

令和 5 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

不整地での移動を支援する バイオミメティックアシストスーツ

令和 6 年 5 月

国立大学法人大分大学

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、国立大学法人大分大学が実施した令和5年度「不整地での移動を支援するバイオメティックアシストスーツ」の成果を取りまとめたものです。

0. 研究背景

現在、全世界的に高齢化が進んでおり、今後ますます働き手不足が深刻になる。そこで年齢に関係なく、健康状態によって労働力を確保するエイジフリーの考え方が普及しつつある。このような状況において、身体の運動機能を拡張するための装着型ロボットや受動型アシストデバイスがこれまで以上に必要とされる。しかしこれまで開発された装着型アシストデバイスの多くは、その機械的関節中心が単軸回転であるため、広い関節可動域で機械軸と生体軸を一致させることが困難である。例えば膝関節は、大腿骨のロールバックによって回転軸が移動するため、機械軸と生体軸の間にギャップが生じやすく、特に深屈曲動作においては無視できないずれが生じる。また足関節（足首の関節）は三次元的な運動をするが、これを適度に許す歩行補助器具の設計論も確立していない。そこで本研究では、膝関節と足関節に着目して、これらの生体運動を模倣するバイオミメティックなアシストスーツの開発を行う。

1. 委託業務の目的

1. 1 研究課題の最終目標

本申請研究では、3年間の研究期間においてこれまで申請者が開発してきたBiomimetic Knee Joint (BKJ) およびElastomer Embedded Flexible Joint (EEFJ)を応用しつつ、機能性材料と組み合わせることによって不整地（傾斜地）に適応可能なセミアクティブアシストスーツを実現することを目指す。具体的な数値目標を下記に示す。

- 装具重量：2 kg 未満（両側、電気系を含む）
- 膝の最大補助モーメント：20 Nm 以上（最大屈曲時の補助モーメント）
- 足関節の最大補助モーメント：4 Nm 以上（最大屈曲時の補助モーメント）
- 最大傾斜角：30 度

1. 2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

①Semi-Active BKJの開発

当研究室で開発してきたBiomimetic Knee Joint (BKJ)を発展させ、環境適応機能を付加したSemi-Active BKJの開発を目指す。新規に開発するSemi-Active BKJは、Polycentric BKJを基本構造とし、膝伸展補助トルクを生成するための直動ばねに平衡点調整機構を設けて環境適応性を高める。平衡点調整機構にはラチェット等を用い、歯止めの制御に機能性材料を用いることで、低エネルギーでシンプルなアシスト機構を実現する。Semi-Active BKJによる立ち上がり時の補助効果および装着部への身体負担について、無線筋電図、せん断力検出シート等を用いて評価する。

②Semi-Active EEFJの開発

当研究室で開発してきたElastomer Embedded Flexible Joint (EEFJ)を発展させ、環境適応機能を付加したSemi-Active EEFJの開発を目指す。EEFJは硬さが一様な柔軟構造と、これに内包され硬さを調節できる弾性部材からなる。新規の機構では内蔵弾性部体に機能性材料を用いた動的調整機能を持たせる。足部の内側と外側に独立したEEFJを備え付け、斜面に立った時の前額面内の回転（回内—回外）にも対応させる。Semi-Active EEFJによる歩行負担軽減効果および斜面起立時の負担について、無線筋電図、心肺運動負荷試験装置等を用いて評価する。

③模擬環境における評価

Semi-Active BKJとSemi-Active EEFJを両側に有し、実環境でできるように電気回路とセンサを組み込んだ外骨格アシストスーツを開発する。大分大学減災・復興デザイン教育研究センター（Center for Education and Research of Disaster Risk Reduction and

Redesign、C E R D) の地形や災害救助の専門家からの助言、情報提供により、災害救助の環境を模擬した不整地によって開発するアシストスーツの有効性を検証する。

1. 3 要素課題に対する実施項目及び体制

① Semi-Active BKJ の開発 (担当: 大分大学) (要素課題①に対応)

目標

- (a) 最大補助モーメント: 20 Nm 以上 (最大屈曲時)
- (b) 単体重量: 300 g 未満 (片側)
- (c) 痛みの主観評価: Visual Analog Scale (VAS) で 20 以下

根拠と評価方法

- (a) 成人男性の立ち上がり時膝回りの最大モーメントは約 60 Nm 程度であるが、これの 30%程度を補助することを目的として設定した。評価は材料試験機とロードセルを用いて行う。
- (b) 既存の平衡点調整機能なしの BKJ が約 200 g であることを考慮して設定した。
- (c) 装着時の痛みの主観評価として VAS で 20 以下であることを確認する。被験者 20 名に対して評価し、その中央値を結果とする。対象動作は、平地および 15 度の傾斜板上でのスクワット運動とする。

② Semi-Active EEJ の開発 (担当: 大分大学) (要素課題②に対応)

目標

- (d) 最大補助モーメント: 4 Nm 以上 (最大屈曲時)
- (e) 単体重量: 150 g 未満 (片側)
- (f) 痛みの主観評価: Visual Analog Scale (VAS) で 20 以下

根拠と評価方法

- (d) 成人男性の歩行時の最大モーメントは約 12 Nm 程度であるが、これの 30%程度を補助することを目的として設定した。評価は材料試験機とロードセルを用いて行う。
- (e) 既存の平衡点調整機能なしの EEJ が約 60 g であることを考慮して設定した。
- (f) 装着時の痛みの主観評価として VAS で 20 以下であることを確認する。被験者 20 名に対して評価し、その中央値を結果とする。実験は心肺運動負荷試験装置を用い、速足による 10 分間の歩行とする。歩行中は心電図を常にモニタリングし、運動中に最大心拍数 (最大心拍数 = (220 - 年齢 (歳)) / 分) に達した時には安全のために運動を中止する。

③ 模擬環境における評価 (担当: 大分大学) (要素課題③に対応)

目標

- (g) 装具重量: 2 kg 未満 (両側、電気系を含む)
- (h) 被験者数: 20 名

根拠と評価方法

- (g) 上記 Semi-Active BKJ 2 個、Semi-Active EEJ 2 個、および身体に装着するためのカフ、フレーム、電気回路と配線を含め、実用時に重量による負担を軽減するために設定した。
- (h) 一般的に人が登坂できる急こう配として 30 度を設定し、大分大学旦野原キャンパス内の山林、および動作解析装置が準備された屋内にて実験を行う。項目 (c) と同様、移動前後の運動負荷の主観評価を行う。負担軽減効果を VAS でスコア化し、補助具の有無による結果の統計的検定によって軽減効果を確認する。

④ プロジェクトの総合的推進 (担当: 大分大学)

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、月に一回の割合で研究推進メンバー (大分大学理工学部福祉メカトロニクスコース 菊池研究室等) による進捗報告会を実施する。

本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究の更なる進展に努める。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

① Semi-Active BKJ の開発

当初目標をすべて達成した。

② Semi-Active EEFJ の開発

当初目標をすべて達成した。

③ 模擬環境における評価

重量に関する当初目標は達成した。被験者は14名実施できたが、当初目標である20名は達成できなかった。今後、装置の改良の後に継続して評価を行っていく予定である。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

① Semi-Active BKJの開発

我々は生体膝関節の回転中心運動を模擬するBKJ機構を応用して、2021年度に生体模倣型セミアクティブ膝サポータSemi-active BKJの一次試作機（図1）を開発した。Semi-active BKJは、小型低消費電力の形状記憶合金アクチュエータを内蔵し、歩行路の状況に合わせて異なる反力モーメントを返す。2022年度は、一次試作機と同一のアクチュエータを用いて機構を工夫し、Semi-active BKJの小型、軽量化を実現した二次試作機（図2）の開発を行った。さらに、2023年度は、二次試作機からアクチュエータの構造とばねの配置を変更することで三次試作機（図3）の開発を行った。三次試作機はメインパーツの重量が300 g、補助モーメントは20 Nmであり、最大動作電流は5 mAである。Semi-active BKJを専用カフで大腿部と下腿部に固定し（図4）、スクワット時の痛みの主観評価（VAS）を行ったところ、14名の被験者すべてで10%以下であり当初目標はすべて達成された。

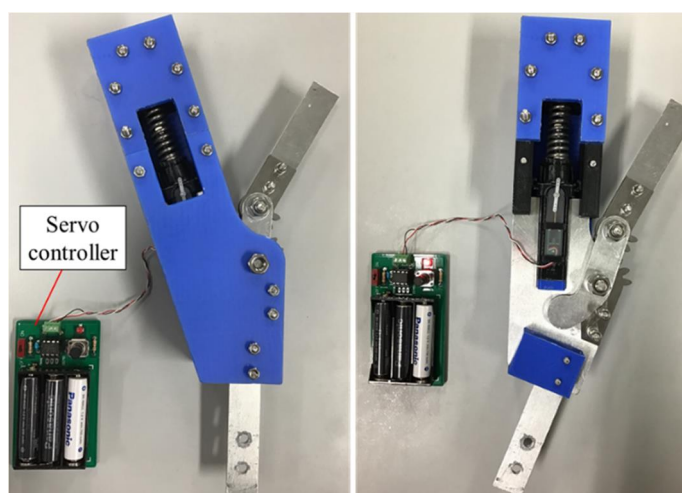


図1. Semi-active BKJ 一試作機（2021年度）

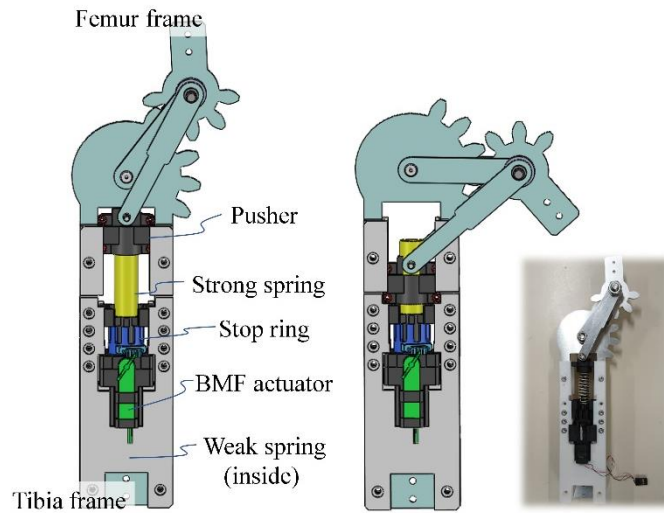


図 2. Semi-active BKJ 二試作機 (2022 年度)

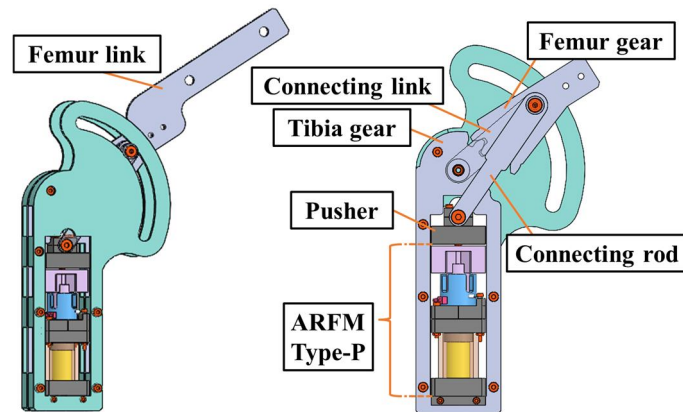


図 3. Semi-active BKJ 三試作機 (2023 年度)



図 4. Semi-active BKJ 装着時の様子

② Semi-Active EEJ の開発

申請者は2021年度において、弾性体内蔵型柔軟関節（EEJ）の基本構造を応用してSemi-active EEJの可変機構の検討を行った（図5）。2022年度は、ワイヤ駆動機構とフィルム型曲げセンサを内蔵した内がえし柔軟パーツを搭載した二次試作機（図6）の開発を行った。また、2023年度には、センサ内蔵内がえし柔軟パーツの改良を行い、三次試作機とした。三次試作機はメインパーツの重量が143 g、補助モーメントは最大4 Nmであり、機構による動作を実現して無電力化した。歩行時の痛みの主観評価（VAS）を行ったところ、14名の被験者すべてで10%以下であり、当初目標はすべて達成された。



図 5. Semi-active EEFJ 一試作機 (2021 年度)



図 6. Semi-active EEFJ 二試作機 (2022 年度)

③ 模擬環境における評価 (担当：大分大学)

2022 年度には、上述の Semi-Active BKJ、Semi-Active EEFJ、および身体に装着するためのカフ、フレーム、電気回路 (図 7) と配線を含め、外骨格アシストスーツ第一試作機を試作した (図 8)。さらに 2023 年度の各パーツの変更に伴い、外骨格アシストスーツ第二試作機を完成させた (図 9)。この外骨格アシストスーツ第二試作機は総重量が 2000g であり当初目標を達成した。

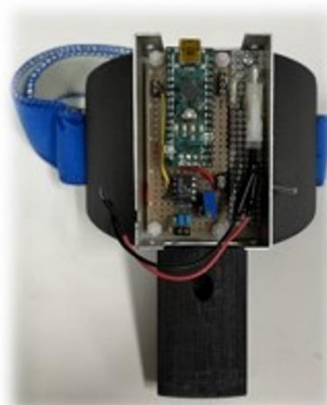
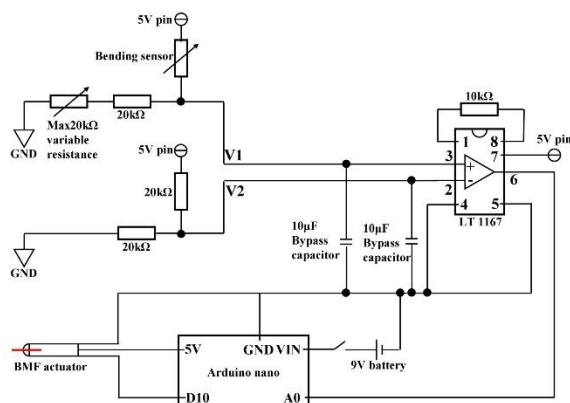


図 7. Semi-active 型外骨格アシストスーツの制御回路およびその外観

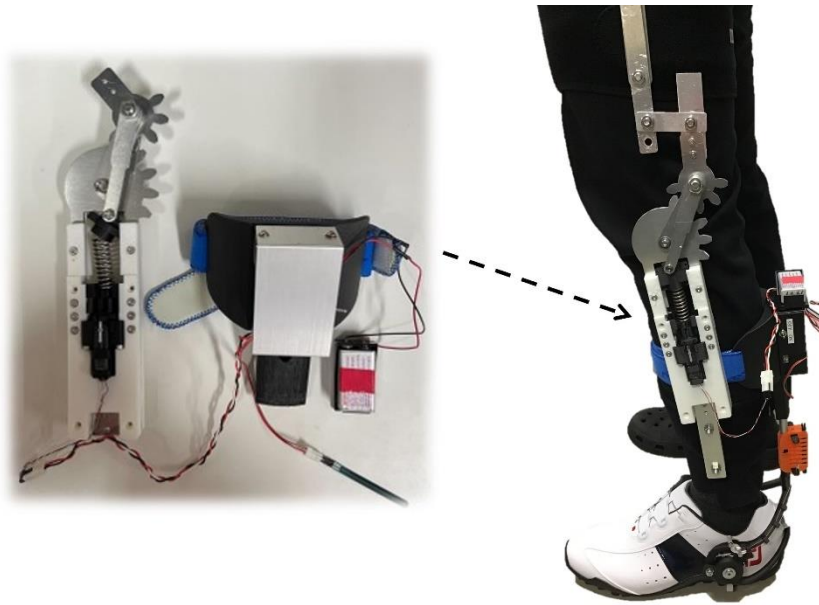


図 8. Semi-active 型外骨格アシストスーツ（第一試作）



図 9. Semi-active 型外骨格アシストスーツ（第二試作）

最大傾斜 30度
動作解析装置 VICON
逆動力学解析ソフト AnyBody



図 10. 動作計測環境下での不整地歩行のための角度調整機能付き傾斜板



図 1 1. 斜面トラバース歩行の様子（写真は Semi-active EEFJ のみ装着）

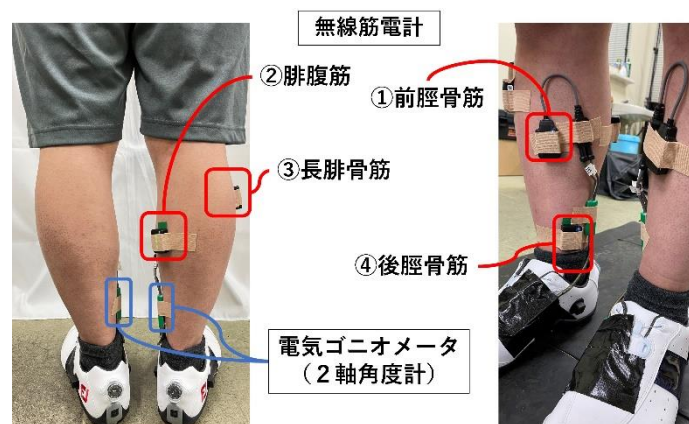


図 1 2. 生体機能計測装置

不整地歩行の動作分析の環境構築のために、角度調整可能な傾斜板を製作し（図 1 0）、動作解析システムの計測環境下で歩行実験を実施した（図 1 1）。実施に伴い、安全性を考慮した詳細条件を検討し、大分大学理工学部倫理審査の承認を得た。被験者は19～24歳の健常男性14名であり、歩行路の傾斜角は 0° 、および 20° とした。筋活動の計測のために無線筋電計を用い、前脛骨筋、腓腹筋、長腓骨筋、後脛骨筋の4つの筋を対象とした（図 1 2）。また、電気ゴニオを用いて足関節の底背屈と内外がえしを計測した。

実験結果を図 1 3 に示す。Two-way ANOVAの結果、Gait cycleはサポート有無で有意差があり（ $P<0.05$ ）、サポート有のほうがゆっくり歩いていた。不慣れなサポートを付けていることで歩行速度が落ちている可能性があり、サポートになれるための学習・訓練期間が必要であった可能性がある。足首内がえし外がえし、および底背屈についてはサポートの有無にも、路面の違いにも有意な差があった。サポートを装着することで内がえし／外がえし角度を抑え、歩行補助の効果が確認された。筋活動に関して個人差が大きく、被験者14名全体での有意差は確認できなかったため、図 1 4 は効果のあった特定の被験者に対する結果である。外がえしと内がえしを担う長腓骨筋、後脛骨筋の活動を抑え、サポートの効果が確認された。しかしながら、被験者によっては筋電が増加する事例もあり、サポートの支援に任せて楽に歩く練習が必要と考えられた。

④ プロジェクトの総合的推進（担当：大分大学）

月に一回の割合で研究推進メンバ（大分大学理工学部 菊池研究室）による進捗報告会を実施した。研究成果は、国内外の多くの学術大会で発表を行った（詳細は、7. 研究発表、知的財産権等の状況）。

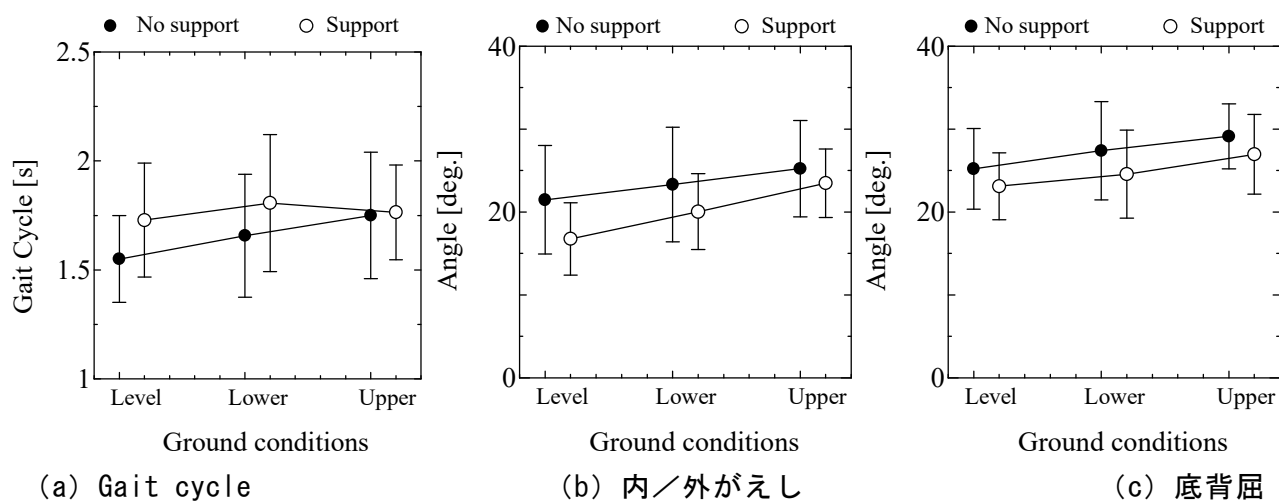


図 13. 実験結果

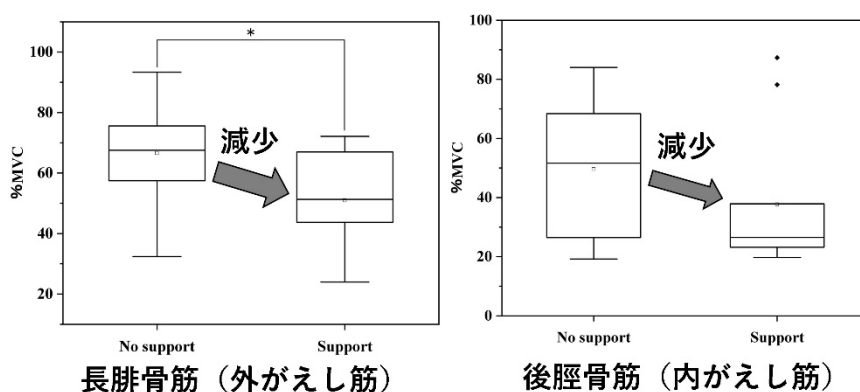


図 14. 実験結果 (筋活動の比較)

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果 (副次的成果) や、目標を超える成果

開発品について日本山岳会九州支部メンバ53名へのアンケートを実施したところ、下り坂、斜面谷側におけるフラットフットイングの支援に使えないか、との意見があった。斜面下りやトラバース歩行においては、路面にフラットに足をつくフラットフットイングが安全な歩行の指針となっている。そこで、本プロジェクトでは提案していなかった斜面下りの底屈サポートによるフットフラットフットイング支援も可能な3wayアシストシューズ (図 15) の開発も進めている。



図 15. 副次成果 (3way アシストシューズ)

さらに、本プロジェクトの実施期間において、その基盤となる下記2件の特許を取得するに至った。

- 大分大学, 菊池武士, 井上智晶, 膝関節補助装置, 特許第7300168号 (特許査定) (2023. 6. 21)
- 大分大学, 菊池武士, 阿部功, 押本泰貴, 下肢装具, 特許第7015055号 (特許査定) (2022. 1. 25)

4. 2 研究課題の発展性 (間接的成果を含む)

全世界的な少子高齢化が進むにつれて、年齢に関係なく能力に応じたエイジフリーの社会構築が持続可能社会の実現には必須である。これを達成するためには完全オートメーションのシステムだけではエネルギー的にもコスト的にも達成不可能であり、人の能力を拡張するウェアラブルデバイスのさらなる発展が必要である。現状のウェアラブルアシストデバイスは、モータによるアクティブな支援がメインであるが、バッテリー容量の限界により限られた重量では稼働時間に限界がある。本成果は、セミアクティブ型の支援を基本としており、極めて少ないエネルギーで人の負担を軽減することを基本コンセプトとしている (図16)。本プロジェクトを通じて、このようなセミアクティブ型ウェアラブルアシストデバイスが小型・軽量・低消費電力のアシストを実現し、不整地を含む様々な地形でのアシストを実現するポテンシャルを有することを確認した。

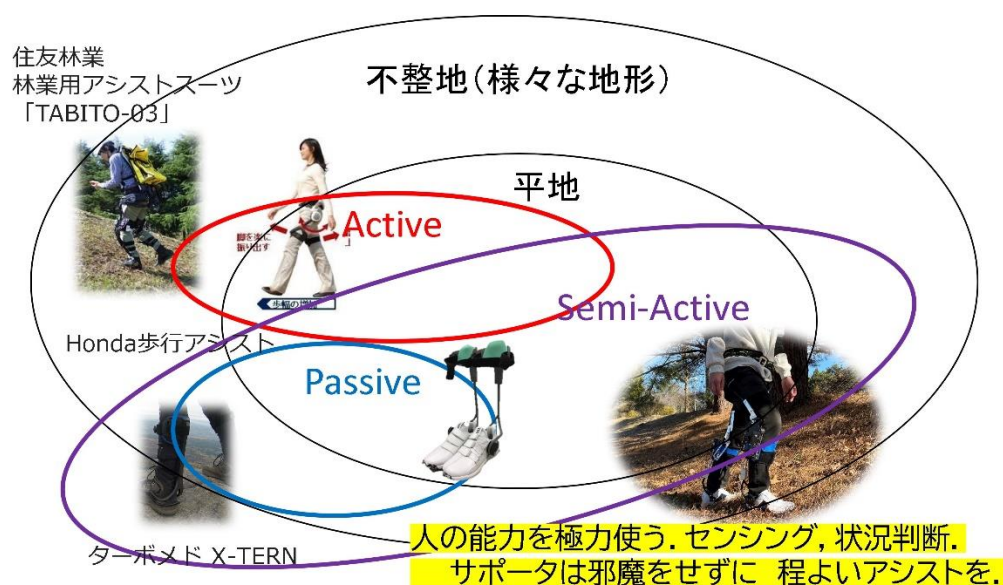


図16. 将来展望

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

本プロジェクトを推進することで、本研究の成果が生体支援工学、バイオメカニクス、ロボット工学分野の研究者に認知されるに至った。そのおかげもあり、プロジェクト期間中に3件の基調講演、招待講演の機会を得た。

- 菊池 武士、基調講演：スマートな機構による高効率歩行支援を目指して、第23回機素潤滑設計部門講演会、2024年4月22日
- 菊池 武士、招待講演：スマート材料&構造の医療・福祉ロボットへの応用、第4回日本再生医療とリハビリテーション学会学術大会、2022年9月24日
- 菊池 武士、基調講演：スマート構造による不整地歩行支援への基礎的検討、日本機械学会第34回バイオエンジニアリング講演会、2022年6月26日

また、本プロジェクトの内容について下記の学会賞を受賞することができた。

- 井口 翔太郎、ライフサポート学会奨励賞、底背屈の支援を切り替え可能な二軸足関節サポータの提案、2024年3月7日
- 中原 麻葵、日本機械学会若手講演フェロー賞、2022年6月2日

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

該当なし

5. 2 経費の効率的執行

関連研究を実施している他学部の動作分析装置を借りることで実験経費の削減に努めた。

6. まとめ、今後の予定

現在、全世界的に高齢化が進んでおり、今後ますます働き手不足が深刻になる。そこで年齢に関係なく、健康状態によって労働力を確保するエイジフリーの考え方が普及しつつある。このような状況において、身体の運動機能を拡張するための装着型ロボットや受動型アシストデバイスがこれまで以上に必要とされる。そこで本申請研究では、3年間の研究期間においてこれまで申請者が開発してきたBKJおよびEEFJを応用しつつ、機能性材料と組み合わせることによって不整地（傾斜地）に適応可能なセミアクティブアシストスーツを実現した。不整地歩行の一種として斜面トラバース歩行の動作分析の結果、サポータを装着することで内がえし／外がえしや底背屈角度を抑え、歩行補助の効果が確認された。筋活動に関して個人差が大きい、効果のあった被験者では長腓骨筋、後脛骨筋の活動を抑え、サポートの効果が確認された。本成果は、セミアクティブ型の支援を基本としており、極めて少ないエネルギーで人の負担を軽減することを基本コンセプトとしている。本プロジェクトを通じて、このようなセミアクティブ型ウェアラブルアシストデバイスが小型・軽量・低消費電力のアシストを実現し、不整地を含む様々な地形でのアシストを実現するポテンシャルを有することを確認した。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

（1）研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	7件
学会発表	18件
展示・講演	5件
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	1件

（2）知的財産権等の状況

発明の名称	発明者	出願登録区分	出願番号（出願日）	出願区分	出願国	登録番号（登録日）
補助装具の補助力を生成する補助力生成機構、及び補助装具	菊池武士，阿部功，戸高健	出願	特願 2022-130687 (2022/08/18)	国内		

（3）その他特記事項

該当なし