

足底への傾斜による歩行誘導の評価

若野達哉^{†1} 永谷直久^{†1}

歩行誘導の研究において、視覚や前庭感覚、触力覚などの様々な感覚情報を用いた研究が提案されている。本論文では、歩行中に地面との接触によって様々な情報を得ていると考えられる足裏への刺激に着目し、足裏への傾き提示による歩行誘導システム開発のための基礎的な知見を得ることを目的として実験を行った。実験では、歩行に影響しやすい傾斜角度や傾斜部位に関する様々なパラメータを条件に歩行への影響を調査し評価した。

1. はじめに

我々は様々な感覚器からの情報を元に環境を把握し、状況に合わせて行動を変化させている。歩行もその行動の一つであり、路面の状態に合わせて歩様を変化させることや、障害物を回避するなど予想される危険を回避するために歩行行動を適時変化させている。実際に、進行方向に障害物があると進行方向を変化させ、左右に避けるといった行動を行うはずである。これは視覚による障害物の認識を行うことで行動変化を行なっている。しかし、歩きスマホのように視覚をスマートフォンの画面に集中してしまうと、前方に障害物があっても認識することができずに衝突してしまう。このような問題を解決するために、周囲の状況に合わせて視覚以外の感覚に刺激を提示することで、歩行をナビゲートするといった歩行誘導の研究が多くなされている。

歩行誘導の研究では、視覚¹⁾や前庭感覚²⁾での運動誘発を用いた研究もあるが、本研究では足裏への触力覚提示に着目した。足は人が歩行する上で地面と直接接触している部分であり、足底に関しては小さな異物や小さな傾斜であっても感じることができていることが知られている。足裏への触覚提示による歩行誘導の先行研究に Frey による CabBoots²⁾があり、足裏への傾斜による歩行誘導が可能であることが報告されたが、具体的な傾斜角度や傾斜を提示するための最適な足裏部位に関する知見がない。

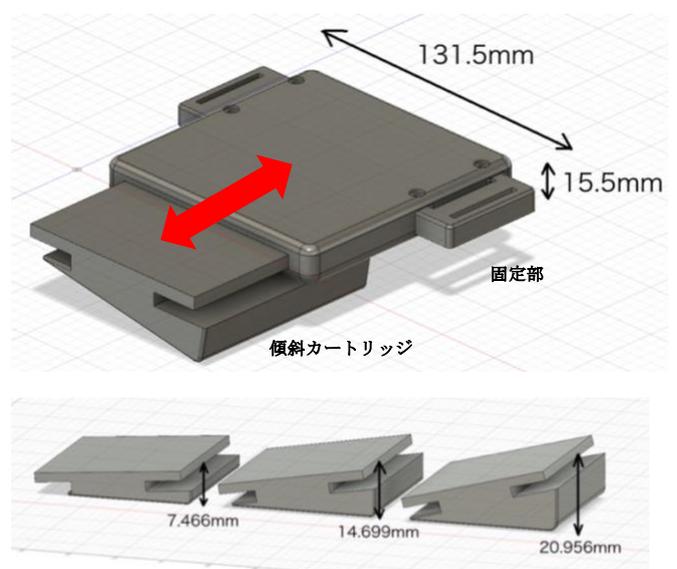
そこで本研究では、足底への傾斜提示による歩行誘導システム開発をするための基本的な知見を得ることを目的として、様々な傾斜角度や傾斜部位を条件に歩行への影響を調査し評価を行った。

2. 傾斜提示装置作製と予備実験

2.1 傾斜提示装置作製 1

足底の触覚感度は踵部よりつま先部の方が高いことが知られており³⁾、傾斜提示する部位が異なることで歩行への影響が異なることが予想される。そこで、図1に示すつま先部と踵部に異なる傾斜角度を提示できるデバイスの開発を行った。製作するにあたって、CabBootsと同様にアウト

ソールに対して装着できる方式とし、図2のように靴を履いたままでも装着できるようにした。さらに、足の大きさは人によってサイズが違うため、様々なサイズに対応できるようにつま先側と踵側が分離できるようにした。傾斜角度は15度、10度、5度の3種類の傾斜となるようにカートリッジ式とした。装置は全て3Dプリンタを使用して作製した。



右上がり傾斜角度 5度,10度,15度

図1 傾斜提示装置



図2 装置装着図

2.2 予備実験 1

製作した傾斜提示装を用いて、傾斜提示部位と傾斜角度の歩行への影響を調査した。被験者に装置を装着した状態

^{†1} 京都産業大学大学院 先端情報学研究所

の歩行と普通の歩行とどういった違いがあったか、足首の負担など違和感がないか伝えてもらった。被験者として成人男性2人の学生に装置を装着してもらい歩行を行った。歩行を行う際に視覚による補正をなくすために閉眼状態で行った。さらに、幅が2mで両端が壁であるため被験者に危険が及ばないように危険方向に向かう時には静止を呼びかけた。

実験環境は、図3に示すように歩行距離が直線距離で10mとなるまで歩行してもらった。実験条件は両足に装置を装着してもらい、傾斜方向に関して2条件、傾斜角度と提示部位に関して5条件で実験を行った。条件の詳細を以下に示す。

傾斜方向：

1. 右上がり
2. 左上がり

傾斜条件：

1. つま先：5度 踵：5度
2. つま先：10度 踵：10度
3. つま先：15度 踵：15度
4. つま先：5度 踵：15度
5. つま先：15度 踵：5度

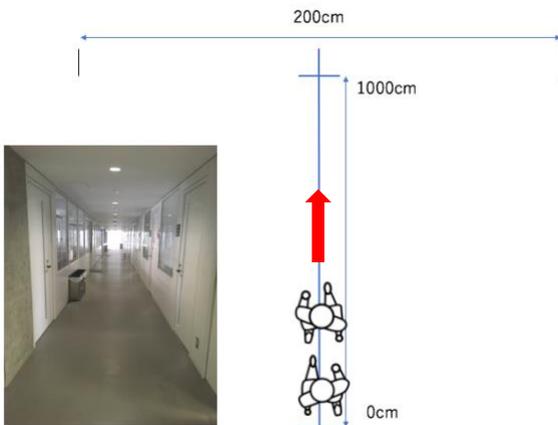


図3 測定環境

2.3 結果

歩行の結果の傾向として表1に示す。被験者によって影響の大きさが異なったが、右上がりでも左に曲がりやすい傾向、左上がりでも右に曲がりやすい傾向が見られた。さらに、つま先部に傾斜角度が大きく提示することで、つま先と踵の両方に提示した時と同じ傾向が見られた。踵部のみの提示では影響が少ない傾向が見られた。

被験者2人に共通した傾向として、傾斜角度が15度で傾斜が急すぎて歩きづらく直進することが困難であり、強制的に誘導される感覚になったと報告された。10度では、

ある程度歩行に影響がでるが強制されるほどの感覚ではない、5度だと傾斜を感じるが気になる程度の感覚ではないと報告された。

実験における装置の問題として、装置を装着した状態の歩行で装置自体がずれて歩行しづらいという報告があった。また、歩行の際に装置が人の体重に耐えられず破損、または装置のエッジの部分でつまずきかける問題が発生した。

表1 各条件の結果

		被験者 A	被験者 B
右上がり	つま先：5度 踵：5度	↑	↶
	つま先：10度 踵：10度	↶	↶
	つま先：15度 踵：15度	↶	↶
	つま先：5度 踵：15度	↑	↷
	つま先：15度 踵：5度	↶	↶
左上がり	つま先：5度 踵：5度	↷	↑
	つま先：10度 踵：10度	↷	↷
	つま先：15度 踵：15度	↷	↷
	つま先：5度 踵：15度	↑	↑
	つま先：15度 踵：5度	↷	↷

2.4 考察

製作した傾斜提示装置では、歩行の際にずれてしまい自然な歩行を行えない。さらに、歩行中に装置自体が破損、またはつまずくといったことも報告された。以上から、この実験において正しい結果が出ていると言えないと考えた。そこで、傾斜提示装置をこの実験で発生した問題を考慮して再製作し再び実験を行なった。

2.5 傾斜提示装置製作2

アウトソールでの問題を考慮してインソールの装置に変更を行った。インソールにすることにより歩行による装置のずれ防止になり、歩行運動を阻害しにくい設計にした。インソールとして製作するにあたり、強度の他に柔軟性も必要とするため、弾性のあるマテリアルを使用した。サイズは一般的に販売されている26.5~27.0cm靴底を参考に作成した。

傾斜角度に関して、予備実験1から15度では傾斜が急

で歩きづらいことや、5度ではあまり感覚を感じないという報告をもとに、傾斜角度を10度に設定して製作した(図4、図5)。



図4 インソールつま先部



図5 インソール全体

2.6 予備実験2

被験者に製作したインソール型の装置を被験者の靴底に装着して歩行を行なった。予備実験1と同様の環境で実験を行い、同様に左右が壁になっているため被験者に危険が及ばないように静止の呼びかけを行った。

実験条件として、傾斜角度10度の際に曲がって歩行していることを認識しており、意識すれば直進することが可能という報告から、触感覚による補正を条件に加えて以下の条件で実験を行った。被験者は靴のサイズが26.5～27.5cmの成人男性3名で実験を行った。

傾斜方向：

1. 右上がり
2. 左上がり

傾斜条件：

1. つま先部と踵部両方
2. つま先部
3. 踵部

2.7 結果

実験結果を表2に示す。予備実験1と同様に被験者ごとに影響の大きさが違った。しかし、被験者Cでは一部を除く条件で変化が見られず直進する傾向が多かった。

被験者3人共に共通するのが、右上がり補正なしでつま先部と踵部の両方に傾斜を提示した時に、左に曲がる傾向が出ており、補正ありでは共通する結果がほとんど現れな

かった。被験者Dと被験者E共に右上がり補正なしで予備実験1と同様につま先部で左に曲がる傾向が出ており踵部で直進する傾向が出た。

表2 各条件の結果

		被験者C		被験者D		被験者E	
		補正なし	補正あり	補正なし	補正あり	補正なし	補正あり
右 上 が り	両方	↶	↑	↶	↶	↶	↑
	つま先	↑	↶	↶	↶	↶	↑
	踵	↑	↑	↑	↶	↑	↑
左 上 が り	両方	↑	↑	↷	↑	↷	↑
	つま先	↑	↑	↑	↑	↷	↑
	踵	↑	↑	↷	↶	↑	↑

3. 測定方法の検討

傾斜提示による歩行への影響を調査するために、歩行距離や左右の変動を定量的に計測する必要がある。計測方法として、OpenCVを使用した画像処理を用いて計測する方法を提案した。しかし、画像処理では計測された左右の変化の大きさと実際の変化の大きさでは誤差が生じてしまう。そのため、発生する誤差が許容できるかどうか判断する必要がある。よってOpenCVを利用した左右の変動の測定を行うプログラムを作製し、測定された大きさと実際の大きさを比較し誤差の計測を行った。

3.1 検討方法

OpenCVの処理として背景差分を利用した数値を利用した計測を行い、左右の200cmの地点の数値から基準となる1cmの数値を求め実際の距離を計測した。

測定環境を奥行き500cm、取ることができる最大の9mの2箇所計測を行い、左右200cmずつ計400cmの幅を取った。計測地点として左に20cm右に50cmずつ区切って印をつけた。そして印を目印に動画を撮影し、画像処理による距離と比較を行い誤差の計測を行った。測定環境を図6に示す。

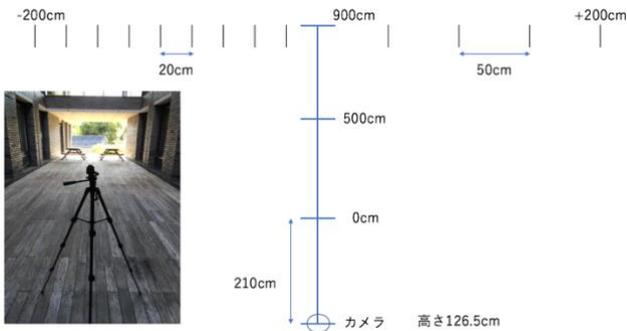


図6 測定環境

3.2 結果

各地点の結果を図7と図8に示す。棒グラフにおける縦軸を単位 cm とした誤差の大きさ、横軸の項目を奥行き地点における左右の幅の印の地点を示しており進行方向を正面とした場合、右を正、左を負の数値として各地点を基準に測定を行った結果である。奥行き 500cm, 900cm 地点で一部をのぞいて誤差が±5cm に収まった。

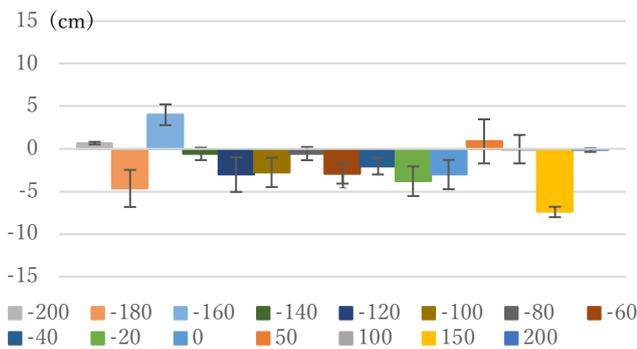


図7 5m 地点の実際の距離との誤差

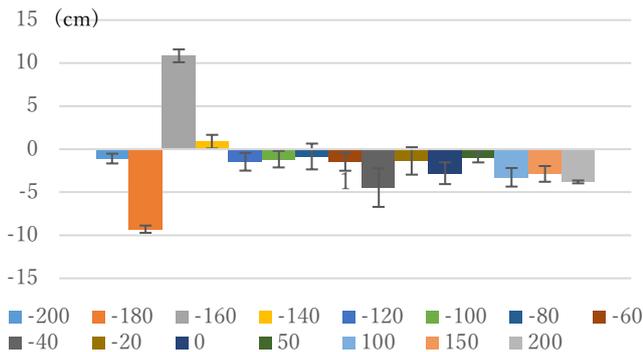


図8 9m 地点の実際の距離との誤差

3.3 考察

9m 地点での計測では 5m 地点の誤差と同様に 5cm 未満に収まっているが -180cm と -160cm 地点では誤差が 10cm と大きく出た。逆地点である 100cm, 150cm, 200cm の地点では誤差が 5cm 未満に収まっていることから計測する際の基準となる印を付ける際に実際の数値とズレが生じた可能性、または計測の際に印の位置にズレて静止した可

能性があると考えた。よって歩行において 5cm は誤差として許容できると考えるため変化の計測が可能であると考えた。

4. 実験

本実験では、足底に図6のインソールを使用することによる 10 度の傾斜提示で歩行を行なった。被験者が所持する靴での実験では被験者ごとに靴底の削れ方が違うため図9の靴を用いて実験を行なった。被験者として 26.5cm～27.5cmの範囲に入る足のサイズをした成人男性4名に行なった。進行方向と歩行距離を被験者間で、ある程度統一する必要があるためリズムによる引き込みを利用して行ない、さらに視覚による補正が強すぎることから歩行の際には閉眼状態で行なった。

被験者には、足幅 20cm 一步の距離を 50cm に設定した 4 歩をリズムに合わせて開眼状態で歩行、その後リズムに合わせて 10 歩歩行を行い静止してもらうように説明をした。計測の際には背景差分を利用した画像処理のためカメラの明るさを上げ、被験者には黒いドライ T シャスを着用してもらい実験を行なった。リズムのテンポとして自然な歩行に現れやすいとわかっている⁵⁾テンポ 100 に設定して行なった。実験条件を予備実験 2 の時と同様の条件を使用して 1 条件につき 5 試行歩行実験を行なった。実際の実験環境を図 10 に示す。



図9 実験に使用した靴

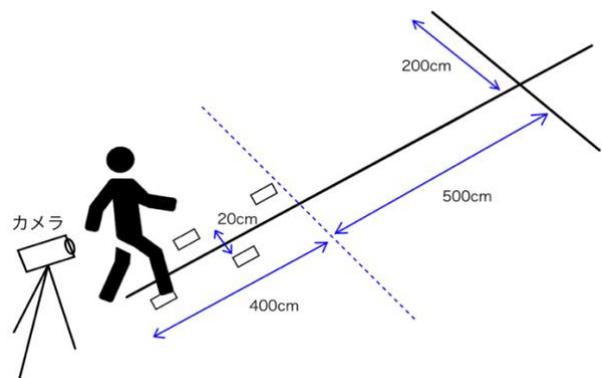


図10 測定環境

4.1 結果

歩行実験から各被験者の各条件における5試行分左右の移動量の平均値を求めた。被験者4人に似た傾向が確認されたためその代表とする結果を図11に示す。縦軸が左右の移動量を示し、横軸が各条件を示す。

傾斜による感覚補正ありでの各条件ではすべての被験者において移動量の大きさが小さかった。被験者によって移動量の大きさが違うが右上がりの条件では左方向、左上がりの条件では右方向に移動した。4人中3人でつま先部と踵部両方に傾斜提示する条件が最も大きく移動しており100cm以上の移動量が見られた。その他の補正がない条件であっても左右の移動量が見られた。

4.2 考察

10度の傾斜による歩行への変化は、傾斜に抗わずに歩行を行うと5mの歩行で最小でも1m以上の変化が見られたが、感覚による補正をかけることによって直進することがわかった。そのため、被験者の意識によって歩行への影響が変化することがわかった。さらに、足底全体に対して提示するよりも、つま先部や踵部に提示する方が左右の移動量が小さいことから、傾斜提示面積が小さくなると左右の移動量も小さくなると考えられる。

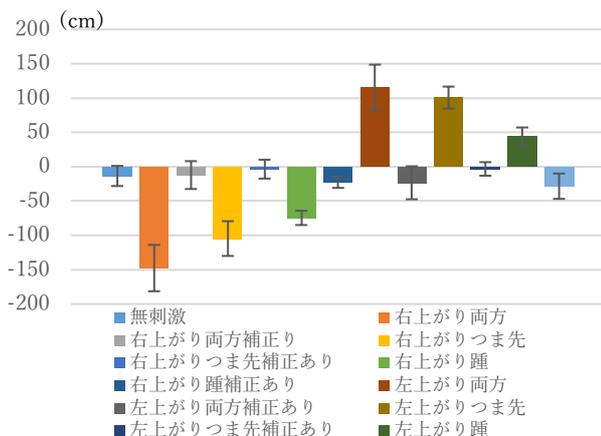


図11 左右の移動量の平均値

5. まとめ

本研究では、足底の提示領域に着目して傾斜を提示し歩行にどのような影響があるのか調査を行なった。先行研究である CabBoots から装着式のアウトソールを作製したが被験者の足に固定させることは難しく、自然な歩行の妨げになることがわかったため装着型のインソールに変更して実験を行なった。歩行実験では OpenCV による画像処理で計測を行い、足底の提示領域につま先部と踵部その両方、さらに被験者の感覚による補正の有無を条件に行なった。結果として感覚による補正で直進性が現れ、補正がない場合に傾斜方向に曲がることを確認された。しかし本実験では傾斜角度を10度に固定して実験を行なっているため今後の発展として傾斜角度による影響の調査を行いたい。さらに、歩行誘導システムや感覚提示システムを開発するにあたり一定の角度を提示し続けるのではなく、傾斜角度を歩行中に変化させることができる装置を開発し、歩行への影響を調査するように発展させていきたい。

6. 参考文献

- 1) Masahiro Furukawa, Hiromi Yoshikawa, Taku Hachisu, Shogo Fukushima, Hiroyuki Kajimoto, Vection Field for Pedestrian Traffic Control, Augmented Human international conference (2011).
- 2) 前田太郎, 安藤英由樹, 渡邊淳司, 杉本麻樹: 前庭感覚電気刺激を用いた感覚の提示, バイオメカニズム学会誌, vol.31, no.2 (2007).
- 3) Frey, Martin.: "CabBoots: shoes with integrated guidance system." Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction. ACM (2007).
- 4) 原田寛之. "歩行感覚支援のための足底刺激アクチュエータの研究開発." (2015).
- 5) 安倍希美, 椎名由深子, 鈴木敏朗: 運動とテンポ. 発育発達研究 24: 52-58, (1996).