

学習方法の違いが視覚運動系列学習に及ぼす影響

田中 観自^{1,2,3}, 渡邊 克巳^{1,2}
Kanji Tanaka, Katsumi Watanabe

¹ 東京大学 先端科学技術研究センター

The University of Tokyo, Research Center for Advanced Science and Technology

² 早稲田大学 理工学術院

Waseda University, Faculty of Science and Engineering

³ 日本学術振興会

Japan Society for the Promotion of Science

kanji.t9@gmail.com

1. はじめに

キーボードのタイピングといった連続的な動作を必要とする行為は日常生活において重要な役割を担っている。この系列的な動作は、学習の初期段階では独立した要素で構成されているが、学習が進むにつれて系列要素は連結され、強化されていく(e.g., Hikosaka et al., 1999)。それゆえに、効率的な練習は、学習時間の短縮や系列動作の強化に繋がる。

練習法で代表的な例として、部分法と全習法が挙げられる(e.g., Naylor & Briggs, 1963)。部分法では、実験参加者に系列の要素を別々に学習させ、後にそれらの要素を繋げさせる。一方の全習法では、参加者に一度ですべての系列の要素を学習させる。研究例でいうと、成人がジャグリングを学習する際に、全習法は部分法に比べて長期記憶への保持が優れている一方で(Knapp & Dixon, 1952)、子供を参加者とした場合、その効果は年齢によって影響されることも知られている(Chan et al., 2015)。加えて、Park, Wilde, and Shea (2004) は、部分法と全体法を組み合わせた系列の部分—全体法と全体法の効果を検証し、部分—全体法の方が系列を二分されてテストされたときに優れた成績であることがわかった。これらのことから、連続的な動作を必要とする学習において、異なる学習方法は長期的な知識保持や転移に影響を与えていることがわかる。

複雑な系列を学習するときに、一度もエラーをせずに学習することは難しく、特に試行錯誤を必要とする場合では、エラーすることで学習が進む。しかし、系列学習においてエラーが生じたとき、系列の最初からやり直す場合と、エラーが生じた場所からやり直す場合のどちらがより効率的なのだろうか？系列学習の間、系列の独立した要素は練習を繰り返すことで連結

されていく(e.g., Verwey, 1999)。したがって、エラー後の試行での再スタート位置が学習に与える影響を検討することは重要である。もし、系列の最初からやり直すのであれば、前回間違えた場所に再び戻って来るのに時間がかかるかもしれない。一方、系列を間違えた場所からやり直すのであれば、エラー後にすぐに間違えたボタン押しを修正することができる。上記で述べた部分法や全習法を検討している先行研究は比較的長期的な学習および記憶保持を対象としているが、本研究では短期的な学習効率や学習時間の短縮に焦点を当てている。したがって、本研究の主目的は、参加者が思考錯誤しながら学習していくときに、最も効率的な練習方法を検討していくことであった。

2. 方法

2.1. 参加者

本研究には、大学生または大学院生 32 名が参加した。すべての参加者は健常であり、実験遂行において必要な視力および運動機能があることを確認した。

2.2. 刺激と手順

本研究では、 $m \times n$ 課題と呼ばれる顕在的視覚運動学習課題を採用した(Hikosaka et al., 1999)。すべてのボタン刺激は 19 インチのタッチパネルモニタ(Elo Touch Solutions, ET1928L)に呈示された。ボタン刺激として 16 個のボタンが 4×4 のマトリクスで配置されており、その下にホームボタンと呼ばれるボタンが配置された。各ボタンの大きさは 3.5×3.5 cm で、ボタン間の間隔は 1.5 cm であった。

まず、点灯しているホームボタンが押されたあと、3 つのボタンが同時に点灯する。この

点灯している3つのボタンには予め押すべき正解の順番が設定されており、参加者は試行錯誤をしながらその順番を探すことが求められた。

3つのボタン押しパターンを6組つなげることで、系列を構成した(3×6系列)。ボタン押しが正しければ、一つずつ点灯しているボタンが消えていき、3つすべて消えれば、新たな3つのボタン押しパターンが即座に点灯する。本研究では、2種類の系列を作成し、all-back系列とzero-back系列と呼んだ(図1)。この2種類の系列では、ボタン押しを間違えたときに次の試行をやり直す位置が異なる。All-back系列では、ボタン押しを間違えた時、すべてのボタンがビープ音と共に点灯し、次の試行は系列の最初からやり直しとなった。一方で、zero-back系列では、すべてのボタンが点灯したのち、次の試行は前の試行で間違えたボタン組み合わせから始まった。

系列の最初から最後まで一度のエラーもなく成功したときのみ、その試行は成功であると認めた。したがって、zero-back系列において、系列の途中から再開された試行は最後まで成功したとしても成功とは認められなかった。同じ系列は、20回成功するまで繰り返された。すべ

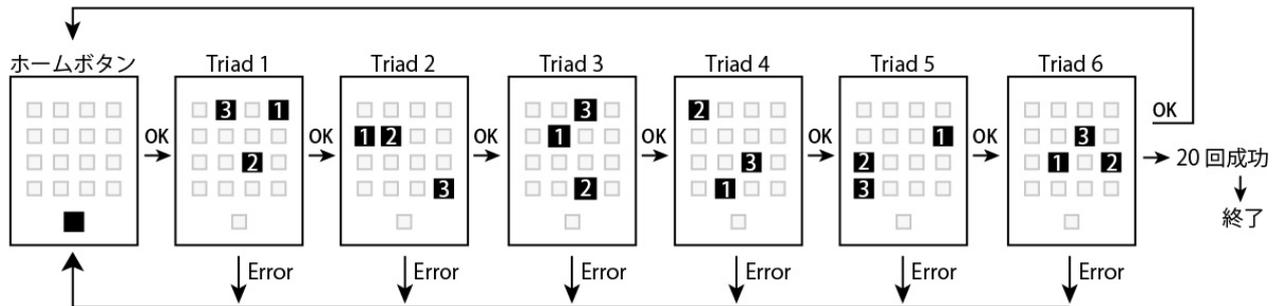
ての参加者は all-back 系列と zero-back 系列を完遂した。なお系列の遂行順序は参加者ごとにカウンターバランスをとって行われた。両系列の間では5分間の休憩を確保した。なお参加者は、なるべく速く正確に課題を遂行するように求められた。

本研究では、4種類の系列を作成し、その中から、2つの系列を all-back 系列と zero-back 系列としてランダムに参加者に振り分けた。これらの4つの系列には、共通するボタン押しの組み合わせが生じないようにすることで、両系列間での不意の転移が生じないようにした。

2.3. 解析

データ解析の際、20回の成功試行を5試行区分に分け、それぞれの試行区分におけるエラー回数および平均達成時間を算出した。例えば、エラー回数における第一試行区分は4回成功するまでに押し間違えた回数を示しており、平均達成時間の第二試行区分は、5回から8回成功したときの平均達成時間を示している。それらに加えて、エラー時の操作時間も含めた作業時間も計測した。

(a) All-back 系列



(b) Zero-back 系列

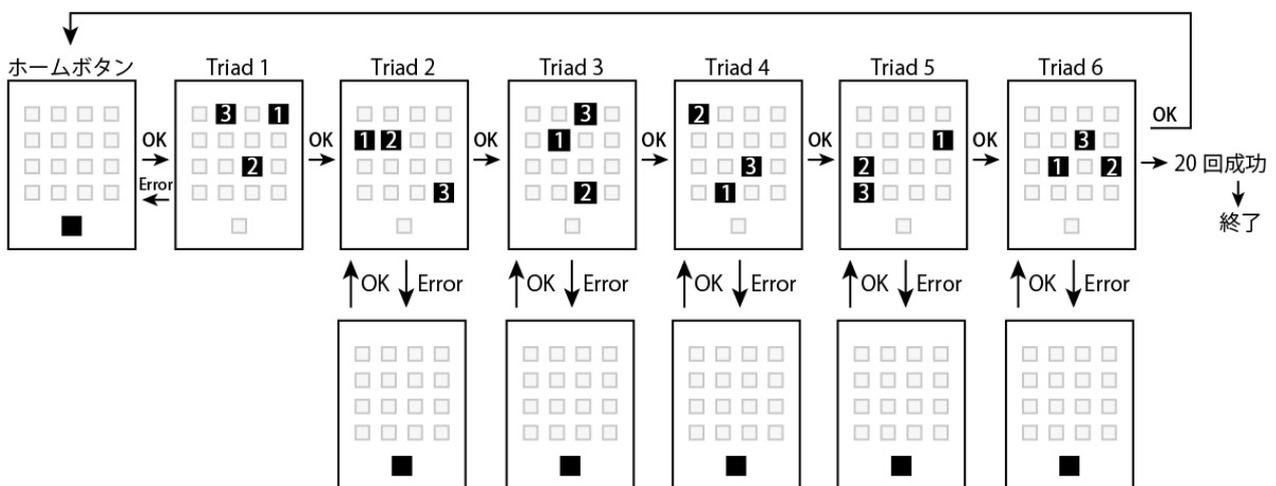


図1. 実験で使用した系列。すべての参加者は all-back 系列と zero-back 系列を完遂した。

3. 結果

図2は、実験参加者が各系列をどのように学習したのかを例として示している。以下のセクションでは、エラー回数（精度）、平均達成時間（速度）、そして作業時間に関する解析結果をまとめた。

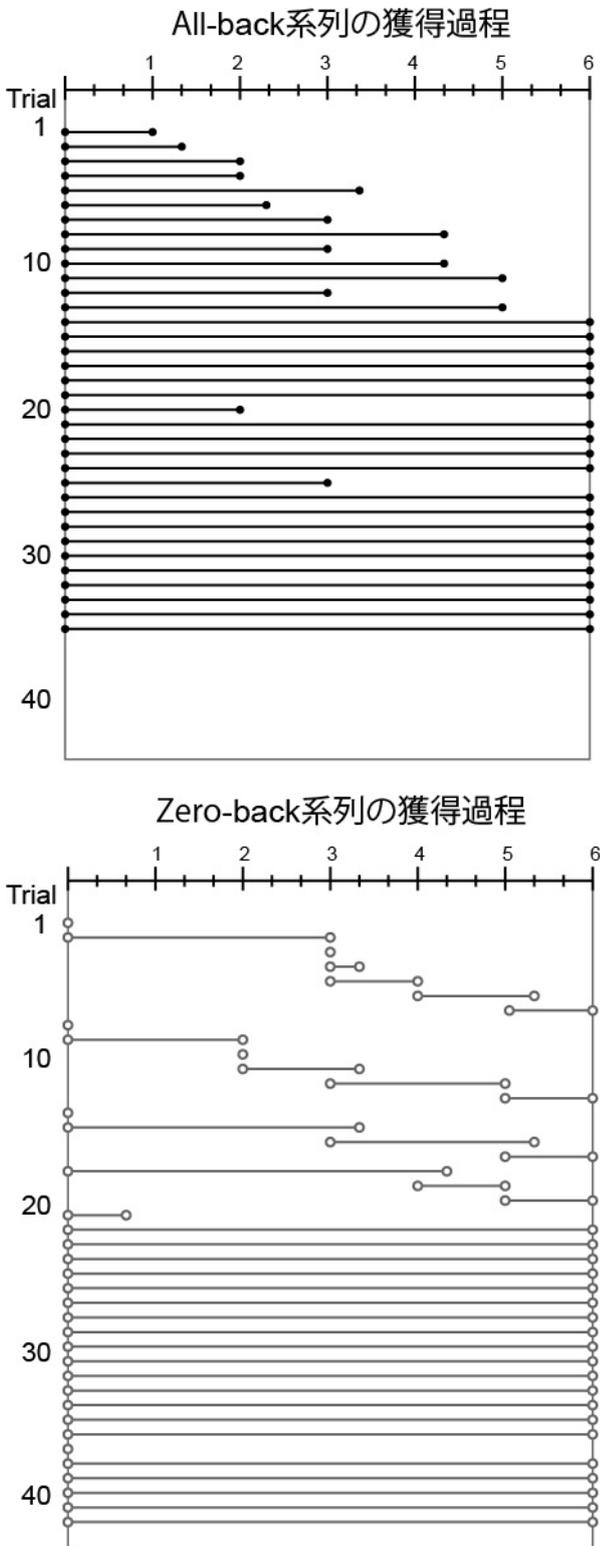


図2. All-back系列とzero-back系列の操作例。

3.1. エラー回数

エラー回数に関する5試行区分 × 2種類の系列の二元配置分散分析を行ったところ、試行区間の主効果が明らかとなり ($F(4, 124) = 126.32, p < 0.0001, \eta_p^2 = 0.80$; Fig 3a), 下位検定の結果、第一試行区間のエラー回数(mean = 35.37 times)は、その他の区間よりも有意に多いことが示された (means = 1.68, 1.18, 1.03, and 0.95 times, in the second, third, fourth, and fifth trial sections, $p < 0.0001$). また、系列種類の主効果も明らかになったことから ($F(1, 31) = 20.49, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.40$), all-back 系列の学習は zero-back 系列に比べて少ないエラー回数で完遂できることを示唆している (all-back sequence, mean number of errors = 27.84 times, 95% CI [22.25, 33.43]; zero-back sequence, 52.65 times, 95% CI [47.06, 58.24]). また、試行区間と系列種類の交互作用も有意であり ($F(4, 124) = 24.57, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.44$), 下位検定の結果、第一試行区分において、all-back 系列のエラー回数が zero-back 系列のエラー回数よりも少ないことを示した一方で ($F(1, 31) = 24.39, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.44$), その他の試行区間においては有意差は見られなかった ($F_s(1, 31) < 1.48, p_s > 0.23, \eta_p^2 < 0.045$). したがって、all-back 系列は zero-back 系列よりも獲得するのが容易であると言え、そして第一試行区間後では両系列ともに安定したパフォーマンスになることが分かった。

次に、各ボタン押しパターンにおいてエラー回数の分布がどのように異なるのかを6種類のボタン押しパターン × 2種類の系列の二元配置分散分析を行ったところ、ボタン押しパターンの主効果が見られた ($F(5, 155) = 3.16, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.09$; Fig. 3b). また下位検定では、3番目のボタン押しパターンで生じたエラー回数は、5, 6番目のボタン押しパターンで生じたエラー回数よりも多いことが示された ($p < 0.05$). しかしながら、ボタン押しパターンと系列種類の交互作用は有意ではなかった ($F(5, 155) = 0.52, p = 0.75, \eta_p^2 = 0.016$). この結果は、all-back 系列と zero-back 系列において各ボタン押しパターンのエラー回数の分布には大きな違いはなく、zero-back 系列は all-back 系列に比べて系列獲得の効率が全体的に低いことを示唆しているものである。

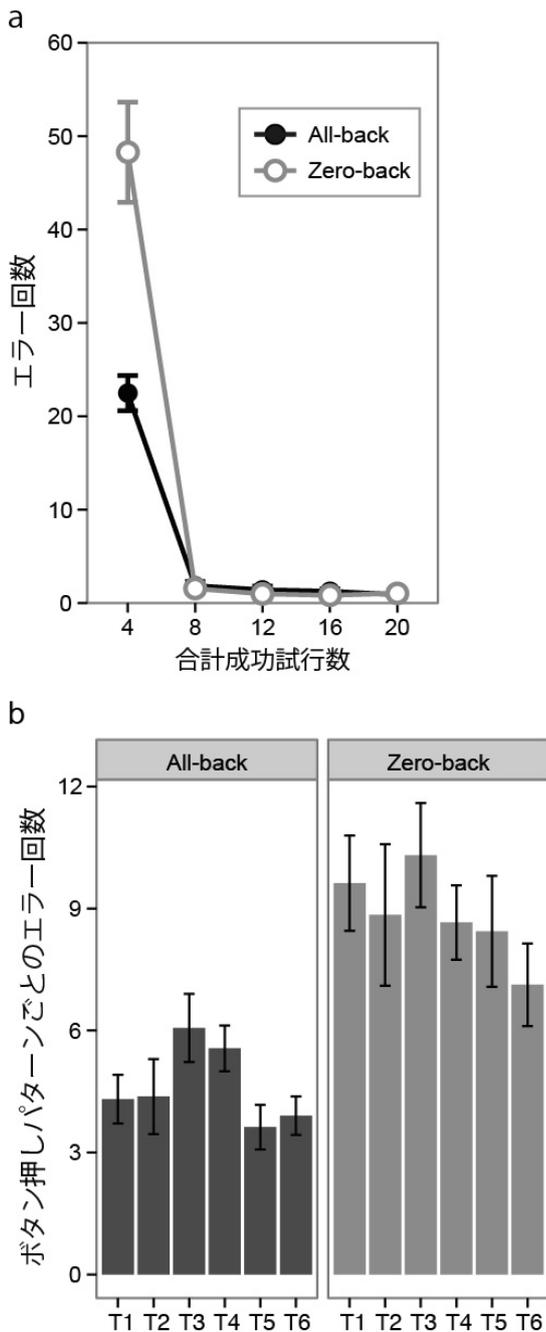


図 3. エラー回数. (a).all-back 系列と zero-back 系列のエラー回数. (b).各ボタン押しパターンにおけるエラー分布.

3.2. 速度

成功試行時の平均達成時間に対する 5 試行区分 \times 2 種類の系列の二元配置分散分析の結果, 試行区分の主効果が見られた($F(4, 124) = 134.37$, $p < 0.0001$, $\eta_p^2 = 0.81$; Fig. 4a). 下位検定の結果, 平均達成速度は徐々に速くなっていったことが分かった(first > second > third > fourth = fifth, $p < 0.01$; mean = 11.67, 9.54, 8.83, 8.44, and 8.29 s in the first, second, third, fourth, and fifth trial sections). また, 系列種類の主効果が有意傾向で

あることも明らかとなり($F(1, 31) = 4.06$, $p = 0.052$, $\eta_p^2 = 0.12$), all-back 系列における平均達成速度は zero-back 系列よりも速い傾向にあることを示唆している(all-back sequence, mean performance time in successful trials = 9.04 s, 95% CI [8.73, 9.36]; zero-back sequence, 9.67 s, 95% CI [9.35, 9.98]). 試行区分と系列種類の交互作用は有意ではなかった($F(4, 124) = 0.93$, $p = 0.44$, $\eta_p^2 = 0.029$).

上記の分散分析の結果は, 有意傾向であったために, 追加で all-back 系列の速度の利得を検討した. まず, all-back 系列と zero-back 系列において, 20 回の成功試行の平均達成時間を計算し, zero-back 系列の時間から all-back 系列の時間を引き, 最後にその値を all-back 系列の時間で割った: $(P_{\text{zero}} - P_{\text{all}}) \div P_{\text{all}}$. その結果, all-back 系列の速度の利得は 8.00%で(95% CI [1.33, 14.67]), ゼロよりも有意に大きいことが示された(one-sample t test; $t(31) = 2.44$, $p < 0.05$). これらの結果は, all-back 系列の成功時の達成速度は zero-back 系列の速度に比べて速いことを示唆している.

3.3. 作業時間

ここでは, all-back 系列と zero-back 系列を遂行したときの作業時間を比較した. 一つは, 最初に成功するまでの作業時間(Fig. 4b)と 20 回成功するまでの作業時間を比較した(Fig.4c). その結果, all-back 系列は zero-back 系列に比べて最初に成功するまでの作業時間が短いことが明らかになった ($t(31) = 3.00$, $p < 0.01$, $d = 0.66$).これは, all-back 系列が zero-back 系列に比べて正しいボタン押しの順番を早く獲得していることを示すものである. 加えて, 20 回成功するまでの時間においても, all-back 系列が zero-back 系列に比べて早かったことから($t(31) = 2.70$, $p < 0.05$, $d = 0.56$), 学習完遂においても all-back 系列が zero-back 系列よりも早く完遂することを示唆している.

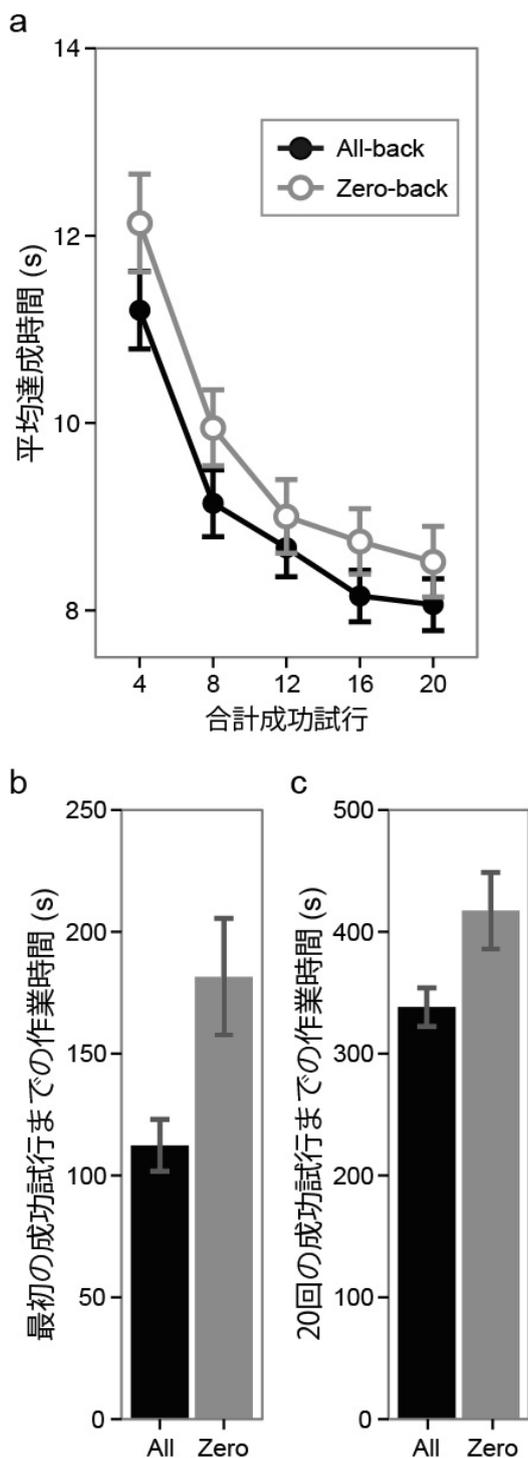


図4. 平均達成速度および作業時間. (a). all-back系列とzero-back系列の平均達成速度. (b). 一回成功するまでにかかった作業時間. (c). 20回成功するまでにかかった作業時間.

4. 考察

本研究では、試行錯誤を伴う課題において、効率の良い学習方法を検討した。その結果、all-back系列はzero-back系列に比べて少ないエラー回数、速い達成時間、そして短い作業時間であることを明らかにした。これは、ボタン押

しを間違えたときには、系列を最初からやり直した時の方が途中からやり直すときにくらべて、学習効率が優れていることを示唆している。

多くの先行研究では、 $m \times n$ 課題の all-back 系列を採用し(e.g., Hikosaka et al., 1999), 人はボタン配置といった系列の空間的表象を先に学習し、その後ボタン押しの運動的表象を学習することを示しており、それぞれの異なる学習過程の時間軸が示唆されてきた。

本研究の結果、第一試行区分において、all-back 系列は zero-back 系列よりもエラー回数が少ないことが明らかとなり、それ以降の試行区分では両系列に有意差はなかった。加えて、all-back 系列と zero-back 系列の各ボタン押しパターンにおけるエラー分布にも差がなかったことから、zero-back 系列は all-back 系列よりもボタン押しの順番を学習するのが難しいことを示唆している。Zero-back 系列の難しい理由の一つとして、逆行性干渉が考えられる(e.g., Baddeley & Dale, 1966). 例えば、zero-back 系列において参加者が最初のボタン押しパターンを成功して、二番目のボタン押しパターンで間違えたとき、次の試行で系列の最初からやり直すことはできず、二番目のボタン押しパターンからやり直すことになる。そのため、次に最初のボタン押しパターンを押すまでに比較的長く時間がかかっていることになる。一方の all-back 系列では、二番目のパターンで間違えた後、最初からやり直すことになるので、比較的早く二番目のパターンに到達できる。したがって、zero-back 系列の場合、以前に学習したボタン押しの保持が、新たに学習したボタン押しによって逆行的に干渉を受けている可能性が考えられる。

本研究における最も顕著な結果は、zero-back 系列の作業時間やエラー回数が all-back 系列に比べて長く多かつたのにもかかわらず、zero-back 系列の平均達成時間も all-back 系列に比べて速いことであった。提唱されている系列獲得過程によると(Hikosaka et al., 1999), zero-back 系列を遂行している場合、all-back 系列を遂行している時に比べて、運動的表象を獲得するのが遅いと考えられる。一つの可能性としては、all-back 系列に取り組んでいるとき、最初にすべてのボタン押しパターンを成功するまでの間に、ある程度運動的表象を獲得していることが考えられる。一方、zero-back 系列に取り組んでいるときには、同じボタン押しパターンを連続的に繰り返すことができないので、成功するまでの間に運動的表象を獲得していなかったと思われる。さらに、zero-back 系列における

多いエラー回数や長い作業時間は、運動表象の獲得に貢献しておらず、これは系列学習における空間的表象と運動的表象の並列学習を反映している結果であると言える(e.g., Hikosaka et al., 1999). これらをまとめると、エラーが生じたとき、エラーが生じたボタン押しパターンでやり直すことは、運動的表象の獲得を遅らせることとなり、結果として成功試行時における平均達成時間が遅くなったと思われる。

参考文献

- [1] Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1993). The recency effect: Implicit learning with explicit retrieval?. *Memory & Cognition*, 21(2), 146-155.
- [2] Chan, J. S., Luo, Y., Yan, J. H., Cai, L., & Peng, K. (2015). Children's age modulates the effect of part and whole practice in motor learning. *Human Movement Science*, 42, 261-272.
- [3] Hikosaka, O., Nakahara, H., Rand, M. K., Sakai, K., Lu, X., Nakamura, K., Miyachi, S., et al. (1999). Parallel neural networks for learning sequential procedures. *Trends in Neurosciences*, 22(10), 464-471.
- [4] Knapp, C. G., & Dixon, W. R. (1952). Learning to juggle: II. A study of whole and part methods. *Research Quarterly*, 23(4), 398-401
- [5] Naylor, J. C., & Briggs, G. E. (1963). Effects of task complexity and task organization on the relative efficiency of part and whole training methods. *Journal of Experimental Psychology*, 65(3), 217-224.
- [6] Park, J. H., Wilde, H., & Shea, C. H. (2004). Part-whole practice of movement sequences. *Journal of Motor Behavior*, 36(1), 51-61.
- [7] Verwey, W. B. (1999). Evidence for a multistage model of practice in a sequential movement task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(6), 1693-1708.