

労災疾病臨床研究事業費補助金

炭素繊維バネ搭載ロボット装具による労働者の腰痛防止のための医工連携研究

令和1年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 小野寺宏

令和2年 3月

## 目 次

### I. 総括研究報告

炭素繊維バネ搭載ロボット装具による労働者の腰痛防止のための医工連携研究-----3

研究代表者 小野寺宏

### II. 分担研究報告

炭素繊維バネ搭載ロボット装具による労働者の腰痛防止のための医工連携研究-----7

分担研究者 山口健

III. 実験結果資料 -----8

労災疾病臨床研究事業費補助金  
(総括) 研究報告書

炭素繊維バネ搭載ロボット装具による労働者の腰痛防止のための医工連携研究

研究代表者 小野寺宏 東京大学大学院工学系研究科

研究要旨：炭素繊維(CFRP)バネを搭載する装着型無動力ロボットを開発し、荷物上げ下ろし動作時の労働負荷軽減および腰痛予防を目指す。令和1年度、下肢装着型ロボットを設計・試作して荷物挙上時の足関節および膝関節の運動支援効果を確認した。実用化にあたり歩行違和感のさらなる軽減と業務内容（介護業、荷物運搬業）に応じたロボット設計の必要性も明らかになり、令和2年型ロボットの設計を行った。ロボット装着者（被検者）用官能試験法（アンケート）を決定した。

研究分担者 山口健・東北大学大学院工学系研究科・准教授

#### A. 研究目的

荷物上げ下ろし作業支援機能と腰痛予防効果（持ち上げ重量 15kg 以下）を有する無動力の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) バネ搭載型装具ロボットを開発する。対象となる労働として、空港や倉庫・工場における重量物上げ下ろし、医療介護施設における患者の動作支援（立ち上がりとベッドから車椅子等への移動支援）を想定する。これらの業務において労働者が常時装着でき、現行の電動ロボットの不得意領域である水濡れ環境や消毒が不可欠な業務環境においても労働負荷軽減効果とともに腰痛予防効果を発揮できる無動力装着型ロボットを目指す。

現在開発が進められている装着型労働支援ロボットは電気モーターや圧縮空気を駆動源とするアクチュエータを用いるものであり、装具ロボットの重量と稼働時間が実用化において課題となっている。アクチュエータを用いる装具ロボットは電源を搭載する必要があるためロボット総重量は更に増加する。このため転倒時に装着者は大きなダメージを受ける危険がある。アクチュエータ搭載型装具ロボットは水や油で汚染された環境での動作が困難だが、無動力の

CFRP バネ搭載ロボットは水中を含めてあらゆる労働環境において活用できる利点があり、消毒も容易であるため食品工場など清潔が求められる労働環境での活用も期待される。

令和1年度は、CFRP バネ搭載装具ロボットのプロトタイプを設計・製作する。荷物の上げ下げ労働をシミュレーションするロボット性能の評価用動作を策定し、運動解析装置で支援効果と腰痛誘発姿勢の関係を解析する。装着者が装具ロボットの性能を評価するためのアンケートを制作する（官能試験）。令和2年度は装着者の意見をもとに装具ロボットを改良し労働現場でのテスト用ロボットを制作する。令和3年度は労働者が長時間装着できる装具ロボットを完成させて腰痛予防効果と労働負荷軽減効果を客観的および主観的に評価する。

#### ※ 労災補償行政の課題との関連性

労働者の腰痛予防・軽減対策としては可能な限り重量物を持ち上げる作業を減らすことが重要である。15kg を超える重量物の日常的な上げ下ろし作業は機械が担うことが望ましい。人間が空間に挙上・運搬することが許容される重量は 15kg 以下(望ましくは 10kg 以下)に限定すべきである。15kg を超える重量物を人間がやむ

を得ず空間保持・移動させざるを得ない業種においては従来型のモーター駆動型装具ロボットが担うことになる。このように本研究において実用化を目指す無動力 CFRP 装具ロボット（15kg 以下の重量物での作業）と従来型のモーター搭載型ロボットとは効率的に役割分担できると考える。腰痛は荷物持ち上げ型の労働で頻発しており労働補償行政のなかで解決すべき重要項目のひとつとなっている。重量物を日常的に扱う労働環境において労働者は脊椎の障害（椎体変形、圧迫骨折、椎間板損傷）に起因する疾患および疼痛に悩まされ離職や生活の質の低下など社会的にも大きな損失が生じる。本研究では、多くの労働者が負担感なく短時間で脱着が可能で安全な装具ロボットを目指しており労働補償行政に貢献できると信じる。

重量物を持ち上げる際の姿勢も腰痛予防において重要である。我々は重量物挙上のスペシャリストであるウェイトリフティング選手とパワーリフティング選手の動作を解析し、重量物挙上時の効果的な体の使い方と腰痛予防運動を労働補償行政に反映させることも目指す。これらの解析により重量物操作時の腰痛予防と正しい重量物持ち上げ姿勢の教育に使用できるマニュアルの策定を最終年度に予定している。

## B. 研究方法

CFRP バネ搭載下肢用ロボットの装着による腰痛予防・軽減効果を評価して実用性能を有する装具ロボットを開発する。令和1年度は安全のため市販の汎用アルミニウム製装具を改造して炭素繊維バネで下肢と靴部を連結し種々のバネ強度およびバネのレイアウトを検討した。装具下腿部の外側と内側に2枚のCFRPを連結し、CFRPの他端は靴の内外側と連結した。重量物持ち上げ開始時（しゃがみこみ）にCFRPバネが屈曲し重量物持ち上げ動作時（立ち上がり）にCFRPバネがエネルギーを解放して元位置に復することで持ち上げ作業を無動力で支援すること

ができる。CFRPバネ定数の最適化にあたり、厚みの異なる数種類のCFRPバネを用いて支援効率の最適化をおこなった。

本装具ロボットによる荷物挙上動作支援効果の判定には、

(a) モーションキャプチャーによる運動学的解析、

(b) 官能試験（アンケート）

を使用する。官能試験項目については整形外科医・リハビリテーション医・神経内科医が検討のうえ作成した。

モーションキャプチャー解析については、従来の光学的 passive marker 法による3次元動作解析とともに、動作撮影ビデオを用いたディープラーニングを用いた2次元動作解析法を用いた（今年度はOpenPoseを使用）。光学的 passive marker 法では専用の測定室における労働模擬動作を解析する。ディープラーニングによるビデオ解析も併用する理由は、労働者の自然な労働環境における実性能を評価可能と考えるからである。

令和2年度は1年度モデルを改良し労働現場でのテスト用モデルを制作する。令和3年度は労働現場用モデルを制作し腰痛予防・軽減効果を評価する。腰痛対策には重量物作業時の姿勢が重要であるため腰痛防止のための正しい挙上方法と姿勢についての作業マニュアルを作成し労働安全（腰痛予防）に寄与する（重量物作業時の腰痛防止マニュアルとして労働安全行政に提言）。

（倫理面への配慮）東京大学および東北大学の倫理委員会に装着実験実施を申請。令和2年度より実業務における装着を視野に入れて承認の後インフォームドコンセントを得て実施する。

## C. 研究結果

a) 作業負荷量の決定、装具ロボットでの評価を開始（図1, 2）

専門医 3 名と理学療法士 2 名は本装具ロボットが支援する作業用荷物の重量上限を 15kg に設定した。それを超える重量物は電動ロボットが担うべきであるとの意見で一致した。令和 1 年度は腰痛防止効果・支援効果解析のための連続負荷重量を 10kg に設定した。なお熟練介護者による車椅子移乗支援も 10～15kg の挙上とほぼ同レベルの労働負荷である（熟練介護者）。

装具ロボットの評価には客観評価と主観評価（アンケート）を併用する。すなわち、

- ・客観評価：重量物持ち上げ時の姿勢と安定性を運動学的に解析し運動支援効果と腰痛リスクを算出

- ・主観評価（官能試験）：修正 Borg スケールで作業負荷感を定量化し、各関節支援効果、腰痛予防性能、各関節支援効果、現場での有用性を回答させることになった。装着者の意見とあわせて主観評価項目（官能試験）を決定した（表 1）。

#### b) 測定結果

装着者全員（理学療法士 10 名，学生 2 名）がロボットの中腰・立ち上がり・荷物挙上支援効果，足関節支援効果を実感した。膝関節を支援していないにも関わらずほとんどの使用者が膝関節の支援効果をも自覚した。モーションキャプチャー解析では足関節に加えて膝関節でもバネ強度に比例した支援効果が確認でき（図 3），理学療法士の評価が裏付けられた。足関節支援バネのみでの膝関節支援効果の実証はロボット軽量化，製造コスト減，歩行支援機能向上に直結するものであり 19 年度最大の成果である。バネ定数については強いバネを好む者や軽いアシストを好む者など個人差が大きい，最大公約数的には CFRP 厚 3～4mm のバネが介護支援に適していた。1 名が強いバネ使用時に車椅子移乗支援時の“体が後方に引かれる感覚”を訴えた。内側の CFRP バネが車いす移乗支援時に患者の足に引っかかり邪魔になるとの指摘もあった。令和 1 年度モデルは装具の調整個所が多

いため下肢への装着に時間がかかりすぎる（10 分程度）ので簡単・迅速に装着できるようにしてほしいとの意見もあった。

これらの指摘と解析結果をもとに令和 2 年度モデルを設計した。

#### D. 考察

我々は CFRP バネを足の両側に搭載することにより，弱いバネを用いても十分な歩行・しゃがみ動作の支援効果が得られること，方向転換時に足関節運動が保たれるため CFRP バネの欠点であった方向転換阻害効果が軽減されることを見出して下肢装着型装具ロボットの開発を進めて特許出願済みであり，効率よく本研究を実施できたと考える。装具ロボットには大きな力が加わるため装具の安全性を最優先し，令和 1 年度は既存の（スポーツ競技用装具として実績のある）下肢用アルミ製装具を改造して装具ロボットを制作した。被験者の体格・性別により装具ロボットサイズが異なることもあり令和 1 年モデルは調整個所の多い（金属部品が多く重い）ロボットとなった。必然的にフィッティングに時間がかかることになり重量も増加してしまった。令和 2 年度モデルでは介護支援モデルと重量物運搬モデルを分離して設計することで金属製部品点数を削減し，脱着時間短縮と大幅軽量化を目指す。

本装具ロボットの重量物持ち上げ効果に関しては被験者全員が有効と答えたが，バネ強度に関しては被験者により好みが大きく分かれた。強いバネを好む者，弱いバネを好む者とではバネ強度の差は 2 倍にも達した。これには荷物挙上姿勢の差も関与しており，重量物挙上スペシャリストであるウエイトリフティング選手の演技を参考にして腰痛防止効果と効率的な重量物挙上法（重量物持ち上げ姿勢）を令和 2 年度においても検討し装具ロボット設計に反映させた。

本研究申請時には労働負荷軽減用 CFRP バネ

定数をコンピュータ制御により可変にすることを想定していたが令和1年度の研究の結果、バネ定数を可変にしなくても十分な労働支援効果が得られることが明らかになった。この結果、一切の電子部品やバッテリーが不要となり、水濡れ環境さらには水中での労働にも本ロボットシステムを活用できる。消毒薬でロボット全体を殺菌することも可能であり、食品業界や製薬業界などロボットの清潔性が重視される労働環境においても本ロボットの活用が期待される。

#### E. 結論

労働現場で装着可能な無動力装具ロボットの实用化を目指し、軽量かつ装着が容易で装着違和感の少ない、重量物作業支援型装具ロボット試作機を制作した。装着実験の結果、重量物持ち上げ時の支援効果が確認できた。令和1年度の成果をもとに令和2年度モデルは、介護業向けロボットと荷物運搬業向けロボットに分離設計して機構の簡素化・軽量化と脱着時間短縮を図る。

F. 健康危険情報 なし

G. 研究発表

1. 論文発表 なし

2. 学会発表

・武田伊織, 山田敦史, 小野寺宏 OpenPose を用いたマーカレスモーションキャプチャの可能性 日本生体医工学会 関東支部若手研究者発表会東京工業大学 2019/11/30

・武田伊織, 小野寺宏 炭素繊維強化プラスチック (CFRP) バネを活用した下肢運動支援システムの開発. 第2回 COI 学会日本科学未来館 2019/9/19

・山田敦史, 松崎博貴, 武田伊織, 小野寺宏. 上肢機能障がい者のための強化学習を用いた自律型ロボットハンドの開発. 日本ロボット学会学術講演会 早稲田大学 2019/9/6

H. 知的財産権の出願・登録状況

特許出願

歩行支援装具 特願 2017-166264

国際特許移行 PCT 2019

## (分担) 研究報告書

荷物の上げ下ろし作業支援のための炭素繊維板バネを搭載した下肢装具の開発

研究分担者 山口 健 東北大学大学院工学研究科・准教授

研究要旨：炭素繊維板バネを搭載した下肢装具の荷物上げ下ろし作業支援のための評価実験を行うにあたり、予備実験を行い動作力学解析手法及びその妥当性並びに実験方法の問題点を確認した。

### A. 研究目的

本研究の目的は、荷物の上げ下ろし作業支援のための炭素繊維バネを搭載した下肢装具の開発を行うことである。本年度は、炭素繊維バネ搭載下肢装具を装着した状態で、荷物の持ち上げ実験を行い、フォースプレート、光学式3次元動作解析装置、ビデオ画像のディープラーニング(openpose)を用いた運動力学解析を行い、実験プロトコルと解析方法の確立を目指す。

### B. 研究方法

L字形のCFRP板バネの上部は膝関節装具に、下部は靴に、それぞれ自由度を持った状態で取り付けた。また、板バネは片脚につき、内側と外側それぞれに取り付けることができ、着脱も可能とした。しゃがみ込む際に板バネがたわみ、生じる復元力によって立ち上がる際にアシストを得ることができる。研究グループ内の健常成人男性1名を被験者として荷物の持ち上げ実験を行った。フォースプレートにより床反力を測定した。また、被験者の各関節に取り付けた赤外線反射マーカークの位置を3次元動作解析装置により測定するとともに、openposeでも同時に測定した。炭素繊維板バネによるアシストの強さは、板バネの厚さによって調整した。被験者には、立位からパワーポジションを目標としてしゃがみ込み、荷物を把持し、その後立ち上がって荷物を持ち上げるよう指示した。なお、被験者からは事前にインフォームドコンセントを得た。

評価項目として、股関節、膝関節、足関節モーメントを、逆動力学法に基づき算出した。また、各下肢関節パワーを下肢関節モーメントと関節角速度の積として求めた。

### C. 研究結果

炭素繊維板バネ搭載下肢装具を用いることで、しゃがみ込み、立ち上がりの各フェーズにおいて、膝関節パワーにおいて効果がみられた。板バネの厚さが大きくなるにつれてその効果は増加する傾向がみられたが、関節可動域が制限される傾向があった。また、股関節や足関節については同装具によるパワー低減は見られなかった。また、3次元動作解析装置、openposeを用いた解析のいずれにおいても同様の結果が得られた。

### D. 考察

より強い板バネを搭載するほどしゃがみ込み、立ち上がりのいずれにおいても動作に大きな股関節パワーが必要であった。これは、同一の高さにある荷物を把持するためには上体を倒す必要がある。したがって、次年度の実験においては、被験者数を増加するとともに、股関節の最下点を統一するなどの工夫が必要である。

### E. 結論

炭素繊維板バネ搭載下肢装具の荷物の持ち上げ実験を行い、膝関節パワーにおいて装具の支援効果を確認できた。また、実験プロトコル、解析方法について、改善点等の知見を得た。

表 1

被験者による官能試験解答項目（アンケート）

アンケート		修正Borgスケール	
修正Borgスケールで評価（最悪が10点）		点数	つらさ指標
・装着時のつらさ（不快感）	_____点	10	非常に強い
バネ無しで3回連続動作		9	
・しゃがみ動作のつらさ	_____点	8	
・荷物持ち上げた時のつらさ	_____点	7	かなり強い
・荷物を元の位置に置く時のつらさ	_____点	6	
バネ装着で3回連続動作		5	強い
・しゃがみ動作のつらさ	_____点	4	やや強い
・荷物持ち上げた時のつらさ	_____点	3	
・荷物を元の位置に置く時のつらさ	_____点	2	弱い
バネの支援効果はありましたか？		1	かなり弱い
股関節 あり・わからない・なし		0.5	非常に弱い
膝関節 あり・わからない・なし		0	なにも感じない
足関節 あり・わからない・なし			
10kg荷物の50回上げ下ろし作業をする場合、 この装具を使いたいですか？			
使いたい・どちらでもよい・使いたくない			
腰痛予防効果はあると思いますか？			
大いにある・多少ある・改良すればある わからない・無い			



図1 重量物挙上動作の種類

重量物を垂直に挙上する動作（荷物搬送労働）と被介護者を起立・移乗させる動作（介護労働）という2種類の労働において疲労軽減（労働支援）と腰痛予防を目指す。

重量物持ち上げ動作をディープラーニングで解析(OpenPose 使用)した例を右図に示す。ビデオカメラ撮影動画をそのまま解析できるため、労働現場での自然な動作を解析できる利点がある。

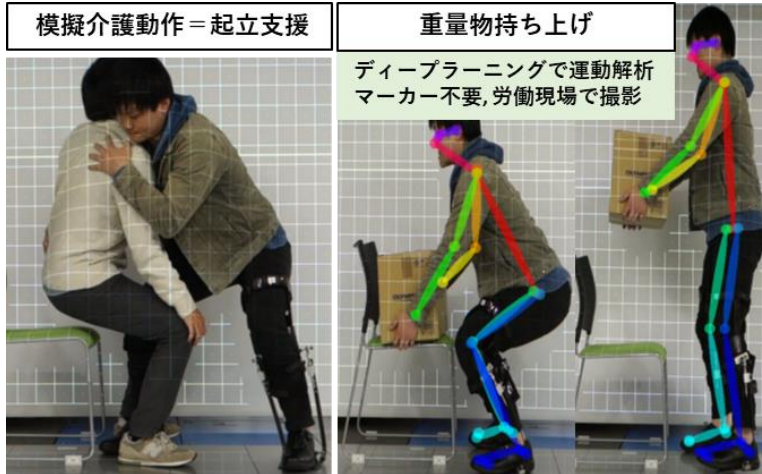


図2 重量物挙上動作実験セットアップ（反射型モーションキャプチャーシステム）

CFRP 装具ロボットを装着して重量物 10kg を挙上後、元の位置に置く。

左右の装具ロボットにはそれぞれ2枚のCFRP バネが装着されており下腿部と靴部を連結している。

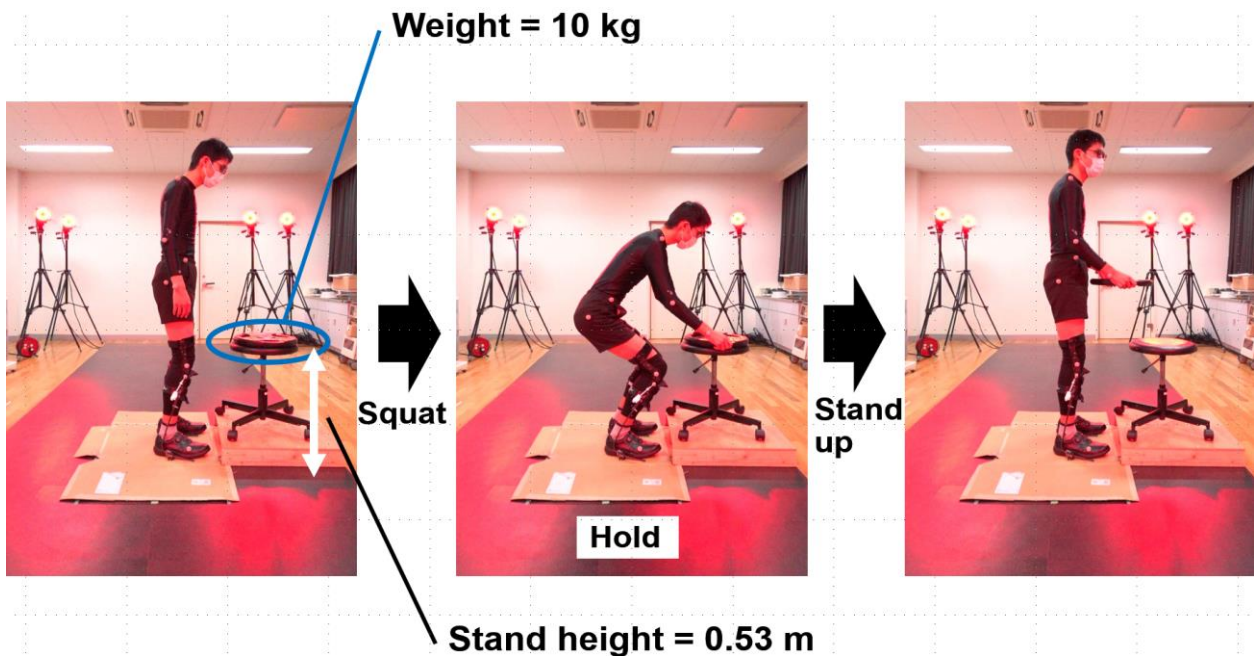


図3 運動支援効果の例

モーションキャプチャー装置による運動支援効果解析結果.

I: バネ支援無し, II, III, IV の順でヤング率の大きいバネを装着 (強い支援効果). CFRP バネ強度と膝関節運動支援効果が相関していることがわかる.

