

研究結果報告書

1. 研究題目名

パワーアシストスーツの装着感の定量的評価法の開発

2. 担当者

徳島県立工業技術センター

電子・情報技術担当 主任研究員 麻植 雄樹

企画総務担当 主任 酒井 宣年

株式会社ヨコタコーポレーション

機械部 技術開発室 佐藤 正和

徳島大学大学院

社会産業理工学研究部 高岩 昌弘

3. 結果報告

○目的

担当者は、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。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である。また、装着感は、製品に付加価値を付与し、商品性を高める品質要素となる。ところで、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ない。そこで、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。

○研究内容

・評価手法

本研究では、パワーアシストスーツの装着における快適・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。関連研究において、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、脳磁図、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。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（Near-Infrared Spectroscopy：NIRS）と自律神経の活動の度合いを示し、心臓の電氣的興奮である心電（Electrocardiogram：ECG）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、機能的 MRI と同様に脳賦活の変化を測定することが可能である。図 1 に近赤外分光計を示す。血液中のヘモグロビンやその他の生体組織は、可視光（波長 400～700nm）を吸収しやすいのに対して、近赤外線（波長 700～900nm）は、酸素化ヘモグロビンを吸収しやすく、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、皮膚と頭蓋骨を經由した後に、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言われている。

心電は、心筋を伝播していく電氣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 波が用いられる。図 2 に示すように、計測した心電図から、R 波どうしの時間的間隔である RR 間隔（RRI：R-R Interval）を求めることで、心拍数の変動は算出可能である。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、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、心拍数の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可能である。心拍数の計測については、廉価な装置である心電センサーを用いて計測可能である。

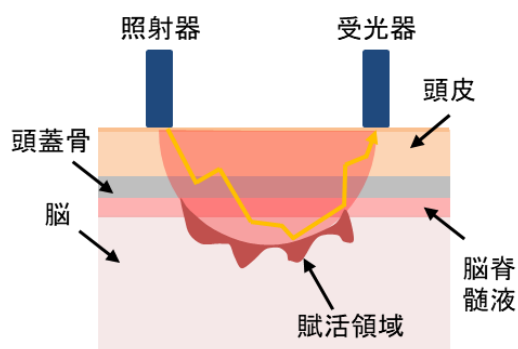


図 1 近赤外分光法（NIRS）

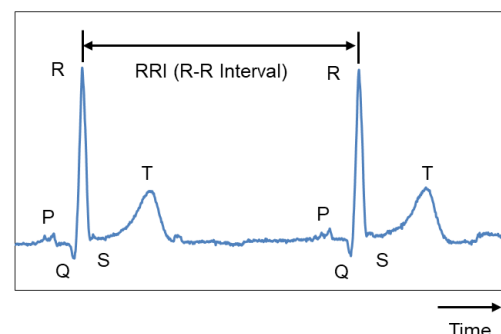


図 2 心電図波形

・計測システムの構築

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。本研究では、図3に示すとおり、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る。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、心電図については、図4に示すとおり、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る。無線通信機能により、身体動作に非拘束な心電図計測が可能である。

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、同期計測システムの構築を行った。図5に同期計測システムのシステム構成を示す。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シを行う方法を用いた。図6に同期計測システムのインターフェースを示す。なお、本システムは、心電だけでなく、筋電や皮膚電位などのアナログ電気信号全般の同期計測を可能とした。



図3 近赤外分光計



図4 心電センサー

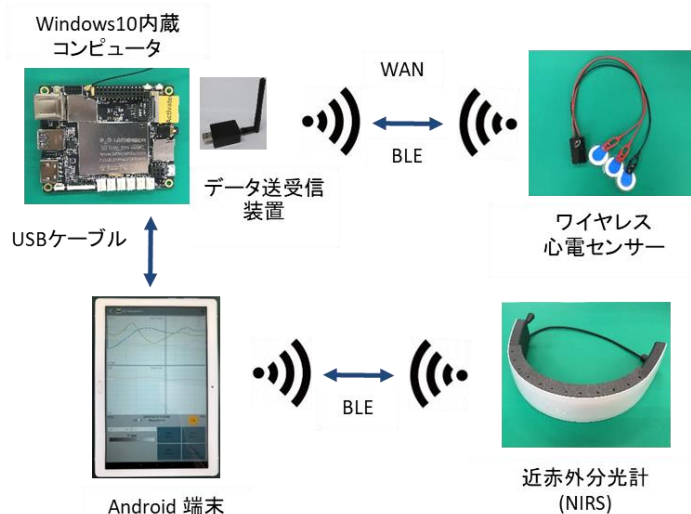


図5 同期計測のシステム構成

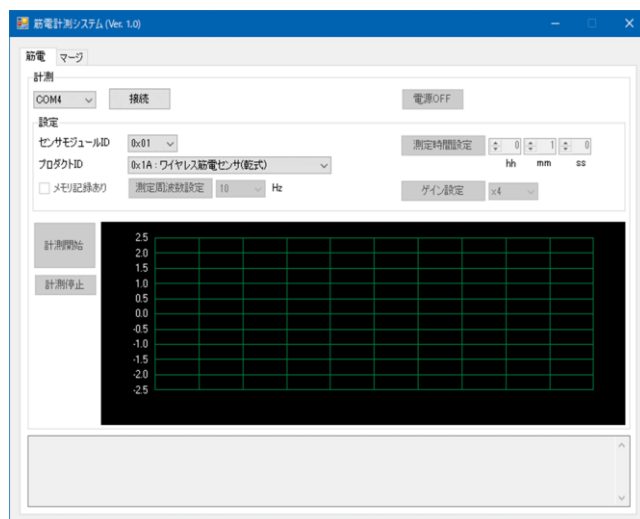


図 6 同期計測システム

・実験条件

本評価で用いるパワーアシストスーツは、担当者が開発を行った試作品を用いる。図 7 に、パワーアシストスーツの試作品を示す。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。重量は 6.5kg である。事前のユーザビリティテストにおいて、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、実験条件をベルト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 (ベルト位置 Low、胸部パッドの締め力 Low) とパターン 2 (ベルト位置 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 ($\Delta oxy-Hb$) と心拍変動の違いについて調査を行う。図 8 に評価実験の様子、図 9 に実験プロトコルを示す。実験参加者には、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、国際標準 10-20 電極配置法に基づき、嗜好性の情動を感じると脳活動が見られると言われている $Fp1$ 、 $Fp2$ 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、事前のユーザビリティテスト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てもらった。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てもらった。実験中は、リラックスした状態で上方を眺めるようにした。



図 7 アシストスーツ試作品



図 8 評価実験の様子

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（腰部ベルト位置 Low、胸部ベルト力 Low）

パターン2：快（腰部ベルト位置 High、胸部ベルト力 High）

図 9 実験プロトコル

・解析方法

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ことがわかっている。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。図10に示すラッセルの感情円感モデルにおいては、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。関連研究において、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。従って、本評価においては、副交感神経活動が優位になり、リラックス状態を快条件とし、自律神経活動が活発になり、興奮した状態（イライラ状態）を不快条件とする。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、 $\Delta oxy-Hb$ 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、 $\Delta oxy-Hb$ は増加傾向となる。

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では、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。副交感神経神経が優位になり、リラックス状態に近づくと、 n 番目の RR 間隔と $n+1$ 番目のばらつきが大きくなる。一方で、交感神経神経が活発になり、興奮状態に近づくと、 n 番目の RR 間隔と $n+1$ 番目のばらつきが小さくなる。これらのばらつきを利用して、快・不快の評価を行う。

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、交感神経神経と副交感神経の活動の度合いについて評価を行う。図 11 に LF/HF の算出プロセスを示す。心拍の時間的波形から、心拍の時間変動 (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) にそれぞれピークを 2 つの成分が現れる。交感神経系は 0.15Hz 以上の変動を伝達しない特性を持つ。そのため、LF/HF を求めることで、その値が高いときが交感神経活動、値が低いときは副交感神経活動が有意であることが示唆されていることを利用して、快・不快の評価を行う。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。

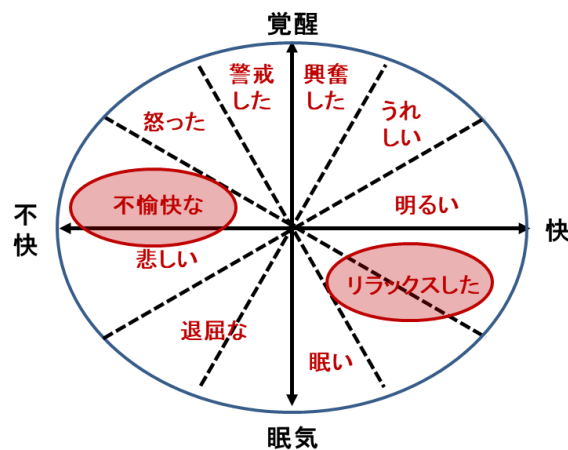


図 10 ラッセルの感情円環モデル

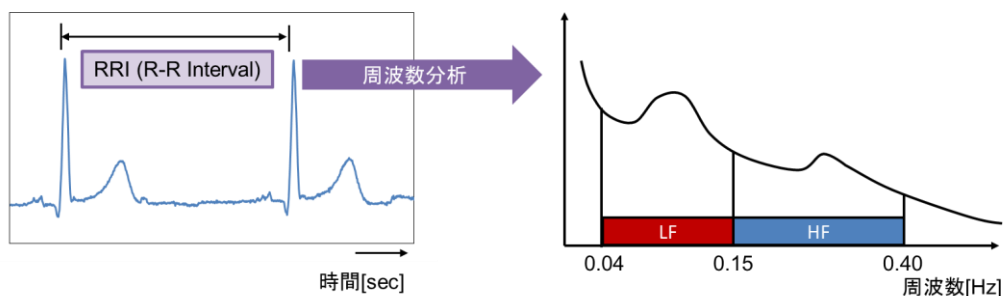


図 11 LF/HF の算出プロセス

・評価結果

図 12 にパターン 1（不快条件）とパターン 2（快条件）について、RRI（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す。先行研究から、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。本評価においては、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。ここで、評価結果においては、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 $\sigma_2 = 62.8$ と大きくなっている。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る。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。

次に、図 13 に各条件における酸素化ヘモグロビン濃度の変化量 $\Delta oxy-Hb$ の時系列変化の一例を示す。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、低い値に収束している。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 $\Delta oxy-Hb$ が増大し、脳賦活反応が活発になり、 $\Delta oxy-Hb$ は増加傾向にある。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 $\Delta oxy-Hb$ は減少し、脳賦活反応が抑制されていることがわかる。

さらに、図 14 に LF/HF の結果の一例を示す。図 14 からわかるように、パターン 1（不快条件）では 15[sec]から 25[sec]まで LF/HF の値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る。その後、25[sec]から急激に LF/HF の値は減少しており、副交感神経活動が優位になっている。ここで、各条件における LF/HF の平均値、標準偏差を表 1 に示す。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、標準偏差は小さい。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る。

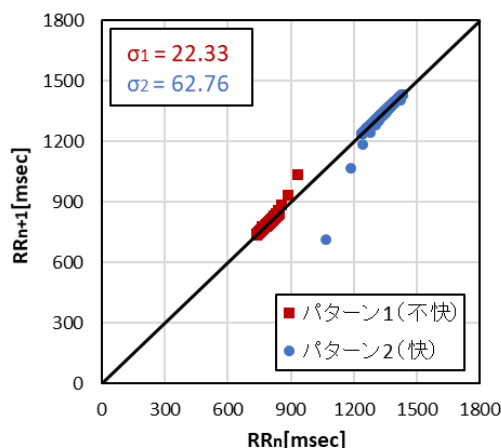


図 12 心拍変動のローレンツプロット解析結果

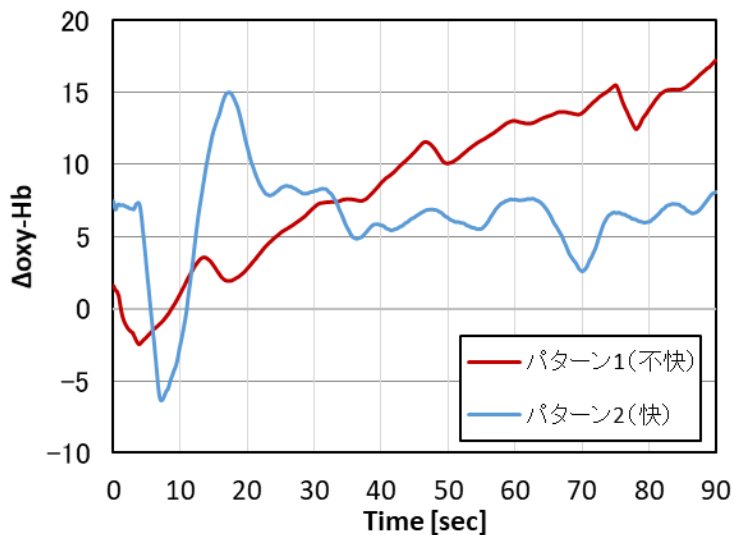


図 13 酸素化ヘモグロビン濃度 ($\Delta oxy-Hb$) の時系列変化

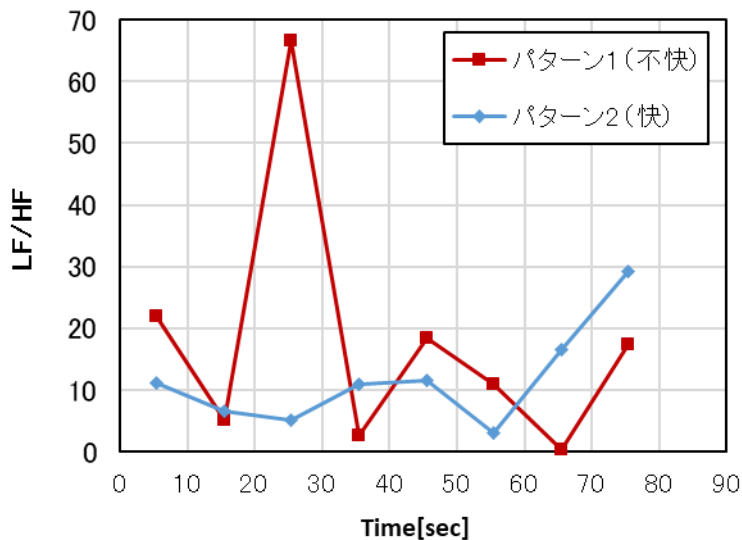


図 14 LF/HF の時系列変化

表 1 LF/HF の平均値、標準偏差

	平均値	標準偏差
パターン1 (不快)	17.92	19.79
パターン2 (快)	11.74	7.69

・まとめ

パワーアシストスーツの装着感について、近赤外分光計と心電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。今後、開発した評価法を設計改善に盛り込み、製品化に向けた開発を行っていく予定である。