

パワーアシストスーツの装着感の定量的評価法の開発

Development of Quantitative Evaluation Method of Wearing Feel on Power Assist Suit

麻植 雄樹^{*1}, 酒井 宣年^{*2}, 佐藤 正和^{*3}, 高岩 昌宏^{*4}
 OE Yuki, SAKAI Nobutoshi, SATO Masakazu and TAKAIWA Masahiro

抄 録

本研究では、パワーアシストスーツの装着感について、近赤外分光計と心拍センサーの計測システムを構築し、頭部の血中の酸素化ヘモグロビンと心拍変動に基づく評価を行った。その結果、主観評価で感じた心理と対応する生理特性の変化を確認することができ、評価技術の有用性を確認することができた。

1 はじめに

近年、高齢化社会の進行に伴い、介護労働の負担は増大している。このため、装着型パワーアシストスーツの作業現場への導入により、作業者の腰部負担を軽減させることが求められている¹⁾²⁾。著者らは、これまでに介護現場等の作業者の前屈動作や重量物の持ち上げ動作を支援し、腰部負担を軽減させることを目的とした装着型パワーアシストスーツの開発を行ってきた³⁾。装着型パワーアシストスーツの市場投入を見据えた際、基本性能であるアシスト効果だけでなく、長時間の装着が予想されるため、装着感の向上が必要となっている⁴⁾。装着感とは、製品に付加価値を付与し、商品性を高める品質要素となっている。パワーアシストスーツの装着感の評価は、一般的に、主観評価で行われており、生理特性に基づいた客観的な評価指標が確立されていない。本研究では、パワーアシストスーツの装着感を設計開発に計画的に盛り込むため、客観的指標である生体情報に基づいた装着感の定量的評価法の開発を行った。

2 方法と結果

2・1 評価方法

本研究では、パワーアシストスーツの装着において快適・不快の客観的指標となる生体情報に基づいた評価法について検証を行った。先行研究において、快適感やストレスの客観的なデータを捉える生体情報として、脳波、心拍変動、機能的 MRI、頭部の血中の酸素化ヘモグロビン濃度などが有効であること

が示唆されている⁵⁾⁶⁾。中でも、大掛かりな測定装置を用いず、比較的簡便に測定が可能な頭部の血中の酸素化ヘモグロビン濃度の計測が可能な近赤外分光法 (NIRS: Near-Infrared Spectroscopy) と自律神経の活動の度合いを示す心電図に着目した。

近赤外分光法 (NIRS) は、頭皮上に照射器と受光器を装着し、照射器から入力された連続光を少し離れた受光器で検出することで、頭部の血流中の酸素濃度 (酸素化ヘモグロビン濃度) の計測が可能である。神経活動の直接的な測定ではないが、脳賦活の変化を測定することが可能である⁷⁾。図1に近赤外分光法を示した。血液中のヘモグロビンやその他の生体組織は、可視光を吸収しやすいのに対して、酸素化ヘモグロビンは、近赤外線を吸収しやすく、その吸収量は酸素濃度により変化する。装置の照射器から放出された近赤外光は、皮膚と頭蓋骨を透過した後、大脳皮質表面を透過し、血液中のヘモグロビンで反射された光を受光器で検出する。入射光の強さに対する検出した反射波の強さの割合により、血流中の酸素化ヘモグロビン濃度を算出し、酸素含有量の変化から脳の賦活状態を推定する。一般に、脳が賦活状態にあると、酸素化ヘモグロビン濃度の変化量が大きくなり、賦活でなくなると酸素化ヘモグロビン濃度の変化が小さくなるといわれている⁷⁾。

心電は、心筋を伝播していく電気的興奮を体表面に設置した電極で計測したものである。心臓の活動は、洞結節でのペースメーカーパルス発生、心房の収縮、心室の収縮、血液の駆出であり、各プロセスに応じて、電気信号を発生している。多くの分析では、電気信号の振幅が大きいことから検出しやすく、取り扱いが容易な R 波が用いられている。図2に示

*1 電子・情報技術担当 *2 企画総務担当

*3 株式会社ヨコタコーポレーション

*4 徳島大学

したように、計測した心電図から、R波どうしの時間的間隔である RRI (R-R Interval) を求めることで、心拍変動が算出される。心臓の制御は自律神経の交感神経と副交感神経の拮抗的支配を受けている。快適でリラックスした安静状態である時、心臓は副交感神経の支配下であり、エネルギー最小で鼓動するため心拍数は低下する。一方、中枢神経(脳)に驚きや不快などの心理が生じると、交感神経が優位になり、心拍数を増加させる。従って、心拍変動から交感神経と副交感神経の活動状態を明らかにすることで、人間の快・不快の推定を行うことができる。心拍変動の計測については、安価な装置である心電センサーを用いて計測を行った。

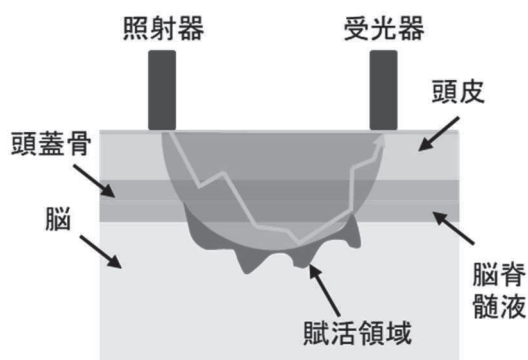


図1 近赤外分光法

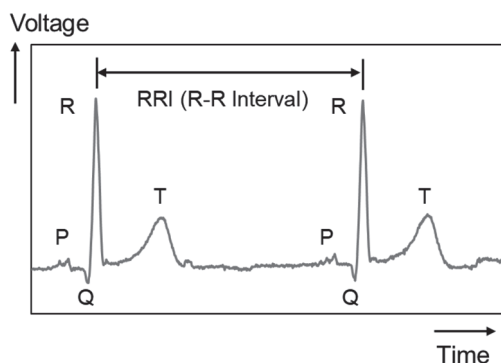


図2 心電図波形

2・2 計測手法

まず、評価実験を行うための計測システムの構築を行った。図3に示した前頭部の脳血流の計測が可能である近赤外分光計を用いた。近赤外分光計は、国際10-20法におけるFp1, Fp2の2チャンネルであり、照射器と受光器の距離は30mmである。また、心拍変動は同図に示した無線機、アンプ、ロガーを一体化したワイヤレス方式の心電センサーを用いた。無線通信機能により、身体動作に非拘束な心電図の計測が可能である。評価実験で用いる近赤外分光計

と心電センサーはシステムの互換性がなかったため、計測システムの同期を行った。同期計測システムは、心電センサー側のシステムと近赤外分光計のNTP (Network Time Protocol) を合わせておき、計測開始タイミングで各データのマージを行う方法を用いた。

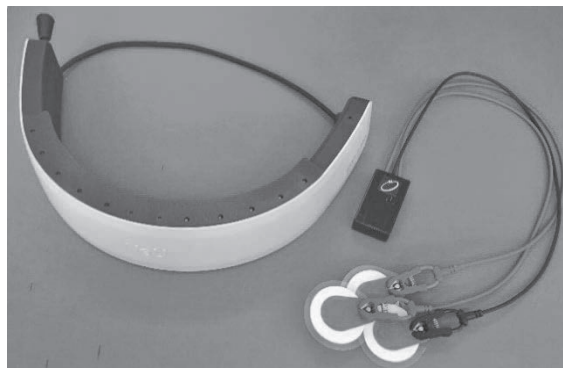


図3 近赤外分光計と心電センサー

2・3 実験条件

本評価で用いるパワーアシストスーツは、著者らが開発した試作品を用いた。図4に、パワーアシストスーツの試作品を示した。試作品は、背部に搭載した1台のモータにより、作業者の腰部の両側に補助力を付与できる外骨格タイプである。事前に行った主観評価において、腰部ベルトの高さと胸部パッドの締め力が装着感に寄与することがわかっている。具体的には、腰部ベルトの高さが低く、胸部パッドの締め力が小さい場合、アシスト力が伝達され難く、装着感が悪化することがわかっている。一方、腰部ベルトの高さが高く、胸部パッドの締め力が大きい場合、アシスト力が伝達されやすくなり、装着感が改善されることがわかっている。そこで、実験条件を腰部ベルトの高さと胸部パッドの締め力の2水準とした。具体的には、パターン1(腰部ベルトの高さLow, 胸部パッドの締め力Low)とパターン2(腰部ベルトの高さHigh, 胸部パッドの締め力High)について、快・不快の客観的評価指標である酸素化ヘモグロビンの変化量($\Delta\text{oxy-Hb}(t)$)と心拍変動の傾向について調査を行った。図5に評価実験、図6に実験プロトコルを示した。実験参加者は、近赤外分光計と心電センサーを装着し、実験プロトコルの期間中は継続的に計測を行った。近赤外分光計の計測部位は、嗜好性の情動を感じると脳活動が見られるといわれている国際10-20法におけるFp1, Fp2の位置に

設定した。実験参加者は、ベースラインとして、装置の未装着条件で 60 秒間安静立位を行った後、事前に行った主観評価で不快に感じたパターン1の条件でパワーアシストスーツを装着し、90 秒間の立位姿勢を維持した。その後、未装着条件で 60 秒間のレストを行った。そして、再度、未装着条件のまま、60 秒間安静立位を行い、ベースラインを計測した後に、パターン2の条件で 90 秒間の立位姿勢を維持した。実験参加者は、実験中、リラックスした状態で上方を眺めるようにした。

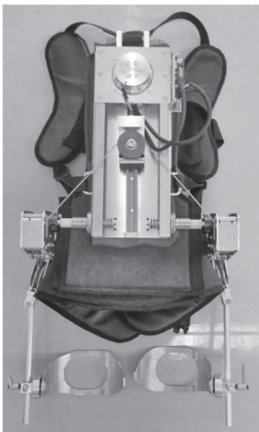


図4 アシストスーツ
試作品

図5 評価実験

ベースライン (60s)	パターン1 (90s)	レスト (60s)	ベースライン (60s)	パターン2 (90s)
-----------------	----------------	--------------	-----------------	----------------

パターン1：不快（腰部ベルト高さ Low、胸部ベルト力 Low）

パターン2：快（腰部ベルト高さ High、胸部ベルト力 High）

図6 実験プロトコル

2・4 解析手法

近赤外分光計で計測された酸素化ヘモグロビン濃度の変化のデータについては、以下の式を用いて評価を行った。

$$\Delta oxy-Hb(t) = \frac{oxy-Hb(t) - \mu_{rest}}{\sigma_{rest}}$$

なお、 $\Delta oxy-Hb(t)$ を酸素化ヘモグロビン濃度変化量のデータ、 $oxy-Hb(t)$ を計測データ、 μ_{rest} を安静立位期間（ベースライン）における平均値、 σ_{rest} を安静立位時（ベースライン）における標準偏差である。ここで、事前の検証により、パワーアシストスーツの装着における快条件は、興奮状態よりむしろ、リラックス状態で感じる事がわかっている。不快条件は、

眠気が強く退屈になるよりむしろ、不愉快に感じる（イライラ状態）ことがわかっている。ラッセルの感情円環モデルにおいては、横軸の快-不快の心理が大きく寄与していると考えられる⁸⁾。先行研究において、横軸の快-不快の心理は、自律神経活動が支配的であることがわかっている⁸⁾。従って、本評価においては、副交感神経活動が優位になるリラックス状態を快条件とし、自律神経活動が活発になる興奮状態（イライラ状態）を不快条件とした。快条件では、リラックス状態であることから、脳賦活反応は穏やかになり、脳賦活は抑制傾向となり、 $\Delta oxy-Hb(t)$ は減少傾向となる。一方で、不快条件では、興奮状態であることから、脳賦活反応が活発になり、 $\Delta oxy-Hb(t)$ は増加傾向となる。

心電センサーで計測された心電図の解析方法として、心拍変動係数（CV-RR）、RR 間隔の周波数解析やカオス解析などが挙げられる。本研究では、カオス解析の一つであり、時系列信号で自律神経機能の評価であるローレンツプロット解析⁵⁾と RR 間隔の周波数解析を行った。ローレンツプロット解析は、計測された心電図を RR 間隔に変換し、横軸を n 番目の RR 間隔、縦軸を n+1 番目の RR 間隔として、グラフ上にプロットした解析手法である。副交感神経が優位になり、リラックス状態に近づくとき、n 番目の RR 間隔と n+1 番目のばらつきが大きくなるといわれている⁵⁾。一方で、交感神経が活発になり、興奮状態に近づくとき、n 番目の RR 間隔と n+1 番目のばらつきが小さくなるといわれている。これらのばらつきを利用して、快・不快の評価を行った。RR 間隔の周波数解析に関しては、LF/HF（低周波領域と高周波領域のパワー比）を用い、交感神経と副交感神経の活動の度合いについて評価を行った。心拍の時間的波形から、RR 間隔の時間変動を抽出し、周波数解析すると、0.04~0.15Hz の低周波領域（LF）と 0.15Hz~0.40Hz の高周波領域（HF）の成分が現れる。交感神経系は 0.15Hz 以上の変動を伝達しない特性を持つといわれている。そのため、LF/HF が大きい場合は交感神経活動、LF/HF が小さい場合は副交感神経活動が優位である特性を利用して、快・不快の評価を行った。なお、リサンプリング周波数を 10[Hz]、解析時間毎の間隔を 10[sec]とした。

2・5 評価結果

図7にパターン1（不快条件）とパターン2（快条件）について、心拍変動のローレンツプロット解析を行った結果の一例を示した。先行研究⁵⁾から、1次直線 ($RR_{n+1}=RR_n$) からのばらつきが大きいほど、副交感神経活動の寄与度が大きく、人間は快適に感じていることがわかっている。事前の主観評価の結果による検証において、ラッセルの感情円環モデルに基づくと、不快条件では交感神経活動が優位になり、快条件においては、副交感神経活動の優位になることがわかっている。計測結果においては、パターン1（不快条件）の標準偏差 $\sigma_1=22.3$ であるのに対し、パターン2（快条件）の標準偏差 $\sigma_2=62.8$ と大きくなった。つまり、パターン1（不快条件）に対して、パターン2（快条件）の方が1次直線 ($RR_{n+1}=RR_n$) からのばらつきは大きく、副交感神経活動の寄与度が大きいことがわかった。これより、事前に行った主観評価の結果は、取得した心電データから、ローレンツプロット解析を行った結果と概ね合致していることが確認できた。

図8に各条件における酸素化ヘモグロビン濃度の変化量 $\Delta oxy-Hb(t)$ の時系列変化の一例を示した。図13からわかるように、時間の経過に伴い、パターン1（不快条件）が大きくなり、パターン2（快条件）では時間経過により、小さい値に収束した。つまり、時間の経過に伴い、パターン1（不快条件）では、酸素化ヘモグロビン濃度の変化量が増大し、脳賦活反応が活発になり、 $\Delta oxy-Hb(t)$ は増加する傾向が見られた。一方で、パターン2（快条件）では、酸素化ヘモグロビン濃度の変化量 $\Delta oxy-Hb(t)$ は減少し、脳賦活反応が抑制されていることがわかった。

図9にLF/HFの結果の一例を示した。図9から、パターン1（不快条件）では15[sec]から25[sec]までLF/HFが増大していることから、副交感神経活動が低下し、交感神経活動が優位になっていることがわかった。その後、25[sec]から急激にLF/HFは減少しており、副交感神経活動が優位になっていることがわかった。ここで、各条件におけるLF/HFの平均値、標準偏差を表1に示した。表1からわかるように、パターン2（快条件）はパターン1（不快条件）に対して、対象区間全体で見たときのLF/HFの平均値、標準偏差は小さくなった。つまり、パター

ン2（快条件）はパターン1（不快条件）に対して、対象区間全体では、安定的に副交感神経活動が優位になっていることがわかった。

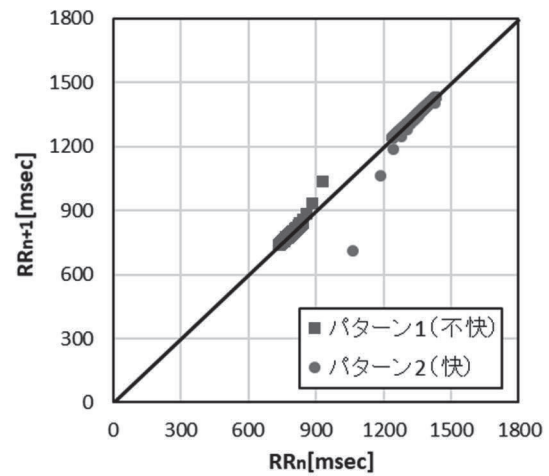


図7 心拍変動のローレンツプロット解析結果

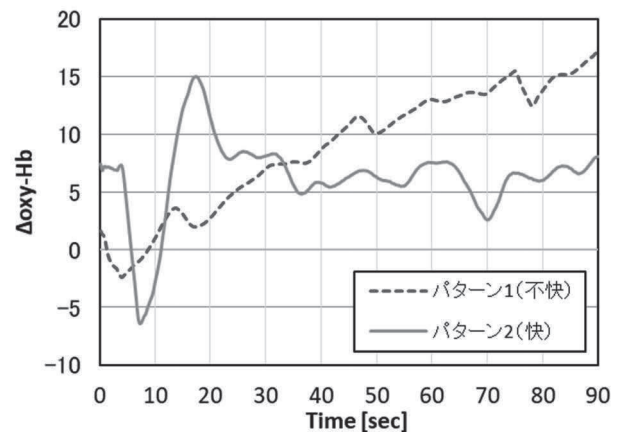


図8 酸素化ヘモグロビン濃度 ($\Delta oxy-Hb$) の時系列変化

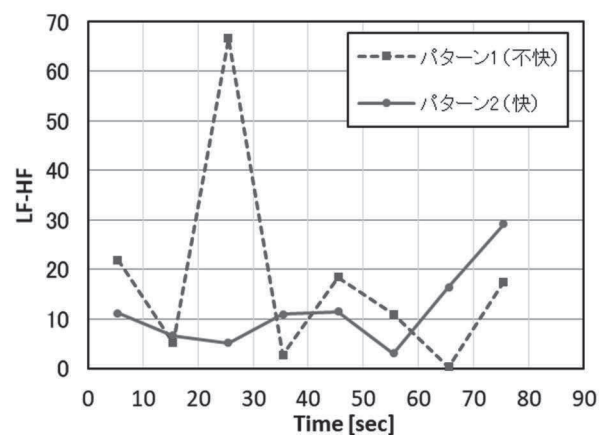


図9 LF/HFの時系列変化

表 1 LF/HF の平均値と標準偏差

	平均値	標準偏差
パターン1 (不快)	17.9	19.8
パターン2 (快)	11.7	7.7

3 まとめ

パワーアシストスーツの装着感について、近赤外分光計と心拍センサーによる計測システムを構築し、評価を行った。その結果、主観評価で感じた心理と対応する生理特性の変化を確認することができ、評価技術の有用性を確認することができた。

謝辞

本研究は、公益財団法人 JKA の助成を受けて実施しました。実験にご協力頂いた被験者の皆様に感謝します。

参考文献

- 1) 村松慶紀, 所晃史, 小林宏. “マッスルスーツの開発と評価(表面筋電図を用いた補助動作の評価)”. 日本機械学会論文集, Vol. 83, 2017, p. 16-78.
- 2) 佐藤帆紡, 川畑共良, 田中文英, 山海嘉之.

“ロボットスーツ HAL による移乗介助動作の支援”. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 76, 2010, p. 227-235.

3) 酒井宣年, 麻植雄樹, 佐藤正和. “アシストスーツに適応した磁力弾性アクチュエータの研究”. 平成 30 年度 JKA 補助事業研究結果報告書, 2019.

4) 佐藤千恵, 横矢重治, 渡邊博美, 梅原英之, 中村裕紀, 小林宏. “マッスルスーツ®のフィールドテスト(物流の作業現場への適用)”. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 79, 2013, p. 3525-3538.

5) 豊福史, 山口和彦, 萩原啓. “心電図 RR 間隔のローレンツプロットによる副交感神経活動の簡易推定法の開発”. 人間工学, Vol. 43, 2007, p. 185-192.

6) 吉田倫幸. “感性反応としての脳波の読み取り方”. デザイン学研究特集号, Vol. 10, 2002, p. 29-38.

7) 平山健太, 綿貫啓一, 楓和憲. “NIRS を用いた水平振動時の脳賦活分析”. 日本機械学会論文集, Vol. 81, 2015, p. 14-26.

8) 池田悠平, 岡田佳子, 堀江亮太, 菅谷みどり. “生体情報を用いた感情の推定手法の検討”. 組込みシステムシンポジウム 2018, 2018, p. 106-107.