

運動系列実行時のチャンク選択手がかりの検討： 連続ボタン押し課題におけるセット置き換え型エラーの 分析から

森田 ひろみ^{1,a)} 村松 陽太郎²

受付日 2016年7月5日, 採録日 2017年1月10日

概要：日常行動の多くは、単純な運動からなる系列を実行することにより実現される。運動系列の記憶は階層的に構造化されて貯蔵され、その階層構造に基づき実行が制御されると考えられている。本研究は、階層構造の中間的階層において、次に実行すべきチャンクがどのようにして選択されるかについて調べることを目的とする。そのために、4個のボタン押しからなるセット5個からなる系列という明確な階層構造を持つ運動系列を学習する、 $[4 \times 5]$ 連続ボタン押し課題を用い、実行すべきセットの想起手がかりを検討した。実験参加者は、まず5種類の系列を、ボタン配置手がかりなしに押せるようになるまで学習し、その後、ランダムに選ばれた系列の最初のセットのボタンのみ点灯される条件でボタン押しを実行した。この再生テストで出現した誤反応を分析した結果、押すべきセットの代わりに別のセットをそっくり実行する置き換え型エラーが見られた。置き換え型エラーの多くは、他系列の同じ番号のセットを実行するものであったのに対し、同じ系列の異なる番号のセットを実行するものは少なかった。また、先行するセットを共通にする他系列のセットを実行するものが見られた。結果から、実行すべきチャンクの選択に、チャンク実行段階に関する構造的手がかりやチャンク間の連合手がかりが用いられることが示唆された。

キーワード：系列的手続き、運動系列、連続的運動学習、連続ボタン押し課題、置き換え型エラー

Cue to Select Next Chunk in the Execution of Sequential Procedure: from the Analysis of Set-substitution Errors in the Sequential Button-press Task

HIROMI MORITA^{1,a)} YOTARO MURAMATSU²

Received: July 5, 2016, Accepted: January 10, 2017

Abstract: The most part of our daily routines is done by executing sequences of simple movements. The movement sequences are stored in the hierarchical structure and executed under the hierarchical control. This study investigated how the next chunk is remembered at the intermediate layer of the hierarchical structure. For the purpose we used the sequential button-press task in which participants learned hierarchically structured movement sequences comprised of 5 sets of 4 button presses and examined what kind of cues are used to remember the next button-press-set. Participants learned 5 sequences until they could press 20 buttons in the correct order without visual cues. Then they were tested without visual cues. Substitution errors in which participants pressed a set of 4 buttons in the correct order but in the wrong context were observed. Most substitutions occurred between the sets of the same number of the different sequences while few occurred between the sets of the same sequence. The sets which follow the identical sets placed in the different sequences substituted with each other. The result suggests that the chunk is remembered according to the structural cue of the execution stage and to the association links between consecutive chunks.

Keywords: sequential procedure, movement sequence, sequential motor learning, sequential button-press task, substitutional error

1. はじめに

使いやすい情報機器の設計は、情報学的・工学的観点から重要なテーマである。その設計には、人間の情報機器利用に関わる認知機能の理解が不可欠である。現代の情報機器の多くは、タッチパネルディスプレイ上に表示された質問に対し、数字や文字を選んでタッチ入力することを繰り返して操作する。たとえばATMでは、ある画面で自分の電話番号を入力し、別の画面で振込先口座番号を入力する。このような単純な運動からなる一連の操作を繰り返し実行すると、人間はそれを記憶し、質問が現れる前から無意識のうちに手が動き始めること、それにより自分の押しやすいタイミングで素早く操作することが可能になることを示唆する研究結果が得られている [1], [2]。さらにこのタッチ入力のタイミングやエラー数が、それぞれの画面で何回のタッチを行うかというグルーピングの影響を受けることが示唆されている [2], [3]。本研究は、画面ごとに複数回のタッチを行いながら進めていく操作が、個々のタッチ、各画面における複数のタッチからなる入力、操作全体という階層構造を持つことから、階層構造を持つ運動系列の学習と記憶の認知特性を調べ、どのようなエラーが生じやすいかを明らかにすることにより、エラーが生じにくくストレスの少ない操作の設計について手がかりを得ることを目的とする。

1.1 運動系列の記憶の階層構造とアクションスリップ

私たちの日常行動は、よく慣れた手続きの実行の連続である。複雑な情報機器の操作もその例に漏れず、駅でICカードにチャージするとき、ATMで現金を振り込むとき、スマートフォンを操作するときなどに、画面へのタッチのような単純な運動から構成された手続きを何種類か組み合わせて様々な機能を実行している。なかでも特によく行う操作は記憶しており、ほとんど無意識のうちに実行することができる。

このような個々の運動からなる一連の手続きを運動系列という。同じ運動系列を何度も繰り返して実行すると、手続き記憶として定着し、それを想起することにより速やかに実行できるようになる。運動系列の記憶は、目的に直結する最高次のユニットから、筋肉を動かす最低次のユニットにいたる階層構造をなしており、この階層構造に基づいて制御され、実行されると考えられている [4]。階層的制御は、低次のユニットの自律的機能と高次のユニットの学習可能性とを兼ね備えることにより、柔軟かつ確実な行動

を可能にするが [5]、その一方で、中間階層において誤ったユニットを選択してしまうアクションスリップを生じる。たとえば、夕食のために服を着替えようとして寝室に行ったところ、気づいたらベッドの中にいたというスリップを Norman は Capture error と分類したが [6]、これは、寝室に行って部屋着に着替えてから食堂に行き夕食を食べるという一連の運動系列の途中で、部屋着に着替えるという中間階層ユニットの代わりにパジャマに着替えるというユニットを誤って選択したため生じたと考えられる。Norman らのモデルによると、連続する中間階層ユニットの接続時点において、注意による確認がうまくなされないと、直前に実行したユニットや、現時点の文脈情報に基づき選択すべきなのに、より広い文脈情報、たとえばより以前の中間階層ユニットなどに基づいて選択してしまい、このようなスリップが生じる [7]。しかし、実際にどのような文脈情報が中間階層ユニットの選択に用いられるかについては十分明らかにされていない。そこで本研究は、運動系列の実行において、次に実行すべき中間階層ユニットの選択にどのような情報が用いられるかに注目する。

1.2 連続ボタン押し系列の実行におけるセット選択手がかかり

運動系列の学習、記憶、あるいは実行について調べる先行研究においては、タイピング [8] や離散的系列生成 [9]、直列反応時間課題 [1] などが用いられてきたが、本研究は Hikosaka ら [10] の連続ボタン押し課題を用いて検討を行う。

連続ボタン押し課題は、もともと4行4列の16個のボタンからなるパネルを用い、サルに正しい順序で10回ボタンを押すことを学習させるものである。パネル内のボタンを2個ずつ点灯させることにより、押すべきボタンの位置を与える点が特徴的であり、これをセットと呼ぶ。サルは、セットの2個のボタンのうちどちらを先に押すかを試行錯誤により学習する。正しい順序で押すことができれば次のセットに進めるが、間違えると最初のセットからやり直しとなる。第1セットから第5セットまでの合計10回のボタン押しを正しく遂行することに10回成功すると1ブロックが終了する。この課題は、10個のボタン押しからなる系列を、個々のボタン押し、セット、系列全体、という3階層に構造化して被験体に学習させることができる。

Sakai ら [2] は、ヒトを対象とした2ボタン×10セットからなる連続ボタン押し学習実験を行い、記憶の単位であるチャンクとセットの関係をボタン押しタイミングから検討している。彼らは、セットの最初のボタン押しにかかる時間を、押すべきボタンを選択する時間を含むことから、選択時間と呼び、2個目のボタンを押すのにかかる時間を、選択の余地がなく残ったボタンを押すだけの時間という意味で、運動時間と呼んだ。実験の結果、選択時間は運動時

¹ 筑波大学

University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305–8550, Japan

² 筑波大学大学院図書館情報メディア研究科

Graduate School of Library, Information and Media Studies, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305–8550, Japan

a) morita@slis.tsukuba.ac.jp

間に比べて長い、その選択時間も長いものと短いものが見られた。Sakai らによると、長い選択時間は複数のセットがまとまってできたチャンクの最初のセットの第1ボタン押しであることを意味し、短い選択時間はチャンク内の後続セットの第1ボタン押しであることを意味する。彼らが用いた2ボタン×10セットのボタン押し系列は、1セットの2個のボタンが1チャンクとして記憶される場合から、5セット10個のボタンが1チャンクにまとまって記憶される場合まで見られたが、平均すると2.5セットからなるチャンクに分かれて記憶された。したがって、20個のボタン押し系列は、2から3セットからなるチャンクを中間階層とする階層構造に体制化されて記憶されると考えられる。

森田 [3] は、セットを構成するボタン数を4個に増やし、5セットからなる $[4 \times 5]$ 課題を用いて実験を行った。 $[4 \times 5]$ 課題では、セットの最初のボタンだけでなく、第2、第3番目のボタン押しの際にも選択の余地があるにもかかわらず、第2、第3、および第4番目のボタン押し時間は第1ボタン押し時間に比べて顕著に短かった。このことは、第1ボタン選択時に他の3個のボタン押し順序も想起されており、1セット4ボタンが最小のチャンクを形成することを示唆する。また、原学習後、ボタンがまったく点灯しない条件で同じ系列の再学習を行ったところ、原学習と同様に、第1番目のボタン押し時間が長く、第2、第3、第4番目のボタン押し時間は短く、第5番目のボタン押し時間が長く、第6、第7、第8番目のボタン押し時間は短い、というパターンになった。この点からも、ボタン押し系列が、原学習で与えられた1セット4ボタンを基本としたチャンクに分かれて記憶に保持され、ボタン配置手がかりがない場合にもセットを単位として実行されると考えられる。

ここで、中間階層にあたるセット階層に注目して考えると、連続ボタン押し系列を正しく再生するためには、系列を構成するセットのボタン押し順序を保持しており、かつそのセットを正しい順序で選択できることが必要十分条件といえる。そして、正しく選択するための手がかりとして、次に実行すべきセットが、どの系列のどのセットであるかという構造的手がかり、直前セットとの間の連合手がかり、セットの点灯パターンというボタン配置手がかりなどが考えられる。本研究は、これらの手がかりが実際に利用されるかどうかを、ボタン押し実行におけるセット選択の誤りについて調べることにより明らかにする。

1.3 置き換え型エラー

Salthouse [11] は、タイピング課題を用いた実験において、押すべき文字とは異なる文字を誤って押してしまうエラーを置き換え (substitution) として報告している。Henson ら [12] は、直後直列再生課題を用いた実験を行い、次のような Fill-in 効果を報告している。実験参加者は6個程度の

アルファベット文字からなる系列を提示された直後に順番どおり再生することを求められた。その結果、たとえば、「RXKHZB」の提示に対して再生時に、「RXH」と間違えたら、続いて「Z」を答える頻度はけっして高くなく、先に答えるべきであった「K」で「埋める」傾向が見られた。これが Fill-in 効果である。

これらの研究が、1文字単位での置き換え型エラーを報告しているのに対し、本研究は、セット単位での置き換え型エラーが生じるかどうか、生じるとすればどのような関係にあるセットを置き換えて実行するのかを調べ、それにより、構造的手がかり、連合手がかり、ボタン配置手がかりが置き換え型エラー発生の要因となるかを検討した。

1.4 実験の概要

5個の系列の学習と再生テストからなる実験を行った。ここで系列とは、20回のボタン押し順序のことをいう (たとえば、図1(a)にあげた系列は{1, 6, 15, 3, 14, 4, 7, 12, ..., 11, 5, 16, 13}である。ただし、ボタン配列の個々のボタンを左上から横方向に1から16の数字で表す)。実験参加者には、系列を5画面に分けてボタン押しを学習させた。個々の画面における4回のボタン押しの順序をセットという (たとえば上記の系列の第1セットは{1, 6, 15, 3}である)。最初のボタンを押してから途中で間違えて中止するまで、あるいは最後のボタンを正しく押し終えるまでを1回の試行とする。

実験参加者は、各系列につき、まずは押すべきボタンが点灯する通常の連続ボタン押し学習を行い、続いて同じ系列をボタンがまったく点灯しない状態で正しく押すことができるようになるまで再学習を行った。再学習を行う目的は、セットのボタン配置手がかりなしに、記憶に基づき系列を実行できるようになることであった。このようにして、5個の系列をボタン配置手がかりなしに正しく押せるようになるまで学習した後、テストとして、ランダムに選ばれた系列の最初のセットのボタン点灯を手がかりに、その後はボタンが点灯しない状態でボタン押しを実行するテスト1 (セット非点灯条件)、および第2セット以降もボタンが点灯する条件下でボタン押しを実行するテスト2 (セット点灯条件) を行い (図1(a)参照)、置き換え型エラー発生数を調べた。

置き換え型エラー発生数と構造的手がかりの関係について次のように予想する。なお、構造的手がかりは系列の手がかりとセット番号の手がかりからなり、系列の手がかりとは、どの系列に出現するセットかという情報である。セット番号の手がかりとは、系列によらず、何番目に出現するセットかという情報である。もし構造的手がかりのうち、系列の手がかりが他の手がかりよりも強く働けば、非点灯条件の再生テストにおいて、同じ系列の他セットを誤って実行してしまう置き換え型エラーの発生数が相対的

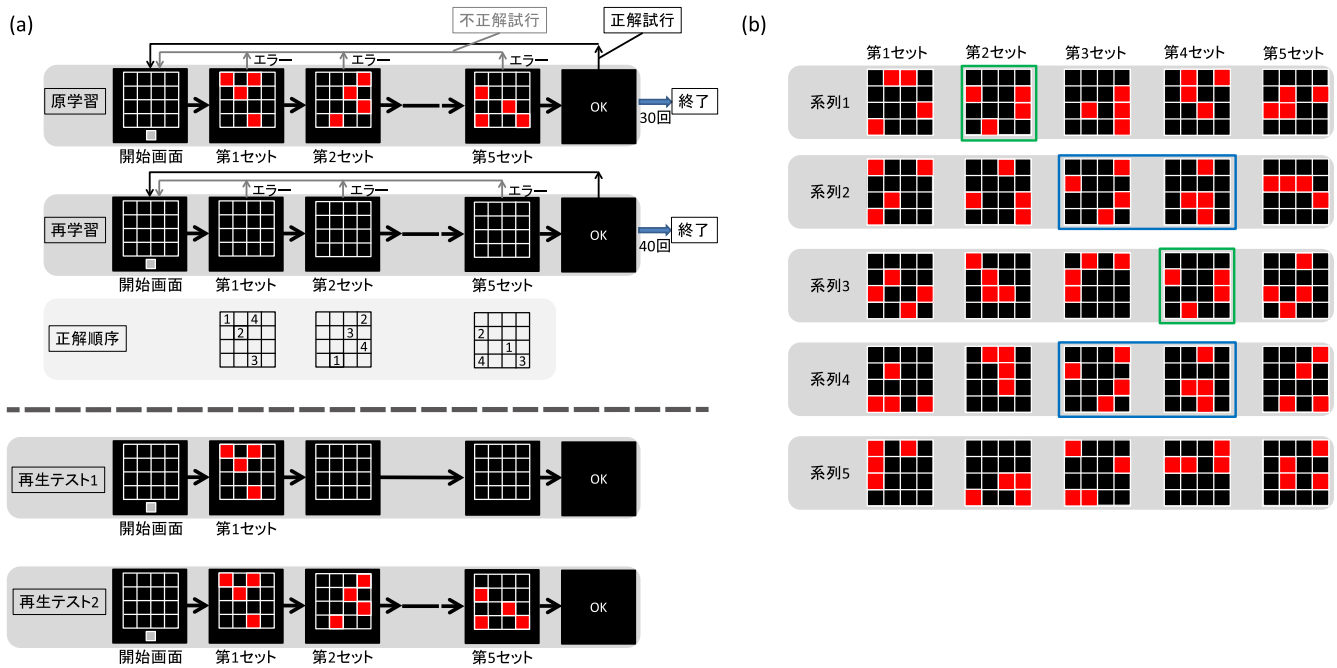


図 1 (a) [4 × 5] 連続ボタン押し課題の原学習，再学習，再生テスト 1 および 2 の手続き。
 (b) 5 個の系列の例。緑色の枠で囲んだセットどうしは点灯するボタンは同じだが押し順序が異なる。青色の枠で囲んだセットどうしは点灯するボタンもその押し順序も同じ

Fig. 1 (a) Procedure of 4 × 5 sequential button-press task in original learning, relearning, and reproduction test 1 and 2. (b) An example set of 5 sequences. The sets in a green frame have the same button pattern but different button-press order with each other. The two-set groups with a blue frame have the same button pattern and button-press order with each other.

に多いことが予想される。一方、セット番号の手がかりが他の手がかりよりも強く働くならば、他の系列の同じセット番号のセットを実行してしまう置き換え型エラーの発生数が相対的に多いことが予想される。

連合手がかりが置き換え型エラー発生要因となるかを調べるために、5 個の系列のうちの 2 個の一部を同一セットとした (図 1(b) 参照)。もしセット間の連合が系列の手がかりよりも強ければ、これら同一セットの直後のセットどうしの置き換え型エラーが他の置き換え型エラーより多く発生することが予想される。また、ボタン配置手がかりが置き換え型エラー発生要因となるかを調べるために、別の 2 系列に、同じボタン配置であるが押し順序の異なるセットを配置した (図 1(b) 参照)。もしボタン配置パターンがセット選択の主たる手がかりであるならば、セット点灯条件のテストにおいて、これらのセット間の置き換え型エラーが多数生じることが予想される。以上の仮説に基づき、置き換え型エラーの生じたセットと、実際に実行されたセットの関係に対するエラーの生起分布を調べた。

以上に加えて、様々な文を話すときに同じ単語が用いられることがあるように、セットはそもそも系列とは独立に保持され、複数の系列で共用されるものなのか、それとも系列ごとに形成され、それぞれの系列の記憶の一部として保持されるのかについて検討するため、上述の同一セット

を含む 2 個の系列の学習効率を比較した。セットが系列に属することなく共通の記憶表象として保持されるならば、すでに学習したセットを再び別の系列の原学習で学習するとき、試行錯誤の回数は少なくすみ、また最初からスムーズにボタンを押せることが予想される。一方、セットが各系列の記憶表象の一部として学習され、同じセットであっても他の系列で出てきた際はまた新たな記憶表象が形成されると仮定すると、試行錯誤の回数もボタン押しに要する時間も、最初に学習したときと同程度となることが予想される。

2. 実験方法

2.1 参加者

実験参加者は、19 人 (男 9 人, 女 10 人, 年齢 18~25 歳, 全員右利き) であった。実験に際して、すべての実験参加者に対し、実験内容について十分説明し、書面により実験参加への同意を得た。

2.2 装置

パーソナルコンピュータ (DELL 社製 Dimension XPS 600) とタッチパネル内蔵液晶カラーディスプレイ (EIZO 社製 FlexScan L560T-C, 17 インチ) を用いて、簡易暗室内で行った。実験参加者は椅子に座り、ディスプレイア

ムで固定したタッチパネルディスプレイを押しやすいような角度に調節し、実験を行った。

2.3 手続き

画面中央の幅 0.3 cm の白い枠で囲まれた 14.5 cm × 14.5 cm の領域を、同じく幅 0.3 cm の白い線で縦 4 個 × 横 4 個の正方形に区切り、これら 16 個の正方形 (3.2 cm × 3.2 cm) をボタンと見なした。背景およびボタンの色は黒であった。試行開始時に、ボタン配列の 1.7 cm 下方に白い枠で囲まれた 2.5 cm × 2.5 cm の赤い正方形が表示された。これを開始ボタンと呼ぶ。

これらのボタンを用いて、[4 × 5] 構成の連続ボタン押しの学習およびテストを行った (図 1(a) 参照)。

最初に、第 1 番目の系列の原学習を行った。試行開始時に、上記のボタン配列と開始ボタンが提示された (この画面を開始画面と呼ぶ)。実験参加者が開始ボタンを押すと、開始ボタンが消え、同時に 16 個のボタンのうち最初のセットの 4 個が赤色に点灯した。実験参加者はこれら 4 個のボタンを決まった順序で押さなければならないが、事前に順序を知らされていないため試行錯誤により学習しなればならなかった。すなわち、ボタンを順番どおり押すことができれば次のセットに進めたが、誤ったボタンを押すとその時点で試行は終了し、ただちに次の試行の開始画面が提示された。どのセットにおいても間違えたらそこでその試行は終了し、次の試行となった。セット 1 からセット 5 まで、すべてのボタンを正しい順序で押すことができると、OK という表示が出た後に次の試行の開始画面が提示された。正解試行 30 試行をもって原学習は終了した。

続いて、この系列の再学習を行った。原学習とはほぼ同じ手続きで再度学習するのだが、原学習と異なり押すべきボタンが赤く点灯しなかった。つまり、実験参加者は開始ボタンを押した後、16 個の黒いボタン配列を前に、正しい順序で 20 回のボタン押しを行わなければならなかった。原学習同様、誤ったボタンを押すと試行が終了し、次の試行の開始画面となった。学習を確実にするため、正解試行 40 試行をもって再学習終了とした。ただし、30 回連続して不正解試行だった場合は、そのまま続けても再学習を終了することは困難である可能性が高いと判断され、その系列の再学習を中止して次の系列へ進んだ。

実験参加者は、5 個の系列の原学習と再学習を行った後、次の再生テストへと進んだ。再生テストでは、先に学習した 5 個の系列からランダムに選ばれた系列を再生することを求められた。誤ったボタンを押しても試行はそのまま続き、20 回ボタンを押すと試行が終了した。

再生テスト 1 では、セット 1 のみ押すべきボタンが点灯し、セット 2 から 5 は点灯しないため、セット 1 のボタン配置を手がかりとして先ほど学習した系列を想起し、セット 2 以降もその系列のボタン押しを続けなければならな

かった。再生テスト 1 は、各系列につき 10 試行ずつの合計 50 試行から構成された。

再生テスト 2 は、すべてのセットにおいて押すべきボタンが点灯する点以外は、再生テスト 1 と同じであった。

最初の系列の原学習開始前に、原学習と再学習の教示を行い、さらに 5 系列を学習した後は再生テストを行うことを伝えた。再生テスト 1 と 2 の教示は、再生テスト 1 の開始前に行った。

3 番目の系列の再学習後と 5 番目の系列の再学習後に 10 分以上の休憩時間をとった。それ以外にも各系列の再学習後および再生テスト 1 の終了後に実験参加者の希望を聞き、それに応じて数分以上の休憩をとった。教示や休憩時間を含む実験のために要した時間は平均 3 時間であった。実験参加者には時給 810 円の謝金を支払った。

2.4 系列

5 個のボタン押し系列は、実験参加者ごとに作成した。これ以後、最初に学習する系列を系列 1、次に学習する系列を系列 2 というように、学習する順序に従い系列を呼ぶことにする。系列はコンピュータで乱数に基づき作成したが、次のような制約を設けた (図 1(b))。① 系列 1 のセット 2 と系列 3 のセット 4 は同一ボタン配置であるが、異なるボタン押し順序とした。② 系列 2 と系列 4 のセット 3 および 4 は同一ボタン配置で同一ボタン押し順序とした。③ 上記以外のセットについて、どのセット間でもボタンが 3 個以上一致することがないようにした。

実験参加者には、ボタンは利き手の人差し指で押すこと、試行を開始したら途中で考え込まずにできるだけ素早く正確にボタンを押すことを指示した。

3. 実験結果

再学習において、不正解試行を 30 回連続した場合、ただちにその系列の再学習を中止した。それにより 5 系列中 3 系列以上の再学習が中止となった実験参加者が 3 人いた。これらの実験参加者のデータは分析から除外した。残る 16 人中、8 人は 5 系列すべての、6 人は 4 系列の、2 人は 3 系列の再学習を達成できた。

実験参加者は、再生テストにおいてどの系列のどのセットも 10 回ずつ実行した。そのうち、正しく反応できなかったセットについて、なかでも誤って他セットを押してしまった置き換え型エラーについて発生数を数えた。さらに、それらの置き換え型エラーについて、反応すべきセットと誤って反応してしまったセットの関係を調べた。続いて、同一ボタン押し順序である系列 2 と系列 4 のセット 3 および 4 に注目し、これらのセットの直後にあたるセット 5 などの置き換え型エラー発生数を数えた。また、同一ボタン配置の系列 1 セット 2 と系列 3 セット 4 の間の置き換え型エラー発生数を数えた。

表 1 再生テスト 1 の反応内訳

Table 1 The categorization of the responses in the reproduction test 1.

	正解	エラー	
		置き換え型	その他
生起数	2309	552	1139
割合(%)	58	14	28

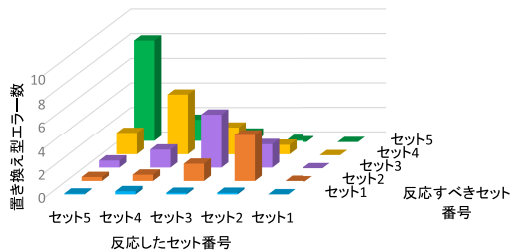


図 2 再生テスト 1 における反応すべきセット番号および反応したセット番号に対する置き換え型エラー数

Fig. 2 The number of substitutions in relation to the to-be-responded set number and the actually-responded set number in the reproduction test 1.

さらに、系列 2 と系列 4 の原学習において、セットごとに、そのセットのボタンを押し間違えて試行が途中終了となった回数（セット不正解数）を数えた。また、これらのセットのボタン押しに要した時間（セット遂行時間）を調べた。

最後に、セットとチャンクの間隔を調べるためにボタン押しタイミングの分析を行った。

3.1 再生テスト 1 におけるエラーの分析

(1) 置き換え型エラーの生起数

再生テスト 1 で生じた反応の内訳を表 1 に示す。置き換え型エラーが生じたといえるかを検討するため、1 サンプル t 検定により 0 との差を比較したところ、有意であった ($t(15) = 4.41, p < .001$)。

(2) 置き換え型エラーのセット間関係

置き換え型エラーを、反応すべきセット番号と実際に反応したセット番号の関係ごとに分類して集計した値の実験参加者間平均を図 2 に示す。このグラフには正解は含まれない。

反応すべきセット番号と反応したセット番号の関係を統計的に検討するため、反応すべきセット番号と反応したセット番号の差をとり、この差に対する置き換え型エラー発生率（逆正弦変換を施した値）の実験参加者間平均を図 3 に示す。この値を対象として繰返しのある 1 要因分散分析を行ったところ、セット番号の差の主効果が有意となった ($F(4, 60) = 23.3, p < .001$)。多重比較の結果、同じセット番号どうしの置き換え発生率と異なるセット番号どうしの置き換え発生率の間に有意差が見られ（セット番号の差

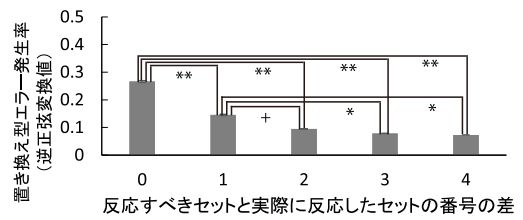


図 3 反応すべきセットと実際に反応したセットの番号差に対する置き換え型エラー発生率（これ以後グラフのエラーバーは標準誤差を示す）

Fig. 3 The average number of substitutions in relation to the gap of set numbers between the to-be-responded set and the actually-responded set. (Error bars of this and subsequent graphs mean standard error.)

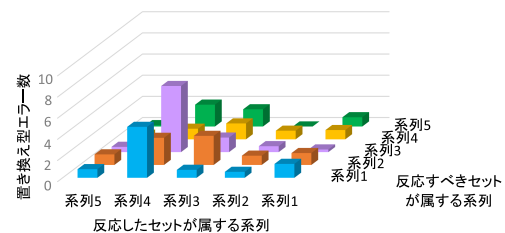


図 4 再生テスト 1 における反応すべきセットの属する系列および反応したセットの属する系列に対する置き換え型エラー数

Fig. 4 The number of substitutions in relation to the sequence containing the to-be-responded set and that containing the actually-responded set in the reproduction test 1.

が 1 の条件との間のみ $p < .01$, それ以外の条件との間は $p < .001$), セット番号の差が 1 の条件と 2 の条件との間に有意傾向が ($p = .076$), 1 の条件と 3 の条件および 4 の条件との間には有意差が見られた (どちらも $p < .05$). それ以外の組合せに有意差は見られなかった ($ns.$).

次に、反応すべきセットが属する系列と実際に反応したセットが属する系列の関係ごとに置き換え型エラーを分類して集計した値の実験参加者間平均を図 4 に示す。このグラフには正解が含まれない。

反応すべきセットの属する系列と反応したセットの属する系列の関係を検討するため、反応すべきセットの系列番号と反応したセットの系列番号の差をとり、この差に対する置き換え型エラー発生率（逆正弦変換を施した値）の実験参加者間平均を図 5 に示す。この値を対象として繰返しのある分散分析を行ったところ、系列番号の差の主効果が有意となった ($F(4, 60) = 2.84, p < .05$) が、多重比較では有意差が見られなかった ($ns.$).

(3) 連合に従う置き換え型エラー数

系列 2 のセット 5 を反応すべきところ、系列 4 のセット 5 を反応してしまう置き換え型エラーおよびその逆のエラーの生起数を調べたところ、前者が 29、後者が 6 であった。これらの置き換え型エラーが生じたといえるかどうかを統計的に検討するため、1 サンプル t 検定により 0 との差を比較したところ、前者は有意であったが、後者は有意では

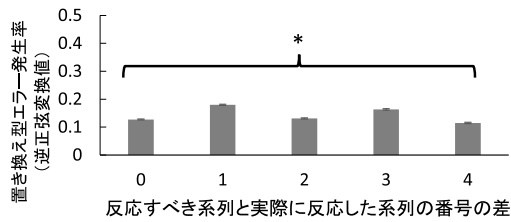


図 5 反応すべきセットと実際に反応したセットが属する系列の番号差に対する置き換え型エラー発生率

Fig. 5 The average number of substitutions in relation to the gap of sequence numbers between the to-be-responded set and the actually-responded set.

表 2 系列 2 セット 5 に対する他系列のセット 5 による置き換え型エラー発生数

Table 2 The number of substitutions of 5th set of the sequence 2 with 5th sets of other sequences.

	系列 1	系列 2	系列 3	系列 4	系列 5
発生数	0.25	-	0.94	1.81	0.06

表 3 再生テスト 2 の反応内訳

Table 3 The categorization of the responses in the reproduction test 2.

	正解	エラー	
		置き換え型	その他
生起数	3125	9	866
割合(%)	78	0.00	22

なかった (それぞれ, $t(15) = 2.65, p < .05, t(15) = 1.19, ns.$).

そこで, 系列 2 セット 5 に対する, 系列 4 を含む他系列のセット 5 による置き換え型エラー数の実験参加者間平均を表 2 に示す. 系列 4 セット 5 による置き換え型エラーの生起数が, 他の系列のセット 5 による置き換えに比べて多いかを検討するために, 系列 4 セット 5 による置き換え発生率と系列 1, 3, 5 のセット 5 による置き換えの平均発生率の逆正弦変換値を対象として, 対応のある t 検定を行ったところ, 有意差が見られた ($t(15) = 3.03, p < .01$).

(4) ボタン配置手がかりに従う置き換え型エラー数

系列 1 のセット 2 を反応すべきところ, 系列 3 のセット 4 を反応してしまう置き換え型エラーおよびその逆の生起数を調べたところ, 両方とも 0 であった.

3.2 再生テスト 2 におけるエラーの分析

(1) 置き換え型エラーの生起数

再生テスト 2 で生じた反応の内訳を表 3 に示す. 置き換え型エラーが生じたといえるかを検討するため, 1 サンプル t 検定により 0 との差を比較したところ, 有意傾向であった ($t(15) = 1.952, p = .058$). ただし, 発生した置き換え型エラー 9 個はすべて, 系列 1 セット 2 に対する系列 3 セット 4 からの置き換え型エラーであった.

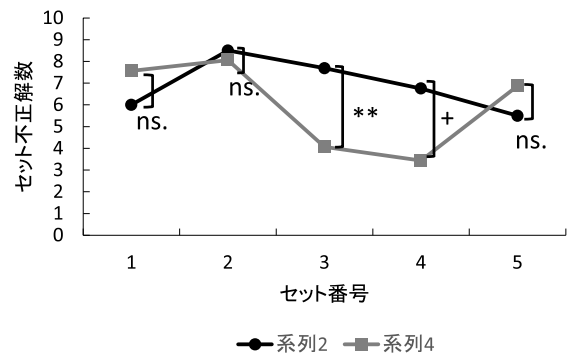


図 6 系列 2 および 4 の原学習におけるセット不正解数

Fig. 6 The number of incorrect responses occurred for each set of sequence 2 and 4 in the original learning.

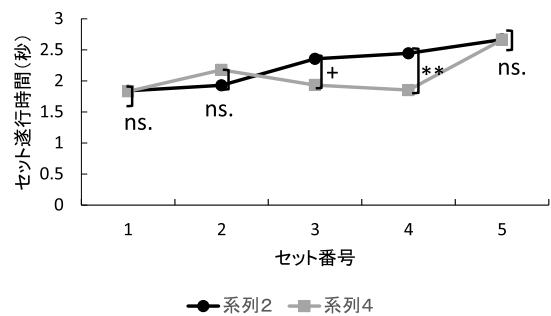


図 7 系列 2 および 4 の原学習におけるセット遂行時間

Fig. 7 The time required to perform a set of 4 button presses for each set of sequence 2 and 4 in the original learning.

3.3 異なる系列に含まれる同一セットの原学習成績の比較

(1) セット不正解数

系列 2 と系列 4 の原学習におけるセット不正解数の実験参加者間平均を図 6 に示す. なお, 実験後の内観報告において, 16 人中 10 人の実験参加者が 4 番目の系列の原学習の際に, すでに学習したセットと同一のセットが含まれていることに気づいたことを報告している.

これらの系列間で学習成績に差が見られるかをセットごとに比較するため, セット 1 からセット 5 までのセット不正解数を対象に, Wilcoxon の対応のある符号付順位和検定 (Bonferroni の修正による) を行ったところ, セット 3 については系列間に有意差が, セット 4 については有意傾向が見られた (それぞれ, $Z = 3.28, p < .01, Z = 2.52, p = .059$) が, その他のセットについては系列間に差が見られなかった (セット 1: $Z = 1.30, ns.$, セット 2: $Z = .031, ns.$, セット 5: $Z = 1.38, ns.$).

(2) セット遂行時間

系列 2 と系列 4 の各セットの遂行時間 (セットのボタン提示から第 4 ボタン押しまでに要した時間) を原学習最初の 5 試行で平均した値を図 7 に示す (実験参加者間平均). 系列間でセット遂行時間が異なるかどうかを検討するため, 系列とセットの 2 要因の繰返しのある分散分析を行ったところ, 系列の主効果は有意ではなく ($ns.$), セッ

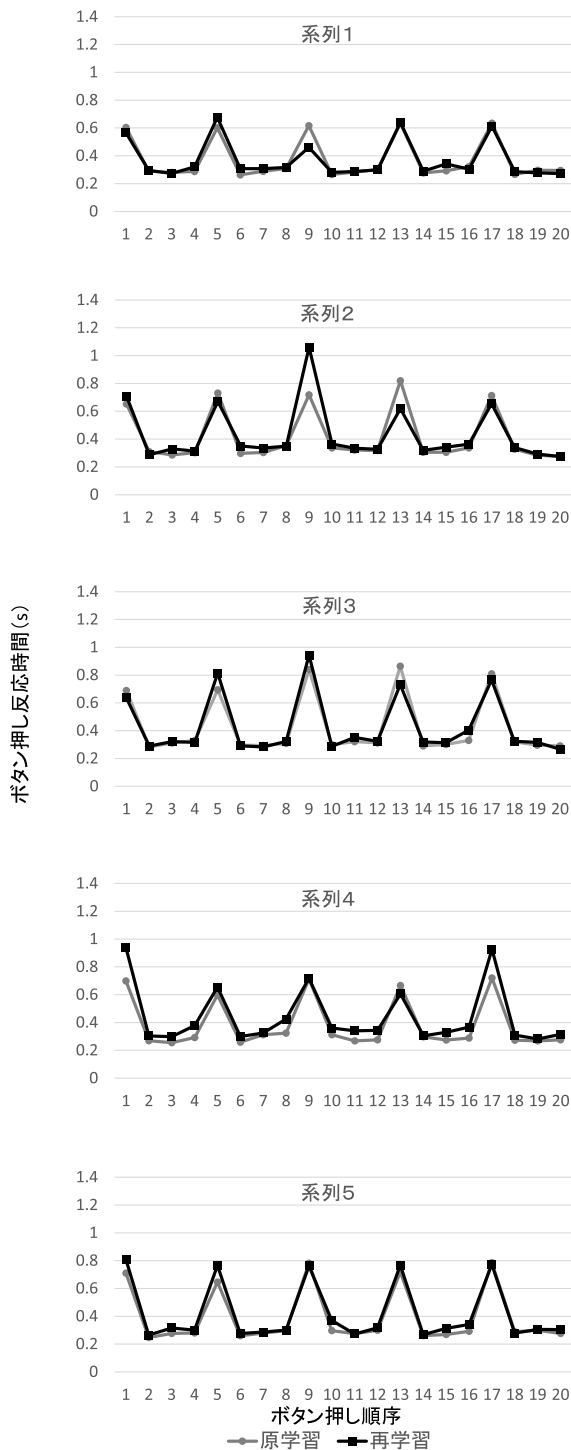


図 8 5 個の系列のボタン押しタイミング

Fig. 8 Reaction time for each button press for 5 sequences in the original learning and the relearning.

トの主効果は有意, そしてそれらの交互作用が有意傾向となった ($F(1, 15) = 1.23, ns., F(4, 60) = 8.77, p < .001, F(4, 60) = 2.49, p = .053$). 各セットにおける系列の単純主効果は, セット 1, 2 および 5 においては有意ではなく, セット 3 においては有意傾向 ($p = .053$), セット 4 においては有意となった ($p < .01$).

3.4 ボタン押しタイミングの分析

第 1 ボタンから第 20 ボタンまでのボタン押し反応時間を原学習および再学習の最終 5 試行で平均した値を図 8 に示す (実験参加者間平均).

森田 [3] は, $[4 \times 5]$ 課題のボタン押し系列が 1 セットを 1 チャンクとして記憶されることを示唆したが, 本実験においても 1 セット 1 チャンクを基本としてチャンク形成していたことを検証するため, 系列ごとに再学習のボタン押し反応時間を対象とし, セット内のボタン押し順序 (1 から 4) を要因として, 繰返しのある分散分析を行ったところ, すべての系列においてボタン押しの主効果が見られた (系列 1 から順番に, $F(3, 177) = 50.7, p < .01; F(3, 237) = 47.0, p < .01; F(3, 237) = 65.4, p < .01; F(3, 222) = 64.9, p < .001; F(3, 177) = 87.7, p < .01$; Bonferroni の修正による). セット内における多重比較の結果 (Bonferroni の修正による), 第 1 ボタンと他の 3 つのボタンの間に有意差があり ($p < .01$), その他の対の間には有意差がなかった ($ns.$).

4. 考察

セット単位での置き換え型エラーが生じるかどうか, また構造的手がかり, 連合手がかり, ボタン配置手がかりが置き換え型エラー発生 of 要因となるかを検討するため, 5 個の系列について, ボタン配置手がかりに基づく原学習と記憶に基づく再学習を行い, その後, これらの系列の再生テストを行った.

その結果, 再生テスト 1 において, 置き換え型エラーが有意に生じた. ここでは, 再生すべき系列を指定するために第 1 セットのボタンを点灯したが, その後のセットのボタンは点灯しなかった. このような条件下でボタン押しを実行するためには, その系列の個々のセットのボタン押し順序を記憶しているに加えて, 次に実行すべきセットを正しく選択できることが必要である. 置き換え型エラーが生じたことは, セットのボタン押しを記憶しているが, 誤った文脈で選択して実行することがあることを示す.

置き換え型エラーの反応すべきセットと実際に反応したセットの番号の関係性を調べたところ, 番号が一致するエラーが, 番号の差が 1, 2, 3, あるいは 4 となるエラーに比べて有意に多く, また, 番号差が 1 のエラーは, 差が 2 のエラーに比べて有意傾向, 3, 4 のエラーに比べて有意に多かった. 一方, 反応すべきセットと実際に反応したセットのそれぞれが属する系列の番号の関係については, 番号の差の要因が有意であったが, 番号が一致するエラー数が多いという関係は見られなかった. つまり, 置き換え型エラー発生率において, セット番号一致の影響が見られたが, 系列一致の影響は見られなかった. したがって, セットの選択に際して, 構造的手がかりのうちセット番号の手がかりが働くことが示唆されるが, 系列の手がかりが働くこと

は本実験の結果からは示唆されない*1。

次に、先行するセットが同一の系列2と系列4のセット5 どちらの置き換え型エラーが生じるかどうかを調べたところ、系列2セット5を反応すべきところ系列4セット5を反応してしまうエラーが有意に生じた。このエラーは、上記のセット番号手がかりに従う置き換え型エラーともいえるが、他の系列のセット5からの置き換え型エラーに比べて生起数が有意に多かったことから、セット番号の手がかりに加えて、直前セットとの結び付きによる連合手がかりが働いたと考えられる。一方、逆のパターン、すなわち系列4セット5を反応すべきところ、系列2セット5を反応してしまうエラーが生じなかったことについては、学習の順序が関係していると考えられる。最初に学習したセットのボタン押しの記憶や連合関係の記憶に比べ、後で学習したセットや連合関係の記憶はより良く保持されていたためではないかと考えられる。以上より、セット選択に際して、連合手がかりが働くことが示唆される。

再生テスト2では、すべてのセットでボタンが点灯したため、同じボタン配置でボタン押し順序が異なる系列1セット2と系列3セット4の間を除き、置き換え型エラーは生じなかった。これらのセット間では、系列1セット2に対する系列3セット4からの置き換えが有意に生じたことから、セットのボタン点灯パターンがそのセットのボタン押しを想起する手がかりとして働くことが示唆される。一方、逆パターンである系列3セット4に対する系列1セット2からの置き換えが生じなかったことは、やはり学習順序が関係しており、後で学習したセットの方がより良く保持されていたためと考えられる。以上のように、ボタン配置手がかりに依存した置き換え型エラーが見られたが、その生起数が多くなかったことから、ボタン配置手がかりは決定的な役割を果たすわけではなく、他の手がかり、すなわち構造的手がかりや連合手がかりとともに用いられることが示唆される。本実験のように、ボタンの点灯なしに系列を正しく押せるまで学習した場合には、ボタン配置手がかりへの依存度が低下するという可能性も考えられる。

セットのボタン押しの記憶が、その系列の一部として保持されるのか、それとも他系列でも利用可能な形で保持さ

れるのかを検討するため、系列2と系列4の原学習初期のセット不正解数およびセット遂行時間を比較した。セット不正解数について、セット1, 2および5には系列間の有意差が見られなかったのに対し、セット3と4には系列間の有意差または有意傾向が見られた。また、セット遂行時間についても、セット1, 2および5には系列間の有意差が見られなかったのに対し、セット3と4には系列間の有意傾向または有意差が見られた。このように、系列4の原学習において、セット3および4は、試行錯誤のエラーを起こす回数が少なくまた最初から遂行速度が速かったことから、これらのセットは系列4において新たに学習されたのではなく、系列2の学習により形成された記憶痕跡を利用して再学習されたと考えられる。ここから、セットの記憶表現が、系列から独立した記憶表象として、後の系列でも使用されることが示唆される。

最後に、本実験におけるセットとチャンクの関係を検討するため、再学習の20回のボタン押しタイミングを分析した。その結果、すべての系列について、セット内の第1ボタンは他のボタンより反応時間が長く、他の3ボタンの間に反応時間の差がなかった。したがって、1個のセットを1個のチャンクとする体制化を基本として系列が記憶されたと考えられる。

5. 総合考察

我々は日々、様々な運動系列を実行している。運動系列の記憶は階層構造を持ち、その実行は階層的に制御されると考えられている [4]。本研究は、このような階層構造の中間の階層において、次のチャンクをどのような手がかりに基づき選択しているかを調べることを目的とした。そのために、ボタン押し、セット、系列という3階層の構造を持つ [4×5] 連続ボタン押し課題の学習と再生テストからなる実験を行った。[4×5] 課題では、多くの場合セットとチャンクが一致すると仮定されるため、ここでセット選択に関して得られた結果は、チャンク選択の性質を反映すると考えられる。実際に、再学習のタイミング分析から、1セットが1チャンクという基本パターンが確認された。

実験結果は、次に実行すべきチャンクが、構造的手がかりや連合関係の手がかりに基づき選択されることを示した。そして、置き換え型エラーの多くが異なる系列に属する同一番号のセット間で生じていたことから、セット番号の手がかりが働くことが示唆される。再生テスト2において、同一ボタン配置のセット間で置き換え型エラーが生じたことから、ボタン配置を手がかりに、異なる系列の異なるセット番号のセットを実行してしまうことがあることが分かる。再生テスト1においてこのようなエラーが見られなかったことから、ボタン配置の視空間的記憶よりも、この系列のこの番号のセットではこのように指を動かすという運動系の記憶に依存してボタン押しを行っていた可能性

*1 実験結果に示したように、番号が一致するセットどちらの置き換え型エラーは、番号の異なるセットどちらの置き換え型エラーに比べて発生率が有意に高いという統計結果が得られた。しかし、図4を見ると、特にセット5 どちらの置き換え型エラーが多いことから、連合に従う置き換え型エラーが含まれていることが影響している可能性が疑われる。また、系列2と系列4の間でセット3, 4が同一であることが何らかの影響を及ぼしている可能性も否定できない。そこで、系列2と系列4における置き換え型エラーを除いて、発生率を対象とした繰返しのある1要因分散分析を行ったところ、番号の差の主効果が有意となり ($F(4, 60) = 12.7, p < .001$)、多重比較の結果、番号差0と1の間に有意傾向 ($p = .08$)、番号差0と2, 3, 4の間に有意差 ($p < .05$) が見られ、それ以外には有意差は見られなかった。したがって、連合に従う置き換え型エラーの影響などを除いても番号が一致するセットどちらの置き換え型エラーが多いことが分かる。

も考えられる。

本実験の学習レベルは、連続ボタン押し課題を用いた他の研究との比較から、学習初期から中期段階にあたりと考えられる [10]。この学習段階における連続的運動の記憶と実行に関して、実験結果から次のようなモデルが考えられる。(1) 学習により形成されたチャンクの記憶表象は、学習時の系列から独立に保持され、他の系列実行時に用いられることもある。(2) チャンクの記憶表象にはボタン押し順序に加えて、それがどのような実行段階で実行されるものかという情報も含まれる。(3) 系列再生時には、その進行状況に従い、実行段階に対応するチャンクのグループの中から適切なものが選択され、実行される。(4) 選択の際に、連合の手がかりやボタン配置パターンを含むその他の文脈手がかりも用いられる。

すでに述べたように、Salthouse [11] は、タイピング課題を用いた実験において、押すべき文字とは異なる文字を誤って押してしまう置き換え型エラーを報告しているが、これは非熟練者がよく犯す誤りで、誤って隣のキーを押してしまうような末梢的な運動ミスであり、中枢における運動順序制御の問題ではないとしている。これに対し、本研究で報告する置き換え型エラーは、中間階層のチャンクがそっくりそのまま別のところで実行される現象であり、末梢的な運動ミスとは考えにくい。Sternberg [8] は、1 から 5 文字程度のアルファベットからなる系列を数秒間の遅延においてタイピングさせる課題を用いた実験結果などから、系列再生のメカニズムについて、(1) あらかじめ実行する可能性のある運動プログラムをすべて読み込み、(2) それらの中から実行時に探索・選択して実行するが、(3) いったん使用したプログラムもバッファから削除せず次回また探索するという仮説を提案している。また、Henson ら [12] は、文字系列の直後再生実験において Fill-in 効果が見られたことから、連合手がかりが用いられないと主張している。これらの先行研究では、提示された短い系列を直後あるいは数秒の遅延後に実行する課題を用いて運動の作業記憶を調べていると考えられるのに対し、本研究は、3 階層の構造を持つ系列を繰り返し学習することにより獲得される、初期から中期段階の手続き記憶を調べている。そして、その中間的階層に注目することにより、先行研究と異なり、末梢的ミスとは考えにくい置き換え型エラーの存在や、実行段階の手がかりの存在、連合手がかりが働く可能性をとらえたところに意義がある。

系列的手続きの学習効率に個人差があること、またそれが視覚作業記憶の容量と相関を持つことが知られている [13]。本実験の結果は、19 人の実験参加者のうち、3 系列以上達成できた 16 人の実験参加者の結果をまとめたものである。したがって、以上の考察は、学習効率や作業記憶容量の個人差と関係する可能性があり、特に学習効率の低い個人においても成立するかについては今後検討の余地がある。

6. 結論

系列的手続きの実行は階層的に制御されると考えられているが、そのメカニズムは、ボタンを特定のパターンで押すような単純な運動系列を用いて調べられてきた。本研究は、ボタン押し、セット、系列全体という階層構造を持つ運動系列を学習する連続ボタン押し課題を用い、中間的階層にあたるセットの選択におけるエラーを分析することにより、チャンク選択の手がかりを検討した。その結果、チャンクの実行段階に関する構造的な手がかりや、チャンク間の連合手がかり、ボタン配置手がかりなどが用いられることが示唆された。

7. 今後の課題と展望

夕食を食べることを目的として寝室に行ったのに、ベッドに入ってしまう Capture error について、本研究で得られた知見を基に考えると、異なる系列間の同じ実行段階の中間階層ユニットどうし（たとえば、居間から寝室に移動した後、「部屋着に着替える」と「パジャマに着替える」）が置き換わったことが原因で生じ、その後、連合手がかりにより誤った行動を続けてしまったと説明できる。これに対して、異なる実行段階の中間階層ユニットとの間、たとえば寝室において開始する一連の行動の最初の中間階層ユニット（寝室にしまっているレターセットを取り出して手紙を書き始めるとか、ノート PC を開いてメールチェックを始めるとか）と置き換わってしまう Capture error は生じにくいことが予想される。今後は、このような予想を検証することや、構造的手がかりと連合手がかりの優先度の関係およびチャンクの実行段階の情報がどのような形で保持されるかを解明することが課題となる。

情報機器を設計する際、それを用いる人間の認知特性を知り、それにふさわしい設計をすることは重要である。Nielsen によると、情報機器を含むシステムのユーザビリティは、学習しやすさ、使いやすさ、記憶しやすさ、エラーの少なさ、主観的満足度により決まる [14]。本研究および森田 [3] は、タッチ入力に従い画面が遷移していくタイプの機器のユーザビリティに関する人間の認知特性を検討した。森田 [3] は、1 画面で押すべきボタン数が一連のボタン押しの実行しやすさに与える影響を、遂行の速やかさや記憶の堅固さの側面から調べた。これに対し本研究は、ある程度慣れたボタン押しの流れの中でどのようなエラーが生じるかについて調べた。その結果、同じ実行段階の画面における操作間で取り違えて操作するエラーが生じやすいことが明らかになった。

本研究の結果から、操作者は同じ段階において行うことのできる入力操作をまとめて保持する可能性が示唆され、それらの操作どうしの置き換え型エラーを防ぐ工夫の必要性が指摘される。ここから、情報機器のユーザビリティに

関して、構造化を促すような設計により学習しやすさや記憶しやすさを向上させられる可能性や、現在実行しようとしている操作系列の手がかりをすべての画面で一貫して与えるなどの工夫により、置き換え型エラーを減少させられる可能性が示唆される。

謝辞 実験を行った坂田正伸氏に謝意を表す。本研究は JSPS 科研費 22530787 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Nissen, M.J. and Bullemer, P.: Attentional Requirements of Learning: Evidence from Performance Measures, *Cognitive Psychology*, Vol.19, pp.1–32 (1987).
- [2] Sakai, K., Kitaguchi, K. and Hikosaka, O.: Chunking during Human Visuomotor Sequence Learning, *Experimental Brain Research*, Vol.152, pp.229–242 (2003).
- [3] 森田ひろみ：タッチパネルボタンの階層構造が連続ボタン押しの効率に与える影響, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.3, pp.1212–1221 (2014).
- [4] Rosenbaum, D.A., Kenny, S.B. and Derr, M.A.: Hierarchical Control of Rapid Movement Sequences, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol.9, No.1, pp.86–102 (1983).
- [5] Rhodes, B.J., Bullock, D., Verwey, W.B., Averbeck, B.B. and Page, M.P.A.: Learning and Production of Movement Sequences: Behavioral, Neurophysiological, and Modeling Perspectives, *Human Movement Science*, Vol.23, pp.699–746 (2004).
- [6] Norman, D.A.: Categorization of Action Slips, *Psychological Review*, Vol.81, No.1, pp.1–15 (1981).
- [7] Botvinick, M.M. and Bylsma, L.M.: Distraction and Action Slips in an Everyday Task: Evidence for a Dynamic Representation of Task Context, *Psychonomic Bulletin & Review*, Vol.12, No.6, pp.1011–1017 (2005).
- [8] Stelmach, G. (Ed.): Information Processing in Motor Control and Learning, *The Latency and Duration of Rapid Movement Sequences: Comparisons of Speech and Typewriting*, Sternberg, S., Monsell, S., Knoll, R.L. and Wright, C.E., pp.117–152, Academic Press (1978).
- [9] Verwey, W.B.: Processing Modes and Parallel Processors in Producing Familiar Keying Sequences, *Psychological Research*, Vol.67, pp.106–122 (2003).
- [10] Hikosaka, O., Nakahara, H., Rand, M.K., Sakai, K., Lu, X., Nakamura, K., Miyachi, S. and Doya, K.: Parallel Neural Networks for Learning Sequential Procedures, *Trends in Neurosciences*, Vol.22, No.10, pp.464–471 (1999).
- [11] Salthouse, T.A.: Perceptual, Cognitive, and Motoric Aspects of Transcription Typing, *Psychological Bulletin*, Vol.99, No.3, pp.303–319 (1986).
- [12] Henson, R.N., Norris, D.G., Page, M.P.A. and Baddeley, A.D.: Unchained Memory: Error Patterns Rule out Chaining Models of Immediate Serial Recall, *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol.49A, No.1, pp.80–115 (1996).
- [13] Bo, J. and Seiler, R.D.: Visuospatial Working Memory Capacity Predicts the Organization of Acquired Explicit Motor Sequence, *Journal of Neurophysiology*, Vol.101, pp.3116–3125 (2009).
- [14] Nielsen, J.: *Usability Engineering*, Academic Press (1994).



森田 ひろみ (正会員)

1994年東京大学大学院人文科学研究科心理学専攻博士課程単位取得退学。2002年筑波大学図書館情報学系講師。現在、筑波大学図書館情報メディア系准教授。日本心理学会、日本認知科学会会員。博士(心理学)。



村松 陽太郎 (学生会員)

1994年生。2016年筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒業。同大学大学院図書館情報メディア研究科博士前期課程在学中。