



足部の締め付けによる歩行軌跡の操作

赤瀬稔尚¹⁾, 松本啓吾¹⁾, 吉田成朗^{2,3)}, 葛岡英明¹⁾

Toshinari AKASE, Keigo MATSUMOTO, Shigeo YOSHIDA and Hideaki KUZUOKA

1) 東京大学 大学院情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {akase, matsumoto, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1, shigeo@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)

3) 国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ (同上)

概要: 実環境・VR 環境の双方で、ユーザの進行方向を無意識的に変化させる手法が求められている。一方で進行方向を変化させる手法の多くは、ユーザに進行方向の変化を意識される、特殊な装置を必要とするなどの課題が存在する。本稿では、足趾把持力と歩幅の関係性に基づき、足部の締め付けにより足趾把持力を変化させ、歩行の軌跡を操作する簡易的な手法を提案した。また、締め付けに有効な部位および原理の予備的検証を行った。

キーワード: 歩行誘導, 足部刺激, リダイレクテッドウォーキング, 足趾把持力

1. はじめに

日常生活の様々な場面において、目的地へ移動するためにナビゲーションシステムを用いることが多々ある。代表例として、地図とユーザの現在地情報を統合したスマートフォンアプリケーションが挙げられる。しかしながら、このようなアプリケーションは地図と周囲の情報を対応付けながら歩行する必要があるため、対応付けのために周囲への注意力が低下する恐れがある。混雑した場所での注意力の低下は、衝突や転倒などの事故につながる可能性がある。無意識的にユーザの進行方向を誘導する事ができれば、ナビゲーションシステムを使用することに起因する周囲への注意力の低下や事故を未然に防ぐことにつながる。また、自分がどこに進まないといけないかを意識することがなくなるため、周囲の景観を楽しむ余裕も出てくる。

他方、実環境だけでなくバーチャル環境においても無意識的にユーザの進行方向を変える手法が求められている。VR 環境においては、実空間より広い VR 空間を効率的に歩き回るためのリダイレクテッドウォーキング (以下 RDW と呼ぶ) と呼ばれる方法論が研究されている。RDW の実現のために、実際の歩行経路に対して VR 映像に曲率ゲインをかける手法が様々提案されてきた [1]。しかし、視覚的な操作のみによるゲインの操作には限界があるため、視覚以外の感覚提示を組み合わせることで進行方向操作を実現する試みが注目されている。例として、視覚+触覚 [2]、視覚+聴覚 [3] 等が挙げられる。

他にも、視覚操作を不要とするため実環境に適用可能な、他の感覚入力によって進行歩行操作を行う研究として、腰部へのハンガー反射を利用した手法 [4]、前提感覚刺激を利用した手法 [5]、靴底の高さを左右で変化させる手法などが存在する。[6] ハンガー反射を利用した手法は、誘導情報の

解釈が不要であるという利点があるが、歩行が曲げがっていることに気づかれてしまう。前提感覚刺激を利用するものも、誘導情報の解釈が不要であるが、前庭感覚に対する電気刺激時間の制限が存在し、ガイドラインでは 1 日あたり 30 分までとなっている。靴底の高さを左右で変化させる手法については、ユーザが足底の高さの違いに気づかない範囲で進行方向操作が可能であった。動的なデバイスはまだ作成されていないものの、最終的にデバイスを作ると体重の半分を支持する必要がある装置が大掛かりになることが想定される。実際に、別の目的で靴底の高さを変化させるデバイスとして "Level-Ups" [7] が存在するが、装置が大きく重く通常の歩行に影響を与える可能性がある。

そこで、本研究では新たな靴型デバイスによって進行方向操作を行うことを見据えて、進行方向操作手法の新たな手法として足部を締め付ける手法を提案、検証する。足部への締め付けは、足部把持力と歩幅の関連性 [8] に着目し、締め付けにより把持力を操作することで歩行に影響を与えるという仮説に基づいている。靴型デバイスの利点として、歩行運動に関する筋肉や、歩行の安定性に関する感覚器が足部に集中している点、すでに靴を装着しているため新たなデバイスを装着する必要がなくユーザに対する負荷が小さい点、把持する必要がないため手のリソースを用いない点などが挙げられることから、靴型デバイスに着目した。

2. 足趾把持力が歩行にもたらす効果と仮説

安定した歩行・立位姿勢を保つための要素に、足で物を掴む力である足趾把持力がある。足趾把持力と歩行の関連については、歩行における推進力や、地面から離れる際のキック、把持力を鍛えることによる高齢者の転倒予防などいくつかの可能性が述べられている。本研究では、足趾把持力と

歩幅との関連性に注目した。健全な高齢者において、足趾屈筋力と歩幅に有意な正の相関が認められた [8] ことから、片方の足を締め付け足趾把持力を減少させた場合、締め付けた足と反対側の歩幅が減少することが予測される。これにより左右で歩幅の差を生み出すことで、締め付けた足と逆方向に歩行軌跡が曲がるという仮説に基づき、足部の締め付けを行う。

3. 足部締め付けが歩行に及ぼす影響評価実験

3.1 実験概要

本実験では、足部締め付けが歩行に影響を与えるかどうかについての検証するとともに、歩行に影響を与える有効な締め付け部位の調査を実験参加者内計画で行った。実験参加者は閉眼状態でいくつかの部位の締め付け条件での歩行を行なう。歩行時に装着したトラッカーの情報をもとに締め付け部位と歩行の軌跡の関係性について評価する。

3.2 バンドによる締め付け

足趾把持力に関わる筋力として、短母指屈筋、長母指屈筋、虫様筋、短指屈筋、長指屈筋が挙げられる。章 2. での仮説をもとに、足趾把持力を一時的に低下させるために、上記の筋肉への締め付けができる部位を決定した。図 1a で、短母指屈筋、虫様筋の締め付け、図 1b で短趾屈筋の締め付け、図 1c で長母趾屈、長趾屈筋の締め付けが行える。また、長母趾屈筋、長趾屈筋は脛脛部分に位置しているが、本研究では応用先として靴型デバイスを考えているため、足先から足首までの範囲で、これらの筋肉に対する締め付けを行いたい。そこで、短母指屈筋、虫様筋、短指屈筋に影響を及ぼさないかつ、足先から足首までの範囲で締め付けを行える、長母趾屈筋、長趾屈筋につながっている腱に対しての締め付けを行った。(図 1c)

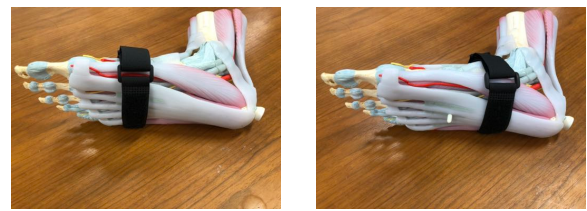
締め付けには、幅 2.5cm の非伸縮の布製の面ファスナーバンドを用い、締め付け力が過度に集中しないよう、厚手の靴下を履いた上で締め付けた。締め付けの強度については、実験参加者が痛みを感じない範囲で靴の靴紐を強く結んだ時に近いと感じる強さで締め付けた。

3.3 実験参加者

本実験の実験参加者はいずれも、通常歩行に支障をきたさない健康な男性 8 名、女性 4 名の計 12 名 (年齢 21-25、平均年齢 23.5 歳) であった。

3.4 実験手順

実験は、実験説明、練習、試行、アンケートで構成され、実験参加者 1 人あたりの所要時間は約 75 分であった。実験についての説明後、実験参加者は図 2 のように、Bluetooth ノイズキャンセリングヘッドホン、歩行計測のためのトラッカーを腰、両足部に、そして右手にコントローラ、最後に足部にバンドを装着した。また、ヘッドホンを用いてノイズキャンセリングを行うことで外部の環境音から自身の位置を推定できないようにした。さらに歩調統制のために 95bpm のメトロノーム音を提示した。右手に把持したコントローラが振動している間は歩行をするよう指示することで、閉



(a) 短母指屈筋、虫様筋

(b) 短趾屈筋の締め付け

の締め付け



(c) 長母趾屈、長趾屈筋の締め付け

図 1: バンドを用いた締め付け位置

眼時でも壁にぶつかることなく、実験者の補助なしに歩行できるようにした。腰、両足部につけたトラッカーにより、腰、両足 3 点の位置座標と回転を取得できるようにした。機器装着後実験参加者は、5m×9m の歩行範囲を持つ実験室で前を向いていることを確認した後、目を瞑った状態でコントローラが振動している間 8.0 m 歩行した。歩行を停止した後も閉眼を維持し、実験参加者が思う開始地点に向かって 5 歩歩いた後開眼するよう指示を与えた。これは、歩行を停止した地点で開眼してしまうと開始地点からのずれを認識され、今後の歩行に影響を与えるという問題を解消するためである。3 (図 1 の締め付け部位の数) × 2 (左右の足) + 1 (締め付けを行わない条件) の合計 7 条件で、それぞれの条件に対して一連の歩行動作を 5 回、合計 35 回の試行を繰り返した。それぞれの条件の試行が終わるたびに、その条件の歩行に対する自由記述式アンケートを回答し、実験の最後に実験全体に関する自由記述式アンケートを回答した。実験の最初に締め付けを行わない条件を 5 回行い、それ以外の条件に関しては条件の順番をランダムにして実験を行った。また、目を瞑って歩くという状況は普段経験しないため、測定を開始する前に締め付けを行わない状態での歩行練習を 10 回行った。

4. 実験結果・考察

実験で計測した 8.0m の歩行のうち、定常状態での歩行を解析するため、歩き始めと歩き終わりの両端 1.5m を切り取った間の 5.0m を解析に利用する区間とした。以下、締め付けない場合、図 1a、図 1b、図 1c の位置に締め付ける場合を順に 00,01,02,03 とする。例として、右足の図 1a の箇所だけに締め付けた条件は、100_r01 のように表す。

12 (実験参加者数) × 5 (各条件の歩行数) の計 60 歩行についての、各締め付け条件における歩行の平均と分散を



図 2: 実験参加者の
機材装着の様子

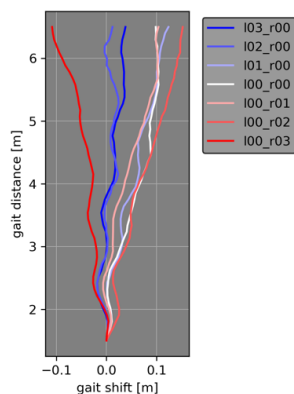


図 3: 各締め付け条件における
実験参加者全体の歩行軌跡の
平均

表 1: 各締め付け条件における実験参加者全体の歩行
軌跡の分散

tightening conditions	l00_r00	l01_r00	l00_r01	l02_r00	l00_r02	l03_r00	l00_r03
standard deviation[m]	0.243	0.276	0.238	0.204	0.249	0.284	0.303
left and right mean values of standard deviation	0.243	0.257		0.226		0.294	

求めたものを図 3 に示す。歩行距離を y 軸とし、単位は [m] である。1.5-6.5m の区間を 100 分割した値を y とし、その y 座標における歩行の左右のずれ量 [m] の平均値を x 軸で表したものが、図 3 である。また、図 3 については、比較しやすくするため $y = 1.5$ 地点での x が 0 になるよう合わせている。 $y = 6.5$ m での左右のずれ量の標準偏差を実験参加者ごとに求め、標準偏差の実験参加者全体平均を表したものが表 1 である。

図 3 の結果について説明する。締め付けていない条件との比較を行うと、締め付け位置図 1a の l01_r00, l00_r01 については、 $y = 6.5$ 地点での差が殆どない事がわかる。締め付け位置図 1b の l02_r00, l00_r02 については、 $y = 6.5$ m 地点で、締め付けていない条件からみて x 軸負の方向に左足を締め付けたとき、正の方向に右足を締め付けたときとなっている。締め付け位置図 1c の l03_r00, l00_r03 については、 $y = 6.5$ m 地点で、どちらも締め付けていない条件からからみてどちらも x 軸負の方向に属しており、 x の値が小さい順に右足を締め付けた条件、左足を締め付けた条件、何も締め付けていない条件となっている。

次に、表 1 の標準偏差の結果について説明する。3 行目の標準偏差の左右の平均を取ったものを見てみると、標準偏差が小さい方から順に締め付け 02, 締め付けていない, 締め付け 01,03 となった。

各締め付け条件を締め付けていない条件と比較した際の考察を行う。締め付け 01 については、平均の差がわずかであり分散も小さいことから、歩行軌跡に対する影響は殆ど

ないと推測できる。締め付け 02 については、締め付けていない条件を中心として、締め付けた足の方向に歩行が曲がっており、標準偏差も他の締め付け位置よりも小さいことから、締め付けた足の方向に歩行軌跡が曲がる傾向にある可能性が示唆される。また、締め付け 03 は、締め付けた足と逆方向に曲がる傾向が示唆されたものの、どちらも締め付けていない状態に比べ左側にそれていること、標準偏差が他の締め付け条件よりも大きいということから、締め付けた足と逆方向に曲がる傾向の可能性もあるが、標準偏差が大きいことから単に歩行時の安定性の低下が結果に影響したと考えられる。実際、アンケートによると、締め付け 03 では足首の可動域が制限され、歩きづらかったり、歩行時の違和感が大きいという意見が他の締め付け位置より多く見受けられた。

以上から、締め付け 02 の条件においてのみ、締め付けた足に歩行が曲がる可能性が示唆された。この結果は、本研究の仮説とは逆の結果となったが、締め付けが筋肉、腱以外の部位の歩行に関わる部位に影響を与えたことが考えられる。筋肉、腱以外の場所で締め付けの効果が加わった場所として、姿勢調整に関わる感覚受容器が数多く存在している足底が挙げられる。足部を冷却し足底からの感覚入力量を低下させることが、姿勢調整や歩行への影響を及ぼすという研究がなされている。[9] このことから足部への強い締め付けが、足底からの感覚入力量を低下させ、それにより歩行への影響が起きたということが推測される。

また、本実験によって締め付け 02 の条件においてのみ、締め付けた足に歩行が曲がる傾向ある可能性があることがわかったが、これはあくまで全実験参加者の平均値に関する考察であり、各実験参加者ごとの歩行(図 4) 全てに共通しているわけではない。この図の軸は図 3 と同じであり、細い線が実際の歩行経路、太い線が条件ごとの歩行の平均経路を表す。締め付けた足と同じ方向に曲がっている場合図 4a もあれば、逆の場合図 4c や、全く影響がない場合図 4b など実験参加者によって効果のばらつきが大きい。

5. 今後の課題

本実験により締め付け条件 02 における締め付けた足側に歩行が曲がる可能性が示唆されたが、実験参加者間での効果のばらつきがあることから、さらなる検証が必要である。締め付けが足底感覚を鈍麻させ歩行に影響を与えると推測したが、足底感覚と立位や歩行時の安定性についての研究は存在する他、歩行の曲がりとの関係性は不明である。そのため今後は、足底感覚と歩行の曲がりについて検証を行う必要がある。

アンケートによると、閉眼時の歩行に恐怖を感じ実験の前半ではその恐怖が拭いきれていないという回答が複数みられた。以上から、実験開始前の歩行練習回数は 10 回から、さらに 35 試行のうち前半部分の約 1/3 である 15 回を追加する必要がある。他にも試行数に応じた恐怖感の減少によって、実験の前半から後半にかけて歩行が変化すると予測で

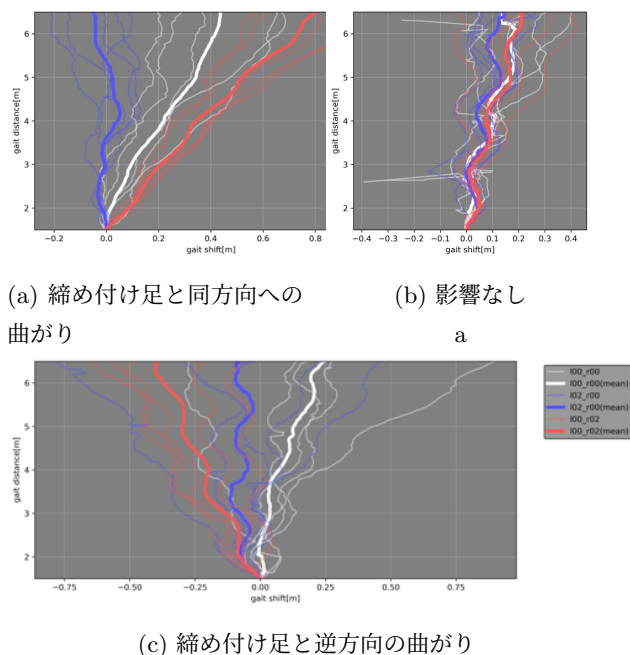


図 4: 各実験参加者の締め付け条件 02 における歩行軌跡とその平均

きる。そのため、締め付け条件の順番はランダムだが、同じ締め付け条件の歩行は連続で行ったため、締め付け部位による歩容の変化に対する歩行の慣れによる歩容の変化の影響が大きいと考える。以上から、同じ締め付け条件の歩行が連続で行われないよう完全にランダムにする必要がある。しかし、今回手の感覚や実験参加者の回答をもとに締め付けの位置と強さを決定したため、再び締め付ける際の再現度が低くなる問題があり、そのため同じ締め付け条件の歩行を連続で行う必要があった。今後の実験では、この問題を解消できるような、締め付けの強さや位置を揃えられる簡易的なデバイスを作成する必要がある。

また、歩行の解析の際に左右の足の踏み出しが逆であれば、腰の位置の波形が逆位相になってしまうため、歩行の左右のズレの平均や標準偏差を取る際に影響を与えてしまう。そのため歩き始めの足を指定する必要がある。

6. おわりに

本研究では、足趾把持力と歩幅の関係性について注目し、歩行誘導の新たな手法として足部を締め付ける手法の提案と検証をおこなった。検証の結果、図 1b の位置への締め付けを行うことで、締め付けた足の方へ歩行が曲がる可能性が示唆された。しかしながら、仮説とは真逆の結果であり、上記の結果は締め付けが足趾把持力の低下ではなく、足底の固有感覚入力量の低下などといった、歩行に関する他の足の器官に影響を及ぼすために生じる現象であると推測される。今後は、実験の方法を改善したり、仮説を練り直

したりしたうえで検証を行い、本実験結果の原因の解明及び、締め付け手法を用いた新たな歩行誘導システムの構築を目指す。

参考文献

- [1] S. Razzaque, Z. Kohn, and M.C. Whitton: Redirected walking, Proceedings of Eurographics, 2001, pp.j105-106.
- [2] 松本 啓吾, 鳴海 拓志, 伴 祐樹, 谷川 智洋, 廣瀬 通孝, 視触覚間相互作用を用いた曲率操作型リダイレクテッドウォーキング, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2018, 23 巻, 3 号, p. 129-138,
- [3] P. Gao, K. Matsumoto, T. Narumi and M. Hirose, "Visual-Auditory Redirection: Multimodal Integration of Incongruent Visual and Auditory Cues for Redirected Walking," 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2020, pp. 639-648
- [4] 今 悠気, 中村 拓人, 梶本 裕之, ハンガー反射の歩行への影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2016, 21 巻, 4 号, p. 565-573
- [5] Maeda, T., Ando, H., Amemiya, T., Nagaya, N., Sugimoto, M., & Inami, M. (2005). Shaking the world: Galvanic vestibular stimulation as a novel sensation interface. Paper presented at International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 2005
- [6] Y. Zhang and J. Hong, "Direction change of redirected walking via a single shoe height change," 2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), 2021, pp. 375-376
- [7] Dominik Schmidt, Rob Kovacs, Vikram Mehta, Udayan Umapathi, Sven Köhler, Lung-Pan Cheng, and Patrick Baudisch. 2015. Level-Ups: Motorized Stilts that Simulate Stair Steps in Virtual Reality. Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems.
- [8] Misu, S., Doi, T., Asai, T. et al. Association between toe flexor strength and spatiotemporal gait parameters in community-dwelling older people. J Neuro-Engineering Rehabil 11, 143 (2014).
- [9] Ryuichi Sawa, Takehiko Doi, Shogo Misu, Kota Tsutsumimoto, Hidemi Fujino, Rei Ono, Decreased skin temperature of the foot increases gait variability in healthy young adults, Gait & Posture, Volume 38, Issue 3, 2013, Pages 518-522,