

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22872

研究課題名（和文）筋活動に着目した注意の外部表出の計測とモデル化

研究課題名（英文）Measuring and modeling muscle activation evoked by attention

研究代表者

中村 裕一（NAKAMURA, YUICHI）

京都大学・学術情報メディアセンター・教授

研究者番号：40227947

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：「注意」と「動作」との関係を分析し、「観測された動作」から「注意」を推定するための逆問題を解くための指針を得ることを目的として研究を進めた。「注意を払う動作」が最も顕著に現れるのが首周りであるため、「首周りの動作」を重点的に分析し、筋シナジー解析によって、頭部回旋運動中の筋活性が注意状態によらず一定の3成分により表現できること、また、注意状態による違いが筋シナジーの時間パターンに顕著に現れることが明らかになった。同様に、注意状態の違いが複数筋間の時間周波数的な関係としても観測できることがわかった。さらに、筋活動の分析に用いる筋シナジーが比較的安定に現れることも検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

注意の状態が動作中の筋協調の発現やその時間的变化に顕著に現れることが確認できた。これらは注意に対する（残存）能力や個人的な特性を測るために筋活動を利用する具体的な方法を提案する新しい知見ととなっている。さらに、「注意を払う動作」が行われていることを別の人が知覚するための、動作の伝達方法やその性能について設計や調査を行った。これらの将来的な応用として、注意状態やその能力の推定があげられるが、それだけでなく、見守りなどへの応用の可能性について確認することができた。

研究成果の概要（英文）：We analyzed the relationship between attention and motions, and investigated inverse problem of estimating attention state from observed motions. We focused on motions around the neck because behaviors for paying attention are often appear on neck and head motions. Through the analyses, we obtained the result that turning around motions, i.e., head rotations, are composed of three muscle synergies for each orientation; the spatial patterns are common among different attention conditions, and the temporal patterns are significantly different among attention conditions. Wavelet coherence showed the spatio-temporal patterns of muscle activation are also significantly different among attention conditions. We also investigated muscle synergies are relatively stable over some period, e.g., two weeks. Those results suggest that we can rely on the analyses of muscle synergy and spatio-temporal characteristics for estimating attention states.

研究分野：ユーザインタフェース

キーワード：注意 筋活動 注意分配・分割 注意による筋活動の変容 筋シナジー

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究当初の背景

人がいつどの対象にどのように注意を向けるか、つまり、どのように注意を配分するかというメカニズムを解明することは神経生理学的、認知心理学的に重要な課題であり、また、工学的にも、注意の状態を計測し、利用することが重要な課題となっている。その一方で、注意を向けられている対象やその空間的な位置を推定する工学的な方法としては、依然として「視線の計測」が主となっている。また、音や様々な気配などに対する注意の強さを測るためには、課したタスクの達成度や付加的なテストのスコア等に頼ることが多いのが現状である。そのため、日常的な状況で注意の状態を計測したり、推定することは依然として難しい問題となっていた。

2. 研究の目的

本研究は内部状態としての「注意」と「注意を払う動作」との関係を分析し、「観測された動作」から「注意」を推定するための逆問題を解くための指針を得ることを目的とした。そのために「筋活動」に着目し、注意の状態と筋活動の関係を計測・分析すること、さらに、筋活動から注意の対象の数や位置、また、注意の強さを推定する方法論を探る方針で研究を行った。筋活動に着目したのは以下のような理由からである。「注意」によって、直後に発生が予想される情報を敏感に感じ取るための姿勢を保持したり、短時間後に対応（動作）し易いように姿勢や筋肉の状態を整えるために、姿勢や筋活動の変容が起こる。また、それだけではなく、注意によって運動野や脊髄のニューロンの賦活が促進または抑制されて、刺激に対する反応が変化するためである。このような考えに基づき、本研究では「注意の外部表出としての筋活動のモデル化とその計測」に対する新しいアプローチを提案し、それを検証することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 研究項目

「注意」から「動作が外部表出する」間にはいくつかの過程が内在することから、当初想定した調査よりも一段掘り下げ、複数の要素が複合した問題として分析を行った。具体的には、以下のような研究項目を設定した。

① 「首周りの筋活動」の機序の分析: 我々の先行研究において、一方の対象からもう一方の対象へ振り向くタスクを設定し、対象の重要度や合図のタイミングを変えることによって動作状態が変わることを確認してきた。本研究期間においては、振り向き動作における首周りの筋活動と複数筋の協調関係、特に筋シナジーの分析を行った。

② 「注意」と「首周りの筋活動」の関係の分析: 注意の状態によって筋活動が変容することを確認した。注意状態の異なる課題を与えながら、筋シナジーの現れ方、また、筋協調の詳細な時間周波数的振る舞いについて分析を行った。

③ 「筋協調」の恒常性に関する分析: 「外部表出された動作」から「注意」を推定するために筋シナジーを用いることの妥当性を確認するために、筋シナジーが複数の試行、また、複数日に渡って安定して現れることを検証した。ここで重要な点として、日によって体調が変わることに加え、筋電位計測の電極を貼る位置やその接触状況が異なることである。特に後者の影響が大きく、電極の装着・脱着毎に筋電計測のゲインやクロストークが変化することに対応しなければならない。

(2) 首周りの筋活動の計測

頭部の動作に特に重要とされる左右それぞれの胸鎖乳突筋 (SCM)、頭板状筋 (SPL)、僧帽筋 (TRAP) の筋電位を計測し、筋活動の大きさ (筋張力) を推定するために Winter と Stark の筋活性度の考え方をを用いた。比較的ゆっくりとした筋協調を分析するために、筋シナジー仮説に基づいて解析を行った。筋シナジー仮説は、筋や関節の自由度よりも少数の動作パターン (シナジーと呼ぶ) の組み合わせで人間の運動が構成されているとする仮説であり、身体の高い自由度や冗長性に対し

て効率的に運動を獲得・発現できる戦略だと考えられている．本研究では，NMF (Non-negative matrix factorization) によって，筋活性データ M を，

$$M \simeq WH \quad (1)$$

と分解した．ここで， W は各筋の筋活性の割合を表す空間パターン (Spatial pattern)， H は各空間パターンの発現の強さを時系列で表す時間パターン (Temporal pattern) である．さらに，時間的解像度の高い筋協調関係を調べるために，ウェーブレットコヒーレンスを用いて解析を行った．連続ウェーブレット変換の計算には，計測した筋電位データを全波整流したデータを用いた．また，マザーウェーブレットとして，Morlet ウェーブレットを使用した．

(3) 筋シナジーの恒常性の分析

筋シナジーの恒常性を分析するために，首周りではなく，より大きな動作である「立ち上がり動作」を選んだ．これは，立ち上がりが日常生活において繰り返し行われ，動作の再現性が高いためである．また，立ち上がりが重要なリハビリテーションのトレーニング項目となっているなど，注意状態の分析だけでなく，種々の目的に研究結果が活用されることを期待している．

立ち上がり動作に対して筋シナジーを求めた例 (空間パターン) を図 1 に示す．ここでは，立ち上がりに重要な 10 の筋，脊柱起立筋 (ES)，大殿筋 (GM)，中殿筋 (Gmed)，内側広筋 (VM)，外側広筋 (VL)，大腿直筋 (RF)，

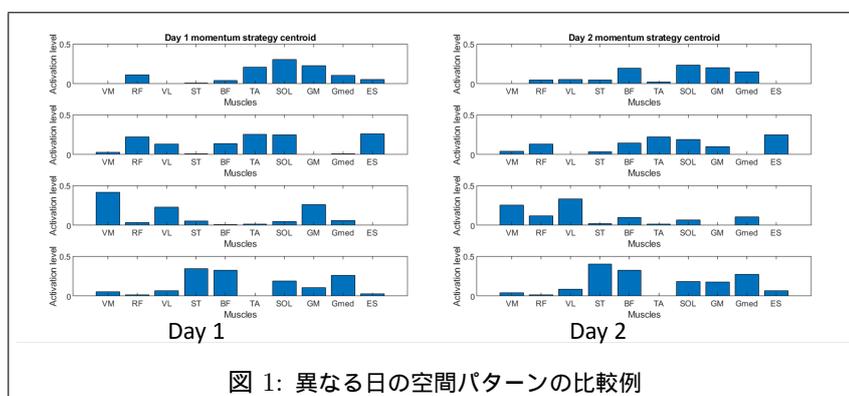


図 1: 異なる日の空間パターンの比較例

(RF)，大腿二頭筋 (BF)，半腱様筋 (ST)，前脛骨筋 (TA)，ヒラメ筋 (SO) について，筋活性度を求め，それを上式によって分解した．図で，それぞれの空間パターンとして，各筋の寄与 (筋電値の大きさ) が示されているが，立ち上がりに関しては，3～4 個の空間パターンが支配的であることが示されている．

4. 研究成果

(1) 注意状態による振り向き動作の変容

実験設定

被験者に異なる視覚刺激を与えて注意状態の異なる頭部回旋運動を誘発した．設定したタスクは，頭部回旋運動を行いながら，ディスプレイに表示されるターゲット (注目対象) を探し，それを注視するものである．

(a) 固定条件: 被験者は，運動開始以前にターゲットの表示位置を知っており，その知識に基づいてフィードフォワード的に効率的な回旋運動を行う．運動中には，注意が記憶 (または空間的なイメージ) 中のターゲットのみに集中して向けられている状態となる．

(b) ランダム条件: ターゲットの表示位置を毎試行ごとランダムとする．被験者は，事前知識に基づくことなく，ターゲットを探しながらフィードバック的に回旋運動を行う．

筋シナジー解析

固定条件とランダム条件の各々について筋シナジーの導出を行った結果，両条件ともに空間パ

ターンは3つの成分でよく表現することができ、各成分が異なる条件間で類似していることを確認した。

図2に、右方向への頭部回旋運動における筋シナジーの空間パターンを示す。得られた3つの成分のうち、シナジー1は主働筋である左の胸鎖乳突筋 (Left-SCM) を中心としており、主要な回旋トルクを発生する働きを持つ。シナジー2は協働筋もしくは拮抗筋として働く左の僧帽筋 (Left-TRAP) が主であり、頭部回旋の安定性を保っていると考えられる。シナジー3は協働筋である右の頭板状筋 (Right-SPL) を中心に構成される成分であり、安定して頭部回旋が行われるように補助的な力を発揮していると考えられる。

図3に、各条件における典型的な筋シナジーの時間パターンの例を示す。固定条件では、画面切り替えから0.5 s以内に3成分すべてがほぼ同時に急峻に活性化しており、各シナジーが一度に強く発現したことがわかる。一方、ランダム条件では、固定条件に比べて各シナジーの立ち上がりが緩やかであり、それが同期していない。この傾向は明確であり、固定条件およびランダム条件それぞれのほぼ全ての試行において、それぞれ図3(a) および (b) のような時間パターンが現れた。

時間周波数解析

図4に、各実験条件における左の胸鎖乳突筋と右の頭板状筋の筋電位信号の間のウェーブレットコヒーレンスの例を示す。固定条件においては、図4(a) のように、周期0.1 s付近の周波数帯において強いコヒーレンスが現れるケースが80%程度と全体の大半を占めた。一方で、ランダム条件においては、ほぼ全ての試行において、図4(b) のように、上記の周波数帯に強いコヒーレンスは見られなかった。これらの傾向は、左の胸鎖乳突筋と左の頭板状筋、左の胸鎖乳突筋と右の胸鎖乳突筋など、他の多くの筋の組み合わせでも確認された。いずれの組み合わせにおいても、固定条件およびランダム条件それぞれの80%程度の試行において、それぞれ図(a) および (b) のようなコヒーレンスが見られた。

注意状態と筋活動との関係

筋シナジー解析によって、頭部回旋運動中の筋活性が注意状態によらず一定の3成分により表現できること、また、注意状態による違いが筋シナジーの時間パターンに顕著に現れることが明らかになった。注意をあらかじめ固定できる場合には、運動を構成する各シ

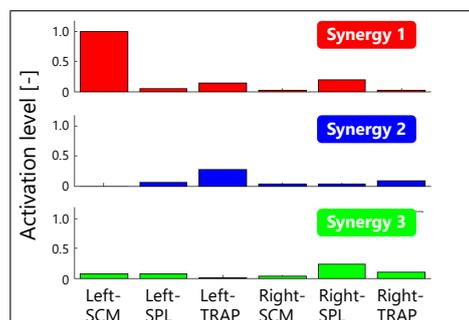
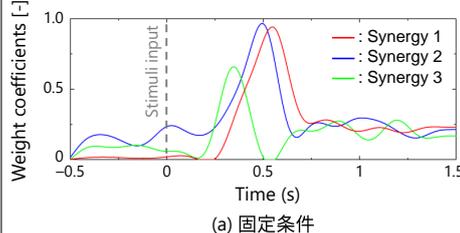
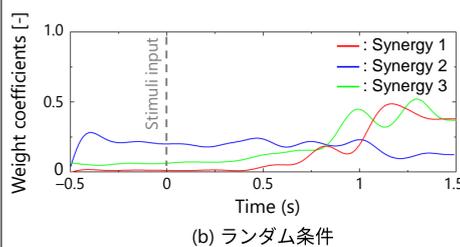


図2: 右方向への頭部回旋運動における筋シナジーの空間パターン

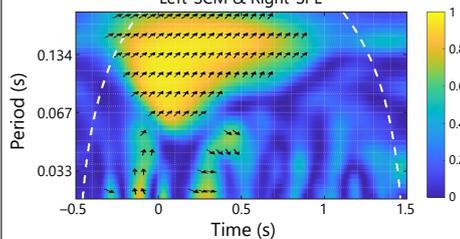


(a) 固定条件

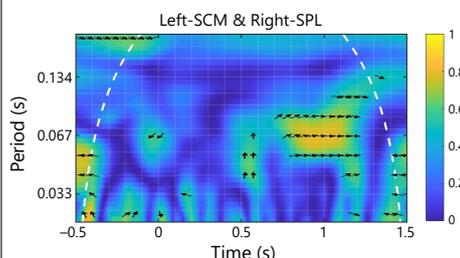


(b) ランダム条件

図3: (a) 固定条件および (b) ランダム条件それぞれにおける筋シナジーの時間パターン



(a) 固定条件



(b) ランダム条件

図4: ウェーブレットコヒーレンスの例

ナジーを同時に強められること、一方で、注意対象が時間的に変化する場合には、各シナジーを弱く発現させた状態を継続する必要があるとともに、それらをはっきり同期させることが難しいとすることを示している。また、ウェーブレットコヒーレンス解析によって、注意が固定された運動において、複数の筋の筋活動間に強い同期関係(コヒーレンス)が表れることが確認された。これらのことから、注意状態の違いが複数筋間の時間周波数的な関係としても観測できることがわかった。具体的には、注意対象が固定されて、事前に運動戦略が立てられる場合には、動作の開始時にコヒーレンスが長く表れること、また、決定的でない注意対象が散在する場合には、それに対応した短周期の同期が短く現れることなどが示された。

(2) 筋協調の恒常性に関する分析

本研究では、「脳神経系においては(短期間で)筋シナジーが変化しない」ことを仮定とし、「計測されたデータから計算される筋シナジー」は脳神経系の筋シナジーが筋電計測のゲインやクロストークによって変調されたものとする。この考えに基づき、「計測されたデータから計算される筋シナジー」を以下のように照合する。まず、複数日の計測データに対し、それぞれのデータに対する筋シナジーを計算し、次に、得られた筋シナジーどうしの変換を求める。それによる矛盾(誤差)を確認することによって、仮定の正しさを確認する。そのために、 i 日目の計測データを M_i とし、それぞれの NMF による分解を以下を行う。

$$M_i \sim W_i H_i \quad (2)$$

上記の理由から、異なる日の空間パターンは異なる値となることが想定される。つまり、 $W_i \neq W_j (i \neq j)$ となる。次に、変換行列 R_{ij} を以下のように設定する。

$$W_i \sim R_{ij} W_j \quad (3)$$

非ゼロ要素をゲイン比とクロストーク項だけに絞れば、最小二乗法などによって R_{ij} を求めることができる。この R_{ij} によって変換された空間パターンを $\tilde{W}_i (= R_{ij} W_j)$ とし、 W_i と \tilde{W}_i 、 H_i と $\tilde{H}_i (= M_i / \tilde{W}_i)$ を比較することによって、変換の妥当性を確認する。

このような検証を5人の二週間中の5日について行った結果、概ね良好な結果を得た。これにより、脳神経系における筋シナジーは短期間では大きく変化しないことが示唆された。今後、より検証を進めていく予定である。

(3) まとめ

「注意を払う動作」が最も顕著に現れるのが首周りであるため、本研究では「首周りの動作」を重点的に分析した。また、首周りの運動だけでなく多くの動作は、複数の筋の協調によって発現する。この協調関係が安定して計測できることが、「外部表出された動作」から「注意」を推定するために重要な問題となるため、その分析を行った。さらに、「注意を払う動作」が行われていることを別の人が知覚するための、動作の伝達方法やその性能について設計や調査を行った。

これらの研究の結果として、注意の状態が動作中の筋協調の発現やその時間的な変化に顕著に現れることが確認できた。これらは注意に対する(残存)能力や個人的な特性を測るために筋活動の具体的な利用方法を提案する、新しい知見となつている。また、その際に用いる筋シナジーが比較的安定に現れることも検証できつつある。将来的な応用として、注意状態やその能力の推定などがあげられるが、それだけでなく、見守りなどへの応用も考えられるが、その可能性について確認することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Takahide ITO, Yuichi Nakamura, Kazuaki Kondo, Espen KNOOP, Jonathan ROSSITER	4. 巻 E103-D, No.11
2. 論文標題 Design and Performance Analysis of a Skin-Stretcher Device for Urging Head Rotation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 2314-2322
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋克弥, 下西 慶, 近藤一晃, 井藤隆秀, 戸田真志, 秋田純一, 中村裕一
2. 発表標題 頭部回旋運動における注意状態が頸部筋活動に及ぼす影響
3. 学会等名 信学技報, MBE2021-90, Vol.121, No.389
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Julian Ilham, Yuichi Nakamura, Kazuaki Kondo, Takahide Ito, Qi An, Junichi Akita, Masashi Toda
2. 発表標題 Stability of muscle synergy patterns for sit-to-stand motions under different conditions
3. 学会等名 IEICE Tech. Report, MBE2021-88, Vol.121, No.389
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daiya Kibe, Masashi Toda, Masahiro Migita, Junichi Akita, Kazuaki Kondo, Yuichi Nakamura
2. 発表標題 SVM-based motion estimation and muscle fatigue evaluation using myoelectric center frequency
3. 学会等名 IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川村美帆, 佐々木雄一, 中村裕一
2. 発表標題 GP-HSMM の尤度計算並列化による高速な身体動作の分節化方式
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, Vol.SICE SI2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺田翔平, 右田雅裕, 戸田真志, 近藤一晃, 秋田純一, 中村裕一
2. 発表標題 滑りによる物の落下予測に有効な筋電位特徴の調査
3. 学会等名 信学技報, HIP2020-45, Vol.120, No.185
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺田翔平, 右田雅裕, 戸田真志, 近藤一晃, 秋田純一, 中村裕一
2. 発表標題 水平腕運動中に腕の筋から生じる反射応答の調査
3. 学会等名 HCGシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田拓洋, 井藤隆秀, 近藤一晃, 中村裕一, 秋田純一, 戸田真志
2. 発表標題 筋活動による呈示反力の制御と質感の変容の分析
3. 学会等名 HCGシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahide Ito, Yuichi Nakamura, Kazuaki Kondo, Jonathan Rossiter, Junichi Akita, Masashi Toda
2. 発表標題 Motion Information Transmission for On-Neck Communication
3. 学会等名 International Conference on Computer-Human Interaction Research and Applications (CHIRA)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	秋田 純一 (AKITA JUNICHI) (10303265)	金沢大学・工学系研究員・教授 (13301)	
研究協力者	戸田 真志 (TODA MASASHI) (40336417)	熊本大学・総合情報基盤センター・教授 (17401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------