



膝におけるハンガー反射による歩行誘導の研究

福井岳¹⁾, 中村拓人¹⁾, 松本啓吾¹⁾, 鳴海拓志¹⁾, 葛岡英明¹⁾

1) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {gaku.f, n.takuto, matsumoto, narumi, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: ナビゲーションシステムや VR 空間内でのリダイレクテッドウォーキングへの応用にむけて、歩行を誘導する技術が注目されている。先行研究では腰におけるハンガー反射を利用した歩行誘導が大きな効果を持つことが報告されているが、体格差によって生じる効果の個人差や歩行誘導感が強いことなど、未だ課題は多い。本研究では、これらの課題解決のために、腰部よりも自然な歩行誘導を実現できる可能性があるハンガー反射提示部位として膝部を提案し、提案手法が歩行を誘導できることを示した。

キーワード: 力覚・体性感覚, 触覚, 歩行誘導, ハンガー反射

1. はじめに

地図アプリによる目的地への誘導機会の拡大や、メタバース空間での誘導方法への注目など、現実空間・バーチャル空間における誘導の重要性は高まっている。こうした現実世界での歩行や VR 空間での無限歩行体験など実際に歩行動作が伴う体験においては、誘導に注意が割かれ過ぎると転倒や衝突のリスクが高まってしまう。そこで利用者の注意を妨げない形での歩行誘導が期待されている。これまで歩行誘導の手法として、視覚・聴覚を用いた手法や電気刺激等による力覚を用いた手法 [1, 2, 3, 4] が提案されてきた。しかし、視覚を用いた手法では利用者の注意が外界からそらされること、力覚を用いた手法では歩行に危険を伴うことといった欠点があった。その中で、腰におけるハンガー反射による歩行誘導手法 [5] は、誘導力が大きい点や利用者に解釈不要な誘導を与えるという点、錯覚による力覚であり、容易に抵抗可能であるという点で優れており、注目すべき手法であるといえる。

ハンガー反射とは、ワイヤーハンガーを頭に被ると回転方向の力覚を感じ、自然に頭が回転してしまうという現象である。このハンガー反射は、手首、腰、膝、足首といった頭以外の身体部位でも発生することが報告されており [5, 6], 身体部位が回転してしまうほどの大きな力覚を提示可能であることから、その応用が進められている。

ハンガー反射の応用のひとつである、腰でのハンガー反射による歩行誘導は、前述のように大きな利点を持つ一方で、利用者が誘導されていることに気づきやすいこと、腰のサイズの個人差が大きいためにハンガー反射を提示するデバイスの設計が難しく、万人に最適な強度でハンガー反射を提示できないことなどの欠点がある。そこで本研究では、腰以外の身体部位でのハンガー反射による歩行誘導の可能性を考えることで、前述の課題を解決可能であるか検討する。これまでの研究では、足首や頭のハンガー反射ではあまり歩行誘導の効果が無いということが示されている [5]。他方、先行研究では脚部の力覚を最も強く発生させる

ハンガー反射の部位は膝だと示されている [6]。そこで本研究では、腰部よりも自然な歩行誘導を実現できる可能性があるハンガー反射提示部位として膝を考え、膝におけるハンガー反射を利用した歩行誘導手法の可能性を調査する。

2. 関連研究

歩行誘導を実施する手法は多く提案されているが、ここでは本研究が目指す「注意を多く割かず、解釈を極力必要としない歩行誘導」に関する研究を紹介する。

2.1 力覚を用いた誘導手法

力覚を用いた誘導手法においては、利用者に力覚を提示して直接的に利用者の歩行を誘導する。本手法は利用者による解釈なしに歩行を誘導可能であることから、複数の手法が提案されている。力覚による誘導の研究として、前庭部への電気刺激を用いて利用者の重心を左右に揺動させる手法 [4] や、大腿部への機能的電気刺激を行う手法 [3] などが提案されている。しかし、電気刺激を用いた手法については長時間の利用が困難であるといった欠点がある。

これらを解消する歩行誘導の手法として、ハンガー反射による誘導が提案されている。

2.2 ハンガー反射による誘導手法

腰におけるハンガー反射による歩行誘導では、利用者の歩行を大きく誘導可能であることが示されている [5]。大きな誘導効果を持つことから、提示される情報に利用者が意識を向ける必要はなく、一方で利用者は誘導に抗うことも容易に可能であり [7], 歩行時の危険回避が可能である。

物理的に提示する刺激は小さいことから、ある程度長時間の力覚提示も可能であり、新たな誘導手法として注目されている。

しかし、腰ハンガー反射による歩行誘導にも欠点は存在する。まず一つ目は、腰部のサイズの体格差が大きいという点である。このことにより、実用化のためには幅広いデバイスサイズの開発が必要となってしまう。もうひとつの欠点として、利用者が大きな誘導感を覚えるという点があ



図 1: 膝部ハンガー反射デバイス (右) とその装着イメージ (左)

る。大きな誘導感を覚えることにより、ナビゲーションシステムにおいては外発的注意により利用者が外界から注意をそらしてしまう可能性がある。

以上の課題に対応するため、ハンガー反射を発生させる新たな身体部位として、本研究では膝に着目する。膝は脚の回転方向の力覚提示について大きな効果を示すことが知られている [6]。また、膝は腰に比べて個人間の体格差が小さいため、デバイスサイズの種類も少なくてもよいと考えられる。加えて、上半身全体に大規模な回転の力覚を提示する腰におけるハンガー反射と比べて、脚部だけに回転の力覚を提示する膝におけるハンガー反射の方が、誘導感が小さくなることが予想される。

3. 実験

3.1 実験目的

本実験では、膝におけるハンガー反射が歩行に与える影響を調査する。左右の膝に同じ回転方向の力覚を発生させた状態で歩行させた際に、歩行の向きを変化させるかについて調査を行った。

3.2 ハンガー反射

ハンガー反射は、皮膚への圧力に伴う皮膚のせん断変形によって発生し、ハンガー反射による回転方向は皮膚のせん断変形方向と一致することが報告されている [5]。本実験では、後述の膝部ハンガー反射デバイスを用いて皮膚に圧力を加え、その圧力によって皮膚のせん断変形を発生させることにより、ハンガー反射を発生させる。

3.3 膝部ハンガー反射デバイス

本実験で用いた膝部ハンガー反射デバイスは、先行研究 [6] を参考に 3D プリンタで作成したフレームに、4つのバルーンを取り付けた構造をしている。このバルーンに小型ポンプを用いて空気を送り込み、特定の組み合わせのバルーンの膨らみによる圧力を発生させることで、皮膚のせん断変形を発生させ、ハンガー反射を発生させる。バルーン内部の圧力は 1174 hPa になるように制御する。また、各バルーンのサイズは 5 cm×5 cm である。

本デバイスを実験参加者の両膝に装着させ、両足同時にハンガー反射を任意の方向に発生させる。本実験では、ハンガー反射で両足を左回転させる条件を Left, 右回転させる条件を Right, デバイスを装着した状態でいずれの方向にもハンガー反射を発生させない (バルーンを膨らませない) 条件を Neutral として実験を行った。



図 2: 実験時の様子

3.4 実験設備

事前に前述のデバイスで実験参加者の膝部でハンガー反射が発生することを確認し、ハンガー反射の発生に最適なデバイス位置を確認した。参加者には、視覚情報遮断のためのアイマスク、聴覚情報遮断のためのノイズキャンセリングヘッドホン、膝部ハンガー反射デバイスを装着させた。ヘッドホンからは、ホワイトノイズと歩調統制のための 100 BPM のメトロノーム音が提示された。このリズムに合わせて、参加者は 0.6 秒に一歩歩くことになる。また、参加者は靴を脱ぎ、靴下を履いた状態で実験を行った。

実験は奥行き 4 m, 横幅 4 m の歩行スペースのある静かな実験室内 (図 2) で行われ、ノイズキャンセリングヘッドホンに装着した Vive トラッカを用いて頭部の位置座標の軌跡の記録を 60 fps で行った。また、視覚情報及び聴覚情報を遮断して歩行する実験参加者の安全を確保するために、歩行エリアの各辺には、安全柵としてビニール紐をたらしした。

3.5 実験手順

実験参加者はスタートライン中央の印に足先をそろえて立ち、ゴールライン中央にあるバツ印が正面に見えるように体の向きを調整した状態で、目隠しとヘッドホンを装着する。ホワイトノイズとメトロノーム音が聞こえたら、任意のタイミングで歩行を開始する。歩行エリア外に出た時点で音声及びデバイスを停止する。参加者に試行の終了を伝え、停止の指示を行った。歩行に際して、参加者には「ハンガー反射によって歩行を誘導されている感覚を覚えることがあると思いますが、それに無理に従いも抗いもせず、自然に歩行をしてください」と指示をした。

また、歩行時のデバイスのずれによる影響をなくすため、各試行のあとには目視でデバイスの位置を確認するとともに、ずれが確認できた場合および実験参加者からずれの申告があった場合には、デバイスの装着位置を再度最適な位置に調整した。

3.6 実験条件

実験参加者は 20～24 歳の健康な男女 9 人であった。実験の条件としては、前述の Left, Right, Neutral の 3 種類が存在し、それぞれを 5 試行ずつ、計 15 回の試行を行った。なお、試行順序による影響を抑えるため、試行の順番はラン

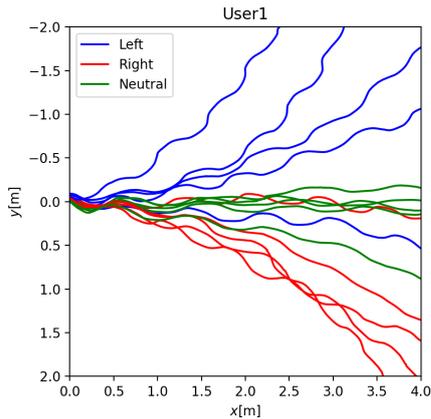


図 3: 実験参加者の歩行の軌跡の一例

ダムに決定した。実験参加者には各試行のあとにアンケートに回答させた。

3.7 実験結果

図 3 に取得した参加者の一人の歩行軌跡を例示する。後述する横ずれ距離は、実験参加者のゴール地点での y 軸方向の距離 [m] とした。通常のゴール地点は横軸方向 4m 地点に到達した位置とした。ただ、実験参加者の歩行が大きく曲がり、ゴールラインに到達することなく歩行エリア外に出た場合には、その地点をゴール地点として扱った。また、実験参加者が歩行エリア内を周回してしまう場合には、実験参加者が歩行エリア外に初めて出た地点をゴール地点とした。図 4 に各条件における、直進方向からの横ずれ距離を示す。グラフの縦軸は横ずれ距離、横軸は各条件、十字印は平均値を表している。横ずれ距離はスタート位置を (0 m, 0 m)、実験参加者のゴール位置を (x [m], y [m]) としたときの y [m] に相当する。ただし、実験参加者が歩行エリア内で周回をしてしまった、User4 の Right 条件 2 試行と Left 条件 3 試行、User8 の Right 条件 1 試行分のデータは除外してある。

Neutral, Right, Left の 3 条件について、独立変数をハンガー反射の提示条件、従属変数を横ずれの大きさとして、対応のある 1 要因の分散分析を行った。その結果、統計的に有意な主効果が認められた ($F = 25.25, p < .001$)。Bonferroni の検定法による多重比較の結果、Neutral, Right, Left のそれぞれの条件間に有意な差が存在することが示された ((Neutral, Right) : $p < .005$, (Neutral, Left) : $p < .001$, (Left, Right) : $p < .001$)。方向変化の平均値は Neutral 条件で -0.056 m, Right 条件で 0.539 m, Left 条件で -0.716 m であった。

また、図 5 は各条件における単位距離あたりの方向変化を示している。方向変化の値の算出方法はスタート位置を (0 m, 0 m)、実験参加者のゴール位置を (x [m], y [m]) としたときの、 $\tan^{-1}(y/x)/x$ [degree \cdot m $^{-1}$] である。この値は、直進方向に 1m 進むごとに、実験参加者の歩行の方向が直進方向からどの程度の角度ずれるかを示す指標となる。

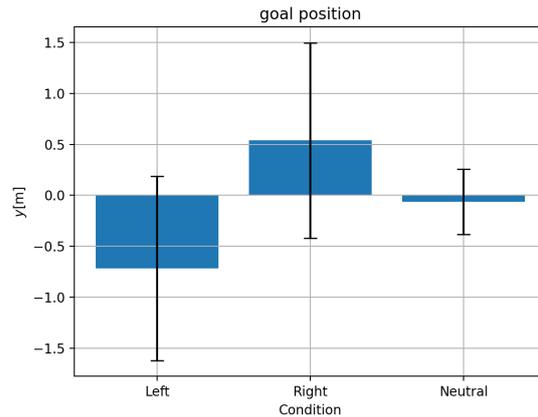


図 4: 各条件下での横ずれ距離

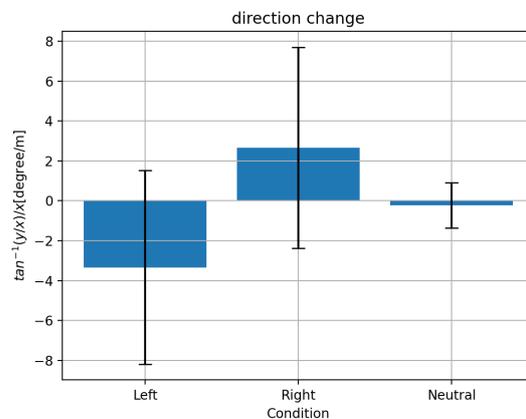


図 5: 各条件下での方向変化の値

この数値を用いることにより、歩行が大きく曲がり、 $x = 4$ m に到達するより前にエリア外から出てしまった試行をより適当に評価可能になる。ただし、このデータについても、実験参加者が歩行エリア内で周回をしてしまった、User4 の Right 条件 2 試行と Left 条件 3 試行、User8 の Right 条件 1 試行分のデータは除外してある。

Neutral, Right, Left の三条件について、独立変数をハンガー反射の提示条件、従属変数をゴール地点を (x [m], y [m]) としたときの方向変化として、対応のある 1 要因の分散分析を行った。その結果、統計的に有意な主効果が認められた ($F = 19.56, p < .001$)。Bonferroni の検定法による多重比較の結果、Neutral, Right, Left のそれぞれの条件間に有意な差が存在することが示された ((Neutral, Right) : $p < .01$, (Neutral, Left) : $p < .005$, (Left, Right) : $p < .001$)。方向変化の平均値は Neutral 条件で -0.199 degree \cdot m $^{-1}$, Right 条件で 2.66 degree \cdot m $^{-1}$, Left 条件で -3.34 degree \cdot m $^{-1}$ であった。

3.8 実験考察

歩行の横ずれ距離や方向変化の値などの検定結果から、腰におけるハンガー反射と同様に、膝におけるハンガー反射も一定の歩行誘導効果を持つと言える。しかし、取得した

軌跡を見ると、実験参加者によっては歩行エリア内で周回運動をしてしまうほどの強さの歩行誘導を受けた (User4, User8) 一方で、ハンガー反射による歩行誘導の影響をほとんど受けなかった実験参加者 (User2, User3, User6) や、いずれの向きのハンガー反射の提示に対してもほとんど一定方向の歩行誘導を受けた実験参加者もいた (User8)。このことから、膝におけるハンガー反射による歩行誘導の効果について、大きな個人差があると考えられる。

ハンガー反射の発生のしやすさにも個人差はあるものの、本実験では試行を行う前に意図した向きへのハンガー反射の発生を確認していた。このことから、効果が薄かった実験参加者については、ハンガー反射は発生していたにも関わらず、歩行はハンガー反射の影響を受けなかったことが考えられる。また、逆向きの効果が出た実験参加者については、歩行時には逆向きのハンガー反射を受けているように感じていたと考えられる。

この原因について、実験参加者ごとの歩き方の違いが考えられる。本実験においては歩調については統制を行ったものの、各実験参加者の細かい歩き方や、歩幅についての統制は行わなかった。これにより、各実験参加者の歩行の傾向によって、ハンガー反射の影響の有無が大きくなったのではないかと考えられる。たとえば、膝ハンガー反射は歩行時の足先の向きをハンガー反射によって制御することで歩行誘導を行うものであり、元々内股や外股で、足先の向きに関わらず歩行している実験参加者は影響を受けにくいと考えられる。

実験参加者へのインタビューにおいても、歩行を曲げられる感覚はあったものの、試行終了後に目隠しを外して確認すると、歩行がほとんど曲がっていなかったことに驚いたという意見があり、膝におけるハンガー反射による力覚が必ずしも歩行に影響を及ぼすわけではないということがわかった。

今後の実験において、どのような歩行に対して膝におけるハンガー反射の誘導効果が大きくなるか、また、小さくなるかを調査することにより、手法の改良が望めると考えられる。最後に、腰におけるハンガー反射による歩行誘導との比較を考える。先行研究において示された同条件での歩行誘導における方向変化は、Left 条件で平均 $-10.2 \text{ degree} \cdot \text{m}^{-1}$ 、Right 条件で平均 $9.1 \text{ degree} \cdot \text{m}^{-1}$ であった [7]。この値は、本実験の結果 (Left 条件で平均 $-3.34 \text{ degree} \cdot \text{m}^{-1}$ 、Right 条件で平均 $2.66 \text{ degree} \cdot \text{m}^{-1}$) より大幅に大きな値であり、膝におけるハンガー反射による誘導効果は、平均的には腰におけるハンガー反射による誘導効果の 3 分の 1 程度の効果をもつということがわかった。

しかし、本実験では、エリア内で周回してしまうほど強い誘導効果が示された実験参加者も存在したことから、今後の研究において、膝におけるハンガー反射による歩行誘導の誘導効果を高める手法をより詳しく調査することで、本実験で得られた以上の水準の誘導効果を得ることも期待できると考えられる。

4. おわりに

本研究では、優れた歩行誘導可能性を持つ腰におけるハンガー反射に代わる新たな歩行誘導の手法として、膝におけるハンガー反射による歩行誘導可能性について調査した。結果として、腰で確かめられたものよりは小さいものの、膝におけるハンガー反射によっても歩行誘導効果が認められ、また、実験参加者によっては非常に大きな誘導効果を示した。

しかし、膝におけるハンガー反射の効果は個人差が大きいが明らかとなった。どのような要因が膝におけるハンガー反射の効果を強める、もしくは弱めるのかなどは検討の余地があり、今後も効果最大化を目指して手法の検討をおこなっていく。また今後の展望として、膝または腰におけるハンガー反射とヘッドマウントディスプレイによる視覚刺激を組み合わせることによるリダイレクテッドウォーキングへの応用を検討したい。ハンガー反射の適用方法についても、膝と腰両方におけるハンガー反射を組み合わせることによって、誘導感を分散し、より小さな誘導感で大きな誘導を行うことなどを検討していく。

謝辞 本研究は JSPS 科研費基盤研究 (B)(19H04149,22H03628) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] R. Tenmoku, M. Kanbara, and N. Yokoya, "A wearable augmented reality system using positioning infrastructures and a pedometer," 2003.
- [2] S. Holland, D. R. Morse, and H. Gedenryd, "Audiosps: Spatial audio navigation with a minimal attention interface," *Personal and Ubiquitous computing*, vol. 6, no. 4, pp. 253–259, 2002.
- [3] M. Pfeiffer, T. Dünthe, S. Schneegass, F. Alt, and M. Rohs, "Cruise control for pedestrians: Controlling walking direction using electrical muscle stimulation," in *ACM CHI2015*, pp. 2505–2514, 2015.
- [4] R. C. Fitzpatrick, D. L. Wardman, and J. L. Taylor, "Effects of galvanic vestibular stimulation during human walking," *The Journal of Physiology*, vol. 517, no. Pt 3, p. 931, 1999.
- [5] 今悠気, 中村拓人, and 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*, vol. 21, no. 4, pp. 565–573, 2016.
- [6] H. Sanada, M. Kobayashi, Y. Kon, and H. Kajimoto, "Investigation of effective parts for rotation and translation of the legs using hanger reflex," in *AHs*, pp. 1–6, 2020.
- [7] 今悠気, 中村拓人, and 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*, vol. 22, no. 3, pp. 335–344, 2017.