

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：34428

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19617

研究課題名（和文）繰り返し動作の変動における生理学的因子の解明および変動抑制装置の開発

研究課題名（英文）An investigation of the physiological factor in trial-to-trial variability

研究代表者

瀧 千波（Taki, Chinami）

摂南大学・スポーツ振興センター・助教

研究者番号：40844311

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、個人内で繰り返し動作時に発生する試行間変動と自律神経活動の関係性を明らかにするため、安静時における自律神経活動と体性運動神経の関係性について検討を行った後、繰り返し動作の最大随意収縮時における自律神経活動の変化について調べ、抑制方法の検討と抑制装置の開発を行った。健康若年者を対象とした測定の結果、試行間誤差には自律神経活動の変動が影響していることが示唆され、抑制装置や呼吸制御によって試行間誤差が抑制できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

個人内で繰り返し動作時に発生する試行間変動は現在まで着目されておらず、生理学的に不明な点が存在する。本研究では、自律神経活動のゆらぎに着目し、試行間変動には生理学的要因として自律神経活動が影響していること、加えて安静時の自律神経活動と脊髄運動ニューロン活動に関係があることを示唆し、変動の抑制装置を開発した。本研究の成果はスポーツのみならず、医療分野やリハビリテーションなど多分野への応用につながる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to investigate the relationship between trial-to-trial variability and autonomic nervous activity. The results of this study suggested that (1) fluctuations in autonomic activity affected trial-to-trial variability and (2) there was a possibility of controlling trial-to-trial variability by the developed device or respiration.

研究分野：身体運動システム

キーワード：フラクタル 自律神経活動 H反射 呼吸

1. 研究開始当初の背景

ヒトは同一動作を繰り返し実行しようとしても、ロボットのように同一動作を繰り返すことはできず、実際の動作には意図せぬばらつき(動作の変動)が発生する。これはスポーツで頻繁に要求される微細な力調節を要求される動作のみならず、実験環境下における最大筋出力発揮のような場面でもみられる(対馬, 2015)。この動作の変動は再現性を要求されるスポーツのパフォーマンスにおいて重要な影響を与えるため、動作の変動を最小限にすることが望まれる。しかし、現在までに個人内の動作の変動に着目した研究は少なく、変動に着目している先行研究では実験課題の設定により結果に一貫性はなく、加えてヒトの冗長性によっても影響を受けてしまい、生理学的メカニズムは明らかではない。動作の変動は前述したようにパフォーマンスに大きく影響するため、動作の変動が発生する生理学的メカニズムを明らかにすることはスポーツのパフォーマンス発揮のために重要である。

一方、体性運動神経と自律神経はともに末梢神経であるにも関わらず、独立した神経であるとみなされ、その関係性については言及されてこなかった。しかし、近年、解剖学的に筋紡錘に交感神経が分布していることが示されており(Radovanovic et al., 2015)、体性運動神経と自律神経の関係性について疑われ始めている。また、自律神経活動を反映する血圧や心拍は安静時であっても常に無意識下で変動している(Yamamoto & Hughson, 1994)。このような変動は一般的に“ゆらぎ”と呼ばれており、ヒトの身体において必ず発生している。従って、自律神経活動で発生する“ゆらぎ”が動作の変動に関係しており、その結果動作の変動が発生していることが予測される。

2. 研究の目的

本研究は、最大随意収縮力発揮時における個人内で繰り返し動作時に発生する動作変動のメカニズムを自律神経活動の観点から明らかにすることが目的である。加えて、動作変動のメカニズムに基づいた、変動抑制装置の開発に向けたシミュレーションを行い、数値シミュレーションから得られた最適値に基づいた抑制装置の開発を行った。

3. 研究の方法

(1) 自律神経活動の影響の検討

安静時におけるH波振幅と血圧変動の関係性の検討

9名の健常若年者を対象に、安静仰臥位にて腓腹筋内側頭(MG)およびヒラメ筋(SOL)からH反射を導出し、心電図・血圧・呼吸の20分間の同時計測を行った。H波計測の最適な刺激強度が異なったため、SOL刺激試行とMG刺激試行の2回をランダム順で行った。血圧から収縮期血圧(SBP)および拡張期血圧(DBP)、心電図からR-R間隔を算出し、時系列データを算出した。その後、変動の度的特性を定量化するためDetrending Moving Average Analysis(DMA)を行い、スケーリング指数を算出した。2つの時系列間の関係性を評価するためにDetrending Moving-average Cross-correlation Analysis(DMCA)を行い、相関係数DMCAを各種時系列間(RR-Hwave(SOL)、SBP-Hwave(SOL)、DBP-Hwave(SOL)、RR-Hwave(MG)、SBP-Hwave(MG)、DBP-Hwave(MG))で算出した。DMCAにおけるスケーリング領域は $1.2 \leq \log_{10} n \leq 2.2$ の範囲とし、回帰直線をフィットさせることでスケーリング指数を各被験者で推定した。その後、MG刺激試行とSOL刺激試行の比較を行った。

MVC発揮直前の自律神経活動の検討

の結果を踏まえ、MVCを行う前後で呼吸によって意図的に変調させた場合に血圧や心電図の変化があるか否か、また発揮トルクのピーク値が変化するかについて追加検討を行った。8名の被験者を対象とし、MVC試行中の左手首から血圧、心電図および呼吸と下腿三頭筋の筋電図を計測し、繰り返しのMVC発揮を14回行った。14試行中呼吸のコントロールを行い、MVC発揮直前30秒間でメトロノームに合わせるrapid条件(1 Hz)と自然呼吸条件をランダムに、各条件7試行ずつ行った。筋電図は正規化し、各試行のピークトルクの平均値、筋活動(RMS)、直前30秒間のRRIおよびSBP・DBPの平均値を算出した。その後、条件間で比較を行った。

(2) 抑制装置に組み込むノイズ刺激パラメータのシミュレーションによる検討

H波振幅変動に対して感知できないノイズを印加することで変動が変化することが示唆されている(Taki et al., 2017)。そこでノイズ刺激を応用した刺激装置を開発するため、複数のパラメータの検討を行った。H波振幅変動データを基として、様々なパワースペクトル密度で長時間相関特性が異なる時系列データを作成した。生体内に印加するノイズ刺激について周波数特性や刺激強度が異なった組み合わせを作成し、作成した時系列データに対してノイズを印加する確率共振の数値シミュレーションを行った。上述から算出されたデータを基に同一被験者(健常成人2名)に対してシミュレーションと一致するかを検討した。

(3) 繰り返し動作の変動に対する抑制装置の開発

(2) のシミュレーションで算出した実効値に基づいた抑制装置を開発した。さらに検証のため、開発した抑制装置を用いて実際に筋出力の変動が抑制できるか否かについて健常成人 2 名を対象とし、握力を 10 回実施し、抑制装置をランダムにオン・オフし、ノイズ印加(W)と印加なし(W/O)の条件間で比較した。

4. 研究成果

(1) 自律神経活動の影響の検討

安静時における H 波振幅と血圧変動の関係性の検討

安静時における H 波振幅変動と SBP 変動のスケーリング指数は、各試行の RR、SBP、H-wave の時系列で MG 刺激試行と SOL 刺激試行間で差は認められなかった。一方、DMCA の SBP-Hwave (MG) と SBP-Hwave (SOL) の比較で有意差が確認された。そのため、H 波振幅と SBP の間には相関関係が存在し、安静時の H 波振幅や自律神経活動の“ゆらぎ”が脊髄上位からの入力によるものであることが示唆された。

MVC 発揮直前の自律神経活動の検討

呼吸統制を行い、rapid 条件と自然呼吸条件で比較したところ、rapid 条件において有意にピークトルク値が高くなったこと、筋活動(MG、LG)の値に rapid 条件と自然呼吸条件で差があったことが確認された。また、MVC 発揮直前 30 秒間の安静時における SBP は rapid 条件において有意に高くなっていた。これまでの研究で、体性運動の出力と交感神経活動には相関関係があることが示唆されている (Goodchild et al., 2008)。したがって、血圧を変化させることで筋活動や発揮トルクも変化する可能性が示唆された。

(2) 抑制装置に組み込むノイズ刺激パラメータのシミュレーションによる検討

H 波振幅に対してカラーノイズを印加することで確率共振現象を確認でき、特にホワイトノイズ、ピンクノイズにおいて、スケーリング指数が 1 に近づくことが確認された。数値シミュレーションから算出した実効値を用いてヒトに対してノイズ印加を検証した結果、シミュレーションの予測値と近づくことも確認された。

(3) 繰り返し動作の変動に対する抑制装置の開発

(2) で算出された実効値を基に抑制装置を開発した。装置を用いて最大随意収縮を行った結果、W 条件にて筋出力の変動が抑制された。一方で、筋出力のピーク値が毎試行上昇したわけではなかったため、常に変動する H 波振幅に適応させながら装置を開発する必要があることが示唆された。また、開発したデバイスのサイズが動作に影響してしまうことがあったため、さらなる検討が必要である。

以上のように、試行間変動が身体内で発生している自律神経活動の変動と関与していることが示唆された。収縮期血圧の変動は筋活動やピークトルクにも関与しており、自律神経活動の変化が脊髄運動ニューロン活動の変化に影響する可能性が示された。また、抑制装置も開発し、実際に変動を抑制することが可能であることも示唆された。

<参考文献>

- 対馬栄輝. 最大随意性筋力測定における適切な測定回数の検討. 東北理学療法学. 27:86-90, 2015
- Radovanovic D, Peikert K, Lindstrom M, Domellof FP. Sympathetic innervation of human muscle spindles. *J Anat* 226:542-548, 2015.
- Yamamoto Y & Hughson RL. On the fractal nature of heart rate variability in humans: effects of data length and beta-adrenergic blockade. *Am J Physiol* 266:R40-49, 1994.
- Taki C, Shiozawa N, Kimura T. Application of Minute Electrical Noise to Muscle Proprioception Modulates Excitability of Alpha Motor Neuron Group. *Advanced Biomedical Engineering*, 6:37-41, 2017.
- Goodchild AK, van Deurzen BT, Hildreth CM, Pilowsky PM. Control of sympathetic, respiratory and somatomotor outflow by an intraspinal pattern generator. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 35:447-453, 2008.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Taki Chinami, Nakata Akio, Shiozawa Naruhiro, Kiyono Ken, Kimura Tetsuya	4. 巻 765
2. 論文標題 Cross-correlated fractal components of H-wave amplitude fluctuations in medial gastrocnemius and soleus muscles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neuroscience Letters	6. 最初と最後の頁 136264 ~ 136264
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neulet.2021.136264	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Chinami Taki, Naruhiro Shiozawa, Tetsuya Kimura
2. 発表標題 Peak torque variability in the MVCs of the plantar flexors is associated with the resting systolic blood pressure
3. 学会等名 International Society of Electrophysiology and Kinesiology（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Chinami Taki, Takuya Toyoshi, Naruhiro Shiozawa
2. 発表標題 The investigation of cardiocomotor coupling in the water
3. 学会等名 26th Annual Congress of the European College of Sport Science（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chinami Taki, Naruhiro Shiozawa, Tetsuya Kimura
2. 発表標題 Trial-to-trial peak-force variation in planter flexor MVC is associated with time-lag of electrical activities of agonist muscles
3. 学会等名 20th Congress of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology（国際学会）
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------