

アシストスーツの多機能化に関する研究

－新たな負荷軽減機構の開発と健康管理技術の検討－

中島明哉* 斎藤譲司*

ウェア型アシストスーツに健康維持と健康管理の両機能を搭載することを目的に、新たな負荷軽減機構の開発と健康管理技術の検討を行なった。身体負荷を軽減しかつ一般的な通常動作を妨げない新たな負荷軽減機構として、手動およびエアアクチュエータ駆動による剛性可変ボーンを提案し、実験によりその有効性を示した。また健康管理機能として電気インピーダンスによる脈拍数計測技術の適用可能性について検討し、胸部での測定実験結果から必要十分な計測技術であることを確認した。さらに、背中や腰でも計測が可能なことを確認し、計測デバイスがボーンに搭載可能なことを示した。

キーワード: アシストスーツ, 負荷軽減機構, 脈拍計測

A Study of Multifunctionalization of Assistive Suits

- Development of a New Load Reduction Mechanism and Consideration of Health Care Technology -

Akichika NAKASHIMA and Joji SAITO

For the purpose of incorporating health maintenance and health management functions into assistive suits, we developed a new mechanism for load reduction and examined health care technology. As a new load reduction mechanism that reduces physical load without interfering with normal motion, we proposed a variable stiffness support element driven manually and by an air actuator, and demonstrated its effectiveness through experiments. The applicability of electrical impedance pulse rate measurement technology as a health management function was investigated, and the results of a chest measurement experiment confirmed that the measurement was sufficient. Furthermore, we confirmed that measurement was possible on the back and lower back, demonstrating that the measurement device could be mounted on the support element.

Keywords: assistive suit, load reduction mechanism, pulse rate measurement

1. 緒 言

働き方改革や健康志向の高まりから、職場環境の改善や従業員の健康維持・管理が重要視され、それに活用できるスマートテキスタイルの開発が求められている。スマートテキスタイル分野は、これまで県内繊維企業が衣料分野で培った繊維技術を応用できる成長分野であり、IoT・AIなどの電子・情報技術との融合による用途開発が可能である。

このような中、重い荷物を持ち上げる作業現場では、健康維持のための腰痛予防としてコルセット等から進化したウェア型アシストスーツの活用が期待されている。現状のウェア型アシストスーツは、その多くがゴムなどの弾性体を背面に配置し、体の前屈動作により

引き伸ばされた弾性体が元に戻る際の復元力を筋力の補助力としている¹⁾²⁾。この方式は図1(a)に示すように重量物を持ち上げる際に膝を曲げず背を丸める前傾姿勢³⁾をとることを前提としている。しかし、この姿勢においては腰椎への負荷を軽減することは難しい。一方で、背筋を伸ばした状態に拘束することを目的とし、その固定力を高めるために背面部に芯となる硬い部材(ボーン)を搭載した方式も存在する⁴⁾⁵⁾。このタイプは背を丸められないため、図1(b)に示すように膝を曲げて荷物を持ち上げる³⁾ように誘導する。そのため、腰椎への負荷は軽減されるが、ボーンに動きが拘束されるため、普段の動作を妨げることが課題である。

また、健康管理を目的として、作業者の心拍数などを収集するバイタルセンシングシャツが注目を集めている³⁾⁴⁾。しかしながら、アシストスーツは作業服と

*繊維生活部

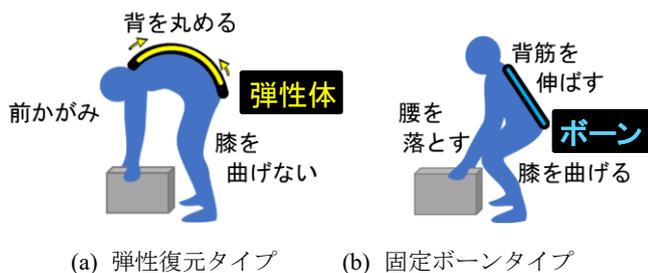


図1 ウェア型アシストスーツ

同様に、シャツなど複数枚の衣類の上に装着する。したがって、健康管理技術として肌に直接接触して測定するバイタルセンシングシャツの技術^{6,7)}を用いることはできず、心電図による心拍の計測は難しい。

現在、ウェア型アシストスーツにはこの腰痛予防とバイタルデータ収集の両機能を備えた繊維製品は存在しない。そのため、それぞれの機能を有する製品を着用する必要があり、導入や管理が煩雑になる。そこで、本研究では、心拍と同等の情報として扱える脈拍に注目し、アシストスーツに健康維持と健康管理の両機能を搭載することを目的に、身体負荷を軽減し且つ他の作業を妨げない新たな負荷軽減機構の開発と衣類の上からでも脈拍を測定できる健康管理技術についての検討を行なった。

2. ウェア型アシストスーツの負荷軽減機構

新たな負荷軽減機構として、作業に応じて手動およびアクチュエータ駆動により剛性を変更できる剛性可変ボーンの開発を行なった。これにより、剛性を低い状態とすることで通常動作は妨げず、重量物を持ち上げる際には剛性を高い状態にして図1(a)の姿勢をとれなくし、図1(b)のような動作に誘導することで腰椎への負荷を軽減することを目標とした。

2.1 剛性可変ボーンの構造

剛性可変ボーンは、図2に示すような薄肉の矩形断面を有する梁構造の状態を低剛性状態とし、断面の両端が起き上がるように変形することで高剛性状態となる構造とした。

2.2 手動剛性可変ボーン

2.2.1 試作

厚さ0.5 mm、幅100 mm、長さ450 mmのポリカーボネート板に組紐（綿、幅2 mm）を図3に示すように80

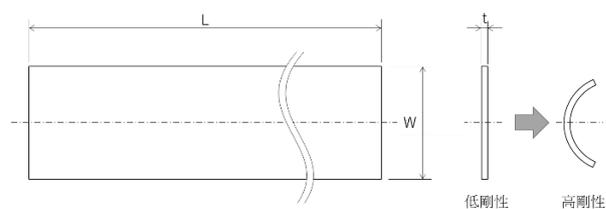


図2 剛性可変ボーンの構造

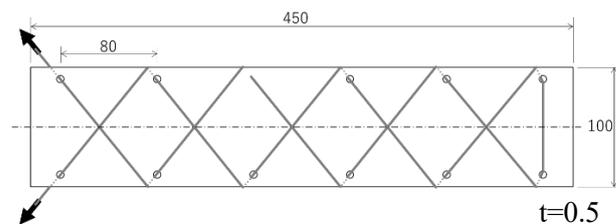


図3 手動剛性可変ボーン

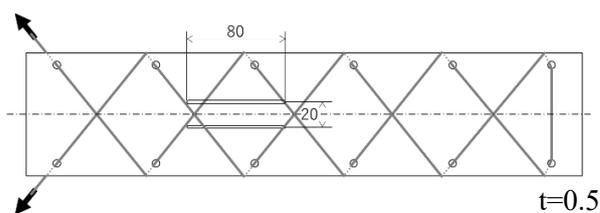


図4 手動剛性可変ボーン（スリット入り）

mm間隔で靴紐を通すように配し、この組紐を矢印方向に引くことで変形する手動剛性可変ボーンを試作した。

2.2.2 実験方法

試作した手動剛性可変ボーンをアシストスーツに組み込み、紐を引くことで剛性可変機構の確認を行なった。また、剛性可変過程におけるボーンの形状観察及び変形終了に至るまでの紐の引き込み量や最大引き込み力を計測した。

2.2.3 実験結果

紐は引き方により、左右のバランスが取れず、必ずしも想定した円弧状に変形しないことを確認した。そこで、図4に示すようにボーンが腰に接触する位置に2本のスリットを入れ、ベルトを通すことでボーン中央部の幅20 mmを体に密着させる仕様に変更した。これにより高剛性状態では図5に示すようなスリット箇所を中心にした形状に変形すること機構となった。この

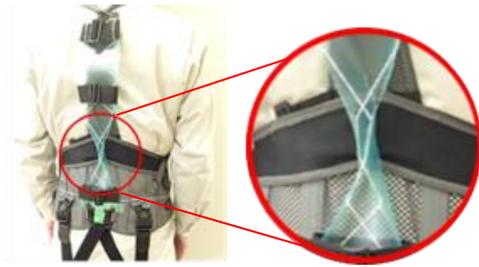


図5 手動剛性可変ボーンの高剛性状態

変形に寄与している部分の紐の長さは片側375 mmであり、その引き込み量は約120 mm、最大引き込み力は約12 Nであった。

2. 3 アクチュエータによる剛性可変ボーン

2. 3. 1 試作

ボーンの高剛性を自動化することを目的に、アクチュエータの選定を行なった。アクチュエータはウェア型の利点を生かすためボーンの外部にモータを搭載するのではなく、紐状の伸縮型アクチュエータを用いることとした。前項の手動可変ボーンでは変形に寄与している組紐をそのまま置き換えるには、伸縮率32%、伸縮力12 N以上の性能が必要となる。しかしながら、これらの性能を満足するアクチュエータは存在しないことから、近い仕様のエアアクチュエータ(マッキベン型細径人工筋肉SM40・(株)s-muscle)を選定した。そのうえで、小さい変位量で剛性可変が可能なボーンとして、厚さ1 mm、幅100 mm、長さ450 mmのポリカーボネート平板を低剛性状態とし、エアアクチュエータを図6のように配置したボーンを試作した。

2. 3. 2 実験方法

エアアクチュエータに空気圧0.5 MPaを供給することで剛性可変機構の確認を行なった。

2. 3. 3 実験結果

エアアクチュエータ駆動時にボーンは図7のように湾曲変形した。変形後の最大高さは23 mm、最小幅は84 mmであり、高剛性状態になることを確認した。

2. 4 着用評価

重量物を持ち上げる際には剛性を高くして図1(a)のような姿勢をとれなくし、図1(b)のような動作に誘導できることを確認するための実験を行なった。

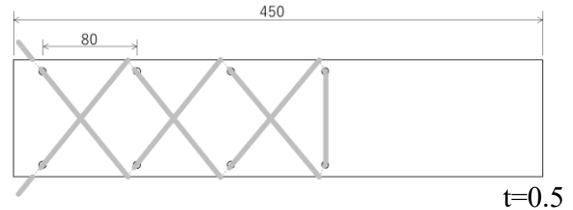
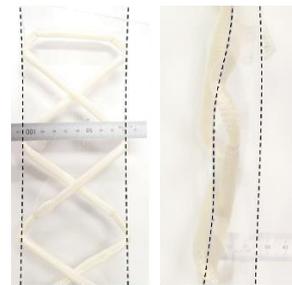


図6 アクチュエータによる剛性可変ボーン



(a)正面から見た様子 (b)側面から見た様子

図7 空気圧0.5 MPaのボーンの様子



図8 アクチュエータ駆動ボーンの高剛性状態

2. 4. 1 実験方法

試作したボーンを組み込んだアシストスーツを着用し、ボーンの高剛性値が低い状態及び高い状態において直立状態から背を丸めるように前屈する動作実験を行なった。

2. 4. 2 実験結果

手動、アクチュエータ駆動ともにボーンが平板状態で剛性が低い状態においては、背を丸めて前かがみになる姿勢は容易に取ることができた。一方で、図5や図8のようにボーンの高剛性が高い状態においては、背を丸める動作の抵抗となった。これにより、通常作業時はボーンの高剛性を低い状態とすることで作業性を低下させず、重量物を持ち上げる際にはボーンの高剛性にするこで背筋を伸ばした姿勢に誘導でき、その有効性を確認した。

2. 5 考察

ポリカーボネートのヤング率(E)を2.3 GPaとすると、手動ボーンの低剛性状態における剛性(EI)は $2.4 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$ である。紐を引いて変形させた後の高剛性状態においては、ボーンの剛性が最大となる位置の断面形状を幅0.5 mm、高さ40 mmの梁が2枚並立している状態として計算すると、その剛性値は $12.2 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$ となった。また、アクチュエータ駆動ボーンの高剛性状態の剛性は $19.2 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$ であり、駆動後に湾曲したボーンの剛性が最大となる位置の断面形状を半径 $R=50 \text{ mm}$ 、厚さ $t=1 \text{ mm}$ 、角度 $\theta=1.68 \text{ rad}$ の円環の一部として近似し、式(1)を用いて断面二次モーメント I_G を計算した剛性値は $11.1 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$ であった。

$$I_G = \frac{1}{4}(\alpha + \sin \alpha \cos \alpha)(r_2^4 - r_1^4) - \frac{1}{\alpha(r_2^2 - r_1^2)} \left\{ \frac{2 \sin \alpha (r_2^3 - r_1^3)}{3} \right\}^2 \dots (1)$$

ただし、 $\alpha = \frac{\theta}{2}$ 、 $r_2 = R + \frac{t}{2}$ 、 $r_1 = R - \frac{t}{2}$

このことから、背筋を伸ばした姿勢に誘導するためにはボーンの剛性が $10.0 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$ 以上あれば十分である可能性が高いことがわかった。なお、この妥当性については今後の課題として取り組んでいく予定である。

3. アシストスーツのための健康管理技術

3. 1 計測原理とデバイスの試作

皮膚非接触で一分間当たりの脈拍数を測定精度 $\pm 5\%$ で計測可能な方法について検討した結果、

- ・皮膚に直接触れることなく脈拍計測ができる
- ・皮膚に接触はしないが、ある程度装被測定者に密着している(アシストスーツは肩ベルトやチェストベルトなどがあるため)
- ・既にある程度実用化のめどが立っている⁸⁾
- ・電子デバイスの小型化が可能

などの点が確認できたことから、シートベルトなどで脈拍や呼吸数をモニタリングするために使用されている電気インピーダンスを用いた計測技術⁹⁾のアシストスーツへの応用可能性について検討することとし、図9に示す小型デバイス(45.5×38.5×10.5 mm)を試作した。

3. 2 実験方法・条件

ウェア型アシストスーツのチェストベルトに搭載し、

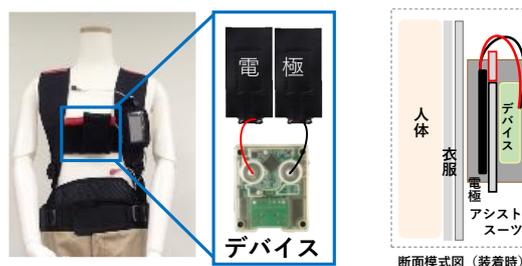


図9 試作デバイスと装着の様子

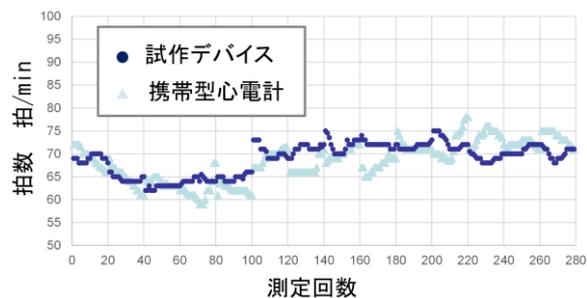


図10 計測比較実験の結果

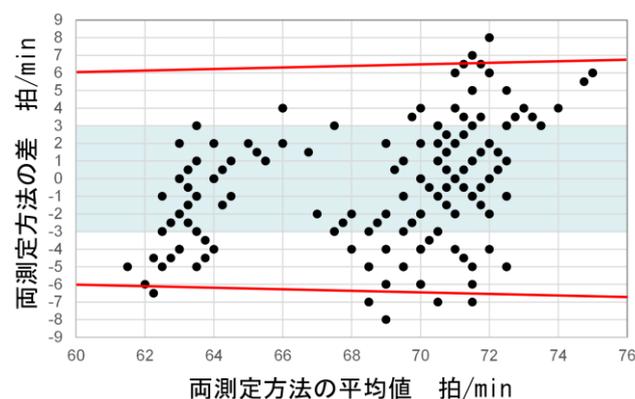


図11 ブランド-アルトマン分析結果

比較対象として市販の携帯型心電計(Checkme ProX・三栄メディスン(株))に誘導コードと心電図電極をセットしたI誘導による心拍数計測を同時に行なうために、椅子に座った安静な状態で脈拍計測実験を行なった。

3. 3 結果と考察

図10に示すように試作デバイスによる脈拍数の計測値は携帯型心電計の心拍数の表示値に対し一定程度同期して値が上下することが確認でき、脈拍数の増減傾向が把握できた。また、試作デバイスの脈拍数値と携帯型心電計の心拍数値の平均と差を図示したブランド

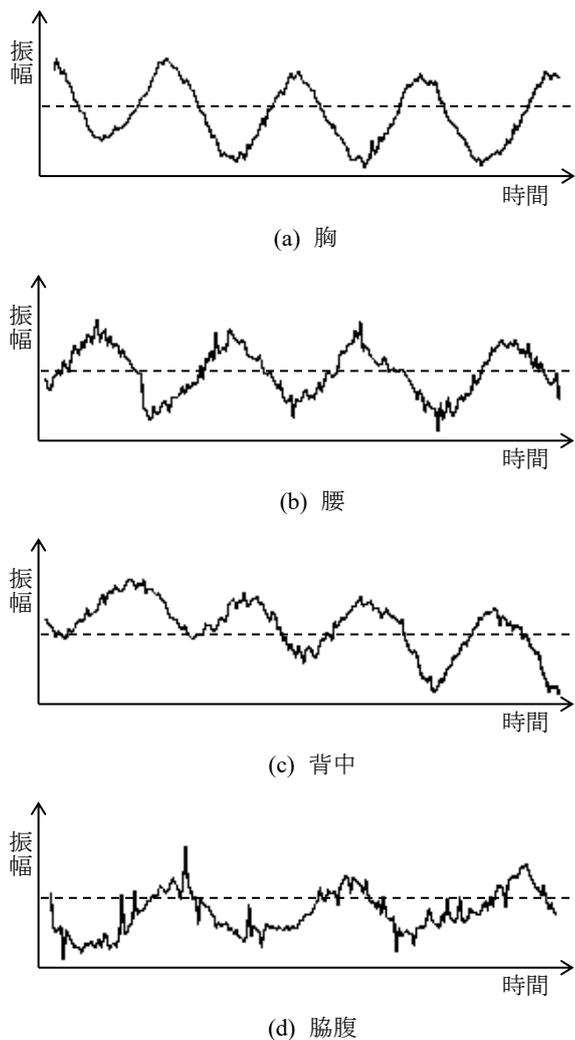


図12 各部位での測定波形

- アルトマン分析¹⁰⁾⁻¹²⁾を行なった結果を図11に示す。医療用の心拍計自体に ± 3 拍/分の誤差が許容されている¹³⁾ことを考慮し、これに5%の誤差を上乗せした上下限範囲(太線内)に96.7%以上のデータが含まれることから、本計測技術の応用は十分妥当であると判断した。

さらに、本研究においてボーンへの脈拍計測機能(デバイス)搭載の可能性を検討するために、腰や背中、ボーンに近いわき腹における計測実験を行なった。胸を含む各部位における計測波形を図12に示す。計測波形のうち振幅の大きいものは呼吸に対応しており、その中にある小さな振幅の波形が脈拍に対応している。これらの波形を比較した結果、脇腹についてはノイズが大きく計測には適していないが、腰や背中については胸の波形に比べ多少ノイズが大きいものの、呼吸及び脈拍が十分計測できることを確認した。これによりデバイスのボーンへの一体化の可能性が高いことが確認

できた。

4. 結 言

アシストスーツに健康維持と健康管理の両機能を搭載することを目的に、身体負荷を軽減し且つ他の作業を妨げない新たな負荷軽減機構の開発と、衣類の上からでも脈拍を測定できる健康管理技術についての検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) アシストスーツの新たな負荷軽減機構として剛性可変ボーン(手動, エアアクチュエータ駆動)を提案し、実験によりその有効性を検証した。
 - (2) 健康管理機能として電気インピーダンスによる脈拍計測技術の適用可能性について検討し、必要十分であることを確認した。
 - (3) 電気インピーダンスによる脈拍計測デバイスが背面ボーンへ搭載可能なことを確認した。
- 今後は耐久性や作業時における脈拍測定の安定性等について検討を行ない、実用化を目指す。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、適切なお助言を頂いた POSH WELLNESS LABORATORY(株)の根武谷吾氏に感謝します。

参考文献

- 1) 山崎信寿, 高橋直己. 体表面長さ変化を利用した介護者腰部負担軽減衣服. バイオメカニズム. 2004, vol. 17, p. 235-244.
- 2) 今村由芽子. 筋力補助効果と体幹安定化効果を持つ軽労化装具スマートスーツ・ライト. 北海道大学博士論文. 2014, 84p.
- 3) 西條富美代. 姿勢と動作—作業姿勢と負担—. 日本集中治療理学療法科学. 1995, vol. 10, no. 8, p. 127-134.
- 4) 米田貢. “upr×金沢大学×山本寛斎事務所のコラボレーションにより実現「サポートジャケットBb+PRO」販売開始”. 米田研究室. <https://yoneda-lab.w3.kanazawa-u.ac.jp/pdf/20160912-01.pdf>, (参照 2022-07-12).
- 5) ユーピーアール株式会社. “サポートジャケットBb+FIT SLIM/WIDE”. ユーピーアール株式会社. <http://assistsuit.upr-webshop.jp>, (参照 2022-07-12).
- 6) 多田泰徳, 井上雅博, 得丸智弘. 導電性インク配線を利用した生体電気測定肌着の特性評価. 繊維機械学会誌. vol. 59, no. 6, p. 141-148.

- 7) 河西奈保子, 小笠原隆行, 中島寛, 塚田信吾. 着るだけで生体情報計測を可能とする機能素材hitoeの開発及び実用化. 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン. 2017, vol. 11, no. 1, p.17-23.
- 8) 損害保険ジャパン日本興亜株式会社. “「シートベルトカバー型デバイス」による事故防止サービス開発に向けた実証実験開始”. 損害保険ジャパン日本興亜株式会社. https://www.sompo-japan.co.jp/-/media/SJNK/files/news/2018/20190313_1.pdf?la=ja-JP#page=1, (参照 2022-07-12).
- 9) 学校法人北里研究所. 生体情報検出装置、検出方法. 特開2020-110692. 2020-07-27.
- 10) Benjamin W Nelson, Nicholas B Allen. Accuracy of Consumer Wearable Heart Rate Measurement During an Ecologically Valid 24-Hour Period: Intraindividual Validation Study. JMIR Mhealth Uhealth. 2019, vol. 7, iss. 3, e10828, p. 1-16.
- 11) 長谷川敬志, 金主賢, 中島一樹. 安静座位・着衣状態での脈拍数計測のための光電脈波ラインセンサの開発. 計測自動制御学会論文集. 2014, vol. 50, no. 8, p. 588-593.
- 12) 小竹良文, 佐藤暢一. Bland-Altman法による心拍出量モニタの精度評価. 日本集中治療医学会雑誌. 2009, vol. 16, no. 3, p. 263-272.
- 13) JIS T 1304:1998. 心電図監視装置