

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：32675

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K19865

研究課題名（和文）CFRPを活用した歩行支援装具の開発

研究課題名（英文）Development of the gait assisted brace using Carbon Fiber Reinforced Plastics

研究代表者

武田 伊織（Takeda, Iwori）

法政大学・理工学部・助手

研究者番号：70792266

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の復元力を利用した歩行支援装具を開発した。理学療法士へのヒアリングを元に設計を進め、トポロジ最適化によって軽量化を目的とした装具の設計指針を得ることが出来た。また、歩行時の筋使用量の評価によって、その支援効果を実証した。筋使用量が減少する条件がある一方で、被験者によってはCFRPの復元力を前進のエネルギーに変換できない場合もあった。CFRPの厚さは装着者によって至適な条件が存在し、また装具は装着者の身長に合わせた調整が重要であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、CFRPを歩行支援装具に応用している。現在処方されている装具は、金属製支柱を有するため重く、歩行を支援する機能は無い。本研究ではCFRPパネを活用することで、軽量かつ自身の体重を歩行支援に変換できる装具を実現しており、リハビリテーション分野における独自性の高い知見が得られている。また、副次的に、人工知能による姿勢解析技術が既存のモーションキャプチャに匹敵する精度を持つことがわかった。これにより、専用のスタジオに限定されることなく、屋外等の従来では困難だった環境での姿勢解析が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a gait-assist brace using the restoring force of carbon fiber reinforced plastics (CFRP). The design was based on interviews with physical therapists. Topology optimization was used to obtain a design guideline for a lightweight brace. We also evaluated the amount of muscle use during walking to demonstrate the effectiveness of the braces. While there were conditions in which muscle usage decreased, some subjects were unable to convert the restoring force of the CFRP into forward energy. The results suggest that the optimum CFRP thickness is appropriate for each wearer, and that it is important to adjust the brace to the height of the wearer.

研究分野：人間工学

キーワード：CFRP 歩行支援

1. 研究開始当初の背景

脳卒中の後遺症等による運動機能障害者に処方される装具は、金属製支柱を有するため重い(約 2 kg)。足底屈を抑制する機能が主であり、歩行を支援する機能は無い。そのため、運動疾患の専門医(神経内科、リハビリテーション科)によると、“装具を装着すると重くて疲れるし、足の動きも制限されて歩きにくい”との不満がある。

関連研究において、ケーブルを利用した外骨格が酸素消費量を約 23%低減できることが示されているが(B. T. Quinlivan, Sci. Rob. 2017)、駆動システムとバッテリーの重量が課題となっている。軽量化のためには無動力が望ましいが、電動に匹敵する装具は未だ無い。

ここで、炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics, 以下 CFRP)は、パラリンピックの陸上競技において、その優れたバネ性能が実証されている。更に、鉄と比較して 1/4 の比重、10 倍の比強度、そして 7 倍の比弾性率となり得る軽量かつ高強度な材料である。したがって、CFRP を歩行支援に利用した装具を作製すれば、「軽量、高強度、無動力、そして大きな支援効果」を有する装具が開発できると考えた。本研究で提案する装具の支援メカニズムは以下の通りである。まず、足関節の背屈時、装着者の体重によって L 字型の CFRP が変形する(図 1b)。重心移動による除荷に伴い、復元力がはたらく(図 1c)。これが床を蹴る力となり、歩行支援効果を生み出す。

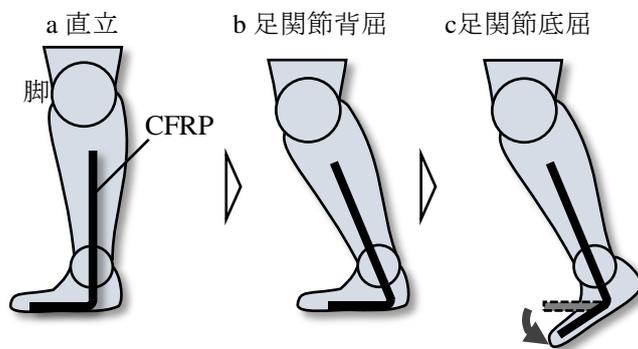


図1 歩行支援のメカニズム

2. 研究の目的

上記の背景・課題から、本研究では CFRP を活用した軽量かつ高強度な歩行支援装具の開発を目的とする。この大目的達成のため、本研究では①脚が受ける反力と支援効果の大きさを考慮し装具全体の設計を行うこと、②装具の軽量化を図ること、そして③実際に作製した CFRP 装具を用いて歩行試験を行いその支援効果を確認することを主たる目的として設定した。

3. 研究の方法

研究目的に掲げた 3 つの項目に準じて記述していく。

①では、歩行時の関節の屈曲角度や支援効果の伝達経路等から CFRP の配置を決定する。②では、トポロジ最適化によって、支援装具の、CFRP 以外の部分(下肢との接続部)の設計を行う。③では、作製した CFRP 装具を装着した状態で一定時間歩行し、その際の筋電を計測することで筋活動を評価する。

4. 研究成果

①装具全体の形状決定

本研究では、下肢の左右に L 字型 CFRP を配置した装具を考案し、作製した。リハビリセンターの理学療法士の方からのヒアリングを受け、CFRP の配置の調整を繰り返し、図 2 のような形状の装具を最終版とした。下肢内側の CFRP は、先端が拇指球後方に隠れるような配置であり、自然な歩行の妨げにならないようになっている。用いる CFRP の厚さは、3, 4, 5, 6 mm を用意した。固定具には主として 3D プリントした柔軟な素材を用い、CFRP と接続する背面はアルミ板で補強した。固定にはスノーボードシューズ等で用いられる、ラチェットと紐を組み合わせた Boa システムを用いた。靴の下に図 2(b)に示す鑑のような板を設けることで、CFRP の復元力が効率よく足に伝わる。靴と装具とはボルトによって接続されている。

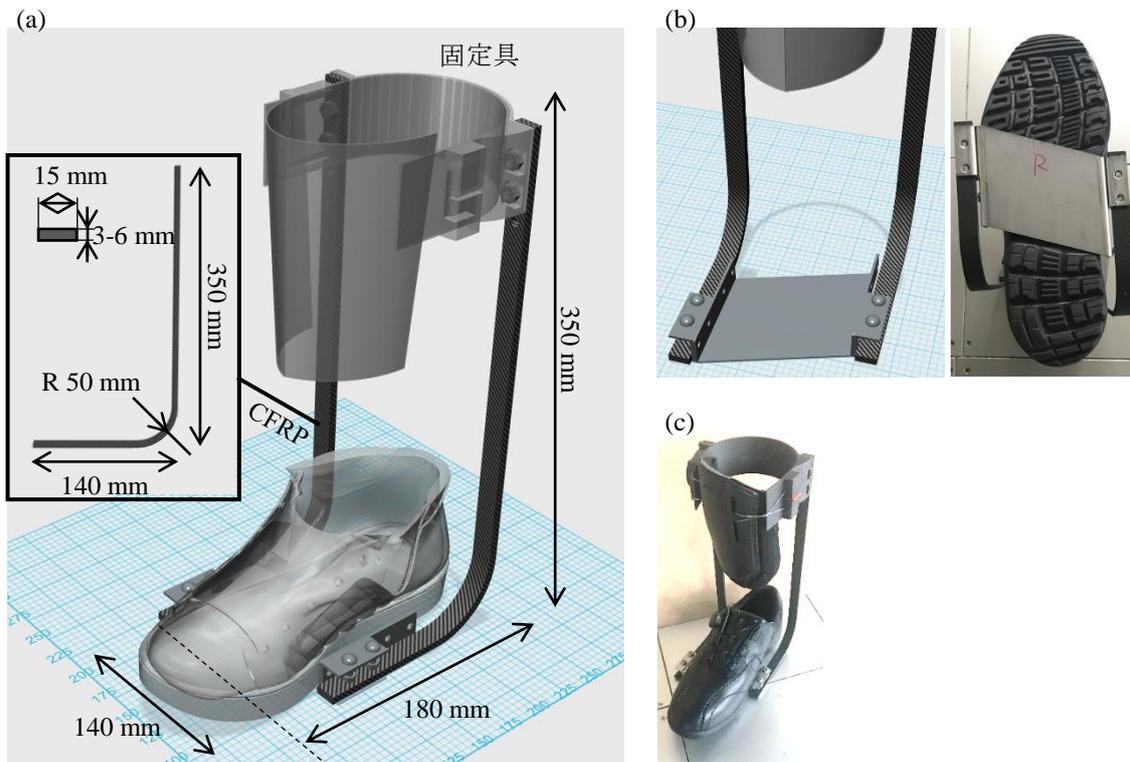


図2 CFRP装具

②装具の軽量化

トポロジ最適化とは、設計空間内で、耐荷重等の与えられた制約条件を満たす最適な構造を計算的に導く手法である。本研究では、Inspire (Altair Engineering 社) を用い、下肢との接続部分の最適化を試みた。装具前面は布ないしそれに準ずる素材を用いることが一般的であるので、下腿背面に接する部分を対象とした。図3は解析結果であり、枠線の部分が設計空間を、濃い色の部分が最適化された構造部分を、薄い色の部分がCFRPをそれぞれ示している。設計空間に比して必要な構造部分は極めて少なくなったが、安全率は少なくとも6以上となった。構造部分が少なくて良いということは、しばしば装具で問題となる通気性を解決出来得る。ただし、以降の実験の実験ではヒトを対象としているため、安全性を考慮して図2に示した形状で実施した。

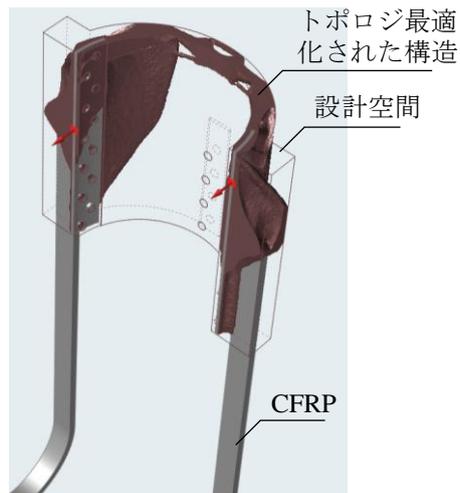


図3 トポロジ最適化による設計指針

③支援効果の実証

インフォームドコンセントを得た被験者を対象に、歩行試験を実施した。被験者は健康な20-24歳の男性8名で、平均身長 170 ± 11.2 cm、平均体重 60.5 ± 10 kgであった(±は標準偏差)。筋使用量の評価のため、右脚の前脛骨筋(Tib.)、腓腹筋(Gas.)、大腿直筋(Rec.)の筋電をそれぞれ取得した。すべての被験者は、歩行試験の前に装具に慣れるために数十分の練習を行った。歩行距離や歩幅は、被験者の歩きやすいように任せた。歩行速度は、成人男性の平均値(阿久津

邦男, 歩行の科学, 不昧堂, 1975) を参考に, 被験者の歩きやすい速度と調整し, 4.94–5.3 km/h の範囲で設定した. 速度はメトロノームを用いて一定に保った. 被験者は, メトロノームが 10 ないし 6 回 (beats) 鳴るのに合わせて一方向に歩行し, その後 5 ないし 4 回鳴るのに合わせて方向転換し, 再度歩行する, というプロセスを繰り返し実施した. 歩行試験は 1 条件につき 5 分間行った. 筋電は 5 分間の試験のうち, 最後の 2 分間のみ取得した. これは, 試験開始直後はメトロノームに合わせることに注力し, 自然な歩行にならない恐れがあるためである. また, 方向転換直前および直後は歩行が乱れるため, 歩行する 10 beats ないし 6 beats の中間の 5 beats ないし 3 beats を抽出し解析した. 取得した筋電図は整流化および最大随意筋力 (Maximal voluntary contraction, 以下 MVC) による正規化処理をした. MVC とは, その筋肉で意識的に出すことのできる最大の力であり, この値で規格化することで, 個人差や筋電計を貼る位置による差をある程度排除した議論が可能になる. 装具未装着条件と比較した際の有意差を, 2 群どちらもが正規分布していれば対応のある t 検定で, 少なくとも一方が正規分布していない場合は Wilcoxon の符号順位和検定で評価した. なお, 被験者のうち 1 名は, 筋電計トラブルの影響で取得したデータにノイズが多かったため, 評価から除外した.

表 1 は, 7 名の被験者 A~G の, それぞれの筋使用量が有意に増減したかどうかをまとめている. 被験者 A の, 3 mm および 6 mm の条件および被験者 E の 4 mm の条件では, 特定の筋肉の使用量が有意に減少している一方で増加した筋肉は無いという, 当初想定していた理想的な結果となった. 一方で, いずれかの筋肉では減少しているが他の筋肉で増加している, といった条件も多かった. 被験者 A と E は, 被験者中の身長の高さ上位 2 名であり, 多くの条件で筋使用量が増加した被験者 F は最も身長が低かった. 条件統一のため, 装具の高さ等は被験者に応じて変更していないため, CFRP の屈曲には高身長の方が有利であると予想される.

人間の歩行は, 重心を前方に移動させることによって起きる上体の落下を利用している. この落下のエネルギー, すなわち使用者の体重によって CFRP が屈曲することが望ましい. これは, 筋肉のはたらきによって屈曲させた場合, 得られる支援効果は筋肉から前借りしたにすぎず, 運動全体としての筋使用量の低下が期待できないからである. 足関節の背屈に寄与する前脛骨筋と膝関節屈曲に寄与する腓腹筋の使用量増加は, CFRP を屈曲させるために筋肉を使用している可能性がある. また, 膝関節伸展に寄与する大腿直筋の使用量増加は, CFRP の復元力を前進時の推進力として活用することができておらず, 逆に制動するために使用している恐れがある. 十分な練習時間をとることで, これらを改善することができると考えている. 実験手順として, そもそもメトロノームに合わせて歩行することが困難な被験者もおり, 工夫の必要性を痛感した.

以上より, 装着者の身長に合わせた CFRP 装具を装着することで, 歩行時の筋使用量の低下が見込める. 十分な練習時間を確保することで, 想定している装具の使用法通りに歩行できることを期待している.

表1 装具着用による筋使用量の有意増減

	A			B			C			D		
	Tib.	Gas.	Rec.									
3 mm		↓		↓	↓	↑	↓	↑				↑
4 mm		↑			↑	↑	↓	↓	↑			↑
5 mm					↓	↑		↑	↓		↑	↑
6 mm		↓			↓	↑	↓	↑	↑	↓	↓	↑

	E			F			G		
	Tib.	Gas.	Rec.	Tib.	Gas.	Rec.	Tib.	Gas.	Rec.
3 mm	↑		↓	↑	↑	↑	↑		
4 mm			↓	↑	↑	↑	↓	↑	
5 mm	↑		↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑
6 mm	↑					↑	↓	↑	↑

④その他の主たる成果

反射マーカを用いる従来法的なモーションキャプチャは、様々な歩行解析に用いられている一方で専用の設備が必要であり、また屋外では撮影困難である。姿勢解析用 AI である OpenPose は、撮影された動画像から人間の目や関節中心などの“キーポイント”を検出することが可能であり、特に精度が高い。OpenPose で関節中心を正確に検出できれば、カメラで撮影するだけで、屋外やモーションキャプチャスタジオ以外での歩行解析が可能になる。そこで、トレッドミル上での歩行を対象とし、モーションキャプチャシステム (MAC3D, Motion Analysis 社) と OpenPose の双方で解析し、下肢の関節角度を比較することでその有効性を検証した。

スタジオ内に設置したトレッドミル上で、反射マーカを付けた被験者が歩行する様子をキャプチャし、同時に真横からビデオ撮影した。モーションキャプチャしたデータは専用のソフトウェアで、撮影した動画は OpenPose および Kinovea による解析を行った。Kinovea は人体の動作解析によく用いられているソフトウェアで、使用者が画像上に線を引くなどして、角度等を計測することができる。これにより、人が目で見た際の関節角度を評価した。OpenPose には関節角度を自動で計算する機能は無いため、検出された“キーポイント”の座標から計算した。

図4は、歩行1周期での股関節角度について、モーションキャプチャ、AI、そして人がそれぞれ評価したものをまとめている。相関性は級内相関係数 ICC(2,1)を用いて評価した。ICC(2,1)は、0.75以上でよく相関しているとされる。どの解析方法でもおおよそ同様の結果を示した。表2は股関節、膝関節、足関節における ICC(2,1)の値をそれぞれまとめたものである。足関節以外では、高い相関があると判断できる。

足関節で相関関係が見られなかった原因は、足指 (MP 関節) が屈曲した状態では OpenPose から得られる情報だけで足関節角度の計算ができないためであった。MP 関節が屈曲しない状態では、足関節角度における OpenPose とモーションキャプチャとの ICC(2,1)の値は 0.75 まで改善した。これらの値は、先行研究における最良の成果である、Ohらによる Kinect を用いた研究 (股関節、膝関節、足関節でそれぞれ 0.86, 0.90, 0.49) よりも高い値である。

以上より、平面上に限定はされるものの、OpenPose による画像認識を用いることで、従来のモーションキャプチャに匹敵する解析が可能であることが示唆された。

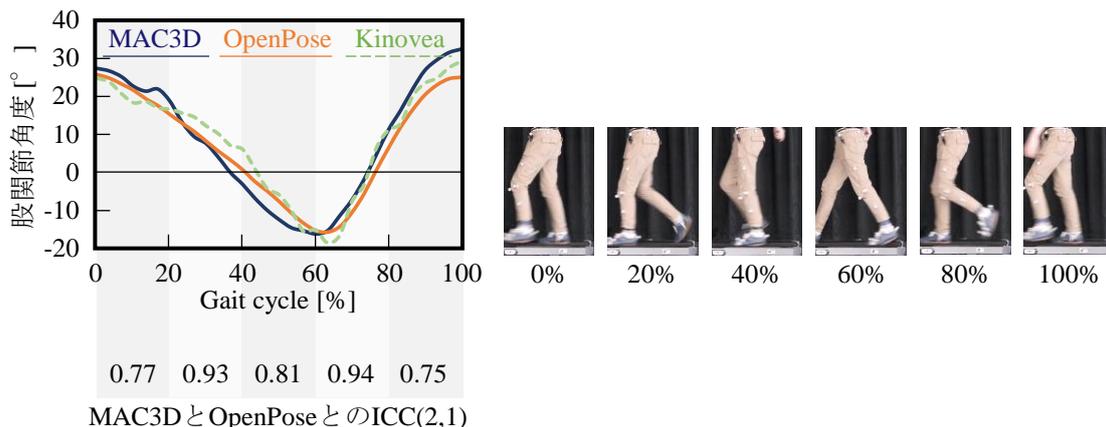


図4 股関節角度の解析結果

表2 各関節角度における解析手法間の ICC(2,1)

	股関節		膝関節		足関節	
	OpenPose	Kinovea	OpenPose	Kinovea	OpenPose	Kinovea
MAC3D	0.97	0.96	0.92	0.90	0.51	0.57
OpenPose	-	0.98	-	0.98	-	0.87

<引用文献>

B. T. Quinlivan et al., Assistance magnitude versus metabolic cost reductions for a tethered multiarticular soft exosuit. *Sci. Robot.* 2, eaah4416 (2017). DOI: 10.1126/scirobotics.aah4416
 Oh J, Kuenze C, Jacopetti M, Signorile JF, Eltoukhy M. Validity of the Microsoft Kinect TM in assessing spatiotemporal and lower extremity kinematics during stair ascent and descent in healthy young individuals. *Med Eng Phys.* 60:70–76 (2018). DOI: 10.1016/j.medengphy.2018.07.011
 阿久津邦男, 歩行の科学, 不昧堂, 1975

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takeda Iwori, Yasunaga Wataru, Kobayashi Satoshi, Tagawa Yusaku, Onodera Hiroshi	4. 巻 35
2. 論文標題 Gait assist brace with double carbon fiber reinforced plastic spring blades to allow ankle joint movement and change in walking direction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 927 ~ 938
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2021.1946422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takeda Iwori, Yamada Atsushi, Onodera Hiroshi	4. 巻 24
2. 論文標題 Artificial Intelligence-Assisted motion capture for medical applications: a comparative study between markerless and passive marker motion capture	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 864 ~ 873
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10255842.2020.1856372	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 武田伊織, 小野寺宏
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田伊織
2. 発表標題 炭素繊維強化プラスチック (CFRP) パネを活用した下肢運動支援システムの開発
3. 学会等名 第2回COI学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武田伊織, 小野寺宏, 山田敦史
2. 発表標題 OpenPoseを用いたマーカレスモーションキャプチャの可能性
3. 学会等名 日本生体医工学会 関東支部若手研究者発表会2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------