

ロボットハンドによる運動教示が 指運動の巧緻性にもたらす効果

筑波大学大学院 上 林 清 孝
(共同研究者) 同 長谷川 泰 久
同 河 本 浩 明
同 衣 川 慶

Effect of Robotic Hand-Assisted Motion on Skilled Finger Movements

by

Kiyotaka Kamibayashi, Yasuhisa Hasegawa,
Hiroaki Kawamoto, Kei Kinugawa
University of Tsukuba

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the effect of robot-assisted passive training on the performance of complex finger tapping. The subjects were healthy adults; they were divided into 2 groups. During the training session, one group underwent robot-assisted passive tapping training (passive training group), and another group did not move their fingers (control group). In one training session, passive finger tapping in a fixed sequence (little-index-ring-little-middle finger) at 2 Hz for 20 s was performed 10 times in the passive training group. The subjects underwent 6 training sessions. The maximum tapping frequency of the finger sequence used in the passive training and of another finger sequence was measured for 20 s before and after each training session. At the first and second training sessions, the mean number of maximum tapping frequency at the finger sequence used in the passive training for the passive training group was significantly greater after the training session than before the training session. The effect of passive training on the fastest tapping frequency, however, was reduced slightly before the next training session. It was suggested that passive tapping with the assistance of the robotic

hand might have a short-term effect after passive training at early training sessions in the present experimental condition.

要 旨

本研究では、複雑な系列の指タッピング運動をロボットハンドによって受動的に繰り返すことで、タッピングのパフォーマンスに効果をもたらすか調べることを目的とした。被験者は健常成人で、訓練セッション中に受動タッピングを行う受動訓練群と指を動かさないコントロール群に5名ずつ振り分けた。1回の訓練セッションで、受動訓練群には、2Hzで小指—示指—環指—小指—中指の系列からなる20秒間の受動タッピングが10セット行われた。訓練セッションは計6回実施した。訓練セッションの前後には、受動訓練と同じ系列ともう1つ別の系列にて、20秒間の最速タッピングを測定した。1, 2回目の訓練セッションで、受動訓練群による受動訓練の系列での平均タッピング数は、セッション前に比べてセッション後に有意に増加した。しかし、セッション後のタッピングパフォーマンスは、次のセッション開始前にはわずかに低下していた。今回の実験条件では、ロボットハンドによる受動タッピングが訓練セッションの初期にパフォーマンスを高めるが、短期的な効果であることが示唆された。

緒 言

パーソナルコンピュータのキーボードタイピングでは両手指の複雑な連続運動が要求され、初めのうちは難しく感じられる。しかし、その動作を繰り返し行うことによって、運動を強く意識することなしに、速く正確にタイプできるようになる。近年、このような運動学習の神経機構に関して、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) や陽電子放射断層撮影法 (PET) などの脳機能イメージングを用

いた研究が盛んに行われており、多くの知見が得られている^{2,4,6,7,8,10}。Kerniら⁷)は、複雑な順序による母指と他の4指との対立運動を速く正確に遂行できるよう数週間練習した場合、一次運動野の賦活領域が訓練期間に応じて変化することを報告している。また、正誤フィードバックを受けながら探索的に正しい順序でのボタン押しを学習している際には前頭前野、運動前野、小脳などの複数の領域で活動が高まる一方、補足運動野はすでに学習した順序でのボタン押しで活性が高いことが報告されている⁶。このように運動学習の過程では脳の様々な領域が可塑的に変化するものと考えられ、そのプロセスは早い学習期、ゆっくりとした学習期、学習保持期の3段階でモデル化されている⁴。

このうち運動学習の初期には、運動パターンが確立されておらず、体性感覚情報に強く依存しながら運動を実行しているため、感覚入力が運動学習に重要な役割を果たしているものと推察される。他動的に動かされる受動運動では随意的な運動コマンドを必要としないが、脳機能イメージング研究から運動関連領域の賦活化や可塑的変化が示されている^{2,3,9,16}。さらに、感覚神経を反復的に電気刺激することによっても運動野の興奮性が高まることが報告されており^{12,15}、体性感覚入力に起因した脳の賦活化や可塑的変化が明らかになってきている。しかしながら、受動運動による体性感覚の入力が運動スキルの向上を引き起こすかについては、これまでほとんど調べられていない。

そこで本研究では、連続的運動学習の代表的なパラダイムである手指の系列タッピングを巧緻的な運動課題とし、ロボットハンドによる受動運動がタッピングのパフォーマンスに及ぼす効果を調

べることを目的とした。

1. 方法

1.1 被験者

被験者は、神経疾患の既往歴がない健常な成人男性10名、女性1名の計11名（年齢 23.0 ± 1.3 歳、身長 170.6 ± 5.7 cm、体重 60.5 ± 9.2 kg）であった。実験参加にあたり、被験者には本研究の目的や方法などを十分に説明し理解させた上で、書面より実験参加の同意を得た。被験者の利き手調査にはエディンバラ利き手テスト¹¹⁾を用い、全被験者を右利きと判定した。

1.2 実験プロトコル

被験者は、空気圧で駆動するロボットハンドによる受動的なタッピングを行う受動訓練群と指を動かさないコントロール群の2群へランダムに振り分けられた。男性被験者1名が指の怪我で実験を継続できなくなったため、各群5名ずつとなった。

示指を1、中指を2、環指を3、小指を4と割り当て、受動訓練では4-1-3-4-2のタッピング順序（系列A）にてロボットハンドによる非利き手のタッピング運動を行った（図1A）。タッピング周波数は2 Hzで、20秒間のタッピングを1セットとした。セット間には40秒間の休息をはさみ、10セットを1日の訓練セッションで実施した（図1B）。タッピングボタンの前方に提示した4つのLEDが各指のタッピングタイミングで点灯するため、受動タッピング中にそのLEDを注視し、手指はリラックスするよう被験者に指示した（図2A）。コントロール群では受動タッピングを行わず、ロボットハンドを装着した状態にて、系列Aの順番に2 Hzで点灯するLEDを注視するよう指示された。受動訓練群と同様に、40秒の休息をはさみながら、20秒間のLED注視を10セット繰り返し、1日の訓練セッションとした（図1B）。全被験者が、週2日の頻度で3週間、計6回の訓練セッションに参加した。

毎回の訓練セッション前後には、各被験者のタ

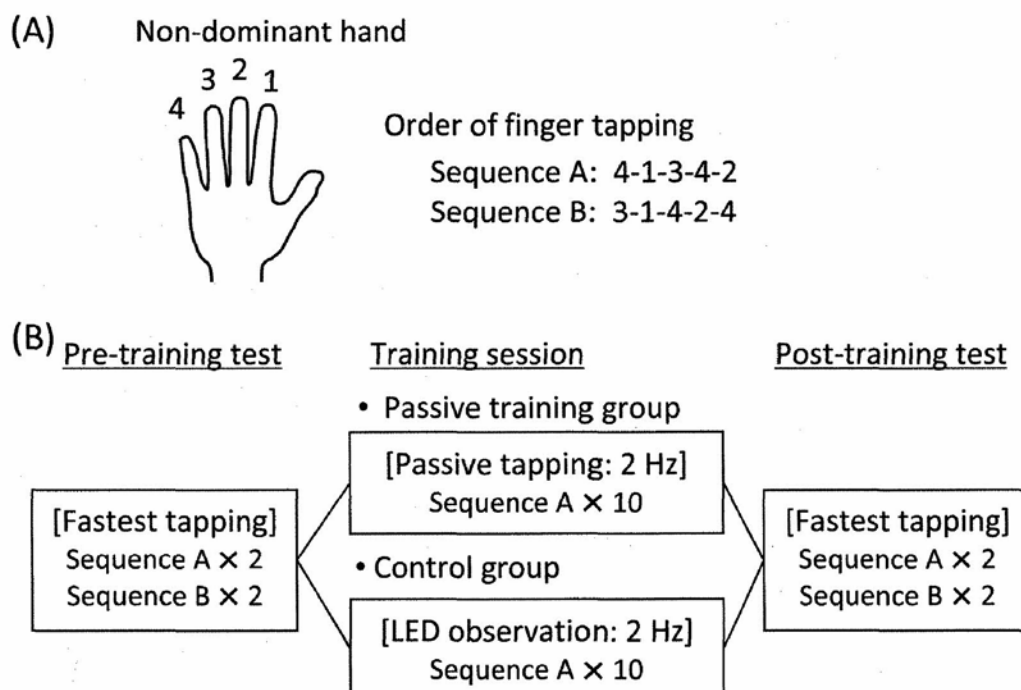


図1 (A) 左手（非利き手）4指の番号付けと2種類の指タッピング系列、(B) 1回の測定における実験プロトコル

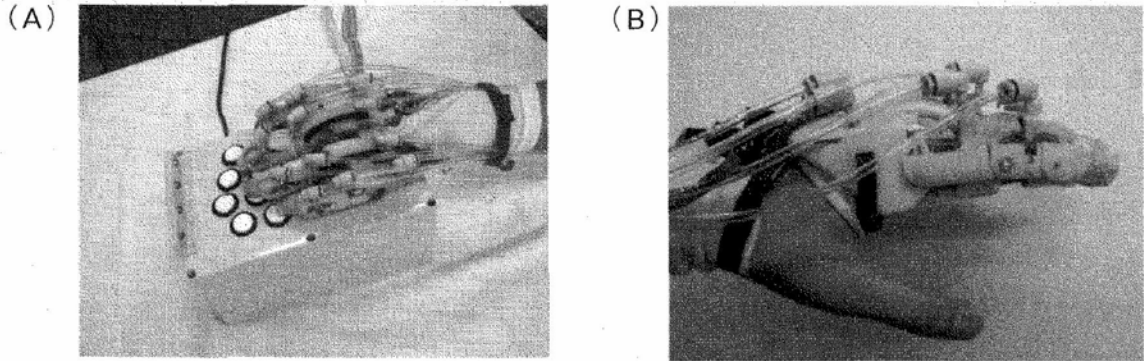


図2 (A) 指タッピングを支援するロボットハンドとタッピングボタン, (B) ロボットハンドの側面

タッピング能力を評価する目的で、20秒間の最速タッピングでのボタン押し回数を測定した。タッピングの指順序は、受動訓練と同じ系列Aとそれとは異なった3-1-4-2-4（系列B）の2つとし、各系列のタッピングを2回ずつランダムに実施した（図1 A, B）。被験者にはできる限り速く正確にタッピングを20秒間繰り返すように指示した。訓練セッション前（Pre）の測定、訓練セッション、訓練セッション後（Post）の測定からなる1回の実験時間は、およそ40分であった。

1. 3 ロボットハンドの仕様

本研究では、示指から小指の4指を独立にタッピング運動支援できる自作の外骨格型ロボットハンドを使用した。外骨格の甲側にある差し込み口にエアコンプレッサから空気を送り、空気圧でスライダを押し出すことでハンドの関節部を屈曲させた（図2 B）。中手指節関節は独立で、近位指節間関節と遠位指節間関節は連動して駆動するシステムで、ロボットハンドの装着にはベルクロテープと指用・手首用サポータを用いた（図2 A, B）。ロボットハンドを装着した状態で、2atmの空気圧にて6 Hzの受動的なタッピングが可能であった。

1. 4 測定項目

実験中、非利き手の浅指屈筋（flexor digitorum

superficialis: FDS）と指伸筋（extensor digitorum communis: ED）から表面電極（F-150S, 日本光電社製）によって筋活動を双極導出した。筋電図信号は1000倍に増幅し、5-1000 Hzでバンドパスフィルタ処理した（MEG-6108/ AB-611J, 日本光電社製）。訓練セッション中、随意的な筋活動が生じないように、被験者前方のオシロスコープ（TDS2014B, テクトロニクス社製）に筋電波形を提示した。指先位置に配置したボタン（直径20 mm）より出力される5 Vの信号を基に、各指のタッピング回数を算出した。筋活動信号と各指のボタン信号はA/D変換器（Micro1401, CED社製）を介して2 kHzでパーソナルコンピュータに記録し、オフラインで解析した。

1. 5 データ解析および統計処理

訓練セッション前後に記録した最速タッピングのパフォーマンスは、20秒間に正しいタッピング順序で行ったタッピング数（各指のタッピング数を合計）によって試行ごとに評価した。また、正確性を評価するため、順番を間違えたタッピング数を正確な順で行ったタッピング数で除すことにより、エラー率を算出した。

各測定データは、平均±標準偏差で示した。統計解析として、2要因または1要因の差の検定には反復測定による分散分析を行い、有意差が認められた場合にはTukey's HSD法による多重比較を

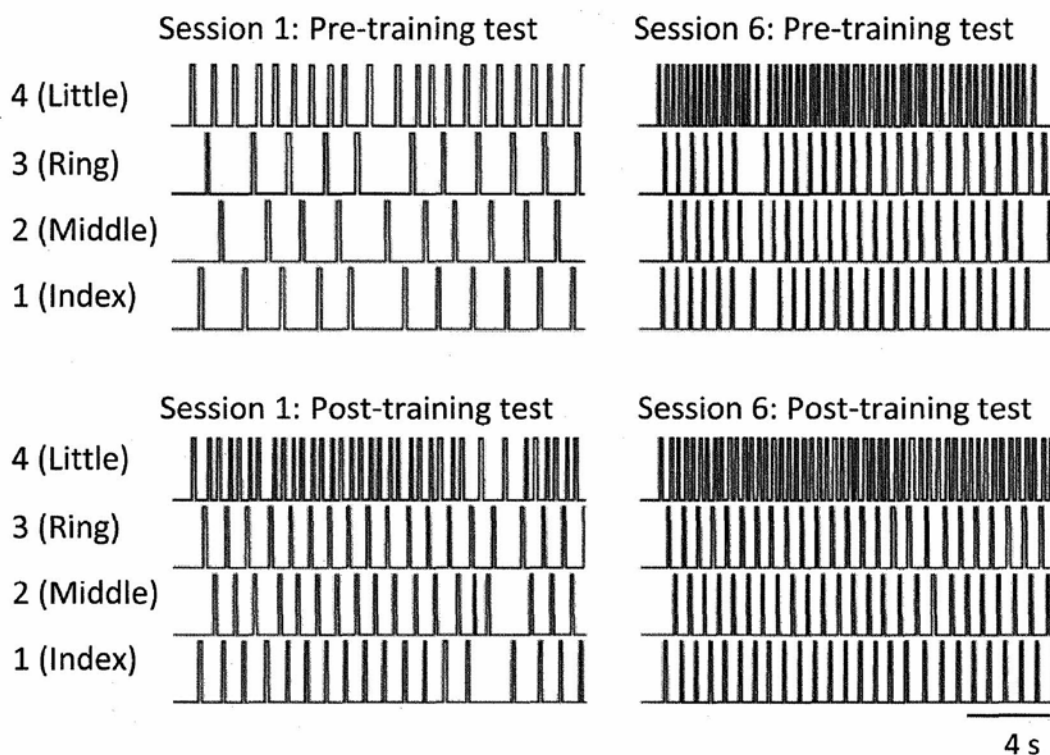


図3 受動訓練群の被験者1名で、初回と6回目のセッション前後に記録した最速タッピング(系列A)によるボタン信号の典型例

行った。また、対応のある標本の検定には Wilcoxon の符号付順位和検定を用いた。いずれも有意水準は危険率5%未満とした。

2. 結果

図3には、受動訓練群の1名の被験者で、系列Aでの最速タッピング時に記録したボタン信号の典型例を示した。左図は初回訓練セッションのPreとPostにおける記録で、20秒間のタッピング数はPre(54回)からPost(88回)で増加した。Postの測定においてボタンの押し間違いが2回みられ、エラー率は2.3%であった。右図は6回目の訓練セッションの結果で、タッピング数はPreで120回(エラー率3.3%)、Postで127回(エラー率0%)であった。

図4は、各セッションのPreとPostで2回ずつ測定した最速タッピングのタッピング数を平均した結果である。初回セッション前の平均タッピング数を2元配置分散分析(系列×被験者群)で解析したところ、系列に主効果($F_{1,8}=36.7, P<0.01$)

がみられたが、被験者群の主効果や交互作用は有意でなかった。したがって、実験開始段階で系列Aは系列Bよりも困難なタッピング課題であったが、被験者群間でタッピング能力に有意な差は認められなかった。

Preで測定した系列Aの平均タッピング数は、受講訓練群、コントロール群ともに、初回訓練セッションに比べて、それ以降の全セッションにおいて有意に増加した($P<0.01$, 図4)。2回目のセッションと比較しても、4~6回目のセッションにおけるタッピング数は有意な増加を示した(受講訓練群でのセッション2 vs 4: $P<0.05$, それ以外: $P<0.01$)。コントロール群では3回目のセッションに比べて4回目以降のセッションにおいても有意な差がみられた(セッション3 vs 4, 5: $P<0.05$, 3 vs 6: $P<0.01$)。また、Preの系列Bでも両被験者群で、初回訓練セッションに比べて、3回目以降のセッションでタッピング数は有意な増加を示した($P<0.01$, 図4)。さらに、2回目セッションと比較して5・6回目セッションで有意な増加が生

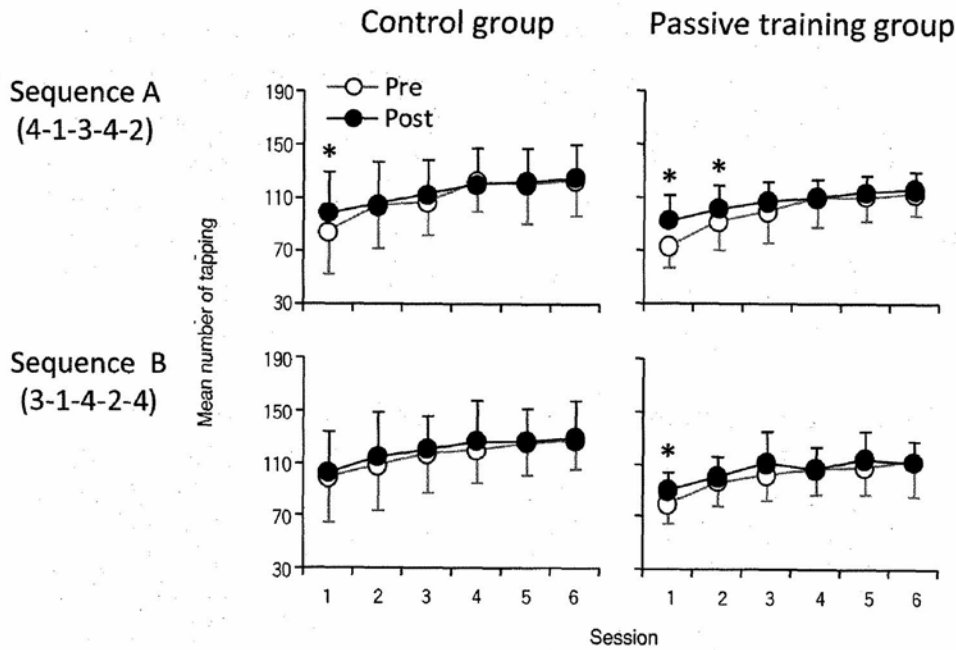


図4 訓練セッション前 (Pre) と後 (Post) に測定したコントロール群 (Control group) と受動訓練群 (Passive training group) での最速タッピング時の平均タッピング数 (上図: 系列A, 下図: 系列B) *: $P < 0.05$ Pre vs Post

じた (受動訓練群でのセッション 2 vs 5: $P < 0.05$, それ以外 $P < 0.01$).

測定時 (Pre, Post) とセッション (1 - 6) の因子で2元配置分散分析を行ったところ, 受動訓練群の系列Aでは, 測定時 ($F_{1,4}=15.4, P < 0.05$), 訓練セッション ($F_{5,20}=17.7, P < 0.01$) に加え, 交互作用 ($F_{5,20}=6.5, P < 0.05$) も有意となった. したがって, 受動訓練群による系列Aのタッピングでは, タッピング数の増加パターンが6回の訓練セッションを通じてPreとPostで異なっていることが示唆された. 一方, 受動訓練群の系列Bやコントロール群のAとBの両系列では交互作用は認められず, 受動訓練群の系列Aに特異的な結果であった.

続いて, セッションごとに平均タッピング数をPreとPostで比較したところ, 初回セッションの受動訓練群では系列Aと系列Bにおいて, コントロール群では系列AにおいてのみPostで有意な増加がみられた ($P < 0.05$, 図4). 特に, 受動訓練群の系列Aにおいて, Postでの回数増加が顕著であった. また, 2回目のセッション前後の比較においても, 受動訓練群の系列Aで有意な変化が

生じた ($P < 0.05$). このように, 訓練の初期段階において, セッション後のタッピング数が受動タッピングを行った条件でより増加することが示唆された. しかし, このPostで増加したタッピング回数は次回セッションのPre測定時にはわずかに減少していた.

一方, 最速タッピング時のエラー率に関しては, 系列間や被験者群間で明らかな差はみられなかった. また, 訓練セッションを通じた経時的な変化も認められなかった.

図5は, 各条件で2回測定した最速タッピングのうち, タッピング数の多かったデータを最大タッピング数として解析した結果である. 系列ごとに初回セッションのPreでの回数を100%に標準化し, 最大タッピング数の増加率を被験者群間で比較した. 系列Aにおいて, Preでの最大タッピング数の増加率は被験者群間に差はほとんどみられなかったが, Postではコントロール群に比べて受動訓練群で大きな値を示した (図5上). しかし, 被験者群とセッションの因子による2元配置分散分析の結果は, Pre, Postともにセッションの主効果のみで ($F_{5,40}=27.2, 11.6; P < 0.01$), 被験

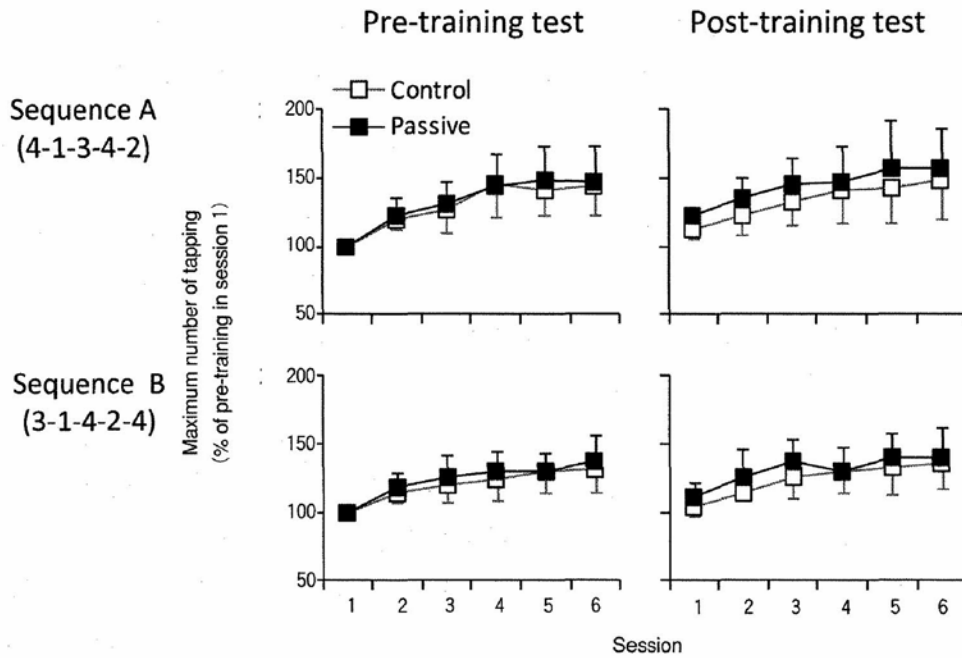


図5 訓練セッション前 (Pre-training test) と後 (Post-training test) におけるコントロール群 (Control group) と受動訓練群 (Passive training group) での最大タッピング数の変化 (上図: 系列 A, 下図: 系列 B) 系列ごとに初回セッション前の最大タッピング数にて標準化した

者群間に有意な差はみられなかった。さらに、系列 B においても、Pre と Post の両方でセッション因子による主効果のみが認められた ($F_{5,40}=24.9, 22.2; P<0.01$, 図 5 下)。このように、系列 B でもまた最大タッピング数はセッションを通じて増加し、被験者群間でその向上割合に有意差は観察されなかった。

3. 考 察

ヒトの手指は、解剖学的要因だけでなく神経系の側面からも独立した指運動が非常に困難とされるが¹³⁾、複雑な運動プログラムが要求されるピアニストでは健常者に比べてタッピング能力が高いように、指運動にも訓練効果がみられる⁵⁾。

本研究の受動訓練群は、1回の訓練セッション内に、系列 A での 20 秒間の受動タッピングを 10 セット繰り返した。その系列の Pre での最速タッピングは、初回の訓練セッションと比較して以降のセッションで、2 回目のセッションに比べて 4 ~ 6 回目のセッションで有意な増加を示した。指の対立運動による学習効果は訓練で経験したパターンに依存することが知られているが⁸⁾、本研究

では受動訓練群の系列 B でもセッションを通じてタッピングスキルの向上がみられた。さらに、受動タッピングを行わなかったコントロール群の Pre においても、A と B の両系列でタッピング数がセッション間で有意に変化した。受動訓練群の系列 B におけるタッピング回数増加の要因として、タッピングを繰り返す際に系列 A と B には共通部分 (4-2-4) が存在するため、系列 A で生じた訓練効果が系列 B でも一部関係した可能性があげられる。一方、コントロール群の系列 A や B については、LED を注視している際の運動イメージによる効果が考えられるが、この効果からパフォーマンスの向上を説明することは困難なように思われる。コントロール群での系列 B では、訓練セッション前後での早い学習期によるパフォーマンス向上よりも、訓練セッション間でのゆっくりとした学習期にパフォーマンスがより向上した (図 4 左下)。受動訓練群だけでなくコントロール群でも両系列に生じたタッピングの向上は、Pre と Post で実施した最速タッピングの運動経験自体が学習効果として関連したのではないかと推察される。2 Hz で 20 秒間を 10 セット行った受動運動に

よる効果よりも、PreとPostで20秒の最速タッピングを2回ずつ随意的に遂行したことでの影響がより強いものと考えられる。

しかし、今回の結果においても、受動タッピングによるものと思われる短期的な効果が観察された。受動訓練群の系列Aでのみ特異的に、平均タッピング数の増加パターンがPreとPostで異なっていた(図4右上)。これは、訓練セッションの初期に、Postでのタッピング数増加が大きかったことによるものと思われる。また、統計的に有意ではないが、Postで測定した最大タッピング数の増加率は、コントロール群に比べて受動訓練群で高かった(図5右上)。これらの結果から、受動訓練群では系列Aでの受動タッピングがPostのタッピングパフォーマンスに影響を与えている可能性が示唆された。

Postでみられた受動訓練群とコントロール群での最大タッピング数の増加率における差は、次セッションのPre測定時にはみられなかった。それゆえ、受動的な指タッピングによる効果は受動運動直後に限られた短期的なもので、セッション後に観察されたスキルの向上は固定されなかったようである。運動の習熟が固定されなかった理由の一つに、Postでの測定において系列AとBの2つの異なった運動タスクを実施したことがあげられる。1つの運動課題を学習してから5時間以内に別の課題を学習した場合には、新しい運動の学習が困難となり、先に学習した効果も弱まる現象が報告されている^{1,14)}。系列Aでの受動訓練直後に、系列Bでの最速タッピングを行った本研究では、受動訓練の効果が系列Bから干渉作用を受けた可能性があげられる。本研究ではパフォーマンス評価に用いた20秒間での最速タッピングの遂行によっても運動学習が生じた可能性もあるため、パフォーマンス評価の方法など更に検討する必要があるものと思われる。また、最速タッピング周波数は5 Hz以上になったのに対し、受動訓練でタ

ッピングは2 Hzであったように、感覚刺激として十分ではなかったことも考えられる。

4. まとめ

本研究では、感覚入力のみが惹起される受動運動を繰り返すことでも、系列タッピング運動にパフォーマンス向上がみられるのか調べる目的で、ロボットハンドを用いた実験を行った。その結果、訓練セッションの初期段階では、受動タッピングを行った系列において、受動訓練群にパフォーマンス増加の効果がみられた。しかし、その効果は短期的なものであり、次のセッション開始時までにはゆっくりとした学習による更なるパフォーマンスの向上はみられなかった。今後は実験プロトコルを再度検討し、受動運動による訓練効果の可能性をより詳細に調べていく必要があるものと思われる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Brashers-Krug T., Shadmehr R., Bizzi E., Consideration in human motor memory., *Nature*, 383, 252-254 (1996)
- 2) Carel C., Loubinoux I., Boulanouar K., Manelfe C., Rascol O., Celsis P., Neural substrate for the effects of passive training on sensorimotor cortical representation: a study with functional magnetic resonance imaging in healthy subjects., *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, 20, 478-484 (2000)
- 3) Christensen L.O.D., Johansen P., Sinkjær T., Petersen N., Pyndt H.S., Nielsen J.B., Cerebral activation during bicycle movements in man., *Exp. Brain Res.*, 135, 66-72 (2000)
- 4) Doyon J., Benali H., Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills., *Curr. Opin. Neurobiol.*, 15, 161-167 (2005)

- 5) Hund-Georgiadis M., Yves von Cramon D., Motor-learning-related changes in piano players and non-musicians revealed by functional magnetic-resonance signals., *Exp. Brain Res.*, 125, 417-425 (1999)
- 6) Jenkins I.H., Brooks D.J., Nixon P.D., Frackowiak R.S.J., Passingham R.E., Motor sequence learning: a study with positron emission tomography., *J. Neurosci.*, 14, 3775-3790 (1994)
- 7) Karni A., Meyer G., Jezzard P., Adams M.M., Turner R., Ungerleider L.G., Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning., *Nature*, 377, 155-158 (1995)
- 8) Karni A., Meyer G., Rey-Hipolito C., Jezzard P., Adams M.M., Turner R., Ungerleider L.G., The acquisition of skilled motor performance: Fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 95, 861-868 (1998)
- 9) Lange R., Nowak H., Haueisen J., Weiller C., Passive finger movement evoked fields in magnetoencephalography., *Exp. Brain Res.*, 136, 194-199 (2001)
- 10) Lotze M., Braun C., Birbaumer N., Anders S. Cohen L.G., Motor learning elicited by coluntary drive., *Brain*, 126, 866-872 (2003)
- 11) Oldfield R.C., The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113 (1971)
- 12) Ridding M.C., Brouwer B., Miles T.S., Pitcher J.B., Thompson P.D., Changes in muscle responses to stimulation of the motor cortex induced by peripheral nerve stimulation in human subjects., *Exp. Brain Res.*, 131, 135-143 (2000)
- 13) Schieber M.H., Santello M., Hand function: peripheral and central constraints on performance., *J. Appl. Physiol.*, 96, 2293-2300 (2004)
- 14) Shadmehr R., Brashers-Krug T., Functional stages in the formation of human long-term motor memory., *J. Neurosci.*, 17, 409-419 (1997)
- 15) Stefan K., Kunesch E., Cohen L.G., Benecke R., Classen J., Induction of plasticity in the human motor cortex by paired associative stimulation., *Brain*, 123, 572-584 (2000)
- 16) Weiller C., Jüptner M., Fellows S., Rijntjes R., Leonhardt G., Kiebel S., Müller S., Diener C., Thilmann A.F., Brain representation of active and passive movements., *Neuroimage*, 4, 105-110 (1996)