

歩くと感じる「ぶるぶる」ビジョン — 振動刺激に基づく空間知覚の特性評価 —

菊地 裕貴[†] 佐伯 瞭[†] 下川 隼輝[†] 戸塚 海太[†] 森田 慎一郎[†]
東 孝文[†] 小林 春美[†] 武川 直樹[†] 中村 明生[†]

概要：我々は歩くことによって生じる障害物との距離の変化・差分から振動刺激を生成する視覚障がい者向け振動視覚システム (Vibro-eyesight by Walking; VieW) を開発している。類似の先行研究として、障害物との距離値から直接振動刺激を生成する Electronic Travel Aids (ETAs) が知られている。本研究では、提案システム VieW と従来型 ETAs を実装し、歩行実験を通して空間知覚に関する知見を得ることを目的とする。歩行時正面壁面定位と通路歩行の2種類の課題を設定して歩行実験を実施し、歩行中の位置姿勢のデータ、映像データ、歩行中の発話データを取得するとともに、歩行試行後に実験協力者に歩行のしやすさ、安心感などの印象について質問調査を行った。実験の結果、VieW の認知的特性の知見が得られるとともに、今後のシステムの改善課題の明確化ができた。

1. 序論

世界人口の増加と高齢化により、2020年に世界で約4,000万人いる失明者は、2050年までに1億1,500万人に増加するとされている[1]。視覚障がい者を支援するシステムの開発が今後より一層重要になると考えられる。

これまで視覚障がい者の単独歩行を支援するデバイスとして Electronic Travel Aids (ETAs)の研究が進められている[2][3][4]。ETAsは障害物までの距離・方向の情報を視覚以外のモダリティに変換し提示することで接触を避けるものであり、中でも提示方法として振動が有効であるとされている[3]。しかし、従来のシステムは、センサ計測値を振動強度へと連続的に変換し情報提示しているため、常時提示される振動がユーザのストレスになると考えられる。

Gibsonらが提唱したアフォーダンス理論[5]の代表的な表現であるオプティカルフローは、人が移動することによって生じる網膜上の画像特徴の流れが周囲の空間の構造や障害物までの衝突時間が推定できるものである。我々は、アフォーダンス理論の考え方を援用し、ユーザの歩行によって生じる距離変化の情報から振動を生成し、環境中の空間の構造や接触時間が推定できるシステムの実現を狙う。このコンセプトの下、我々は奥行き距離の変化・差分に基づき生成した歩行による振動視覚システム(Vibro-eyesight by Walking; VieW)を開発している。システムを評価した結果、歩行しながら前方障害物、通路、開口部などの空間構造を認知できることを確認している[6][7][8][9]。

しかし、対象物までの距離を直接振動に変換する ETAs と人の動きによって生じる距離の変化を振動に変換する VieW の2つのシステムによって得られる空間認知に違いがあるのかは明らかでなかった。本研究は、振動から人が空間認知する仕組みを明らかにするため、ETAs および

VieW を搭載したデバイスを構築して、実験的に認知プロセスを評価、分析するものである。

2. 歩行による距離変化振動視覚システム (VieW)

VieW のシステムコンセプトを図1に示す。これは、人が動くことで得られる距離変化を振動刺激として人に与えて空間情報を提供し、「非視覚モダリティによる歩行時空間知覚支援」の実現を目指すものである。

このシステムは、Gibsonらが提唱したアフォーダンス理論[5]に基づき、距離の変化を振動強度に変換する。したがって、人が静止して距離変化がない場合振動が発生せず、歩行や体、頭の回転などにより障害物との相対距離に変化があると、その距離差分に比例して振動が提示される。具体的に図2を用いて説明する。はじめに、図2の左のようにユーザが移動していないときには振動はない。次に図2中のようにユーザが静的空間内を移動すると、周囲の障害物とユーザの奥行き距離の変化が、障害物の方向に対応する複数の振動刺激によりユーザに提示される。すると図2右のようにユーザは提示された振動刺激の増減から、空間的広がりや周囲の3次元的構造を知覚できる。

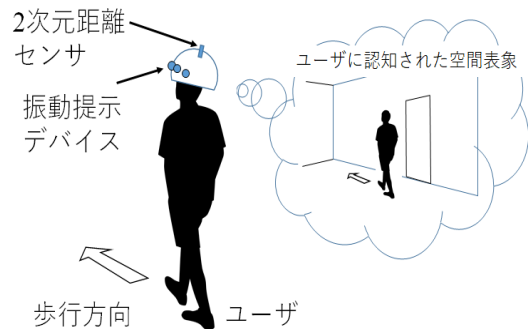


図1 VieW システムのコンセプト

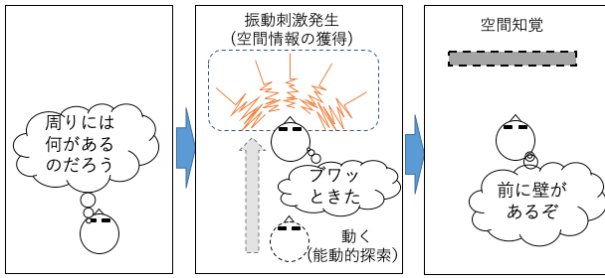


図 2 View : 空間知覚イメージ

3. View の実装

3.1 デバイス概要

図 3 に実装したシステムを示す。構築したシステムはヘルメットの頭頂部に 2 次元測域センサを搭載し、内部に 5 つの振動モータを設置したヘッドバンドを搭載している。頭頂部の測域センサは、振動モータの装着されている方向の障害物までの距離を計測する。ヘルメット内部の振動モータは前額部中心 0° から側頭部 $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$ に配置され、ユーザ頭部に密着している。

システム利用時、ユーザには、(1)ユーザ歩幅を単位とする 0.5 秒間で生じる対象物までの距離変化パラメータ、(2)ユーザが障害物に近づくに従い、指数関数的に増加する相対距離パラメータ、の 2 つの積として算出した振動刺激を障害物に接近した場合のみ与える。回転などにより障害物との相対距離に変化が生じた際にも、その距離差分に比例して振動が提示される。一方、ユーザが移動せずに障害物までの距離変化がない場合、移動しても障害物から遠ざかる場合には、振動しない。

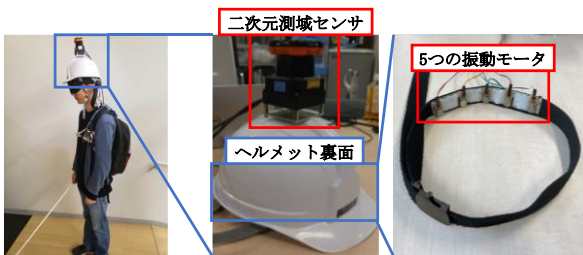


図 3 View : デバイス外観

View の振動強度特性を図 4 に示す。図 4 に示すように、静止時は振動が生成されないこと、一定速度で障害物に接近するなど、距離差分が一定の場合は障害物との距離が近づくに従い、指数関数的に振動が増加するように設定した。

具体的な時刻 t における振動強度 $I(t)$ を式(1)に示す。ここで、ユーザ歩幅 m を単位とする 0.5 秒間で生じる対象物までの距離変化パラメータ $X(t)$ は式(2)により、ユーザが障害物に近づくに従い、指数関数的に増加する相対距離パラメータ $\omega(t)$ は式(3)により与えられる。なお、歩幅 m は 300 mm,

時刻 t で計測した距離値を l_t 、計測最大距離 l_{max} は 5000 mm とする。

$$I(t) = X(t) \cdot \omega(t) \quad (1)$$

$$X(t) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^2 ||l_t - l_{(t-k)}|| \quad (2)$$

$$\omega(t) = 2e^{\frac{-3l_t}{l_{max}}} \quad (3)$$

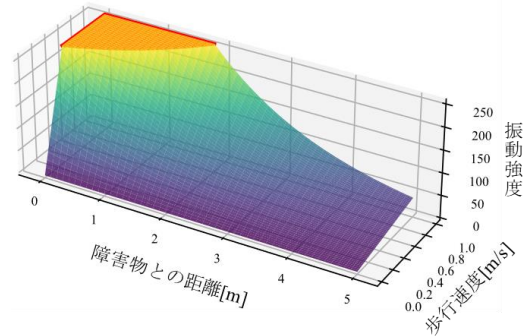


図 4 距離および歩行速度に応じた振動強度

4. 振動刺激に基づく歩行時空間知覚実験

4.1 実験目的

アフォーダンス理論に基づき、対象までの距離の変化を振動強度に変換して人に与えることによって、人の空間の認知がなされるかを明らかにするとともに、さらなるシステムのデザインの改善につなげることを目的として実験をおこなう。

そのために、従来型 ETAs と View の 2 つのシステムを装着したユーザが、空間を移動する際に与えられる振動情報をどう認知し、解釈するのか、また、空間をどのように把握するのか、実験を通じて分析する。

4.2 実験デザイン

実験課題は、壁面までの距離を定位する壁面定位課題、および両側に壁面がある通路を歩行する通路歩行課題である。歩行中のユーザの空間知覚を分析するため、歩行実験中の実験協力者の頭部位置、頭部方向、振動刺激ログ、ユーザ発話、歩行後の質問調査を記録する。また、実験協力者が感じ取った振動や判断を観測するため、実験協力者の行動中にその時点で考えていることを発話させるシンクアラウド(TA)法を採用する[10]。さらに、試行後に実験者が実験協力者に対して質問を実施することで動作の意図を読み取る。以上から、実験協力者の振動刺激に対する認知、行動の判断や意図を分析し評価する。本稿では ETAs と View の 2 手法を比較するため、View と同じデバイスで ETAs の振動提示を行うシステムを開発した。

4.3 ETAsの振動提示式設定

ETAs と VieW の 2 手法を比較するため、VieW と同じデバイスで ETAs の振動提示を行うシステムを開発した。VieW の 1 パターン、ETA の 2 パターンの振動提示により後述の歩行実験を実施する。

ETAs の振動提示強度を図 5 に示す。文献[1]を参考にし、対象までの距離が近くなるに応じて非線形に強度が増加するものを採用した。なお、予備実験では、接触の可能性のある障害物の情報のみを取得したいユーザと、広範囲の情報を必要に応じて自ら情報を抽出したいユーザとがあり、好みが分かれた。そこで本実験ではその好みに対応して ETAs の振動感度特性を 2 パターン準備した。具体的には、①探索範囲 1.5 m 以内に障害物があるときに振動が提示され始めるもの（以下 ETAs(近)とする）、②探索範囲 3.0 m 以内に障害物があるときに振動が提示され始めるもの（以下 ETAs(遠)とする）の 2 パターンである。ETAs(近)、ETAs(遠)の振動強度 $I_{(t)}$ の算出式を式(4)、式(5)に示す。ここで、時刻 t で計測した距離値を l_t とする。図 5 に ETAs(近)および ETAs(遠)の距離に応じた振動強度グラフを示す。

$$I_{(t)} = e^{\frac{(l_t - 1000) \cdot \log_e\left(\frac{90}{255}\right)}{500}} \cdot 255 \quad (4)$$

$$I_{(t)} = e^{\frac{(l_t - 1000) \cdot \log_e\left(\frac{90}{255}\right)}{2000}} \cdot 255 \quad (5)$$

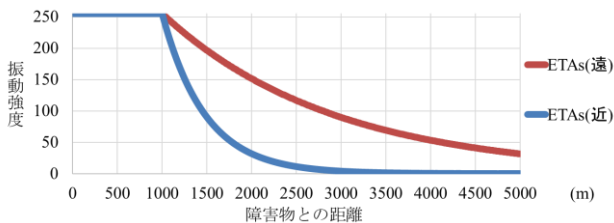


図 5 2 パターンの ETAs の振動強度

4.4 実験環境

実験協力者にとって安全な実験を実施するため、図 6 のような障害物を仮想化した実験環境を構築した。実空間の内部に約 8m を一辺とする正方形領域を設定、これを実験空間とする。2 次元測域センサに替えて、正方形領域の四隅に VR トラック追尾用のセンサを設置し、ユーザの位置・姿勢を追跡する。次に、仮想空間に壁や隙間、障害物を再現した仮想空間を準備する。ユーザには、VR トラックの位置・姿勢、および仮想空間内の物体配置に基づき、ユーザと障害物の相対的な距離を算出し、振動刺激を生成して与える。

この実験環境で、VieW を装着した実験協力者は目隠しをして、実験空間、仮想空間ともに見えない状態で、振動刺激だけを頼りに歩行する。なお、仮想環境の構築にはゲームエンジンの Unity を利用した。また、VR トラック、セ

ンサは HTC VIVE tracker システムを利用した。

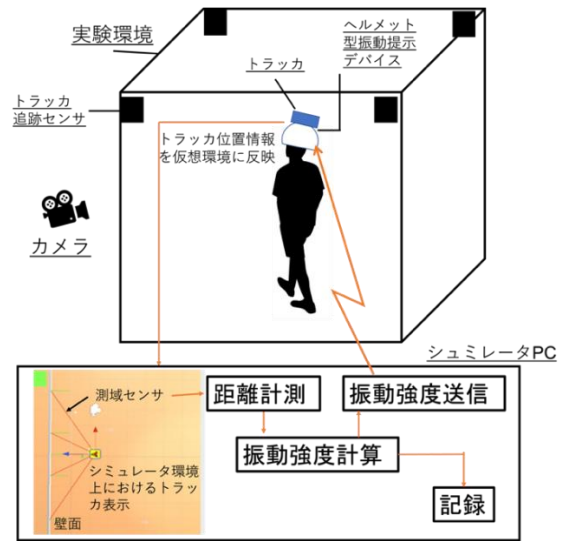


図 6 実験システム構成図

4.5 実験内容

実験協力者に、図 7 に示す壁面定位課題と通路歩行課題の 2 つの課題を課す。ETAs(近)、ETAs(遠)、VieW でそれぞれ 5 回繰り返し実施することとした。

壁面定位課題では、実験開始時に、実験協力者は仮想空間の壁面から 5.0 m 離れた位置で壁面に正対して直立する。その後、壁面に向かって歩行し、壁面に接触する直前の位置で停止するまでを 1 試行とする。実験協力者が仮想環境上の壁面に衝突して通過してしまった場合でも、実空間の障害物に接触しそうになるなど、安全面の問題が出ない限り実験を継続する。

通路歩行課題では、実験開始時に、実験協力者は通路の中央位置で壁面と平行の向きで直立する。その後、通路を 7.0 m 歩行することを 1 試行とする。実験協力者が仮想環境上の壁面に接触した場合、実験管理者が実験協力者に接触した旨を告げる。接触を告げられた実験協力者は振動刺激に基づき、自分の進行方向を修正して実験を継続する。

各課題実施前に、実験管理者は、実験協力者に「障害物に近付いたら振動が大きくなります」など振動刺激の概要を説明するだけの簡単なインストラクションのみを与えた。実験協力者は、実際にデバイスを装着して体験して、振動刺激と空間環境の関係、空間知覚のための探索方法について学習し、理解を深めてもらった。この習熟の時間は、実験協力者が探索方法を見出したと自ら申告するまで十分に与えた。

実験データの分析に資するため、体験学習中と実験中において、思考発話法に基づき、注目した振動方向や動作の意図、知覚した空間などを可能な限り発話するよう、実験協力者に要請した。また、実験空間や他の実験協力者の試行内容を見たり聞いたりして予断を持たないよう、実験協

力者には待機中を含めて目隠しとノイズキャンセリングイヤホンを装着させ、視覚、聴覚を遮断した。

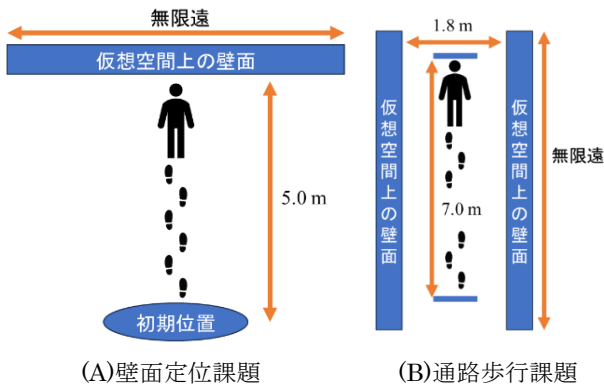


図 7 実験環境

4.6 質問調査

実験協力者の歩行動作の意図を読み取るため、歩行試行後に実験管理者が実験協力者に質問調査する。

質問は、①戸惑わせた振動の有無、②壁面の存在感、③壁面との距離感、④安心感、⑤壁面の存在感が感じられないときの知覚、⑥壁面にぶつかりそうだという感覚の有無、⑦システムの信頼度、⑧探索の手掛かり、⑨わかりやすかったこと・わからなかったこと、である。実験協力者の感覚や印象を問うことで、提示された振動をどのように感じ、空間知覚に利用したのかを明らかにすると期待できる。

5. 実験結果

3名の実験協力者により実験を実施した。全員、20代男子、理工系大学院生である。以下、実験協力者 ID-A、ID-B、ID-C と記す。

5.1 壁面定位課題

5.1.1 ETAs(近)

ETAs(近)における実験協力者の壁探索方法は、壁に近づくとつれて振動子設置角度 0 度方向、30 度方向、60 度方向の順に振動強度が増大することを感じ、60 度方向の振動を感じた地点で歩行を停止する、というものであった。

3名合計 15 試行中、壁に接触したケースは 1 試行であった。質問調査においても 3 名の実験協力者全員が「0 度方向、30 度方向の振動が同時に来て、60 度がその直後に来るように感じた」「壁面にぶつかりそうだと感じられた」と共通の回答が得られた。また、試行中の実験協力者 B が壁面直前で「おおっ」といった驚く発話をした。質問調査でも「突然目の前に障害物が出てきた感じ」と回答した。

以上から、ETAs(近)は、壁面定位はしやすいが、探索範囲が 1.5 m と狭いために壁面の直前に強い振動が発生し、歩行速度が速い場合には壁に接触する可能性があると考えられる。

5.1.2 ETAs(遠)

ETAs(遠)における実験協力者の壁探索方法は、ETAs(近)と同様であった。

3名合計 15 試行中壁に接触したケースは 3 試行であった。質問調査では、「壁面との距離感が ETAs(近)よりもわかりやすい。より遠くからだんだんと近づいていく感覚がある」と 3 名共通の回答が得られた。これは ETAs(遠)の探索範囲が 3.0 m と広いため、壁面定位においては 3.0 m 地点で 0 度、次に 30 度、最後に 60 度と外側に順に広がる振動を知覚して、距離感の把握が ETAs(近)に比較して容易であったためと考えられる。

以上から、壁面定位課題においては ETAs の探索範囲を広くすることでユーザに安心感を与えることができることが示唆された。

5.1.3 VieW

VieW における実験協力者の壁探索方法は、ETAs(近)、ETAs(遠)と同様であった。

3名合計 15 試行中壁に接触したケースは 1 試行であった。質問調査では、「ETAs の 2 式よりも 0 度方向、30 度方向、60 度方向の振動の広がり方がわかりやすかった」と 3 名に共通した回答が得られた。また、実験協力者 B は「ETAs の 2 式よりも早い段階(壁面から遠い地点)から壁に近づいている感覚があった」と回答した。

その一方で、実験協力者 ID-C は「インストラクション時でゆっくり歩いたときに振動強度が小さく、距離感がわからなかった」との回答があった。

ETAs はどの速度で歩行しても距離と振動強度の関係は一意であるのに対し、VieW はユーザが速く歩行すると早く強い振動が提示され、遅く歩行すると遅く弱い振動が提示される。すなわち VieW は歩行速度によって振動強度が可変であり、ユーザの速度に合った振動を提示することができるため、安心感へとつながる可能性がある。しかし、ID-C のコメントのように歩みが遅い場合は、振動の開始のタイミングが遅く、弱い振動のため、空間知覚が困難となる可能性が示唆された。

5.2 通路歩行課題

通路歩行においては、歩行中の通路の横壁への接触を避けるため、進行方向から横へのずれ、偏軌を認知することが重要な課題であり[8]、以下、偏軌について述べる。

5.2.1 ETAs(近)

ETAs(近)における実験協力者の壁探索戦略は、左右 60 度方向の振動強度の強弱で判断 (ID-A) するものと、左右 30 度 60 度方向の振動強度の強弱で判断 (ID-B、ID-C) するものがあつた。

3名の 15 試行中横壁に接触したケースは 1 試行であった。質問調査の結果、「左右の振動強度のバランスからどちらかに偏っているかは知覚できたが、壁面との距離感がわからず不安だった」と 3 名とも同じ回答が得られた。また、

ID-Bは「左右の振動強度のバランスが同じであるときに通路の真ん中を歩いていると知覚したが、距離感がわからないことから、本当に通路の真ん中を歩いているかどうか不安だった」との回答があった。ETAs(近)が壁の直近まで強い振動がないため振動強度の変化を解釈することが難しかったと解釈できる。

5.2.2 ETAs(遠)

ETAs(遠)における実験協力者の壁探索方法は、ID-A、ID-CはETAs(近)と同じであった。ID-Bは、左右30度60度方向の振動強度の強弱での判断に加えて両側壁面間の振動がない方向がどちらにあるかを含めて判断していた。

3名の15試行中横壁に接触したケースは4試行であった。質問調査では、ID-Cから「左右30度60度方向の振動強度の強弱がETAs(近)よりわかりやすい」と回答であった。ETAs(遠)の探索範囲が広く、左右の少しの偏りで振動が発生するためと考えられる。

一方、通路の中央にいても左右から振動が発生しているため、ID-Aから「左右の振動強度のバランスから真ん中を歩いているだろうという予測はできるけど、圧迫感がある。近くにあるという振動が常にあってETAs(近)より変化が感じにくい」との回答があった。

また、ID-Bは「偏軌したことを知覚し、偏軌を修正するための(体の)回転が十分だと感じていたが実際は(回転方向が)修正しきれていなかった」という回答があった。偏軌していることを知覚できても、偏軌の量を判断することが難しいためと解釈できる。

以上から、遠いところから振動するETAs(遠)は振動強度の変化は分かりやすいが、それにより圧迫感や、偏軌修正の難しさなど課題があり、十分な安心感が与えられているとは必ずしも言えなかった。

5.2.3 VieW

VieWにおける実験協力者の壁探索戦略は、3人とも異なっていた。ID-Aは、歩行中に感じる振動の内最も振動が強くなった振動子の方向が偏軌による壁の方向であると判断した。ID-Bは、歩行中に振動が来るか来ないかを判断し、振動があったらそこで頭を回転させて近い壁の方向が左右どちら側にあるかを探った。ID-Cは、歩行中の一步を大きくすることで意図的に距離変化による差分値を大きくし、その時に振動が得られた振動子の方向を偏軌の方向とした。3名の15試行中、横壁に接触したケースは3試行であった。質問調査の結果、「振動提示は信用できない」と3名とも共通の回答であった。ID-Aは「提示された振動が自分のどの行動によるものかわからなかった」、ID-B、ID-Cは「自分と壁との位置関係がわからなかった」と理由を述べた。

一方、ID-A、ID-Bから「ETAsは常に左右の振動強度の比較が必要だったので思考負荷が高いのに対し、VieWは振動が来ているときのみの判断で良いので、より直感的で

あった」との好評価があった。ID-Cも「ETAsの2パターンと比較して回転による偏軌の修正がわかりやすい。ETAsは左右の振動強度の強弱が回転してもあまり変化が無いが、VieWは変化していた」との評価があった。

6. 考察

実験結果に基づき、VieWのデザイン上の課題を整理し、今後のシステムデザインの改善に向けてのアプローチについて述べる。

壁面定位課題においては、VieWのユーザ評価はポジティブであった。その理由としては、ユーザの歩行速度によって変わる振動強度が接触の危険性をETAsよりもわかりやすく提供しており、これが安心感へとつながった可能性があると考えられる。一方、ゆっくり歩くユーザにはETAと異なり振動強度が不足してつかみにくい例が残った。これには、ユーザの慣れによって自然に改善される可能性があるが、システムの振動強度設定の改善が必要と考える。

通路歩行課題においては、VieWによる空間の認知に難しさがあることが示された。一つは、歩行中に横の壁面に接近しても大きい振動が発生せずに壁の知覚が難しい点である。VieWシステムは、距離変化の値と距離に基づく値の積から振動強度を算出するため、壁面との距離が近くても、距離の変化量が小さい場合は振動がほぼ発生しないことがある。たとえば、わずかに傾きながら壁面へと進入すると左右30度60度の距離変化が小さいため振動は小さくなり、接近を知覚できない。VieWは振動がないときは安全であるという振動提示を目指しており、歩行進路方向に平行する横の壁の近接情報を振動としてわかりやすく提示する必要がある。

また、歩行中の頭部の左右のゆれによる距離変化でも振動が発生してしまい、壁面に接近していると誤認してしまう事例も見られた。この問題を解決するためには、自身の歩行揺れにより生じる距離変化には振動が変化しない補償機能を備えたシステム設計が必要であると考えられる。

7. 結論

距離を直接振動に変換するETAs、および距離の変化情報を振動に変換するVieWの2つのシステムにおいて、それらを使うユーザが、与えられた振動情報から壁など周囲の空間をどのように認知するのか、その仕組みを明らかにすること、さらにそこから得られた知見をVieWシステムデザインの改善に期することを目的として、システムを構築し、歩行実験、評価、分析を行った。具体的には、ETAsとVieWの2つのシステムを用いて正面の壁面定位課題と通路歩行課題を実施した。歩行中の位置姿勢のデータ、映像データ、歩行中の発話データを取得するとともに、歩行試行後に実験協力者に歩行のしやすさ、安心感などの印象について質問調査を行った。

実験の結果、壁面定位課題においては、VieW がユーザにとって歩きやすいシステムであるとポジティブに評価された。ただし、歩みが遅いユーザに対して振動のフィードバックが弱いという傾向があった。一方、通路歩行課題においては、VieW の空間の認知に難しさがああり、改善すべき課題が得られた。歩行中にユーザ側方にある壁面に接近しても大きい振動が発生せず知覚することができないという課題点は、歩行進路方向に直交する、ユーザ側方の壁の近接情報を振動として伝える必要性が示唆された。また、歩行中の頭部の左右のゆれによる振動発生が、壁面に接近していると誤認する課題点も抽出できた。

今後は、今回得られた知見をシステムのデザインに反映することが必要である。具体的には、進行方向に対して直交する方向にある壁面の存在を振動に変換して、ユーザに壁面として認知する手法を開発する予定である。

8. デモ展示

デモ展示では、我々が提案する奥行き距離の変化・差分に基づき生成した歩行による振動視覚システム(Vibro-eyesight by Walking; VieW)のデモンストレーションを行う。通路環境における ETAs との比較体験や、実験環境の映像提示によって、システムのコンセプト、実装、空間知覚の可能性についての議論を期待する。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP 19K12881, JP23K11970 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Rupert, R. A. B., Seth, R. F., Tasanee, B., Maria, V. C., Aditi, D. and Jost, B. J.. Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis. *THELANCET Global Health*. 2017, vol. 5.
- [2] Dakopoulos, D. and Bourbakis, N. G.. Wearable Obstacle Avoidance Electronic Travel Aids for Blind: A Survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*. 2009, vol. 40, no. 1, pp.25-35.
- [3] Cassinelli, A., Sampaio, E., Joffily, S. B., Lima, H. R. S. and Gusmao, B. P. G. R.. Do Blind People Move More Confidently with the Tactile Radar. *Technology and Disability*. 2014, vol. 26, p. 161-170.
- [4] Johnson, A. L. and Higgins, M. C.. A Navigation Aid for the Blind Using Tactile-visual Sensory Substitution. *Annual International Conference of the IEEE Engineering Medical and Biology Society*, 2006, p. 6298-6292.
- [5] Gibson, J. J.. *The Perception of the Visual World*. Houghton Mifflin. 1950.
- [6] Morita, S., Kanehara, Y., Kito, K., Kobayashi, H., Mukawa, N. and Nakamura, A.. Environment Understanding During Walking via Modality Conversion from Visual to Haptic Information. *Proc. SPIE 11515 (IWAIT)*, 2020, vol.11515, p. 1-6.
- [7] 吉田裕輝, 奥田昂太, 森田慎一郎, 小林春美, 武川直樹, 中村明生. ブラウっときたらそこに壁: 距離差分から生成した振動刺激を通じた障害物検知. *HCG シンポジウム 2022*, 2022, p. 1-

- 6.
- [8] 奥田昂太, 佐伯瞭, 菊地裕貴, 吉田裕輝, 森田慎一郎, 小林春美, 武川直樹, 中村明生. 目をつぶって廊下を歩けるか?-距離差分から生成した振動刺激に基づく壁沿い歩行時の空間知覚分析-. 第 202 回 HCI 研究発表会, 2023, p. 1-6.
- [9] Morita, S., Kikuchi, Y., Saeki, A., Endo, I., Kobayashi, H., Mukawa, N. and Nakamura, A.. We Can Pass Through the Wall Gap?: Aperture Passage Perception via Vibration Stimuli Generated from Distance Variation. *Proc. SPIE 12749 (QCAV)*, 2023, vol.12749, p. 1-8.
- [10] 福田忠彦, 福田亮子 (監). *人間工学ガイド*. 福田忠彦研究室 (編), サイエントリスト社, 2019, p. 307.