

装着型ロボットの股関節回旋自由度が歩容および歩行安定性に与える影響

The influence of hip joint rotation of a wearable robot on curving motion

○学 久保木 陽亮 (名古屋大) 正 秋山 靖博 (名古屋大)
正 山田 陽滋 (名古屋大) 正 岡本 正吾 (名古屋大)

Yosuke KUBOKI, Nagoya University
Yasuhiro AKIYAMA, Nagoya University
Yoji YAMADA, Nagoya University
Shogo OKAMOTO, Nagoya University

Physical assistant robots are developed for daily living activities. However, the risk of fall is a major concern of physical assistant robots. In this study, we focus on curving motion, because fall is likely to occur during turning owing due to restricted degrees of freedom of joints. We developed new physical assistant robot, which could adjust the degree of freedom, and compared the curving motion. As a result, some subjects had a decrease in step length, when the hip rotation was restricted while curving. Additionally, the analysis of gait stability suggested that restriction affected the stability when they were curving.

Key Words: Curving motion, Physical assistant robot, Gait analysis

1. 研究背景

1.1 高齢社会における装着型ロボットの効果とリスク

日本では急激に進行する少子高齢化によって、労働効率の向上、増加する高齢者の生活の補助並びに生活の質の向上が課題となっている。こういった問題を解決すべく装着型ロボットの開発が進んでいる。

しかしながら、装着型ロボットには実用化への障壁となる解決すべき課題が存在する。特に課題の一つである転倒に関しては、装着型ロボットの制限された可動域による身体の拘束および即応性のないアシストパターンにより、そのリスクが非装着時と比較して増大する恐れがある。その上、転倒は装着者にとって深刻な危害を与えるにも関わらずその事象の解明及び対策が今は十分に行われていない。このように転倒は装着型ロボットにおいて対策されるべき課題となっている。

1.2 装着型ロボットの自由度と旋回動作

装着型ロボットの開発が進むにつれて、装着型ロボットの目的は細分化しつつある。現在では、体を強く固定し大きな出力を出すものと小型で気軽に着用できて生活の補助を行う二つのタイプに大別される。本研究では前者に主眼を置いて研究を行う。現状の装着型ロボットは矢状面上にのみ自由度を持つものが大半である。そのため日常生活を送る上で必ず行われる旋回動作に必要な股関節の自由度に干渉を受け、転倒リスクの増大が懸念されることから、その低減が求められている。

旋回動作は通常股関節周りの自由度が用いられる[1]。股関節は屈曲/伸展、内旋/外旋、並びに内転/外転の3自由度を有し、旋回時にはそれぞれが役割を果たす。

屈曲/伸展は足を前後方向に出す動作である。足を踏み出し移動を行う。内旋/外旋は大腿骨を軸として足を回転させる動作である。旋回動作中において内旋/外旋を行うことで歩行転換が容易になりスムーズな旋回が可能である。内転/外転は足を横に開く動作である。これにより旋回動作中に想定したライン上を歩行可能になる。また、足を開くことで横方向に対して安定性を得ることが可能である。

屈曲/伸展は矢状面上に自由度を持つ装着型ロボットでも可能な動作である。内旋/外旋、内転/外転はスムーズな旋回の



Fig. 1 Overview of new physical assistant robot



Fig. 2 Joint for hip rotation

実現に貢献するが、機構の複雑化に伴う剛性の低下及び重量増加などの解決すべき課題が多い。また、旋回動作において股関節の回旋が重要であると先行研究で示されている[2]。

2. 研究目的

2.1 装着型ロボットの自由度拡張

旋回動作中の転倒リスク低減には矢状面外の自由度拡張は有効であると考えられる。しかしながら、現状の体を拘束するタイプの装着型ロボットは主にリハビリを目的として開発されているため矢状面外に自由度を有する物は少ない。そのため、矢状面外に自由度を持たせた場合の装着者の挙動につい

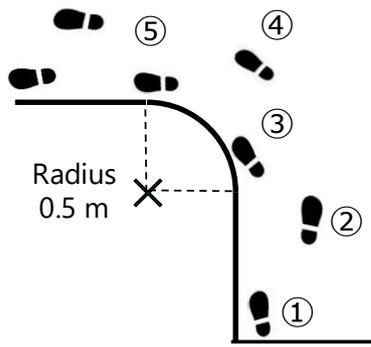


Fig.3 Condition of experiment. I instructed which foot to step right or left. This figure is the condition that 1st step is the left. Number in this figure means number of the step. The subjects walked straight until 2nd step, and did curving motion from 3rd step.

ては十分に解明されていない[3]。そこで、自由度導入の影響を評価すべく矢状面外に可動域を持つ装着型アシストロボット装着者の挙動の分析を行う。

なお、本研究では股関節の外旋、内旋が可能となるように自由度を拡張した装着型ロボットを使用し、旋回動作の変化を計測する。そして、この股関節旋回自由度と旋回動作の関係を解析し、その影響を評価する。

2.2 被験者の安定性評価

装着者の不安定な挙動は転倒につながるリスクとなるため、旋回動作中の被験者の安定性を解析するのは重要である。そのため本研究では XCOM Method [4]を用いて被験者の安定性余裕を解析する。XCOM Method は人間の体をモデルに近似し、運動方程式から安定性余裕 (b) を算出する。安定性余裕は安定な姿勢の指標であり、値が大きいくほど安定となる。安定性余裕は以下の(1)~(3)式を用いて算出される。転倒が起きるには重心がBoSの外側に出ている必要がある。そのためbの値が大きいくほど転倒に対する余裕がある。なおbの値がマイナスの場合、手や足などを用いて運動量を発生させるか、新たに足を接地しない限り転倒が引き起こされる。

$$XCoM = CoM + \frac{V_{CoM}}{\omega_0} \quad (1)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (2)$$

$$b = BoS - XCoM \quad (3)$$

XCoM: 重心の最大移動範囲 **CoM:** 重心位置ベクトル

V_{CoM}: 速度ベクトル **ω₀:** 倒立振り子モデルの固有角振動数

g: 重力加速度 **L:** 重心から床面までの長さ

b: 安定性余裕ベクトル

3. 歩行実験

3.1 実験装置

矢状面上の自由度のほかに股関節の内旋/外旋を自由度に持つ装着型ロボット(Motor Actuated Lower limb Orthosis, MALO)を使用する。全体の概要を図1に示す。具体的には図2のジ

ョイント機構を用いて股関節の回旋動作を行う。このジョイント機構は円弧となっており 30° 程回旋する仕様となっている。先行研究より人間が曲率半径 0.5m のカーブを旋回する場合、股関節に 30° 程度の回旋がみられたとする結果があるため、旋回動作には十分な自由度であると考えられる[5]。

3.2 実験条件

本実験は本学工学部倫理部会の承認のもと行った。被験者 20 代の男性 5 名とした。以降この 5 名を被験者 A,B,C,D,E と呼称する。被験者は MALO を装着し曲率半径 0.5 m の円に沿って旋回動作を行った。概要を図 3 に示す。被験者の歩行は以下のように統制した。初めの二歩は直進動作となるように開始位置を調整し、三歩目から旋回動作に入るように指示をした。また、旋回動作中は左足がレーンに沿うよう指示をした。

比較する条件を次の通りに設定した。自由度の影響を見るためにジョイントの拘束の有無を変更した。また、旋回動作中の左右の足の役割の影響を見るため、一歩目の踏み出しを左または右で変更した。これにより旋回動作に入る三歩目が左と右で別れることとなる。なお、以下の結果では一歩目が左足の場合のみを載せている。これは一歩目が右足の場合も、後述する歩行軌跡、股関節回旋角および安定性に拘束が同様の影響を及ぼしたためである。

3.3 計測及び解析

動作の計測はモーションキャプチャシステム (Motion Analysis 社製 MAC 3D System) によって行った。

次に解析で着目したパラメータについてその定義と算出方法を示す。着目したパラメータは股関節の回旋角、歩行軌跡、および安定性余裕 b の値である。

股関節の回旋角は骨盤に対する大腿骨の回転と定義する。直立した状態を 0° としたときに体の内側の向きを負、外側の向きを正とした。左の上前腸骨棘から右の上前腸骨棘に向かうベクトルを算出、それに直行するベクトルを進行方向ベクトルと定義する。さらに、大腿の背面から前面に向かうベクトルを大腿ベクトルとして定義する。その後、その二つのベクトルを水平面上に投影し内積をとることで算出した。さらに、算出した股関節回旋角を、足が接地してから次にその足が接地するまでを 100% と定義して正規化した。正規化後、1% 毎に各試行での股関節回旋角の平均値、標準偏差を算出した。

歩行軌跡は被験者がどのように歩行したかを示すもので重心軌跡、骨盤位置及び足の接地位置を用いて視覚化した。重心は骨盤の中心にあると仮定して算出した。骨盤位置は左右の上前腸骨棘および上後腸骨棘の midpoint をとることで算出した。足の接地位置は両足のかかととつま先の位置を結ぶことで算出した。

安定性 b の値は前述の XCOM Method を用いて算出した。なお、b の値は進行方向成分とそれに垂直な横方向成分で算出している。今回は b の値が最小となる歩行周期の 40~60% 近辺に着目した。これは歩行の安定余裕が最小となる点である。

4. 実験結果

4.1 股関節の回旋角

股関節回旋角の計算結果を示す。被験者 A と被験者 C で特徴が分かれたため今回は被験者 A と C について示す。なお、被験者 B,E は被験者 A と同様の結果が、被験者 D は被験者 C と同様の結果が得られた。図 4-a に被験者 A、図 4-b に被験者 C の左足股関節回旋角を示す。図 5-a に被験者 A、図 5-b に被験者 C の右足股関節回旋角を示す。横軸を歩行周期とし、足が接地してから次にその足が接地するまでを 100% と定義して正規化した。縦軸を股関節の回旋角とし直立した状態を 0° としたときに体の内側に向かう向きを負、外側に向かう向き

を正とした。図中の線が各歩行周期における平均値、その周りがその平均に対する標準偏差である。青色の線は拘束が無い場合を示し、赤色の線は拘束が有る場合を示す。被験者 A は右足股関節回旋角において拘束有と拘束なしを比較した場合に大きな差があらわれた。左足股関節回旋角に関しては差があらわれなかった。反対に被験者 C は左足股関節回旋角において拘束ありと無しで大きな差があらわれた。左足股関節回旋角においては拘束有となしで関節角度パターンにほとんど差があらわれなかった。なお被験者 C は体格が小柄でありロボットの装着できる身長の下限であった。そのためロボットとの間に隙間が生じる程度大腿を回転させることができたため拘束有と無しで同様の関節角度パターンがあらわれたと考えられる。

4.2 歩行軌跡

被験者 A の歩行軌跡を示す。図中の黒棒は骨盤の位置、赤い点線は被験者の重心軌跡である。被験者 A の一歩目が左足かつ拘束有の場合の歩行軌跡を図 6-a に、拘束がある場合を図 6-b に示す。なお、そのほかの被験者においても被験者 A と同様の結果が見られた。

拘束による歩幅の減少および骨盤回旋角の減少がみられる。これは一歩目をどちらにするかに関わらず見られた現象である。

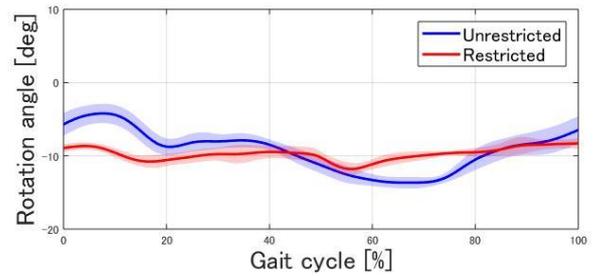
4.5 安定性余裕:b

全被験者における旋回中の安定性余裕が最小となった点を示す。グラフは箱ひげ図となっている。縦軸に安定性余裕 b をとった。青色が拘束のない場合、赤色が拘束のある場合である。グラフ中の丸印が中央値、バーの太い部分が四分位点を示す。なお、算出に用いたステップは旋回中における右足とした。算出の際には進行方向とそれに対する横方向成分で個別に算出を行った。進行方向成分の b の最小値を図 7-a に、進行方向に対する横方向成分の最小値を図 7-b に示す。結果は全被験者で進行方向成分の b の最小値に差が出る結果となった。拘束がある場合とない場合を比較して拘束がある場合の方がより安定性余裕をとって旋回動作をしていたことがわかる。横方向成分は被験者によって拘束の影響があらわれる場合とあらわれない場合があった。また影響があらわれた場合も進行方向成分と比較して顕著な差は見られなかった。

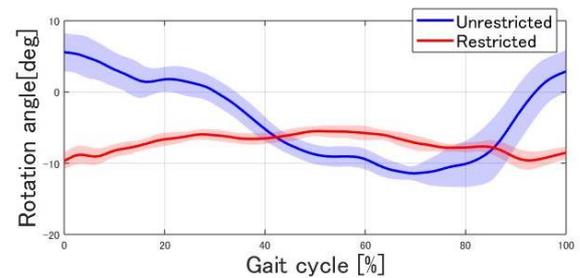
5. 考察

5.1 股関節回旋角

股関節回旋角は拘束による減少がみられた。しかしながら減少の仕方は被験者ごとに異なった。先行研究において人の旋回動作は 5 パターンに集約できるとする研究結果が存在する [5]。これは人間の股関節回旋角、軸足の選択および腰の捻りを用いて分類したものである。このことから我々の研究においても股関節回旋角に着目することで人間の旋回動作を特定のパターンに集約することが可能ではないかと考えられる。パターンの集約が成功することで各パターンに応じた適切なアシストの提供が可能になると考えられる。しかしながら、被験者はロボットを装着した状態で旋回動作を行っているため、先行研究とは一概に比較できない。そのため他のパラメータを解析することが必要である。

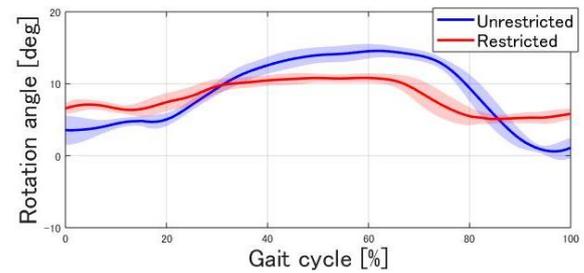


(a) Subject A

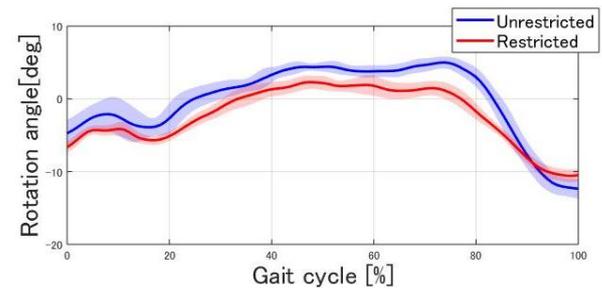


(b) Subject C

Fig.4 Left hip rotation angle. In that case 1st step is the left. (a) Result of Subject A. (b) Result of Subject C. Vertical axis means rotation angle and horizontal axis means gait cycle normalized as 100%. Blue line means the case of rotation joint is unrestricted and red line means restricted.

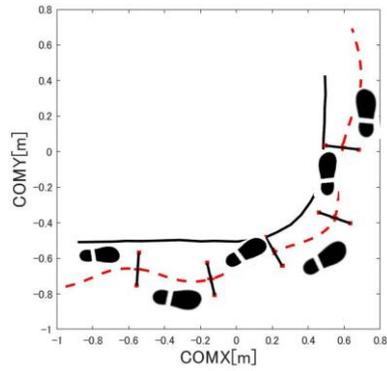


(a) Subject A

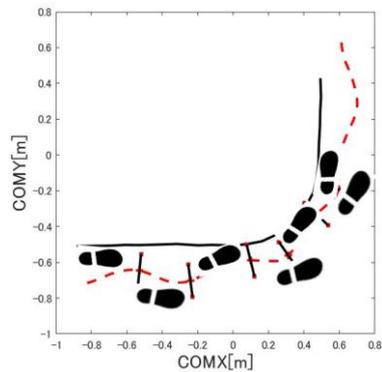


(b) Subject C

Fig.5 Right hip rotation angle. In that case 1st step is the left. (a) Result of Subject A. (b) Result of Subject C. Vertical axis means rotation angle and horizontal axis means gait cycle normalized as 100%. Blue line means the case of rotation joint is unrestricted and red line means restricted.

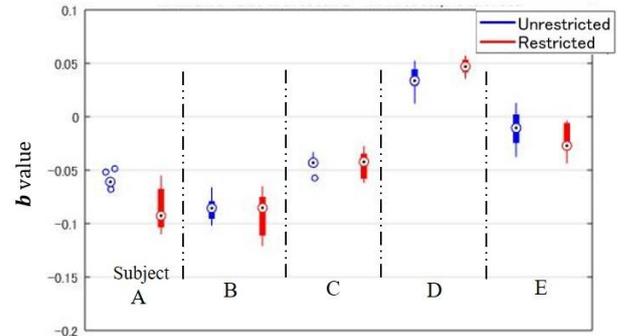


(a) Unrestricted

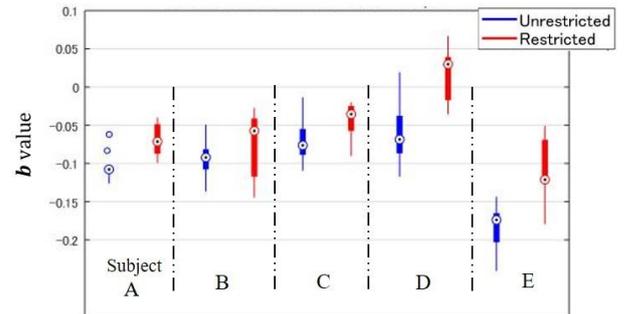


(b) Restricted

Fig.6 COM trajectory. In that case 1st step is the left. (a) rotation joint is unrestricted. (b) rotation joint is restricted. Black bar means the position of pelvis when subject's heel contact to ground. Red dot line means the COM trajectory.



(a) Walking direction



(b) Medio-lateral direction

Fig.7 Minimum b value. In case that 1st step is the left. (a) Minimum b value in the walking direction. (b) Minimum b value in the medio-lateral direction. Vertical axis means b value and horizontal axis means results of each subject. Blue bar means the case of unrestricted and red bar means the case of restricted.

5.2 安定性余裕

旋回動作中における安定性余裕が最小となる値を算出した。進行方向成分では全被験者において拘束ありの場合で安定性余裕が大きかった。これは一歩目をどちらにするか関係なく見られた結果である。しかしながら、横方向成分に関しては被験者間で一定の傾向は見られなかった。また、拘束によって大きな差があらわれなかった。旋回動作中において転倒の危険性が高いのは横方向成分である。そのため拘束中の被験者は横方向成分の安全を拘束がない場合と同程度確保する必要があったと考えられる。そのため横方向成分に関しては安全性に差が現れなかった。しかしながら、横方向成分の安全性を確保するため慎重に歩行を行ったため、進行方向成分に関しては拘束がある場合において安定性余裕が大きくなったと考えられる。

6. まとめ

本研究では股関節回旋自由度の拘束が可能な装着型ロボットを用いて旋回実験を行い、拘束の影響を歩行軌跡、股関節回旋角および安定性余裕の観点から解析を行った。

結果は、歩行軌跡および股関節回旋角で拘束による動作の制約が見られた。これにより歩幅の減少および股関節回旋角の減少が確認された。安定性余裕では、拘束有の場合で安定性

余裕が増加するという結果が得られた。これは拘束により装着者が慎重に歩いたためだと考えられる。

参考文献

- (1) Y. Fukui, Y. Akiyama, Y. Yamada, and S. Okamoto "The Change of Gait Motion When Curving a Corner Owing to the Motion Restricted Caused by a Wearable Device" Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 525-530, Banff, Canada, Oct 2017
- (2) E. Kramer, Y. Akiyama, Y. Fukui, and Y. Yamada "The Change of Gait Motion During Curvilinear Obstacle Avoidance while Restriction by a Wearable Robotic Device" Result of exchange study of JUACEP p.1-6 2017.
- (3) Y. Kuboki, Y. Akiyama, Y. Yamada, and S. Okamoto "装着型ロボットの股関節回旋自由度が旋回時の歩容に及ぼす影響の評価" 名古屋大学卒業論文 2018
- (4) S. M. Bruijn O. G. Meijer P. J. Beek and J. H. van Diee "Assessing the stability of human locomotion: a review of current measures" Journal of the royal society 2013
- (5) Y. Akiyama K. Toda T. Ogura Y. Yamada and S. Okamoto "Classification of the Gait Motion when Turning Corner Naturally -Range of motion of hip joint on the out-of-sagittal plane required for wearable robot-" Advanced Robotics, vol. 31 p. 1-9 2017.