

旋回歩行に対する装着型ロボット股関節回旋自由度の影響

秋山靖博^{*1}, 久保木陽亮^{*1}, 山田陽滋^{*1}, 岡本正吾^{*1}

Effect of the restriction of hip rotation caused by an exoskeleton on the curving gait

Yasuhiro AKIYAMA^{*1}, Yosuke KUBOKI^{*1}, Yoji YAMADA^{*1}
and Shogo OKAMOTO^{*1}

^{*1} Department of Mechanical Systems Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan

Physical assistant robots are required to be used not only in the hospital but also in the daily living environment to improve quality of life of the elderly or productivity of labors. However, most of such robots are not designed to perform various motions required in the daily living environment. Although corner curving is necessary for daily life, it is not easy for the physical assistant robot because they are not equipped with the degree of freedom of hip rotation, which is not necessary for straight walking. In this study, the natural curving motion of human was observed and classified at first. Then, the curving motion of subjects who wearing the physical assistant robot was observed to evaluate the effect of joint restriction. The change of gait motion caused by the restriction of hip rotation was represented by the decrease of step length and walking speed. Although the gait stability did not decrease by the joint restriction owing to the compensation motion, the change of gait motion should be considered in the assist algorithm to fit to the curving motion.

Key Words : Gait motion, Curving, Physical assistant robot, Hip rotation, Gait stability

1. 緒言

近年, 下肢装着型ロボットの役割は医療施設におけるリハビリテーションだけでなく, 日常生活環境における生活補助および作業補助へと広がりつつある. しかし, トレッドミルあるいは歩行レーン上での直進歩行が主であるリハビリテーションと比べ, 日常生活空間において要求される動作ははるかに多様かつ複雑である. そのため, 多くの装着型ロボットはそれらの動作に対して十分に対応できていない.

多くの装着型ロボットは直進歩行のみを想定した構造となっている. 直進歩行は主に矢状面上における股関節, 膝関節, 足関節の屈伸からなり, 股関節の内転, 内外旋方向回旋は小さい. そのため, 多くの装着型ロボットは内転, 内外旋方向に明確な自由度を持たず, 矢状面外の動作はリンクの剛性あるいは調整用の遊び等により吸収する構造となっている. これは, 関節構造の複雑化からくる重量増加および高価格化を避けるためには合理的な設計である. しかし, 直進歩行以外の多くの日常生活動作ではそれらの自由度が必要となる. 例えば, 廊下や家具の角を曲がる旋回歩行は日常生活に不可欠である⁽¹⁾が, 歩きながら体幹の方向を変える際には, 直進時よりも大きな内外旋を伴う.

一方, 疾患, 加齢等により関節が損傷あるいは機能が低下して可動範囲が減少した際には, 動作可能な関節の動作を組み合わせることで歩行を継続する代償的な歩容が出現することが知られており⁽²⁾, 装着型ロボットにより関節自由度が拘束された場合でも, 何らかの方法で旋回の継続は可能であると考えられる. しかし, 代償歩行では安定性の低下等の歩行能力の低下が発生する恐れがあり, 通常 of 自然な動作とは異なる歩容を強いられることにより長期的に筋骨格系に悪影響を及ぼすことも懸念される.

そのため本研究ではまず, 人間の自然な旋回動作を計測, 整理する. 次に, 装着型ロボットを使用した際の旋回動作を計測し, 自然な旋回動作と比較する. 装着型ロボットの関節を拘束することで, 装着型ロボットの使用および股関節回旋の拘束が旋回時の歩容に与える影響を明らかにする. また, 装着型ロボットの使用による歩容の変化が歩行能力に与える影響を考察し, 装着型ロボットの日常生活環境への普及に必要な技術要素の提案を行う.

2. 自然な旋回動作の計測

2・1 実験の概要 人間が歩行中に進行方向を変える際に生じる旋回動作については, これまでも多く

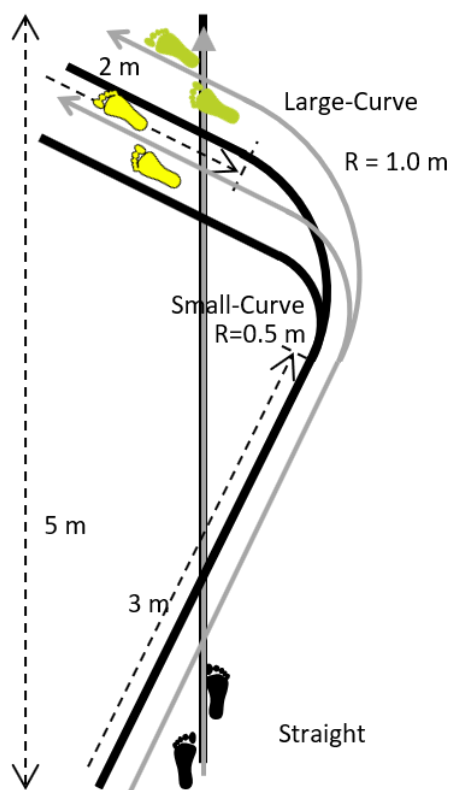


Fig. 1 Walking lane⁽⁵⁾

の研究がされている^(3,4)。しかしそうした研究の多くは旋回開始位置・速度等を統制して行われたため、その歩容はおおむね一様である。しかし、実生活における旋回動作はそのタイミング、速度、旋回半径などの要因に影響され、より多様なものとなる。そのため、人間の自然な旋回動作の計測を目的として、幅広い条件の下で旋回歩行実験を行った⁽⁵⁾。

実験は12人の若年成人参加者に対して、図1に示す歩行路を用いて行った。歩行路は床にテープでマークされており、助走期間ののち、半径0.5 mおよび1 mで左に90度旋回している。旋回動作は、参加者に取り付けたマーカをモーションキャプチャシステム(Motion Analysis社製, MAC 3D System)によって計測することで得た。また、床反力計測のため、移動式フォースプレート(テック技販社製, M3D-FP-U)を靴底に固定した靴を使用した。参加者は、それらの計測器を装着した後に試行を開始した。

各試行において参加者は、歩行を開始する足の左右および旋回半径について指示された。これは、旋回動作が旋回半径および旋回区間に差し掛かる歩行タイミングによって影響されると考えられるため、それらを意図的に変化させることでより多様な動作を計測することを意図したものである。参加者は指示された条件に従って、歩行路の外側を自由な速度で旋回した。実

験では、足の左右および旋回半径の長短の組み合わせによる合計4条件を、10試行ずつ計測した。足の左右は試行ごとにランダムに指示され、旋回半径はいずれかの条件で20試行を計測した後に変更された。旋回半径の順番は、被験者ごとにランダムに決定された。本実験は、名古屋大学工学部倫理部会の許可のもとで実施した。

関節角度は、計測されたマーカ軌跡を人体モデル(Mulsculographics社製, SIMM)にフィッティングすることで計算した。また、参加者のステップ位置は、つま先およびかかとのマーカの軌跡から得た。各試行における旋回動作を特徴づける物理量として、旋回区間における骨盤の最大内傾角度、最大前傾角度および歩行路接線方向に対する最大骨盤内側旋回角度を用い、Ward's法によるクラスタ分析によって旋回動作を分類した。クラスタ分析では、同時にすべての被験者、条件の角曲がり試行を対象とし、それらを5グループに整理した。各グループにおいて、ステップ位置、股関節回旋角等を比較することで、グループの動作の特徴を考察した。

2・2 実験結果 各グループの代表的なステップ位置を図2に示す。股関節回旋角度も含めて考察すると、大まかに、グループ1,2は股関節の内旋が少なく、内足ステップ時の両足外旋による旋回が主となっている。一方、グループ3,4,5では股関節内旋が大きくなっており、外足をより内側に踏み出すことで行う旋回が特長である。グループ間で両足の内旋角度に差がみられるが、いずれのグループでも最大外旋角度は約30度であり、直進歩行での外旋は10度程度であることは大きく異なる値である。

3. 装着型ロボット使用時の旋回動作の計測

3・1 実験の概要 装着型ロボット使用時の旋回動作および関節自由度拘束による動作の変化を明らかにするため、装着型ロボットを使用した旋回歩行実験を行った。参加者は11名の若年成人である。図3に、使用した装着型ロボットの概要を示す。ロボットは、コルセット、フレーム、靴からなり、各関節は回転ジョイントで接続されている。膝関節および足関節は矢状面における屈伸の1自由度のみを持つ。股関節は、矢状面における屈伸に加えて、スライド継ぎ手により内外旋方向に自由度を有する。また、この自由度は治具により拘束することができる。ただし、今回は関節自由度の影響のみを評価するため、モータは搭載していない。

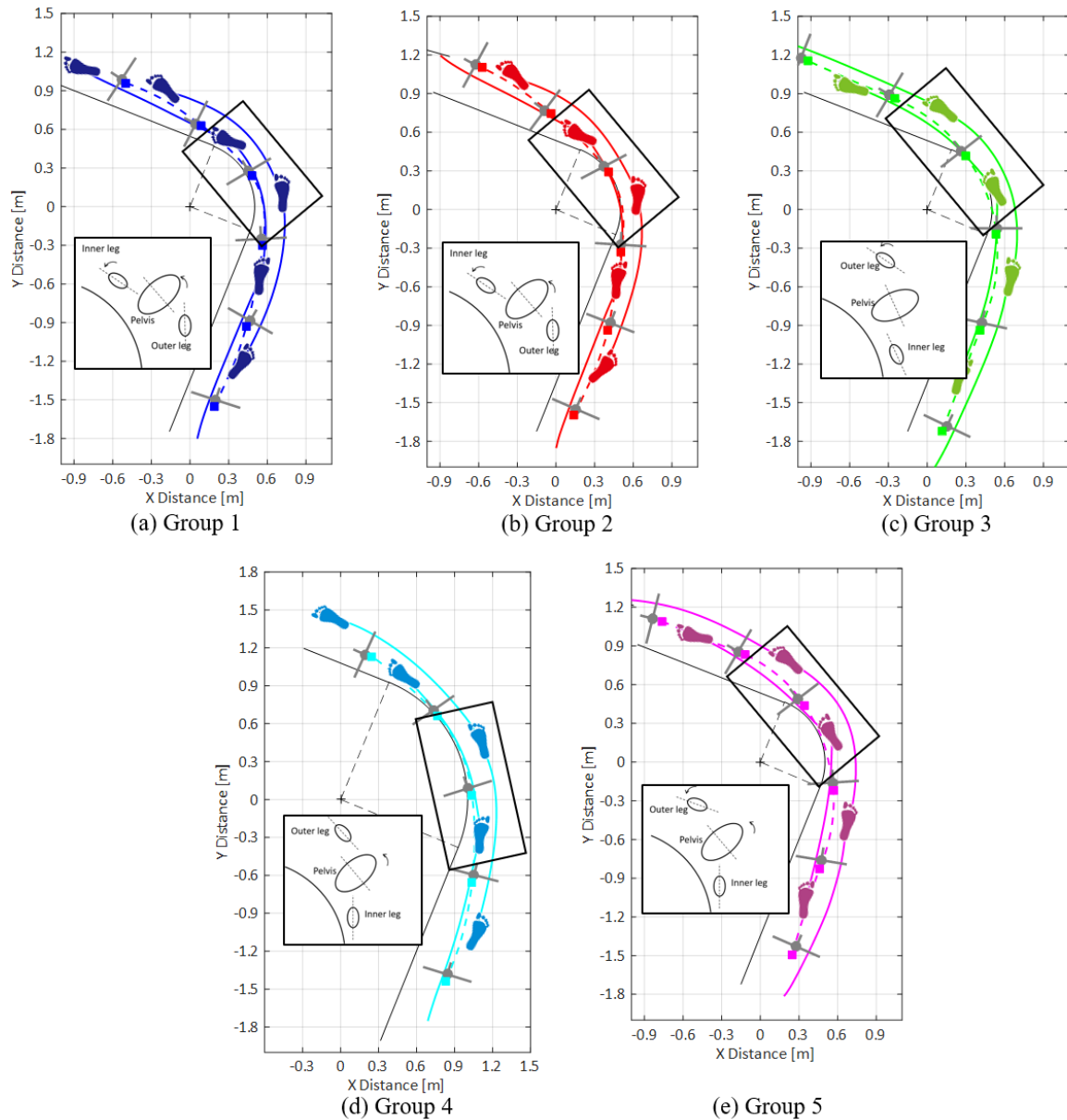


Fig. 2 Curving strategies⁽⁵⁾

使用した歩行路を図4に示す. 旋回部の半径は0.5 m である. 自由度拘束の影響に注目するため, 歩き出しから3歩目で旋回区間に踏み込むよう開始位置を調整し, 旋回時の歩行タイミングを統制した. 旋回動作はモーションキャプチャシステムで計測した.

各試行において参加者は, 歩行を開始する足の左右を指示された. これは, 旋回時の歩行タイミングにより旋回動作が異なる可能性を考慮したものである. さらに, 股関節回旋自由度の影響を評価するため, 回旋の拘束の有無を試行間で切り替えた. これらを組み合わせた4条件をランダムに実施し, 各条件について10試行ずつ計測を行った. 本実験は, 名古屋大学工学部倫理部会の許可のもとで実施した.

旋回動作を代表する物理量として, 股関節回旋の最大/最小角度に加え, 歩幅, ステップ時間, 重心速度等の歩容に関するもの, 1ステップ当たりの骨盤回旋角等の旋回の進行に関するもの, 股関節最大屈伸角度, 安定度余裕(MoS, margin of stability)等を用いた. MoSは, 重心位置・速度および支持面境界位置から求める力学的な転倒余裕である⁽⁶⁾. これらの物理量を歩行ステップごとに求め, 主成分分析を適用することで旋回動作の特徴を抽出した. 歩行を開始する足の左右によって各ステップの向きが逆転するため, 主成分分析はそれぞれの条件について別々に行った.

3・2 実験結果 各条件において計測された歩容のうち, 代表的なものを図5に示す. 回旋の非拘束時



(a) Overview (b) Hip rotation joint

Fig. 3 Wearable robot (Motors were not mounted in this study)

には、内足の外旋によって旋回している様子が見られる。これは、自然な旋回動作の分類では、グループ 1, 2 にあたる歩容である。これに対し、グループ 3, 4, 5 で見られた、外足ステップ時の内旋による旋回はあまり見られなかった。この傾向は、歩き出しの左右による歩行タイミングの違いによる影響を受けなかった。

これに対し、回旋を拘束した条件では、拘束により最大内外旋角度はいずれも大きく減少した。これにより旋回動作は大きく変化し、同様に図 5 より、歩幅および 1 ステップ当たりの骨盤旋回角度が顕著に減少していることが分かる。さらにこの時、歩行速度も有意に減少した。一方、MoS は有意に増加していた。これは、拘束時の方が力学的な安定性には余裕があることを示す結果である。

また、各主成分は、拘束による旋回動作の変化を代表する構成となった。すなわち、歩幅および 1 ステップでの骨盤旋回角と相関が高い主成分と、ステップ時間および速度と相関が高い主成分が現れ、各試行におけるそれらの主成分の得点は、股関節回旋拘束の有無により大きく異なる値となった。

4. 装着型ロボットと旋回動作の関係

4・1 ロボットの装着の影響 股関節回旋を拘束しない場合においても、装着型ロボットの使用時には、自然な旋回動作において見られた歩容の多様性は見られなかった。装着型ロボット使用時に多く見られたのは、自然な旋回動作の一部である内足の外旋による旋回であった。

このような動作の一様性の原因として、実験条件の影響を無視することはできない。装着型ロボットを使用した実験では、旋回半径は単一であり、より旋回区

間に近い地点で歩行タイミングを統制したため、許容

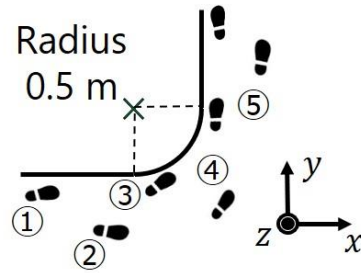


Fig. 4 Walking lane

される動作のばらつきがロボット非装着の自然な条件の実験よりも狭いものであった可能性がある。しかし、ロボット非装着での実験では、同条件であっても被験者間および試行間において動作の多様性が見られ、条件の制約のみで多様性の減少を説明することは困難である。また、旋回開始時点での足の左右は歩行の位相が逆転した状態であり、条件としては全く異なるものである。その両者において同様の旋回動作が見られたことは、この動作の普遍性を示唆するものである。一方、旋回開始時点での歩行タイミングにそれ以上のばらつきを持たせられなかったことは、動作の多様性を制限した要因としてさらに検証の必要があると考えられる。

次に、装着型ロボットの使用自体が参加者を特定の旋回動作に誘導した可能性が考えられる。今回使用した装着型ロボットは内外転方向の自由度を持たないため、関節自由度は自然歩行時と同一ではない。旋回歩行において計測される関節動作範囲は内外旋方向の方が内外転方向よりも広いが、内外転方向の動作も生じている⁹⁾。内外転が拘束されたことで自然な動作が妨げられ、旋回動作の多様性が失われた可能性がある。しかし、装着型ロボットの股関節ジョイントを取り外し、内外転、内外旋が完全に自由に行える条件において実施した実験でも、同様に外旋を主体とした旋回が行われており⁷⁾、内外転の拘束が旋回動作の一様性の原因とは考えにくい。他には、膝関節および足関節における屈伸以外の自由度の拘束、ロボットの重量等が原因として考えられ、さらなる検証が求められる。

今回の実験において見られた旋回動作の一様性は、一方で少なくとも計測された動作による旋回が可能であることを意味する。そして、装着型ロボット開発の観点からは動作の一様性は好ましい特性である。すなわち、今回多く見られた内足ステップ時の股関節外旋によって旋回する動作を前提として、関節可動域およ

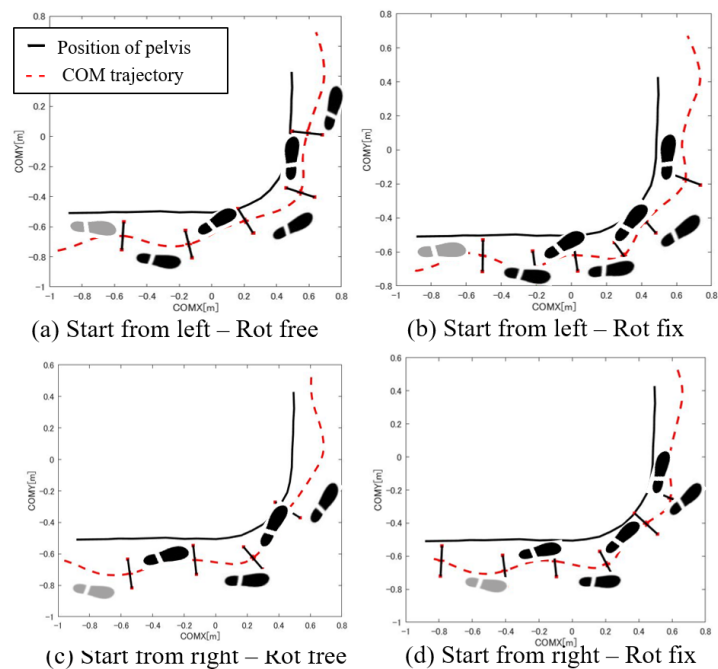


Fig. 5 Curving motion with the assistant robot (The position of the first step was assumed (not observed))

びアシストトルクのパターンを設定すれば旋回動作は可能であり、それは動作の多様性を考慮するよりも容易である。一方、自然な旋回動作の多様性を考えると、そのような歩容が適合しない装着者が存在する可能性を考慮することも求められる。

4・2 股関節回旋自由度拘束の影響 ロボット装着状態で股関節回旋自由度を拘束することによる旋回動作の変化は顕著であり、非拘束時と比較して特に速度、歩幅、1ステップでの骨盤回旋角度が減少した。

旋回動作と直進動作について独立した主成分が現れた点を踏まえると、それぞれの主成分に関連した物理量から影響を考察することができる。旋回動作については、拘束による股関節回旋の減少が1ステップ当たりの骨盤の回旋角度を制限すると考えられる。そのため、進行方向の変更に必要な歩数が増加する。今回、参加者は歩行路を大きく外れることはなかったため、歩行路の曲線に沿った旋回のためには歩幅を短縮して歩数を増加させる必要があった。一方、直進動作としては、ステップ時間を増加させ、速度を低下させるよう変化している。しかし、歩き出しの足が異なる場合にはこの主成分の構成は異なっており、旋回、直進の独立性は特定の歩行タイミングにおいてのみ成立する可能性がある。また、拘束による物理量の変化は速度および歩幅について有意である一方で、ステップ時間については有意差がなく、歩行速度の減少は歩幅の減少に伴う現象とも考えられる。

また、自由度拘束下での旋回歩行では、特に前方転倒に対する歩行安定性が増加する傾向があった。これは、拘束によって歩幅および歩行速度が減少したことで重心の動揺が減少し、支持基底面中央付近に留まる結果となったためと考えられる。歩行中の安定性は、歩行自体が本質的には不安定な動作であるために評価が難しい。今回の安定性の向上は、より静歩行に近い歩容となったことを示唆している。

このように、股関節回旋自由度を拘束した条件でも旋回動作自体は可能であり、それにより安定性が損なわれるものでもない。しかし、このような条件下での歩容は明らかに自然な旋回動作とは異なるものである。そのため、歩行時の不快感および代償歩行による身体各部に対する長期的な負担についてはさらなる検討が求められる。

5. 結言

装着型ロボットの日常生活環境適応において要求される代表的な動作である旋回動作について、装着型ロボットの使用およびロボットによる股関節回旋自由度の拘束が与える影響を計測した。まず、ロボットを装着しない自然な旋回動作を計測、分類した。さらに、装着型ロボットを使用して、股関節回旋自由度の有無のそれぞれの場合について旋回動作を計測した。

自然な状態では旋回動作には被験者間、試行間で多様性があり、旋回時の足取りが異なる複数のグループに分類された。一方、装着型ロボット使用時には股関節回旋が可能な条件でも旋回動作は一樣となり、それは自然な旋回を分類したグループの一つと一致した。また、股関節回旋を拘束した状態ではそれらの旋回動作とは大きく異なり、1 ステップ当たりの骨盤旋回角度と歩幅が減少し、小刻みに少しずつ進行方向を変える歩容となった。

股関節回旋自由度を有する装着型ロボットにおいて旋回動作が一樣であることは、アシストトルクパターンの設計を容易にする。また、股関節回旋を拘束した条件でも代償的歩容を取ったことで旋回自体は可能であり、静歩行に近づいたことで力学的な安定性も損なわれていない。しかし、通常時とは大きく異なる歩容を取るることによる長期的な身体的影響については検討の余地があると考えられる。

参 考 文 献

- (1) Brian C Glaister, Greta C Bernatz, Glenn K Klute, and Michael S Orendurff, "Video Task Analysis of Turning During Activities of Daily Living," *Gait and Posture*, Vol.25, No.2(2007), pp.289-294.
- (2) Davis Roy B., "Reflections on clinical gait analysis," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, Vol.7, No.4(1997), pp.251-257.
- (3) Matthew JD Taylor, P. Dabnichki, SC Strike, "A Three-Dimensional Biomechanical Comparison Between Turning Strategies During the Stance Phase of Walking," *Human Movement Science*. Vol.24(2005), pp.558-573.
- (4) K. Hase, RB Stein, "Turning strategies during human walking," *Journal of Neurophysiology*. Vol.81(1999), pp.2914-2922.
- (5) Yasuhiro Akiyama, Hitoshi Toda, Takao Ogura, Shogo Okamoto, and Yoji Yamada, "Classification and Analysis of the Natural Corner Curving Motion of Humans based on Gait Motion," *Gait and Posture*, Vol. 60(2018), pp.15-21.
- (6) A.L. Hof, Mamix G.J. Gazendam, and W.E. Sinke, "The Condition for Dynamic Stability," *Journal of Biomechanics*, Vol.38(2005), pp.1-8.
- (7) Yusuke Fukui, Yasuhiro Akiyama, Yoji Yamada, and Shogo Okamoto, "The Change of Gait Motion when Curving a Corner owing to the Motion Restriction Caused by a Wearable Device," *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, (2017), pp.525-530.