若年健常者における歩行アシストスーツの着用が歩行動作および主観的使用効果に及ぼす影響¹

松浦皐月², Choi Jeewon³, Luecha Teerapapa², 武末 慎^{2,4}, 村木里志³

We investigated the gait motion during the use of a wearable walking assistance device that supports hip joint flexion and the perceived effectiveness of the device over time. Twenty-eight healthy young adults were included in the study conducted with three experimental conditions as follows: free gait without wearing the device (F), gait while wearing the device but with the power turned off (N), and gait with assistance (A). Each gait on a treadmill for approximately 5 min was assessed using a motion analysis system and subjective evaluation indexes. Compared with the other conditions, condition A, which was assisted gait, increased the range and maximum flexion of the hip joint angle. However, the increase in double support duration implied that gait might have been adjusted to improve stability. Furthermore, some of the effects on gait motion tended to become more noticeable over time. On the other hand, the subjective rating of the amount of gait loading reduced by the device was improved over time. Taken together, while the effects of walking assistance were observed in the gait motion and the subjective efficacy of the device increased over time, some side responses were observed.

本研究では、股関節屈曲を補助する歩行アシストスーツの使用が、動作および主観的使用効果に及ぼす影響を、時間経過を踏まえて検討した。若年健常者28名を対象とし、3条件（装着しない（F条件）、装着はするが電源は入れない（N条件）、アシスト有り（A条件））における約5分間のトレッドミル歩行の歩行動作および主観評価を比較した。A条件の歩行動作では、他の条件と比較して股関節角度の変化量および最大屈曲角度が増加したが、アシストの安定性を高めるためと考えられる両脚支持期の延長等の動作調節が見られた。なお、動作への影響の一部は時間経過に伴い顕著になった。主観評価に関しては、アシストの負担軽減効果が時間経過に伴い有意に高くなった。以上のように、歩行アシストの使用により、その効果は動作に反映され、また主観的な負担軽減の評価が時間経過に伴い高くなる一方、動作に意図した効果以外の影響も現れることが示唆された。

（キーワード：動作アシスト、歩行、股関節屈曲、動作解析、主観的使用効果）

1. はじめに

近年、作業支援や福祉の分野で、外部からの力で身体機能を補助・拡張する身体装着型の動作アシスト機器の開発が進んでいる。このうち歩行アシストに関しては、有効性が示唆されているリハビリ¹⁾の用途だけでなく、労働現場の作業負担軽減への活用、歩行能力が衰えた人の歩行能力拡張等、今後多くの人の日常にも役立つ技術

となる可能性がある。

健常者の歩行アシスト使用に関する先行研究では、即時的な使用効果について、代表的な歩行指標や筋電図等の客観的指標による評価^{2~4)}が見られる。例えば、最新の研究では、歩行アシストの使用時には、歩行速度の増加や歩幅の拡大が生じる²⁾、筋シナジー³⁾や下肢各関節および体幹角度の運動⁴⁾が通常の歩行時とは異なる等の影響が生じることが確認されている。歩行アシストの今後の性能向上や用途拡大を見据えた場合、以下のような視野からもさらに研究を進める必要がある。

例えば、多くの歩行アシスト機器は、一部の関節運動をあるタイミングでアシストするが、その使用中の人間の歩行動作は、機器の動作をそのまま再現するとは限らない⁴⁾。日常的に行われ、最適化されている歩行動作にとっては、アシストが外乱となる可能性も考えられる。

1 受付：2020年10月19日 受理：2020年11月10日

2 九州大学大学院芸術工学府

Kyushu University, Graduate School of Design

3 九州大学大学院芸術工学研究院

Kyushu University, Faculty of Design

4 日本学術振興会特別研究員DC

JSPS Research Fellow

しかしながら、現在までの研究では、アシストの効果の立証に重点が置かれている場合が多い。アシストが身体に及ぼす影響に関して理解するために、全身の関節動作や安定性など、広範な観点からの検証が必要である。

また、アシスト技術は、現段階では多くの人にとって接した経験がなく、新奇な技術であるため、使用に際し精神的にも負担に感じられる可能性がある。心理的に無理なく受け容れられるものなのか、上述の先行研究で確認されたような歩行動作や身体への影響がどう感じられているのか、といった主観的な影響も考慮すべきである。このようなアシストの使用に関する主観評価について、客観的指標とも包括的に理解できれば、使用者にとってより有効で受容性がある製品デザイン理解の手がかりになると考える。

さらに、使用時間の経過に伴い、アシストを使用しながらの歩行へ慣れが生じ、身体への影響の程度や主観的な使用感が変化すると推測できる。しかし、上記の先行研究では、10 m歩行路等を用いた実験環境での評価が中心であり、時間経過に伴うアシストへの適応過程に関する報告はほとんど見られない。歩行アシストが実際に活用されていく状況を想定した評価として、客観的指標および使用者の主観的指標について、より長時間使用した場合の検討が有用であると考ええる。

本研究では、歩行アシストスーツが、使用者の動作および主観的使用効果に及ぼす影響を包括的に評価することを目的とした。このとき、先行研究と比較して時間幅を設けたプロトコルを用いて、時間経過の影響についても検討した。解析途中ではあるが、有用な知見が得られたことから、基礎的な解析で有意差が見られた項目を中心に、ここに結果の一部を報告する。

2. 方 法

2-1. 実験参加者

実験参加者は、健康上の問題がなくトレッドミル歩行を行える20歳代の男女28名（男性14名、女性14名、平均年齢 22.4 ± 1.6 歳、身長 165.3 ± 6.9 cm、体重 58.7 ± 8.7 kg）とした。実験は九州大学大学院芸術工学研究院実験倫理委員会の承認（承認番号No.355）を得て実施した。

2-2. 歩行アシストスーツ

本実験では、図1に示した歩行アシストスーツを使用した。これは、住友理工株式会社と九州大学の共同研究の成果を基に開発されたものである。着用者の股関節屈

図1 歩行アシストスーツ

Fig. 1 Walking assist suit.

曲（脚を前方に振り出す動作）のタイミングを加速度センサーで認識し、腰から膝下部にかけて装着したベルトをリールで巻き取り短くすることで、股関節屈曲動作をアシストする。このベルトの装着位置や長さは、着用者の体格に合わせて調節可能である。アシスト時のベルト張力は最大25.5 N、アシストスーツの装着質量は約2.2 kgであった。

2-3. 実験条件

実験条件は、装着しない（F条件）、装着はするが電源は入れない（N条件）、アシスト有り（A条件）、の3条件とした。実験参加者には、各条件においてトレッドミル（エアロミル STM-1250、日本光電工業株式会社製）を歩行してもらった。走行ベルトの幅は0.5 m、長さは1.4 mであった。歩行速度は若年健常者の平均的な歩行を想定し4 km/hとし、傾斜は0%（水平）とした。

2-4. 実験手順

計測前に最大15分間を目安に、アシストスーツを装着しない状態でトレッドミルでの歩行練習を行い、トレッドミル歩行に慣れたことを確認した。まっすぐ前を見つめ、腕の振り方を含め普段通り歩くよう指示した。なお、実験参加者のうち、それまで一度もトレッドミルを使用したことがなかった5名については、事前（実験とは別日）に20分間程度のトレッドミル練習の機会を設けた。

暫時的な使用の中での主観評価（質問紙による）の変化を確認するため、図2のように歩行区間を2つ設けた。40秒間の歩行後、一度停止し主観評価の質問紙に回答してもらい、続いて同じ条件での歩行を再開し、240秒後にもう一度質問紙に回答してもらった。試行時間は、回答時間等を含めて1試行あたり合計約5分間であり、各条件に対して1試行ずつ実施した。

図2 1試行の流れ

Fig. 2 Protocol for one trial.

2-5. 歩行動作の解析

赤外線カメラ10台で構成された三次元動作解析システムを用いて歩行動作の計測を行った。Helen Hayesマーカーセットを基準に、歩行アシストスーツの動作を阻害しない位置（全身28か所）に赤外線反射マーカーを貼付した。このとき、上前腸骨棘および仙骨については、転子点で代替した。解析空間の座標系は、左右方向をX軸、進行方向をY軸、鉛直方向をZ軸とした。歩行周期は、右脚の踵接地を0%、同脚の次の踵接地を100%とし、これを1歩行周期として正規化した。各歩行区間の最後20秒間を動作解析の対象区間とし、それぞれ「区間1」、「区間2」とした。解析区間に含まれる各歩行周期中の以下の指標について、解析区間中の平均値を解析区間毎に算出した。

- 1) 歩行指標：距離因子として、ステップ長 [m]、歩調 [steps/min] を算出した。ステップ長は右脚の踵接地から左脚の踵接地までの距離、歩調は単位時間内の歩数である。また、時間因子として、歩行周期 [s]、立脚期・遊脚期・両脚支持期それぞれに要する時間 [s] および1歩行周期に占める割合 [%] を算出した。
- 2) 関節角度：矢状面（YZ平面）における股関節の角度を算出した。解析区間に含まれる各歩行周期において、最大屈曲角度 [°]、最大伸展角度 [°]、また、それらの差を関節角度変化量 [°] として算出した。
- 3) 重心の動揺：身体各部のマーカー位置から、身体を体幹および7つのセグメントの剛体リンクモデルに近似し、各セグメントの重心の合成重心として身体重心を推定した⁵⁾。この重心位置について、X軸、Y軸、Z軸上それぞれにおける移動の軌跡から、歩行周期毎に最大値と最小値の差分より動揺 [mm] を算出した。

2-6. 主観評価

アシストの主観的な効果を評価するため、各試行中にBorg CR-20に従い、自覚的運動強度 (Ratings of Perceived Exertion ; RPE)⁶⁾ の回答を、「全身 (RPE-o)」と「脚のみ (RPE-l)」それぞれについて口頭で得た。ま

表1 VASスケールによる主観評価の質問項目

Tab. 1 Items of subjective evaluation by VAS scales.

質問項目	VASスケール [mm]	対象条件
① 歩行動作は快適でしたか	50=とても快適 0=どちらでもない -50=とても不快	F条件, N条件, A条件
② 足の振りは自然でしたか	50=とても自然 0=どちらでもない	A条件
③ 腕の振りは自然でしたか	-50=とても不自然	
④ アシスト機器の装着部分は快適でしたか	50=とても快適 0=どちらでもない -50=とても不快	N条件, A条件
⑤ アシスト機器により歩行が楽になりましたか	50=とても楽になった 0=どちらでもない -50=とてもきつくなった	A条件のみ
⑥ アシスト機器により足が持ち上げられるのを感じましたか	50=とても感じた 0=どちらでもない -50=全く感じなかった	

た、100 [mm] のVAS (Visual Analogue Scale) を用いた質問紙に回答してもらった。表1に、各質問項目のVASスケールおよび対象とした使用条件を示す。各質問項目は、アシスト関連の製品のユーザビリティテストに関する先行研究^{7,8)} を基に作成した。各試行中に主観評価の回答を得たタイミングは、図2に示す通りである。

2-7. 統計処理

Shapiro-Wilk検定を用いてデータの正規性を確認した後、使用条件および時間の経過が各指標に及ぼす影響を検討するため、VAS⑤・⑥を除く各算出指標について、対応のある二元配置（使用条件×時間経過（解析区間））分散分析を行った。主効果が認められたものについてはBonferroni法を用いて多重比較を行った。VAS質問紙における項目⑤・⑥は、A条件のみで行ったため、区間1および区間2について対応のあるt検定を行った。有意水準はいずれも5%とした。

3. 結果

表2に主要な指標の平均値と、分散分析および多重比較の結果を示す。以下に、本研究の目的に鑑み、多重比較の結果、A条件に関して有意差が認められた項目を中心に述べる。

ステップ長 [m] および歩調 [steps/min] には、使用条件間で有意差は見られなかった。その他の歩行指標に関しては、両脚支持期時間 [s] と両脚支持期割合 [%] において、A条件が他の条件よりも有意に大きかった。

表2 歩行動作に関する主要な指標の比較

Tab. 2 Comparisons of principal gait motion indexes.

時間経過 使用条件	区間1			区間2			主効果 (F値)		交互作用 (F値)	多重比較
	F	N	A	F	N	A	使用条件	時間経過		
ステップ長[m]	0.63 (0.03)	0.63 (0.03)	0.64 (0.03)	0.64 (0.03)	0.64 (0.03)	0.64 (0.03)	1.00	7.30*		
歩調[steps/min]	106.3 (4.4)	106.7 (3.8)	105.7 (3.8)	104.5 (3.5)	105.3 (4.1)	105.1 (3.8)	2.06	14.44**		
両脚支持期時間[s]	0.14 (0.01)	0.14 (0.01)	0.15 (0.01)	0.15 (0.01)	0.14 (0.01)	0.15 (0.01)	10.73**	35.77**		F, N<A**
両脚支持期割合[%]	12.5 (1.0)	12.4 (0.9)	12.8 (1.0)	12.7 (0.8)	12.6 (1.0)	13.0 (1.0)	9.48**	12.23**		F, N<A**
股関節角度変化量[°]	40.8 (3.3)	40.4 (3.0)	42.9 (3.4)	41.5 (3.0)	41.3 (2.9)	43.7 (3.0)	71.40**	23.68**		F, N<A**
股関節最大屈曲角度[°]	39.0 (3.4)	38.5 (3.3)	40.8 (3.6)	39.0 (3.7)	39.1 (3.8)	41.1 (3.5)	75.08**	4.80*		F, N<A**
重心上下方向動揺[mm]	32.6 (5.5)	32.2 (5.0)	33.6 (3.8)	33.4 (5.6)	33.9 (5.4)	35.9 (4.8)	10.06**	12.16**	3.38*	F, N<A**

値は被験者間の平均値 (標準偏差), 主効果および交互作用はF値. *: $p<0.05$, **: $p<0.01$

図3 時間経過に伴う主観評価の変化

Fig. 3 Changes of user's impression over time.

股関節角度の変化量 [°] および最大屈曲角度 [°] は、A条件が他の条件よりも有意に大きかった。

重心位置の上下方向動揺 [mm] では、A条件が他の条件よりも有意に大きく、また、使用条件と時間経過の交互作用が認められた。そこで、単純主効果の検定を行ったところ、区間2においてA条件で他の条件よりも動揺が大きくなった ($p<0.01$)。また、A条件 ($p<0.01$) およびN条件 ($p<0.01$) において、区間1より区間2で動揺が大きかった。

主観評価については、 t 検定を行ったVAS質問紙項目⑤にのみ、解析区間で有意差が見られ、区間1より区間2で評価が向上した (図3)。なお、RPEおよび質問紙項目①～④の回答結果については、解釈を検討中であり、本短報の考察中では扱わないこととする。

4. 考 察

4-1. 動作に関して

歩行アシストには様々な方式があるが、本研究で用いた歩行アシストは、股関節屈曲動作を補助するものであり、仮説として、股関節屈曲角度の増大、また、それに伴うステップ長拡大等の効果が期待される。実験結果

において、股関節の最大屈曲角度がA条件で有意に大きかった点から、股関節屈曲のアシスト機能が意図した動作に作用していたことが確認できた。一方で、ステップ長にはA条件での有意な拡大は認められなかった。しかし、本研究でアシストの影響として確認された、股関節角度変化量や重心の上下動揺の増加は、ステップ長拡大の因子となりうる⁹⁾。ここから、実験参加者は、アシストを歩行に十分に有効活用できていなかった可能性がある。この理由として、速度が限定されたトレッドミル歩行であった点等、今回の実験環境に起因する要素が考えられる。ただし、実験参加者個々に着目すると、A条件にてF条件よりもステップ長が拡大したか否かについては、個人間で差が見られた。個人差や他の身体部位の運動等から、今後の検討が必要である。

また、時間経過の影響を考慮すると、重心へのアシストの影響は、時間経過に伴い大きくなった。時間経過に伴い、アシストへの慣れが生じると推測できる。ここから、股関節の動作や重心の上下移動は増大させつつも、歩幅は変化させないという特異的な歩行が、アシストの力に適応して歩行を安定させるために適した動作であった可能性も、検討課題としたい。

その他、A条件に見られた特徴として、両脚支持が有意に大きかった。両脚支持期を増加させることにより、片脚でバランスをとる時間が減るため、歩行を安定させられる¹⁰⁾。本研究の実験参加者は、実験で初めて歩行アシストを経験しており、股関節屈曲時のアシストが外乱として働き、歩行中のバランスが低下していた可能性が考えられる。このため、アシスト有りの歩行への適応策として、安定性の高い両脚支持期を増加する戦略がとられたと推測される。

なお、本研究の限界として、トレッドミル歩行が対象であった点を挙げる。本研究では、条件間で歩行速度を一定にし、また、先行研究に比べて時間幅を設けた使用

を検討できるという利点から、トレッドミル歩行を対象とした。しかしながら、歩行速度が常に一定であった点や、限られた面積（トレッドミルベルト）内で歩行しなければならなかった点が、本研究のアシスト時に見られたステップ長拡大に関する個人差や両脚支持期の延長に繋がった可能性がある。今後は、床面での歩行路等に対しても同様な実験を行い、今回報告した動作の特徴が、アシストスーツ使用時に普遍的な事象か否かを検討する必要がある。

4.2. 主観評価に関して

t検定にて有意差が見られたVAS質問紙の項目⑤(図3)から、時間経過に伴い、アシストの効果を感じやすくなっていたと言える。ただし、項目⑥からわかるように、アシストによる足の持ち上げられ具合の感じ方には、時間が経過しても変化が見られなかった。時間経過に伴い、足を持ち上げる力の程度の感じ方は変化しなくても、歩行を楽にするという観点で、アシストの力を上手く使えるようになったと感じていたと考えられる。また、項目⑤に見られた時間経過の効果から、使用時間をさらに延ばした場合、アシストを効果的に感じる傾向は、より大きくなる可能性が考えられる。

本研究の目的の一つは、アシストが動作および主観的な使用効果に及ぼす影響を、包括的に理解することである。動作に関しては、アシストによる股関節角度変化量や重心上下動の増加がステップ長に反映されないという非効率性が見られた。また、A条件での両脚支持の増加から、アシストに対してバランスをとるための試みが必要であった可能性が考察された。このような、使用したアシストスーツが意図した効果以外の動作への影響は、時間経過により大きくなっていた。この一方で、時間経過に伴いアシストを効果的に感じやすくなっていた。このようなことから、4-1でも述べた特異的な歩行は、アシストの力を歩行の負担軽減に役立てる使い方をする上でも、適した方法であった可能性がある。

5. おわりに

本研究では、歩行アシスト使用時の動作および主観的使用効果に着目し、時間経過を踏まえて検討した。その結果、本研究で用いた歩行アシストの影響は動作に現れており、これらの影響の一部は、時間経過に伴い顕著になった。主観評価に関しては、アシストにより歩行を楽に感じる程度が、時間経過に伴い大きくなった。なお、今回得られた結果は、本研究で使用したアシストスーツに限定される可能性がある。今後は全身の動作解析を

行い、アシストに対する適応戦略を、個人差や歩行の安定性等にも着目しながら検討する必要がある。

利益相反

本研究で使用した歩行アシストスーツには住友理工株式会社と九州大学との共同研究の成果の一部が用いられている。

謝 辞

本研究の一部は、科研費（17H01454）の助成を受けて行った。また、実験実施にあたっては、住友理工株式会社に歩行アシストスーツを貸与していただきました。ここに記し心より感謝申し上げます。

付 記

本論文の内容の一部は、日本人間工学会第61回大会において発表した。

文 献

- 1) 小林龍生. ロボット運動器リハビリテーション. リハビリテーション医学. 2020, 57 (5), p.404-408, doi: 10.2490/jjrmc.57.404
- 2) Lee, S.; Lee, H.; et al. Gait performance and foot pressure distribution during wearable robot-assisted gait in elderly adults: Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2017, 14 (123), doi: 10.1186/s12984-017-0333-z
- 3) Li, Z.; Liu, H.; et al. Muscle Synergy Alternation of Human During Walking With Lower Limb Exoskeleton. Frontiers in Neuroscience. 2019, 12, 1250, doi: 10.3389/fnins.2018.01050
- 4) Hayes, S.; White, M.; et al. A biomechanical comparison of powered robotic exoskeleton gait with normal and slow walking: An investigation with able-bodied individuals. Clinical Biomechanics. 2020, 80, 105133, doi: 10.1016/j.clinbiomech.2020.105133
- 5) 江原義弘, 山本澄子. ボディダイナミクス入門 立ち上がり動作の分析. 東京, 医歯薬出版, 2001, 102p.
- 6) Borg, G. Perceived exertion: a note on “history” and methods. Medicine and Science in Sports. 1973, 5 (2), p.90-93.
- 7) Baltrusch, S. J.; van Dieën, J. H.; et al. The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals: Applied Ergonomics. 2018, 72, p.94-106, doi: 10.1016/j.apergo.2018.04.007
- 8) Almenara, M.; Cempini, M.; et al. Usability test of a hand exoskeleton for activities of daily living: an example of user-centered design: Disability and Rehabilitation: Assistive Technology. 2017, 12 (1), p.84-96, doi: 10.3109/17483107.2015.1079653
- 9) 小宅一彰, 三和真人. 高齢者の歩行において重力の利用を低下させる原因. 理学療法. 2010, 37 (2), p.70-77.

- 10) Maki, B. E. Gait Changes in Older Adults: Predictors of Falls or Indicators of Fear? Journal of the American Geriatrics Society. 1997, 45(3), p.313-320, doi: 10.1111/j.1532-5415.1997.tb00946.x

著者情報

松浦皐月（まつうらさつき，学生会員，連絡著者）

2017年3月早稲田大学人間科学部卒。2019年4月より，九州大学大学院芸術工学府芸術工学専攻デザイン人間科学コース在学中。

連絡先：matsuura.satsuki.311@s.kyushu-u.ac.jp

Choi Jeewon（チェジウォン）

2020年3月九州大学大学院芸術工学府博士後期課程修了。博士（工学）。2020年4月より，九州大学大学院芸術工学研究院

デザイン人間科学部門学術研究員。

Luecha Teerapapa（ルーチャティールパパ）

2017年9月マヒドン大学理学療法学専攻修士課程修了。2019年10月より，九州大学大学院芸術工学府芸術工学専攻デザイン人間科学国際コース在学中。

武末慎（たけすえしん，学生会員）

2017年3月九州大学芸術工学部卒。同大学大学院芸術工学府芸術工学専攻デザイン人間科学コース在学中。2020年4月より日本学術振興会特別研究員DC。

村木里志（むらきさとし，正会員）

広島大学大学院生物圏科学研究科博士課程後期修了。博士（学術）。県立長崎シーボルト大学（現 長崎県立大学）を経て，2003年より九州大学大学院芸術工学研究院デザイン人間科学部門准教授。2016年より教授。