

ブルブルン...「オプティカルフロー歩いて感じる振動で」

—光学的流動の触覚的表現—

薙野 智哉^{1,a)} 阿部 伊吹^{1,a)} 下川 隼輝¹ 戸塚 海太¹
武川 直樹¹ 森田 慎一郎¹ 小林 春美¹ 東 孝文¹ 中村 明生^{1,a)}

概要：本研究では、ユーザの歩行時に、自己の進行方向や回転方向の情報を振動刺激の流れで表現し、ユーザに認識せしめることが可能か、を目的とする。我々は、歩行時に発生する周囲の障害物との距離変化に基づいた振動刺激をユーザに提示する空間知覚支援システム（Vibro-eyesight by Walking; VieW）を開発している。しかし、これまでは、振動による方向情報の表現が不十分であるため、ユーザと障害物との相対的な移動の認知が難しかった。そこで本研究では、視覚における空間認知において重要な役割を果たす「光学的流動」を、触覚に刺激による仮現運動として表現する手法を提案する。ユーザの動きによる障害物を含む空間との相対的な位置変化を振動刺激の流れにより認知できることが期待される。このコンセプトを実現する実験システムを構築し、実験では、歩行中のユーザが提示される振動刺激の流れを知覚できるか、また、移動方向と提示される光学的流動を模擬した振動刺激の流れの方向が一致するかを検証する。実験の結果、移動方向と整合する振動刺激の流れの提示により、歩行中のユーザはその流れを自分の動きと一致していることが知覚できた。すなわち、ユーザは自己の移動方向の情報を振動の流れにより、認識できることが示唆された。一方、実験システムから提示されるパターンの生成精度については課題が残った。ユーザの左右移動に対しては正確な振動刺激の流れを提示できたが、接近、後退した場合、歩行中の体の横揺れ、頭部の回転により、歩行方向に一致する振動刺激の提示できていなかった。ユーザの歩行中の外乱を抑制すれば、正確な振動の流れパターンをユーザに提示することが今後の課題である。

1. はじめに

視覚障がい者の歩行支援において、周囲の障害物の存在の知覚、距離変化の知覚は重要な役割を果たす。この知覚を実現するため、振動刺激などの異なるモダリティによる空間知覚支援が多く研究されている。我々も、視覚障がい者の歩行支援を主たる応用先と想定し、自身と物体までの距離の変化・差分に応じて生成した振動刺激をユーザに提示する空間知覚支援システム（Vibro-eyesight by Walking; VieW）を提案し、開発を進めている。2024年現在、VieWでは、前方の障害物、通路および開口部が存在する空間内での歩行時の空間知覚支援で有効性を確認している[1]-[6]。従来のVieWでは、主に障害物の接近・後退を、ユーザと障害物との距離の変化および差分から生成された振動強度によりユーザに提示していた。そのため、ユーザの進行方向や回転運動方向の情報伝達が不十分であった。例えば、ユーザが障害物に接近または物体から後退した際に、ユーザと障害物との距離の変化および差分が接近と後退で等しいため、提示される振動強度からその識別ができなかった。そのため、ユーザは、提示される振動刺激から周囲の空間

情報の把握が困難であり、自身と障害物との相対的な移動を知覚することができなかった。

一方、生態学的知見からは、人が視覚を利用して周囲空間を知覚する際に、網膜上を流れる像(無数の特徴点)の動きである「光学的流動」が重要な役割を果たすことが知られている[7]。我々は、この光学的流動に着目し、これまでの振動強度のみによる障害物に対する接近・後退の表現ではなく、視覚における光学的流動を振動刺激より表現することを試みた。その結果、ユーザは視覚情報に頼らず、物体移動をベクトル情報として認知することが可能となり、空間内での自身の動きや物体との相対的な変位を認知できることを示唆した。具体的には、光学的流動のベクトル情報を触覚刺激による仮現運動として提示するシステムを提案し、開発を進めている[8]。その研究では、ユーザは椅子に座って静止した状態で、仮想空間内での前後左右への仮想的な運動に基づく振動刺激の流れから得られるユーザ自身の仮想移動方向を認識できるか否かを検証している[8]。実験の結果、振動刺激の流れを知覚して、ユーザ自身の移動方向を認識できることを確認できた。

本研究の目的は、ユーザの歩行時に、進行方向や回転方向の情報を振動刺激の流れで表現し、ユーザに認識せしめることが可能かを明らかにすることである。具体的には、「(静止でなく)歩行中のユーザは提示される振動刺激の流

¹ 東京電機大学
Tokyo Denki University, Adachi, Tokyo 120-8551 Japan
a) {nagino.t, abe.i, nakamura}@is.fr.dendai.ac.jp

れのパターンを知覚できるか?」、また、「システムがユーザの歩行に対して正しい流れのパターンを提示できるか?」の2点を調査する。特に、人は実環境内において歩行する際、横揺れをしたり、顔や体の向きが自然に回転したりするものであり、これらのふるまいは、移動の方向に対応する振動パターンを正しく提示するために大きな外乱となりうる[9]。

以下、2章では、問題設定、システムコンセプト、リサーチクエスチョンについて詳述する。3章では、実験デザイン、振動提示デバイスの提示刺激について解説を加える。4章では、実施する実験の手順に説明を加え、結果と知見に関して考究する。5章では、本研究を総括する。

2. 問題設定

2.1 システムコンセプト

2.1.1 コンセプト概要

開発するシステムは、光学的流動を模擬した振動を仮現運動に基づいて生成し、ユーザに提示する。一例を挙げると、ユーザが障害物に接近する際、視覚における光学的流動は放射状に広がる。これにより、ユーザは障害物に近づいていることを視覚的に知覚し、自身と障害物との相対的な動きを認識する[7]。本システムでは、簡単のためこの光学的流動を1次元で表現する。これを振動刺激の流れとしてユーザに提示することで、自身と空間内の障害物との相対的な動きを触覚として提供する(図1)。

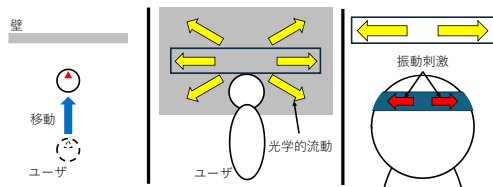


図1 システムコンセプト(障害物接近時)

2.1.2 振動提示箇所

本システムの振動提示箇所として人の前額部を起用する。以下にその理由を示す。

- 2点の刺激を与えられたときの距離弁別閾が小さいため
- 視覚における光学的流動を作る目と近いことより、ユーザにとって解釈が容易と考えられるため
- 頭部の回転や姿勢と同じ動きをするため

また、振動子は人の前額部、横一列に配置する。

2.1.3 仮現運動による流れの提示

視覚の仮現運動を踏まえて、触覚の仮現運動を以下のように定義する。身体上の異なる2点において、適切な時間間隔で刺激を与えることで、2点間を流れる1つの刺激の流れとして感じる錯覚現象である[10]。

仮現運動を表現するには、適切な空間的かつ時間的間隔

で、複数箇所への刺激が必要となる。ここでは、流れの方向情報を2点に対する振動刺激の位置変化としてユーザに提示する(図2)。

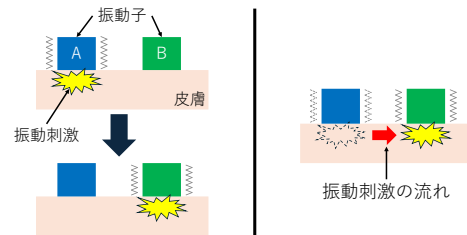


図2 仮現運動を適用した振動刺激

2.1.4 光学的流動の種類

ここでは、ユーザの歩行時、自身と障害物との相対的な移動によって生じる光学的流動を、ユーザから見て障害物が接近時に生じる「流出」、後退時に生じる「流入」、右移動時に生じる「左から右への流れ」、左移動時に生じる「右から左への流れ」の4種類に限定する(図3)。人は、歩行中これらの4種類の流れを利用し、流出は自身の前への移動、流入は後ろへの移動、左から右への流れは自身の左への移動、右から左への流れは自身の右への移動と解釈ができる[7]。

この4種類の流れを前額部に配置した振動子より表現し、歩行中のユーザにおける自身の進行方向や回転方向の変化を知覚し、障害物に対する空間認知を高めることを目指す。

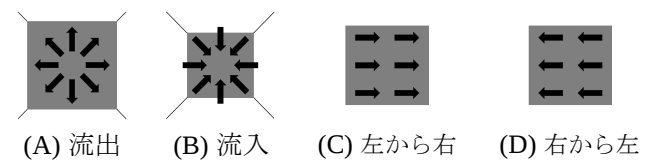


図3 移動により生じる光学的流動

2.2 リサーチクエスチョン

これまでに、ユーザが椅子に座って静止した状態で、仮想空間内での前後左右への仮現運動に基づく振動刺激の流れから、ユーザ自身と障害物との相対的な動きを認知できることを確認している[8]。これは、静止したユーザに仮想空間上に配置したオブジェクトを仮想的に移動させて、その移動に対応する振動パターン(流出・流入・左から右への流れ・右から左への流れ)を提示することで、身体運動なしに、オブジェクトの移動方向(接近・後退・左移動・右移動)を体験させるものであった。しかし、現実にユーザが歩行する実験の実施はなされていない。さらに、システムは必ずしも身体運動と一致した振動パターンを提示するとは限らず、身体移動に伴う横揺れ、体の回転など外乱による影響は明らかとなっていない。また、ユーザ自身が歩行する場合、歩行中のユーザの移動と提示される移動の一致、不一致がどのように人に知覚されるかも明らかとな

っていない。

以下のリサーチクエスチョン (RQ) を構築して、実験的に解明する。実験により、空間知覚支援システムの設計指針を提供する。

RQ1) 歩行中のユーザは提示された振動刺激の流れを知覚できるか？

- ここでは、移動方向に対応した振動パターンがユーザに提示された場合のみを対象とする。

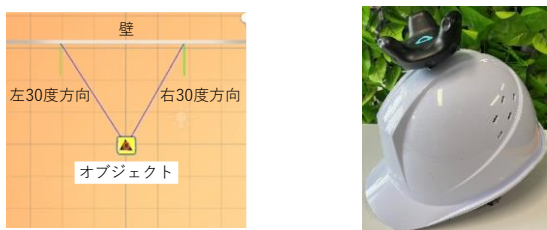
RQ2) システムはユーザの歩行に対して正しい流れのパターンを提示できるか？できない場合はその原因は何か？

2.3 システム構成

上記の RQ を実験より明らかにするために、実験システムを実装した。ここでは、システムコンセプトを確認することを目的として限定し、現実の壁・通路の環境ではなく、Unity より、壁や隙間、障害物を仮想空間上に再現・構築する。これにより、ユーザは構築した仮想空間上での自由な歩行が可能である。また、このシステムデザインは、障害物がある実空間での実施より安全であり、かつ環境変更の自由度が高い。

具体的には、仮想空間上にユーザに見たてたオブジェクトを配置する (図 4 の(A))。また、ユーザは VR トラックを取り付けたヘルメット (図 4 の(B)) を装着する。これにより、ユーザが歩行することで VR トラックと連動してオブジェクトが移動する。したがって、ユーザは仮想空間上を歩行することが可能となる。

本システムでは、Unity より、ユーザの正面方向を 0 度としたときの左右 30 度方向の距離情報、ユーザを模したオブジェクトの位置、姿勢データを 0.01 秒毎に取得し、メインプログラムに送信する。メインプログラムでは、Unity より送信された取得情報をもとにユーザの視覚における光学的流動を算出する。算出した光学的流動を振動強度情報として振動モジュールに送信する。振動モジュールでは、受信した振動強度情報から振動子を駆動させ、ユーザに提示する (図 5)。



(A) 仮想空間 (B) VR トラック付きヘルメット

図 4 システムデザイン

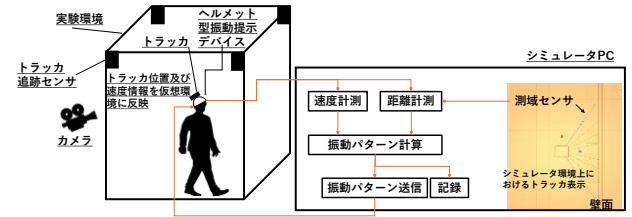


図 5 システムフロー

2.4 光学的流動の振動表現

光学的流動は、ユーザが注目する方向にある 3 次元物体上の特徴点を網膜に投影し、特徴点の移動ベクトルとして表現したものである。ここでは、基礎検証のため移動ベクトルを振動により表現する簡易な表現形式とする。

仮現運動より流れの方向を表現するため 2 個の振動子を用いる。本稿では、1 つの振動刺激の流れを表現する 2 個の振動子のペアをユニットとする。ユニット内の振動刺激の流れの起点となる振動子を始点、振動刺激の流れの終着点となる振動子を終点とする。

ユニットの振動時間間隔を適切に調整して流れの方向を表現する。具体的には、ユニット内の 2 個の振動子を A、B としたとき、A から B への振動刺激の流れを提示する場合、A で 300 ms 振動させた後、B で 300 ms 振動させる。その後、600ms で両振動子を停止させ、再び A を 300 ms 振動させる。本稿では、両振動子を振動させていない時間を空白時間と定義する。この空白時間を設けることにより逆方向の流れとして感じられないことを予備実験で確認している。これにより、ユニット 1 つで流れを表現できる。なお、A、B の振動時間と空白時間の 1200 ms を 1 周期の提示と呼ぶ (図 6)。また、同一のユニットで振動の始点と終点を入れ替えることにより逆方向の流れを表現できる。

ユーザに提示する各振動子の振動強度はユーザの歩行速度、障害物との距離に依存せず、一定とする。

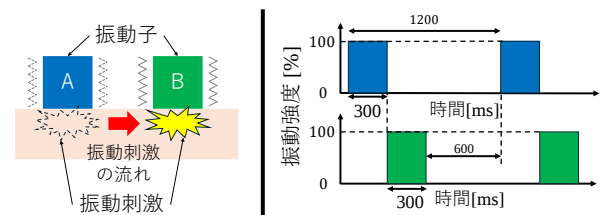


図 6 振動子 A から B への振動パターン

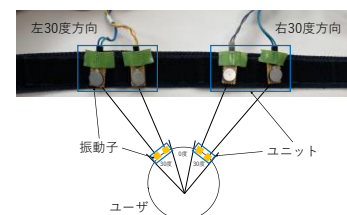


図 7 振動提示デバイス

次に振動ユニットを複数配置して光学的流動を表現する。簡単のため、本研究では、ユーザの頭部中央を 0 度方向とし、ユーザの前額部における左右 30 度方向に 1 つずつユニットを配置する。また、ユニット内の 2 個の振動子を、15 度の間隔を空けて配置する（図 7）。これは、2 点弁別閾を考慮したもので、予備実験により前額部の振動提示では、振動子の間隔を 15 度以上空ける必要があることを確認したためである。

3. 実験デザイン

3.1 実験目的および概要

本実験の目的は、「RQ1: 歩行中のユーザは提示された振動刺激の流れを知覚できるのか」、また、「RQ2: システムはユーザの歩行に対して正しい流れのパターンを提示できるか？できない場合はその原因は何か？」である。先行研究では、ユーザを仮想的に移動させることで移動方向（接近・後退・左移動・右移動）に応じた振動パターン（流出・流入・左から右への流れ・右から左への流れ）をユーザに提示していた[8]。それに対してここでの実験では、ユーザ自身が移動することで、先行研究と同様に、移動方向に応じた振動パターンが提示されるかを検証する（図 8）。

実験において、実験協力者は、振動子ユニットを装着し、仮想空間内に構築した壁のある空間を歩行する。

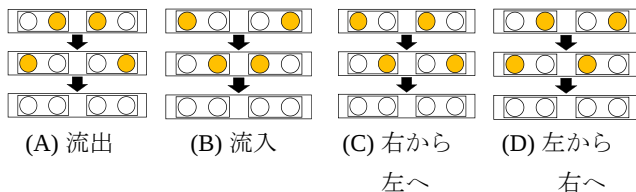


図 8 光学的流動を模した振動（1 周期）

3.2 提示刺激

仮想空間内に壁を配置し、その手前 d [m] 程度に実験協力者の歩行開始地点を配置する（図 9）。実験において、実験協力者の移動に応じて、振動提示デバイス（図 7）から提示される振動刺激の流れは以下の 4 パターンである（図 8）。すなわち、ユーザの移動方向（接近・後退・左移動・右移動）に対応する振動パターン（流出・流入・左から右への流れ・右から左への流れ）である。ここで、デバイスに配置するユニットを構成する 2 個の振動子の内、左側を L、右側を R とする。

- 「流出」表現: 左 30 度方向のユニットで、R、L の順に振動し、右 30 度方向のユニットで、L、R の順に振動。
- 「流入」表現: 左 30 度方向のユニットで、L、R の順に振動し、右 30 度方向のユニットでは、R、L の順に振動。

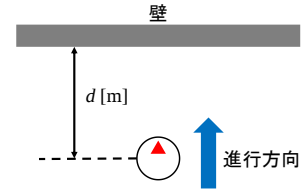


図 9 実験環境

- 「左から右への流れ」表現: 左右それぞれ 30 度方向のユニットで、L、R の順に振動。
- 「右から左への流れ」表現: 左右それぞれ 30 度方向のユニットで、R、L の順に振動。

なお、仮想空間中のユーザの 4 種の動き方向は、システムの位置センサにより判別され、4 つの振動パターンの一つを決定してユーザに提示される。

4. 歩行四方向識別実験

4.1 実験手順

実験協力者は VR トラッカ付きヘルメット（図 4 の(B)）と振動提示デバイス（図 7）を装着し、構築した仮想環境上を接近、後退、左移動、右移動の 4 通りの歩行パターンの 1 つを選んで歩行する。歩行の際、ユーザは 5 周期分の振動パターンが知覚するまで歩行を続ける。また、ユーザは毎周期で知覚した振動パターンを回答する。

5 名の理工系学生の実験協力者に参加いただいた。以下では、5 名の協力者をそれぞれ ID1, ID2, ID3, ID4, ID5 と記す。

試行回数は、実験協力者が歩行する前・後・左・右の各方向で 10 試行、計 40 試行実施する。なお、本実験では、事前にシステムに慣れるための練習セッションは実施していない。また、実験後にインタビューを実施した。

4.2 実験結果

始めに、実験システムの精度を評価するため、ユーザの移動方向に対してシステムから提示された振動パターンの対応を表 1 に示す。表 1 では、ユーザの移動方向と移動により提示された振動パターンが一致していた割合（一致率）を示している。表 1 より、各移動方向と提示された振動パターンの一致率について、接近時は 55 %、後退時は 62 %、左移動時は 98 %、右移動時は 100 %であった。これにより、ユーザが左右方向に移動するときには、移動方向と整合する振動パターンがユーザに提示されていることを確認した。一方、ユーザが接近、後退した場合、十分な精度で振動パターンが提示されていないことがわかった。

ユーザの動きに対応していない振動パターンを除き、移動方向に整合する振動パターンを提示した場合の識別結果を表 2 に示す。表 2 では、ユーザに提示された振動パターンの内、移動方向と一致する場合の振動パターンとそれを知覚できた割合（正答率）を示している。表 2 より、各振動パターンの正答率について、流出は 94 %、流入は 83 %、

左から右へ流れ（右流れ）は 100 %，右から左への流れ（左流れ）は 100 %であった．すなわち，自身の動きと整合する振動パターンに対しては精度よく自分の動きを知覚できることが明らかとなった．

最後に，提示される振動パターンに誤りを含む全パターンに対して実験協力者に提示された振動パターンに対する識別結果を表 3 に示す．表 3 は，ユーザに提示された振動パターンとそれを知覚できた正答率を示している．表 3 より，各振動パターンの正答率について，流出は 91 %，流入は 80 %，左から右への流れ（右流れ）は 87 %，右から左への流れ（左流れ）は 83 %であった．これから，整合していない振動パターンでは正答率が低下することが明らかになった．

実験後のインタビューでは，「各振動子に注目せず，振動刺激の流れ全体で感じていた」や，「歩行中に提示された振動刺激の流れが環境にリンクしていた」という回答があった．知覚が難しいと感じた実験協力者からは，「歩行に気を取られてしまい，振動刺激の流れの知覚にさく集中力がなかった」や，「歩行と振動の知覚を同時にする必要があるため，振動が来ていることは確認できたが，その流れまで知覚できないことがあった」という回答があった．また，「前進（接近）しているから前進（接近）の振動パターンが来るだろう思っていたが，別の振動パターンが来たときに違和感を覚えた」や，「前進後退しているのに左右方向に移動振動したときの振動パターンが提示されたとき，違和感があった」との回答があった．

図 10 に，実験協力者 ID4 の接近移動，9 回目試行の移動軌跡と頭部の姿勢角の時間変化を示す．また，ユーザの歩行により提示された振動が，移動軌跡および頭部の姿勢角の時間変化のどこで提示されたかを示している．なお，この試行において，ユーザに提示された振動パターンは，時間順に，流出・左から右への流れ・左から右への流れ・流出・流出であった．図 10 の(A)より，ユーザの移動方向に対応する振動パターンが提示された，1 回目，4 回目，5 回目の提示では，ユーザは偏軌することなく，歩行していたことが確認できた．これに対して，ユーザの移動方向と異なる振動パターンが提示された，2 回目，3 回目の提示では，ユーザが偏軌しているときに振動が提示されていた．また，図 10 の(B)より，移動方向に対応する振動パターンが提示されたときでは，ユーザの頭部の姿勢角の時間変化が少なかったのに対し，移動方向と異なる振動パターンが提示されたときでは，頭部の姿勢角が正から負の方向に大きく変化していたことが確認できた．

表 1 ユーザの移動方向と振動パターン

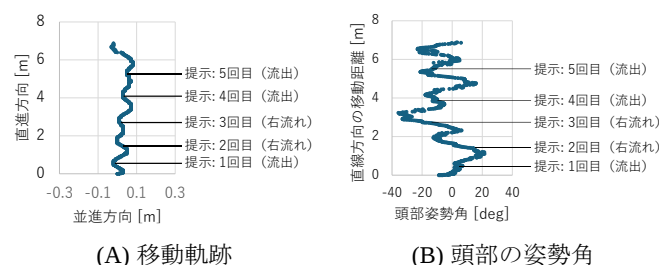
		提示された振動パターン			
		流出	流入	右流れ	左流れ
移動方向	接近	55%	0%	0%	45%
	後退	0%	62%	38%	0%
	左移動	2%	0%	98%	0%
	右移動	0%	0%	0%	100%

表 2 提示された振動パターンとその知覚
(移動方向と振動パターンが一致)

		知覚した振動パターン			
		流出	流入	右流れ	左流れ
振動パターン	流出	94%	0%	4%	2%
	流入	1%	83%	15%	2%
	右流れ	0%	0%	100%	0%
	左流れ	0%	0%	0%	100%

表 3 提示された振動パターンとその知覚

		知覚した振動パターン			
		流出	流入	右流れ	左流れ
振動パターン	流出	91%	0%	4%	4%
	流入	1%	80%	14%	2%
	右流れ	12%	0%	87%	1%
	左流れ	1%	13%	2%	83%



(A) 移動軌跡

(B) 頭部の姿勢角

図 10 実験データ

(実験協力者: ID4, 試行回数: 9 回目, 移動方向: 接近)

4.3 考察

移動方向と振動パターンが一致する場合，提示された振動パターンの正答率が高いことを確認できた（表 2）．提示された振動パターンの知覚では，実験後インタビューより，振動刺激を全体的に感じることで振動パターンを知覚していたことが確認できた．

また，歩行中のユーザに移動方向と異なる振動パターンが提示された場合，その振動パターンを知覚できず，誤答していたことを確認した（表 3）．実験後のインタビューより，移動方向と異なる振動パターンが提示されることで，違和感を覚え，知覚が困難であることを確認した．また，歩行中に振動刺激が提示されることで，振動パターンの知

覚にさく集中力が低下し、振動刺激の流れの知覚が難しい場合があることも確認できた。特に、ユーザ後退時、振動刺激の流れの知覚が困難であったが、これは、本実験で利用したシステムが障害物までの距離によらず、振動強度が一定であるため、不安感から振動刺激の知覚に集中することが難しかったことが考えられる。

以上より、「RQ1: 歩行中のユーザは提示された振動刺激の流れを知覚できるか?」について、移動方向と提示される振動パターンが一致するとき、歩行中のユーザはその振動刺激の流れを正しく知覚できることが示唆された。

一方、システムのデザインの課題が明らかとなった。ユーザが接近、後退する歩行時、対応する流出、流入以外の振動パターンが提示される例が多く観察された。これは、図 10 に示すようにユーザの歩行動作に伴う横揺れが含まれていたためと考えられる。例えば、ユーザの接近時、進行方向に対して直線的に歩行することが期待されたが、図 10 の(A)のようにユーザの移動軌跡は直線的ではなく、偏軌を繰り返して蛇行していた。また、ユーザの歩行時、頭部の姿勢角は進行方向が正面 0 deg となることが期待されたが、図 10 の(B)のように-35 deg から 20 deg の間で変化していた。

その結果、「RQ2: システムはユーザの歩行に対して正しい流れをパターンとして提示できるか? できない場合はその原因は何か?」については、ユーザの移動方向と提示される振動パターンが精度よく一致しなかった。また、原因はユーザの歩行時の頭部動揺であることが確認できた。今後、ユーザの移動方向と提示される振動パターンを一致させるために、取得するデータにおいて、身体運動に伴う外乱要因となる要素を抑制する必要がある。

具体的には、図 10 の(A)より、ユーザの移動方向に対して、不意な横揺れおよび偏軌が生じており、それらが生じるとき、移動方向と異なる振動パターンがユーザに提示されていた。また、図 10 の(B)より、ユーザの歩行による頭部の姿勢角の変化が大きいとき、移動方向と異なる振動パターンがユーザに提示されていた。そのため、これらの身体運動に伴う外乱要因を抑制する手法を導入することで想定される振動パターンをユーザに提示可能であると考えられる。

5. おわりに

空間内をユーザ自身が歩行し、空間移動方向に対応する振動流動パターンをユーザに提示することで、歩行中のユーザが自己の移動方向を振動刺激の流れから知覚できるシステムのコンセプトを提案し、構築した実験システムから移動方向が識別可能であることが明らかになった。

視覚における光学的流動を、振動による仮現運動によって実現する本システムは、歩行中の振動刺激から空間を知覚可能であることが示唆された。一方、構築したシステムはユーザの歩行に対して対応する正しい流れをパターンとして提示するには改良が必要であることも明らかになった。

今後の課題として、今回の歩行四方向識別実験では、流動の方向のみを振動パターンとして提示されていることがある。光学的流動の方向だけでなく、その大きさを表現するため、振動強度を一定でなく可変とする、あるいは仮現運動の振動間隔を可変とするなどが考えられる。また、ユーザの移動方向の意図に適合する振動パターンを提示するために、歩行中のユーザの身体運動に伴う外乱を抑制する必要がある。これにより、ユーザは提示される振動から、障害物への衝突時間が推定できることが考えられる。

また、今回実施した実験は、ユーザが壁のある仮想空間内を歩行していたが、汎用性を高めるため、通路、あるいはドアなどの間隙通過実験を実施する必要がある。

以上の課題を改善して、より多くの視覚障がい者が利用できる実用的な空間知覚支援システムの実現を期待する。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP19K12881, JP23K11970, 及び、公益財団法人双葉電子記念財団 2024 年度自然科学研究助成の助成を受けた。

参考文献

- [1] 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), pp.(1-6), 2020.
- [2] 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, "ブワッときたらそこに壁: 距離差分から生成した振動刺激を通した障害物検知", HCG シンポジウム 2022, pp.(1-6), 2022.
- [3] 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 pp.(1-6), 2023.
- [4] 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), pp.(1-8), 2023.
- [5] 菊地裕貴, 佐伯瞭, 森田慎一郎, 東孝文, 小林春美, 武川直樹, 中村明生, "歩くと感じる「ぶるぶる」から周囲の 3 次元環境を理解できるか?: 距離から生成した 2 通りの振動刺激に基づく空間知覚の特性評価", HCG シンポジウム 2023, pp.(1-7), 2023.
- [6] Saeki, A., Kikuchi, Y., Okuda, K., Morita, S., Kobayashi, H., Mukawa, N., and Nakamura, A., "We can Down the Corridor?: Veering Perception via Vibration Stimuli Generated from Distance Variation", Proc. SPIE 13164 (IWAIT), pp.(1-6), 2024.
- [7] Gibson, J. J., "The Ecological Approach to Visual Perception", Houghton Mifflin, 1979.
- [8] 下川隼輝, 戸塚海太, 武川直樹, 森田慎一郎, 小林春美, 東孝文, 中村明生, "ブルブルン…「おっ, 前に動いている!」: 光学的流動の触覚表現", HCG シンポジウム 2024, pp.(1-7), 2024.
- [9] 平崎鋭矢, "歩行中の頭部の冠状面内での動き", バイオメカニズム 19, pp.117-124, 2008.
- [10] Sherrick, C. E. and Ronald, R., "Apparent Haptic Movement", Perception & Psychophysics, Vol.1, No.6, pp.175-180, 1966.