

感覚運動適応を利用した認知症者運動技能学習支援方法

小野明日香¹ 河田博昭¹ 渡部智樹¹

概要: アルツハイマー型認知症では目的のある運動技能を行う能力が障害され、日常生活に支障をきたしている。明示的学習に障害のあるアルツハイマー型認知症者の運動技能学習を可能にするため、手続き的記憶として保存されており実行可能な動作から新しい動作へ視覚フィードバックを用いた感覚運動適応により移行させることを目指す。しかし、学習したい動作と同じ構造の動作が手続き的記憶として保存されているとは限らず、感覚運動適応は異なる構造の動作に使うことができないという問題があった。そこで、同じ構造内での感覚運動適応を組み合わせることで、異なる構造の動作への感覚運動適応を実現する方法を提案する。

キーワード: 認知症, 感覚運動適応, 手続き的記憶, 視覚フィードバック

The approach to use sensorimotor adaptation in motor-skill learning for people with dementia

ASUKA ONO^{†1} HIROAKI KAWATA^{†1}
TOMOKI WATANABE^{†1}

Abstract: People with Alzheimer-type dementia (AD) are impaired with skilled movements, which disturbs their activities in daily life. Our goal is to enable motor-skill learning for people with AD against their impaired explicit learning ability, by transforming a familiar motor task preserved in their procedural memory into a desired novel motor task through sensorimotor adaptation induced by visual feedback. However, sensorimotor adaptation has been investigated within the same task structure but the familiar motor task and the desired motor task are not necessarily within the same task structure. We proposed the approach to combine multiple sensorimotor adaptations between motor tasks within the same task structure stepwise to enable sensorimotor adaptation between motor tasks in different task structures.

Keywords: Dementia, Sensorimotor adaptation, Procedural memory, Visual feedback

1. はじめに

現在全世界で 5500 万人以上が認知症であり、2050 年には 1 億 3900 万人に増加すると予想されている[1]。認知症の 60%から 70%を占める[1]アルツハイマー型認知症では目的のある運動技能を行う能力が障害され(失行)、日常生活に支障をきたしている[2]–[5]。運動技能学習を目的とする多くのリハビリテーションプログラムでは学習の初期段階で明示的学習が必要だが、アルツハイマー型認知症では明示的学習能力が障害されているため、明示的学習が不要な運動技能学習方法の開発が必要である[6], [7]。具体的には、アルツハイマー型認知症者ではある動作を何度も実行することによりその動作の手続き的記憶を形成する能力は残っているが、そもそも手続き的記憶が形成される前の動作を指示に従ったり試行錯誤したりして実行することが難しいという課題がある。

そこで我々は、学習の初期段階では手続き的記憶として保存されている動作の実行をタスクとし、その動作から目的の動作へ明示的指示なしに少しずつ移行させるという方法の実現を目指す。動作を移行するために、動作実行中

動作実行者自身が見ている動作の軌跡や使う物の位置を視覚的にずらすことにより、そのずれに応じて運動制御を修正する機能の働き(感覚運動適応)を引き起こし、ある動作から目的とする動作へとフォームを修正させる。

このような明示的学習が不要な運動技能学習の実現により、アルツハイマー型認知症者の運動技能学習における介助者の指示や促し、繰り返し回数などの学習コストの低減をめざす。例えば、失行によりできなくなってしまった更衣動作を、本手法により実行可能にし、繰り返し実行することで手続き的記憶を形成し、日常生活の中でも実行可能にするという試みである。本稿では、手続き的記憶として保存されている動作から、共通する運動システムの入力と出力との関係をもつ(同じ構造)動作への感覚運動適応を組み合わせることで、共通する運動システムの入力と出力との関係をもたない(異なる構造)動作へ感覚運動適応を実現する方法を提案し、その実現可能性の初期検討のために基礎的な動作を用いた実験計画について述べる。

¹ 日本電信電話株式会社 NTT 人間情報研究所
NTT Human Informatics Laboratories, NTT Corporation

2. 関連研究

アルツハイマー型認知症の運動技能学習を可能にする方法の検討にあたって、運動技能学習の構造学習とパラメトリック学習に着目した。構造学習では運動システムの適切な入力と出力とを特定し、それらを結び付ける方程式の形式を決定する[8]。例えば、腕の運動コマンドとラケットの動きなどの間のマッピングを決定する。一方パラメトリック学習では特定の構造に対する制御パラメータの設定を特定する[8]。例えば、テニスとバドミントンそれぞれのラケットの質量の分布などの特徴を特定する。

ここで構造とは、異なる複数の動作に共通する運動システムの入力と出力との関係である。文献[9]によると、動作実行には多関節におよぶ複数の筋活動を協調することが必要であり、腕のリーチングなどの単純な動作でさえ、脳内の少なくとも数十個のニューロンの活動によって制御されているが、例えば異なるラケットに対して制御パラメータがどのように共分散するかという法則といった動作の根本的な構造を特定し、より低次元な部分空間に限定することで、学習における冗長性の負担を軽減できることが示唆されている。つまり、構造学習によりいったん構造を特定したら、その構造に適したパラメータを特定するだけでよい。そのため、同じ構造を持つ新しい動作は迅速に学習が可能である[9], [10]。

構造学習には明示的プロセスが使われるが[11]、既に学習した構造上のパラメトリック学習には感覚運動適応が使われる[9]。感覚運動適応は、明示的プロセスが追加的に関与することもあるが、主に小脳に依存した暗黙的再校正メカニズムが担う[12]。アルツハイマー型認知症者においても、視覚フィードバックを用いた感覚運動適応が残存していることが確認されている[13]。

先行研究では視覚フィードバックの角度をずらされたターゲットへのリーチング動作[14]やカーソルの追跡動作[15]、視覚フィードバックが拡大・縮小される下で一定の半径の円を描く動作 [16]など、同じ構造内での感覚運動適応のみを取り扱っている。また、視覚フィードバックを段階的に変化させ、残効の大きさや頑健性の利得を報告した研究もあるが、異なる構造に移行させることは試みられていない[17]。

3. アプローチ

認知症を患う学習者でも、これまでに繰り返し実行してきた経験から既に手続き的記憶として保存されている動作は実行可能であるため、すでに手続き的記憶として保存されている動作を実行することを学習の初期タスクとし、目的の動作へと少しずつ移行させる。ある動作から目的の別の動作へ移行させるには、認知症を患う学習者にも残存している感覚運動適応を使えらると思えるが、感覚運動適

応を使うためには二つの動作が同じ構造である必要がある。しかし、更衣の際のボタン止め動作など日常生活の動作では、学習したい動作と同じ構造の動作が手続き的記憶として保存されているとは限らない。

そこで、同じ構造内での感覚運動適応を組み合わせることで異なる構造の動作へ感覚運動適応を実現し、将来的に日常生活に使われる動作にも応用可能ではないかと考えた。例えば、タイピング動作からシャツのボタン止め動作へなど異なる構造の動作間への移行に感覚運動適応を使うことができるようになる。

図1に示す概念図を使ってより詳しく説明する。ユーザが手続き的記憶により実行可能な動作を A、学習したい目的動作を B と置く。動作 A と動作 B は構造が異なり、それぞれ構造 1、構造 2 内にある。構造の異なる動作 A から動作 B へは通常構造学習が必要であり、感覚運動適応を誘導することができない (A-B route)。そこで、構造 1 と構造 2 をともに満たす動作 A' を経由することで、構造の異なる動作 A から動作 B へ感覚運動適応を誘導することができるのではないかと考えた (A-A'-B route)。

具体的には、ユーザに動作 A を実行してもらい、その軌跡をモーションセンサなどにより随時取得し支援システムに入力する。支援システムは動作 A と同じ構造内の動作 A' へ感覚運動適応を引き起こすようずらした軌跡を VR ディスプレイなどから視覚フィードバックとして出力する。次に、動作 A' と同じ構造内の動作 B へ感覚運動適応を引き起こすようずらした軌跡を VR ディスプレイなどから視覚フィードバックとして出力する。本稿では初期検討として、基礎的な動作を用いて同じ構造内での感覚運動適応を組み合わせることで異なる構造の動作へ感覚運動適応を実現できるかを確認する。

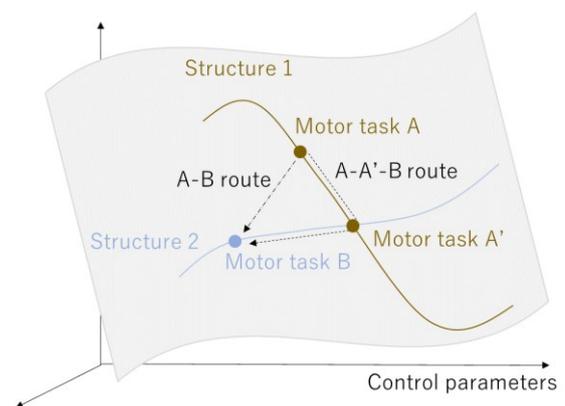


図1 本アプローチを示す概念図 ([18]を参考に作成)。

Figure 1 The concept of our approach (adapted from reference [18]).

4. 実験計画概要

構造の異なる動作 A から動作 B へ直接感覚運動適応を誘

導する場合 (A-B 条件) と、動作 A から同じ構造の中間状態の動作 A'を経由して動作 B へ感覚運動適応を誘導する場合 (A-A'-B 条件) の動作 B が観測されるまでに要する試行回数や残効の頑健性[17]を比較する。構造の推定には筋シナジー[19]を用いる。

健常高齢者 10 名、動作 A を実行可能なアルツハイマー型認知症者 10 名に実験に参加してもらう。両群ともに身体障がいがないこと、認知症者群では認知症の程度が中等度 (MMSE11 点から 20 点など) であることを条件とする。

実験参加者に VR ヘッドセットを装着した状態で、動作 A を繰り返し実行してもらう。実験参加者の動作の状態をカメラやモーションセンサを用いて随時取得し、VR ヘッドセットのディスプレイを用いて実験参加者へ随時提示する。A-B 条件では、取得した動作の状態を動作 A に対する動作 B の相対値だけ空間的位置をずらして提示しながら、動作 A を繰り返してもらう。この時、動作 A が変化して動作 B の実行が観測されるまでの試行回数を測定する。一定の試行回数後も動作 B の実行が観測されない場合は終了し、感覚運動適応を誘導できなかつたとみなす。A-A'-B 条件では、まず取得した動作の状態を動作 A に対する動作 A'の相対値だけ空間的位置をずらして提示しながら、動作 A を繰り返してもらう。この時、動作 A が変化して動作 A'の実行が観測されるまでの試行回数を測定する。動作 A'の実行が観測されたら、動作 A'に対する動作 B の相対値だけ空間的位置をずらして提示しながら、再び動作 A を繰り返してもらう。この時、動作 A'が変化して動作 B の実行が観測されるまでの試行回数を測定する。A-B 条件と A-A'-B 条件で動作 B が観測されるまでに要した試行回数を比較する。また、動作 B が観測された後、実験参加者の動作の状態をずらさず提示し、動作 B が変化して動作 A が観測されるまでの試行回数を測定し比較する。

5. おわりに

アルツハイマー型認知症者にとって明示的リハビリテーションが困難という課題に対し、手続き的記憶として保存されている動作から同じ構造内での感覚運動適応を組み合わせることで異なる構造の動作へ感覚運動適応を実現する方法を提案し、その実現可能性の初期検討のために基礎的な動作を用いた実験計画について述べた。しかし、多くの認知症者に手続き的記憶として保存されている動作、学習したい動作は何か、それらの動作間の移行は本提案手法で可能な範囲にあるか、視覚フィードバックを外した後に感覚運動適応の残効が消えず目的の動作の手続き記憶を形成するまで繰り返し実行できるのか、アルツハイマー型認知症者の視空間認知障害の影響を受けないか、ずらした視覚フィードバックを提示して混乱を引き起こさないかといった課題があり、さらなる検討が必要である。

参考文献

- [1] World Health Organization, Dementia. Sep. 02, 2021. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dementia> (accessed Feb. 28, 2022).
- [2] Foundas, A. L., Apraxia: neural mechanisms and functional recovery. *Handb. Clin. Neurol.* 2013, vol. 110, p. 335–345.
- [3] Foundas, A. L. and Duncan, E. S., Limb Apraxia: a Disorder of Learned Skilled Movement. *Curr. Neurol. Neurosci. Rep.*, Nov. 2019, vol. 19, no. 10, p. 82.
- [4] Lesourd, M. et al., Apraxia and Alzheimer's Disease: Review and Perspectives. *Neuropsychol. Rev.*, Sep.2013, vol. 23, no. 3, p. 234–256.
- [5] Edwards D. F. et al., A Quantitative Analysis of Apraxia in Senile Dementia of the Alzheimer Type: Stage-Related Differences in Prevalence and Type. *Dement. Geriatr. Cogn. Disord.*, 1991, vol. 2, no. 3, p. 142–149.
- [6] White, L. et al., Facilitating the Use of Implicit Memory and Learning in the Physical Therapy Management of Individuals With Alzheimer Disease: A Case Series. *J. Geriatr. Phys. Ther.*, Mar. 2014, vol. 37, no. 1, p. 35–44.
- [7] van Halteren-van Tilborg, I. A. D. A. et al., Motor-Skill Learning in Alzheimer's Disease: A Review with an Eye to the Clinical Practice. *Neuropsychol. Rev.*, Sep.2007, vol. 17, no. 3, p. 203–212.
- [8] Wolpert, D. M. and Flanagan, J. R., Motor learning. *Curr. Biol.*, Jun. 2010, vol. 20, no. 11, p. R467–R472.
- [9] Braun, D. A. et al., Structure learning in action. *Behav. Brain Res.*, Jan. 2010, vol. 206, no. 2, p. 157–165.
- [10] Tzvi, E. et al., Mini-review: The Role of the Cerebellum in Visuomotor Adaptation. *The Cerebellum*, Jun. 2021.
- [11] Bond, K. M. and Taylor, J. A., Structural Learning in a Visuomotor Adaptation Task Is Explicitly Accessible. *eNeuro.*, Aug. 2017, vol. 4, no. 4, p. ENEURO.0122-17.2017.
- [12] Krakauer, J. W. et al., Motor Learning. *Compr. Physiol.*, Mar. 2019, vol. 9, no. 2, p. 613–663.
- [13] Paulsen, J. S. et al., Prism adaptation in Alzheimer's and Huntington's disease. *Neuropsychology*, 1993, vol. 7, no. 1, p. 73–81.
- [14] Krakauer, J. W. et al., Learning of Visuomotor Transformations for Vectorial Planning of Reaching Trajectories. *J. Neurosci.*, Dec. 2000, vol. 20, no. 23, p. 8916–8924.
- [15] Gouirand, N. et al., Eye movements do not play an important role in the adaptation of hand tracking to a visuomotor rotation. *J. Neurophysiol.*, May 2019, vol. 121, no. 5, p. 1967–1976.
- [16] Sülzenbrück, S. and Heuer, H., Functional independence of explicit and implicit motor adjustments. *Conscious. Cogn.*, Spring 2009, vol. 18, no. 1, p. 145–159.
- [17] Michel, C. et al., Enhancing Visuomotor Adaptation by Reducing Error Signals: Single-step (Aware) versus Multiple-step (Unaware) Exposure to Wedge Prisms. *J. Cogn. Neurosci.*, Spring 2007, vol. 19, no. 2, p. 341–350.
- [18] Kobak, D. and Mehring, C., Adaptation Paths to Novel Motor Tasks Are Shaped by Prior Structure Learning. *J. Neurosci.*, Jul. 2012, vol. 32, no. 29, p. 9898–9908.
- [19] Gentner, R. et al., Robustness of muscle synergies during visuomotor adaptation. *Front. Comput. Neurosci.*, 2013, vol. 7.