

腰背部へのせん断力提示による歩行誘導手法の提案と評価

原田 玲央¹ 橋本 直¹

概要：映像や音声による歩行ナビゲーションでは、ユーザが提示された情報を解釈し、歩行方向を判断することが求められる。歩行中の情報閲覧は周囲環境への注意力が散漫してしまい危険である。このため、ユーザによるナビゲーション情報の解釈は不要であることが望ましい。そこで本研究では、ユーザの腰背部にせん断力を提示することで腰部の回旋運動を生起し、無意識的に歩行方向を制御する手法を提案する。開発したハードウェアを用いて左右に歩行を誘導する実験を行なった結果、歩行方向の変化量は平均11.3degree/mとなった。

キーワード：歩行誘導, 触覚刺激

1. はじめに

スマートフォンの普及に伴い、歩行中であっても地図アプリケーションを使用することで現在位置と進むべき方向を容易に把握することができるようになった。しかし、歩行中にルートを確認する際、ユーザはスマートフォンの画面を注視し、提示された情報を読み取る必要がある。これでは、周囲環境への注意力が散漫してしまい、転倒や衝突といった事故やトラブルを招いてしまう。

人間が複数の課題を同時に遂行しようとした場合、それぞれの課題を単独でこなした時よりもパフォーマンスが低下することが知られており、二重課題干渉と呼ばれている [1]。歩行中におけるモバイル端末の閲覧や操作は、歩行ルートの逸脱や歩行速度の低下を招くという報告もあり、歩行中に案内情報を読み取って解釈するという行為は、「歩行する」という課題と「情報を解釈する」という課題の二重課題干渉であると言える [2-4]。そのため、歩行ナビゲーションシステムは、ユーザが「提示された案内情報を解釈する」という課題を媒介せず、無意識的に歩行が進むべき方向へ誘導されることが望ましい。

そこで本研究では腰背部へのせん断力提示によって無意識的な歩行誘導を行う手法を提案する。本手法は、リュックサック使用時に生じる腰背部での力の変化に着目している。リュックサック装着時に腰部のみを回旋させると、リュックサックと腰背部の間に相対的なズレが発生する。この時、接触面に水平方向の力が働いている。我々はこの現象に着目し、腰背部にせん断力を与えることで、逆説的

に腰部回旋運動を誘発できるのではないかと考えた。本稿では、作成したせん断力提示デバイスの概要について説明し、同デバイスによる方向識別実験と歩行実験の結果について報告する。

2. 関連研究

歩行ナビゲーションシステムに関する研究はこれまでにさまざまなものが提案されている。本章では、関連研究を「ユーザの意識的な判断を伴う歩行ナビゲーション」と「ユーザを無意識的に誘導する歩行ナビゲーション」の2つに分類し、説明する。

2.1 ユーザの意識的な判断を伴う歩行ナビゲーション

ユーザの意識的な判断を伴う歩行ナビゲーションとは、ユーザが視覚・聴覚・触覚などの感覚に提示される記号的な情報を意識的に解釈し、歩行方向の変更を自ら行うものである。視覚・聴覚提示によるユーザの意識的な判断を伴う歩行ナビゲーション手法では、スマートフォンに搭載された地図アプリケーションや音声案内があげられる。

意識的な判断を伴う記号的な指示情報を触覚刺激によって提示する手法として、スマートフォンを通じて、進むべき方向に対応した特定の振動パターンを提示することでユーザを目的地に導く歩行ナビゲーション手法 [5-8] や、振動子を多数配置したベルト型デバイスを用いて腰部に振動を伝達することでナビゲーションを実現する手法 [9,10] などが提案されている。また、Meier らは、触覚提示によるナビゲーション手法は、視覚提示によるものと比べて認知負荷が軽減することを示唆している [11]。

¹ 明治大学
Meiji University

以上のような触覚提示手法では、周辺の状況や危険を察知するために重要な役割を果たしている視覚や聴覚の注意資源をナビゲーションのために割かないため、音声案内やスマートフォンを注視する必要がある地図アプリケーションに比べて安全と言える。しかし、ユーザは提示された感覚情報に対応した運動を自ら選択し、歩行するため、ユーザーに対して認知的負荷がかかると考えられる。歩行中のユーザの認知負荷を極限まで減らすためには提示された情報を意識的に判断することなく、無意識的に歩行方向を制御することができる手法が望ましい。

2.2 ユーザを無意識的に誘導する歩行ナビゲーション

無意識的に歩行を誘導するためには、歩行方向の変更に必要な身体運動を直接発生させる方法が考えられる。ユーザは自然に歩くだけで歩行に影響を受け、提示される情報を意識的に判断することなく目的地にたどり着くことができる。このようなコンセプトを実現するためのナビゲーション手法が既にいくつか提案されている。

2.2.1 視覚提示型

視覚誘導性自己運動感覚に着目し、床に縞々模様のマットを敷くことでユーザを特定の方向に誘導する手法 [12,13] や、HMD を通じてユーザの視野を左右方向にずらすことで歩く方向を無意識的に制御する手法 [14] などが提案されている。これらの手法では、視覚的な刺激によって無意識的な歩行ナビゲーションを実現しているが、床にマットを敷く手法では、特定のユーザを任意の目的地に誘導することができないといった点、HMD を使用する手法では、誘導可能な範囲や条件が HMD の視野角や周囲の環境に依存してしまうといった点が課題としてあげられる。

2.2.2 触覚提示型

人間の触覚には、速い動きには敏感であるが、遅い動きは知覚しにくいといった非線形な知覚特性がある [15]。この知覚特性を利用した手法として、非対称な振動を発生させた小型振動子や振動スピーカの把持によって、ユーザの指に牽引錯覚を知覚させることによる歩行誘導手法が提案されている [16–18]。

身体へ与える物理的刺激を姿勢に直接作用させることで、歩行を誘導する手法も提案されている。Frey らは靴底の角度が Roll 軸方向へ変化する靴を使い、ユーザの重心を強制的に移動させることで歩行方向の制御を実現している [19]。電気刺激を使用した手法では、前庭電気刺激 (Galvanic Vestibular Stimulation, GVS) によってユーザの姿勢を Roll 軸方向に揺さぶる手法がある [20–22]。耳の後ろに小型の電極パッドを装着し微弱な電流を流すことによりユーザの平衡感覚が操作され、視覚・姿勢・歩行に影響が生じる。ユーザは陽極側に歩行が誘導され、歩行方向の変化量は電流量に比例して大きくなる。Pfeiffer らは、大腿部に貼り付けた複数の電極パッドから微弱な電流を流

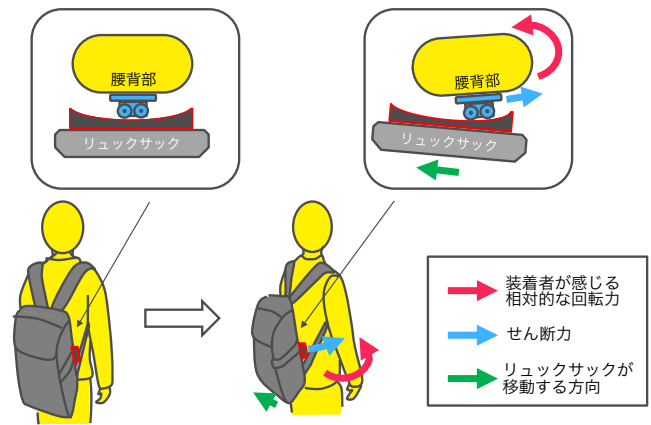


図 1: 腰背部へのせん断力による回旋力提示

す (Electrical Muscle Stimulation, EMS) ことで、大腿筋の yaw 軸回転を発生させ、無意識的な歩行誘導を実現している [23]。ハンガー反射現象を利用した歩行ナビゲーション手法も提案されている [24,25]。ハンガー反射現象とは、腰部の前後 2 箇所を圧迫することにより Yaw 軸に対する腰部の回旋運動が生起する現象であり、腰部を圧迫するアクチュエータを 4 つ搭載したベルト型デバイスを使って、4 つのアクチュエータのうち 2 つを駆動することで腰部の回旋運動を生起させ、歩行を誘導している。

牽引錯覚を提示する手法ではデバイス把持の必要性、靴底の制御であれば転倒の危険性が存在している。また、前庭電気刺激は使用時間に関する制約があり [26]、大腿部への電気刺激による手法では、誘導効果に個人差があるため電極パッドの装着位置や電流量のキャリブレーションに時間を要する。これらの手法に対し、我々の手法は、デバイスを把持する必要がなく電気刺激も使用しない。また、ハンガー反射による手法は腰部の前方含む 4 点にアクチュエータを密着させる必要があるが、我々は腰背部の 1 点のみの密着で腰部回旋運動を実現する。

3. 提案手法

3.1 腰背部へのせん断力提示による腰部回旋運動の誘発

リュックサックを背負っている時に肩部の位置を変えずに腰部のみを回旋させると、リュックサックの支点が肩部にあるため、腰部が回旋する向きに対して逆の向きにリュックサックが相対的に移動する。この時、リュックサックと腰背部の間にズレが生じているため、接触面において水平方向の力が働いていると考えることができる。我々は、図 1 に示すようにリュックサックから腰背部に対して水平方向のせん断力を提示することで、せん断力の向きと同じ向きへの腰部回旋運動を誘発し、結果として歩行を無意識的に誘導することができるのではないかと考えた。

3.2 せん断力提示デバイス

仮説検証のためにリュックサックと腰背部の間にせん断

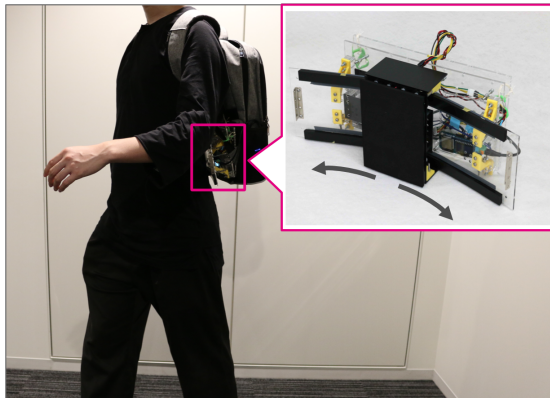


図 2: 作成したデバイス

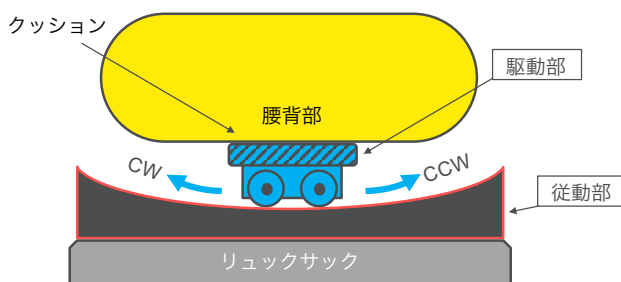


図 3: デバイスの構造

力を発生させるデバイスを作成した。作成したデバイスを図 2 に、デバイスの駆動機構の概略を図 3 に示す。本デバイスは、装着者の腰背部へ接する駆動部とリュックサックに固定される従動部で構成される。駆動部は天然ゴム素材のクッションを通じて腰背部に密着する。そして、カーブ (曲率半径 $R=400\text{mm}$) を描いた従動部の軌道上をモータの駆動を利用して、体軸を中心に時計回り (Clock Wise, CW) または反時計回り (Counter Clock Wise, CCW) に移動する。従動部はリュックサックに固定され、リュックサックの重さを利用して駆動部を腰背部に密着させる役割を果たす。腰背部に密着した駆動部を CW または CCW 方向に移動させることで、腰背部にせん断力を発生させ、駆動部が移動する向きと同じ向きへの腰部回旋運動を誘発する。

デバイスのシステム構成を図 4 に示す。本デバイスは、ギヤードモータ (TAMIYA 製 TorqueTuned2 モータ $\times 2$ + ダブルギヤボックス, ギヤ比 344.2:1), デュアルモータドライバ (DFRobot 社製 DF-MD V1.3), モバイルバッテリー (Anker 社製, 5V4.8A, 20100mAh), 乾電池 (単 3 $\times 6$), マイコンボード (CambrianRobotics 社製 obniz) で構成され、デバイス重量は 2.0kg である。駆動部の駆動速度, 駆動時間, 駆動方向は Wi-Fi 経由でスマートフォンから制御される。

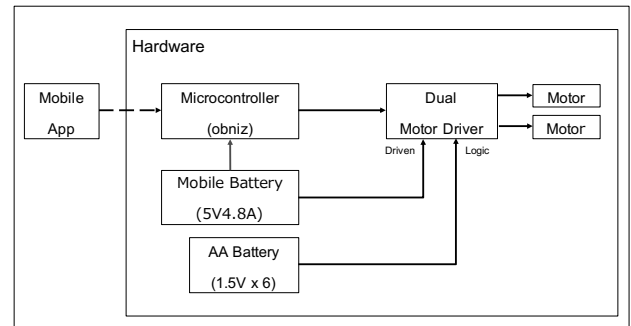


図 4: システム構成

4. 評価実験

4.1 実験 1: 方向識別実験

4.1.1 実験方法

実験 1 では、直立静止状態の参加者に対し、作成したデバイスから提示されるせん断力によって腰部の回旋運動を知覚させ、回旋方向を識別させることが可能であるか検証した。

実験者は、デバイスの駆動部が従動部の中央に位置した状態であること (以下、ホームポジションと呼ぶ) を確認し、「CCW/Neutral/CW」の 3 種類の駆動パターンのうち 1 つを参加者に対して 2 秒間提示した (図 5a)。その後参加者に、どのように知覚したかについて最も近かったものを、「左回旋 (CCW)/右並進/右回旋 (CW)/左並進/変化なし/わからない」の 6 つの選択肢から 1 つ選択させた (図 5b)。回答選択肢の正答は、「CCW/Neutral/CW」の各駆動パターンに対して、「左回旋 (CCW)/変化なし/右回旋 (CW)」である。実験者は参加者に対し、3 種類の駆動パターンをランダムに 5 試行ずつ提示した。また、リュックサックの重量による方向識別への影響を考慮し、リュックサックの重量 (デバイス重量含む) を、大学生が日常生活で使用する時の平均 4.66kg [27] を参考に、5.0kg と 3.0kg の 2 条件に設定した。1 人あたりの試行回数は駆動パターン 3 種類 $\times$ 5 試行 $\times$ リュックサックの重量 2 条件の計 30 試行である。

実験者は、実験開始前に参加者に対し「身体の向きはデバイスの動きに委ねるようにしてください」と指示し、実験中は、視聴覚情報を遮断するために参加者に対してアイマスクとホワイトノイズを流した Bluetooth ヘッドホンを着用させた。各試行終了後、実験者はデバイスをホームポジションに戻した。実験 1 の参加者は、19 歳から 23 歳まで ($M = 20.8$, $SD = 1.3$) の男女 8 名 (男性 7 名, 女性 1 名) であった。

4.1.2 実験結果

図 6 にデバイスの駆動パターンに対する平均正答率を示す。縦軸は知覚した方向の正答率の全体平均を表しており、エラーバーは標準偏差である。腰背部へせん断力を提

(a)

条件	リュックサック	デバイスの駆動パターン	正答
1	3.0kg	 CCW	 左回旋(CCW)
2	5.0kg		
3	3.0kg	 Neutral	 変化なし(Neutral)
4	5.0kg		
5	3.0kg	 CW	 右回旋(CW)
6	5.0kg		

(b)

どう知覚したか?					
 左回旋	 右並進	 右回旋	 左並進	 変化なし	 わからない

図 5: (a) 実験条件と (b) 回答選択肢

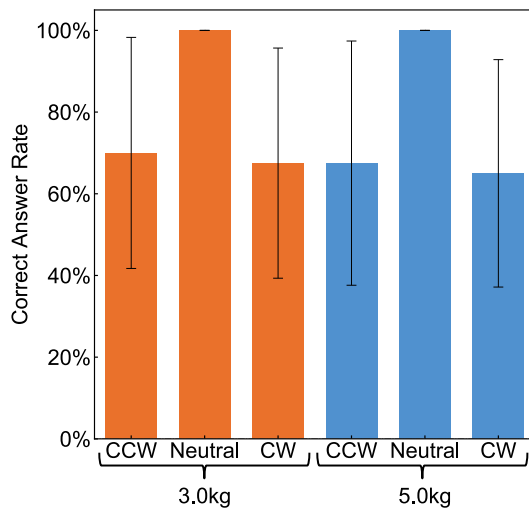


図 6: 駆動パターンに対する平均正答率

示しなかった Neutral 条件における正答率は 100%だった。CCW 条件および CW 条件では 60%以上の正答率を示した。しかし、User7のみ Neutral 条件以外の正答率が 0%であった。これは我々が正答としていた腰部回旋の向きに対して逆向きの回旋を知覚したと回答したためであり、知覚の仕方に個人差があると示唆する結果となった。本実験における回答は、「左回旋 (CCW)/右並進/右回旋 (CW)/左並進/変化なし/わからない」の六肢強制選択であり、偶然に正解する確率であるチャンスレベルは、選択肢「わからない」を除いた 20.0%(= 1/5) である。各条件の正答率とチャンスレベルを比較するために各条件ごとに 1 標本 t 検定を行なった。その結果、全ての条件において有意差が確認された (CCW:3.0kg, $t(7) = 4.68$, $p < 0.01$; CW:3.0kg, $t(7) = 4.46$, $p < 0.01$; CCW:5.0kg, $t(7) = 4.20$, $p < 0.01$; CW:5.0kg, $t(7) = 4.28$, $p < 0.01$)。以上より、直立静止状態の参加者は、せん断力提示によって腰部回旋運動を生起することが可能であるということが示唆された。

4.2 実験 2: 歩行実験

4.2.1 実験方法

実験 2 では、歩行中においても腰部の回旋運動を生起させ、歩行方向を変化させることが可能であるか検証した。参加者は、実験 1 に参加した 19 歳から 23 歳まで ($M = 20.8$, $SD = 1.3$) の男女 8 名 (男性 7 名, 女性 1 名) である。

実験環境を図 7 に示す。実験は $7m \times 5m$ の歩行エリアを持つ静かな教室にて行った。参加者の位置計測用に、ステレオカメラ (ZED Stereo Camera, Stereolabs Inc.) と Deep Learning による人物認識ライブラリ OpenPose^{*1}を組み合わせた三次元人物測距システムを構築し、スタート位置から歩行方向の正面 10m の位置に設置した。これにより参加者の身体部位 25 箇所の位置座標を計算し、歩行軌跡を記録した。

実験者は、参加者の歩行開始前にデバイスがホームポジションにあることを確認した。参加者の歩行が歩行開始地点から正面方向 1m の位置に到達したタイミングで「CCW/Neutral/CW」の 3 種類の駆動パターンのうち 1 つを歩行中の参加者に対して 2 秒間提示した。実験 1 と同様に、3 種類の駆動パターンをランダムに 5 試行ずつ計 15 試行 1 セットをリュックサックの重量 3.0kg, 5.0kg とした 2 セット計 30 試行 (駆動パターン 3 種類 $\times$ 5 試行 $\times$ 重さ 2 条件 = 30 試行) の歩行軌跡を計測した。

図 8 に実験の様子を示す。実験者は参加者に対し、視聴覚情報を遮断するためのアイマスクと Bluetooth ヘッドホンを試行開始前に装着させ、ヘッドホンからホワイトノイズが流れ始めたことを合図に、任意の歩行速度で歩行を開始するよう指示した。また、ヘッドホンから流れているホワイトノイズの停止を合図に、歩行を停止するよう参加者に指示した。歩行の仕方に関しては「任意の歩行速度で身体の向きはデバイスの動きに委ねるようにしてください」とのみ指示した。各試行終了後、実験者は参加者に対してスタート地点に戻るよう指示し、デバイスをホームポジションに戻した。

実験者は、目隠し状態での歩行 30 試行の計測終了後、アイマスクを外した非目隠し状態での歩行実験を実施し、目隠し状態での歩行実験と同様の条件で 30 試行の歩行軌跡を計測した。参加者は、目隠し状態と非目隠し状態の歩行実験で計 60 試行の歩行を行なった。

4.2.2 実験結果

図 9 の上段に参加者ごとの目隠し状態 (6 条件 $\times$ 5 試行 = 30 試行) での歩行軌跡、下段に非目隠し状態 (6 条件 $\times$ 5 試行 = 30 試行) での歩行軌跡の結果を示す。User1(目隠し) の CCW:3.0kg と CW:3.0kg の 2 歩行分、User2(目隠し) の Neutral 条件 2 歩行分と CCW:5.0kg 条件 4 歩行分、User2(非目隠し) の CCW:3.0kg 条件 1 歩行分と CW:5.0kg

^{*1} <https://github.com/CMU-Perceptual-Computing-Lab/openpose>

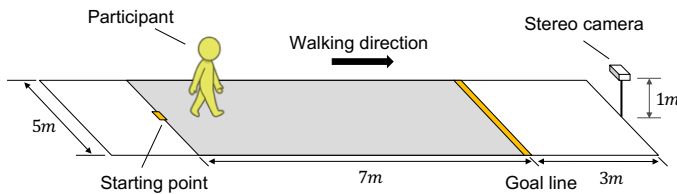


図 7: 歩行エリア

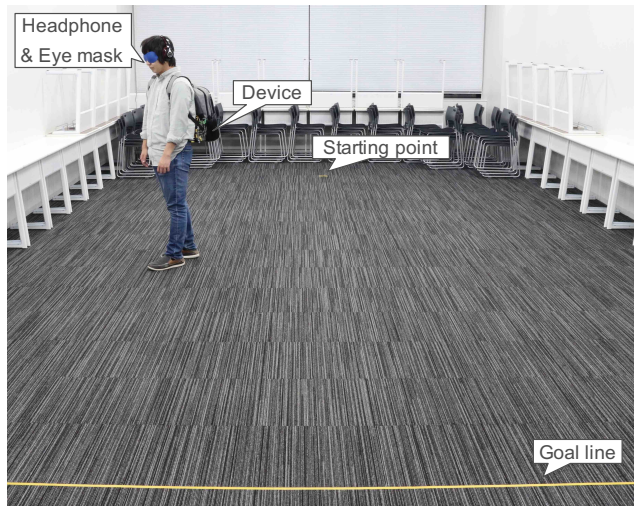


図 8: 歩行実験の様子

条件 2 歩行分の歩行データは位置計測に失敗したため解析データから除外した。User1, 2, 3 に対する歩行実験では、歩行方向の変化が確認された時点で位置計測を停止したため、描画される歩行軌跡が他の参加者と比較して短くなっている。

図 9 より、目隠し歩行および非目隠し歩行の両条件共に、腰背部へのせん断力提示によって各参加者の歩行方向を変化させることができていることを確認した。User4 の非目隠し歩行は、目隠し歩行と比べて歩行方向の変化が小さいことが確認できる。User7 は、実験 1 の結果同様、実験者が提示した駆動パターンと逆の向きへの腰部回旋運動を知覚し、歩行していることが確認された。User4 と User7 を除く全ての参加者は、目隠し歩行および非目隠し歩行の両条件共に、正しい方向へ誘導されていたことが確認できる。

ここで、参加者の歩行方向をどのくらい曲げることができたかを示す指標として方向変化量 θ° を定義する。方向変化量 θ° は、直進方向を x 軸の正の向き、直進方向に対して左方向への移動を y 軸の正の向き、歩行開始地点を $(0, 0)$ 、せん断力提示開始地点を $(d, 0)$ 、参加者のゴール位置を (x, y) とした時、次式で表すことができる。

$$\theta^\circ \simeq \frac{180}{\pi(x-d)} \arctan \frac{y}{x-d} [\text{degree/m}]$$

これは、デバイス駆動開始地点を考慮し、歩行制御の従来研究 [24] で用いられている式を変形したものである。正の値は左方向への方向変化、負の値は右方向への方向変化を

表し、方向変化量 θ° の絶対値が大きいほど歩行方向を大きく曲げることができたとみなすことができる。

図 10 に各条件における方向変化量 θ° を示す。User7 を外れ値として除外し、Friedman 検定を行なったところ、全 12 条件の間に有意差が確認された ($\chi^2(11) = 67.571$, $p < .001$)。事後比較として 12 条件全ての組み合わせについて Wilcoxon Signed Rank 検定を行い、FDR 制御法 (Benjamini-Hochberg 法) を用いて多重比較補正をしたところ、表 1 に示すように 5%水準で有意差が確認された。

駆動パターンおよび目隠し・非目隠しの条件が同じ組み合わせにおいて、リュックサックの重量の違いによって有意差がみられた組は {CW:3.0kg (目隠し), CW:5.0kg (目隠し)} のみであり、他 5 つの組み合わせには有意差がみられなかったため、リュックサックの重量が歩行方向の変化に影響を与えているとは言えない結果となった。駆動パターンおよびリュックサックの重量が同じ組み合わせにおいて、目隠し歩行と非目隠し歩行の違いによる有意差がみられた組は、{CW:5.0kg (目隠し), CW:5.0kg (非目隠し)} のみであり、他 5 つの組み合わせには有意差がみられなかった。

User7 を除外せずに検定を行なった場合、Friedman 検定では有意であることが認められたが、FDR 制御法 (Benjamini-Hochberg 法) を用いた多重比較補正では、全ての組み合わせについて有意差がみられなかった。

全 12 条件の中でせん断力提示が最も効果的に方向に影響を与えていた条件は CCW:3.0kg (目隠し) で 9.65degree/m, CW:5.0kg (目隠し) で -12.9degree/m であった。

これらの結果から、目隠し歩行および非目隠し歩行の両条件共に、参加者の腰背部にせん断力を提示すると歩行方向を左方向・直進・右方向の 3 方向に誘導することが可能であることが明らかとなった。また、User7 の歩行軌跡のように、腰背部に提示されたせん断力の向きと逆の向きへの腰部回旋運動を知覚する参加者が一部存在することが明らかとなった。そして、リュックサックの重量の違いによる有意差はみられなかったため、方向変化がリュックサックの重心移動によって生起するものではないと示唆される。

4.3 アンケート調査

実験 1 および実験 2 のそれぞれの計測が終了した段階で、腰部の回旋運動および歩行方向の変化が無意識的に生じたかどうかを問うアンケート調査を行なった。

アンケート項目を表 2 に示す。参加者は、実験 1 の終了直後に Q1, Q2、実験 2 の終了直後に Q3, Q4 の質問を 5 段階 (1:全くそう思わない ~ 5:非常にそう思う) で評価し、最後に、どのように知覚したかについて自由に記述した。アンケート項目の Q1, Q3 は腰部回旋もしくは歩行制御が無意識的であったか、Q2, Q4 は意識的であったかどうかに関する内容である。

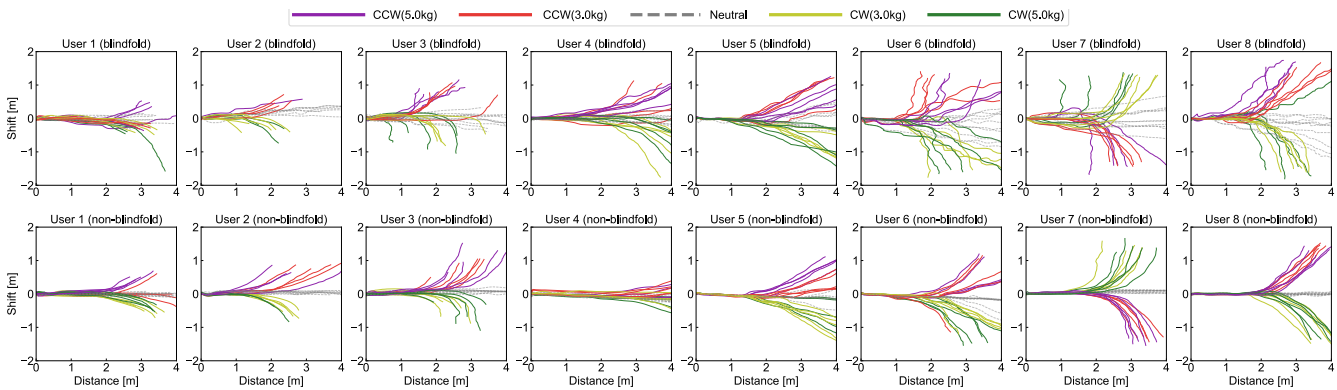


図 9: 全参加者の歩行軌跡 (上段:目隠し歩行, 下段:非目隠し歩行)

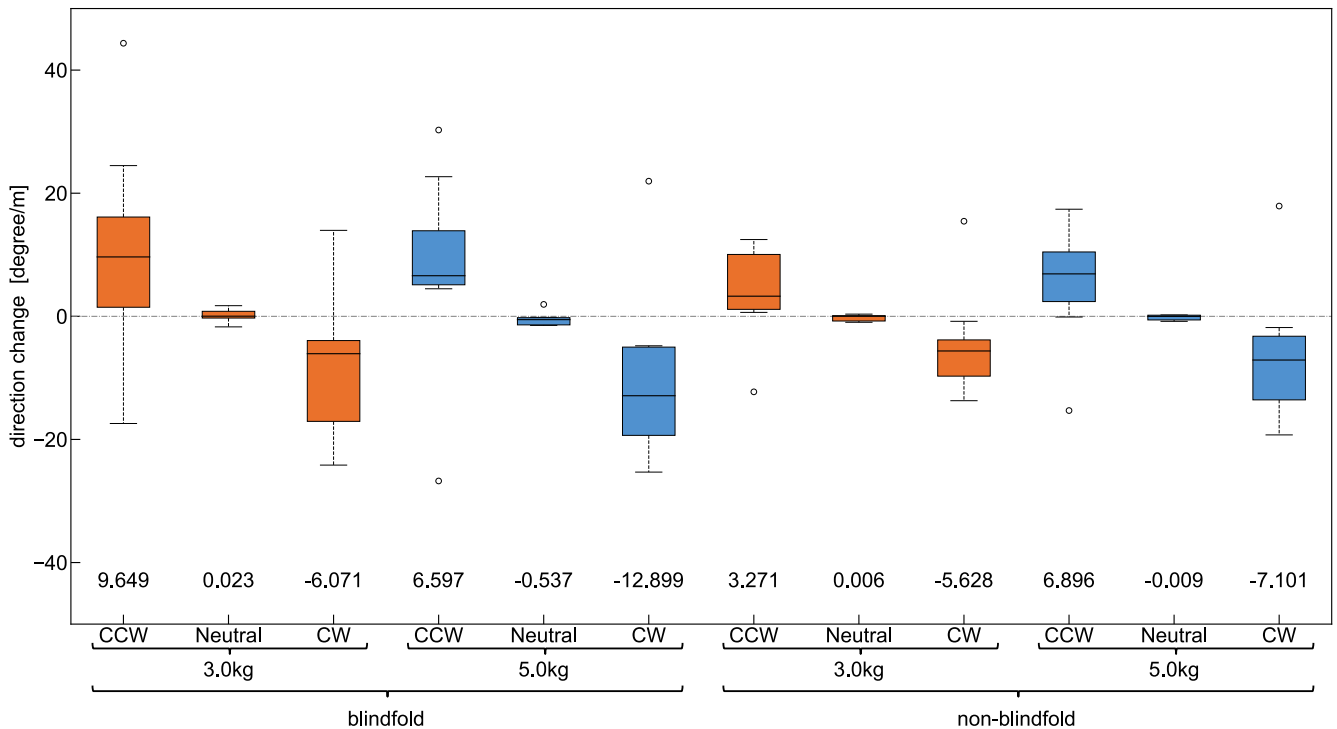


図 10: 各条件における歩行時の方向変化量 (グラフ下部に平均値を記載)

表 1: 歩行実験における各条件間の有意差

*:q-value<0.05 (FDR-corrected p-value)			blindfold						non-blindfold					
			3.0kg			5.0kg			3.0kg			5.0kg		
			CCW	Neutral	CW	CCW	Neutral	CW	CCW	Neutral	CW	CCW	Neutral	CW
blindfold	3.0kg	CCW		*	*		*	*		*	*		*	*
		Neutral	*		*	*		*	*		*	*		*
		CW	*	*		*	*	*	*	*		*	*	*
	5.0kg	CCW	*	*	*		*	*	*	*	*		*	*
		Neutral	*		*	*		*	*	*	*		*	*
		CW	*	*	*	*	*		*	*	*	*		*
non-blindfold	3.0kg	CCW	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*	*
		Neutral	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*
		CW	*	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*
	5.0kg	CCW	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*	*
		Neutral	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*
		CW	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	

表 2: アンケート項目

Q1	デバイスの動きによって自然に上半身が動いた.
Q2	デバイスの動きを感じて意識的に上半身を動かした.
Q3	デバイスの動きによって歩く方向が自然に誘導された.
Q4	デバイスの動きを感じて意識的に歩く方向を変えた.

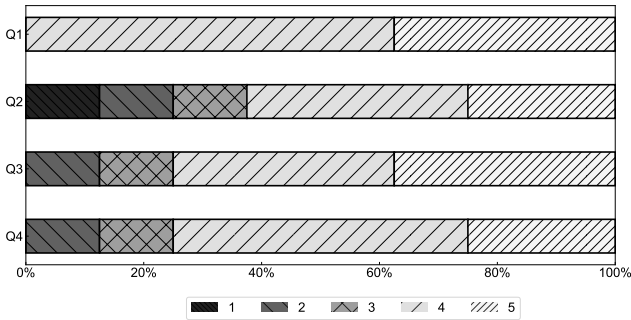


図 11: アンケート調査の結果

表 3: 既存の歩行誘導手法との方向変化量の比較

	degree/m
HMD [14] *2	-14.3~8.2
GVS [22] *2	-10.9~10.9
EMS [23]	-15.8~15.9
Hanger-Reflex [24] *3	-7.0~6.1
Our Method	-12.9~9.6

図 11 にアンケート結果を示す。質問に対して 4 以上の評価をつけた参加者の割合は、Q1 では 100%, Q2 では 62.5%, Q3 と Q4 に関しては 75%であることが確認された。自由記述式のアンケートでは、以下のような回答が得られた。

- 最初は自然に動いたが、動きの後半は背中 of 異物感を感じるように自分で動いた。
- 腰部が回旋させられるにつれ、姿勢に違和感を感じるようになったので自分で動かした。
- 腰はすぐに捻られたが足の向きが変わるまでには時間がかかるように感じた。ぐぐっと動かされる感じが面白かった。
- 歩行中上半身が回転させられたり、腰が左右に引っ張られる感覚があった。
- 基本的には背中を押される感覚が強く、前に進まされることが多かった。

5. 議論

5.1 既存の歩行誘導手法との方向変化量の比較

我々が行った歩行実験では、歩行の方向変化量が平均 11.3degree/m となった。この結果をもとに、我々の提案が歩行誘導手法として十分であるかを従来手法との比較により議論する。

従来手法と提案手法の方向変化量を表 3 に示す。大腿部への EMS による歩行誘導手法 [23] は、無意識的な歩行ナビゲーションとして最も効率的に歩行方向を変化させることができている。我々が提案する手法は、表 3 に示す従来手法の方向変化量と比較しても、同等の効果を確保することができているため、歩行を誘導するにあたり十分に適用可能な手法であると言える。

5.2 無意識的な歩行誘導が実現できているか？

せん断力提示によってどのように知覚したかを問うアンケート調査では、複数の参加者から「せん断力提示開始直

後は、無意識的に腰部が回旋を始めた。しかし、デバイスが腰部に対して外側に動くにつれて、姿勢に違和感を感じるようになったので意識的に回旋させた」といった回答が得られた。これは少なくとも、歩行方向を変更するきっかけが無意識的であったことを示唆している。そのため我々は、提案手法によって歩行方向を無意識的に変化させることができていると考えている。認知負荷の軽減の度合いや二重課題干渉の問題をクリアすることができているのかといった点を明らかにするには、歩行中に計算タスクをさせながら歩行を誘導するといった評価実験を別途に実施する必要があると考えている。

5.3 腰部回旋運動を誘発するメカニズム

本手法では、腰背部に対して、水平方向のせん断力を与えることで腰部回旋を誘発している。この現象が、せん断力によって直接腰部を回旋させているのか、結果的にハンガー反射 [25] のような錯覚が発生しているのかは、現段階では未解明である。しかし、ハンガー反射は腰部前方と後方の 2 点を圧迫する必要があるのに対し、本手法は腰背部 1 点のみに対する刺激提示で腰部の回旋が生起していることから、ハンガー反射現象と同一の原理であると断定することはできない。

また、腰部回旋の誘発要因として、腰背部の片側面が前方に押し出されたから腰部回旋を感じたと考えることもできる。腰背部の片側を前方に押し出す機構であっても腰部の回旋運動が生起されるかどうかを検証し、腰部回旋運動を生起させる主要因を特定する必要がある。

本稿では、左右に歩行を誘導する実験を行なったところ、一定の効果は確認されたが、せん断力の強弱や提示時間の違いによる方向変化量への影響は未解明である。そのため、せん断力と方向変化量の関係を数理モデル化することが求められる。

本手法は、腰背部のみにせん断力を提示するため、デバイスをリュックサック以外に取り付けてることで歩行誘導以外への応用が可能ではないかと考えている。例えば、回転椅子の背もたれに取り付けることで、VR コンテンツやカーレースゲームなどにおける没入感の向上が挙げられる。実際に、デバイスを回転椅子の背もたれに取り付け、ユーザが座った状態でも腰部の回旋運動を知覚させることができるか調査したところ、腰部の回旋運動を生起させることが可能であることを確認している。

5.4 せん断力提示デバイスの課題

作成したデバイスは、ユーザの腰背部に密着するクッションが CW, CCW 方向に移動することでせん断力を提示する構造のため、腰背部との密着度合いが低い場合は、誘導効果が十分に働かない。また、デバイスの駆動部を中央から外側へ駆動する必要がある設計であるため、歩行方

*2 文献 [14, 22] では、方向変化量の単位として mm/m を採用していたが、本稿では degree/m に変換した値を記載した。

*3 文献 [25] ではハンガー反射現象を生起させるために、4 個の空気圧アクチュエータのうち 2 つを動的に駆動できるベルト型デバイスを提案しているが、方向変化量について明記されていなかったため、腰部 2 点を静的に圧迫する U 字型アルミニウム製プレートによって検証されている同著者の文献 [24] の方向変化量を記載した。

向を変化させたら元の位置に戻す必要がある。しかし、駆動部を戻そうとすると元の進行方向へ歩行方向を変化させてしまう。そのため、一定の向きにせん断力を与え続けることが可能なベルトコンベア型の機構に見直す必要がある。

6. おわりに

本研究では、ナビゲーション情報の解釈が不要な歩行ナビゲーションシステムの実現を目的に、ユーザの腰部部にせん断力を提示することで腰部の回旋運動を生起し、無意識的に歩行方向を制御する手法を提案した。作成したデバイスを用いて左右に歩行を誘導する実験を行なった結果、歩行方向の変化量は平均 11.3degree/m となった。これは、従来研究における無意識的な歩行誘導手法の方向変化量と同等の結果であるため、我々の提案が歩行誘導手法として十分であることを示唆している。また、せん断力提示によってどのように知覚したかを問うアンケート調査を行なったところ、腰部回旋運動が無意識的に生起されることが示唆された。

参考文献

- [1] Baddeley A. Working memory, *Science*, Vol.255, No.5044, pp.556-559, 1992.
- [2] Eric M.L, Lisa M.M. Cell phones change the way we walk, *Gait & Posture*, Vol.35, No.4, pp.688-690, 2012.
- [3] 増田康祐, 芳賀繁. 携帯電話への文字入力に注意, 歩行, メンタルロードワークに及ぼす影響-室内実験によるスマートフォンとフィーチャーフォンの比較-, 人間工学, Vol.51, No.1, pp.52-61, 2015.
- [4] 中村葵, 村田伸, 飯田康平, 井内敏揮, 鈴木景太, 中島彩, 中嶋大喜, 白岩加代子, 安彦鉄平, 阿波邦彦, 窓場勝之, 堀江淳. 歩きスマホが歩行に及ぼす影響について, *Japanese Journal of Health Promotion and Physical Therapy*, Vol.6, No.1, pp.35-39, 2016.
- [5] S.Rümelin, E.Rukzio, R.Hardy. NaviRadar: a novel tactile information display for pedestrian navigation, *In Proc. of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.293-302, 2011.
- [6] M.Pielot, B.Poppinga, S.Boll. PocketNavigator: Vibrotactile Waypoint Navigation for Everyday Mobile Devices, *In Proc. of the 12th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, pp.423-426, 2010.
- [7] H. Kawaguchi, T.Nojima. STRAVIGATION: a Vibrotactile Mobile Navigation for Exploration-like Sightseeing, *In Proc. of the 9th International Conference on Advances in Computer Entertainment*, pp.517-520, 2012.
- [8] D.Szymczak, C.Magnusson, K.Rasmus-Gröhn. Guiding Tourists through Haptic Interaction: Vibration Feedback in the Lund Time Machine, *Proceedings of the 2012 International Conference on Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication*, pp.157-162, 2012.
- [9] K. Tsukada, M. Yasumura. ActiveBelt: Belt-type Wearable Tactile Display for Directional Navigation, *In Proc. of the 6th International Conference on Ubiquitous Computing*, pp.384-399, 2004.
- [10] Jan B. F. Van Erp, Hendrick A. H. C. Van Veen, C.Jansen, T.Bobbins. Waypoint Navigation with a Vibrotactile Waist Belt, *ACM Transactions on Applied Perception*, Vol.2, No.2, pp.106-117, 2005.
- [11] A. Meier et al. Exploring Vibrotactile Feedback on the Body and Foot for the Purpose of Pedestrian Navigation, *In Proc. of the 2nd International Workshop on Sensor-based Activity Recognition and Interaction*, pp.11:1-11:11, 2015.
- [12] H.William, Jr.Warren, B.A.Kay, W.D.Zosh, A.P.Duchon, S.Sahuc. Optic flow is used to control human walking, *Nature Neuroscience*, Vol.4, pp.213-216, 2001.
- [13] M. Furukawa, H.Yoshikawa, T.Hachisu, S.Fukushima, H.Kajimoto. "Vection Field" for Pedestrian Traffic Control, *In Proc. of the 2nd Augmented Human International Conference*, pp.19:1-19:8, 2011.
- [14] A. Ishii et al. Optical Marionette: Graphical Manipulation of Human's Walking Direction, *In Proc. of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.705-716, 2016.
- [15] S.S.Stevens. On the psychophysical law, *Psychological Review*, Vol.64, No.3, pp.151-181, 1957.
- [16] T.Amemiya, H.Gomi. Buru-Navi3: Behavioral Navigations Using Illusory Pulled Sensation Created by Thumb-sized Vibrator, *In Proc. of ACM SIGGRAPH2014 Emerging Technologies*, Article 4, 2014.
- [17] J.Rekimoto. Traxion: A Tactile Interaction Device with Virtual Force Sensation, *In Proc. of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 427-431, 2013.
- [18] 田辺 健, 矢野 博明, 岩田 洋夫. 2 チャンネル振動スピーカを用いた非対称振動による非接地型並進力・回転力提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.22, No.1, pp.125-134, 2017.
- [19] M.Frey. CabBoots: Shoes with Integrated Guidance System, *In Proc. of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, pp.245-246, 2007.
- [20] R.C.Fitzpatrick, D.L.Wardman, J.L.Taylor. Effects of galvanic vestibular stimulation during human walking, *Journal of physiology*, Vol.517, No.3, pp.931-939, 1999.
- [21] 杉本麻樹, 渡邊淳司, 安藤英由樹, 前田太郎. 前庭感覚刺激による歩行方向の誘導-パラサイトヒューマン研究第 17 報-, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.339-342, 2003.
- [22] 杉本麻樹, 渡邊淳司, 安藤英由樹, 前田太郎. 前庭感覚インターフェース技術の理論と応用, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.3, pp.1326-1335, 2007.
- [23] M.Pfeiffer et al. Cruise Control for Pedestrians: Controlling Walking Direction using Electrical Muscle Stimulation, *In Proc. of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.2505-2514, 2015.
- [24] 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, Vol.21, No.4, 2016.
- [25] Y.Kon et al. HangerON: A Belt-Type Human Walking Controller Using the Hanger Reflex Haptic Illusion, *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, pp.10:1-10:2, 2017.
- [26] 青山一真, 飯塚博幸, 櫻井悟, 宮本靖久, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹. 往復電流刺激が及ぼす前庭電気刺激の身体動揺増大効果のモデル化, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.20, No.4, pp.291-298, 2015.
- [27] 武山智子, 金井章, 塚本歩美, 嶋尚哉. アンケートによる大学生の靴の使用状況調査, バイオフィリア リハビリテーション学会研究大会予稿集, pp.33-33, 2010.