

## 労災疾病臨床研究事業費補助金 研究結果の概要

### 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

研究分担者 山口健・東北大学大学院工学系研究科・准教授

#### 研究目的

現行の装着型労働支援ロボットは電気モーターを駆動源としており重量と稼働時間が実用化において課題となっている。そこで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。対象となる労働者として、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。

#### 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・軽減効果を評価し実用性能を有する装具ロボットを開発する。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運動学的解析と筋電図解析、アンケートを使用する（修正 Borg スケール）。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）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。

正しい重量物挙上動作は効率的な筋使用と腰部ストレスを軽減できる挙上姿勢を意味する。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する。この結果をもとに CFRP バネの支援効果最大化と腰痛誘発リスク最小化を可能にするマニュアルとソフトウェアを開発する。

#### 研究結果・考察

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の長い事（10 分程度）であり、これらの指摘と解析結果をもとに CFRP バネ再設計、CFRP バネ下端と靴との連結方法見直し、下腿装着部品を改良した。

装着者全員（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膝関節は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 バネの強度と支援効果はほぼ比例したが逆に通常歩行の阻害効果も出現した。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。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。今年度の実験では被験者が最も挙上しやすいと感じる動作姿勢で計測したためと考える。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（前傾姿勢）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。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着手した（R3 年度完成）。労働者が自己の作業姿勢を録画でき腰痛危険度を数字として知り正しい姿勢を学習できる機能を搭載する予定である。手軽に録画と学習ができることを重視しスマートフォンのアプリ開発に着手した。

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下肢装着型装具ロボットの開発に着手した（特許出願，2021 年論文発表）。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が被験者の体格・性別により装具ロボットサイズが異なることもあり調整個所の多い（金属部品が多く重い）ロボットとなった。R2 年モデルでは介護支援ロボットと一般労働支援ロボットを分離して設計することで金属製部品点数を削減でき脱着時間短縮と大幅軽量化が可能になった。R2 年度は主に介護支援ロボットの性能評価と性能向上に注力したが、R3 年度は一般労働支援ロボットの評価ならびに両ロボットの実用化にむけた最終調整をおこなう予定である。

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。パワーポジションが上手に取れた被験者で支援効果（筋電図）が大きい傾向が認められた。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で可変に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に分ける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。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る予定である。

## 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を制作し評価した。重量物持ち上げ時の支援効果を確認した。正しい挙上姿勢により支援効果が向上し腰痛リスクも軽減できるため、正しい労働作業姿勢を学習できるマニュアルとソフトウェアが必要である。

## 今後の展望

完全無動力を達成し水濡れ作業でも利用可能、滅菌処理も容易という本装具ロボットの特徴を生かし实用化を目指す。腰痛危険動作の評価および安全な重量物挙上動作の学習を支援できるスマートフォンのアプリケーションを R3 年度開発し労災防止行政に貢献したい。