

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏 名 BA0 Caijilahu
 学 位 博士（工学）
 学 位 記 番 号 新大院博（工）第 506 号
 学位授与の日付 令和 2 年 9 月 23 日
 学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
 博 士 論 文 名 運動時と視覚探索時における生体信号計測とそのモデル化に関する研究

論文審査委員 主査 教授・前田 義信
 副査 教授・堀 潤一
 副査 教授・飯島 淳彦
 副査 教授・山崎 達也
 副査 准教授・岩城 護
 副査 名誉教授・木竜 徹

博士論文の要旨

本論文は生体信号の計測とそのモデル化に関する研究であり，その中でも 1) 運動時のストレスが聴覚刺激によって軽減されることの検証と，2) 視覚探索が効率的である理由が眼球運動の特性にあることの検証の 2 点に焦点を当てて行われた．これら 2 点は生体の効率性に関する研究の一環である．前者は，音楽を聴取しながらサイクリング運動すると，運動中の心拍変動に影響を与えストレスが低減して運動効率が上昇するという仮説の検証である．後者は，複数の代替物の中からターゲットを探索する視覚探索時の眼球運動（注視点の動き）が，ターゲットを短時間で発見できるように最適化されているという仮説の検証である．ともに実験参加者から生体信号を計測し，数理モデルを構築して検証を行った．

本論文は 6 章から構成され，第 1 章では研究全体に関する序論，第 2 章では心拍変動計測による自律神経系の評価，第 3 章では聴覚刺激に対する運動時の心拍変動の評価，第 4 章では視覚の生理学的知見，第 5 章では視覚探索時の注視点ネットワークがスモールワールド性を有することが述べられた．第 6 章は研究統括である．

適切な運動をすることは健康の維持・増進のために有効であるが，モータリゼーションが発展した現代社会において，日常生活で身体を動かす機会は減少している．それゆえ，身体トレーニングの需要は年々増加している．運動強度と運動時間を適正に保つためには，心拍変動のような数値的な生体信号をフィードバックすることが求められる．心拍変動は大きく時間領域指標と周波数領域指標に分類される．時間領域指標の例としては，隣接する 2 つの R 波の間の時間間隔（RR 間隔）の標準偏差（SDNN）や，RR 間隔の差の二乗平均平方根（RMSSD）がある．交感神経活動の相対的指標である SDNN/RMSSD も指標になりうる．周波数領域指標の例としては，低周波数 LF を高周波数 HF で除した LF/HF がある（第 2 章）．LF/HF も交感神経活動の指標のひとつである．サイクリング運動中のこれら生体信号を計測し，主観的な知覚運動強度（RPE）との関係性に着目した（第 3 章）．

その結果，音楽が好きなグループに分類された実験参加者の知覚運動強度 $feRPE$ は，重回帰モデル $feRPE = -0.04 LF/HF - 0.90 RMSSD$ ($R^2 = 0.81$) で説明された．一方で，音楽が好きでないグループに分類された実験参加者の知覚運動強度 $nfeRPE$ は，重回帰モデル $nfeRPE = -0.82 RMSSD + 0.07 SDNN/RMSSD$ ($R^2 = 0.69$) で説明された． R^2 の値より，音楽が好きな実験参加者の RPE が客観的に計測された生体信号からよく説明できることが分かった．また 2 つのグループ間で統計的検定を行った結果，音楽が好きな実験参加者は，交感神経の上昇を伴うことで，低強度の運動であっても主観的運動強度が有意に上昇することが分かった．

視覚探索では、探索時間が代替数の対数に比例することが知られている（Hick の法則）。つまり代替数が増加しても探索時間は相対的に増加しない。この効率的な視覚探索は眼球運動の機能に内在すると考えられる（第 4 章）。本論文では、眼球運動が探索画面上で紡ぐ“注視点ネットワーク”は、スモールワールド性を有するがゆえに探索時間が増加しないという仮説を立て検証を行った。スモールワールド性は任意の 2 点間距離が代替数の対数程度（ランダムグラフと同じ）という条件（短距離性）と、任意の 3 点がパスで接続される“三角形”の割合が相対的に多いという条件（クラスタ性）の 2 条件が満たされるネットワークに現れる。探索領域を素早く走査するためには短距離性（ショートカット）が必要であり、眼球運動のサッケードがこれに貢献する。しかし、短距離性だけではターゲットを認知することができない。ターゲットを認知するためには、注視点ターゲット近傍で最大 0.5 秒停滞しなければならない。注視点の停滞は眼球の固視微動であり、素早い発見と認知のために、注視点ネットワークにはショートカットだけでなくクラスタ性も求められる。

本論文では視覚探索実験データの頻度分布から固視微動とサッケードをモデル化し、ネットワークを構築した。固視微動に対するサッケードの割合 p を変化させ、短距離性とクラスタ性を求めた。割合 p が実際の眼球運動で観察されるサッケードの割合と一致するとき、スモールワールド性が最も大きくなるような短距離性とクラスタ性が得られた。こうして視覚探索の効率性（認知科学で観察される経験的事象）が、注視点ネットワークのスモールワールド性（複雑ネットワーク科学の知見）から説明できることが示唆された。

審査結果の要旨

本論文はヒトの行動の効率性に関して、以下の 2 点を明らかにした。

- 1) 身体にとっては大切だが心理的な苦痛を伴う運動に対して、テンポの速い音楽を聴取しながら低負荷の運動を実施すると、心拍変動が影響を受け運動効率が上昇する。すなわち、身体的負荷は残るので運動の効果はあるが、心理的負荷は軽減されることが明らかになった。ただし、高負荷の運動や遅いテンポの音楽聴取では効果がなく、「低負荷運動」＋「速いテンポの音楽聴取」のときに、運動に対する心理的負荷が相対的に小さくなることが分かった。さらに、重回帰分析を用いて心理指標に影響する生理指標を少数選別し、実験結果を多変量解析手法でもって定量的に評価することができた。
- 2) 視覚探索においてターゲットの場所が予め分かっているなら、最短距離で眼球運動し注視点を移動させればよい。しかし、ターゲットの場所が不明のとき、どのような眼球運動をすれば短時間でターゲットを発見できるのか？眼球運動は、定性的に小さな固視微動と大きなサッケードに分類される。実験から得られた固視微動に対するサッケードの出現割合は、注視点ネットワークのスモールワールド性を相対的に大きくするようになっていたことが分かった。スモールワールド性はネットワーク内の任意の 2 点間距離が相対的に小さくなる性質なので、短時間でターゲットを発見できるようにサッケードの出現割合が機能生理的に決められていると推察される。

以上のように本論文では、生体の効率性に関して仮説の実験的検証とモデルを用いた数理的解析を行っており、これまで科学的に未解決であった課題に対し、ひとつの解答を与えている。ゆえに研究内容と研究手法の双方に独創性と新規性が認められ、今後、生体機能解析の研究分野で応用される可能性が高い。よって、本論文は博士（工学）の博士論文として十分であると認定した。