

別添 1

総合研究報告書表紙

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～3年度 総合研究報告書

研究代表者 小野寺 宏

令和4年（2022）年 3月

総合研究報告書目次

目 次

I. 総合研究報告	
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--	1
研究代表者 小野寺 宏	
分担研究者 山口 健	
II. 研究成果の刊行に関する一覧表	----- 16

研究報告書

労災疾病臨床研究事業費補助金
 (総括) 研究報告書
 研究代表者 小野寺 宏

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重量物の上げ下ろし労働時の負荷軽減および腰痛予防を目指す。令和(R)1年度は下肢装着型ロボットの仕様と性能評価項目を策定して装具ロボットを試作し運動支援効果を検討した。令和2年度は前年度モデルの課題を抽出しCFRPバネを再設計するとともに人体接続部品のレイアウトを見直し装着所要時間短縮と軽量化を図った。R3年度は足関節の拘束を可能な限り軽減するためCFRPバネの接続方法を変更し方向回転時や歩行時の違和感軽減を図った。荷物挙上支援においてはR2年モデルと同等の効果が認められ(筋電図および官能試験による)、さらに装着感向上と歩行支援効果も観察できた。R1年モデルをパラメディカルスタッフが評価した結果、介護業種と重量物挙上業種では装具ロボットへのニーズが大きく異なることが明らかになった。そこでR2年度以降は介護業向けロボットと重量物挙上労働向けロボットを別設計とした。新型コロナウイルスのため医療介護施設での検討が不可能となったためR2年度以降は重量物挙上労働向けロボットに注力した。ロボット構造の単純化が可能となり(電子回路不要)過酷な消毒や水濡れ環境での使用に耐えられる装具ロボットを実現できた。R4年度以降に靴メーカーとも連携し実用化を目指す。重量物挙上競技のパワーリフティングとウエイトリフティングではバーベル挙上時に正しいパワーポジションをとれることが成績向上と腰痛予防に不可欠である。我々はパワーポジション姿勢で支援効果が最大となるよう装具ロボットを設計し腰痛予防と労作時の負担軽減を目指した。装具ロボットを搭載していない場合でもパワーポジションを習得することで重量物挙上時の疲労軽減と腰痛予防効果が期待されるためR2年度より正しい挙上姿勢(パワーポジション)学習のためのスマートフォンアプリ開発に着手しR3年度完成した。本アプリの普及により労働安全行政(労災防止対策：腰痛誘発動作回避による腰痛予防と負担軽減)に貢献したいと考える。

研究分担者 山口健・東北大学大学院工学系研究科・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)を併せ持つ無動力の炭素繊維強化プラスチック(CFRP)バネ搭載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

や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重く、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医療現場や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。

本研究ではCFRPバネ搭載装具ロボットのプロトタイプを製作し運動解析装置と筋電図計測によりロボットの労働支援効果と腰痛誘発姿勢の関係を客観的に解析する。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）。最終年度には労働者が重量物取扱作業をしていない時でも装着に負担を感じずに労働を続行できる装具ロボットを完成させる。これにより腰痛予防と労働負荷軽減を実現したい。

※ 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。米国CDCの基準によれば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く、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という。したがって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べきである。本研究において実用化を目指す無動力CFRP装具ロボットは15kg以下の重量物（CDC勧告のように10kg以下を将来的に実現すべきである）の挙上動作支援に特化し、従来型のモーター搭載型ロボットと役割分担する。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である。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。本研究は労働者が短時間で装脱着できる軽量で安全な装具ロボットの開発により労働補償行政に貢献できると信じる。

労働者が自らの作業姿勢を実際に見て腰痛リスクを知るとともに効率的で安全な荷物挙上姿勢を習得するためのソフトウェアの開発も重要である。ソフトウェアには重量物挙上時の腰椎負荷推定値を表示する機能も搭載する。これにより労働安全管理者は腰痛リスクのある作業工程見直しの際に腰痛負荷推定値を客観データとして活用できるようになる。重量物挙上のスペシャリストであるウエ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動作を作業者に学ばせることで労働補償行政に反映させたい。重量物操作時の腰痛予防と正しい重量物持ち上げ姿勢学習のための教材を上記のスマートフォンアプリに搭載して労働者が直感的に正しい作業姿勢を習得できる環境を実現したい。

B. 研究方法

CFRPバネ搭載下肢装着型ロボットの腰痛予防・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。R1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の他端を靴の内側部に連結した。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。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う。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

運動学的解析と筋電図解析, (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(修正 Borg スケール) (表 1). 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 次元的動作解析とともにビデオ画像のディープラーニング動作解析法を用いた. 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実際の労働環境におけるロボットの性能を解析できるからである.

R2 年度は R1 年モデルの問題点(装具時間が長く調整が面倒, 内側 CFRP バネが介護動作時に被介護者の足に接触する可能性がある, 足関節可動域の制約が大きい, バネで床に傷がつく)を基に CFRP バネを再設計し CFRP バネ装着位置と取り付け方法を見直した (図 1).

R2 年度モデルでは装具フレームを市販のアルミ製部品から CFRP および 3D プリント樹脂製に変更し軽量化と易装着性を実現した. R2 年度モデルは R1 年度モデルよりも足関節の自由度は向上して装着感は向上したが歩行時の足関節制約感が残った. そこで R3 年度モデルでは踝よりも前方に CFRP バネを配置することで足関節の自由度を改善し歩行時の違和感除去を目指した.

腰痛誘発リスクの少ない重量物挙上動作は“効率的な筋使用と動作姿勢により腰部ストレスを軽減できる挙上姿勢”と定義される. パワーリフティング選手に正しい挙上姿勢と悪い挙上姿勢を演技してもらい挙上効率と腰椎負荷量を計算した. これらのデータをもとに CFRP バネの支援効果の最大化と腰痛誘発リスクの最小化を可能にする自己学習ソフトウェア (スマートフォンで動作するアプリ) を開発した. スマートフォンで撮影した挙上画像または動画から挙上時の腰椎負荷推定値ならびにパワーポジションがとれていたか表示する. 腰痛危険動作の場合には模範姿勢をあ提示して腰痛リスクの少ない挙上姿勢を学習させる (マニュアルも搭載) (R3 年度).

(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した (東京大学 KE20-35).

C. 研究結果

R1 年度に決定した重量物作業模倣動作 (椅子座面の高さから 10kg の物体を把持して立ち上がり再び元の位置に降ろす) と性能評価基準 (客観評価と主観評価アンケート) により装具ロボットの労働支援効果を解析した. R1 年モデルでの要改善点は内側 CFRP バネが介護者の車いす移乗支援時に邪魔になる事, 調整個所が多く装着所要時間が長い事 (10 分程度), バネ先端部の床接触による床損傷である. これらの指摘と解析結果をもとに CFRP バネの再設計, CFRP バネ下端と靴との連結方法見直し, 下腿装着部品の改良をおこなった. 装着者全員 (分担研究者施設ふくめ 13 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 (研究分担者 山口の項参照). 膝関節を支援していないにも関わらずほとんどの被検者が膝関節支援効果も自覚した. 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, 被検者の主観評価が裏付けられた. CFRP バネの強さと支援効果はほぼ比例したが, 通常歩行の阻害効果も認められた (バネ強度と比例). 筋電図のパワースペクトル解析では最大 30% の筋活動軽減効果が認められた (腓腹筋, 図 2). 支援効果の個人差は比較的大きく, 一因として正しいパワーポジションが取れていたか否かが挙げられる. なお R2 年度実験では正しい挙上姿勢を指導せず被験者に自由に挙上させた. なおパワーリフティング選手に良い姿勢 (パワーポジション) と悪い姿勢 (しゃがまずに上半身前傾によりバーベル挙上) で試技をしてもらったが悪い挙上姿勢では腰椎ストレスが増加した (図 3).

R2 年度重量物挙上労働者用モデルでは, その場で中腰姿勢を保持できる (座れる) chairless

chair または wearable chair とよばれる構造をもつタイプも検討した。他の研究者や企業は wearable chair の大腿後面サポート部は剛体を用い股関節部または膝関節部に設置された機構部品で体重をささえている。我々は大腿後面サポート部を CFRP バネにすることで大幅な軽量化を実現しており CFRP が受ける荷重負荷を地面に逃がすことで腰部と下肢筋へのストレスを軽減している。本モデルを装着し 30 秒間の着座姿勢を維持させると前脛骨筋と大腿直筋の活動量が優位に低下した（筋電図活動量が平均 5% 低下）。我々が制作した wearable chair 型装具は大腿後面に固定していないため他社製装置のような拘束感はないが、装着状態での長時間歩行は実用的ではない（大腿後面に CFRP バネが突出）ため中腰作業が業務時間の大半を占める工場労働者等での活用が中心となる。

R3 年度モデルでは CFRP バネが下腿前側と靴足背部を連結する形状であり足関節の自由度は R2 年度モデルよりも向上しており方向転換時や歩行時の違和感ほぼ消失した。前年度モデル同様に腓腹筋の筋活動が立ち上がり・しゃがみ込みの両方の動作において減少していた（図 4）。ただし CFRP の強度が大きすぎるとしゃがみ込み時の筋活動軽減効果は減少した。この結果、装具ロボット装着者の筋力および体重ならびに挙上重量をもとに CFRP バネ強度を装着者ごとに設定する必要があることが明らかになった。

労働者が正しい挙上姿勢を習得し腰痛発生リスクを軽減するためのソフトウェア開発に R2 年度着手した。ディープラーニングを用いて人体各部位を標識することは容易だがクラウドに介護者の顔や工場設備等の情報が施設外で操作されることになるため実用化における障壁になると考えた。そこで作業姿勢や周辺環境の情報を施設・企業の内部のみで取り扱う方法とした。現在のスマートフォンの演算能力では人体各部位の高精度認識は非現実的であるため、人体部位（腰痛リスクとパワーポジション計測に必要なポイ

ント、すなわち足関節、膝関節、股関節、肩、頭等）は作業者自身が画面にタッチして認識させる方式とした。認識作業（数秒）完了後、画面に重量物挙上時の腰椎負荷量（米国および我国の上限は 3400 ニュートン）を表示し 3400 ニュートンを超える場合には警告する仕様とした。さらにパワーポジションがとれていたか画面に表示するとともに模範例を画面に重ねて示すことで労働者が正しい腰痛予防姿勢（＝効率的な挙上動作）を直感的に学習できる仕様とした（図 5）。

D. 考察

CFRP バネはパラリンピックでその優れた運動支援能力を見せつけたが日常用装具では CFRP バネは活用されていない。CFRP は直線運動の支援効果はあるものの回転運動（方向転換など）を阻害するためである。我々は細い CFRP バネを複数搭載することで歩行・しゃがみ動作・重量物上げ下ろし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て方向転換阻害効果を軽減できることを見出し下肢装着型装具ロボットの開発に着手した（特許出願済）。

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 R1 年度は市販の下肢用アルミ製装具（スポーツ競技用）に CFRP バネを接続する構造とした。しかし被験者の体格・性別により装具ロボットサイズが異なるため調整個所が多い（金属部品が多く重い、装脱着に時間がかかる）ロボットとなりパラメディカルスタッフには不評であった。R2 年度モデルは介護支援ロボットと一般労働支援ロボットを別設計にすることで金属製部品点数を削減し装着時間短縮と大幅軽量化を実現した。新型コロナウイルス流行のため医療福祉施設での実験が不可能となったため R2 年および R3 年は一般労働支援ロボットの研究に絞らざるを得なかった。

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、筋電図解析で支援効果を解析すると個人差が大きかった。パワ

一ポジションが上手に取れた被験者で支援効果が大きい傾向が認められた（筋電図活動減少，官能試験で高得点．研究分担者 山口の項参照）．本研究申請時には CFRP バネ定数を労働条件に合わせてコンピュータ制御する予定であったが介護支援ロボットと一般労働支援ロボットを別モデルにしたことでバネ定数調整が不要となり一切の電子部品とバッテリーを除去できた．これにより水濡れ環境さらには水中での労働にも本ロボットを活用可能となった．消毒薬でロボット全体を滅菌できるため食品業界や医療介護業界，製薬業界などロボットの清潔性が必須の労働環境での活用も期待される．

中腰姿勢とは被介護者の移動や起立支援のため腰椎屈曲または下肢（股・膝・足関節）屈曲により重心の下方移動を維持する筋負荷の大きい動作であり労働安全上問題である．リフティング競技におけるパワーポジションは理想的な姿勢として介護業界でも推奨されるが下肢の各関節部の負荷が大きく立ち上がり動作時の負担もあり労働現場で選択されにくい．本装具ロボットはパワーポジション（スクワット姿勢）時の下肢関節負荷を低減でき，かつ体勢の復帰を支援できるため，腰痛の主因である腰椎屈曲による重量物挙上（介護動作）を選択する必要がなくなる．結果として腰部ストレスは軽減され腰痛予防効果が期待できる．本装具ロボットによりはじめてパワーポジションによる“正しい”腰痛予防が実現できる．

正しいパワーポジションを取れた被験者で支援効果が大きいことから，正しい荷物挙上姿勢（＝腰痛予防姿勢）を学習できるアプリの開発を進めた．スマートフォンでの撮影画像をクラウドにアップロードしてもらえば高速コンピュータで容易に人体各部位の自動同定が可能である．しかし労働者/工場/被介護者のプライバシー確保と企業秘密保持の観点からオフラインでアプリ動作を完結させる必要があると考え撮影者自身が人体部位をマーキングする方式に変更した．こ

れにより福祉介護施設や工場等で安心して使えるアプリになったと自負している．

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で装着違和感の少ない重量物作業支援型装具ロボットを開発した．重量物上げ下ろし時の支援効果ならびに歩行支援効果を確認できた．R3 年度モデルは R1 および R2 年度モデルでの課題をほぼすべて克服した．安全靴を使用する場合には重量増加は片側 300 グラム以内であり装着者の負担は軽く，10 秒以内で装着が完了できる．高額な CFRP 加工費が本装置の实用化の最大の障壁だが，CFRP 構造と後加工の見直しにより 10 万円以下での販売も視野に入った．正しい挙上姿勢の習得により本装具ロボットの支援効果が向上し腰痛リスクも軽減できるため，労働者自身がスマートフォンで撮影して自身の腰痛危険度を認識でき正しい作業姿勢を学習できるスマートフォンアプリを開発した．

挙上動作解析アプリは東京大学大学院工学研究科矢谷浩司研究室との共同研究によるものであり矢谷先生および山田崇晴学士に感謝します

F. 健康危険情報 なし

G. 研究発表

1. 論文発表

Iwori Takeda, Atsushi Yamada & Hiroshi Onodera. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2020 電子版 <https://doi.org/10.1080/10255842.2020.1856372>. ArtificialIntelligence-Assisted motion capture for medical applications: a comparative study between markerless and passive marker motion capture.

Iwori Takeda, Atsushi Yamada, Hiroshi Onodera. Artificial Intelligence-Assisted motion

capture for medical applications: a comparative study between markerless and passive marker motion capture. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 24, 864-873, 2021
10.1080/10255842.2020.1856372

Iwori Takeda, Wataru Yasunaga, Satoshi Kobayashi, Yusaku Tagawa, Hiroshi Onodera. Gait assist brace with double carbon fiber reinforced plastic spring blades to allow ankle joint movement and change in walking direction. Advanced Robotics, 35, 927-938, 2021
10.1080/01691864.2021.1946422

Yusaku Tagawa, Taiyu Okatani, Hiroshi Onodera. Estimation of coefficient of static friction with one-axis force sensor by observing peripheral local slips on elastic hemisphere.” *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration 14.1, 206-212, 2021.

2. 学会発表

武田伊織, 小野寺宏. 炭素繊維強化プラスチックを活用した歩行・中腰作業支援装具の開発. 第41回バイオメカニズム学術講演会 東海大学湘南キャンパス. 2020/12/6

多川雄作, 岡谷泰祐, 小野寺宏. 弾性半球の周辺局所滑りを利用した1軸力センサでの静止摩擦係数推定の実験的評価. 38回日本ロボット学会学術講演会. 早稲田大学早稲田キャンパス. 2020/10/

Tagawa Y, Okatani T, Onodera H. Experimental study of Estimation of Coefficient of Static Friction with One-Axis Force Sensor by Observing Peripheral Local Slips on Elastic Hemisphere. The proceeding of The SICE Annual Conference 2020. Thailand online. 2020/9/1

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

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			
腰痛予防効果はありますか？			
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 CFRP バネ搭載装具ロボット

(a) 介護支援用令和1年度モデル

(b) 介護支援用令和2年度モデル. 令和1年度モデルの半分 500 グラムに軽量化, 装着時間短縮.

(c) 重量物挙上労働むけ令和2年度モデル

(d) 重量物挙上労働むけ令和3年度モデル

(a)



(b)



(c)



(d)



図2 重量物(10kg) 挙上動作における腓腹筋表面筋電図

上段は筋電図記録(単位ミリボルト), 下段は wavelet 解析. ロボット装具を装着せずに重量物の上げ下ろし動作をおこなうと, 挙上時に腓腹筋活動が著明に増加し, 200Hz に達する高周波数の筋活動が認められる (多数の腓腹筋繊維活動を反映. ほぼ full interference). ロボット装着時の筋活動上昇は比較的小さく高周波成分を認めない. ロボット装具の腓腹筋支援効果は一連の動作において約 30 パーセントである (筋電パワー解析).

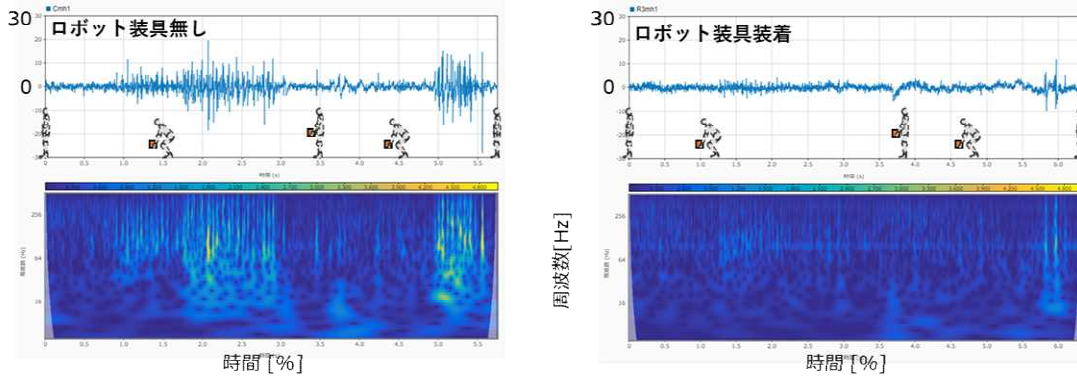


図3 パワーリフティング選手による正しい重量物挙上姿勢 (パワーポジション) と悪い姿勢の例

20kg のシャフトを挙上しているため正しい姿勢でも腰部負担は 4500N に達している. 悪い姿勢では 4800N と腰部負担が増加している. ただし悪い姿勢であっても重心位置をシャフト近傍に位置させて腰部負担軽減姿勢を無自覚にとっているため 300N の増加にとどまるが, 一般労働者の場合は腰部負担がさらに大きくなると推測する.

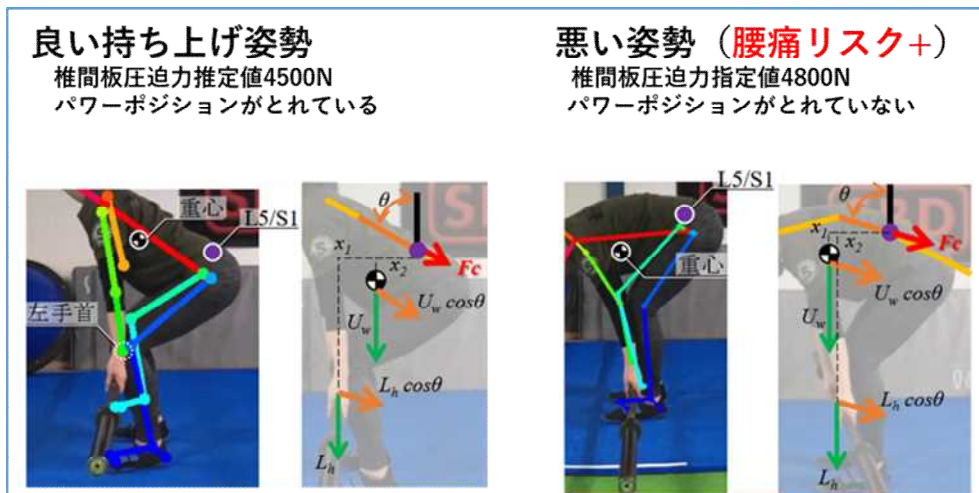


図 4

R3 年度型装具ロボットにおける重量物上げ下ろし時の筋活動

C:コントロール (装具非装着), 2:CFRP バネ厚 2mm, 4:CFRP バネ厚 4mm

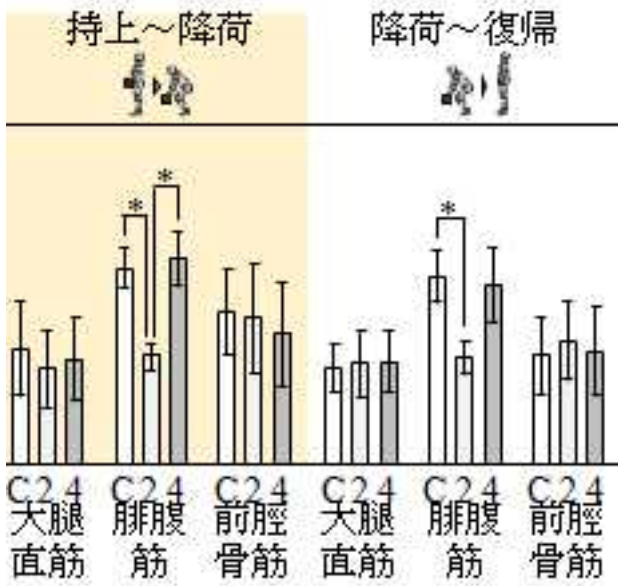
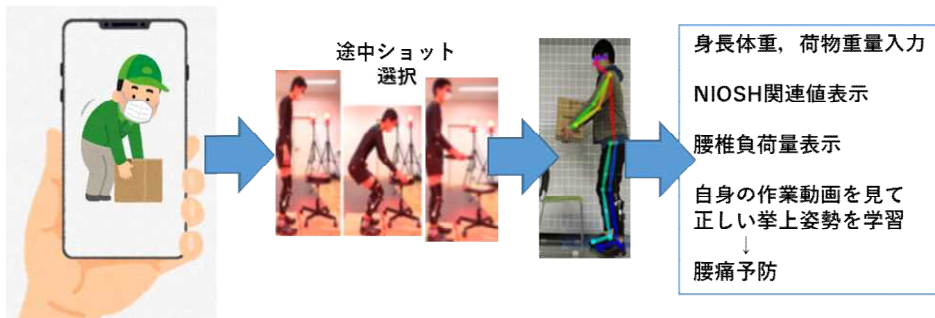


図 5 労災(腰痛) 予防見える化アプリ

スマートフォン撮影動画 (または写真) から重量物運搬業務 (介護を含む) における労働負荷量を計算。重量物挙上時の腰痛誘発リスクとして脊椎負荷量を示す(米国 CDC および厚労省は腰痛防止のため 350kg 以下に抑えることを推奨)。望ましい作業姿勢を緑で表示することで労働者は自身の挙上姿勢を見て正しい挙上姿勢を学習できる。

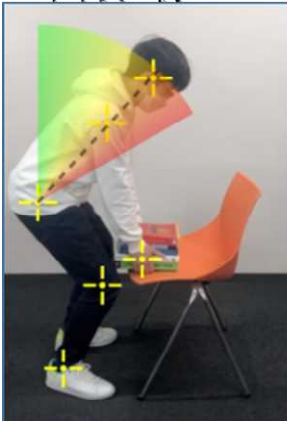
(a) 開発イメージ



(b) 開発したスマートフォンのアプリ例

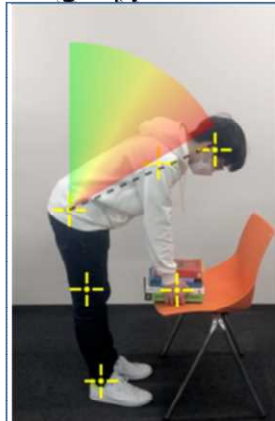
スマートフォンアプリ表示例
パワーポジションに近い良い姿勢を
緑の領域で示す

やや良い例



脊椎負荷は203kg
体の傾きは42度です
この姿勢では
30.4kg以上のものを
持ち上げると
腰痛リスクが高まります

悪い例



脊椎負荷は224kg
体の傾きは65度です
この姿勢では
28.2kg以上のものを
持ち上げると
腰痛リスクが高まります

脊椎負荷が350kgを超えると腰痛リスクが高まります

労災疾病臨床研究事業費補助金
(総括) 研究報告書
研究分担者 山口 健

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年度に策定した重量物上げ下ろし動作モデルと評価項目を令和2年度に改良しマルチチャンネル筋電図解析を併用して装具ロボットの運動支援効果を検討した。バネ強度と重量物上げ下ろし支援効果との関係を解析したところ、被検者によって最適な支援効果が得られるバネ強度は異なっていた。本装具ロボットの支援効果は正しい荷物挙上姿勢で最大となる(パワーポジション)。パワーポジションはウエイトリフティングやパワーリフティング選手の腰痛予防に不可欠の挙上姿勢だが、パワーポジションがうまくとれている被検者ほど高い支援効果を示す傾向があった。令和3年度は挙上姿勢と支援効果との関係を詳細に解析した。さらに市販の下垂足補正用CFRP短下肢装具の重量物挙上支援効果を検討した。令和3年モデルはCFRPバネの靴部固定位置を踝の前方に移動したことで足関節自由度は改善し本装具ロボットの実用化が視野に入った。今後企業とも連携してCFRP装具ロボットの普及を目指したい。

A. 研究目的

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。令和2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)、筋電図を用いた運動力学解析を行う。なお令和1年度において確立した実験プロトコルと解析方法を使用する。

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2年度モデルでは炭素繊維バネと下肢および靴との連結方法を改良してバネの交換を容易にするとともに軽量化を図った。図1に示すように、L字型板バネは足関節周りの骨格に沿うように上部は膝関節装具に、下部は靴に取り付けてある。膝関節装具の重量(治具を含む)は0.8 kg、靴の重量(治具を含む)は0.4 kgであるため、下肢装具全体の重量は両

脚で2.4 kgほどである(図2)。板バネの復元力つまり板バネの厚さと作業支援効果の関係を明らかにするために、厚さのみが異なる3種類の板バネ(板バネ厚さ:2, 3, 4 mm)を用意した。しゃがみ込み時に膝関節の屈曲と足関節の背屈により板バネがたわみ、生じる復元力によって立ち上がりの際に足関節底屈のアシスト力を得られる仕組みとなっている。足関節が40°背屈した時、図3に示されるように板バネのたわみはおよそ0.25 mとなるため、2 mm板バネによるモーメントは4 N・m、3 mm板バネによるモーメントは12 N・m、4 mm板バネによるモーメントは30 N・mと推定される。ここで、装具使用者の体重を60 kgと仮定すると、足関節モーメントの最大値は54 N・mとなるため、立ち上がり時に最大で、2 mm板バネ使用により7%、3 mm板バネ使用により22%、4 mm板バネ使用により56%のアシストを得られると推定される。なお、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、着脱も可能である。



図1 CFRP バネ搭載下肢用装具の外観

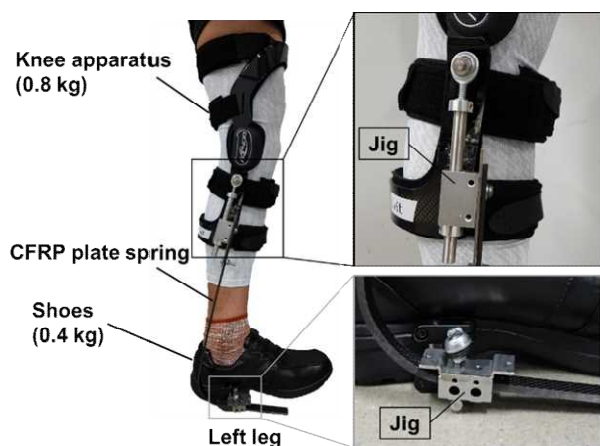


図2 CFRP バネ搭載下肢用装具の構造

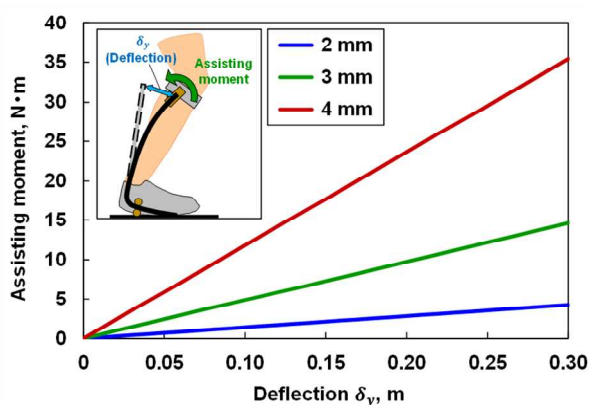


図3 板バネのたわみ量とアシストトルクの関係

R1 年度に決定した重量物作業模倣動作 (椅子座面の高さから 10kg の物体を把持して立ち上がり再び元の位置に降ろす, 図 4), マルチチャンネル

筋電計 (下肢や体幹に装着), 性能評価基準 (客観評価と主観評価アンケート) により装具ロボットの労働支援効果を解析した. 健常成人男性 12 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被験者の体格を考慮しつつ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.

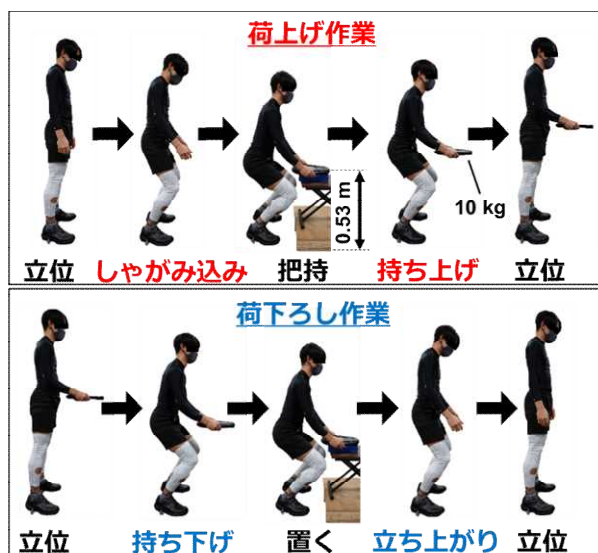


図4 重量物作業模倣動作の概略

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, 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. なお, 関節パワーの代表値としてしゃがみ込み及び持ち下げでは, 負のパワーの最大値を, 持ち上げ及び立ち上がりでは正のパワーの最大値を評価に用いた. マルチチャンネル筋電計を用いて重量物上げ下ろし動作時の表面筋電図を取得した. 筋電図を取得した筋は, 前脛骨筋, 内側腓腹筋, 大腿直筋, 脊柱起立筋の 4 つである. 筋電図解析には最大振幅法, 積分法, FFT 法,

wavelet 法等を用いた。また、実験後に、被験者に対して運動時の主観的負荷度を表す自覚的運動強度に関する質問を行い、修正 Borg スケールにより評価するよう指示を行った。また、各下肢関節における板バネの支援効果の有無について質問を行った。

令和3年度、足の背屈力低下により歩行時につま先が下垂してしまう下垂足患者を対象としたCFRP製の短下肢装具【アラード AF03 (トーオフショートモデル)、株式会社田沢製作所】を用いて、荷物の持ち上げ実験を行い、作業の支援効果を明らかにする。同短下肢装具の外観を、図5に示す。市販のウォーキングシューズに入れ、その上から靴を履くことで着用する。挙上実験プロトコルは前年度と同様である。



(a) 短下肢装具 (b) 装着した様子

図5 CFRP板バネ搭載短下肢装具

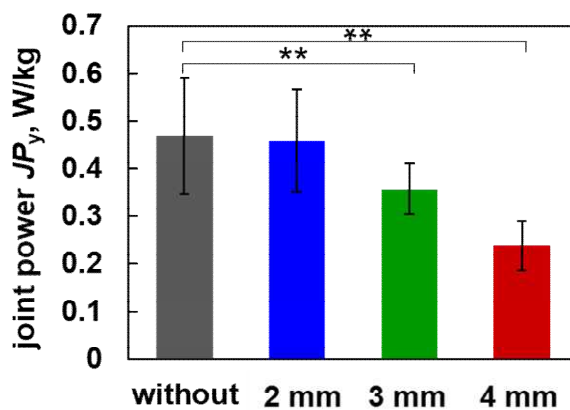
(倫理面への配慮) 本研究における実験プロトコルは、東北大学大学院工学研究科人を対象とする研究に関する倫理委員会にて事前に承認を得ており(20A-5)、各被験者には事前に実験方法と注意点を説明したうえで書面にてインフォームドコンセントを取得した。

C. 研究結果

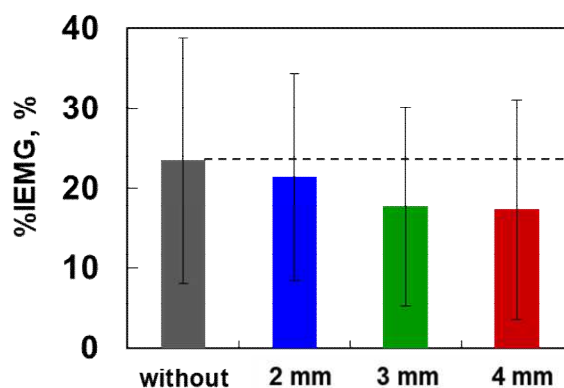
荷上作業のしゃがみ込み動作において、使用する板バネ厚さの増加とともに、足関節パワーが増加し、前脛骨筋の使用量が増加する傾向がみられた。その結果、しゃがみ込み動作時の主観的負荷

度は増加する傾向がみられた。一方、図6に示されるように、荷上げ作業の持ち上げ動作において、4mm厚の板バネを使用した際に、足関節パワーが板バネ未使用に比べて減少し(図6(a))、腓腹筋の使用量が減少する傾向がみられた(図6(b))。その結果、主観的負荷度も減少することが分かった(図6(c))。4mm厚の板バネを使用すると、足関節パワーが増加するものの、腓腹筋の使用量は減少する傾向がみられた。よって結果的に、主観的負荷度が減少することが分かった。荷下ろし作業の立ち上がり動作において、4mm厚の板バネを使用すると、足関節パワーが減少し、板バネ使用により厚さによらず前脛骨筋の使用量が減少する傾向がみられた。

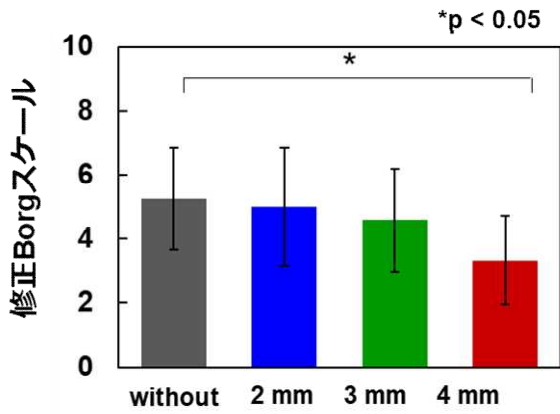
支援効果の個人差は比較的大きいが、その原因の一つとしてパワーポジションが取れていたか否かが挙げられる。その根拠として、荷上げ作業と荷下ろし作業それぞれにおいて、足関節



(a) 足関節パワー



(b) 腓腹筋使用量

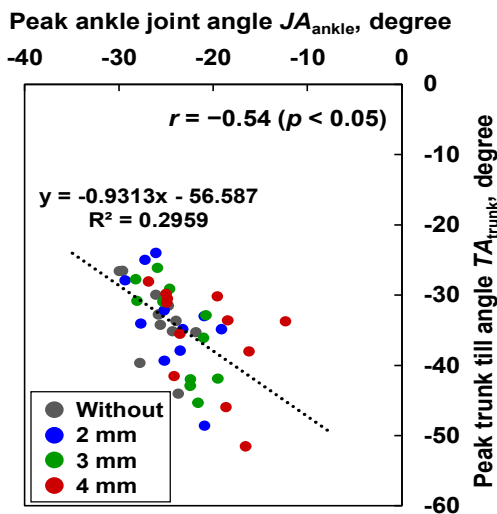


(c) 主観的負荷度

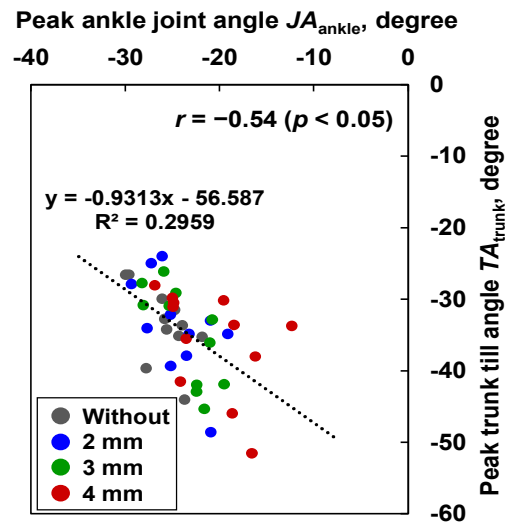
図6 持ち上げ動作における評価結果

背屈角度がより大きな被験者ほど最大体幹前傾角度が得られ (図7), そして腓腹筋使用量が装具未使用時に比べて低下する傾向がみられた。

また, 足関節背屈角度が大きく, その結果最大体幹前傾角度が大きな被験者, すなわちパワーポジションをうまくとれている被験者群では, 板バネが直接作用しないと考えられる膝関節伸展動作の支援効果も得られることが示唆された (図8)。さらに, これらの被験者群では4 mm厚の板バネ搭載装具を用いることにより持ち上げ持ち下げ動作の両方で脊柱起立筋使用量が未使用時に比べて減少することも明らかとなり (図9) 本ロボット装具が, 腰痛予防にも効果があることを示した。



(a) 荷上げ作業



(b) 荷下げ作業

図7 足関節背屈角度と最大体幹前傾角度の関係

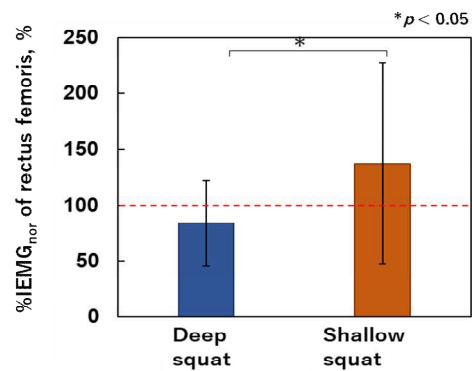


図8 パワーポジションをとれている被験者群 (Deep squat 群) と取れていない被験者群 (Shallow squat 群) の大腿直筋 (膝関節伸展筋) 使用量

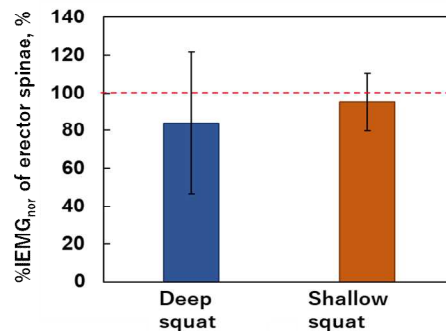


図9 パワーポジションをとれている被験者群 (Deep squat 群) と取れていない被験者群 (Shallow squat 群) の脊柱起立筋使用量

市販の下垂足防止用短下肢装具ではしゃがみ込みにおいては、足関節背屈筋である前脛骨筋使用量が装具着用によって増加した(図10)。これは、装具のカーボンをたわませるために、前脛骨筋の活動量が増加したためと考えられる。挙上時は腓腹筋使用量が装具着用によって減少したが、前脛骨筋では筋使用量が増加傾向を示した。膝関節運動にかかわる大腿二頭筋と大腿直筋については短下肢装具装着により筋活動が増大した。このようにCFRPをらせん状に靴中敷きに装着した下垂足防止短下肢装具は我々が開発したCFRP装具ロボットとは異なる筋活動を示した。下垂足防止短下肢装具はしゃがみ立ち動作支援に最適化されておらず足関節屈曲時には足関節のねじれ方向の力が発生する事も理由の一つと考えられるが脱着の容易さは非常に魅力的であり我々の装具ロボットの脱着しやすさ向上のヒントとしたい。

D. 考察

CFRPバネ搭載装具ロボットを用いることで、しゃがみ込み、立ち上がりの各フェーズにおいて足関節とともに膝関節の支援効果がみられた。板バネの厚さが大きくなるにつれて支援効果は増加する傾向がみられたが、同時に関節可動域が制限されるため被検者の体格や筋力により最適なバネ強度(支援効果と関節可動域制約の兼ね合い)を選択する必要がある。本装具ロボットではバネ強度の変更は容易であり装着者の体力や体形にあわせた装具ロボットの最適化が可能である(オーダーメイド装具ロボット)。さらにパワーポジションの習得も本装具ロボットの支援効果には

重要であった。3次元動作解析装置とAIを用いた解析のいずれにおいても同様の解析結果が得られた。このことは労働現場の撮影動画をもとに腰痛危険動作の解析ならびに炭素繊維板バネの支援効果の解析が労働現場でじゅうぶん可能であることを意味する。R2年度はR1年度の知見をもとに改良した実用機を試作し評価したが、筋電図解析によりほとんどの被検者において下肢筋の負荷軽減効果が観察された。一部の被検者では傍脊柱筋の支援効果も観察されたが、これが理想的な重量物挙上開始姿勢(ウエイトリフティングのパワーポジション姿勢)と関連するかについてはパワーリフティング競技者の協力も得つつ詳細な解析を行う予定である。

E. 結論

CFRP板バネ搭載装具ロボットの労働負荷軽減/腰痛予防効果解析のため重量物(10kg)の上げ下ろし実験を行い運動工学的解析、筋電図解析、官能試験を実施した。その結果本装置の労働支援効果が確認できた。本プロジェクトのなかで確立した実験プロトコルと解析方法をもとに実用化にむけて靴メーカー等とも連携して労災防止(腰痛予防)に貢献していきたい。

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 なし

H. 知的財産権の出願・登録状況 なし

別紙4

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍 なし

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Iwori Takeda, Atsushi Yamada, Hiroshi Onodera	Artificial Intelligence-Assisted motion capture for medical applications: a comparative study between markerless and passive marker motion capture	Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering	24	864-873	2021
Iwori Takeda, Wataru Yasunaga, Satoshi Kobayashi, Yusaku Tagawa, Hiroshi Onodera	Gait assist brace with double carbon fiber reinforced plastic spring blades to allow ankle joint movement and change in walking direction	Advanced Robotics	35	927-938	2021
Yusaku Tagawa, Taiyu Okatani, Hiroshi Onodera	Estimation of coefficient of static friction with one-axis force sensor by observing peripheral local slips on elastic hemisphere	Journal of Control, Measurement, and System Integration	14	206-212	2021
Iwori Takeda, Atsushi Yamada, Hiroshi Onodera	Artificial Intelligence-Assisted motion capture for medical applications: a comparative study between markerless and passive marker motion capture.	Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering	電子版 https://doi.org/10.1080/10255842.2020.1856372	Dec8:1-10	2020