運動学習における中枢プログラムおよびパラメータの変換について

乾 信 之

CHANGES IN CENTRAL PROGRAM AND STRUCTURAL PARAMETER IN MOTOR LEARNING

NOBUYUKI INUI

Abstract

The purpose of this study is to examine how human performance organized by motor learning is reorganized through changes in the central program and structural parameter by using a tracking task of serial pattern.

On the one hand, the subjects who had to adjust themselves to the changed central program (program group) tried to execute the corresponding switch responses coincident with light onsets in 20 trials in the first half and tried to complete perfectly with anticipatory response in 20 trials in the second half. On the other hand, the subjects who had to adjust themselves to the changed structural parameter (parameter group) tried to execute the corresponding switch responses coincident with light onsets in 40 trials. The serial patterns which subjects tracked were 352415 in the program group and 352415 in the first half of the parameter group and 352451 in the second half of that group. The stimulus interval (100 ms) and the interstimulus interval (400 ms) were always constant. The subjects were 20 right-handed female students, being randomly assigned to the 2 groups with 10 subjects respectively.

In both groups, the proportion of correct responses amounted approximately to 70~90% of the total response in the first half. Both groups increased the correct and anticipatory responses in the final phase of the first half. The program group, however, remarkably decreased the correct responses (7.03%) and markedly increased the anticipatory responses (42.16%) in the final phase of the second half. The program group in the first half was different from the one in the second half in structuring its own performance. In the parameter group, on the other hand, the performance in the final phase of the second half (anticipatory response : 25.00%) was higher than that of the first half (anticipatory response : 4.46%) although the performance without anticipatory response in the initial phase of the second half was lower than the one in the final phase of the first half. This finding was taken as an order through fluctuation.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1989, 38 : 133~138)

key words : motor learning, central program, structural parameter, anticipatory response.

I. 緒 言

Kelso^{9,10)} はヒトに両側の指および手を位相を異に内転と外転を繰り返させ、この運動の頻度の増加を要求すると、ある臨界頻度で突然に同位相の運動に移行することを見出した。また Hoyt and Taylor⁷⁾ はウマの gait shift の中に相転移に含まれる現象を報告している。このように動作様

式が突然に変換されていく過程は、現在の神経生理学²⁾ のみでは十分に説明できない。

運動学習を適応系として捉えた時、高原¹³⁾の調整的および自己組織的適応の概念は重要である。調整的適応とはメタ構造は変化させないが、構造を規定するパラメータ(構造パラメータ)を調節することによる環境適応であり、自己組織的適応とはメタ構造すらも変化させる環境適応であるとい

う。つまり前者は予想範囲内の環境変化に対して現状維持的であり、主としてネガティブ・フィードバック系によって制御されている。一方、後者は予想を越えた環境入力変化に対して、既存の組織化された行動パターンを変化させた方（メタ構造の変化）が、より高次の運動課題を解決するのに有効な場合の制御過程であり、ポジティブ・フィードバック系が重要な役割を果たすものである。

このような側面から、運動学習における制御系の変化を捉えようとする、従来の運動学習の測定である正確性（エラー反応）および速度（反応時間、動作時間）の概念では、充分理解できない。そこで調枝^{3,4)}は4つのパフォーマンス測定（正反応、見越反応、誤反応、無反応）を用いて、適応系としての運動学習を検索している。

したがって、本研究では運動学習によって組織化されたパフォーマンスが、中枢プログラムの変更（メタ構造の変化）および構造パラメータの変換に伴って、どのように再組織化するかを検討した。

II. 方 法

実験には図1に示した竹井機器（TKK）製の系列反応装置を用いた⁶⁾。被験者の前方50cmの位置に5個の発光ダイオード赤色光刺激を5cm間隔で並列し、これに対応して被験者の手元に5個のタッチスイッチが並べられた。系列パターン、刺激間隔および刺激点灯時間は、調整器を介してタイムプログラマー（TKK, No. 419）によってプログラム制御され、反応結果はスポーツプリンタ（SEIKO, CT-916）を改造したものを用いて記録した。

被験者は大学生女子（18～21才）20名であり、“プログラム群”および“パラメータ群”の2群に各10名をランダムに割り当てた。

プログラム群は系列パターンの追従課題遂行中に、中枢プログラムの変更を強いられた。この群は352415を1系列1試行とした系列パターンを40試行追従した。その際、前半の20試行は刺激の点灯と同時に反応し、ブザー音を契機に後半の20試行は完全見越反応で応じるように教示した。

一方、パラメータ群は追従課題遂行中に構造パ

Fig. 1. Experimental situations and four performance measures. The stimuli were five luminous diodes covered with red lens caps and mounted five cm apart on a vertical display board. Five touch switches were placed beneath the lights. Stimulus presentation was controlled by a time programmer and the result of response was recorded by a printer.

ラメータの変換を要求された。この実験事態における構造パラメータの変換とは、系列パターンの一部の変化および刺激間間隔の変化を差し、本実験では前者を用いた。したがって、この群は前半の20試行はプログラム群と同一の系列パターン(352415)を追従し、後半の20試行は系列位置を1部変更した352451を1系列1試行とした系列パターンを追従した。その際、パラメータ群は前半と後半共に刺激の点灯と同時に反応するように教示された。

刺激点灯時間は100 msであり、刺激間間隔は400 msとした。

III. 結 果

図2は4つの測度の割合から、パラメータ群およびプログラム群のパフォーマンスの変化を示した。上の2組の帯グラフはパラメータ群の結果であり、下の2組のものはプログラム群の結果である。両群共に左側の1組の帯グラフの上部は、第1試行から第3試行までの結果(前半の初期段階)であり、下部は第18試行から第20試行までの結果(前半の終期段階)である。また右側の1組の帯グラフの上部は、第21試行から第23試行までの結果(後半の初期段階)であり、下部は第38試行から第40試行までの結果(後半の終期段階)である。各帯グラフの右側の白い部分は正反応の割合、黒い

部分は見越反応の割合、横線の部分は誤反応の割合、そして左側の白い部分は無反応の割合を表した。

パラメータ群の前半では、初期・終期共に正反応が約91%であり、また無反応が約1.8%であった。一方、前半の初期から終期にかけて、誤反応は5.26%から2.67%まで減少し、その減少分がほぼ見越反応の増加分に相当し、見越反応は1.75%から4.46%まで増加した。

パラメータ群の後半では系列パターンの位置の一部を逆転させること(352415→352451)によって、被験者に構造パラメータの変換を求めた。その結果、前半の終期段階に4.46%であった見越反応がなくなり、正反応が約3%増加して94.60%に達し、無反応が約1%増加して2.70%になった。しかし、後半の終期段階には見越反応が25.00%に達し、その分だけ正反応が減少して70.53%になった。その際、誤反応は3.57%であり、無反応は0.90%であり、あまり変化がなかった。

プログラム群の前半では、正反応が約73%で変化しなかった。一方初期から終期にかけて、誤反応と無反応が減少した分だけ、見越反応が0.45%から22.22%まで増加した。

プログラム群の後半では系列パターンは同一であるが、刺激点灯と同時に反応することから完全見越反応で応ずることへ変更した。その結果、後

Fig. 2. Percentages of four performance measures in the parameter (top) and program (bottom) groups. The left histogram showed the percentage in the first half and the right one in the second half. The top histogram in a pair of histogram showed the percentage in the initial phase and the bottom one in the final phase. The correct, anticipatory, error and omission responses were indicated from right in each histogram. Abbreviation, initial: initial phase, final: final phase.

半の初期段階では正反応を 50.26% まで減少し、見越反応を 37.96% まで増加した。さらに終期段階では見越反応が 42.16% に達し、無反応が 46.48% に著増した。一方正反応は 7.03% まで激減し、その減少分は見越反応と無反応の増加に相当した。

次に平均反応時間を指標として、系列パターンの位置効果を検討した。

図 3 の上部にはパラメータ群の結果を示した。縦軸には反応時間を表し、横軸には系列パターンの位置を表した。矢印の左側に前半の結果を示し、右側に後半の結果を示した。そして黒丸は初期段階の反応時間を表し、白丸は終期段階のものを表した。前半の系列パターンは 352415 であり、

後半のそれは 352451 であり、いずれも構造化されたパターンが含まれていないために、系列パターンに依存した反応様式はみられなかった。前半の初期には約 280 ms から 420 ms の間に分布していたが、終期には約 200 ms から 250 ms に分布し、試行を重ねるに伴って反応時間が均一化した。後半の初期には、系列パターンの位置が変更されたことに伴って、反応時間の分布する範囲が拡大し、約 235 ms から 410 ms に分布した。しかし後半の終期には反応時間が均一になり、しかも反応時間は約 100~130 ms に分布し、前半の終期よりも反応時間が短縮された。

図 3 の下部にプログラム群の結果を示した。前半の初期は約 315 ms から 385 ms に分布し、終期

Fig. 3. The mean reaction time to serial stimuli in the parameter (top) and program (bottom) groups. The mean reaction time was indicated on the ordinate and the serial position on the abscissa. The left diagram showed the time in the first half and the right one in the second half. The reaction times in the initial phase were shown by the filled circles and the times in the final phase by the open circles.

には約 140~180 ms に分布して均一な反応時間を呈した。しかし後半では完全見越反応を要求したために、初期の反応時間は約 30~180 ms に分布し、終期のそれは約 215 ms から約 55 ms に分布し、反応時間は顕著に短縮したが、いずれも均一な反応時間を呈さなかった。

IV. 考 察

系列パターンの追従課題において、組織化されたパフォーマンスが、中枢プログラムの変更および構造パラメータの変換に伴って、どのように再組織化するかを検討した。

その結果、プログラム群およびパラメータ群共に、前半の20試行では正反応が約 70~90% を占め、初期段階から終期段階にかけて、正反応および見越反応の割合を増加させることによって、学習効果がみられた。また平均反応時間においても両群共に、前半の初期より終期の方が短縮され、終期の反応時間は均一化され、上述の4つのパフォーマンス測度の結果を支持した。

本実験で用いた系列パターンは、パラメータ群の後半に系列位置を変更した部分を除けば、手の動作が内転と外転の繰り返しになり、単純反応事態では屈筋と伸筋の収縮速度から内転時に反応時間が短縮し、外転時に延長すると考えられるが、系列反応事態では学習の進行に伴って均一な反応時間を呈することが知られている^{8,12)}。このことはパフォーマンスを制御する中枢プログラムが、系列刺激の時間認知によって形成されていると考えられ、前頭連合野が運動の時空間的構造をプログラムするという知見によく一致している⁵⁾。

一方、プログラム群では後半の終期に正反応を約 7% に減少させたのに対して、見越反応を約 42% まで著増させた。また平均反応時間は後半の終期に均一化しなかったが、約 215 ms から約 55 ms に分布した。つまりプログラム群では、前半の正反応中心のパフォーマンスから後半の見越反応中心のパフォーマンスへ構造変化させたといえる。新しく質的に異なるパフォーマンスを獲得する際、すでに習得したパフォーマンスの構造を変化させることによって、新しい課題に適応して

いくと考えられる^{3,6,11)}。

パラメータ群では後半の初期に見越反応がなくなり、前半の終期よりもパフォーマンスが低下した。しかし後半の終期には見越反応を25%まで増加させ、前半の終期よりも高いパフォーマンスを呈した。また前半の終期の反応時間は均一化されていたが、後半の初期の反応時間は前半の終期より延長し、均一ではなかった。しかし、後半の終期の反応時間は前半の終期よりも短縮され、均一化を生じた。つまり後半の終期には前半の終期よりも高いパフォーマンスを呈したが、プログラム群のようにパフォーマンスの構造変化はみられなかった。

調枝ら⁴⁾は運動学習におけるパラメータ変更に伴って、ノイズ誘起による秩序形成 (noise induced transition) について検討し、本実験と同様な結果を得ている。系列パターンの一部の变化は既存の組織化された行動パターンに“ゆらぎ”を生じさせる。そのため、後半の終期には前半の終期よりも組織化の進んだレベルの見越反応の割合が増加し、再組織化過程がみられた。微小な“ゆらぎ”がトリガーとなって新しい秩序が増幅される過程は、運動制御のレベルの向上に重要な役割を演じていると考えられる。また Attali¹⁾は“ノイズ”は系が複雑になると、秩序形成を促進する要因になり、その系を質的に高く形成することを指摘している。

したがって、単一の構造パラメータの変更に伴って、高いパフォーマンスが得られたことは、“ゆらぎ”および“ノイズ”を通しての秩序の増幅現象と考えられる^{4,6,11)}。

V. 総 括

系列光刺激の追従課題において、中枢プログラムの変更を強いられた被験者(プログラム群)は、352415 を1系列1試行としたパターンを40試行追従した。その際、前半の20試行は刺激の点灯と同時に反応し、後半の20試行は完全見越反応で応じるように教示した。一方、構造パラメータの変換を求められる被験者(パラメータ群)は、前半に352415を、後半に352451を1系列1試行とし

たパターンを刺激点灯と同時に反応した。

その結果、両群共に前半の20試行では正反応の割合が約70~90%を占め、系列パターンを繰り返すことによって誤反応と無反応の割合を減少させて、正反応と見越反応の割合を増加させた。しかしプログラム群では後半の終期段階に正反応が約7%になり、見越反応が約42%まで増加し、パフォーマンスの構造変化がみられた。一方、パラメータ群では後半の初期段階に見越反応がなくなり、前半の終期段階よりもパフォーマンスが低下したが、後半の終期（見越反応25.00%）には前半の終期（見越反応4.46%）より高いパフォーマンスを呈した。つまり、単一の構造パラメータの変更は、再組織化によって高いパフォーマンスを得た。このことは“ゆらぎ”を通しての秩序の増幅現象と考えられる。

(受付 昭和63年9月19日)

文 献

- 1) Attali, J. (1979) : La parole et l'outil. Presses Universitaires de France, Paris.
- 2) Brooks, V. B. (ed.) (1981) : Motor control. Handbook of physiology, Sect. 1, Vol. II, Part 1 and 2, Am. Physiol. Soc., Bethesda, Md.
- 3) 調枝孝治(1986) : 自己組織系としての人間の運動学習. 広島大学総合科学部紀要Ⅵ, 4, 11-21.
- 4) 調枝孝治, 橋本晃啓, 北村靖治(1987) : 系列パターン学習のパラメータ適応制御. 広島大学総合科学部紀要Ⅵ, 5, 29-38.
- 5) Fuster, J. M. (1981) : Prefrontal cortex in motor control. In Brooks, V. B. (ed.) Handbook of physiology, Sect. 1, Vol. II, Part 2, Am. Physiol. Soc., Bethesda, Md., 1149-1178.
- 6) Haken, H., Kelso, J. A. S. and Bunz, H. (1985) : A theoretical model of phase transitions in human hand movements. Biol. Cybern., 51, 347-356.
- 7) Hoyt, D. F. and Taylor, C. R. (1981) : Gait and the energetics of locomotion in horses. Nature, 292, 239-240.
- 8) 乾 信之(1988) : 知覚—運動スキル学習における系列情報処理の発達. 愛知県立大学児童教育学科論集, 21, 8-13.
- 9) Kelso, J. A. S. (1981) : On the oscillatory basis of movement. Bull. Psychol. Soc., 18, 63.
- 10) Kelso, J. A. S. (1984) : Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. Am. J. Physiol. : Reg. Integ. Comp., 15, R1000-R1004.
- 11) Kelso, J. A. S. and Scholz, J. P. (1985) : Cooperative phenomena in biological motion. In Haken, H. (ed.) Complex systems : Operational approaches in neurobiology, physical systems and computers. Springer, Berlin, 124-149.
- 12) Summers, J. J. (1975) : The role of timing in motor program representation. J. Motor Behavior, 7(4), 229-241.
- 13) 高原康彦(1985) : システム論から見た適応, 自己組織化, 学習の概念 : 組織の創造性と革新性の理解のために. 組織科学, 19, 66-77.