

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01293

研究課題名(和文) 装着型ロボットの転倒時アシストの可能性およびそれによる転倒リスク軽減効果の評価

研究課題名(英文) Evaluation of the effect of assist pattern on the risk of fall using gait assist robot

研究代表者

秋山 靖博 (Akiyama, Yasuhiro)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：00610536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：旋回動作について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・評価した。股関節回旋を拘束した条件でも代償の歩容を取ったことで力学的な安定性は損なわれていない。しかし、通常時とは大きく異なる歩容を取ることに伴う長期的な身体的影響については検討が必要である。また、歩行中の踏み転倒回避動作を実験により再現し、アシストパターンが踏み転倒回避動作に与える効果について計測および解析を行った。実験により得た転倒回避動作の主成分分析によって、回復動作の大小を表す主成分が得られた。結果から、接触後、初めのステップ接地までは同一方向へのアシストを維持することで転倒リスク低減に貢献すると示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高齢化社会において今後普及が期待される装着型ロボットにおいて発生する安全上の問題の解決に貢献するものである。日常環境において遭遇するつまずきおよび旋回に際し、アシストパターンおよび関節自由度の影響を解析することで、装着型ロボットが備えるべき機構および機能の選定が容易となる。これにより、費用対効果に優れた装着型ロボットの開発が可能となり、装着型ロボットの普及に貢献することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：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. Then, the effect of assist pattern on fall recovery motion against tripping during walking was observed and analyzed. Margin of stability of recovery steps became significantly larger when the assist torque was continuously applied that it stopped. Thus, it was suggested that the assist torque perhaps decrease the fall risk.

研究分野：安全工学，ロボット工学

キーワード：装着型ロボット 転倒リスク 関節自由度

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高齢者の労働参加や QOL (Quality of Life) の向上を進める上で、日常生活環境での装着型ロボットの使用は重要なステップであり、今後そうした場面において、非装着時にも同様であるように装着者の転倒が発生することは避けられない。転倒は、労働災害として比較的長期の休業期間を要するのみならず、高齢者においてその後の QOL を著しく悪化させる深刻な事象であるため、転倒リスクは装着型ロボット使用の意義を損ないかねず、対策が求められている。しかし、現在の装着型ロボットは転倒回避動作を想定しておらず、むしろ関節自由度の拘束および即応性のないアシストパターンが装着者の転倒回避動作を妨げ、転倒リスクを増加させる可能性がある。

日常生活環境における多様な転倒リスクへの対応には、装着型ロボットの自由度・可動域の拡大を含めたハード面、転倒に対応したアシストパターンの切り替えによる動作妨害の防止および動作補助によるソフト面の両面での対策が求められる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的のひとつは、矢状面外方向自由度および可動域の制限による転倒リスクの解明である。関節自由度および可動域の制限により動作が拘束されることで、無装着状態に行っていた転倒回避動作が不可能となり、異なる動作戦略の発現や動作の遅れが予想される。重心移動範囲・速度等を計測することでその際のバランスを定量化し、幾何学的拘束による転倒回避動作の変化による転倒リスクへの影響を明らかにする。そのため、試験用装着型ロボットもしくは改造した装具を用いて実際に関節自由度および可動域を制限した状態で歩行・転倒実験を行う。

また、転倒回避時に装着者動作とアシストの間で生じる動作の不整合を原因とした転倒リスクの解明および対策も重要な課題である。転倒時、装着者は高速で大きな角度の関節動作を行うが、それにアシストが干渉することで動作範囲・速度の制限や逆方向へトルクが生じる場合、装着者の動作が妨害され、転倒リスクが顕著に増加すると考えられる。そのため、アシストパターンの差による転倒回避動作の変化を評価し、アシストによる妨害が転倒リスクに与える影響を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 装着型ロボット関節自由度の影響評価

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 1 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。

使用した歩行路を図 2 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



(a) Overview



(b) Hip rotation joint

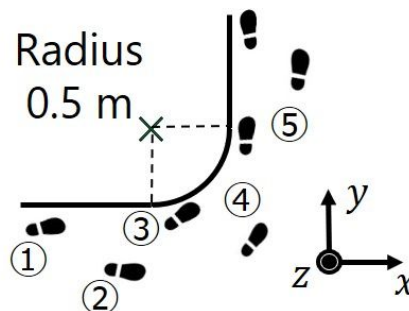


Fig. 2 Walking lane

Fig. 1 Wearable robot (Motors were not mounted in this study)

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。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 つまづき転倒リスクに対するアシストパターンの影響

実験の目的は、アシストパターンが異なる条件での躓きに起因する転倒回避動作を実験により取得し、その後、転倒リスクへのアシストパターンの効果を評価することである。仮説として、意図の不一致によらず転倒回避動作と同一方向へのアシストは転倒リスクを低減するとした。そこで実験プロセスとして、被験者は、下肢装着型ロボットを使用して繰り返し歩行し、ランダムな試行で躓きが与えられた。アシストの影響を評価するため、接触後アシストを維持する場合と停止する場合の2条件を設けた。また、ロボットは遊脚期、股関節を持ち上げ膝関節を前方に送るアシストを印加する。そこで躓き後のアシストの変化の影響が大きくなると考えられる接触条件として遊脚初期の衝突を設定した。

アシストを維持するアシスト維持パターンおよびアシストを停止するアシスト停止パターンを設定した。アシスト維持パターンでは、障害物接触後、股関節を屈曲させ、膝関節を伸展させて転倒回避動作を補助する役割のアシストトルクを印加する。アシスト停止パターンでは、接触後、動摩擦補償のみを行うことで、被験者の動作を阻害しないこととした。

本研究では、公募により募集した健常な男性11名(年齢 $23.1 \pm 1.8$ 歳、身長 $172.9 \pm 3.5$ cm、体重 $63.6 \pm 5.1$ kg)を被験者として実験を行った。接触の有無を合わせて計330回の試行を行い、うち110回の接触を解析した。設定条件と異なるタイミングでの接触や接触が失敗した試行、接触後の転倒回避動作中に再度障害物に接触した試行は解析から除外された。モーションキャプチャ、力覚センサにより、被験者の姿勢、床反力、接触力を計測した。

転倒回避動作を説明する変数を定義する。ここで、FSは被験者が接触脚を接地したタイミング、SSは被験者が回復脚を接地したタイミング、HTは被験者が障害物に接触したタイミングを指す。被験者の反応を表す変数として、平均速度およびステップ時間を導入した。平均速度は、重心の前方方向進行量を、ステップに要した時間で除算した値である。ステップ時間は、1ステップの時間である。反応動作の特徴を表す変数として、ステップ長、ステップ軌跡、最大つま先

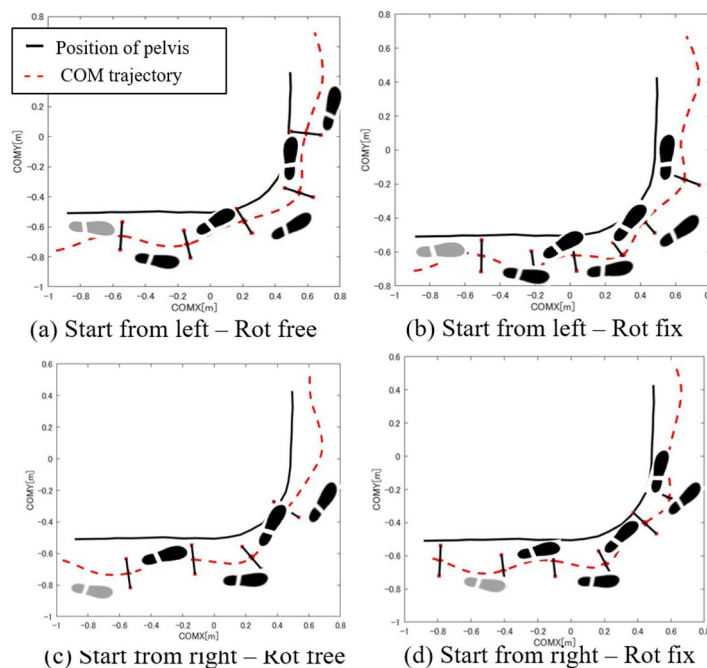


Fig. 3 Curving motion with the assistant robot (The position of the first step was assumed (not observed))

高さ、最大膝関節屈曲角度および瞬間重心速度を導入した。ステップ軌跡は、つま先位置の 3 次元の移動距離である。最大つま先高さは、つま先の垂直方向における位置の最大値である。最大膝関節屈曲角度は、膝関節屈曲角度の最大値である。被験者の安定性を表す変量として、最低重心位置および安定性余裕を導入した。安定性余裕は、重心の転倒方向への前進を抑制することのできる足圧中心の最小距離を示し、正方向に値が大きいほど安定であることを意味する。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 装着型ロボット関節自由度の影響評価

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 3 に示す。回旋の非拘束時には、内足の外旋によって旋回している様子が分かる。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

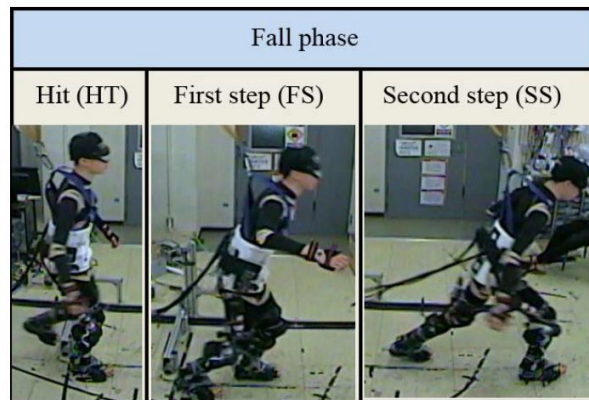


Fig. 4 Fall recovery motion obtained by fall experiment. The subject choose elevating strategy with disturbed leg as a first step after hit and recovery leg as a second step after hit

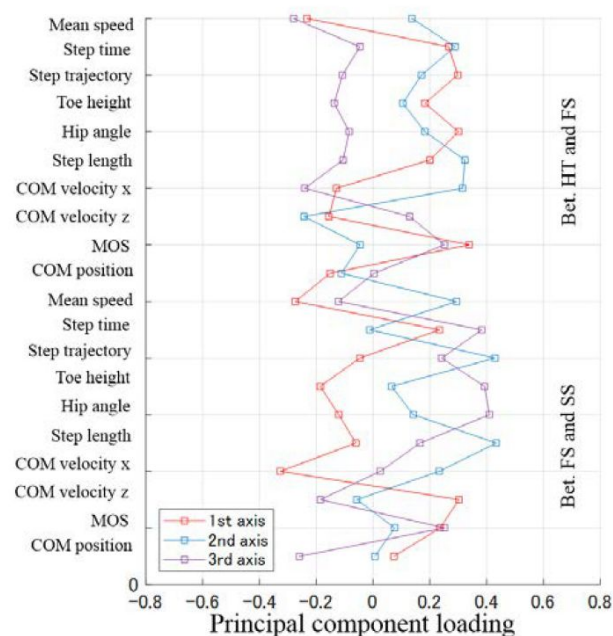


Fig. 5 Result of coefficient value of first to third axes through principal component analysis

る値となった。

#### 4.2 つまづき転倒リスクに対するアシストパターンの影響

図 4 に転倒回避動作の概観を示す。転倒回避動作は衝突後、衝突脚を踏み出す動作と回復脚を踏み出す動作の一連の流れで行われた。得られた転倒回避動作の変量を抽出して特徴を決定する主成分分析を行い、転倒回避動作の主要な動作を得ることで、アシストパターンがどのような動作に影響を与えたか調べた。主成分分析に用いた変量は、被験者の反応を表す変量、反応動作の特徴を表す変量および被験者の安定性を表す変量である。その結果から、転倒回避動作の特徴を表す 3 つの主成分を明らかにした。図 5 に主成分分析によって得られた各軸に対する変量の主成分負荷量を示す。横軸は相関係数、縦軸は変量を意味する。また、赤線は第 1 軸へのそれぞれの変量の主成分負荷量、青線は第 2 軸へのそれぞれの変量の主成分負荷量、紫線は第 3 軸へのそれぞれの変量の主成分負荷量を示す。また、20 個の変量のうち、上 10 個の変量が HT から FS の変量を示し、上 10 個の変量が FS から SS の変量を示す。これらの主軸について物理的な意味を考察する。

第 1 主成分は、被験者の転倒回避動作の完結に要する歩数に影響する主成分であると考えられる。第 1 主成分のそれぞれの変量の相関係数は、FS における踏み出しを示す変量であるステップ時間、ステップ軌跡、つま先高さ、膝関節屈曲角度、ステップ長および安定性余裕に大きな正の値を示し、SS における踏み出しを示す変量である平均速度、つま先高さや進行方向への速度を示す重心速度に大きな負の値を示した。したがって、衝突脚接地までにどれだけ大きな回復動作を行い、回復脚接地までにどれだけ小さな回復動作を行ったかを表す主成分であると考えられる。また、SS における進行方向への重心速度が負に大きな値を出力した。つまり、衝突脚接地時に大きな回復動作を行った場合、SS における重心は大きな変位を必要とせず、転倒回避動作が衝突脚接地時で完結していたと考えられる。したがって、FS の安定性余裕が大きいほど SS の回復動作が小さく転倒リスクが小さい。

第 2 主成分は、前方への進行量を示す主成分であると考えられる。第 2 主成分のそれぞれの変量の相関係数は、FS におけるストライド長および進行方向への重心速度、SS における進行速度、足軌跡、ストライド長に大きな正の値を示した。したがって、衝突後、衝突脚を接地するまでの前方への進行量、および回復脚を接地するまでの前方への進行量を表す主成分であると考えられる。

第 3 主成分は、アシストロボットの影響を示す主成分であると考えられる。第 3 主成分のそれぞれの変量の相関係数は、SS におけるつま先高さ、膝関節最大屈曲角度に大きな正の値を示した。したがって、装着型アシストロボットの股関節を屈曲するアシストによる影響を表す主成分であると考えられる。

アシストパターンの有無による有意差が生じた変量は、主成分得点として第 3 主成分得点。FS における変量として、平均速度および安定性余裕、SS における変量として、ステップ時間、ステップ軌跡、最大つま先高さ、最大膝関節角度および安定性余裕であった。FS における安定性余裕 (MOS) の解析の結果から、アシスト維持パターンにおける安定性余裕は、アシスト停止パターンに比べて大きく有意差が示された。つまり障害物との接触後、接触脚の十分な踏み出し動作をアシストする効果を与えたことが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Akiyama Yasuhiro, Fukui Yusuke, Okamoto Shogo, Yamada Yoji	4. 巻 15
2. 論文標題 Effects of exoskeletal gait assistance on the recovery motion following tripping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0229150
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229150">https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229150</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 AKIYAMA Yasuhiro, MITSUOKA Kento, OKAMOTO Shogo, YAMADA Yoji	4. 巻 14
2. 論文標題 Experimental analysis of the fall mitigation motion caused by tripping based on the motion observation until shortly before ground contact	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 18-00510
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1299/jbse.18-00510">https://doi.org/10.1299/jbse.18-00510</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Erik Kramer
2. 発表標題 The Change of Gait Motion During Curvilinear Obstacle Avoidance while Restricted by a Wearable Robotic Device
3. 学会等名 IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保木陽亮
2. 発表標題 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
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮田羽月
2. 発表標題 トレッドミル上においてつまずき転倒を誘発する方法の開発および妥当性評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮田羽月
2. 発表標題 トレッドミル上でつまずき転倒を誘発する実験装置の歩行レーン上でのつまずき動作との比較による妥当性検証
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保木陽亮
2. 発表標題 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
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋山靖博
2. 発表標題 躓きによる転倒回避動作を対象とした装着型アシストロボットのアシストパターンの効果評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuma Igami
2. 発表標題 Development of adaptive gait assist algorithm using ground reaction force
3. 学会等名 1st IFAC Workshop on Robot Control (WROCO) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hazuki Miyata
2. 発表標題 Validation of trip-induction system on a treadmill by comparison with a walking lane
3. 学会等名 ICORS 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS'19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋山靖博
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第25回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2020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
---------	---------------------------	-----------------------	----