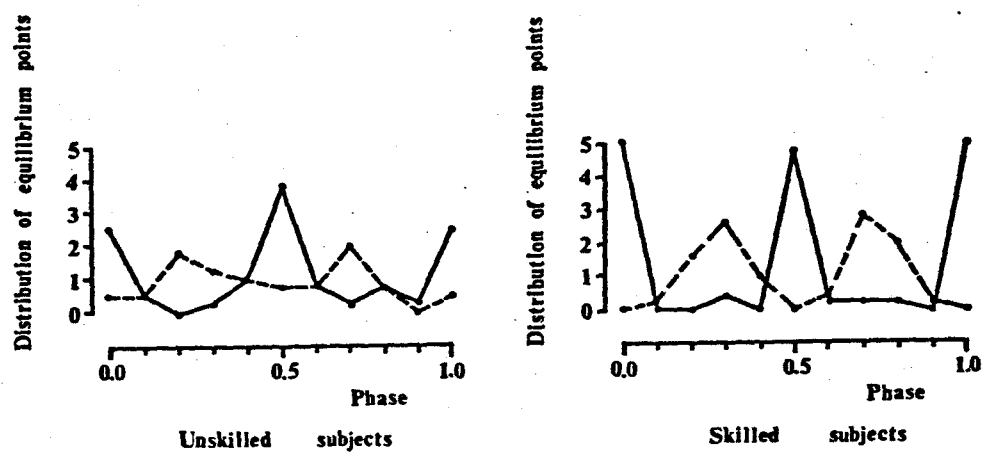


図31. 左右の位相遷移曲線から計算した平衡点の分布
 実線は安定平衡点, 破線は不安定平衡点の分布を示す。
 左図は7°1, 右図は7°2の被験者の結果を示す。

α 時, 2 振動子の相互作用によって、次回 α の ϕ は

$$\phi_1 = \phi_{1e} + (G' \cdot F') \delta$$

のように表わされる。それ故、 $|G' \cdot F'|$ は微小擾動 δ の増幅率を示す指数と考えることが出来る。よって $|G' \cdot F'|$ が 1 より小さければ平衡点は安定で、0 に近づけば近づく程、その安定度が高いと言える。逆に、 $|G' \cdot F'|$ が 1 より大きければ、平衡点は不安定で、大きくなるほどなる程、その不安定度が増加する。もし $|G' \cdot F'|$ が 1 に等しければその平衡点は中立安定である。これらの結果を考慮して、各平衡点の安定度、不安定度を示す評価関数として次の式を定義する。

$$C_i = 10 (|G'(\phi_{2e}) \cdot F'(\phi_{1e})| - 1) \quad (7)$$

ただし、 i は i 番目の平衡点を示す。

(7) 式より、安定平衡点に対しては C_i が負となり、不安定平衡点に対しては C_i が正となることからわかる。すなわち C_i が減少すればする程、安定度が増加し、 C_i が増加すればする程、安定度が減少する。

次に各位相の安定度を評価するために、位相 ϕ の安定度を次のように定義する。

$$C(\phi) = 1/n \sum_{i=1}^n C_i \quad (8)$$

ただし、 n は、その座標が $[\phi - 0.05, \phi + 0.05)$ にある平衡点の個数である。例えば、44-70 10 被験者の場合、位相 0.5 において、安定平衡点 15 個、不安定平衡点 3 個存在する。それ故、位相 0.5 の安定度 $C(0.5)$ は平衡点 15 個 1 個の安定度 C_i から次のように求められる。

$$C(0.5) = 1/18 \sum_{i=1}^{18} C_i$$

ガル-7°1とガル-7°2の被験者に対するこれらの結果を図32の下段に示す。比較のため、図27に示した両手タッピング時にあける系統誤差の標準偏差も図32の上段に示す。

我々は両手タッピングが2つの神経振動子の結合系によって制御されていると考えた。高い安定度を示す位相差での両手タッピングは他の位相差での両手タッピングに比べ、容易に行なえ、かつ精度も高いと考えられる。

これらの結果から位相差0.0の同相リズムパターンと位相差0.5の交替リズムパターンが他の位相差の両手タッピングに比べ、安定なリズムパターンであることが示された。

4.5 考察

両手を使ってのタッピングがどのような神経機構のもとに制御されているかは生理学的には明らかになっていない。前節までに述べたように、我々は2つの振動子の結合系からなるモデルを考へ、左右それぞれに計測された位相差移曲線を使って、このような系の振舞いについて解析してきた。図32に示した結果から、安定度の変化のグラフが標準偏差の変化のグラフとよく一致しているのがわかるであろう。

さらに、2つの被験者ガル-7°の結果を詳細にみると、ガル-7°1の被験者の安定度曲線の最大値がガル-7°2の被験者の最大値より大きく、最小値についても、ガル-7°2の被験者の最小値より小さいのがわかる。

すなわち、ほとんどの全ての位相で、ガル-7°1の被験者の安定度曲線の0レベルからの変位がガル-7°2の被験者のものより大きくなっているのがわかる。

この絶対値は2振動子の相互作用の強さの増加関数になっているので、

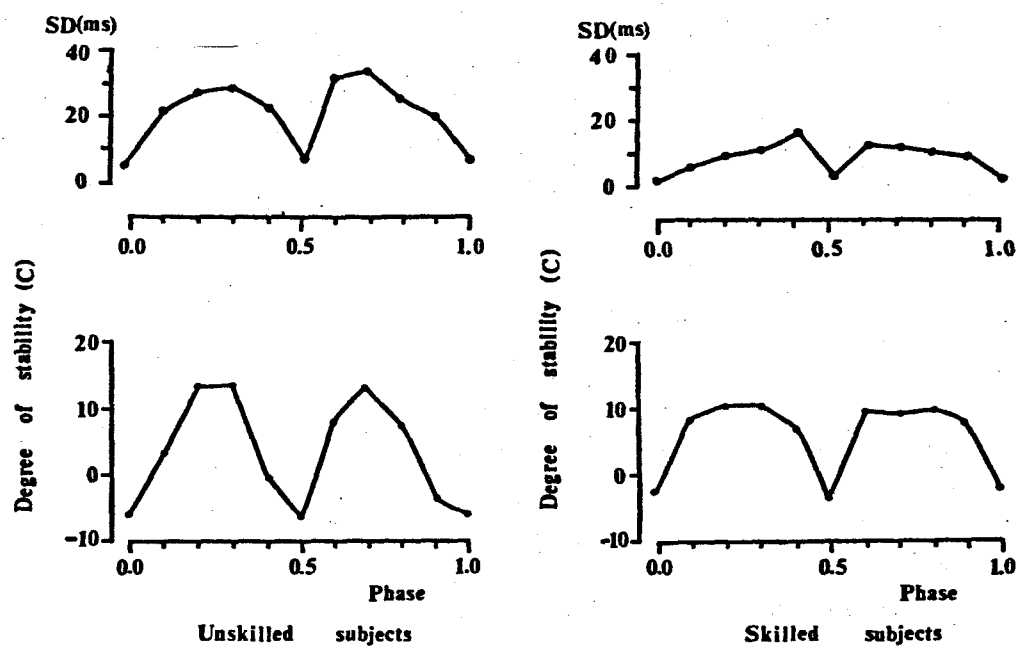


図32. 安定度指数(C)と位相差の標準偏差(SD)の対比
左図は「ル-7°1」、右図は「ル-7°2」の被験者の結果を示す。

これらの結果は、グループ1の被験者において、左右2つの振動子の相互作用がグループ2の被験者における相互作用より強いことを示唆している。

3.4.3 節において、左右の神経回路の相互作用が学習によって弱められ、その結果の位相遷移曲線の0型から1型への変化となることが示された。グループ2の被験者の方が習熟者であるので、2振動子の結合モデルから習熟者の方が左右の相互作用が弱いという傾向が示された。これらの結果より、両手タッピングが左右それぞれのタッピングを制御している神経振動子の結合系によって制御され、これらの振動子の相互作用が学習によって弱められると考えられる。

勿論、両手タッピングの神経支配を考える時、学習を繰り返すにつれて、いろいろな位相差でのタッピングが容易かつ正確にできるようになることから、2振動子の結合モデルよりもさらに上位の神経支配を考慮しなければならないのではないかと考えられる。

4.6 むすび

左右両方の手で一定の位相差のあるタッピングを行なわせると、位相差0.0の同相リズムパターンと位相差0.5の交替リズムパターンのパフォーマンスが良いことが知られた。このモデルとして、左右の振動的な神経回路の相互作用系を考え、それぞれの神経回路で得られた位相遷移曲線から、この系の定常状態における振舞いの解析を行なった。その結果、同相リズムパターンおよび交替リズムパターンが安定になることが多々ことが示された。この結果は、両手タッピングにおけるパフォーマンスの良い位相とよく一致しているので、両手タッピングを制御する神経回路には、左右の片手タッピングを支配する2つの神経振動子の相互作用系が組み込まれていることが示唆された。

第5章 結 言

この章では、この研究によって明らかにされたことを要約して述べる。

第2章では、タッピング時間間隔の分散に注目して、 $200\text{ms} \sim 1000\text{ms}$ の間のタッピング時間間隔の平均値と其の標準偏差の関係に、様相の異なる領域が存在することが明らかにされた。すなわち、標準偏差がタッピングの平均時間間隔の増加に伴ない平方根的に増加する領域($200 \sim 350\text{ms}$)、平均時間間隔の増加に比して標準偏差の増加が著しく小さい、あるいはほぼ一定となる領域($350 \sim 500\text{ms}$)、平均時間間隔の増加に伴ない標準偏差が直線的に増加する領域($500 \sim 1000\text{ms}$)である。次にフィッガー・タッピングの神経機構の概念モデルを提起して、このような時間間隔と標準偏差の関係が2つの制御機構を反映したものであることが示された。一つはフィードフォワード制御機構であり、この機構のもとでは、記憶されている時間間隔自身のばらつきと神経信号伝達時の外乱による時間間隔のばらつきとが加算される結果、時間間隔(T)と標準偏差(SD)の間には $SD = \sqrt{KT} + KT$ の関係の成立することが明らかにされた。一つはフィードバック制御機構であり、この機構のもとでは、記憶されている時間間隔自身のばらつきだけでなく時間間隔のばらつきとなって現れるので $SD = KT$ の関係の成立することが明らかにされた。

さらにタッピング時の脳波の測定から、非常に短い時間間隔(250ms)と長い時間間隔(750ms)とで制御機構の異なることが示唆された。

第3章では、周期的出力を出すための振動的な神経回路の発現として、フィンガー タッピングをとらえ、種々の課題で位相反応実験を行ない、その結果得られた位相遷移曲線から、タッピング運動を制御している神経回路と、課題を制御している神経回路との相互作用について考察された。

課題としては、タッピング運動肢の対側肢のキ-押し応答、発声応答、図形識別の3課題を設定した。その結果、神経回路間の機能的な意味での相互作用のレベルは、キ-押し応答、発声応答、図形識別の順に強いことが明らかにされた。タッピング周期の変化の実験では、周期が短くなるにつれ相互作用が弱くなることが示された。一方、運動負荷の変化によっては相互作用の変化がみられなかった。また、同一課題に対する学習によって位相遷移曲線の0型から1型への移行が示され、学習によって神経回路間の相互作用が弱くなることが明らかにされた。最後に左右の位相遷移曲線の計測から、周期的な出力を出す神経回路の特性は左右対称な構造を有していることが明らかにされた。

第4章では両手による協調的なタッピングが考察された。最初に左右両方の手で一定の位相差のあるタッピングを行なうと、位相差0.0の同相リズムパターンと位相差0.5の交替リズムパターンのパフォーマンスが良いことが明らかにされた。

次にこのモデルとして、左右の振動的な神経回路の相互作用系を考え、左右それぞれで得られた位相遷移曲線を用いて、この系の定常状態における振舞いを解析された。その結果、同相リズムパターンおよび交替リズムパターンが安定になることが示され、両手タッピングを制御する

神経回路には、左右の片手タッピングを支配するそれぞれの神経回路の相互作用系が組み込まれていることが明らかにされた。

謝 辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成において、終始熱心な御指導と御鞭撻を賜った大阪大学基礎工学部生物工学科 鈴木良次教授に心より謝意を表します。また、本論文の作成において有意義な御意見を頂いた大阪大学基礎工学部生物工学科 大沢文夫教授ならびに塚原伸晃教授に心から感謝いたします。

さらに研究を進めるに際し、断えず有益な御討論を頂いた大阪大学基礎工学部生物工学科 佐藤俊輔助教授、末田統助手、小林欣吾助手、真島澄子技官ならびに鈴木研究室の大学院生諸氏に対し深くお礼申し上げます。また、人間科学部 官本健作教授には、脳波測定に際し、貴重な御助言を頂きました。深くお礼申し上げます。

第2章の研究は寺尾豊氏(現 西宮東高校教諭)との共同研究であり、第3章、第4章の研究は大阪大学基礎工学部生物工学科大学院生 川人光男氏との共同研究の成果である。両氏の御尽力に対し深く感謝いたします。

最後に研究上の御便宜を賜わり、御激励下さいました富山大学工学部 八木寛教授、若林嘉一郎教授ならびに富山大学教育学部 杉本啓郎助手に深謝いたします。

参考文献

- Babinski, J.: Sur le rôle du cervelet dans les actes volitionnels nécessitant une succession rapide de mouvements (Diadococinésie). *Rev. neurol.*, 10, 1013-1015 (1902)
- Bartlett, N.R. and Bartlett, S.C.: Synchronization of a motor response with an anticipated sensory event. *The Psychological Review*, 66, 203-218 (1959)
- Bouisset, S. and Lestienne, F.: The organization of a simple voluntary movement as analysed from its kinematic properties. *Brain Research*, 71, 451-457 (1974)
- Daan, S., and Berde, C.: Two coupled oscillators; Simulations of the circadian pacemaker in mammalian activity rhythms. *J. theor. Biol.*, 70, 297-313 (1978)
- Dijkstra, S.J. and Van der Gon, J.J.D.: An analog computer study of fast isolated movements. *Kybernetik*, 12, 102-110 (1973)
- Getty, J.D.: Counting process in human timing. *Perception and Psychophysics*, 20, 191-197 (1976)
- Getty, J.D.: Discrimination of short temporal intervals, A comparison of two models. *Perception and Psychophysics*, 18, 1-8 (1975)
- Grillner, S. and Zangger, P.: On the central generation of locomotion in the low spinal cat. *Exp. Brain Res.*, 34, 241-261 (1979)
- Hillyard, S.A.: Relationships between the contingent negative variation and reaction time. *Physiology and Behavior*, 4, 351-357 (1969)

Hoyle, G.: Exploration of neuronal mechanism underlying behavior in insects, Neural Theory and Modeling. 346-376, Ed. by Reiss, R.F., Stanford University Press, Stanford, California (1964)

伊藤正男：神経中枢の運動制御，真島，猪飼編「生体の運動機構とその制御」pp. 202-227, 杏林書院(1972)

Kawato, M., and Suzuki, R.: Biological oscillators can be stopped. Topological study of a phase response curve. Biological Cybernetics, 30, 241-248 (1978)

Keele, S.W.: Movement control in skilled motor performance. Psychological Bulletin, 70, 387-403 (1968)

Keele, S.W. and Posner, M.L.: Processing of visual feedback in rapid movements. J. Exp. Psychology, 77, 155-158 (1968)

Kennedy, D. and Davis, W.J.: Organization of invertebrate motor systems. In "Handbook of physiology. vol.1" Ed. by Kandel, E.R. pp. 1023-1087, Bethesda, Maryland, American Physiological Society (1977)

Luria, A.R.: Frontal lobe syndromes. In "Handbook of Clinical Neurology, vol.2" Eds. by Vinken, P.J. and Bruyn, G.W. pp. 725-757, North-Holland, Amsterdam (1969)

McAdam, D.W. and Seales, D.M.: Bereitschaftspotential enhancement with increased level of motivation. Electroencephalogram and clinical Neurophysiology, 27, 73-75 (1969)

Michon, J.A.: Studies on subjective duration. 1. Differential sensitivity in the perception of repeated temporal intervals. Acta Psychologica, 22, 441-450 (1964)

Michon, J.A.: Tapping regularity as a measure of perceptual motor load. Ergonomics, 9, 401-412 (1966)

Michon, J.A. and Van der Valk, N.J.L.: A dynamic model of timing behavior. *Acta Psychologica*, 27, 204-212 (1967)

Michon, J.A.: Programs and "Programs" for sequential patterns in motor behavior. *Brain Research*, 71, 413-424 (1974)

中村隆一：小脳疾患・パーキンソニズムの反復交互動作障害，
神経進歩 第19巻4号，pp 712-724 (1975)

Pearson, K.G. and Iles, J.G.: Nervous mechanisms underlying inter-segmental coordination of leg movements during walking in the cockroach. *J. Exp. Biol.*, 58, 725-744 (1973)

Perkel, D.H., Schulman, J.H., Bulloch, T.H., Moore, G.P. and Segundo, H.P.: Pacemaker neurons; Effect of regularly spaced synaptic input. *Science* 145, 61-63 (1964)

Pinsker, H.M.: Aplysia bursting neurons as endogeneous oscillators. 1. Phase response curves for pulsed inhibitory synaptic input. *J. Neurophysiol.* 40, 527-543 (1977)

Pittendrigh, C.S. and Bruce, V.G.: An oscillator model for biological clocks. In "Rhythmic and synthetic processes in growth" Ed. by Rudnick, D. pp. 75-109, Princeton, N.J., Princeton University Press (1957)

Pittendrigh, C.S.: Circadian oscillations in cells and the circadian organization of multicellular systems. In "The Neurosciences; Third study program." Eds. by Schmitt, F.O. and Worden, F.G. pp. 437-458, The MIT Press (1974)

Reiss, R.F.: A theory and simulation of rhythmic behavior due to reciprocal inhibition in small nerve nets. *Proc. AFIPS Spring Joint Computer Conference*, 171-193 (1962)

- Shik, M.L. and Orlovsky, G.N.: Neurophysiology of locomotor automatism. *Physiological Reviews* 56, 465-501 (1976)
- Stark, L.: Neurological control systems, *Studies in bioengineering*. Plenum Press, New York (1968)
- Stein, P.S.G.: Neural control of interappendage phase during locomotion. *Amer. Zool.*, 14, 1003-1016 (1974)
- Stent, G.S., Kristan, W.B., Friesen, W.O., Ort, C.A., Poon, M. and Calabrese, R.L.: Neural generation of the leech swimming movement. *Science*, vol. 200, 23, 1348-1357 (1978)

寺尾 豊, 山西 潤一, 鈴木 良次: タッピングのタイミング機構について,
第16回日本ME学会大会論文集, 2a-c-3 (1977)

- Treisman, M.: Temporal discrimination and the indifference interval; Implications for a model of the "Internal clock". *Psychological Monographs* 576, 1-31 (1963)

塚原 進: 人の動作におけるフィードバックとフィードフォワード,
真島, 猪飼 編「生体の運動機構とその制御」pp.231-251.
杏林書院 (1972)

- Van der Gon, J.J.D. and Thuring, J.Ph.: The guiding of human writing movements. *Kybernetik*, 2, 4, 145-148 (1965)
- Walter, W.G., Cooper, R., Aldridge, V.J., McCallum, W.C. and Winter, A.L.: Contingent negative variation; An electric sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature*, 203, 380-384 (1964)
- Wertham, F.I.: A new sign of cerebellar disease. *J. nerv. ment. Dis.* 69, 486-493 (1929)

Winfree, A.T.: Integrated view of resetting a circadian clock.
J. theor. Biol., 28, 327-374 (1970)

Winfree, A.T.: Resetting the amplitude of Drosophila's circadian chronometer. J. Comp. Physiol., 85, 105-140 (1973)

Winfree, A.T.: Resetting biological clocks. Physics Today 28, 34-39 (1975)

Winfree, A.T.: Phase control of neural pacemakers. Science 197, 761-763 (1977)

Wing, A.M. and Kristofferson, A.B.: The timing of interresponse intervals. Perception and Psychophysics, 13, 455-460 (1973)

Wing, A.M. and Kristofferson, A.B.: Response delay and the timing of discrete motor responses. Perception and Psychophysics, 14, 5-12 (1973)

山西潤一, 川人光男, 鈴木良次: 位相反応曲線によるフィンガー
タッピングの神経機構の解析, 第17回日本ME学会大会
論文集, 2-E-5 (1978)

山西潤一, 川人光男, 鈴木良次: ヒトのフィンガータッピングの位相
遷移曲線の計測, 日本ME学会誌 医用電子と生体工学,
第17巻 4号, 271-277 (1979)

Yamanishi, J., Kawato, M. and Suzuki, R.: Studies on human finger tapping neural networks by phase transition curves. Biological Cybernetics. 33, 199-208 (1979)

Yamanishi, J., Kawato, M. and Suzuki, R.: Two coupled oscillators as a model for the coordinated finger tapping by both hands. Biological Cybernetics. (1980) in Press

山西程一, 川人光男, 鈴木良次 : ヒトの両手タッピングの位相遷移曲線
による解析. 日本ME学会誌 医用電子と生体工学 (投稿中)

Yamanishi, J., Kawato, M. and Suzuki, R.: Studies on the coordinated
finger tapping by both hands with phase transition curves.
Neuroscience Letters, Supplement (1980) in Press