高齢者の身体性注意能力向上を目的とした ニューロフィードバック訓練システムの開発

立命館大学 理工学部
助教　櫻田 武

はじめに

高齢者の日常生活においては、階段の上り下りや障害物回避など外部環境に対して適切な動作を行うことが身体的健康維持に重要となる。しかしながら、自身の身体感覚の鈍化や身体に注意を向ける認知的能力（身体性注意[1]）の低下によって、つまずき・転倒などのアクシデントが生じ、怪我を負うリスクが高まる。以上のようなリスクを低減するためには、神経系における身体性注意能力を訓練することが重要となる。この点について、近年、健常者における身体性注意能力には個人差があり[2-4]、加えて、この注意能力の個人差は体性感覚野から誘発される定常状態体性感覚誘発電位（Steady-state somatosensory evoked potentials: SSSEP[5]）の応答特性として反映されることも明らかとなりつつある[6]。そこで本研究では、身体性注意能力の向上を目的として、SSSEPを利用したニューロフィードバック訓練システムを確立するとともに、本システムでの訓練が歩行動作の改善に寄与することを示す。

ニューロフィードバックとは、計測した脳活動を本人にリアルタイムでフィードバックする技術であり、この技術を用いることで脳活動を望ましい状態へ誘導し特定の脳機能向上を実現する。本研究におけるニューロフィードバック訓練システムでは、脳波電極を左右体性感覚野（正中寄り）に配置し、左右の足裏に機械振動刺激（22Hz）を提示した際に観察されるSSSEPをリアルタイムで解析することで、対象者の注意状態に関する成分を抽出する。最後に、この注意状態を反映した脳波成分強度をバーグラフの高さに変換しモニター上に提示したうえで、「足裏の刺激に注意を向けながら、バーグラフがなるべく高くなるように取り組んでください」という教示を与えて訓練を行った。また、ニューロフィードバック訓練前後において、足への身体性注意能力が向上したことを確認するため、歩行中に障害物をまたぐ運動課題を実施した。歩行中においては両足先にマーカーを取り付けたうえで、動作をモーションキャプチャシステムによって計測した。本ニューロフィードバック訓練によって、SSSEP応答が強まり、身体性注意能力が向上されていれば、障害物をまたぐ際に適切な足上げ動作が観察されることが期待される。本ニューロフィードバック訓練には、健常若年者10名が参加した。本研究は立命館大学倫理委員会で承認され、ヘルシンキ宣言を遵守して行われた。

結　果

図１にニューロフィードバック訓練における序盤および終盤のSSSEP応答の典型例を示す。ニューロフィードバック訓練中に計測された脳波に対して高速フーリエ変換したスペクトラムパワーを確認すると、22Hzにおいて観察されるピークが今回着目しているSSSEPであり、本訓練システムにおいて当該脳波を誘発できているといえる。また、図中の点線は振動刺激呈示時において刺激に対して注意を向けないよう教示された際のスペクトラムパワーであり、一方実線は、振動刺激に対して能動的な注意を向けるように教示された際のスペクトラムパワーである。訓練前後のSSSEP応答を比較すると、訓練前（図１左）よりも訓練後（図１右）の方が応答が強まっていることが分かる。さらに、刺激に対して能動的に注意を向けた際に応答強度が強まる傾向はSSSEP特有の特徴であるが、この注意に付随した応答変化も訓練後の方が顕著であるといえる。

つづいて、訓練前後において実施した障害物をまたぐ歩行課題での足先の矢状面軌道を示す（図２）。歩行課題はスタート位置から４歩で構成され、３・４歩目で障害物をまたぐことが教示されている。訓練前(図２上段)においては、障害物の位置に対して足が適切に上げられておらず、ぶつかるケースも見受けられた。一方、訓練後（図２下段）においては、足先の軌道も滑らかとなり、障害物に衝突せずまたぐ動作が多く観察された。

図１

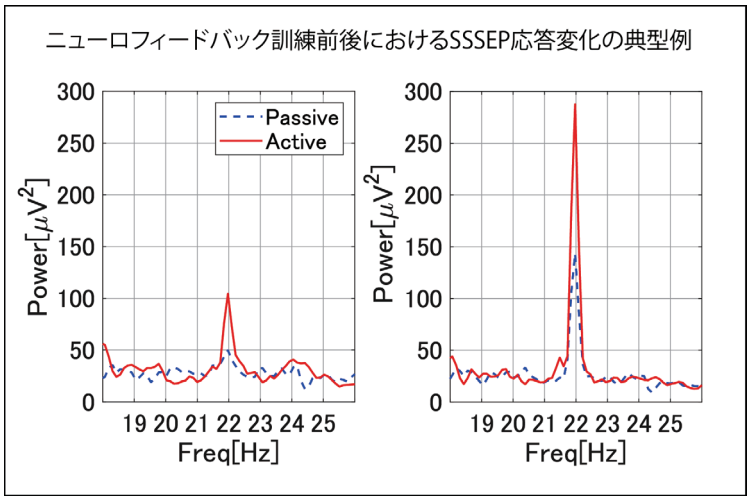
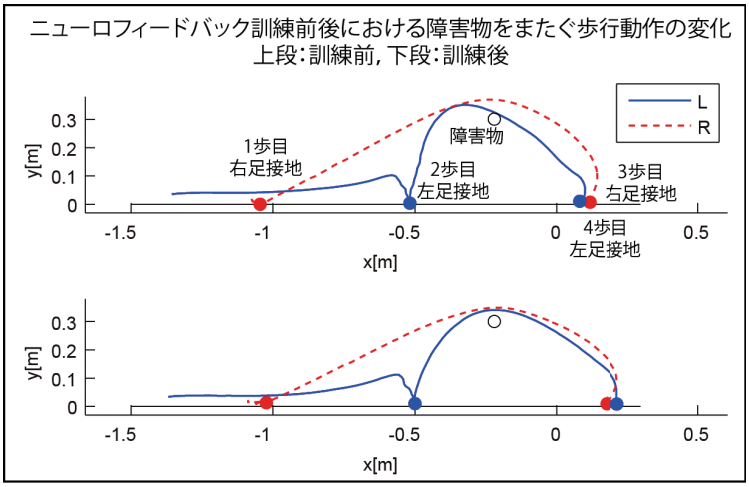


図２



考　察

本研究において、ニューロフィードバック訓練システムを構築し、SSSEPに反映される注意関連成分の応答強度を高めることに成功した。さらに、SSSEP応答の変化に伴って訓

練後には歩行動作の改善を示す結果も観察された。しかしながら、今回の参加者の中には訓練効果が十分認められないケースも存在し、その効果には大きなばらつきが認められた。このようなニューロフィードバックにおける訓練効果差は近年問題視されており[7-8]、今後訓練効果差を克服するための改善策確立が重要となる。リアルタイム解析手法の改善・脳波電極配置の最適化・訓練日数の拡充など、訓練者全員がニューロフィードバックによる恩恵を受けられるようにシステム全体を改良していく必要がある。

また、今回は自身の脳波をリアルタイムでモニターする条件下での実験しか実施していない。今後は統制群として、事前に記録した他人の脳波をダミーとしてフィードバックする条件下での実験も並行して実施していくことが重要となる。

最終的には、今回若年者で観察された訓練効果が他の年代においても同様に得られることを実証し、高齢者の身体的健康維持に寄与できる訓練システムとしてその有効性を示していく。

要　約

本研究においては、神経活動修飾法の一種であるニューロフィードバックを用いて、高齢者の脳活動を望ましい状態へ誘導することで、自身の身体へ注意を向ける能力（身体性注意能力）の向上を目指した。このような身体性注意能力の向上により、歩行動作等の改善が期待される。まず、定常状態体性感覚誘発電位（Steady-state somatosensory evoked potentials: SSSEP）と呼ばれる脳波をリアルタイムで計測したうえで、注意状態に関する推定結果を計測対象者本人へリアルタイムに提示するニューロフィードバック系を構築した。次に、構築した系によりニューロフィードバック訓練効果の評価を試みた。当初、本研究では最終的に高齢者を対象としたニューロフィードバック訓練の実施を計画していた。しかしながら、COVID-19の影響により、感染・重症化リスクが懸念され、健常高齢者を大学に呼んで実験を実施することが困難な状況となった。そこで、申請者の所属する機関内の健常若年者を対象としてデータの取得および解析・評価を行った。その結果、本システムを用いてSSSEPを検出できることが確認された。またニューロフィードバック訓練を行うことにより歩行動作が改善する傾向を示す参加者も確認されたが、まだ十分な参加者数のデータが得られていないため、今後もデータを集めたうえで結論付ける必要がある。最終的には本訓練システムを高齢者に適用し、加齢に伴って低下した注意制御能力の向上を実現するための有効なツールであることを示していく。

文　献

1. Aizu N., Oouchida Y. and Izumi SI., Time-dependent decline of body-specific attention to the paretic limb in chronic stroke patients. Neurology, Vol.91, e751-e758, 2018.

2. Sakurada T., Hirai M. and Watanabe E., Optimization of a motor learning attention-directing strategy based on an individual's motor imagery ability. *Experimental Brain Research*, Vol.234（1）, pp. 301-311, 2016.
3. Sakurada T., Nakajima T., Morita M., Hirai M. and Watanabe E., Improved motor performance in patients with acute stroke using the optimal individual attentional strategy. *Scientific Reports*, Vol.7, 40592, 2017.
4. Sakurada T., Goto A., Tetsuka M., Nakajima T., Morita M., Yamamoto SI., Hirai M. and Kawai K., Prefrontal activity predicts individual differences in optimal attentional strategy for preventing motor performance decline: A functional near-infrared spectroscopy study. *Neurophotonics*, Vol.6（2）, 025012, 2019.
5. Tobimatsu S., Zhang YM. and Kato M., Steady-state vibration somatosensory evoked potentials: physiological characteristics and tuning function. *Clinical Neurophysiology*, Vol.110, pp. 1953-1958, 1999.
6. Sakurada T. and Nagai K., Top-down attentional modulation of steady-state somatosensory evoked potentials characterizing individual optimal attentional strategy for motor learning. *Neuroscience 2019*, Program No. 668.01, Chicago, USA, 2019.
7. Alkoby O., AbuRmileh A., Shriki O. and Todder D., Can we predict who will respond to neurofeedback? A review of the inefficacy problem and existing predictors for successful EEG neurofeedback learning. *Neuroscience*, Vol. 378, pp. 155-164, 2018.
8. Kadosh KC. and Staunton G., A systematic review of the psychological factors that influence neurofeedback learning outcomes. *NeuroImage*, Vol. 185, pp. 545-555, 2019.