

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

Development and validation of trip-induction system by using a treadmill

○学 宮田 羽月 (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)

Hazuki MIYATA, Nagoya University
Yoji YAMADA, Nagoya University

Yasuhiro AKIYAMA, Nagoya University
Shogo OKAMOTO, Nagoya University

Trip-related falls account for a significant proportion of falls in older adults, often resulting in serious injury. A highly accurate fall-risk evaluation method will be increasingly required in the aged society. For this purpose, it is necessary to measure more realistic motion against tripping. We developed a method to induce tripping at arbitrary walking distance and timing in the laboratory using a treadmill and evaluated the validity of it by measuring reaction motion. With respect to each joint angle, it does not greatly deviate from the result of the previous study in the walking lane, and its transition was similar. However, the transition of the forward moment after tripping was very different. By adjusting the treadmill acceleration condition at the same time as the obstacle collision, it would be possible to measure a more realistic motion against tripping.

Key Words: Tripping, Treadmill, Recovery motion

1. 緒言

転倒を引き起こす代表的な要因として、つまずきが挙げられる。つまずきに対する転倒回避メカニズムの解明を目的として、地上に固定されたブロックや板状の障害物を用いた転倒実験が数多く行われた。代表例としては、足元に突然出現する板状の障害物により誘起される転倒が挙げられる^[1]。それらの条件下で、Elevating strategy と Lowering strategy という二つの転倒回避戦略が主に観測されてきた。Elevating strategy は主に遊脚の初期につまづく場合に観測され、遊脚が障害物と衝突後、その衝突した脚を振り上げ障害物を乗り越え回復脚として地面に接地するという動作である。Lowering strategy は主に遊脚の中期以降につまづく場合に観測され、遊脚が障害物と衝突後、即座に衝突した脚を地面に着き、逆側の脚を振り上げ、それを回復脚として地面に接地するという動作である。しかし実験室内の歩行レーンに障害物を固定し自然なつまずきの動作を計測する際には、スペースの制限により再現できる条件が限られる。そのため、転倒の誘発条件の自由度が制限されると共に被験者の予想を防止することが困難である。そこで本研究グループではトレッドミル上を歩

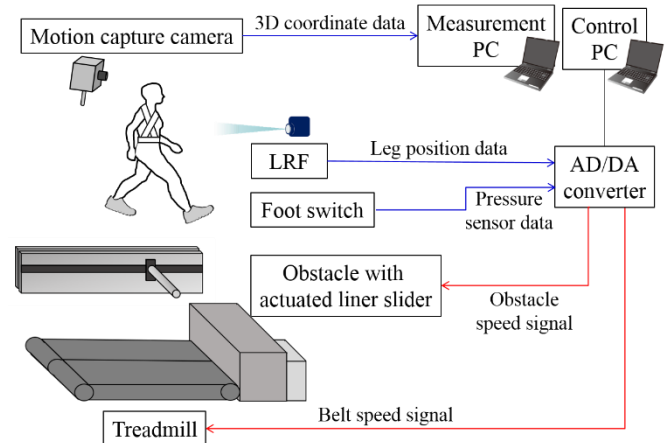


Fig. 2 System configuration

行中につまずきを誘発する実験系の開発に取り組む。地上歩行時と力学的に類似した自然なつまずき転倒の動作計測を目標とする。

2. トレッドミル上転倒誘発実験

2.1 実験装置

任意のタイミングで外乱を印加し、トレッドミル歩行中の被験者のつまずきを誘発する実験系を開発した。本実験系の概略図を図 1, 2 に示す。左右それぞれのベルト速度が制御可能なトレッドミル(大武・ルート工業社製)および歩行転倒誘発装置(イー・パレイ社製)に速度指令値を入力する。なお歩行転倒誘発装置は、直径 5 cm 全長 55 cm のアルミニウム製円筒状障害物と、それを矢状面で水平に動かすためのリニアスライダで構成されている。なお、障害物はベルト面から高さ 20 cm に配置した。また、光学式二次元走査型センサである LRF (Laser Range Finder, UST-20LX, 北陽電機社製) をトレ

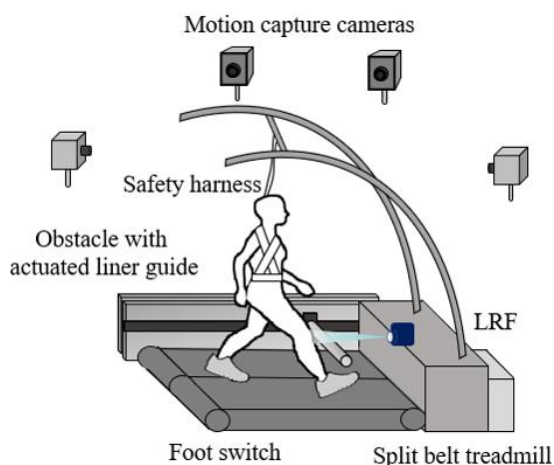


Fig. 1 Experimental overview

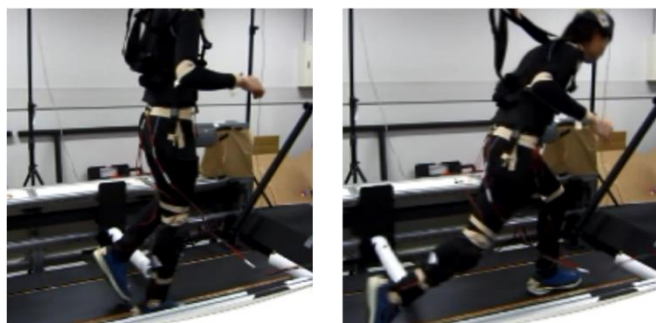


Fig. 3 Perturbation during early swing phase (left: trip, right: recovery step)

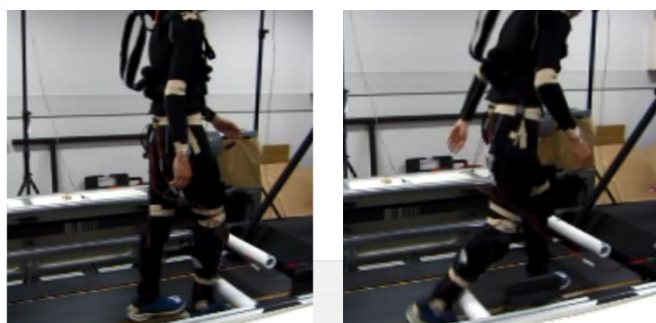


Fig. 4 Perturbation during mid swing phase (left: trip, right: recovery step)

ッドミル前方でベルトから高さ 25 cm に設置した。これは障害物衝突までの全期間で下肢部の検出が損なわれないように、障害物の駆動する高さを避けたためである。障害物の初期位置から所望のタイミング時の脚までの距離を推定する。また、圧力センサ (FSR400, Interlink Electronics Inc.) を両靴の中敷きの下の踵側とつま先側にそれぞれ張り付けたフットスイッチを用いて、踵接地を検出する。左足の踵接地のタイミングで歩行周期のリセットを行い、直前の周期に対する現在の歩行の位相を百分率で推定する。

なお、障害物衝突の予測を防ぐために、下半分が覆われたゴーグルを着用させた。また、視認可能範囲の中央に目印を置き、注視するよう促すことで歩行のふらつきを防いだ。また、被験者の適応を抑制するため、左右それぞれの脚への試行をランダムに行った。

転倒刺激は遊脚への障害物接触と、トレッドミルベルトの加速を同時に発生させることで実現する。その概略を図 3 に示す。地上歩行時の歩行環境を再現するために、障害物はトレッドミルと同一の速度で動作させる。なお、ベルトの加速は、前方への体幹の回転モーメントを増大させるためである。

3 km/h の速度でのトレッドミル歩行を開始する。30 秒程度で歩容の安定を確認した後に、実験者がトリガを入力すると、フットスイッチおよび LRF を用いて推定した被験者位置および歩容に基づいて、所望のタイミングでつまずきが起こるようなアルゴリズムを実装した。

Table 1 Result of hit timing and recovery motion

	Target [%]	Result [%]	Recovery motion
Case 1	65	75.5±2.9	Elevating strategy
Case 2	80	83.7±3.6	Lowering strategy

Notes: Values are mean±SD

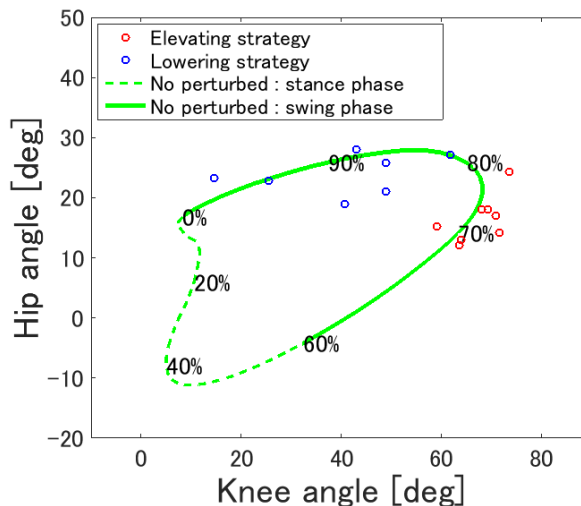


Fig. 5 Relation between hit timing and joint angle

2.2 実験条件

本研究では、つまずきのタイミングに対応した転倒回避動作がトレッドミル上でも地上歩行時と同様に計測されることが重要である。そこで、比較するための条件として、外乱のタイミングが遊脚初期(被験者の歩行周期 65%)または遊脚中期(歩行周期 80%) いずれかとなる 2 条件を用いた。各条件を 10 回ずつ、計 20 回の試行を被験者 2 名に対しそれぞれ行った。実験は、本工学部倫理部会の承認のもとに実施した。

2.3 実験結果

被験者 1 名について、つまずき誘発実験での反応動作を力学的に解析した。

各条件で設定した被験者下肢部と障害物との衝突タイミングと、実際の衝突タイミングとの関係および、つまずきの後の回避動作の選択を表 1 に示す。遊脚初期を狙った条件 1、遊脚中期を狙った条件 2 でつまずき後の回避動作は分かれた。条件 1 では全試行で Elevating strategy が、条件 2 では全試行で Lowering strategy が選択された。それらの反応動作を図 3、4 に示す。

衝突時の下肢部の姿勢と、その後の回避動作の選択の関係および通常歩行時での姿勢を図 5 に示す。姿勢は膝関節角度および股関節角度により表した。図中に記載した各割合は通常歩行時の歩行段階を表している。実験中、衝突の直前まで通常歩行時の歩容と等しい歩行をした場合には、図中にプロットされた各試行の回避動作の選択は通常歩行時のラインに乗る。各試行のプロットは、衝突時の各関節角度が通常歩行時と乖離する程、法線方向に離れる。また踵接地からの時間が通常歩行時より前後に乖離するほど、接線方向に離れる。

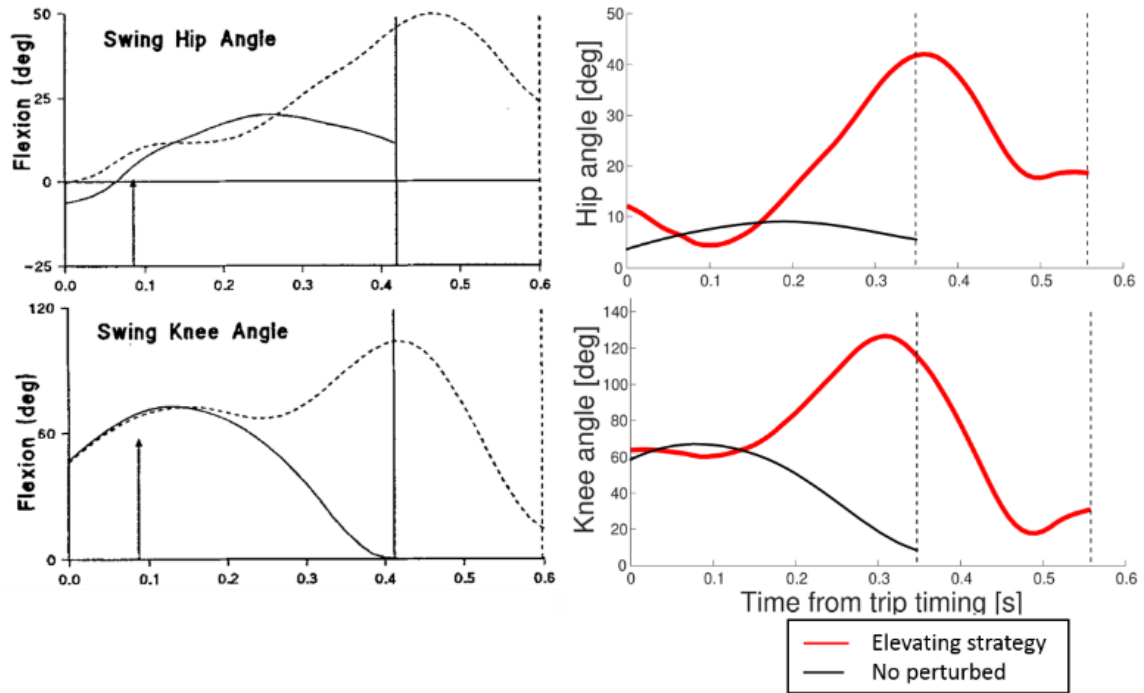


Fig. 6 Typical hip, knee trajectories of the swing limb (left: response against the tripping while overground walking in the previous research^[2], right: response against the tripping using a treadmill-based perturbation)

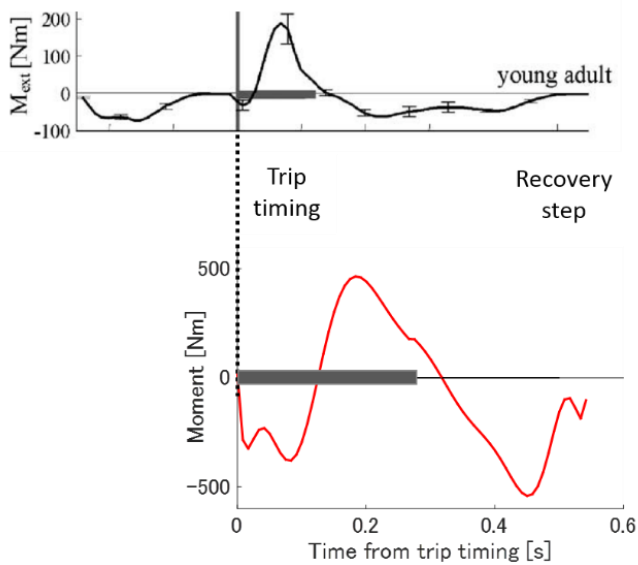


Fig. 7 Typical external moment trajectories; the horizontal bold lines indicate obstacle-foot contact duration (top: response against the tripping while overground walking in the previous research^[3], bottom: response against the tripping using a treadmill-based perturbation)

被験者の通常歩行時の歩行段階 80%を境界として、回避動作の選択が分かれた。本実験では、障害物の移動を下半分が覆われたゴーグルを用いて視覚的に遮ったものの、駆動音を遮断する聴覚的な対策を講じなかったために、複数回の試行の中で被験者は障害物の移動および衝突を予期するようになったと考えられる。被験者が衝突を予期して歩容を変化させたため、衝突のタイミングおよびその時の姿勢が通常歩行時のものと乖離した。

つまずいたタイミングから回復脚の次の脚が踵接地するまでの各回避動作における通常歩行時と Elevating strategy での膝関節角度、股関節角度の変遷を図 6 に示す。歩行レーンで障害物への衝突によりつまずきを再現した左側の J. Eng らの先行研究^[2]と右側の本実験結果の傾向は一致した。したがって歩行レーンでの転倒実験とトレッドミルを用いた本実験系では下肢の反応動作についてはある程度再現されていると考えられる。なお図 5, 6 は各条件 8 試行、計 16 試行のうち、つまずきのタイミングが歩行周期 69%となった試行を代表的な試行として描画したものである。

障害物衝突の瞬間から、回復脚の踵接地のタイミングまで、支持脚のつま先を支持点とした重心の進行方向の前転モーメントの変遷を図 7 に示す。歩行レーンで障害物への衝突によりつまずきを再現した上側の Pijnappels らによる先行研究^[3]と右側の本実験結果では、どちらの回避動作でも、回復脚が接地するまでにモーメントが抑制され、負の値となっており、すなわち角運動量の減少を意味している。これは Pijnappels らにより報告された、若年層ではつまずきの後、支持脚によって角運動量を抑制させる機能が高いことと一致する結果となった。

Pijnappels らによる先行研究^[3]ではつまずいてからのモーメントが負から正值になるまでの時間が 0.02 秒程度で、モーメントは最大約 150 Nm、最小約 -30 Nm であるのに対し、本実

験結果では約 0.1 秒でモーメントは最大約 500 Nm, 最小約 -400 Nm となった. 負の値の期間と正の値の期間の割合や, 値の絶対値の割合が大きく異なる.

これらの違いはどちらも, 本実験系の特徴である遊脚が障害物と接触している間, ベルトが加速されることによって身体の支持点が後方へ送られることに起因すると考えられる. 遊脚が障害物と衝突すると, 障害物から離れるまで両者の相対速度は 0 となる. 地上歩行中と異なり本実験系ではベルトが加速するので, 支持脚は後方へ移動し, 重心と支持点の矢状面距離が大きくなる. すると遊脚が障害物に押し付けられるため, 障害物から離れて前方へ送るためにはより長い時間が必要となる.

また, 本実験では障害物は被験者下肢部と衝突した後, 被験者後方へそのまま等速移動するので, モーメントが負である時間も長くなる. 遊脚が障害物と離れた後も, 重心と支持点間の距離が大きいことにより, 地上での実験に比べ正のモーメントも増大する.

3. 結言

トレッドミル上でつまずき転倒を誘発する実験系を開発し, 歩行レーンでつまずきを再現した先行研究と比較することにより, 本実験系の妥当性を検証した.

各関節角度については歩行レーンでの先行研究結果と大きく逸脱することはなく, その変遷は相似的であった. 一方, つまずいた後の前転モーメントの変遷は大きく異なった. 障害物と同時に適切なトレッドミルの加速条件を付加することによって, 従来の歩行レーンでの転倒実験よりも現実に即した転倒動作の計測が行えることが示唆された.

参考文献

- [1] M Pavol, T Owings, K Foley, and M Grabiner. Mechanisms leading to a fall from an induced trip in healthy older adults. The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences, Vol. 56, No. 7, pp.M428-M437, 2001.
- [2] Janice J Eng, David A Winter, and Aftab E Patla. Strategies for recovery from a trip in early and late swing during human walking. Experimental Brain Research, 102(2):339-349, 1994.
- [3] Mirjam Pijnappels, Maarten F. Bobbert, and Jaap H. van. Push-off reactions in recovery after trip-ping discriminate young subjects, older non-fallers and older fallers. Gait & Posture, 21(4):388-394, 2005.