

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26750121

研究課題名(和文)日常生活環境における潜在的装着型ロボット起因型転倒リスクの評価と低減方策の検討

研究課題名(英文)Evaluation and reduction of the risk of fall caused by wearable robots in the daily living environment

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、装着型ロボットの装着が転倒回避動作および転倒リスクに与える影響を評価するため、日常生活環境を模した転倒要因を歩行中に与え、その際の反応動作を計測することにより転倒回避戦略の同定を行った。また、計測した動作の外挿シミュレーションにより、接地部位および速度の推定を行い、転倒時危害の見積もりを行った。

因子分析による転倒回避戦略の分類および検定を用いたそれらの動作の比較により、主に接触のタイミングの差により生じる複数の転倒回避戦略の特徴の抽出および機序の解明を進めた。さらに、それらの戦略と転倒時危害の関連づけを行い、特徴的な転倒危害の推定およびその軽減方策の提案を行った。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to evaluate the effect of a wearable robot on the fall recovery motion and the risk of fall. Application of the perturbation, which mimicked the one occurring in the daily living environment, during walking caused the loss of balance or fall. Observation of such motions and motion simulation, which estimated the impact position and speed, enabled to identify the reaction strategy and injury risk. Classification of the reaction strategy using factor analysis and comparison of motions using t-test suggested the separation of motion strategy owing to the timing of perturbation. Then, the extraction of the motion characteristics and understanding of the mechanism of the motion resulted in the estimation of the injuries. The relationship between the motion strategy and injury risk of the strategy helped to propose the countermeasure against such falls.

研究分野：安全工学

キーワード：機械安全 装着型ロボット 歩行アシスト 転倒

1. 研究開始当初の背景

人体に装着して装着者の関節屈伸動作を補助する装着型パワーアシストロボット(以下、装着型ロボット)は、日本が直面する少子高齢社会で強く求められる、労働者の生産性や障害者・高齢者の QOL(Quality of life), ADL(Activities of Daily Living)の向上を目的としたロボットである。人間に装着するという特性から装着型ロボットには特段の安全性が求められ、2014 年にはその安全基準である ISO-13482 が策定された。しかし、現状の ISO-13482 は人体との接触部における安全性を定義したにとどまり、転倒をはじめとした装着状態での動作に伴うリスクは十分に検討されていない。

そのため、現在ではそうしたリスクは開発企業のみならず、製造物責任の負担は極めて重い。いくつかの実用的なロボットが開発されているが、結果として使用環境は補助、免荷を前提とした閉鎖施設内にとどまり、一般社会への普及は進んでいない。

2. 研究の目的

本研究は、装着型ロボットの実用化に際して問題となる、ロボットの装着から生じる動作制約を原因とする転倒(以下、装着起因型転倒)の中でも日常生活環境における転倒に注目し、転倒要因の抽出、模擬日常生活環境における実験に加え、転倒挙動のシミュレーションを行うことで装着起因型転倒リスクの特定を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

特に高い頻度、危害が予想される箇所について実験的に検証を行うため、実験室内に模擬日常生活環境を構築した。装置の構成を図1に示す。日常で転倒要因となる蓋然性が高いと判断された足元障害物および側部障害物を金属フレームによって製作した。また、同装置を用いた装着起因型転倒検証実験について、学内倫理部会の許可を受け、実験を行った。

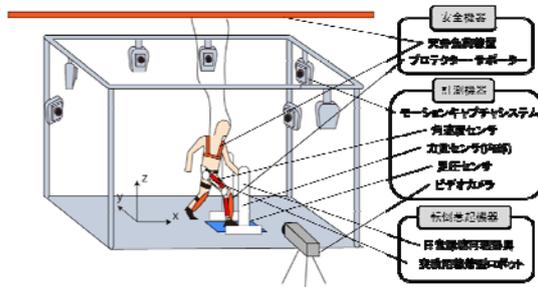


図 1. 転倒模擬実験装置



図 2. 実験用障害物(左:側面衝突, 右:つまずき)

被験者は長さ 7 m の直線走路に沿って歩行し、障害物と接触する。被験者はスピードガイドおよびメトロノームにより歩幅がほぼ一定になるよう調整される。ただし装着型ロボット着用直後は歩容に乱れが生じることが予想されるため、試行前に歩容が安定するまで十分に歩行練習を行う。被験者は初め自然な方法で歩行し、スピードガイド及びメトロノームの速度はそれに対応する値に設定した。接触後の反応については特に指示せず、自然な動作を取ることにした。障害物は可動式で、試行ごとに接触の有無、タイミング等を変更した。被験者の動作は、モーションキャプチャシステム (MotionAnalysis 社製 MAC 3D System) を用いて計測され、ビデオカメラ (SONY 社製) で撮影された。またロボット足底部のフォースプレートにより床反力を、障害物の移動式力覚センサにより接触力を計測した。

それぞれ 8 名の被験者を対象として実験を行い、結果を得た。図 3 に、つまずき発生時の被験者の代表的な動作を示す。この実験では、ロボット装着の影響を評価する対照動作の取得を目的として、ロボット非装着時の挙動を計測した。回復動作の歩幅が短い場合、回復脚と重心間の距離が開き、上体により大きな回転モーメントが発生している様子が分かる。また、転倒時に支持基底面に対し重心が大きく前方にあり、鉛直方向支持力を発揮し難い姿勢にあるため、身体を十分に支持することができず、結果としてより早く重心が降下する様子が観られた。また、進行方向の重心速度が小さいことから、身体の回転動作により進行方向の重心速度が減少し、代わりに鉛直方向に増加したと考えられる。

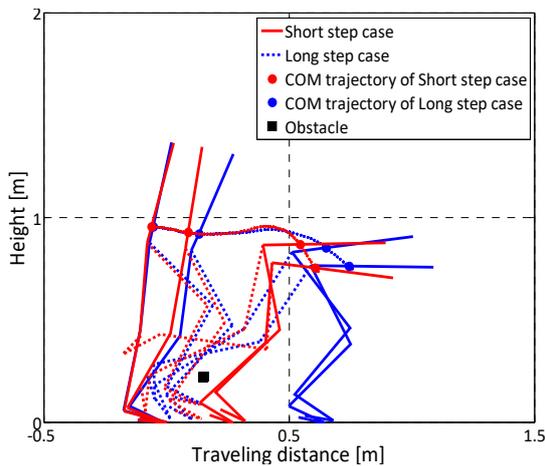


図 3. つまずき発生時の被験者の動作

実験においては転倒危害が発生する以前に被験者は免荷されるため、接地による危害見積もりはシミュレーションにより行った。本シミュレーションで用いた人体モデルは 9 リンク剛体モデルである。モデルは頸部、大腿部、前腕および上腕の左右、そして胴体のリンクで構成される。関節は、足首、膝、腰、肩、肘の左右含め計 10 ジョイントで構成されている。各関節の自由度は、肩関節が 3 自由度、肘関節が 1 自由度、股関節が 3 自由度、膝関節が 1 自由度に定めた。

転倒実験により得られた、安全ハーネスにより支持されたタイミングの姿勢から地面と衝突するまでの動作をシミュレーションによって推定する。対象とする期間および動作は、支持された瞬間の姿勢および速度を初期条件とし、全ての関節トルクが 0 の状態で、自由落下により足部位外のいずれかの部位が地面に衝突するまでの動作である。その際に身体に加わる外力は重力のみである。シミュレータにより推定された動作の一例を図 4 に示す。

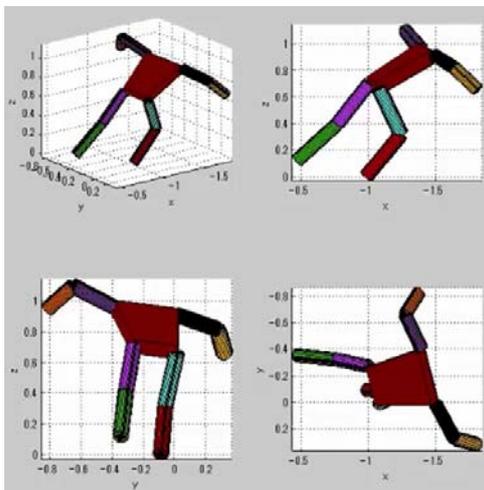


図 4. 転倒シミュレーション

回復脚の回復ステップの働きの違いによる転倒様態への影響について検討を行った

結果として、回復脚踏み出し幅の大小により、地面との接触部位に違いがある可能性が示された。特に踏み出し幅が小さいときは、つまずいた脚と同側の手を最初に地面と接触する割合が最も大きく、踏み出し幅が大きいケースでは、つまずいた脚と同側の膝を最初に地面と接触する割合が大きいことがシミュレーションの結果として得られた。また地面との衝突速度は、手が先に衝突する場合の方が、膝が衝突する場合に比べ大きくなることが分かった。

次に、ロボットを装着しての側面衝突を実験で再現し、その後の回復動作を計測した。被験者の回復動作には試行ごと、被験者ごとに明らかに相違がみられたが、それらは特定のパラメータの大小のみによって判別することが困難であったため、因子分析を用いて戦略の分類を行った、共通因子の因子負荷量を図 5 に示す。バリマックス回転適用後の共通因子の寄与率は第 1 因子から順に 14.7%, 12.6%, 12.4%, 12.0%, 9.9% であり、第 5 因子までの累計寄与率は 61.6% であった。

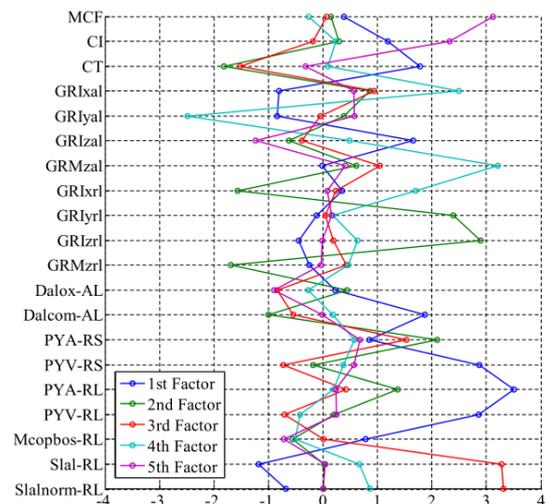


図 5. 因子負荷量の比較

主に旋回動作を表す第一因子と、主に直進動作を表す第三因子を用いて反応動作を分類すると、図 6 のように、主に第 2 象限に位置する、直進動作が支配的な試行と、主に第 4 象限に位置する、旋回動作が支配的な試行に分けられる。

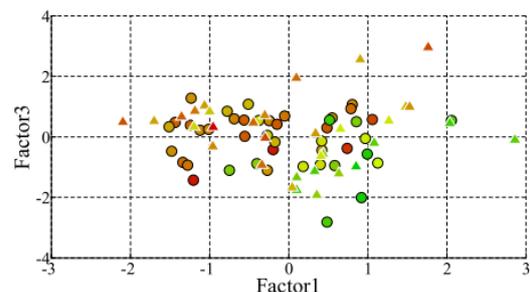


図 6. 第一因子—第三因子平面上の分布

それぞれの代表的な試行における被験者のフットプリントおよび回復脚の踵軌跡を図7に示す。障害物の位置を原点とし黒い正方形は障害物を表す。左足のフットプリントは黄色、右足のフットプリントは緑色で示される。つま先部付近の数字は接触前の1歩から数えた歩数を表す。

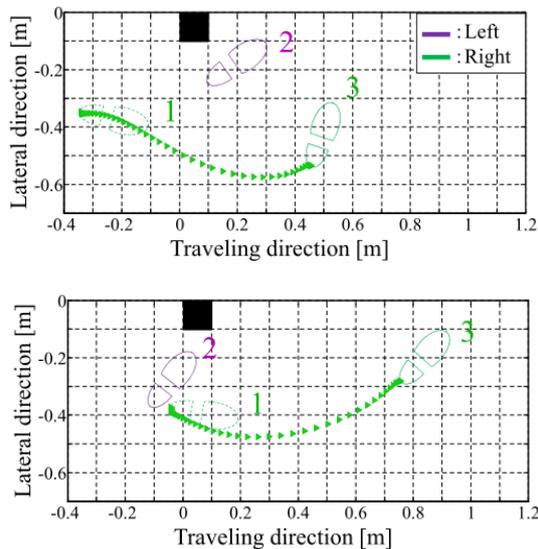


図7. 回復動作(上: 旋回, 下: 直進)

旋回動作では被験者は接触後、比較的遠位に接触脚を接地している。その後体幹を回転させ回復脚を大きく旋回しながら接地した。この際に軸足となる接触脚を滑らせながら回転させる動作が観測された。これは装着型ロボットが関節を拘束することに起因すると考えられる。人間が通常回旋する場合には足を捻りながら行うが、今回の状況ではロボットにより股関節および足関節の内外旋や内外転が制限されている。これにより接触脚を捻ることができず軸足ごと回転させるに至ったと推測できる。

一方で直進動作では接触脚の接地位置が立脚の近傍であり、その後突っかかるような形で回復脚を前方へ踏み出すことにより姿勢を支える動作が観測された。この場合回復脚の踏みつけにより進行方向への勢いを殺しバランスを保ったと推測される。

さらに、両動作には接触のタイミングやそれに伴う接触脚の接地位置および床反力に大きな差異が生じた。旋回動作では初期の接触に対し接触脚を重心の遠位に接地し、進行方向へ減速し、障害物方向へ加速し、踏みつけ力が弱い結果となった。直進動作では周期の接触に対し接触脚を重心の近位あるいは後方へ接地し、進行方向へ加速し、障害物方向や踏みつけは大きな力を発しなかった。接触力は終期の接触に対しては一様に弱い接触となったが、初期の接触に対しては股関節では弱い接触、膝関節では強い接触が発生した。

接触のタイミングにより接触脚を接地させる位置が異なり、それによって回避動作の選択が異なることが明らかになった。接触脚を接地するまでに猶予があり、接触脚を内側へ移動し障害物をすり抜けることが容易である場合は進行方向へ加速する直進が支配的な動作を取った。また接触脚を接触後すぐに重心より前方外側に接地させることとなった場合は進行方向への減速が容易であるが障害物のすり抜けに回転を要し、回転が支配的な動作を取った。

一方で接触部位による回避動作への影響は小さかった。遊脚後期の接触においてはそもそも部位による接触の強さの差異があまり生じなかったが、それが顕著に表れた遊脚初期の接触においても部位間で動作に明確な影響は表れなかった。したがって接触部位による動作選択への影響は小さく、それに比べ接触脚の接地位置が重要な要素であると考えられる。

予想される転倒危害に関しては、旋回動作から転倒へ至る場合、装着者は体幹の過剰な回転によりバランスを崩し転倒すると予想される。このような回転を伴う転倒は後方や側方への転倒となりやすく、股関節や骨盤のような重要な部位を傷つけるおそれがあることから深刻度が高いと考えられる。したがって側方や後方への転倒を防いだり、骨盤部の損傷を軽減するための保護方策が求められる。またロボットに足部が存在する場合、被験者が回転する際に軸足を滑らせていたことから、足底部はそれを阻害しない素材が求められる。

一方、直進動作はつんのめりに類似しており、このような動作から転倒へ至るとすると、回復脚で体重を支持しきれずに前方へ転倒する状況が予想される。前方への転倒においては前腕部による防御動作で転倒の衝撃を緩和することができるため比較的深刻度が低いと考えられる。しかし防御戦略に失敗した場合顔面を強打するリスクが存在する。このような転倒を防ぐために回復脚の踏ん張りを補助するアシスト戦略や、股関節の前方への開脚を妨げない機構が求められる。

4. 研究成果

人間の転倒動作を実験的に取得してシミュレーションと併用することで、装着起因型転倒リスクを評価した。特に、シミュレーションの課題であった人間の防御動作の推定を、実験において取得する動作の範囲をより転倒終期に近い状態まで拡張し、人間の意図的な動作が介在する余地を低減することで解決した。また、装着型ロボットの着用によって新たに生じた転倒要因である側面衝突を対象とすることで、日常生活における装着起因型転倒リスクを明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

[1] Yasuhiro Akiyama, Shogo Okamoto, Yoji Yamada, and Kenji Ishiguro, "Measurement of contact behavior including slippage of cuff when using wearable physical assistant robot," IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering, 査読有, vol. 24, no. 7, pp. 784-793, 2016

[2] Yasuhiro Akiyama, Yoji Yamada, and Shogo Okamoto, "Interaction forces beneath cuffs of physical assistant robots and their motion-based estimation," Advanced Robotics, 査読有, vol. 29, no. 20, pp. 1315-1329, 2015

〔学会発表〕(計8件)

[1] 榑田諒太, 秋山靖博, 山田陽滋, 岡本正吾, "装着型アシストロボット着用者の固定障害物との接触に対する転倒回避動作の研究," 第22回ロボティクスシンポジウム, pp. 159-164, 安中市, 16-Mar, 2017

[2] 秋山靖博, Esam Hafez, 山田陽滋, 岡本正吾, 光岡賢人, "歩行中のつまずき転倒時における受傷程度推定手法の開発," LIFE2016, 3P2-B01, 宮城県, 6-Sep, 2016

[3] 秋山靖博, 光岡賢人, 山田陽滋, 岡本正吾, "歩行中のつまずき転倒現象の計測および危害推定," ロボティクス・メカトロニクス講演会2016, 1A2-13a3, 神奈川県, 9-Jun, 2016

[4] 肥後郁馬, 秋山靖博, 山田陽滋, 岡本正吾, "歩行時の装着型パワーアシストロボットと装着者の動作不整合が引き起こすバランスへの影響," 第16回システムインテグレーション部門講演会, 1C2-2, 愛知県, 14-Dec, 2015

[5] Yasuhiro Akiyama, Ryota Kushida, Yoji Yamada, and Shogo Okamoto, "An analysis of recovery motion of a man wearing physical assistant robot in response to collision," Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 1089-1093, Hong Kong, China, Oct 2015

[6] Kento Mitsuoka, Yasuhiro Akiyama, Yoji Yamada, and Shogo Okamoto, "Analysis of skip motion as a recovery strategy after an induced trip," Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 911-916, Hong Kong, China, Oct 2015

[7] Jessica Gabriela Beltran Ullauri, Yasuhiro Akiyama, Naomi Yamada, Shogo Okamoto, and Yoji Yamada, "Muscle activity restriction taping technique simulates the reduction in foot-ground clearance in the elderly," Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 559-564, Singapore, 12-Aug, 2015

[8] 榑田諒太, 秋山靖博, 山田陽滋, 岡本正吾, "装着型アシストロボット着用者の障害物との衝突に対する転倒回避動作の研究," ロボティクス・メ

カトロニクス講演会 2015, 1A1P06, 京都府, 18-Mar, 2015

〔その他〕

ホームページ等

名古屋大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻 山田研究室 (支援ロボティクス・グループ)

<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/asi/ja/>

6. 研究組織

(1) 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