

# 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

## Validation of trip-induction system on a treadmill by comparison with a walking lane

○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, which account for a significant proportion of falls in the elderly, often result in the serious injury. A highly accurate fall-risk evaluation method will be increasingly required in the aged society. For this purpose, it is necessary to observe more realistic reaction motion against tripping. Thus, we developed a method to induce tripping at arbitrary timing during walking in the laboratory using a treadmill and evaluated the validity of the method by analyzing the reaction motion. At the same time, another experiment, which induces trip in a walking lane, was conducted. Then, they were compared each other. In this study, the difference in sensory comfort rate between treadmill walking and ground walking was focused on. It is necessary to determine whether individual differences in response to trip-induction depends on what kind of conditions. It is considered to be either the experimental system and conditions, or the gait difference inherent to the subject.

**Key Words:** Tripping, Treadmill, Recovery motion, Gait analysis

### 1. 緒言

現在多くの国で高齢社会となっているが、転倒は高齢者の生活水準を下げる要因の一つである。転倒を引き起こす代表的な要因として、つまずき挙げられる。したがって、つまずきのリスクを見積もり、予防への策を講じることが社会的に求められている。それには、自然な転倒動作の計測および解析が必要である。これまで多くの研究者は、実験的に転倒を再現することによって、転倒現象の理解に努めてきた。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<sup>[1]</sup>。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動作である。

このように実験室内に用意した歩行路に障害物を固定し、つまずきの動作を計測する方法は、歩容が実際の歩行と同一である利点がある。しかし走路長の制限により、被験者が障害物と衝突するタイミングを予想するのを防止することが困難である。特に若年者は実験的な転倒試行に順応しやすいため、転倒の予期を十分に防がなければ、さらに自然な転倒動作から乖離する可能性がある。

そこで本研究グループでは、トレッドミル上でつまずきを誘発する実験系を開発した。それは、トレッドミル上で歩く被験者に対して障害物が接近、衝突することによって、つまずきを誘発する実験装置である。上述した歩行路での転倒実験と比較して、トレッドミル上では走路長の制限がないため、連続的な計測が行える。そのため、被験者の不意をついた転倒刺激によって、より現実に近い転倒動作の計測が可能になると考えられる。一方、トレッドミル上では、地上歩行と比較して、歩容がいくつかの面で異なることが多くの先行研究によって報告されている。久保らによれば、トレッドミル歩行中の人間は心理的な要因によりトレッドミル歩行中と比較して、歩行速度を約 1.5 倍速く知覚する<sup>[2]</sup>。すなわち、普段の歩行速度をトレッドミルに適用すると、大幅に速く感じる。そこで本研究では、両者の体感速度の差異が転倒現象に対してどのような影響を及ぼすのかを調査し、トレッドミル上での転倒実験を地上歩行中の転倒実験と同様にみなすための条件を解明することを目的とする。

### 2. トレッドミル上転倒誘発実験装置の妥当性検証

#### 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。本実験系の概略を図 1 に、転倒刺激に対する反応の様子を図 2,3 に示す。

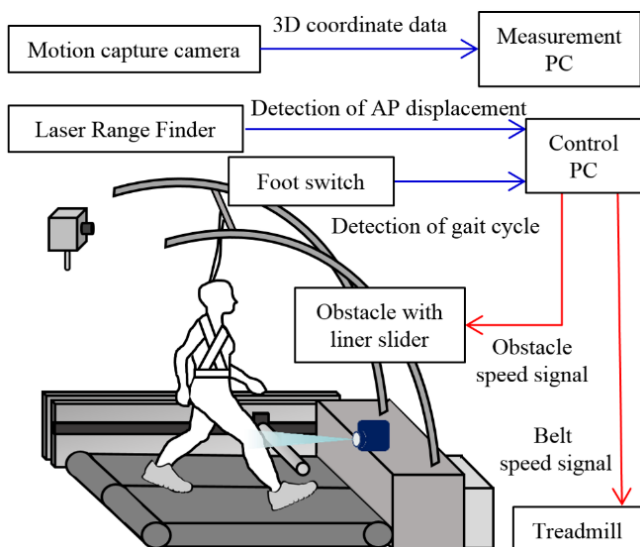


Fig. 1 Experimental overview; Based on the walking cycle detected by the foot switch and the Laser Range Finder, the linear slider with the obstacle moves toward the lower limb of the subject at the set timing

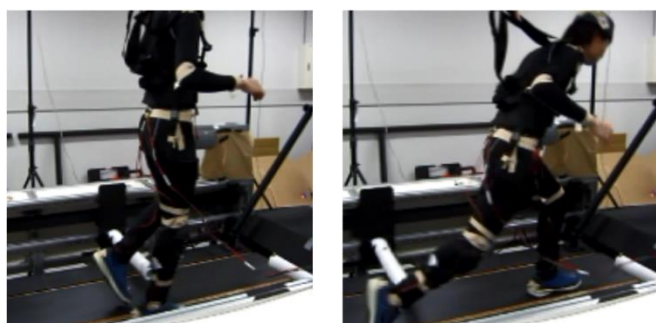


Fig. 2 Perturbation during early swing phase (left: trip, right: recovery step)

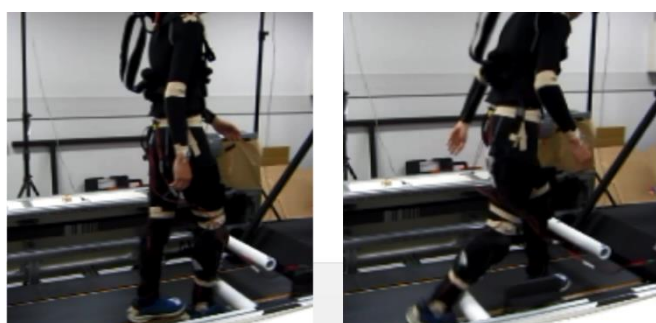


Fig. 3 Perturbation during mid swing phase (left: trip, right: recovery step)

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・バレイ社製)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 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。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) をトレッドミル前方に設置した。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。

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。

被験者がトレッドミル歩行を開始し、歩容の安定を確認した後、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アルゴリズムを実装した。光学式のモーションキャプチャシステム(OptiTrack)を用いて外乱時の反応動作を計測する。

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

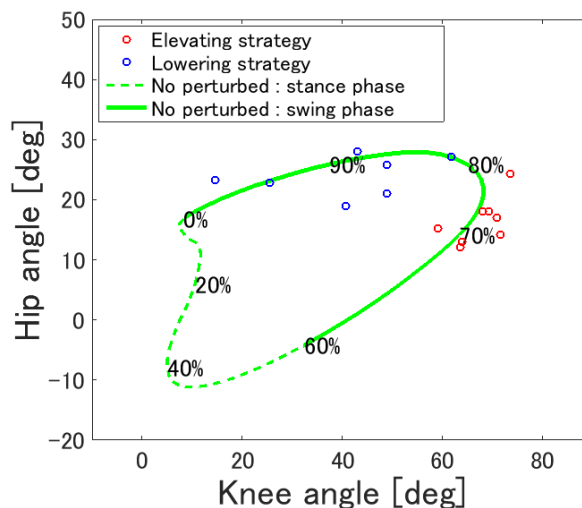


Fig. 4 Relation between hit timing and joint angle

## 2.2 実験条件

実験は、本学工学部倫理部会の承認のもとに実施した。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。歩行速度は 3 km/h に設定した。

## 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。1 名については光学マーカの認識率が著しく低く、動作解析が困難であったため解析を行わなかった。

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 2, 3 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 4 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。

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、装置の駆動音を遮断できなかったために、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測するようになったと考えられる。被験者が衝突を予測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ものの、本研究のトレッドミル上転倒誘発実験装置により、所望の転倒回避戦略を再現することが可能であるといえる。

### 3. トレッドミル上と歩行レーンでの転倒現象の比較

#### 3.1 実験手順の検討

歩行速度を条件として反応動作の変化をトレッドミル、歩行レーンで比較する。一般的な歩行解析において、速度条件による変化を比較する際、基準として用いる速度条件は、複数の被験者に対して同じ速度を用いる場合、あるいは、被験者ごとに自身の快適速度を適用する場合がある。前者では、複数の被験者がある程度同じような歩容をすると予測できる利点がある。後者では、被験者のより自然な動作を計測できるという利点がある。

本研究では第一にトレッドミルにおいて、被験者が選択した自身の歩きやすい速度すなわち快適速度に調整し、転倒実験を行う。第二に、歩行レーンにおいて被験者の地上歩行における快適速度で転倒実験を行う。第三に、第一の実験で得たトレッドミル上での被験者の快適速度を、地上歩行でメトロノーム等によって実現し、転倒実験を行う。第一と第二、第一と第三の反応を比較することによって、転倒刺激に対して双方で同様な反応を得るためには、物理的な速度および感覚的な速度のいずれかが転倒現象に対して支配的な影響を及ぼすかが明らかになると期待される。そしてトレッドミル上で、歩行レーンでの転倒実験と同様な反応を計測することが可能になれば、本実験系は歩行レーンでの転倒実験の代用手段とすることができる。これにより、本実験系によって、より現実に即した転倒現象を簡便に再現するだけでなく、歩行レーンでは実現困難な条件を追加し、転倒に対する反応動作について、さらなる解析を行うことができると考えられる。

#### 3.2 実験条件

実験は、本学工学部倫理部会の承認のもとに実施した。前節で述べた手順にしたがって、第一、第二、第三の実験を行った。被験者は健康な成人男性 2 名である。第一のトレッドミル実験では実験前に 5 分程度の歩行練習を行い被験者の快適速度を取得し、以降の実験の歩行速度に適用した。同様に第二、第三の歩行レーンでの実験では、実験前に、被験者の自然な歩行速度を快適速度と定義した。また、転倒誘発以前の 4.5 歩程度の助走時に、被験者が快適に歩行できる歩幅に合わせて設置した棒状の目標物を注視させることによって歩幅を統制した。加えて、メトロノームを使用することで、被験者の快適速度を実験中に維持した。

一人目の被験者について、第一のトレッドミル上の実験では、計 10 試行の中から、Elevating strategy, Lowering strategy それぞれ 2 試行ずつ、およびダミー試行を 5 試行取得した。ダミー試行の速度は  $0.97 \pm 0.04$  m/s であった。第二の地上実験では計 23 試行の中で Elevating strategy, Lowering strategy をそれぞれ 12 試行、2 試行取得した。また 5 回のダミー試行から取得した速度は  $1.38 \pm 0.09$  m/s、歩行周期は  $1.04 \pm 0.04$  s、ストライド長は  $1.40 \pm 0.05$  m であった。第三の地上実験では計

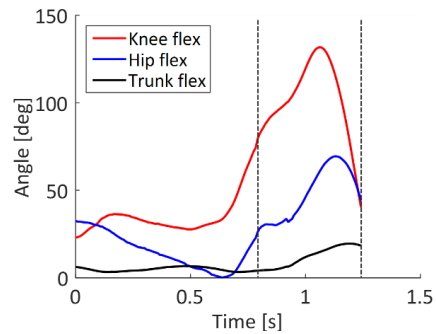


Fig. 5 Joint angle; Overground fall experiment (Subject 2)

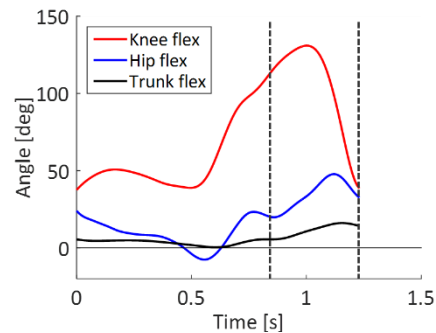


Fig. 6 Joint angle; Treadmill fall experiment (Subject 2)

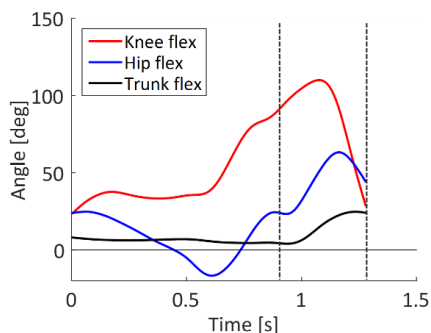


Fig. 7 Joint angle; Overground fall experiment (Subject 2)

23 試行の中で Elevating strategy のみ 21 試行取得した。また 10 回のダミー試行から取得した速度は  $1.02 \pm 0.05$  m/s、歩行周期は  $1.28 \pm 0.08$  s、ストライド長は  $1.36 \pm 0.14$  m であった。同様の手順で障害物衝突のタイミングの条件を遊脚初期に絞り、二人目の被験者に対して第一から第三の実験を行った。第一の実験では、計 12 試行の中から、Elevating strategy を 8 試行、およびダミー歩行を 10 試行取得した。ダミー試行の速度は  $0.97$  m/s であった。第二の地上実験では計 11 試行の中で Elevating strategy, Lowering strategy を 8 取得した。また 5 回のダミー試行から取得した速度は  $1.36 \pm 0.05$  m/s、歩行周期は  $1.05 \pm 0.02$  s、ストライド長は  $1.41 \pm 0.05$  m であった。同様に第三の地上実験では計 12 試行の中で Elevating strategy を 6 試行取得した。また 5 回のダミー試行から取得した速度は  $1.00 \pm 0.05$  m/s、歩行周期は  $1.28 \pm 0.08$  s、ストライド長は  $1.43 \pm 0.07$  m であった。



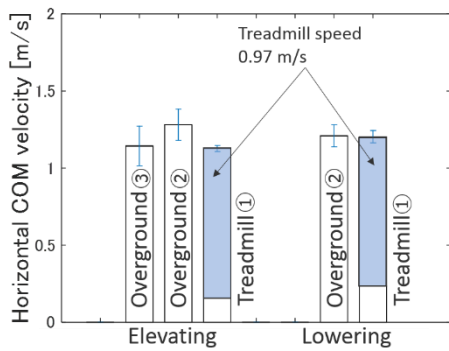


Fig. 8 Horizontal COM velocity at recovery step (Subject 1)

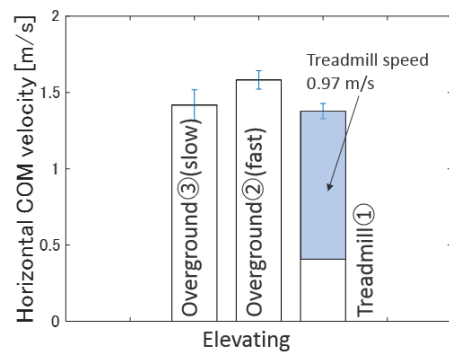


Fig. 10 Horizontal COM velocity at recovery step (Subject 2)

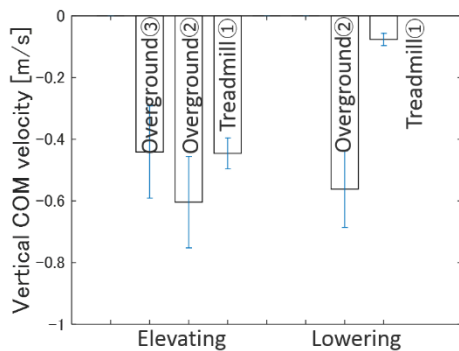


Fig. 9 Vertical COM velocity at recovery step (Subject 1)

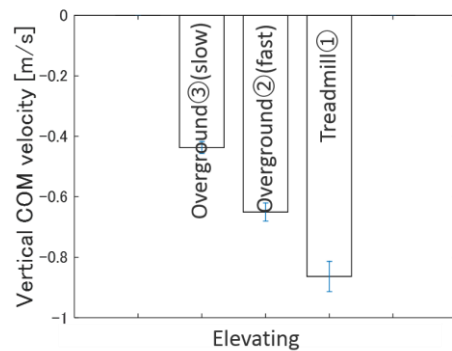


Fig. 11 Vertical COM velocity at recovery step (Subject 2)

### 3.3 実験結果

図 5,6,7 は被験者 2 のつまずいた足の踵接地から、つまずきを経て回復脚接地のタイミングまでの膝関節、股関節角度と体幹角度の変遷を表す。図中の破線は時刻の早いほうからそれぞれ障害物衝突および回復脚接地を表す。各関節角度については以下の二つの傾向があった。まず、膝関節角度の最大値は、第一、第三の実験の間で同様であった。これは感覚的に同速度である条件のほうが転倒刺激に対して同様な反応であったことを示す。次に、股関節角度の最小値付近で、トレッドミル実験では負の値にならなかった。事前に行ったダミー試行では負の値が検出されているため、これは、被験者が障害物衝突を予期して歩容を変化させている可能性を示している。これら 2 つの傾向は被験者 2 名で共通してあらわれた。

つまずいた脚を回復脚として接地した瞬間の重心 (center of mass ; COM) の水平速度、降下速度を図 5 から 8 に示した。なお図 6,8 中の塗りつぶされた箇所はトレッドミルのベルト速度を表す。Elevating strategy での重心降下速度について比較すると、図 7 の被験者 1 では第一、第三の大きさがおよそ等しい。一方図 8 の被験者 2 では第一のトレッドミル実験での大きさが大幅に第三の地上実験での大きさを超えている。これは被験者間のトレッドミル歩行に対する慣れの程度の差が原因である可能性がある。

### 4. 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た。設定したタイミングでつまずきを誘発するアルゴリズムを実装し、代表的な二種の転倒回避動作を任意に再現することが可能となった。また、歩行レーンにおいてもつまずきを誘発する転倒実験を行って、本実験系の反応動作と比較した。その際、トレッドミル歩行と地上歩行における感覚的な快適速度の差に注目した。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 久保晃, トレッドミルの歩行速度の知覚について, *運動生理*, 6(1):33-38, 1991