

平成 31 年 4 月 25 日現在

機関番号：83903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13063

研究課題名(和文) 小型ヒューマノイドを使った自己動作モニタリングによる運動訓練支援システムの開発

研究課題名(英文) Development of a Neuro-Rehabilitation System Based on Selfmonitoring of One's Motor Representation by Using a Small Humanoid Agent

研究代表者

中井 敏晴 (NAKAI, Toshiharu)

国立研究開発法人国立長寿医療研究センター・神経情報画像開発研究室・室長

研究者番号：30344170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではリアルタイムfMRIにより抽出された脳活動を小型ヒューマノイド(SHR)の動作に反映させ、其の映像をニューロフィードバック(NF)情報として利用する運動学習法を開発した。訓練学習の進行に伴う逐次的な二重判別分析法を考案し、身体座標系を直感的に反映するMI学習方法としてBrain Machine Interfaceに応用する見通しを得た。加齢による脳活動領域の非特異的拡大は必ずしも判別分析に不利ではなく、高齢者でも本法による運動学習が有効である事を見出した。実際のロボットの動作による印象評価実験では、高齢者でも自己動作表象を使った視覚的NFはモチベーションを促進する事が判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高齢者向けの運動訓練はフレイルや認知症予防への効果が期待されるが、今後は在宅で運動習慣を維持させる工夫が重要である。SHRを使った身体座標系を反映する自己動作の視覚的NFは、運動学習を行わせる神経リハビリの有力手段と成り得ると示唆された。学術的には、運動感覚統合を行うSalience NetworkがNF-fMRIによる運動学習の効率を反映する一方で、Default Mode Networkは一貫して加齢変化を反映する事が確認でき、安静時脳活動が有力な指標候補である事が明らかにされた意義が大きい。この知見は個人の特性や状況に合わせた運動処方最適化に資すると思われる。

研究成果の概要(英文)：We developed a motor training method using a small humanoid manipulated by the brain activation pattern extracted by real-time fMRI monitoring of on-going task and employ its visual information as the neurofeedback information to the subject. By developing dual discriminant analysis updated according to the learning procedure, its potential capability as a brain machine interface using motor imagery training intuitively reflects the body coordinate was suggested. It has been turned out that global expansion of brain activation in older adults is not necessarily any disadvantage to the discriminant analysis and motor learning training using this method will be valid in older adults. A human robot interaction experiment showing the actual movement of small humanoid was performed. It was observed that the visual neurofeedback based self-representation of movement enhances positive motivation for physical exercises in older adults.

研究分野：神経情報学

キーワード：運動訓練システム 運動表象符号化 Neurofeedback fMRI 小型ヒューマノイド 運動学習 身体座標系 Brain Machine Interface

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高齢者の要支援・要介護の前段階である虚弱 (Flail) に至る前に高齢者の体力低下を抑制・遅延させる介入が重要であり、高齢者向けの健康体操の役割は大きい。文部科学省の体力・運動能力調査 (2013 年) によると 70 代高齢者の 40% が運動クラブに所属している。運動処方 は身体機能だけでなく認知機能の改善にも有用とされるが (Hogan, Psychol Aging 28, 587- 2013) 懐疑的な見解もある (Gates, Am J Geriatr Psychiatry 21, 1086-, 2013)。見解不一致の主な原因は、高齢者は長い生活歴や社会背景によって同一年齢であっても身体状況や認知機能の分散が大きく、一方で運動処方の実施が統制不十分なためと考えられる。従って、運動学習効率を高める方向に作用する神経機序の解明が Flail 対策において有用と考えられる。

2. 研究の目的

高齢者が健康増進のための体操を行う際に、その動作を可視化された情報として feedback し、自ら動作を効率良く最適化するための自己モニタ媒体として小型ヒューマノイド (Small Humanoid Robot, SHR) を用いる利点を検証する。本研究ではモデルとして Neuro-feedback (NF) fMRI と SHR を用いた脳機能測定系を構築し、中～下前頭回や縁上回、頭頂葉等における視覚運動変換の自己動作表象を表現する媒体 (Self-Referenced Movement Representing Agent; SRMRA) としての視覚要素と時系列制御への依存性を明らかにする。自己動作制御の認知機序の加齢変化を明らかにし、高齢者の健康体操支援に SHR を社会実装する方略を提案する。

3. 研究の方法

非侵襲的な脳機能計測は Brain Machine Interface (BMI) の入力情報として用いられるが、semantic な点で出力と関係しない非特異的なスイッチングの段階に留まっているのが現状である。本研究では自らの身体座標の中で生成される動作想起 (Motor Imagery, MI) による脳活動を変数とする NF 訓練法 (NF-fMRI) を開発した。この手法は脳機能信号をデコーディングしないで身体感覚とリンクさせる身体言語を直接利用する考え方に基づく。

(1) システム開発 (NF-fMRI による SRMRA 認知機序の測定系構築)

我々が開発を進めてきた real-time fMRI (rt-fMRI, Bagarinao, Neuroimage 19, 422-, 2003) を元にした NF-fMRI (Bagarinao, Pain 155, 2502-, 2014) に MI を使った訓練学習の成績を SHR の動作に反映させて自己認知の神経基盤を明らかにする実験系を確立した。判別分析の手法としては Support Vector Machine (SVM) を用い、判別結果を SHR の動作としてリアルタイムに反映させるプログラムを作成した。SHR の動作を映像として被験者に提示し訓練学習を行う上で最も適切な MI 作業を日常動作の中から絞り込むための予備実験を行ない、最も安定して十分な活動領域が得られる MI 課題として手の掌握運動を選択した。組み上げた NF-fMRI を用いて若年被験者 20 名を対象として NF 有り、無しそれぞれの条件で 1 週間の間隔を空けた 2 回の測定で MI 訓練をそれぞれ 3 回繰り返す測定を行なった。

(2) 判別分析の精度向上

学習過程により生じる脳活動の経時変化に起因する影響を最小化する補正アルゴリズムとして直近の脳機能マップを参照する SVM による判別法を考案した。また、SHR の動作を感覚的に MI の想像内容により近いものにするための修正を行なった。この改良型 NF システムを用いて、若年者 20 名、高齢者 20 名について NF 有りの条件で MI 訓練を 3 回繰り返す測定を行なった。

(3) 判別分析の次元拡張

上記改良版の NF-fMRI システムに実装されている SVM をリアルタイムで二重判別分析が行える様に拡張し、四肢のそれぞれを屈伸させる MI 課題を用いた測定系を作成した。若年被験者 15 名、高齢被験者 15 名を対象として NF 有りの条件で MI 訓練を 3 回繰り返す測定を行ない、動作生成率や学習曲線への影響を検討した。

(4) 自己動作表象認知の行動実験

SRMRA としての SHR を健康体操のパートナーの用途で社会実装する際に考慮すべき心理的因

子を検討した。被検者の動作を検出する非標識式の高速 MC を使ってリアルタイムに被験者の動作を検出し、SHR にその動作を再現する自己動作モニタ法を使って健康体操を支援する SRMRA モデルを構築した。地域の運動教室に参加している健康体操実践者である高齢者 20 名を対象とし、SHR の動作に反映される自分の動きを見ながら運動をする時の主観的評価や、その様な体験がロボットに対する印象に与える影響、実際の使用感や体操をすることに対するモチベーションへの変化などを調査した。

4 . 研究成果

(1) システム開発 (NF-fMRI による SRMRA 認知機序の測定系構築)

SHR を媒体 (Agent) とする視覚情報を使った NF-fMRI システムを構築し性能評価を行なった (論文 3)。従来の NF-fMRI では相互に関連性の無い全く異なる認知活動を行わせて、その脳活動パターンの違いを検出し BMI のスイッチとしていたので、実際に行なっている認知活動と出力の間の意味的な関連性に乏しかった。本実験では身体表象を反映する kinesthetic な違いがスイッチと一致するような脳機能マップの判別を行うために、手の掌握運動時の動作感覚を想起する MI を左右のいずれかで行わせ、予め各々の被験者から得た MI 遂行中のマップをターゲットとして判別分析を行なった。該当する側の掌握運動の想起状態と判定されると SHR は対応する側の手を拳上し、その映像は被験者に提示されて自己の動作感覚に近似する様にした。

このような自己動作表象の視覚的 NF により、運動学習に動員される高次運動野や感覚統合を司る領域が強く活動し、NF を行わない場合に比べて humanoid の動作生成率が 80%まで向上することが確認された。被検者を 2 群に分けて MI を行う時に NF ありの測定と NF 無しの測定を 1 週間の間隔を開けて 2 回に分けて行なったが、先に NF ありの訓練を行なった効果は 1 週間後の NF 無しの測定まで持続した。しかし、NF 無し訓練を先に行なっても 1 週間後の NF あり測定の成績に影響を与えなかった。以上の結果から、被験者の動作模倣による視覚 NF でも作業効果への注意亢進が成績向上と学習の定着に役立つ可能性が示唆された。

(2) 判別分析の精度向上

脳機能マップの類似性が高くても操作出力の精度が保たれるように判別分析を最適化した。MI 課題としては十分な信号量が得られる手の掌握運動感覚想起を用いたが、判別分析の指標とする被検者の脳活動パターンを訓練学習が進むにつれて更新するように機械学習のアルゴリズムを変更したところ、SHR の動作に反映される MI 上の運動側の左右弁別率や動作生成率は学習の繰返しによって向上する傾向を示し、NF 学習の過程や加齢変化がより特異的に抽出された。

若年者では Default Mode Network (DMN) の主要ノードである後部帯状回 (PCG) と後頭葉の視覚野群から構成される Visual Network (VN) の活動が訓練学習により脱賦活化 (deactivate) された。高齢者ではこの傾向は見られず、認知処理の予備能力の減少を反映すると考えられた。VN の年齢差は NF 訓練により減少し、学習により一定の負荷軽減が得られるが DMN にはそのような傾向は見られず、加齢変化が DMN に反映されると考えられた。この結果は安静時計測 (RSN) の結果と合致している。掌握運動の動作実行課題 (motor execution, ME) と NF 付き MI 課題 (NF-MI) の比較では加齢による脳活動領域の拡大は明瞭だが、NF 無しで動作想起する MI 課題では年齢差は見られなかった。ME と NF-MI で共通に年齢差が検出される領域は認められず、ME では縁上回、下前頭回、基底核などの運動実行に関係の深い領域の活動が高齢者で強かった。NF-MI では前補足運動野や運動前野等の高次運動野、下前頭回、PCG、VN 等の活動が高齢者で強く動員され、若年者の結果と一致していた。

以上より、重点的に賦活が増強される領域に違いがあるものの、視覚情報として自己の身体表象を提示する NF-MI により、ME に相当するレベルの運動制御作業を負荷出来ることが示唆された。NF-MI は特に視覚運動変換機能を要求する作業であることがイメージングの結果としてもよく分かるが、今後は NF-MI がどのような病態生理に対する神経リハビリに適するかを明らかにしてゆきたい。

(3) 判別分析の次元拡張

SVMによる二重判別分析の手法を考案し、2x2の判別をリアルタイムに行う事に成功した。この手法により身体座標系を直感的に反映するMI学習方法を確立する見通しを得たが、BMIの本質的な部分で大きな進歩が実現したと考えている。認知処理の潜在的な低下に伴う余力不足から加齢により脳活動領域が拡大する傾向が見られるが、その影響がNF-fMRIに与える影響を検討する為に高齢者と若年者の比較を行なった。若年者ではDMNの主要ノードであるPCGと後頭葉の視覚野群から構成されるVNの活動が訓練学習により脱賦活化されたが、高齢者ではこの傾向は見られず認知処理の予備能力の減少を反映すると考えられた。VNの年齢差はNF訓練により減少し、学習により一定の負荷軽減が得られるがDMNにはその様な傾向は見られず、加齢変化がDMNに反映されたと考えられる。この結果は安静時計測で観測される結果と合致していた。

(4) 自己動作表象認知の行動実験

以下の2つの方法を検討した。1)健康体操指導者の動作映像からお手本とする基本動作10パターンを抽出し、それを模倣する動作をSHRに実装した。2)手本となる動作に自己の動作を近接させる過程をモデル化するために、非マーカース式の高速MCを使ってリアルタイムに被験者の動作を検出し、SHRにその動作を再現する自己動作モニタシステムを構築した。それぞれのシステムを使って高齢被験者を対象として実際の動作による印象評価としては、いずれもモチベーションに対するポジティブな効果が期待できるものの、運動開始直後の操作性に対する印象がモチベーションに影響し、指導者の動作を単純に模倣した方が抵抗感が少ないことが示唆された。この結果から、高齢者向けの運動支援システムに自己動作表象認知を導入する際にはその適合性を個人レベルで評価した上で段階的に導入した方がよいと考えられた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

中井敏晴 安静時脳活動の解析手法概説 Clinical Neuroscience 37, 153-157, 2019

加藤昇平、中野智文、Epifanio Bagarinao、吉田旭宏、上野美果、中井敏晴、ディーブラーニングによる脳機能画像分類の試み、BIO Clinica 34, 330-335, 2019

Bagarinao E, Yoshida A, Ueno M, Terabe K, Kato S, Isoda H, Nakai T, Improved Volitional Recall of Motor-Imagery-Related Brain Activation Patterns Using Real-Time Functional MRI-based Neurofeedback. Frontiers in Human Neuroscience 12, #158 1-13, 2018. (査読有)

doi:10.3389/fnhum.2018.00158

Kanai A, Kiyama S, Goto H, Tomita H, Tanaka A, Kunimi M, Okada T, Nakai T, Use of the sit-to-stand task to evaluate motor function of older adults using telemetry, BMC Geriatrics 16, #121 1-10, 2016. (査読有)

doi:10.1186/s12877-016-0294-2

[学会発表](計20件)

Nakano T, Kato S, Bagarinao E, Yoshida A, Ueno M, Nakai T, Effectiveness of Multi-ROI 3D-CNNs in Discrimination of Motor Imagery from Functional Brain Image, The 2019 IEEE 1st Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech 2019), OS-AIH, Mar 12-14, 2019.

Nakano T, Kato S, Bagarinao E, Yoshida A, Ueno M, Nakai T, Potentiality of 3D Convolutional Neural Networks to Discriminate Motor Imagery from a Functional Brain Image of an Unknown Subject, Third Annual Scientific Meeting of the Japanese Chapter of ISMRM P-1-1, Program Book 46, Nagoya, Dec 22 2018.

中野 智文、加藤 昇平、バガリナオ エピファニオ、吉田旭宏、上野 美果、中井 敏晴 fMRIを用いたリアルタイムニューロフィードバックシステムと3次元畳込みニューラルネットワークによる脳機能分類の提案 第32回人工知能学会全国大会 4A1-05、鹿児島、2018年6月8日

Nakano T, Kato S, Bagarinao E, Yoshida A, Ueno M, Nakai T. Discrimination of Motor Imagery from Functional MR Image of Human Brain Using Multi-ROI 3D Convolutional Neural Networks. 2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2018) OH-IHP1, Nara, Oct 9-12, 2018.

Bagarinao E, Yoshida A, Ueno M, Terabe K, Kato S, Isoda H, Nakai T, Real-time

functional MRI-based neurofeedback improves volitional recall of brain activation patterns during motor imagery training. BrainConnects 2018 Program Book 23 - 24, Singapore, June 22, 2018.

Bagarinao E, Yoshida A, Ueno M, Kazunori Terabe K, Kato S, Isoda H, Nakai T, Neurofeedback improves the classification of brain activation patterns during motor imagery task training: A real-time functional MRI study. Second Annual Scientific Meeting of the Japanese Chapter of ISMRM P-18, Program Book 56, Wako, Feb 22 2018
Nakano T, Kato S, Bagarinao E, Yoshida A, Ueno M, Nakai T, Application of 3D convolutional neural networks for neuro-feedback training using real-time functional MRI. BrainConnects 2018 Program Book 37 - 38, Singapore, June 22, 2018.
Nakai T, Neuroinformatics for Aging, BrainConnects 2017 Program Book 14 - 15, Kuala Lumpur, August 23, 2017

Bagarinao E, Application of real Time Functional MRI for Motor Imagery Task, BrainConnects 2017 Program Book 18, Kuala Lumpur, August 23-4, 2017

Yoshida A, Bagarinao E, Ueno M, Terabe K, Kato S, Isoda H, Nakai T, Development of a Neurofeedback fMRI System Using Body Representation Visualized by a Small Humanoid, The 22nd Annual Meeting of Organization for Human Brain Mapping #31952, Vancouver, Canada, June 25-29, 2017

Nakai T, Ueno M, Tanaka A, Modulation of the Anterior Saliience Network after 4 Weeks Verbal Training in Older Adults, The 22nd Annual Meeting of Organization for Human Brain Mapping #3777, Vancouver, Canada, June 25-29, 2017

Nakai T, Ho ETW, Chen ASH, Yang GFP, Watanabe H, Tan MP, The INCF Neuroinformatics for Aging Special Interest Group - Cooperation in neuroinformatics to accelerate validation of aging interventions. Advances in Neuroinformatics V, OSii - 6, Wako, Japan, Nov 20, 2017.

Bagarinao E, Yoshida A, Ueno M, Terabe K, Kato S, Isoda H, Nakai T, Use of a small humanoid robot as a neurofeedback system for motor imagery tasks, real-time functional imaging and neurofeedback conference P-#114, Nara, Japan, Nov 30 - Dec 1, 2017.

Nakai T, The Effects of Physical Exercises on Aging Brain - Morphological and Functional Analysis. BrainConnects 2016 Program Book, 16-19, 2016

Ueno M, Kiyama S, Suzuki A, Nakai T, Dependency of the Activations Detected in Resting State Networks on the History of Physical Exercise in Older Adults, BrainConnects 2016 Program Book, 49-51, 2016.

Yoshida A, Bagarinao E, Kato S, Ueno M, Isoda H, Nakai T, Building an Activation Map Driven Operation System for a Small Humanoid Using Real-time fMRI- An Initial Report. BrainConnects 2016 Program Book, 57-59, 2016.

Yoshida A, Bagarinao E, Ueno M, Isoda H, Terabe K, Kato S, Nakai T, Development of a Brain Machine Interface Using a Neurofeedback fMRI System - A Small Humanoid Represents Imagery Movements. 1st Annual Scientific Meeting of the Japanese Chapter of ISMRM 50, #P-11, Osaka, Feb 23 2017.

Nakai T, Ueno M, Tanaka A, Anterior Saliience Network as a Potential Biomarker to Represent the Short-Term Effects of Verbal Training Exercise in Older Adults. 1st Annual Scientific Meeting of the Japanese Chapter of ISMRM 51, #P-12, Osaka, Feb 23 2017.

Ueno M, Tanaka A, Nakai T, Community Based Physical Exercise Program Modulates the Brain Activities in Resting State Networks. 1st Annual Scientific Meeting of the Japanese Chapter of ISMRM 53, #P-14, Osaka, Feb 23 2017.

吉田旭宏、エピファニオ バガリナオ、上野美果、寺部和紀、加藤昇平、磯田治夫、中井敏晴、Real-time fMRI を使用した小型ヒューマノイド Neurofeedback システムの構築、日本生体医工学会東海地方会 #12 名古屋 2016年10月22日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：田中 あゆ子

ローマ字氏名：(TANAKA, Ayuko)

所属研究機関名：神戸松蔭女子学院大学

部局名：人間科学部生活学科 食物栄養専攻

職名：准教授

研究者番号 (8 桁): 50463203

研究分担者氏名：加藤 昇平

ローマ字氏名：(KATO, Shouhei)

所属研究機関名：名古屋工業大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁): 70311032

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：バガリナオ エピファニオ

ローマ字氏名：BAGARINAO Epifanio

研究協力者氏名：吉田 旭宏

ローマ字氏名：YOSHIDA Akihiro

研究協力者氏名：上野 美果

ローマ字氏名：UENO Mika

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。