

装着型ロボットの巡回時歩容に対する股関節回旋自由度の影響

The influence of hip joint rotation of 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 due to restricted degrees of freedom. We developed new physical assistant robot, which had another degree of freedom and analyzed curving motion. According to the experiment, some subjects had a decrease in hip rotation angle, pelvis yaw angle and stride length when the hip rotation was restricted while curving. In addition, some subjects did spin motion, which compensate for decreasing rotation angle. In conclusion, we examined the influence of degree of freedom on falls.

Key Words: Fall, Reaction motion, Physical assistant robot, Gait analysis

1. 研究背景

1.1 日本の現状と装着型ロボットのリスク

日本では急激に進行する少子高齢化によって、労働力の減少、増加する高齢者のサポート並びに生活環境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していると考えられる。その上、転倒は装着者にとって深刻な危害を与えるものであるにも関わらずその事象の解明及び対策が完全にできていない。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ものとして課題となっている。

1.2 装着型ロボットの自由度と巡回動作

現状の装着型ロボットは主にトレッドミル及び直進レーンの歩行を想定しているため矢状面のみ自由度を持つものが大半である。これは装着型ロボットがリハビリで使用されることを想定して開発されたためであるが、日常生活での使用を想定した場合、直進以外の動作を無視することはできない。特に、現状の自由度では日常生活を送る上で必ず行われる巡回動作が干渉を受け、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。

巡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、巡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。足を踏み出すことで移動距離を稼ぐほか前後方向に対しての安定性を得ることが可能である。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。これにより巡回動作中に旋回角を得やすくなり内旋/外旋が行えない場合と比較して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。これにより狙ったライン上を歩行可能になる。また、屈曲/伸展と同様に足を大きく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



Fig. 1 Overview of new physical assistant robot



Fig. 2 Joint for hip rotation

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、巡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

巡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持たせた装着型ロボットの絶対数及び研究結果が少ない。そのため、矢状面外に自由度を持たせた場合の装

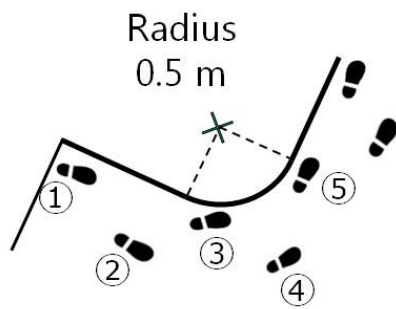


Fig.3 Condition of experiment

着者の挙動につい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、本研究では腰部の外旋、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。

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上部、下部がそれぞれ 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[4]。また、この装着型ロボットにはアシスト機構が備えられている。装着者の歩行をアシストするもので、具体的には歩行時の股関節および膝関節の屈曲/伸展に対して人間の出力の約20%にあたる約 8Nm のトルクを印加することが可能である。アシストタイミングの推定に用いる歩行周期の算出は足裏に装着されたフォースセンサを用いて接地タイミングを読み取っている。

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3名とした。以降被験者A,B,Cと呼称する。被験者はMALOを装着し曲率半径 0.5m の円に沿って旋回動作を行った。概要を図3に示す。歩行の仕方はこちらで統制を行った。具体的には、1歩目を左足とし3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なるべくレーンに沿うようにと指示をした。また、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としてジョイントの拘束の有無、自由度の違いによってアシストの影響がどのように変化するかを見るためとしてアシストの有無である。各条件10回連続で試行し、試行の順は各被験者でランダムとした。

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)による体の位置計測によって行った。

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

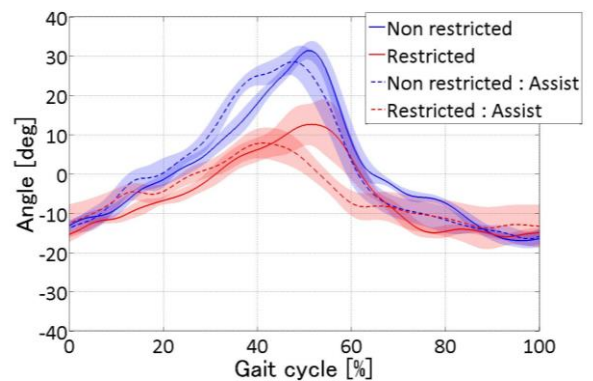


Fig.4 Left hip rotation angle : Subject B

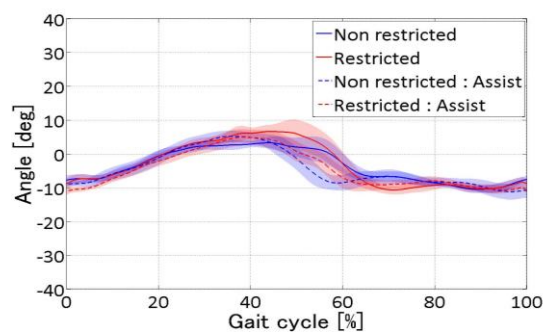


Fig.5 Left hip rotation angle : Subject C

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、骨盤回旋角及び足部スピン量である。

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正、外側の向きを負として骨盤上のベクトルと大腿上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。

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及び上後腸骨棘から算出した。足の接地位置は両足のかかととつま先の位置から算出した。

骨盤回旋角をステップ間における骨盤の方向転換量と定義する。進行方向を向くベクトルと実験室に設定された座標系から内積をとり角度を算出する。その角度をステップ後からステップ前の差をとることによって骨盤回旋角を算出した。

足部スピン量をかかととつま先からなる足部の床面接地中の回転量と定義する。水平面上に投影したかかとからつま先に向かうベクトルが座標系となす角を内積を使用して算出する。接地時の角度からつま先蹴り出し時の角度の差をとることで足部スピン量を算出した。

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。着目した個所は旋回に重要な役割を果たすと予想される旋回中の左足である。図3では③から⑤のステップにあたる。横軸を歩行周期、縦軸を股関節の回旋角とした。横軸を歩行周期とし、③のステップが接地してから⑤のステップが接地するまでを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°

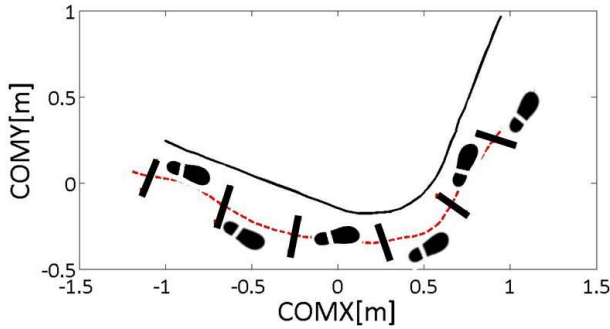


Fig.6 COM trajectory Non restricted : Subject B

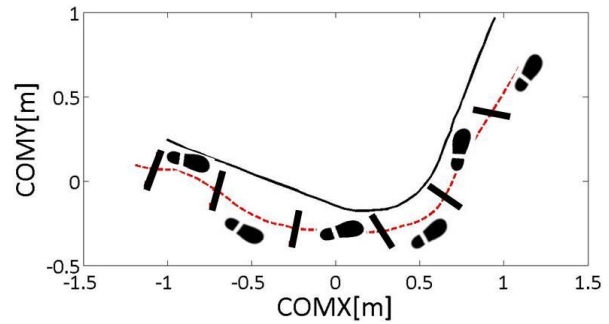


Fig.8 COM trajectory Non restricted : Subject C

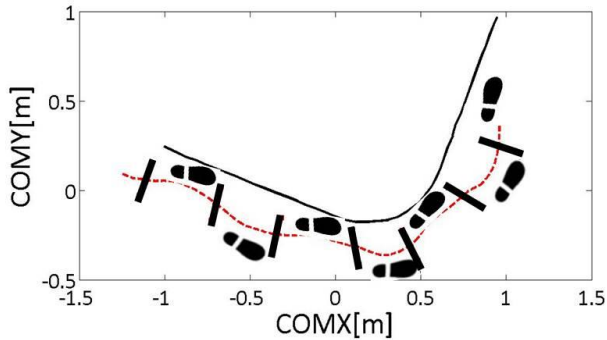


Fig.7 COM trajectory Restricted : Subject B

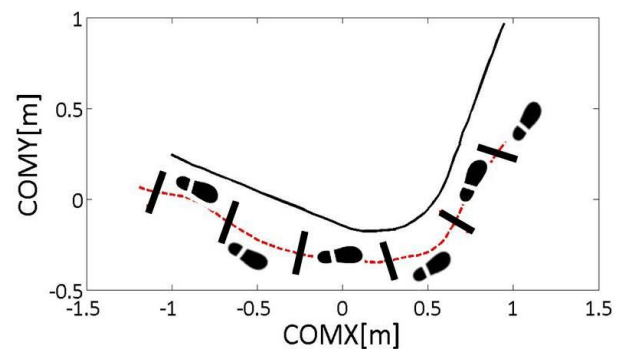


Fig.9 COM trajectory Restricted : Subject C

としたときに体の内側に向かう向きを正、外側に向かう向きを負とした。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。また、アシストが無い条件を通常の線で示し、アシストがある場合を破線で示した。

被験者 B の結果を図 4 に、被験者 C の結果を図 5 に示す。被験者 B はアシストの有無に関わらず拘束の影響がみられた。また拘束が無い場合では装着型ロボットを装着しない場合と同様の自然な回旋角が観測された[4]。反対に被験者 C はどの条件においても結果に差が現れなかった。

なお、今回示さなかった被験者 A はアシストが無い場合で被験者 B と、アシストがある場合で被験者 C と同様の傾向がみられた。

4.2 歩行軌跡

アシストが無い場合の歩行軌跡を示す。被験者 B の拘束が無い場合を図 6 に、拘束が有る場合を図 7 に示す。被験者 C の拘束が無い場合を図 8 に、拘束が有る場合を図 9 に示す。なお、アシストがある場合は個人差が大きく共通の傾向を見出すことが難しかったため結果からは除外した。また、今回示さなかった被験者 A であるがおおむね被験者 B と同様の傾向がみられた。

被験者 B は拘束と非拘束を比較して 3,4,5 歩目に特徴があらわれた。具体的には拘束による歩幅の減少がみられそれに伴い一歩ごとの回旋角が減少している。逆に被験者 C は拘束の影響がみられなかった。

4.3 骨盤回旋角

拘束により歩幅の減少がみられる被験者が存在した。これは、拘束により各ステップで得られる回旋角の減少を補償するための歩行戦略である。このことを定量的に評価するために骨盤回旋角の計算結果を示す。着目した個所は回旋に重要な役割を果たす図 3 の③から④のステップである。アシストが無い場合の各被験者の結果を表 1 に、アシストがある場合の各被験者の結果を表 2 に示す。

結果はアシストが無い場合において各被験者で拘束の影響がみられ、骨盤回旋角の減少が確認された。アシストがある場合は個人差が大きく被験者 A は回旋角が増加、被験者 B は減少、被験者 C は微増という結果になった。

4.4 足部スピン量

回旋中の足部スピン量を計算した。アシストが無い場合の各被験者の結果を表 3 に、アシストがある場合の各被験者の結果を表 4.4 に示す。着目した個所は図 3 の③のステップである。スピンを用いると股関節の回旋の影響を受けることなく方向転換動作が行える。これにより拘束が有る場合でも回旋動作が可能になる。

被験者 A はアシストをかけた条件下でスピン量の増加が確認できる。これは股関節回旋角の変化が見られない個所と一致する。同様に被験者 C はどの条件下でもスピンを利用していた。これも股関節回旋角の変化が見られないこと及び歩行経路の変化が見られないことと一致する。なお、被験者 B も拘束及びアシストが無い条件下でスピンの増加がみられた。しかしながら、股関節回旋角も高く出ているため接地中に股関節回旋を行う歩行戦略をとったものと考えられる。

Table 1 Pelvis yaw angle : No assist

	step	Non restricted No assist (deg)	Restricted No assist (deg)
Subject A	3→4	35.4 ± 5.5	24.7 ± 3.6
Subject B	3→4	41.6 ± 5.4	20.0 ± 6.1
Subject C	3→4	44.3 ± 5.2	34.3 ± 4.9

Table 2 Pelvis yaw angle : Assist

	step	Non restricted Assist (deg)	Restricted Assist (deg)
Subject A	3→4	48.0 ± 5.3	48.3 ± 6.1
Subject B	3→4	33.6 ± 3.0	20.5 ± 3.1
Subject C	3→4	52.3 ± 3.6	45.3 ± 8.9

Table 3 Spin rate of third step : No assist

	Non restricted No assist (deg)	Restricted No assist (deg)
Subject A	0.10±0.2	10.3±5.7
Subject B	22.7±4.4	7.2±3.6
Subject C	19.6±2.9	19.6±5.7

Table 4 Spin rate of third step : Assist

	Non restricted Assist (deg)	Restricted Assist (deg)
Subject A	14.5±3.6	20.5±3.6
Subject B	8.4±2.0	11.4±1.9
Subject C	24.7±5.3	25.7±9.2

5. 考察

5.1 結果の検討

一部の被験者でアシストが無い場合は拘束により股関節の回旋角及び旋回角の減少がみられた。これは歩行経路の変化で示した歩幅の減少と一致する。通常、歩行時において骨盤は股関節の内外旋運動とともに回転しながら進行する。特に旋回動作では股関節の回旋が大きくなるためそれに伴う骨盤の回転の上昇がみられるが、今回は拘束によりそれが妨げられ旋回角が減少したと考えられる。しかしながら、このパラメータだけでは被験者 A,C の股関節回旋角及び骨盤旋回角の定量的評価が行えないため足部スピンの量を計算した。足部スピン量を計算したところ十分に股関節回旋を行えない場合や予備動作を行えない場合においてスピンを用いてそれを補う戦略が観測された。

5.2 自由度及びアシストの影響

自由度を比較した結果、被験者間で特徴的な動作がみられた。自由度を拘束した場合には、股関節回旋角の減少、それに伴う骨盤旋回角の減少がみられた。

アシストの影響は、被験者 A はアシストによって歩かされたという感想を述べておりアシストの影響を強く受けたものと考えられる。被験者 B は旋回直前に外側に膨らむ予備動作をとっていたがアシストにより予備動作が上手く行えず結果として旋回角が減少したと考えられる。被験者 C は全体を通して結果にあまり差が出なかった。

上記のような自由度及びアシストの不整合を補償するためにスピンの利用がみられた。これは、現状のアシストでは自由度に関わらず旋回が上手く行えていないことを示しておりアシストアルゴリズムの改善が必要である。

参考文献

- (1) Yusuke Fukui, Yasuhiro Akiyama, Yoji Yamada, and Shogo 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, Oct2017
- (2) Erik Kramer, Yasuhiro Akiyama, Yusuke Fukui, and Yoji 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) Bing Chen, Hao Ma, Lai-Yin Qin, Fei Gao, KaiMing Chan, Sheung-Wai Law, Ling Qing, Wei-Hsin Liao "Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons" Journal of Orthopaedic Translation (2016) 5, P, 26~37

(4) Yasuhiro Akiyama, Kiyoshi Toda, Takao Ogura, Yoji Yamada, and Shogo 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.