

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K12763

研究課題名（和文）アシスト装具と身体能力に応じた動作戦略の変化に関する研究

研究課題名（英文）Research on changes in movement strategies according to assistive devices and physical ability

研究代表者

今村 由芽子（IMAMURA, Yumeko）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号：60760436

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：歩行を対象としたウェアラブル動作アシスト機器による動作変化の特徴や使用者の身体能力とアシスト効果との関係を明らかにすることを目的とし、動作計測実験を行った。本研究で用いたアシスト機器による動作変化はケイデンスを維持したままストライド長が広がり、歩行速度が向上することが特徴であった。身長、体重、歩幅やTUGテスト等とアシスト効果の間には相関が見られなかったが、高いケイデンスでの歩行はストライド長増加の効果が得られにくいこと、膝伸展筋力の弱い使用者はアシスト時に歩行速度を下げる傾向があること、重心位置の動的安定性や歩幅の左右対称性がアシスト効果の見積もりに有効であること等が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ウェアラブルな動作アシスト機器の普及のためには、アシストによる動作変化や身体能力変化を考慮した評価と、それに基づいて設定された適切なアシスト力による運用が必要である。しかし、アシスト機器が使用者自身の動作や能力に影響を与えるという観点や、使用者の身体能力の個人差に着目した評価はこれまで十分に成されていなかった。本研究で得られた成果は、使用者の身体能力や歩行特徴とアシスト時の動作変容の関係性が中心であるが、評価手法は今後開発が加速すると予想される動作アシスト機器へ応用可能であり、当該分野への実用的な貢献が本研究の社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：Motion measurement experiments were conducted to clarify the characteristics of motion change by a wearable motion assist device for walking and the relationship between the user's physical ability and the assist effects. The effect of the assistive device used in this study is characterized by an increase in stride length and walking speed while maintaining the cadence. Although no correlation was found between height, weight, stride length, or the TUG test and the assist effects, it was found that high cadence is less effective in increasing stride length, that users with weak knee extension muscle strength tend to reduce their walking speed when assisted, and that dynamic stability of the center of gravity and stride length symmetry are effective in estimating the assist effect.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：身体能力 動作計測 アシスト機器 バイオメカニクス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、ロボット技術を利用して身体負担の低減や動作支援を行うことを目的としたアシスト機器の研究開発が盛んに行われている。特に、使用者がアシスト機器を装着する方式のウェアラブルロボットは場所に関する制約が少ないため、日常生活や外出の補助、機能回復など様々な場面での活用が期待されている。装着型のアシスト機器は従来のロボットとは異なりヒトと不可分であり、身体機能を一時的に強化、拡張、または制限するものと捉えることができる。これはヒトもしくはロボットが一方向的に指示を与えるのではなく、ロボットとヒトが互いに影響を与えあうインタラクティブ性を持つことを意味し、ロボットからアシスト力を受けたことによるヒトの反応が重要な要素となる。しかし、研究開始当初までの研究では特定の運動機能の利用者を対象としたリハビリテーションや、運動による筋負担やエネルギー消費の低減に着目した効果検証が行われていることが多く、幅広い使用者に適用した際の動作変容や、その個人差について報告された例が少ないことから、ウェアラブルな動作アシスト機器の総合的な評価は十分に行われていないと考えられた。

### 2. 研究の目的

装着型の動作支援ロボットなどの人との物理的なインタラクションにより負担軽減や機能補助を行うアシスト機器は、その動作変容や使用者自身の身体能力との関係については十分な調査が行われていない。

本研究ではそのようなアシスト機器による動作の変化を定量的に計測し、使用者の身体能力、支援機器のアシスト力と動作変化との関係を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) ウェアラブル動作アシスト機器

本研究では、周期運動である定常歩行を対象として、歩行中の股関節をアシストするワイヤ駆動型パワードウェアのプロトタイプを用いて実験・解析を行った。

パワードウェアは図1に示すように、大腿部の前後にワイヤとそれを巻き取るモータをセットにして配置しており、モータを制御することでワイヤを介して歩行時の股関節の屈曲・伸展動作を促すようなアシスト力を脚へと加える。慣性計測装置(IMU)により使用者の動きを検知し、計測された歩行周期と予め設計したアシストパターンに基づきアシスト力を制御する。アシスト力のタイミング及び強さは歩行開始前に設定により調整可能である。

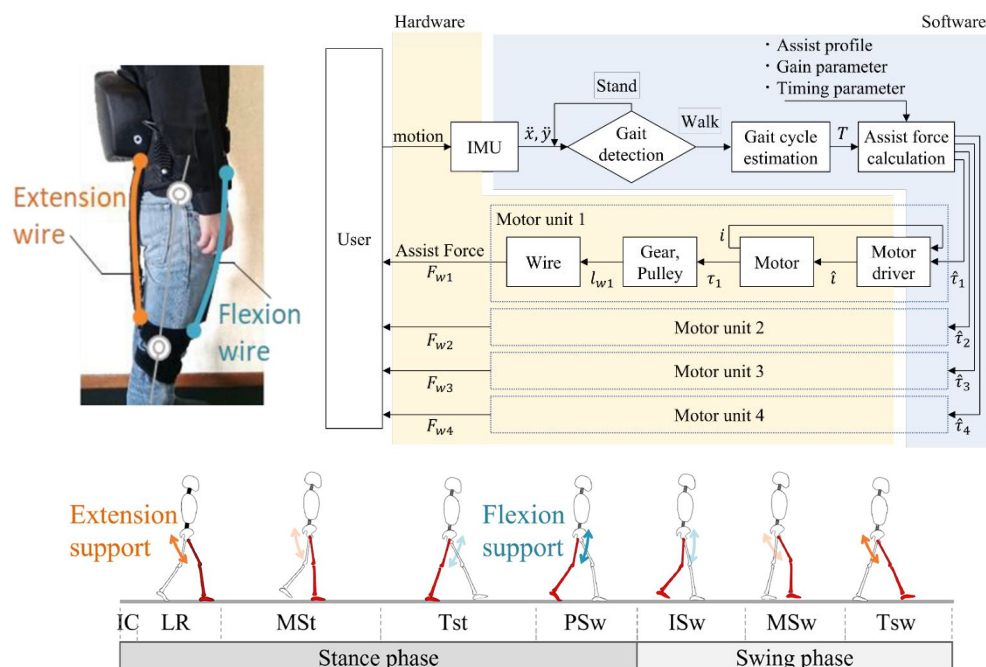


図1 ウェアラブル動作アシスト機器の構成およびアシスト力の概要

#### (2) 動作計測実験

ウェアラブル動作アシスト機器による歩行動作の変容を定量的に解析するため、動作計測実験を行った。全ての実験において、実験参加者は重大な歩行障害を持たず、杖などの補助器具なしに歩行可能であることを選定条件とした。アシスト力の強度は計測開始前にテストし、実験参加者の主観評価および理学療法士の観察により、歩行の安定性が損なわれないようなアシスト強度を参加者毎に設定した。

### 【実験】

実験参加者は 68 ± 9 歳の成人男女 11 名であった。歩行実験開始前に歩行能力の指標とするため、Timed Up & Go Test (TUG) を行った。その後、実験参加者は次のような順序で条件を変え、11m の平地歩行を繰り返し計測した。

1. Pre: パワードウェア着用前の通常歩行
2. Non-assisted: パワードウェア着用、アシスト力無し
3. Assisted: アシスト力有り
4. Post: パワードウェアを取り外した後の通常歩行

動作は慣性センサ式の全身動作計測装置 (MVN Analyze, Awinda: Xsens Technologies B.V.) により計測した。各条件の試行回数は 3 回とした。ただし理学療法士の判断により実験参加者の疲労が蓄積しないよう 2 回に回数を減らす場合があった。実験参加者にはいつも通りの速さ (快適歩行速度) で歩くよう指示した。

矢状面での両脚の大腿の間の角度を大腿挟み角と定義し、歩行周期毎の角度の最大値を求めて下肢関節の可動域の評価指標とした。解析には 11m 歩行した内の歩き始めと終わりの 2m を除く 7m の計測データを用い、多重比較 (Tukey-Kramer method) により差の検定を行った。

### 【実験】

実験参加者は 73 ± 7 歳の成人男女 13 名であった。身長、体重、握力、等尺性膝伸展筋力を歩行実験開始前に測定した。

実験により、主観的なアシストの至適タイミングは使用者ごとに異なることが分かったため、実験では実験プロトコルにアシストのタイミングを評価するための試行を設け、実験参加者の主観評価と理学療法士の観察を元にその参加者に最も適合していると考えられるアシストタイミングを選び、至適アシスト時の歩行動作によりアシストによる影響を評価した。実験参加者は次のような順序でアシスト条件を変え、11m の平地歩行を行った。

1. Pre: パワードウェアを装着しない通常歩行
2. Non-assisted: パワードウェアを装着し、アシストを加えない歩行
3. Assisted: アシストのタイミングを -10% ~ +15% まで 5% ずつ変更し 6 セットの歩行
4. Best: 選択された至適アシストタイミングでの歩行

各セットの試行回数は 3 回を原則とし、実験参加者は快適歩行速度で歩行した。

### 【実験】

実験参加者は 67 ± 12 歳の成人男女 14 名であった。身長、体重、握力、等尺性膝伸展筋力を歩行実験開始前に測定した。

実験と同様に、アシストのタイミングを変更しながら試行を繰り返し、実験参加者の主観評価と理学療法士の観察を元に至適アシストタイミングを選定した。実験参加者への負担を抑えるため、実験のプロトコルの一部のみ残して実験を行った。実験参加者は次のような順序でアシスト条件を変え、11m の平地歩行を行った。

1. Pre: パワードウェアを装着しない通常歩行
2. Assisted: アシストのタイミングを -10% ~ +10% まで 5% ずつ変更し 5 セットの歩行

各セットの試行回数は 3 回を原則とし、実験参加者は快適歩行速度で歩行した。

## 4. 研究成果

### (1) アシスト機器による歩行動作変容の特徴

#### 股関節可動域、トゥクリアランス

実験の結果から、アシスト力を加えた条件では 11 名中 8 名が大腿挟み角の最大値が通常歩行と比較して有意に大きくなっていることを確認した。残りの参加者 3 名も大腿挟み角が小さくなることは無く、本研究で用いたアシスト機器は歩行中の股関節可動域を維持または拡大させることを確認した。実験の結果においても、13 名中 12 名は股関節可動域が拡大し、さらに全ての実験参加者のトゥクリアランス (遊脚期におけるつま先の軌跡の最も低い高さ) がアシスト時に増加することも分かり、アシスト力が下肢の動きを大きくする効果は今回の対象においては殆どの実験参加者に対し発現することを確認した。

#### 歩行速度、ストライド長、ケイデンス

前項でアシスト時の股関節可動域は増加することを示したが、一方でどの実験結果においても歩行速度に関してはアシスト時の変化に一定の傾向が見られず、股関節の可動域の拡大が必ずしも歩行速度の向上には繋がらないことが分かった。さらに実験のデータを用いて歩行特徴量を解析した結果、アシスト時に通常時よりも歩行のケイデンスが増加したのは 13 名中 2 名のみであり、多くは減少または通常のペースを維持した。これはアシストによって歩行速度が増

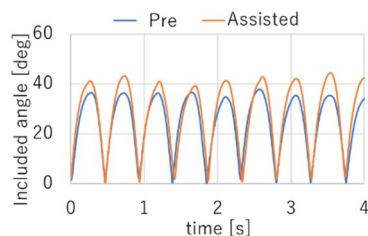


図 2 大腿挟み角の計測例

加した参加者（13名中7名）に限定しても同じ傾向であり、身長比ストライドの平均は非アシスト時 80.5+8.5%，アシスト時 85.5+7.3%，ケイデンスの平均は非アシスト時 118.0+11.2 歩/分，アシスト時 118.7+10.8 歩/分であった。一般的に歩行速度を上げると歩幅とケイデンスのどちらも増加することや、高齢者の歩行の特徴としてケイデンスを維持するものの歩幅が減少する傾向にあることはよく知られている[1]。一方で本実験結果はアシスト機器使用時には主に歩幅の増加が歩行速度の増加に寄与していることを示しており、本パワーウェアのアシストによる特徴的な変化であると言える。

#### 歩行中の股関節角度・角速度

アシストにより歩行速度が向上した実験参加者の股関節角度と角速度の軌道を図3に示す。横軸は歩行周期であり、0%～60%が立脚期，60%～100%が遊脚期である。図より立脚中期から終期（12～50%GC）にかけて伸展位が大きくなっており、この動きが歩幅を大きくしていると考えられる。さらに、前遊脚期（50～62%GC）の関節角速度を見ると、アシスト時に屈曲速度のピークが高くなっている。一般にこのフェーズで股関節の運動が伸展位から屈曲へと急速に移行することにより歩行を加速させるパワーが発生する[2]。アシストにより推進力が向上した実験参加者はこのフェーズにおいて下肢の振り出しにアシスト力を利用し効率よく加速していると考えられる。

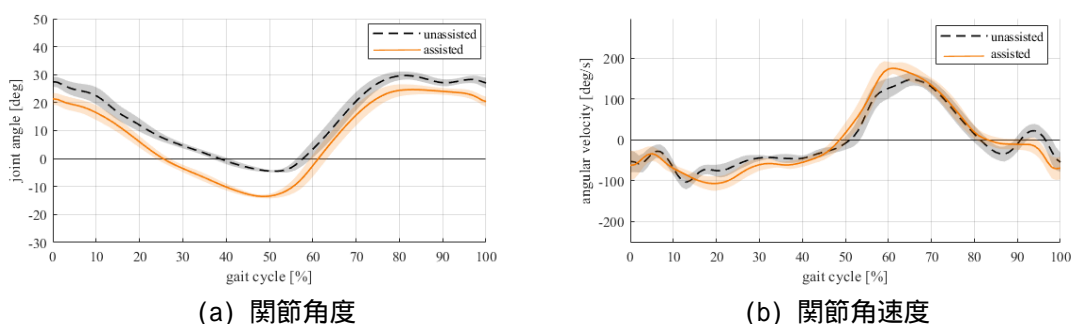


図3 歩行中の股関節角度・角速度の例

#### (2) 使用者の身体能力とアシスト効果の関係

使用者の身長、体重、TUGテストの結果、通常時の股関節可動域、ストライド長などの歩行パラメータと、アシスト時の歩行速度、ケイデンス、ストライド長の変化の間には相関は見出せなかった。以下にアシスト効果との相関がみられた使用者の身体能力および歩行特徴を示す。

#### ケイデンスとアシスト効果

実験の解析から通常歩行時のケイデンスとアシスト歩行時のストライド長の変化には負の相関が見られた ( $r = -.49, p = 0.044$ , 図4)。図4から標準的なケイデンス（約113歩/分）前後で歩行する使用者（125歩/分未満のグループ）ではアシスト時に歩幅が増加するが、標準以上のケイデンスで歩行する使用者（125歩/分以上のグループ）では歩幅が減少する傾向にあったことが分かる。高いケイデンスでの歩行は転倒のリスクを高めることが知られているが、この結果からアシストによるストライド長増加の効果も得られにくくなる可能性があることが明らかになった。

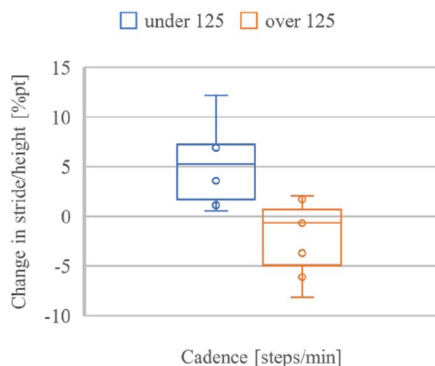


図4 ケイデンスとストライド長の変化

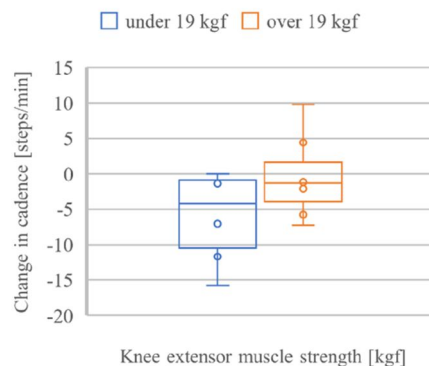


図5 膝伸展筋力とケイデンスの変化

#### 筋力とアシスト効果

さらに、膝伸展筋力と介助歩行中のケイデンスの変化 ( $r=0.62, p=0.009$ , 図5), 及び膝伸展



筋力(ハンドヘルドダイナモメーターで計測した等尺性膝伸筋力)と歩行速度の変化( $r=0.48$ ,  $p=0.049$ )にも正の相関が認められた。このことから下肢の残存筋力が弱い使用者はアシスト歩行時にケイデンスや歩行速度を下げる傾向があることを示している。反対に十分な筋力を持っている使用者は適切なタイミングでアシスト力を加えることにより股関節可動域が広がり、それと併せて使用者自身の身体能力によって全身の姿勢制御を行うことによりアシスト力を推進力の向上に利用することが出来ていると考えられる。

#### 動的安定性とアシスト効果

実験 , の計測結果に対して動的安定性の評価指標として重心上下方向位置の短期リアブノフ指数[3]を解析したところ, アシスト機器の着用により動的安定性が向上した実験参加者は通常時のリアブノフ指数が有意に大きい(動的安定性が低い)ことが分かった。つまり, 現在の歩行周期に合わせたアシスト力を次のステップで印加することによって, 元々の動的安定性が低い使用者の歩行安定性を高めることが出来ると言える。さらに, アシストタイミングを早めることにより動的安定性が高くなる群とタイミングを遅らせることにより動的安定性が高くなる群に実験参加者を分類することができ, 前者の群では歩幅の左右対称性が低いことが分かった。このメカニズムは十分には解明できていないが, 使用者に合わせたアシストタイミングを決定する一つの指標として左右対称性が有用となる可能性が高い。

#### (参考文献)

- [1] MM. Samson, A. Crowe, PL. De Vreede, et al., Differences in gait parameters at a preferred walking speed in healthy subjects due to age, height and body weight, Aging clinical and experimental research, 13(1), 2001, pp.16-21.
- [2] J. Perry and J. Burnfield, Gait Analysis: Normal and Pathological Function, Second Edition, SLACK Incorporated, 2010.
- [3] Dingwell, J. B., Cusumano, J. P., Sternad, D., Cavanagh, P. R., Slower speeds in patients with diabetic neuropathy lead to improved local dynamic stability of continuous overground walking, Journal of biomechanics, 33(10), 2000, pp.1269-1277.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yumeko IMAMURA, Masahiko SUMITANI, Yuko OTAKE, Fumiya HANZAWA, Kazuaki KISHIMOTO
2. 発表標題 Gait changes with powered wear for walking aid: verification experiment measuring walking motion and physical characteristics
3. 学会等名 The 2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今村 由芽子、住谷 昌彦、大竹 祐子、半沢 文也、岸本 一昭
2. 発表標題 高齢者のための歩行支援用パワーウェアによる歩容変化
3. 学会等名 第27回ロボティクスシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今村 由芽子、比留川 博久、松本 吉央
2. 発表標題 IMUを用いた歩行計測とワイヤ駆動アシストスーツによる歩行アシスト制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yumeko Imamura, Kenta Murakami, Fumiya Hanzawa, Kazuaki Kishimoto, Yuko Otake and Masahiko Sumitani
2. 発表標題 Kinematic Analysis of Effect on Walking Motion by Assistive Powered Wear with Wire-driven Assist
3. 学会等名 2019 IEEE International Conference on Advanced Robotics and its Social Impacts (国際学会)
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
---------	---------