

装着型靴底傾斜角度制御インタフェースの開発と歩行誘導への応用

若野達哉^{†1} 永谷直久^{†1}

歩行誘導装置の研究として、これまでに靴底内部にアクチュエータを配した傾斜提示装置の開発などが行われてきたが、使用できるユーザの足のサイズが限定的であり、傾斜角度と歩行軌跡への影響に関する定量的な評価も行われていなかった。

本研究では、様々な靴に対して適応可能な装着型の傾斜提示装置機構の提案を行う。さらに、提案手法を用いて、歩行中にロール角で最大 10 度までの任意の傾斜を提示可能な装置を製作し、評価実験として提示傾斜角度に対する歩行軌跡の時間変化の評価を行った。

1. はじめに

我々の行動の一つでもある歩行は、様々な感覚器からの情報を元に周囲の環境を把握し、目的の位置や方向に移動することや予測される危険を回避するなど状況に合わせて変化させている。これらは視覚による認識で行動変化させているのがほとんどあり、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い周囲の環境を把握できずに危険な目に合うという問題がある。こういった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器を刺激提示することで、歩行をナビゲートするといった歩行誘導の研究がなされている。

多くの歩行誘導の研究では、ハンガー反射を利用した歩行誘導インタフェース¹⁾、振動を提示による歩行誘導インタフェース²⁾など視覚以外の感覚器に刺激提示することができるインタフェースの開発が行われている。先行研究に Frey による CabBoots³⁾があり、この CabBoots は靴底内部にアクチュエータやセンサが内蔵されており足裏に一定角度の傾斜提示ができるインタフェースである。しかし、この CabBoots は靴と一体型であるため使用できるユーザの足のサイズが限定的である。さらに歩行誘導が可能であることが報告されたが、具体的な傾斜角度と歩行軌跡への影響に関する定量的な評価も行われていない。

そこで本研究は、様々な靴に対して適応可能な装着型の傾斜提示装置機構の提案を行う。さらに、提案手法を用いて、歩行中任意の傾斜を提示可能な装置を製作し、評価実験として提示角度に対する歩行軌跡の時間変化の評価を行った。

2. 傾斜角度制御手法の検討とインタフェースの開発

2.1 傾斜角度制御手法の検討

傾斜角度を制御する手法として傾斜を作っている三角形の高さ、もしくは底辺の長さを制御する手法と同等であると考えた。そして、傾斜角度を制御するにあたり次の表 1 に示す 5 種類の手法を提案した。

表 1 各傾斜制御手法

	CabBoots方式	送りねじ方式	巻き取り方式	渦巻方式	ロール角方式
動作イメージ図					
3D CAD 図					
提示角度	0度と一定角度の2段階	一定範囲の角度	段階的な角度	3段階	一定範囲の角度
角度変化速度	速	速	遅	遅	速

・ CabBoots を参考にした手法

先行研究である CabBoots を参考に、横にした板にアクチュエータを用いて立てかけることで高さを変化させる手法である。この手法は構造上簡易的であり、角度変化速度が速いことが利点であるが、提示することができる角度が 0 度と立てかけた時の角度の 2 段階のみである。

・ 送りねじを利用した手法

送りねじを利用した一定の高さの柱を移動させることで底辺を変化させる手法である。この手法は一定範囲で細かく角度を変化させることができるが、大きく角度を変化させる際に角度変化速度が遅い。

・ 巻き取り手法

一定の厚さのチェーンを巻き取ることで高さを変化させる手法である。この手法はチェーンの厚さが重なることで高さ変化するため段階的に角度を変化させることができるが、1 回転ごとにしか変化させることができないため角度変化速度が遅い。

・ 渦巻手法

角度によって半径が異なる渦巻を参考に角度によって高さを変化させる手法である。この手法は、回転角度によって高さを変えることができるため角度変化速度が速いが、考えた構造上角度変化を 3 段階のみである。さらに、傾斜角度が 0 度の時点で高さが約 3cm であり、最大傾斜角度で高さが約 5cm ある。

^{†1} 京都産業大学大学院 先端情報学研究科

・ロール角手法

大きい円弧上の一部を移動することで傾斜角度を変化させる手法である。円弧上を移動することで角度が変化するため細かく角度を変化させることができ、角度変化速度も速い。

これらの提案した 5 つの手法の利点欠点から、細かな角度調整と角度変化速度が速いロール角手法を用いる。しかし、ロール角手法を用いる場合、どのようにアクチュエータを用いて動作させるか考える必要がある。さらに、人の体重による負荷がアクチュエータに直接掛からないように考える必要がある。

2.2 傾斜角度制御インターフェースと制御システムの概要

2.2.1 インターフェース概要

開発したインターフェースは、傾斜角度変化に 2 つの DYNAMIXEL XL-320 と歯車を用いて動作させた。さらに動作後の負荷によるアクチュエータの破損を防ぐためにラチェット機構を取り入れ、SG-90 を用いて動作させた。それぞれのアクチュエータは、図 1 に示す通りつま先部と踵部の 2 か所に配置した。

動作には体重による負荷がない遊脚期に行くことを想定してつま先部に配置したタクトスイッチを用いて動作タイミングを検出できるようにした。

傾斜角度の計測をフォトフレクタである RPR-220 と縞模様を用いて角度計測を行った。1 つの縞模様で約 5 度変化するように幅 15mm にした。

センサやアクチュエータを内蔵するための外装を Formlabs 製光造形機である Form2 を用いてデュアブルレジンで造形し、片足総重量約 600g、高さ 3.1mm になった。3D CAD による動作イメージ図を図 2 に示す。

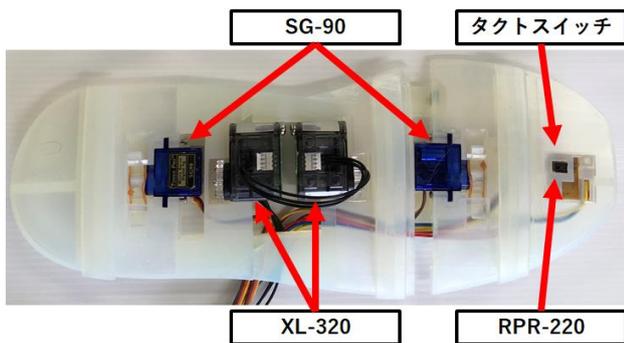


図 1 センサとアクチュエータ配置図



図 2 開発したインターフェース 3D CAD

2.2.2 制御システム概要

それぞれのセンサとアクチュエータを ESP32 を用いて制御を行った。

動作開始には、タクトスイッチによる遊脚期が検出された時に動作方向に従って SG-90, XL-320 の順に動作させる。動作停止には、フォトフレクタと縞模様から角度検出を行い、目標の角度に到達時に XL-320 を停止させ、SG-90 を傾斜方向の負荷を受けるように動作させた。全体の制御システム図を図 3 に示す。

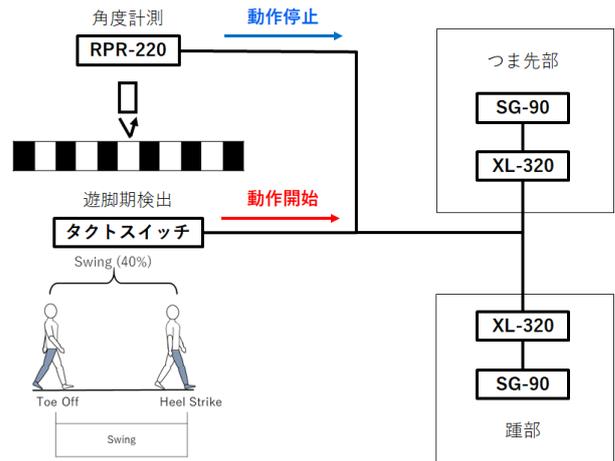


図 3 制御システム図

3. 予備実験

3.1 目的

前研究ではインソール型での固定傾斜角度の歩行への影響を調査したが、本実験で使用するのは開発した装着型のインターフェースであり既存の靴より数 cm 高く、既存の靴より歩きづらくなっている。よって傾斜角度を固定した状態での影響を調査し、本実験を行うための実験方法や環境、制御パターンや考えることを目的とする。

3.2 方法

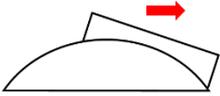
計測には、AR マーカーを利用した画像処理で行った。被験者として成人男性 2 人の学生に開発したインターフェースを装着した靴を履き、計測用の AR マーカーを貼った板を背負って約 5m の歩行実験を行った。実際の装着図を図 4 に示す。

歩行を行う際に視覚による無意識の補正をなくすためにアイマスクをした状態でいき、テンポ 100 のリズムに合わせて行った。

実験環境は、図 5 に示すように直線距離で 5m、横幅 4m で行った。被験者が壁にぶつからないように 5m 地点に紐を張り、危険方向に向かう時には静止を呼びかけた。

実験条件は、右方向の傾斜方向に対して傾斜角度と意識統制に関して 4 条件と傾斜角度なしを加えた計 5 条件で行い、各条件につき 5 試行を行った。条件の詳細は以下に示す。

傾斜方向条件：右方向



傾斜角度条件：

1. 5度
2. 10度

歩行意識条件：

1. 傾斜方向に従って歩行
2. 直進するように歩行



図4 装着図

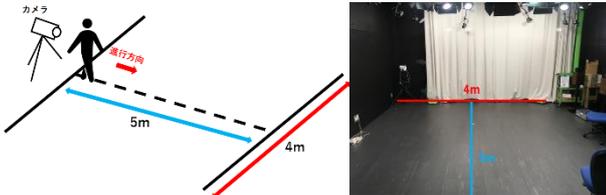


図5 実験環境

3.3 結果

固定傾斜角度による歩行実験から被験者2人に似た傾向が確認されたためその代表として各条件における歩行軌跡を図6、約5m歩行後の左右の平均変位と標準偏差を図7に示す。進行方向に向かって右方向を正、左方向を負とした。

2人の被験者に共通して、傾斜角度5度では意識条件に関係なく影響が見られなかった。傾斜角度10度では傾斜方向に従った条件だと傾斜方向と同様の右方向に向かう傾向が見られ、直進する意識条件だと左方向に向かう傾向が見られた。

3.4 考察

傾斜角度に従った条件では、傾斜角度5度の歩行への影響は小さく、傾斜が無い状態とさほど変わらない。しかし傾斜角度10度では、傾斜方向に影響が出る傾向が確認されたことから傾斜角度10度が傾斜を感じやすいと考えられる。さらに直進する意識条件では、ばらつきが大きくなる傾向があったがこれは、傾斜によって歩行が逸れていると感じ取り補正を行う際に補正の大きさをうまくコントロールできていないことが原因でばらつきが大きくなったと考えら

れる。傾斜角度5度のばらつきより傾斜角度10度のばらつきが大きいことから傾斜角度10度が感じやすいと考えられる。

固定傾斜角度では傾斜角度10度が最も傾斜角度を感じ取りやすいと考えるが、影響が表れても大きく影響しても約50cmであった。これは常時一定角度の傾斜角度を提示していることからの慣れが考えられる。人が危険回避などで行動を変化させるのは、周囲の環境が時間変化しているためである。そこで固定傾斜角度ではなく傾斜角度に時間変化を与えることでより傾斜角度がより感じ取りやすくなり予備実験の結果より歩行に大きな影響を与えると考える。

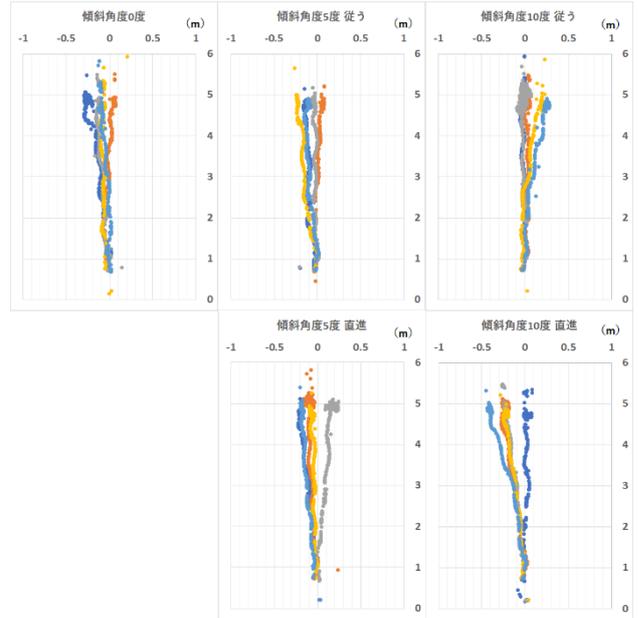


図6 被験者Aの歩行軌跡

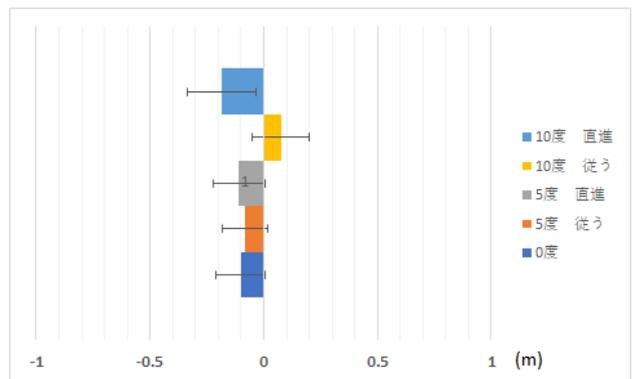


図7 被験者Aの約5m歩行後の左右の平均変位

4. 実験

4.1 目的

固定傾斜角度を提示し続けることによる慣れが影響していると考えられることから開発した傾斜角度制御インタフェースを用いて予備実験の結果から傾斜角度が時間変化する制御パターンを作成し、傾斜角度を制御することに傾斜角度の時間変化による歩行への影響を調査することを目的とする。

4.2 方法

計測と実験環境は、予備実験と同様の方法で行った。予備実験時の被験者からテンポが早いという報告や傾斜角度制御に必要な時間を考えテンポ 80 に変更し、リズムに合わせて歩行を行った。

傾斜角度制御パターンは、予備実験の結果から傾斜角度 10 度が一番変化しやすいことから傾斜角度 10 度になるように段階的に変化させるパターン、一度逆方向に傾斜角度 5 度提示後に傾斜角度 5 度提示するといった傾斜角度変化が 10 度になるパターンの左右を含めた 4 条件に予備実験と同様の意識統制の 2 条件を組み合わせた計 8 条件で行った。傾斜角度は 2 歩歩くごとに変化させ、各条件につき 5 試行を行った。以下に傾斜制御パターンを示す。

傾斜角度制御パターン：

1. 5 度→10 度
2. -5 度→-10 度
3. -5 度→5 度
4. 5 度→-5 度

歩行意識条件：

1. 傾斜方向に従って歩行
2. 直進するように歩行

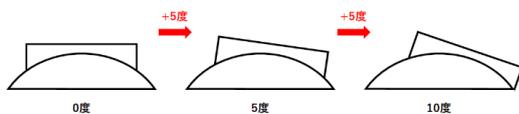


図 8 段階的变化パターン

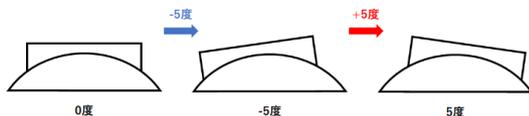


図 9 逆傾斜変化パターン

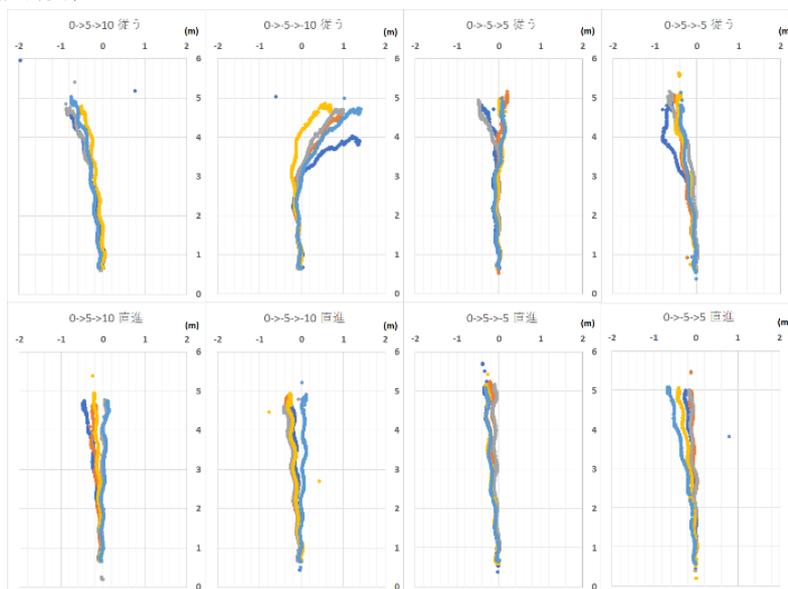


図 10 被験者 C の歩行軌跡

4.3 結果

傾斜角度制御による歩行実験から被験者 2 人に似た傾向が確認されたためその代表として歩行軌跡を図 10 に示す。さらに代表とする歩行軌跡から各条件における約 5m 歩行後の左右の変位の平均値を求め、図 10 に示す。進行方向向かって右方向を正、左方向を負とした。

2 人の被験者に共通して段階的变化パターンで傾斜方向に従った条件が一番大きく影響が現れた。個人差があるが大きいところでは 1m 以上の変化が見られた。直進する意識条件では制御パターンにかかわらず影響が見られなかった。逆傾斜変化パターンで傾斜方向に従った条件は、段階的变化パターンで傾斜方向に従う条件より影響が小さく歩行途中で方向が変化する傾向が見られた。直線する意識条件では、パターン関係なく影響が見られなかった。

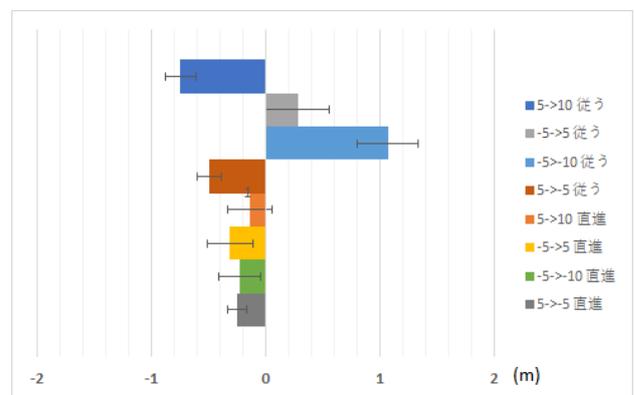


図 11 被験者 C の約 5m 歩行後の左右の平均変位

4.4 考察

結果から固定傾斜角度より傾斜角度制御の方が歩行に影響が出やすいことから時間変化のある傾斜角度が歩行に影響しやすいことがわかった。さらに、段階的に変化させるパターンが歩行に大きく影響を与えており、歩行軌跡から傾斜角度が 10 度に変化した付近から影響が出始めていた。このことから傾斜角度 10 度の変化が一番歩行に影響を与えているのではないかと考えられる。しかし、直進する意識条件だと影響が小さくなり直進することから傾斜角度制御は、歩行を強制的に変化させるほど強いものではないと考える。さらにばらつきがほとんど見られないことから時間経過に変化は直進する意識によつての補正のばらつきが少ないことが考えられる。

逆傾斜変化パターンでは、直進する意識条件では影響が小さいが傾斜方向に従う条件では、5 試行の内数回進行方向が変化しているのが見られた。実験時では逆傾斜を数歩しか提示しておらず、傾斜方向を明確に感じる前に傾斜方向を変更しているため逆傾斜による影響が少ないからだと考えられる。歩行距離を実験時より長くし、提示時間を長くすることでより変化が出るのではないかと考える。

さらに視覚による補正を無くすため視覚を切つて行ったが、それにより傾斜角度が変化した時に被験者に恐怖感があるという報告がされたがこれは、傾斜を感じた時に視覚による認識がされていないため被験者が危険であると感じた結果であると考えられる。そのため視覚障害者などの視覚による認識ができない人の補助的な歩行誘導には危険になる可能性があるため不向きであると考えられる。

5. おわりに

本研究では、傾斜角度制御インタフェースを開発し、それを用いて傾斜角度制御による歩行にどのような影響があるのか調査を行った。

先行研究である CabBoots は一体型であり使用できるユーザの足のサイズが限定的であるということから装着式のロール角を利用した傾斜角度制御インタフェースを開発した。そして、固定傾斜角度による予備実験から影響が出ると考えた傾斜角度 10 度をもとに、段階的に変化させる制御パターンと一度逆傾斜方向に傾斜を変化させる制御パターンを考え、傾斜角度の時間変化による歩行への影響を調査した。結果として歩行を強制的に変化させるほど強いものではなかったが、傾斜方向に従う条件では、段階的に変化させる制御パターンが大きく歩行に影響を与えた。逆傾斜方向に変化させる制御パターンでは数回進行方向が変化していることが確認された。しかし、視覚を切つた状態での傾斜角度変化は被験者に不快感を感じるという報告がされた。

今後は、視覚刺激と傾斜による複合的な感覚の影響を調査していき、VR への応用を考えていきたい。

参考文献

- 1) 今悠気; 中村拓人; 梶本裕之. 腰ハンガー反射を用いた歩行ナビゲーションにおける教示の影響. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2017, 22.3: 335-344.
- 2) 渡邊淳司, et al. 靴型インタフェースによる歩行ナビゲーションシステムの研究. 情報処理学会論文誌, 2005, 46.5: 1354-1362.
- 3) FREY, Martin. CabBoots: shoes with integrated guidance system. In: *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*. ACM, 2007. p. 245-246.
- 4) NAGAO, Ryohei, et al. Ascending and descending in virtual reality: Simple and safe system using passive haptics. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 2018, 24.4: 1584-1593.
- 5) 前田太郎, et al. 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*, 2007, 31.2: 82-89.