前腕部屈伸運動の再現性について

永 田 晟* 北 本 拓** 室 増 男***

A STUDY ABOUT MOTOR-RETENTION ON THE FLEXION AND EXTENSION OF THE FORE-ARM

AKIRA NAGATA, HIRAKU KITAMOTO AND MASUO MURO

The purpose of this study is to clarify the characteristics of the short-term motor-memory and to analyze various loads effect of motor-retention in the exercise of flexion and extension of the fore-arm. As the means of analysis, correlation function between command and response waves was used efficiently and furthermore the electric computer system helped to investigate motor-retention. Many experimental conditions were decided to 0.1-0.8 Hz of one's exercise rhythm, 0-0.5 kg of loads attached to the fore-arm, and 3-6 cm of exercise displacement. Three healthy persons were employed as subjects.

As the results of this study, following points were shown clearly.

(1) After the fore-arm was exercised to the flexuous and extensional directions for 25 sec., response waves of motor-retention were recorded to Data-recorders for 60 sec.. Quantitative analysis of this motor-retention became effective by using the method of correlation function.

(2) About exercise rhythm (frequency), the rapidity of fore-arm exercises in the retentive learning was 0.05 Hz slower than that of these exercises in the beginning learning.

(3) About the transfer gain of these exercises between command and response waves, two motor-gains of the retentive and beginning learning were shown the same values only when these exercises were practised at experimental conditions of 0.8 Hz frequency and 0.5 kg load.

(4) Motor-retention rate, that was calculated from error values of performance, was dropped down such as about 0.3 rate in proportion to the time elapsed of recollection and also to rhythm-slowness of the command frequency.

(5) Optimal exercise displacement of the fore-arm was proved to the median of 6 and 3 cm in order to reappear the length memorized by the beginning learning.

(6) Discharged voltages of the integrated EMG in Flexor and Extensor Carpi Radialis were recorded lower at the time, when motor-retention was displayed rightly and exactly.

(7) Psychological reminiscence and this motor-retention were shown quite opposite results in the learning points of reaction time, rhythm, strength and displacement, because the former was dependent upon the memory in the central nervous system (brain cortex), while the latter relied upon the memory in the peripheral-nervous system (receptor).

(J. Physical Fitness Japan 1976, 25 : 71~77)

I. 結 言

運動学習の上達や熟練度を評価、考察する時に一度学習した事項を上手に再現する能力、即ち一

種の記憶状態の濃淡を利用することが多い。運動学習に記憶の占める範囲は大きく、習熟過程における重要なファクターを示して習熟の遅速にも大きな影響をおよぼしている。

* 東京都立大学理学部体育学教室 Tokyo Metropolitan Univ.

** 国学院大学文学部体育研究室 Kokugakuin Univ.

*** 東京都立墨田川高等学校 Sumidagawa High School

Fig. 3 Block diagram of analysis

データ・レコーダに集録し、そのデータを A-D 変換する。さらに時間差 τ の関数である両者の相関関数（相互相関関数） $\phi_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt$ をフーリエ変換した。すなわち周波数領域から、振幅を中心にクロス・スペクトラム密度

$$\phi_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{xy}(\tau) e^{-2\pi j f \tau} d\tau$$
 を求めた。

x: 目標(入力)波形

y: 屈伸運動(出力)波形

t: 測定時間

τ : サンプリングタイム

T: 最大測定時間

f: 周波数

この値を D-A 変換して、XY レコーダに書かせた。そのクロス・スペクトラム密度（振幅）が最高に表示された時の周波数を算出し、これを良好な再現状態の運動リズムとした。（第 4 図参照）また、その時の振幅値を生体が発揮した再現状態の利得（ゲイン）とした（第 5 図参照）。

原学習時と再学習時のそれぞれにおける目標波形に対する屈伸運動波形のずれを偏差量として算出し、原学習時の偏差量と再学習時の偏差量との比率を把持率²⁹⁾（Retention Rate）とした。

$$R.R. = \frac{EL - ER}{EL} \times 100$$

EL: 原学習時の偏差量

ER: 再学習時の偏差量

上式を求め、運動の正確な成績の面から運動パターンの再現状態を検討した（第 6 図参照）。

III. 結 果

1. クロス・スペクトラムからみた再現状態の変化

1) 再学習時の運動周波数

第 4 図は、目標周波数に対する再現状態をクロス・スペクトラム密度振幅が最高に表現された時の周波数からまとめたものである（図は 3 人の被検者の代表的な例として示した）。

Fig. 4 Comparison with motor-rhythm in the case of the beginning learning and retention

- ; motor-rhythm in the beginning learning
- ; motor-rhythm in the start point of retention
- △; motor-rhythm in the last point of retention

vertical axis; frequency in the subjects response

transversal axis; frequency in the command

屈伸運動時の負荷量や運動距離の各種の実験条件の変化に対して、原学習時では、目標波形の周波数に屈伸運動波形の周波数が一致する傾向があり、0.1, 0.2, 0.4, 0.8Hz とともに、正確な運動がみられた。しかし、これに対して、再学習時では、0~20sec と 41~61sec の両時間帯において、目標周波数より 0.05Hz（約 200msec）遅いリズムの再現となり、時間経過とともに徐々に遅く現象がみられた。また、目標運動リズムが早く

なるにしたがって, そのリズムに近い屈伸運動リズムが再現された。

2) 再学習時の運動振幅(密度)

第5図は, クロス・スペクトラム密度(振幅)の最高値を各目標周波数ごとにまとめたものである。原学習時, 再学習時ともに運動距離が3cmから6cmと2倍になると, 振幅の再現状態に約5dBの増加がみられた。0.8Hzの早い運動リズムになると, 原学習時に近い振幅の再現がみられた。

Fig. 5 Changes of motor-gain (amplitude) in the beginning learning and retention

2. 各種実験条件による再現状態の変化

1) 負荷量の変化

第6図が運動距離および負荷をパラメータとして, 屈伸運動時の目標値に対する偏差量をまとめたもので, 把持率を時間経過(0~20sec, 21~40sec, 41~60sec)ごとにプロットしたものである。負荷量が無い時と有る時とを比較すると, 有る時の方が約2%の割合で再現の増加がみられた。

2) 運動距離(屈伸角度)の変化

Fig. 6 Changes of retention rate according to the time elapsed, command frequency, loads and exercise displacement

第6図の結果のように, 前腕屈伸角度の変化によって, 再現状態に変化がみられた。再学習時に運動距離が6cmから3cmと $\frac{1}{2}$ になると把持率は, 約1.5倍の向上がみられた。

Fig. 7 Changes of the integrated EMG in the beginning learning and retention

3. 時間経過による再現状態の変化

第6図の結果のように、各種実験条件（運動リズム、距離、負荷量）において、時間経過とともに、把持率の比例的な減少がみられた。しかし、早い運動リズムの場合は、時間が経過しても把持率の顕著な減少はみられなかった。

4. 筋放電量の再現状態の変化

第7図は、前腕部の短橈側手根伸筋と横側手根屈筋の積分筋放電量を原学習時と再学習時の時間経過（0～20sec, 41～60sec）ごとにまとめたものである。縦軸には、運動負荷量、距離、目標波形の周波数等の実験条件をプロットした。横軸には、積分筋放電量をプロットした。すべての実験条件で、伸筋の放電量が屈筋の約1.5～2倍の値を示した。目標波形の周波数（運動リズム）が早くなるとともに、屈筋の放電量は比例的な増加がみられた。特に原学習時と再学習時の差は、放電量に関して、有意な差がみられなかった。

IV. 考 察

1. 屈伸運動成績とパターンからみた再現性について

60秒間という短時間後の再生運動にもかかわらず、原学習時より、再学習時の再現パターンでは、約15%の把持率の低下がみられた。これは、視覚情報の有無によるフィードバック入力の影響が大きいと思われる。そして、入力だけをブラウン管上にみせ、人間の制御結果を全然表示しないオープン・ループ・トラッキングの場合と類似した結果を示した。これらの結果は、人間内部のフィードバック機構による制御が主に関与¹⁵⁾し、末梢系の諸器官にショート・ターム・メモリーの存在を知る指標になるのではないかと考えられる。今回の実験のショート・ターム・メモリーに対して、従来の記憶、再生実験のロング・ターム・メモリーは、より如実に末梢系よりも中枢系の作用が問題とされていた。

運動リズム（目標周波数）が早くなるとともに、比例的に再現状態が向上している。遅いリズムの0.1Hzと速い0.8Hzの場合を比較すると、約2倍の把持率の増加がみられた。他方、運動成績の面では、永田、北本¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾によれば、人間の屈伸運動調節では、0.8Hzのリズムが臨界追従周波数であると報告している。本論文の主題となる再現

性は、速い運動リズムは、タイミング制御に近くなり、記憶による制御運動よりも、筋反射的²⁴⁾²⁵⁾な運動制御でおこなわれている結果²⁹⁾と考えられる。また、屈曲、伸展の速度制御には、筋紡錘の求心性神経GⅡが有効に働いているという報告¹⁾からも、速い運動リズムに対する反射的な回路が構成され、末梢部のフィードバック・ループによる適確な運動が可能となり⁹⁾、学習の再現性の向上がみられるようになる。こうした背景が本論文の0.4Hzと0.8Hzの運動リズムに優れた再現状態を示したことを裏付けるものである。

運動距離が2倍になると、生体の運動利得（ゲイン、または運動機能の高まり）の増加が倍増した。これは、筋肉系の高まりが、運動距離の増大とともに著明になるものと考えられる。運動移動量や強度と生体の利得変化は、かなり比例的な関係をもつが、今回の実験では、必ずしも直線的な比例関係ではなかった。運動リズム（目標周波数）の再現状態に比較して、運動利得の再現性は、かなり良好な一致の状態を示した。特に、0.5kgの負荷の場合、原学習時と変わらぬ生体の利得値（-10～-8 dB）を示した。これは、リズム的な速度の再現よりも、量的な振幅の再現性が高く、記憶の持続を示すものである。このことは、ショート・ターム・メモリー時の筋感覚系を中心とした末梢系の記憶にも関係すると思われる。

0.5kgの負荷を与えた場合の再現性は、無負荷の状態に比らべて約2%の増加となった。これは、把持率としての値には、統計上の有意差はなくても、再学習初期において、若干の向上がみられたことを示すもので、0.5kgという負荷、即ち重量によって再現性が良くなることは、筋の重量感覚系が関与していることを裏付けるものである。筋感覚系に負荷量が作用し⁷⁾³¹⁾、中枢での記憶素子と合わせて、再現状態の改善を促したものと考えられる。

短い運動距離の3cmに有効な再現状態がみられた。この現象は、随意運動の再現特性では、速度が速いと変位も大きく、速度が遅いと変位が小さくなるといわれ、本論文でも前述の運動リズム再現特性とともに確認されている。また、視覚情報を切断すると生体の変位量が減少する¹⁹⁾特徴もみられた。運動距離の減少は、位置制御システ

ムの問題であり, 運動制御の意識レベル下における閉ループ・サーボシステムとして働くようである。このシステムの大きなフィードバックは, 主に関節受容器からの情報に基づき, 関節の固有器官が運動距離の知覚と学習過程に決定的な役割を果たしている²²⁾。そのため, この屈伸運動の再現性には, より一層, 末梢系の器官が関係していると思われる。

ショート・ターム・メモリーにおける心理学的な学習実験では, 学習直後よりも一定時間経過したときの方に再現性が向上している。特に分散的練習よりも集中的練習においてレミニセンスが生じやすいという報告²⁰⁾³⁰⁾がある。しかし, 本実験では集中的練習であるにもかかわらず, レミニセンスとは反対の様相を呈した。すなわち中枢, あるいは, それに類似した記憶が十分になされなかったことを示しているものと推察される。このモデル実験においては, 従来の定義による「記憶」ではなく, 末梢感覚系への表面的刺激の結果である「一時的な記憶」¹⁵⁾が推察される。長時間の記憶として残るためには, 原学習の時間を 25sec から 2~3 倍に延ばさねばならないと思われる。

2. 生体反応からみた再現状態

再現状態の優れた時に, 積分筋放電量の減少がみられた。これは, 屈伸運動の効果器としての筋肉系が低い興奮状態で運動を可能にしていることを示し, 熟練者と未熟練者を比較した習熟過程において同一筋群からの筋放電量が減少するという報告³³⁾と同じ結果と推察される。再現性が優れていることは, 筋肉系の活動を低くおさえ, 安定な状態で一定の繰り返し運動を連続させることを意味する。そして, 一種のパターン認識やモデル制御に移行した運動パターンを示すものである。

また, 運動リズムの増加とともに, 屈筋の筋放電量に比例的な増大がみられたが, これは, 良好な再現状態と屈筋の放電量間に相関があるといえる。屈伸運動の筋の協調状態は, 屈筋と伸筋の拮抗様相から評価されるが, 永田, 北本の報告¹⁷⁾¹⁹⁾にもあるように, 前腕部の運動での筋放電は, 伸筋が屈筋よりも約 2 倍の放電量を示し, 今回の実験でも同じ結果が示された。

V. 要 約

前腕部の屈伸運動による原学習をおこなった後, ショート・タームな運動の再現学習を実施し, 前腕部(末梢部)を中心とする運動再現特性の基礎資料を得た。運動リズム, 負荷量, 運動距離等の条件変化による再現状態への影響を検討し, データの相関関数的解析方法によって以下のような結果を得た。

1. 前腕部の屈伸運動の再現状態の評価には, 原学習時と再学習時の運動パターンとの相関関数的手法が有効で, 定量的に解析可能となった。
2. 末梢部を中心とした再学習でのショート・ターム・メモリーは心理学的研究の言語, 記憶学習におけるロング・ターム・メモリー時に生じるレミニセンスと反対の様相である。
3. 運動リズムの再現には, 目標リズムより遅いリズム, 即ち全周波数時の値を平均して約 0.05 Hz のおくれを生じた。
4. 再学習時の運動利得は, 0.8Hz の速い運動リズムや, 0.5kg の負荷が与えられた時に, 原学習時と変らぬ利得を示し, 運動利得の良好な再現性を示した。
5. 把持率(偏差率)よりみた再現状態は, 再現経過時間とともに, その率は減少し, 正確性が低くなった。また, 再学習時の運動リズムが 0.1 Hz から 0.8Hz と速くなるに従って, 目標リズムに合致した再現運動リズムがあらわれ, 適確な再現状態がみられた。
6. 屈伸運動距離を短くすると再現性は, 向上するが, 記憶上の至適な距離は, 6 cm と 3 cm のほぼ中間と考えられた。
7. 身体運動の再現性について運動上のショート・ターム・メモリーの立場から考察を加え, 現場への応用の基礎資料を得た。

(受付 昭和 51 年 5 月 11 日)

参 考 文 献

- 1) 赤沢堅造, 梶山三郎, 藤井克彦(1973): バイオメカニズム 2, 初版, 神経一筋制御系のシミュレーション, 東京大学出版会, 東京, 71-81
- 2) Bunch, M.E., (1941): The measurement of retention by the relearning method, Psychol. Rev., 48, 450-456.
- 3) Bunch, M.E., (1941): A comparison of retention and transfer of training from similar

- material after relatively long intervals of time, *J. comp. Psychol.*, **32**, 217-231.
- 4) George, F.H., (1952) : Errors of visual recognition, *J. exp. Psychol.*, **43**, 202-206.
 - 5) Gordon, H. B., (1974) : 学習の理論 (下), 2版, 学習と保持の基本的条件, 培風館 東京, 464-496.
 - 6) 芳賀 純(1969) : 講座心理学, 第7巻, 初版, 保持と忘却, 東京大学出版会, 東京, 122-140.
 - 7) 畠山一平, 永田 晟, 三枝木泰文(1971) : 筋固有反射系の自動制御理論的解析, 計測自動制御学会論文集, **8**, 389-397.
 - 8) 石井 泰(1973) : 測定値の統計的处理, 3版, 信号処理, 電気学会, 東京, 83-155.
 - 9) 加藤一郎, 浜田利満, 安藤邦明, 宇田川義明(1973) : バイオメカニズム 2, 初版, 人間機械システムにおける筋電情報と電気刺激フィードバック, 東京大学出版会, 東京, 236-242.
 - 10) Katona, G., (1940) : *Organizing and memorizing*, New-York Columbia University Press, 18-20.
 - 11) Kimble, G.A., and Bilodeau, E.A., (1949) : Work and rest as variables in cyclical motor learning, *J. exp. Psychol.*, **39**, 150-157.
 - 12) Luch, C.H., (1922) : The condition of retention, *Psychol. Monogr.*, 31-142.
 - 13) Mary, L. N., (1968) : Short-term memory trace decay in kinesthetically monitored force reproduction, *The Research Quarterly*, **39**, 640-646.
 - 14) Merrill, J. M., (1971) : Effects of overlearning on the retention of a gross motor skill, *The Research Quarterly*, **42**, 60-69.
 - 15) 三木英雄, 原 敬, 橋本考之, 酒井俊司, (1972) : 予知追跡制御における制御者の制御特性に関する一考察, 計測自動制御学会論文集, **8**, 406-413.
 - 16) 永田 晟, 北本 拓(1974) : 脚筋力による持続追従運動の解析, 体力科学, **23**, 134-143.
 - 17) 永田 晟, 北本 拓(1975) : 身体運動の外乱予測能力に関する基礎的研究, 体育学研究, **20**, 269-279.
 - 18) 永田 晟, 北本 拓(1975) : 各種身体諸運動による前腕部周波数応答特性の変化, 人間工学, **11**, 97-98.
 - 19) 永田 晟(1973) : 巧緻性の基礎的研究, 一手指描写運動の多変量相関分析一, 日本体育協会スポーツ科学研究報告, **IV**, 24-33.
 - 20) Peacock, J.B., (1972) : A method for the investigation of interpolated information and time effects in short term retention, *Ergonomics*, **15**, 701-704.
 - 21) Postman, L., and Phillips, L.W. (1963) : The effects of variable context on the acquisition and retention of paired associates, *Amer. J. Psychol.*, **66**, 511-519.
 - 22) Radonjic, D., and Long, C., (1973) : 続人間の手足の制御, 初版, なぜ筋電制御はむずかしいか, 学献社, 東京, 54-63.
 - 23) Richard, A. S., and Kenneth, M. A., (1970) : Intertrial intervals and motor short term memory, *The Research Quarterly*, **41**, 432-438.
 - 24) 島村宗夫(1974) : 運動反射, 臨床生理, **4**, 178-183.
 - 25) 島村宗夫(1974) : 反射の生理, 脳と神経, **26**, 33-41.
 - 26) 管 弘之(1968) : 記憶された随意運動の再現特性について, 人間工学, **4**, 237-238.
 - 27) Tomlinson, R.W. (1972) : Control impedance and precision of feedback as parameters in sensorimotor learning, *Ergonomics*, **15**, 33-47.
 - 28) 土屋和夫(1972) : 生体の運動機構とその制御, 初版, 追跡動作の分析, 杏林書院, 東京, 303-325.
 - 29) 梅本堯夫(1973) : 心理学研究法, 第4巻, 初版, 言語学習および記憶, 東京大学出版会, 東京, 105-157.
 - 30) 梅津八三, 宮城音弥, 相良守次, 依田 新, (1957) : 心理学事典, 初版, 平凡社, 東京, 671.
 - 31) Voduvnic, L., Kralz, A., Kelsim, D., and Brovsak, M., (1973) : 人間の手足の制御, 3版, 電気刺激による筋運動のシミュレーション, 学献社, 東京, 14-29.
 - 32) 八木 晃(1972) : 現代心理学入門 第8巻, 5版, 想起と忘却, 岩波書店, 東京, 125-138.
 - 33) 山下謙智, 高木公三郎, 岡本 勉(1971) : 鉄棒運動における順手車輪の筋電図学的研究, 体育学研究, **15**, 93-102.