

運動主体感に対する 運動情報と心拍情報の関連性の検討

伊勢崎 隆司¹ 大山 慎太郎² 梅沢 昂平¹ Siqu Li³ 青木 良輔¹ 小池 幸生¹ 下田 真吾²
平田 仁⁴ 小田 昌宏³ 森 健策³

概要: ある運動を引き起こしている,あるいは生み出しているのは,他の誰でもない自分であるという感覚が運動主体感であり,リハビリやロボットによる運動支援など様々な領域で着目されている.このような運動主体感は一般的にはアンケートによる定性評価と,外部情報に基づいて運動状態と生理的状态の変化を捉えることで運動主体感を定量的に評価するアプローチがある.生理的状态の計測については大掛かりな装置を用いたアプローチが主流であり,実世界への適用が困難であるという課題がある.また,運動状態と生理的状态が運動主体感に関連して変化することはわかってきているが,時系列的な変化の関連性(例:心拍数が上昇した後に運動主体感が低下するなど)については検討が少ないと考える.本研究では運動主体感に関連して変化する生理的状态を捉える情報として心拍情報に着目し,運動主体感に対する運動情報と心拍情報の時系列的变化特性も含めて関連性を評価することを目的とする.運動主体感に関する4つのアンケートへのスコアに対して運動特徴量と心拍特徴量を用いて重回帰分析を行った.その結果,主体性や課題遂行性に関するアンケートに対して運動特徴量と心拍特徴量が有意に寄与している結果が得られた.また,運動主体感と運動特徴量・心拍特徴量の時系列的变化特性を考慮した重回帰分析においては,運動を阻害されるような感覚に対して,事前に心拍特徴量に変化が生じた後に運動情報に変化が生じている可能性が示唆された.このような結果を通じて,リアルタイムでの運動主体感推定や一定時間先の運動主体感の変化予測技術の実現可能性を検証した.

1. はじめに

運動主体感は「ある運動を引き起こしている,あるいは生み出しているのは,他の誰でもない自分であるという感覚」としてGallagherによって提唱された概念である[1].このような認知的感覚は,患者がリハビリテーションを能動的に実施できるようにするための要素として着目されていたり[2],人の運動をロボットで支援する際にどの程度ロボットが補助をするべきかをユーザの体験的側面で検討する際[3]において重要な観点として考えられたりしている.

運動主体感を計測するためには,被験者の主観的回答に基づく計測が主流である[4],[5],[6].運動主体感が強く生じた際に,自分の行為とその行為の結果のフィードバックまでの時間が短く感じられる現象を捉えるIntentional bindingと呼ばれる課題もあるが[7],このような課題も被験者からの回答を必要とする.運動主体感を被験者からの回答を必要とせずに外部観測情報から評価する試みもいく

つか報告されている.運動主体感の認知モデル(順モデル仮説)に基づく自身の予測した結果と実際の結果との合致性が運動主体感に作用するとも言われており[8],運動の結果(パフォーマンス)は運動主体感に作用することが報告されている[9].運動主体感の感覚は脳内における認知的プロセスであるため,fMRIを通じて運動主体感に関連して変化する脳領域の検討も進められている[10].これら従来研究に鑑みると,運動主体感は運動状態と生理的状态の外部観測によって評価できる可能性がある.一方で,リハビリテーションやロボット支援は実世界で行われることを考えると,実世界への拡張性を考慮するべきであるが,fMRIなどの大掛かりな装置を用いた生理的状态の計測は実世界への拡張は課題が残る.

運動主体感に関連する考えで,その身体が自分の身体であるという感覚である身体所有感がある.この身体所有感を外部情報から評価する際に,注射器が刺さるなどの嫌悪提示による交感神経活動の変化を対象とした心拍情報や皮膚コンダクタンス反応といった生理情報計測がある[11].身体所有感と運動主体感の関連性については継続的に議論がなされているが[4],[12],このような自律神経系の変化

¹ NTT 人間情報研究所

² 名古屋大学予防早期医療創成センター

³ 名古屋大学大学院情報学研究科

⁴ 医学部個別化医療技術開発講座

は身体所有感同様に運動主体感においても生じている可能性がある。心拍情報や皮膚コンダクタンス反応についてはfMRIよりも計測が簡便であることから、これら生理情報から運動主体感に関わる生理的状态の変化を捉えることができれば実世界への適用が期待できる。

運動状態（運動結果が求める理想的であったか否か、どのような運動の仕方だったか等）と、生理的状态（自律神経や心拍数上昇、発汗の有無等）は運動主体感に関連して変化すると考えられるが、これらの時系列的な関連性についても検証は少ないと考えられる。運動主体感は自身の運動とその結果に対する認知的判断プロセスを通じて生成されると考えられるが、この運動に対する認知的判断プロセスにおいて運動状態や生理的状态が何らかの時系列的变化特性を伴って変化している可能性も考えられる。例えば、心拍数が上昇するなどの生理的变化が生じた後に運動主体感を感じる可能性や、運動主体感を感じた後に心拍数が低下するなどの生理的变化が生じる可能性が考えられる。運動内容についても同様に、例えば、パフォーマンスが高くなった後に運動主体感を感じる可能性や、運動主体感を感じた後にパフォーマンスが高くなる可能性などが考えられる。このような運動主体感と運動状態と生理的状态の時系列的变化特性を捉えることができれば、一定時間先の運動主体感を予測することができるようになると期待できる。

本研究では、運動状態に関する情報（運動情報）と生理的状态に関する情報（生理情報）の運動主体感に対する関連性を時系列的観点も含めて検証することを目的とする。生理情報としては計測の簡便さから心拍情報に着目して検討を進めた。本稿では、運動情報から算出する運動特徴量と心拍情報から算出する心拍特徴量と運動主体感の関連性について述べる。

2. 実験

本実験では運動主体感に対する運動情報と心拍情報の関連性を検証することを目的に実験を実施した。図1に示すように、黒い背景の画面の中に白い背景で描写するコースが上から流れてくる環境において、画面下部にある赤いカーソルを入力IFを通じて左右に操作し、コース内部を走行する課題を実施した。本実験は名古屋大学医学部医学系研究科生命倫理審査委員会（承認番号:2020-0538）の承認を受けて実施した。

実験プロトコル 被験者は心拍センサを装着し、実験システムの前に着座する。はじめに3試行分実験システムを導入なしの条件で体験し、システムへの順応を促した。その後、介入なし・支援的介入・阻害的介入の3パターンを順序効果を考慮して被験者ごとに順番を変化させ、各介入パターンにつき3試行ずつデータを計測した。試行が始まると白いコースが上から流れてくる環境にて赤いカーソルが描写される。1試行は1分で、試行実施中の運動情報をソ

フトウェアで計測しつつ、心拍情報を装着したセンサで計測した。1分間経つと自動的に画面が黒くなり、被験者はその時の運動主体感について次で述べるアンケートへの回答を実施した。

計測データ 運動主体感を計測するために下記4つのアンケートを通じたスコアリングの手法を採った。

- Q1 赤い点を自分の思い通りに制御できた
- Q2 コンピューターから自分の操作を支援されているように感じた
- Q3 コンピューターから自分の操作を妨げられるような感覚を覚えた
- Q4 実験者の指示通りに、赤いカーソルを操作できた（課題を上手に実行できた）

上記4項目を設定した理由として、運動主体感は、「ある運動を引き起こしている、あるいは生み出しているのは、他の誰でもない自分であるという感覚」であることに鑑み、運動を生み出しているのは自分である感覚を計測するためにQ1を設定した。また、本実験ではユーザの運動に対してアシスト的観点と外乱的観点を介入を行っているため、それぞれに対する主観的な感じ方を評価するためにQ2, Q3を設定した。さらに、運動主体感において運動が成功したか否かといったタスクパフォーマンスは重要なファクターであるためQ4を設定した。

心拍情報計測については、心電図のピーク間隔（R-R Interval, 以降RRI）をmyBeat（UNION TOOL Corp.）を用いて計測した。RRI情報は心拍の拍動ごとに前回の拍動との時間差をデータとして格納する。

介入パターン 同一条件における運動主体感の変化においては運動の支援的介入と阻害的介入で異なる可能性があるため、介入パターンとしては、ユーザの運動を支援するアシスト介入と運動を阻害する介入によるノイズ介入の2つと、基準条件として介入なしの3パターンを準備した。なお、介入はハンドルへの物理的フィードバックではなく、ユーザのハンドル操作にシステムが算出した介入量を加えた移動量をディスプレイ上のカーソルに反映させる方法を採用した。アシスト介入については、コースの境界付近にカーソルが位置している場合がパフォーマンスに大きく関わると考え、コースの境界付近にてコース中央への介入量が最も大きくなるような介入曲線を設計した。ノイズ介入についてはユーザのハンドル操作があった際に生成する正規分布のノイズを介入量とし、ハンドル操作量に加算した。

2.1 特徴量

運動情報は実験で用いたソフトウェアを通じて各時刻における被験者のハンドル操作の速度、ソフトウェアによる介入量、カーソル位置のコース内部判定情報（内部なら1、外部なら0）の3情報を取得した。1試行分のハンドル操作の速度情報から統計値としてハンドル操作速度の平均量と

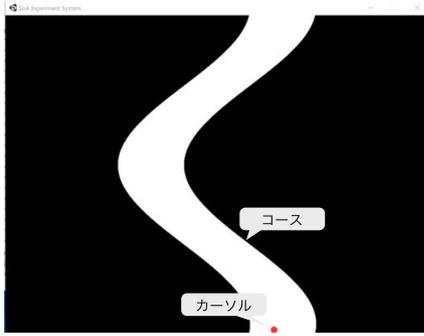


図 1 実験ソフトの動作例



図 2 実験風景

標準偏差を算出した。1 試行分のシステムが算出した介入量の合計値を介入合計量とした。1 試行分のカーソル位置のコース内部判定情報を用いて、1 試行におけるコース内部に維持できた割合をパフォーマンスとして算出した。これら 4 つの特徴量を運動特徴量として使用した。

計測する心拍情報は心拍情報としては、心拍変動解析に基づく特徴量算出を行った。心拍変動解析はユーザーの自律神経を反映するものと言われている [13], [14], [15]。自律神経に関わる心拍変動特徴量としては時間領域特徴量、幾何学領域特徴量、周波数領域特徴量が主に用いられている [16], [17], [18]。本研究では従来研究を参考にこれら特徴量を心拍特徴量として採用することとした。具体的には時間領域特徴量として MEAN, SDNN, CVNN, RMSSD, pNN50 を算出した。幾何学領域特徴量としてローレンツプロットの特徴量である L, T, CVI, CSI を算出した。周波数領域特徴量として LF, HF, LF/HF を算出した。算出した特徴量の説明は表 1 の通りである。計測した RRI データは心拍の拍動ごとに前回の拍動との時間幅 [ms] を格納したものである。生の RRI データは等間隔に計測されていないため、上記特徴量を算出するために RRI データを線形補間により 1[sec] 間隔でリサンプリングを実施して心拍特徴量を算出した。

2.2 分析

運動主体感の重回帰分析 運動主体感に対する運動特徴

表 1 心拍特徴量の説明

特徴量	説明
MEAN	RRI の平均値
SDNN	RRI の標準偏差
CVNN	RRI の変動係数
RMSSD	隣接 RRI の差の二乗平均平方根
pNN50	隣接 RRI の差が 50ms 以上となる割合
L	ローレンツプロットの長軸成分
T	ローレンツプロットの短軸成分
CVI	ローレンツプロットの面積
CSI	ローレンツプロットの縦横比
LF	0.04-0.15Hz の周波数強度
HF	0.15-0.4Hz の周波数強度
LF/HF	LF と HF の比

量・心拍特徴量の寄与を算出するため、リッカートのシグマ法 [19] を用いて間隔尺度化した回答スコアを目的変数、Min-Max Normalization による正規化済みの運動特徴量・心拍特徴量を説明変数とした重回帰分析を行った。 i 番目の試行データから算出した運動特徴量 f_i^m と心拍特徴量 f_i^h を用いて、 s_i^q ($q = Q1, Q2, Q3, Q4$) を下式のように設計した。

$$s_i^q = W^m f_i^m + W^h f_i^h \quad (1)$$

W^m と W^h はそれぞれ運動特徴量と心拍特徴量に対する重みである。この回帰式を最小二乗法で各重みを最適化することで重回帰分析を行った。なお、特徴量間に相関があると算出する重みに悪影響を及ぼすため、分散拡大要因 (Variance inflation factor: VIF) を用いて多重共線性への対処を行った。VIF 値が 10 以上のときは多重共線性が生じている可能性が高いと言われている [20], [21] ため、各特徴量の VIF が 10 以下になるまで VIF が高い特徴量を削減した。

運動主体感と運動特徴量・心拍特徴量の時系列的変化特性を考慮した分析 運動主体感と運動特徴量・心拍特徴量の時間的関連性を評価するために、目的変数と説明変数で用いる試行対象をずらして重回帰分析を行った。具体的には、運動主体感が運動特徴量・心拍特徴量に先行すると仮定した場合の重回帰式は下式とした。

$$s_i^q = W^m f_{i+1}^m + W^h f_{i+1}^h \quad (2)$$

運動主体感が運動特徴量・心拍特徴量に後行すると仮定した場合の重回帰式は下式とした。

$$s_i^q = W^m f_{i-1}^m + W^h f_{i-1}^h \quad (3)$$

なお、目的変数と説明変数で用いる試行データをシフトさせる際、異なる介入パターンの運動特徴量・心拍特徴量では運動主体感の先行性・後行性の評価の妨げになると判断し、目的変数と説明変数ともに同一の介入パターン時のデータセットを用いることとした。データをシフトして新

表 2 各アンケートに対する重回帰分析の決定係数

	Q1	Q2	Q3	Q4
	0.710	0.470	0.715	0.739

表 3 各アンケートへの重回帰における特徴量の係数 (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)

	Q1	Q2	Q3	Q4
const	-0.235	0.065	0.172	-1.071 *
パフォーマンス	0.634 *	0.468	-0.583 *	0.969 **
ハンドル速度 平均量	0.323	0.054	-0.013	0.376
ハンドル速度 標準偏差	-1.245 **	-0.289	0.218	-0.652
介入合計量	-0.58	-0.79 *	1.369 **	-0.864 **
MEAN	0.057	0.451	-0.03	0.184
CVNN	0.009	-0.369	0.022	0.382
RMSSD	0.796 *	0.406	-0.408	1.008 **
pNN50	-0.413	-0.4	0.154	-0.525 *
CSI	0.342	-0.396	-0.424	0.476
HF	-0.365	-0.1	0.241	-0.292
LF/HF	-0.018	0.092	0.108	-0.008

規にデータセットを構築した後に、各場合において VIF を用いた特徴量削減を実施した。

3. 結果

3.1 運動主体感の重回帰分析

12 名の被験者から 3 種類の介入パターンをそれぞれ 3 試行計測したため、全部で 108 試行分のデータを計測した。ハンドル操作に伴って一部試行の心拍情報においてノイズが含まれていたため、ノイズが含まれる試行のデータは取り扱わないこととした。結果的に 74 試行分のデータを用いて各アンケートの回答スコアに対して各特徴量の寄与を検証するために重回帰分析を行った。表 2 に各アンケートの回答スコアに対して最小二乗法にて重回帰分析を最適化した際の決定係数を示す。Q1, Q3, Q4 においては決定係数 0.7 以上であった一方で Q2 に対しては 0.470 と比較的低い決定係数となった。

各アンケートの回答に対する各特徴量の係数を表 3 に示す。各係数において p 値 < 0.05 の場合「*」、 p 値 < 0.01 の場合「**」を係数に併記した。本結果から、Q1 の算出においてはパフォーマンス、ハンドル速度標準偏差、RMSSD の 3 つ、Q3 においてはパフォーマンス、介入合計量の 2 つ、Q4 においてはパフォーマンス、介入合計量、RMSSD、pNN50 の 4 つの特徴量がそれぞれ寄与していた。

3.2 運動主体感が運動情報と心拍情報に対して時系列的变化特性があると仮定した重回帰分析

本解析では、運動主体感が運動情報と心拍情報に先行して表出する場合と、後行して表出する場合を仮定して重回

表 4 各アンケートに対する重回帰分析の決定係数

	Q1	Q2	Q3	Q4
先行	0.710	0.481	0.667	0.698
後行	0.617	0.382	0.746	0.498

表 5 運動主体感が運動情報と心拍情報に先行すると仮定した際の各アンケートへの重回帰における特徴量の係数 (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)

	Q1	Q2	Q3	Q4
const	0.261	0.964	-0.572	0.310
ハンドル速度 平均量	0.617 *	0.019	-0.395	0.992 **
ハンドル速度 標準偏差	-0.528	-0.172	-0.199	-0.563
介入合計量	-1.349 **	-1.184 *	1.772 **	-1.483 **
MEAN	-0.176	0.105	-0.079	0.001
CVNN	0.149	-0.453	0.574	-0.005
RMSSD	0.091	-0.368	0.313	0.020
pNN50	0.239	0.141	-0.127	-0.212
CSI	-0.197	-0.369	0.313	-0.173
HF	0.393	0.458	-0.316	0.457
LF/HF	-0.102	-0.229	-0.039	-0.156

帰分析を行った。2.2 で述べたように、目的変数と説明変数ともに同一の介入パターン時のデータセットを用いることとし、ノイズが含まれる試行のデータは取り扱わないこととした結果、先行している場合に用いたデータは 47 試行分、後行している場合に用いたデータは 49 試行分であった。

各場合における重回帰モデルの決定係数を表 4 に示す。運動主体感が運動情報と心拍情報に先行すると仮定した際の重回帰分析の決定係数については表 2 の結果同様、Q1, Q3, Q4 において比較的高い決定係数で重回帰が行えていることを確認できた。一方で、運動主体感が運動情報と心拍情報に後行すると仮定した際の重回帰分析の決定係数については Q1 と Q3 が高い決定係数で重回帰が行えていると確認できた。表 5 と表 6 にてそれぞれ、運動主体感が運動情報と心拍情報に先行及び後行すると仮定した際の各アンケートへの重回帰における特徴量の係数の算出結果を示す。運動主体感が各種特徴量に先行すると仮定した場合の Q1 においては、ハンドル速度平均量、介入合計量の 2 つ、Q3 については介入合計量の 1 つ、Q4 についてはハンドル速度平均量と介入合計量の 2 つが統計的に寄与している結果となった。運動主体感が各種特徴量に後行すると仮定した場合の Q1 においてはハンドル速度平均量、介入合計量の 2 つ、Q3 については介入合計量と RMSSD の 2 つが統計的に寄与していた。これ以外の決定係数が低かった条件については特徴量の寄与については評価しないこととした。

4. 考察

運動主体感と運動特徴量・心拍特徴量の関連性を評価するため、介入なし・支援的介入・阻害的介入の 3 パターン

表 6 運動主体感が運動情報と心拍情報に後行すると仮定した際の各アンケートへの重回帰における特徴量の係数 (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)

	Q1	Q2	Q3	Q4
const	-0.911	-0.424	0.469	-0.625
パフォーマンス	0.606	0.619	-0.188	0.461
ハンドル速度 平均量	0.662 *	0.216	-0.259	0.459
介入合計量	-1.072 **	-0.781 *	1.556 **	-1.162 **
MEAN	0.247	0.781	0.095	-0.044
CVNN	0.305	-0.483	-0.649	0.308
RMSSD	0.653	0.338	-0.701 *	0.805
pNN50	0.032	-0.324	0.368	-0.011
CSI	0.052	-0.884	-0.417	0.188
LF/HF	0.07	0.717	-0.268	0.088

の介入におけるハンドル操作時のコース遵守課題における運動情報と心拍情報と運動主体感の定性評価情報を計測した。運動特徴量・心拍特徴量を用いて運動主体感の定性評価情報を算出する重回帰分析を通じて、運動主体感を算出するために有意な特徴量を導出した。

同一試行における運動主体感と運動特徴量・心拍特徴量の重回帰分析結果(表2, 表3)において, RMSSDがQ1「赤い点を自分の思い通りに制御できた」とQ4「実験者の指示通りに, 赤いカーソルを操作できた(課題を上手に実行できた)」に正に寄与しているという結果になった。RMSSDは副交感神経活動が活性化すると上昇すると言われているため, 副交感神経活動の上昇がQ1とQ4のスコア改善に関与している可能性が示唆された。またQ4についてはpNN50が負に寄与しているという結果となった。pNN50もRMSSDと同様に副交感神経の活動に相関すると言われている指標であり, pNN50とRMSSDの係数の正負が逆転してしまった現象については後述する解析に用いた心拍情報の計測時間が関係している可能性があり, 今回の結果となった原因については継続的な検証が必要である。また, 運動特徴量としてはパフォーマンスが正に寄与しているという結果となり, 従来研究で述べられている順モデル仮説に基づく予測運動結果と実際の運動結果の合致性が主体感を高める[8]という主張を支持する結果となったと考えられる。

運動主体感と運動特徴量・心拍特徴量の時系列的変化特性分析については, 運動主体感が後行する際のQ3の結果(表6)を踏まえると, Q3「コンピューターから自分の操作を妨げられるような感覚を覚えた」については副交感神経の指標の一つであるRMSSDが変化した後パフォーマンスや介入合計量といった運動特徴量がQ3に作用している可能性がある。すなわち, 一定時間前に副交感神経が低下した後, パフォーマンスが低下したり介入合計量が大きくなるとQ3の感覚が上昇するという時系列的関係性が示唆された。

心拍特徴量から自律神経の評価をする際, 心拍情報の計測時間については一般的には5分間の心拍情報を用いる短時間HRV解析と24時間の心拍情報を用いる長時間HRV解析がある[22]。本実験では1分間の心拍情報を用いたため, 心拍情報と副交感神経などの生理状態との関連性について従来研究とどの程度同様として解釈できるかについては継続的な検証が必要だと考える。実際に副交感神経や自律神経がどの程度変化していたのかを検証するためには, 皮膚コンダクタンス反応や脳波などの他生理情報を用いながら慎重に検証する必要がある。

本解析では心拍情報にノイズが含まれる試行のデータは用いないこととしたため, 結果的に分析対象となるデータが限定的となった。少数のデータセットに対して説明変数項目が多いと説明変数の表現性が高くなってしまい, 目的変数と説明変数が本来は無関係であっても決定係数の高い回帰式が導出されてしまう可能性がある。目的変数と説明変数の両者を実験を無関係(目的変数をシャッフルする)にしたデータセットで算出したモデルの精度と実際の目的変数と説明変数の組み合わせで算出したモデルを比較することで, 無関係のデータセットにおいて偶発的に発生するモデルか, データセットに内在する何らかの関係性を表現するモデルかを検証するY-scramblingという手法がある[23], [24]。この手法を通じてモデルの決定係数を評価してみたところ, Y-scramblingを行ったデータセットについては本解析のすべての条件において決定係数が平均0.2 0.3付近であったため, 本解析結果で決定係数が0.6以上となったケースについてはデータセットの数が限定的であることによる偶発性の影響は小さいと考えられる。本解析では運動主体感と運動情報・心拍情報の関連性を検証するため, 計測したデータセット全体に対して重回帰分析をするアプローチを採ったが, 運動情報と心拍情報を用いて運動主体感を推定するモデルの汎化性能については, Leave-one-outなどの交差検定手法を通じて検証を行っていく予定である。

5. おわりに

運動主体感と運動特徴量・心拍特徴量の関連性を評価するため, 3パターンの介入におけるハンドル操作時のコース遵守課題における運動情報と心拍情報と運動主体感の定性評価情報を計測した。運動特徴量・心拍特徴量を用いて定性評価情報である運動主体感を算出する重回帰分析を通じて, 運動主体感を算出するために有意な特徴量を導出することができた。本論文によって, 運動主体感を外部観測情報からリアルタイムで推定及び予測する技術の可能性を明らかにすることができた。生理情報の追加を通じた推定精度向上や異なる運動タスクでの実験を通じた汎用性検証を進める。

参考文献

- [1] Shaun Gallagher. Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends in cognitive sciences*, Vol. 4, No. 1, pp. 14–21, 2000.
- [2] 坂口正道, 西和田昌恭, 蓑和洋一. 視覚, 触覚および聴覚フィードバックにより運動主体感を生成する手指運動リハビリテーションシステムの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2016, pp. 2A2–02b6, 2016.
- [3] 下田真吾, 岡島正太郎. 人に運動主体感を持たせるロボットによる運動補助. 日本 AEM 学会誌, Vol. 27, No. 4, pp. 412–418, 2019.
- [4] 渡邊翔太, 川合伸幸. 自己身体と操作対象の身体図式的一致はより強い運動主体感・身体所有感を喚起する. 日本認知科学会第 33 回大会発表論文集, pp. 31–40, 2016.
- [5] Atsushi Sato and Asako Yasuda. Illusion of sense of self-agency: discrepancy between the predicted and actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership. *Cognition*, Vol. 94, No. 3, pp. 241–255, 2005.
- [6] 松本倫実. 聴覚刺激及びリズムの周期性が運動主体感に与える影響の評価. ライフサポート, Vol. 26, No. 1, pp. 10–10, 2014.
- [7] Patrick Haggard, Sam Clark, and Jeri Kalogeras. Voluntary action and conscious awareness. *Nature neuroscience*, Vol. 5, No. 4, pp. 382–385, 2002.
- [8] Matthis Synofzik, Gottfried Vosgerau, and Albert Newen. I move, therefore i am: A new theoretical framework to investigate agency and ownership. *Consciousness and Cognition*, Vol. 17, No. 2, pp. 411–424, 2008. Social Cognition, Emotion, and Self-Consciousness.
- [9] Robrecht P.R.D. van der Wel, Natalie Sebanz, and Guenther Knoblich. The sense of agency during skill learning in individuals and dyads. *Consciousness and Cognition*, Vol. 21, No. 3, pp. 1267–1279, 2012.
- [10] Ryu Ohata, Tomohisa Asai, Hiroshi Kadota, Hiroaki Shigemasa, Kenji Ogawa, and Hiroshi Imamizu. Sense of agency beyond sensorimotor process: decoding self-other action attribution in the human brain. *Cerebral Cortex*, Vol. 30, No. 7, pp. 4076–4091, 2020.
- [11] 渡邊翔太, 川合伸幸. 前腕 cg モデルと実際の行為が質的に異なっても運動主体感は誘発されるが身体所有感の生成には完全な一致が必要. 認知科学, Vol. 24, No. 2, pp. 185–195, 2017.
- [12] 若田哲史, 森岡周. 道具操作の運動錯覚時の身体所有感および運動主体感と脳活動の関係. 理学療法学 Supplement Vol. 40 Suppl. No. 2 (第 48 回日本理学療法学会大会抄録集), pp. 48101343–48101343. 公益社団法人 日本理学療法士協会, 2013.
- [13] 早野順一郎. 心拍変動による自律神経機能解析. 循環器疾患と自律神経機能, 2001.
- [14] 後藤貴文, 松浦弘毅, 村本健一郎. 心拍変動解析による自律神経機能の推定. 電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティクス, Vol. 102, No. 507, pp. 13–16, 12 2002.
- [15] 早野順一郎, 山田真己, 藤浪隆夫, 横山清子, 渡辺與作, 高田和之. 心拍変動と自律神経機能. 生物物理, Vol. 28, No. 4, pp. 198–202, 1988.
- [16] 角田啓介, 千葉昭宏, 吉田和広, 渡部智樹, 水野理. 心拍変動を用いた認知能力変化の予測. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, 第 2016 巻, pp. 925–933, jul 2016.
- [17] 藤原幸一. ヘルスモニタリングのための心拍変動解析. システム/制御/情報, Vol. 61, No. 9, pp. 381–386, 2017.
- [18] 伊勢崎隆司, 宮田章裕, 新島有信, 渡部智樹, 水野理. 慣性情報と生体情報に基づく車いす利用者の乗り心地推定. 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム (CDS), Vol. 6, No. 2, pp. 23–31, sep 2016.
- [19] 森正義彦, 篠原弘章. 心理学研究法: 科学の本質から考える. 心理学の世界. 培風館, 2007.
- [20] Robert MO' brien. A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality & quantity*, Vol. 41, No. 5, pp. 673–690, 2007.
- [21] 村上健太郎, 森本幸裕, 堀川真弘. 近畿地方の市街地に生育するシダ類の種組成と気候要因との関係. 日本緑化化学会誌, Vol. 37, No. 1, pp. 38–43, 2011.
- [22] Yoshiaki Matsumoto, Nobuaki Mori, Ryoh Mitajiri, and Zhongwei Jiang. Study of mental stress evaluation based on analysis of heart rate variability. *Journal of Life Support Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 105–111, 2010.
- [23] Alexander Tropsha, Paola Gramatica, and Vijay K Gombar. The importance of being earnest: validation is the absolute essential for successful application and interpretation of qspr models. *QSAR & Combinatorial Science*, Vol. 22, No. 1, pp. 69–77, 2003.
- [24] Danishuddin, G Madhukar, MZ Malik, and N Subbarao. Development and rigorous validation of antimalarial predictive models using machine learning approaches. *SAR and QSAR in Environmental Research*, Vol. 30, No. 8, pp. 543–560, 2019.