

音響効果を用いた歩行者ナビゲーション方法の提案

甲斐 飛我[†] 佐藤 哲司[†]

[†] 筑波大学情報学群 知識情報・図書館学類 〒305-8550 茨城県つくば市春日 1-2

E-mail: †s2013523@s.tsukuba.ac.jp, ††sato@cslis.tsukuba.ac.jp

あらまし 本論文は、歩行者がイヤホンやヘッドホンを用いて音楽を聴取しながら歩行する際に、その音楽に音響効果を付与することで音楽自体を歩行者ナビゲーションに使用する方法を提案する。これまで「右折してください」などの音声を用いたナビゲーションは存在するが、音声が入り込むことで音楽聴取の妨げとなっていた。提案手法では、音楽が聴こえる方向や距離をイメージとして知覚する音像を音響効果を用いて変化させることで、進行方向の指示と音楽聴取とを両立する音響ナビゲーションを実現する。音響効果を付与した複数の音楽を用いて実際に歩行実験を行い、bpm や曲調が異なる音楽であっても歩行者ナビゲーションが実現でき、音楽への理解度が重要であることが明らかとなった。

キーワード 音楽聴取, 行動データ, 歩行者ナビゲーション, 音像, 音響効果

1 はじめに

歩行中に目的地までの経路を調べる方法として現在手軽な方法としては、スマートフォンの地図アプリケーションがある。スマートフォンの位置情報から、現在地と目的地を表示し経路を示してもらい、それをたどるように歩くことで目的地にたどり着くことができる。しかし、歩行中にスマートフォンを操作することは周囲への注意力が低下してしまい、危険である。そのため、地図アプリには音声による歩行者ナビゲーションの機能が搭載されている場合がある。音声によって右左折や直進などを利用者に促すことで、目的地まで案内をするというものである。これはスマートフォンをほとんど操作をせずに目的地まで歩くことができる機能であり、この機能を利用することで周囲を見ながら歩行することができる。しかし昨今では多くの人がステレオイヤホンやステレオヘッドホンを使用してスマートフォンで音楽を聴きながら歩くことをしている。音楽を再生中にこの地図アプリの音声ナビゲーションを利用してしまうと、再生している音楽が一時的に止まったり音量が小さくなったりということが起こる。すなわち、音声による歩行者ナビゲーションは音楽聴取の妨害になってしまうということである。この歩行者ナビゲーションを聴取している音楽で行うことができれば、歩行者ナビゲーションと音楽聴取の両立が可能であると考えられる。

本研究では、歩行中にスマートフォンをほとんど操作することなく目的地まで歩くために、聴取している音楽で歩行者ナビゲーションを行う方法を提案する。提案方法では、音像というものに着目した。「音像」とは、人間が音を聴いたときに知覚される音の姿である [1]。人間は音の響き方や音量の変化などを聴きとって音像という感覚上の像をつくりだす。そしてこの音像の定位を音像定位という。この音像の定位を音響効果によって変化させることで、音楽を歩行者ナビゲーションに用いる方法を提案する。音楽に対して様々なフィルタをかけることで、音

の響き方を変化させ、結果生まれる音響効果によって音像定位を移動させる。

本論文では、第 2 章で関連研究と本研究の位置づけについて説明する。第 3 章で提案手法について説明し、第 4 章で行った実験について説明をする。第 5 章で実験結果を述べ、第 6 章で考察をし、第 7 章で結論を述べる。

2 関連研究

本研究は、歩行中に聴取している音楽を歩行者ナビゲーションに利用することを目的とし、聴取している音楽を加工し、音響効果を付与することで、音楽聴取と歩行者ナビゲーションを両立する方法を提案するものである。

渡邊ら [2] は、健常者の歩行者ナビゲーションを行うため、振動モータが取り付けられている靴型インターフェースを用いて、装着者の足の甲に振動刺激を与えることによって、歩行周期を示すということを試みている。歩行速度は、歩幅と歩行周期によって決定されるが、歩行速度の増減には歩幅の変化は歩行周期の変化に対して十分に小さかったため、歩行速度の制御を目的としている。歩行を阻害することなく歩行周期を示すことを試みている。歩行動作のどのタイミングで刺激を入力するのが効果的なのかを調べている。この靴型インターフェースは振動刺激を入力するが、装着者に心理的負荷をかけずに誘導可能であることを明らかにしている。

山本ら [3] は、従来の歩行者ナビゲーションは視覚に依存しているが、視覚に加えて触覚を用いることを提案している。提案方式として、振動装置を両手に装着し、歩行に伴って、右左折をすべき箇所まで曲がる方向の装置を振動させることで、右左折を示すことを試みている。また、経路を外れてしまった場合には両方の装置が同時に振動することで、視覚に頼らない経路案内を可能にしている。この研究は地図を見て経路を確認する従来の手法と、振動による簡単な進行方向の提示手法との併用を提案している。

小林ら [4] は、複数のユーザの音楽を用いた待ち合わせナビゲーションを提案している。目的地を設定し、複数のユーザが目的地に向かって歩行する際にアプリケーションの開始ボタンを押すと、アプリの地図上に経路が表示され、音楽が再生される。端末は目的地までの距離から歩行速度を計算し、それを元に音楽のテンポを変化させることで、複数のユーザが同時に目的地に到着できるようナビゲーションを行うというものである。

吉崎ら [5] は、受聴者の自発的な運動に伴う動的な聴覚情報の有無が水平面音像定位に及ぼす影響について明らかにするために、他受聴者の頭部回転運動に追従する動的バイノーラル音による水平面の音像定位実験を行っている。動的バイノーラル信号は受聴者の自発的な運動に伴う動的な視覚情報がない場合には、正確に音像を定位できないことを明らかにしている。

3 音響ナビゲーション方法の提案

3.1 提案方法の概要

はじめに、提案する方法が実用できる可能性や、そのおよその特性を明らかにするために予備実験を行った。その予備実験について 3.2 で説明する。右左折の誘導方法について、3.3 で説明する。そして、予備実験の結果から決定した楽曲の選定方法について 3.4 で説明し、楽曲に付与する様々な音響効果について 3.5 で説明する。予備実験の結果を受け、本研究では以下のような方法を提案する。

- 音楽に音響効果を与え、音像定位を移動させることで歩行者に右左折をさせることで、歩行者ナビゲーションを行う。

3.2 音楽の音像で右左折を促す予備実験

音楽の音像定位を移動させることで歩行者に右左折を促すことは可能なのかを明らかにするために予備実験を行った。様々な音響効果を与えて、1 曲の中で 5 回右左折をするように音像定位を変化させた楽曲を作製した。実験参加者 2 名に、ワイヤレス接続可能なステレオイヤホンまたはステレオヘッドフォンを持参してもらい、作製した楽曲を聴取しながら歩行をさせた。実験参加者には音の聴こえるほうに進行するよう伝え、目視で歩行の様子を観察した。結果は、2 名とも 5 回中 4 回はこちらの想定した方向に右左折を行った。両者とも 1 度は右左折を行うことができなかったが、1 名は音像定位の変化を聴きとることができず直進してしまい、1 名は意図していない右左折を行った。このことから、音響効果の与え方に課題はあるが、音楽の音像定位を変化させることで歩行者に右左折を促すことは可能であることが明らかとなった。

また、この予備実験で得られた参加者から、聴いたことのない楽曲では、音像定位の変化が楽曲としての演出であるのか、歩行者ナビゲーションとしての変化であるのかがわからないという意見があった。これをふまえて、本研究では聴いたことのある楽曲のほうが精密な判断が可能であり、この提案方法は歩行中に音楽を聴取している状況を想定しているため、初めて聴く楽曲や聴き馴染みのない楽曲よりもよく聴く楽曲や聴き馴染みのある楽曲のほうが音声による歩行者ナビゲーションでの妨

害の影響が大きいことが予想できることから、多くの人が聴き馴染みのあるであろう楽曲を使用して実験を行うこととした。

3.3 右左折誘導方法

提案方法の手順を説明する。歩行者はステレオイヤホンまたはステレオヘッドフォンを用いて楽曲を再生しながら歩行する。この状態を初期状態とする。歩行者は常に音の聴こえる方向に歩行をする。直進中は、再生中の楽曲は元のままでも何も音響効果を付与していない状態である、この時の音像定位を音像定位の初期位置とする。使用者は楽曲を聴取している状態で歩行し、直進している状態である。音像定位を右左折する方向に移動させる。歩行者は常に音の聴こえる方向に歩行するため、音像定位の変化を感じ取ったらその音像の方向に右左折をする。歩行者の進行方向の変化に合わせて音像定位を初期位置に戻していく。歩行者は音像定位の移動に合わせて直進状態へと戻っていく。これで右左折が完了する。音像定位は左右に移動させるため、距離としては遠ざかっている。そのため、右左折誘導中の音像定位は初期位置よりも距離を遠く感じるように表現する。

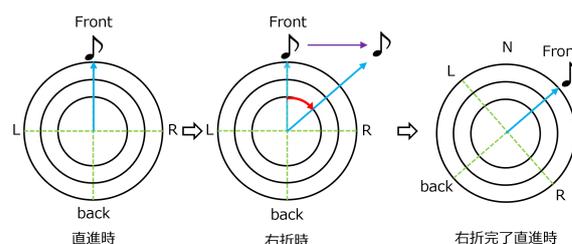


図 1: 右左折誘導方法

3.4 楽曲の選定方法

実験に使用する楽曲の条件は 3.2 をふまえて多くの人にとって聴き馴染みのある楽曲であることとする。この条件を満たす楽曲を過去 5 年間の JASRAC 賞から選定した。JASRAC 賞は日本音楽著作権協会 JASRAC¹ が毎年贈っている音楽賞² である。その受賞基準は、前年度に JASRAC が権利者へ分配した著作物使用料であり、分配額が最も多かった国内作品の上位 3 作品に金、銀、銅賞を贈っている。音楽における著作権使用料は主に、広告での利用やイベントなどでの演奏、録音物や映像出版物などの製作、放送など様々な場面での使用に際して支払われる。前年度の著作権使用料の分配額が多いということは、その楽曲が様々な場所で使用されているということになり、聴く機会も多いといえる。この JASRAC 賞の中から選定をすることで、多くの人にとって聴き馴染みのある楽曲という条件を満たすことができる。表 1 に選定した楽曲の情報を示す。

1 : <https://www.jasrac.or.jp/index.html>

2 : <https://www.jasrac.or.jp/profile/prize/backnumber.html>

JASRAC 賞は楽曲の作詞者、作曲者、音楽出版社に対して贈られる賞だが、楽曲情報としては今回の楽曲の選定には不要であるため表 1 にはアーティストの情報を示す。この表で bpm とは、1 分間の拍数 (Beats Per Minute) であり、音楽用語で言う「テンポ」に相当する。同表に示すように、bpm が 130 以上のアップテンポな曲を 3 曲、100 以下のスローテンポなバラード系を 2 曲選定している。選定した楽曲の bpm はほとんど一定であるが、曲全体を通しての平均値である。

表 1: 選定した楽曲一覧

| 曲名 | アーティスト | bpm | 賞種 | 受賞年 |
|-----------|------------------|-----|--------|-----------|
| 紅蓮華 | LiSA | 135 | 金賞 | 2021,2022 |
| Pretender | Official 髭男 dism | 92 | 銀賞 | 2021 |
| Lemon | 米津玄師 | 87 | 金賞, 銀賞 | 2020,2021 |
| 糸 | 中島みゆき | 144 | 銅賞 | 2019,2020 |
| 恋 | 星野源 | 151 | 金賞 | 2018 |

3.5 楽曲に付与する音響効果

楽曲に付与する音響効果について説明をする。音像定位を移動させるためには方向を表現するための音響効果と距離を表現するための音響効果を楽曲に付与する必要がある。今回は Cubase11³ という DAW ソフトを用いて楽曲に様々なフィルターをかけたり加工をすることによって音響効果を付与する。以下で説明する音響効果は Cubase11 に内蔵されている機能やソフトを用いて楽曲を加工することで付与する。

3.5.1 Pan(パン)

まず、方向を表現するための音響効果として Pan(パン) を操作する。Pan はパンポットと呼ばれるもので、ミキサーなどについている、ステレオ出力される音の左右の定位を操作するものである。楽曲の通常時の状態をセンター (C) とし、左端 (L100) から右端 (R100) までの間で調整することができる。例えば L100 に設定すると右側のスピーカーからは出力されず、左のスピーカーからのみ再生される。これは音量の比であり、L100 の場合は左右の音量の比が 1:0 になり、c の場合は 1:1、R50 の場合は 1:2 となる。この値を調整することで右に動かすと右から音が聴こえ、左に動かすと左から聴こえているように感じ、音の方向を表現することができる。今回は最大で L90～R90 まで値を変化させる。

3.5.2 Reverb(リバーブ)

次に距離を表現するための音響効果として Reverb(リバーブ) を使用する。これはエフェクトのひとつであり、ギターのエフェクターなどにも存在するフィルターのことである。主に残響音や反響音を表現する際に使われる。音に残響音加わることで、空間や広がりを感じさせることができる。大きな室内や小さな部屋、障害物の少ない屋外など、様々な空間を、遅れ具合や大きさなどの違いでそれぞれの場面で音の反響の仕方に似た残響音を付与することで表現することができる。今回は特定の場所ではなく、屋外の歩行可能な全ての道を想定している。そのた

め、特定の空間ではなく元の音に残響音加わることで音像の定位が遠ざかったように感じることを目的として使用する。

3.5.3 HCF(ハイカットフィルタ)

音には、高音になるほど振動数が多いため、距離によって減衰しやすいという性質がある。そのため、遠くから聴こえる音はより高音域が減衰していることになる。イヤホン・ヘッドフォンで音を聴く場合、音源の位置は一定であるので、その音の高音域を減衰させることによって距離を表現することができる。そこで HCF(ハイカットフィルタ) を用いる。このフィルタは High-Cut Filter といい、音の高音域を減衰するフィルタである。LPF(ローパスフィルタ) ともいう。音像定位を移動させる際に距離を遠ざけるために使用する。

3.5.4 アタックタイム

DAW ソフトではコンプレッサーという音が出すぎないように抑制して調整する機能を使用する。その機能の中にアタックタイムという時間を設定するものがある。アタックタイムは音が閾値を越えてからコンプレッサーが機能しはじめるまでの時間のことで、この時間を早くすると音が早く圧縮されるため音に奥行きを感じ、時間が遅いと圧縮されるのが遅いため音がより近くに感じる。この性質を利用して、アタックタイムを調整することで、距離を表現する。

3.5.5 リリースタイム

リリースタイムはアタックタイムと対となる機能である。リリースタイムは音が閾値を下回ってから、コンプレッサーが停止しはじめるまでの時間のことで、この時間を早くすると音が早く圧縮されていない状態に戻るため、奥行きを感じる時間が短くなり、時間を遅くすると、音が圧縮されていない状態に戻るまでに時間がかかるため、圧縮されている時間が長くなり、より奥行きを感じるようになる。この値も、アタックタイムと同様に距離を表現するために使用する。

4 評価実験

4.1 歩行実験概要

5 曲選定をし、音像定位を移動させるよう音響効果を付与した音源を使用して歩行実験を行う。5 名の実験参加者に選定した 5 曲の中から 3 曲を 1 曲ずつ順に聴かせながら筑波大学春日グラウンドを歩行させる。このグラウンドは周囲を木や建物に囲まれた平地である。曲は 1 曲の中で 5 回音像定位を移動させるよう音響効果を付与している。音像定位は左右のいずれか誘導したい方向に 3 秒かけて徐々に移動していき、移動後の位置で 3 秒間再生され、2 秒かけて初期位置に戻る。移動させている箇所は曲ごとに異なっており、左右に少なくとも 1 回は移動するようにしている。表 2 に各参加者に聴取させた曲と曲順の一覧を示す。

4.2 実験手順

実験参加者は音楽を聴きながら歩行するよう伝え、音が左右に動いたと感じたら、その方向に進むように指示をする。実験に使用するステレオイヤホンまたはステレオヘッドフォンは

3 : https://japan.steinberg.net/jp/support/downloads/cubase_11.html

ワイヤレスのものとし、実験用 PC に Bluetooth で接続して音楽を再生する。実験担当者はステレオイヤホンまたはステレオヘッドフォンに接続したパソコンで再生などの操作を行いつつ、接続が切れない距離を保ちながら実験参加者の歩行を妨害しないよう後ろからついて歩く。実験参加者にはウェアラブルカメラを設置したヘルメットを装着させ、視点をカメラで撮影する。

表 2: 実験参加者と聴取楽曲一覧

| 曲順 | 実験参加者 | | | | |
|----|-----------|-----------|-------|-------|-----------|
| | 参加者 A | 参加者 B | 参加者 C | 参加者 D | 参加者 E |
| 1 | 紅蓮華 | Pretender | Lemon | 恋 | Pretender |
| 2 | 糸 | 糸 | 恋 | Lemon | Lemon |
| 3 | Pretender | 紅蓮華 | 糸 | 紅蓮華 | 恋 |

この実験で、音像定位の変化に対して実験参加者がどれほど鮮明に反応できるのかを明らかにすることで、右左折誘導をどのようなタイミングで行えばよいかを検討することができる。

4.3 事後アンケート

実験参加者には 3 曲分の歩行実験後に筆記によるアンケートを実施する。このアンケートでは 11 個の質問を行う。質問は、

- (1) 持参していただいたイヤホンまたはヘッドフォンの製品名と型番を記入してください
- (2) 1 番目の曲について近いものを選択してください
 - (a) 最初から最後まで何度も聴いたことがあった
 - (b) 生活の中で耳にしたことはあった
 - (c) 曲については知っていたが聴いたことはなかった
 - (d) 曲について何も知らなかった
- (3) 2 番目の曲について近いものを選択してください
 - (a) 最初から最後まで何度も聴いたことがあった
 - (b) 生活の中で耳にしたことはあった
 - (c) 曲については知っていたが聴いたことはなかった
 - (d) 曲について何も知らなかった
- (4) 3 番目の曲について近いものを選択してください
 - (a) 最初から最後まで何度も聴いたことがあった
 - (b) 生活の中で耳にしたことはあった
 - (c) 曲については知っていたが聴いたことはなかった
 - (d) 曲について何も知らなかった
- (5) 曲の聴こえる方向の変化はどうか
 - (a) 鮮明に感じられた
 - (b) ぼんやりと感じられた
 - (c) あまり感じられなかった
 - (d) まったく感じられなかった
- (6) 曲の聴こえ方によって感じる距離の変化はどうか
 - (a) 鮮明に感じられた
 - (b) ぼんやりと感じられた
 - (c) あまり感じられなかった
 - (d) まったく感じられなかった

- (7) 右左折しやすいと感じた曲を選んでください
 - (a) 1 曲目
 - (b) 2 曲目
 - (c) 3 曲目
- (8) 右左折しづらいと感じた曲を選んでください
 - (a) 1 曲目
 - (b) 2 曲目
 - (c) 3 曲目
- (9) このシステムを道案内サービスとして利用したいと思いますか
 - (a) 利用したい
 - (b) 利用したくない
- (10) このシステムを街中で使用する場合の工夫点・改善点がありましたらお願いします
- (11) その他、実験の内容あるいは実験遂行上で気づいたことがあれば、何でも記入してください

という内容である。問 1 は何か大きく結果が異なる参加者がいた場合に使用したデバイスに原因がある場合があるので、デバイスを特定できるように製品名と型番を記入させる。問 2 問 4 は予備実験の参加者の意見から、楽曲について聴き馴染みがあるかどうか歩行者ナビゲーションの精度に関係していると考えられたため、聴取させた各楽曲についての認知度や聴取経験、聴取頻度を確認するための質問である。問 5 と問 6 は音響効果による音像定位の移動に関する質問である。問 5 は方向の変化がどれほど感じ取れたかということを確認するための質問であり、問 6 は距離の変化がどれほど感じ取れたかということを確認するための質問である。問 7、問 8 は実験参加者の主観ではどのような曲が右左折しやすいのか、あるいはしづらいつと感じたのかを確認するための質問であり、参加者の主観と歩行者ナビゲーション精度の関係について確認するために設けている。問 9 は提案方法が歩行者ナビゲーションとして有用であっても音楽聴取の妨害となってしまう可能性があるため、既存の音声による歩行者ナビゲーションに対して使用したいと思えるようなものであるのかということについて参加者に確認するための質問である。問 10 と問 11 はこのアンケートで設けた質問では確認することができない意見を調査するための質問である。

5 実験結果

歩行実験の実験結果を項目ごとに示す。

5.1 右左折の精度

まず、音像定位の移動に対して実験参加者の右左折の行動が想定していたように行われていた場合は (○)、行われなかった場合は (×) で参加者ごとに表 3 に示す。右左折の行動が想定していたように行われていたかの判定は、音像定位を移動させている間に左右のうち音像定位が移動した方向に視点が移動し、進行方向が変化した場合に行われたと判定する。

表 3: 右左折精度

| 参加者 A | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|
| 曲名 | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 |
| 紅蓮華 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 糸 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Pretender | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 参加者 B | | | | | |
| 曲名 | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 |
| Pretender | ○ | ○ | ○ | ○ | × |
| 糸 | ○ | × | ○ | × | × |
| 紅蓮華 | ○ | ○ | ○ | × | ○ |
| 参加者 C | | | | | |
| 曲名 | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 |
| Lemon | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 恋 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 糸 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 参加者 D | | | | | |
| 曲名 | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 |
| 恋 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Lemon | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 紅蓮華 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 参加者 E | | | | | |
| 曲名 | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 |
| Pretender | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Lemon | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 恋 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

表 4: 右左折の反応時間 (sec)

| 参加者 A | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|-----|
| 曲名 | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 平均値 |
| 紅蓮華 | 5.5 | 5.1 | 6.8 | 6.0 | 7.2 | 6.1 |
| 糸 | 3.0 | 4.0 | 4.6 | 2.8 | 3.8 | 3.6 |
| Pretender | 3.2 | 2.5 | 2.5 | 3.3 | 2.8 | 2.9 |
| 参加者 B | | | | | | |
| 曲名 | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 平均値 |
| Pretender | 3.8 | 3.3 | 2.9 | 3.1 | - | 3.3 |
| 糸 | 4.3 | - | 2.3 | - | - | 3.3 |
| 紅蓮華 | 6.2 | 3.4 | 3.4 | - | 3.6 | 4.2 |
| 参加者 C | | | | | | |
| 曲名 | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 平均値 |
| Lemon | 3.8 | 3.2 | 3.7 | 3.0 | 3.5 | 3.4 |
| 恋 | 2.7 | 3.1 | 2.8 | 2.7 | 3.3 | 2.9 |
| 糸 | 2.6 | 2.7 | 3.4 | 4.1 | 4.4 | 3.4 |
| 参加者 D | | | | | | |
| 曲名 | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 平均値 |
| 恋 | 4.1 | 3.9 | 3.7 | 4.7 | 3.8 | 4.0 |
| Lemon | 3.6 | 4.1 | 3.5 | 3.3 | 3.4 | 3.6 |
| 紅蓮華 | 3.0 | 3.1 | 3.5 | 3.8 | 3.7 | 3.4 |
| 参加者 E | | | | | | |
| 曲名 | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 平均値 |
| Pretender | 4.2 | 4.1 | 4.2 | 4.5 | 4.0 | 4.2 |
| Lemon | 4.1 | 4.7 | 4.1 | 3.3 | 3.1 | 3.9 |
| 恋 | 4.5 | 3.1 | 3.3 | 5.2 | 3.8 | 4.0 |

5.2 音像定位の移動に対する反応

音像定位の移動に対する実験参加者の反応について、音像定位の移動が始まった時間に対して、実験参加者が変化を感じ取り、視点が左右に移動しはじめるまでの時間を測定結果から計算した。音像定位の移動に対して実験参加者の右左折の行動が想定していたように行われていなかった箇所については計算不可として (-) としている。算出した結果を表 4 に示す。

5.3 アンケート結果

実験に使用したステレオイヤホンまたはステレオヘッドフォンの製品名と型番を 5 に示す。

6 考 察

6.1 精 度

右左折の精度について考察する。表 3 の結果では、4 名の実験参加者は右左折がすべて成功している。参加者 B は 15 回の右左折のうち 5 回失敗している、そのうち 2 曲目の「糸」では 3 回失敗している。アンケート結果では、参加者 B は聴取したすべての曲についてアンケートの間 2 問 4 で「生活の中で耳にしたことはあった」と回答している。一方で音像定位の方向の変化は「鮮明に感じられた」と回答していることから、使用した楽曲が聴き馴染みがなく、原曲の部分と音響効果によって付与された変化部分の区別がつかなかったことが考えられる。参加者 B 問 11 に対して「アップテンポの音楽だと、曲そのもの

の効果なのかと思ってしまいました。」と回答している。参加者 B が 3 回右左折に失敗した「糸」は選定曲の中ではテンポが速い曲なのでこのことから、原曲と音響効果が付与された部分とを聴き分けられることが重要であるといえる。問 9 の「このシステムを道案内サービスとして利用したいと思いますか?」という質問に対しては唯一利用したくないと回答しており、これらのことから聴き馴染みのある楽曲であれば、歩行者ナビゲーションに用いることができることが明らかとなった。楽曲のテンポや曲のジャンルが精度に影響があるのかは今回の実験結果からは検証できなかった。

6.2 音像定位の移動に対する反応

音像定位の移動に対する反応時間について考察する。表 4 では個人差と楽曲差があることが考えられる。最も早い反応時間は 2.3 秒で、右左折に成功した 70 回のうち 60 回が 3.0 秒から 7.2 秒の間になっている。つまり右左折のうち約 86% は音像定位が移動後の位置から初期位置に戻るまでの間に反応していることがわかる。反応のタイミングは、音像定位の変化の間に収まっていることから、音像定位の変化の速度やタイミングは適切であるといえる。音像定位が初期位置に戻っている間に右左折をしはじめていることもあるが、その点に関する違和感や反応が遅れたなどの意見はアンケートには記入されていない。また、このことから主に音像定位の移動に反応しているというよりも、初期状態との比較で変化していることを感じ取っていることが考えられる。そして、音像定位の変化は粗放にしか知覚

表 5: 実験使用再生機器一覧

| | 製品名 | 型番 |
|-------|--------------------|------------------|
| 参加者 A | JPRIDEJPA2 | 2ALCL-JPRIDEJPA2 |
| 参加者 B | オーディオテクニカワイヤレスイヤホン | ATH-CKR7TW |
| 参加者 C | AirPods Pro | A2084 |
| 参加者 D | KABOANG | A8 |
| 参加者 E | オーディオテクニカワイヤレスイヤホン | ATH-CKR7TW |

することができないことが考えられる。また、それぞれの平均値を見ると参加者によって楽曲ごとの 0.3 3.2 のばらつきがあることがわかる。これは特定の楽曲は平均値が高い、あるいは低いといった傾向が見られないため、楽曲のテンポやジャンルは関係ないと考えられ、同じ曲でも参加者によって平均値に差があるため、得意なテンポやジャンルが人によって違うということが考えられる。

また、個人ごとの反応時間の分散（標準偏差）を計算した。図 2 を見ると実験参加者 A のみが反応時間が遅く、分散の値も大きいことがわかる。その他の参加者は反応時間も短く、ばらつきも少なかった。楽曲ごとの反応時間は紅蓮華のみが時間がかかっており、他の楽曲は bgm に関係なくほぼ同じ反応時間であった。

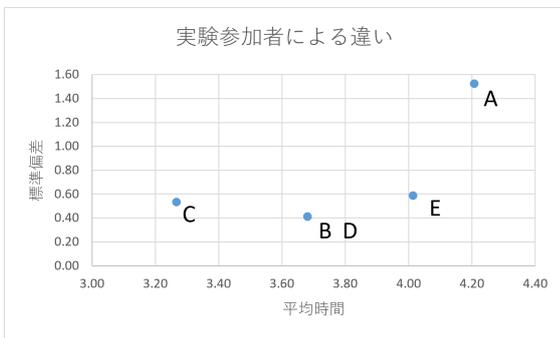


図 2: 反応時間個人差

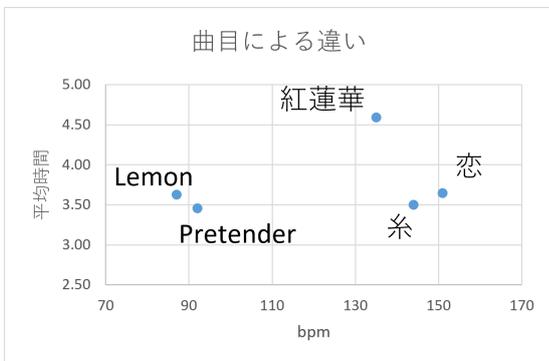


図 3: 反応時間楽曲差

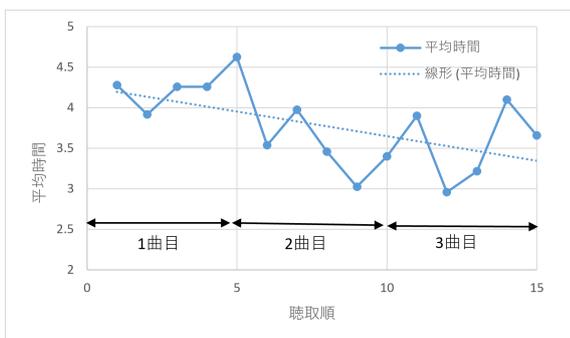


図 4: 学習効果

6.3 学習効果

音像定位の移動について楽曲を聴く量にともなって感覚が慣れていくのかということについて考察する。図 4 の楽曲の順番ごとの平均時間を見ると、緩やかに反応時間が早くなっていることが確認できるが、各右左折の反応時間にはばらつきがある。一方で、参加者 C はアンケートの問 10 にて、「右左折するべき場所の少し前で音響の変化があると『次の交差点でこっちに曲がるんだな』というのがわかってとても良いと感じました」と回答しており、この提案方法に加えて、交差点や T 字路などの地形の視覚的情報があると、音像定位の変化を予測して音像定位の変化に対して身構えるような行動が現れるのではないかと考えられる。

6.4 音響効果

今回、楽曲に付与した音響効果が有効に機能していたかどうかはアンケートの問 5 の「曲の聴こえる方向の変化はどうか」と問 6 「曲の聴こえ方によって感じる距離の変化はどうか」で参加者に確認した。まず問 5 は 4 名が「鮮明に感じられた」、1 名が「ぼんやりと感じられた」と回答している。音像定位の方向については Pan(パン) で表現しており、アンケート結果と右左折の精度から、音響効果が有効に機能していたといえる。次に問 6 は 4 名が「ぼんやりと感じられた」、1 名が「あまり感じられなかった」と回答している。音像定位の距離は Reverb(リバーブ), HCF(ハイカットフィルタ), アタックタイムで表現しており、これについてはあまり有効に機能してはいなかった。これは距離の表現をより強調すると音楽聴取の妨害になってしまい、音楽聴取と歩行者ナビゲーションの両立という目的が達成できない場合があるため音響効果を慎重に付与していたことが原因であると考えられる。音像定位の距離は右左折のためというよりは音像定位の移動をより感覚的に自然に感じられるように表現しているので音像定位の方向ほどは右左折に影響がないと考えられるため音像定位の距離の変化を鮮明に感じられるように音響効果を付与した場合、音楽聴取の妨害にはならないのかを検証する必要がある。

6.5 歩行者ナビゲーションとしての有用性

この提案方法は聴き馴染みのある楽曲であれば歩行者ナビゲーションに用いることができることが明らかとなったが、参加者 B 以外の 4 名はアンケートの間 9 でこの提案方法を道案内サービスとして利用したいと回答しており、このことから、歩行者ナビゲーションのための音響効果の付与は音楽聴取の妨害にはなっていないと考えられる。よって音楽聴取と歩行者ナビゲーションの両立も達成することができたといえる。

7 結 論

7.1 ま と め

本研究では、音像定位という人が音を聴いて作り出す感覚上の像に着目し、楽曲に様々な音響効果を付与することで、音像定位を移動させ、音声による歩行者ナビゲーションの代わりに聴取している音楽の音像定位で歩行者ナビゲーションを行うという歩行者ナビゲーション方法を提案した。この手法は、歩行者に音響効果によって音像定位の方向と距離を移動させ、その音が聴こえると感じる方向に向かって歩行させることで、歩行者は音の聴こえる方向(音像)に向かって歩行するという行動を取り続けるだけで歩行者ナビゲーションを行うことができる方法である。

具体的には、歩行者はステレオイヤホンまたはヘッドホンで楽曲を再生し、この状態を初期状態とする。初期状態では聴取している楽曲は原曲のままであり、音響効果は何も付与していない。この状態は音像は前にあるため、歩行者は直進する。右左折させる際には音響効果を付与し、音像定位を左右いずれか右左折させる方向に移動させる。歩行者は音像定位の移動を感じ取り、そちらに向かって右左折をする。歩行者の進行方向の変化に合わせて、音像定位を初期位置に戻していく。音像定位が初期位置に近づくにつれ、歩行者も直進状態へと戻っていく。このようにして右左折をさせ、歩行者ナビゲーションを行う方法である。

実験では、5 名の実験参加者に対して過去 5 年間の JASRAC 賞から選定した 5 曲のうち 3 曲を聴取させながら歩行させ、1 曲につき 5 回音像定位を移動させて、歩行者ナビゲーションを行った。実験の結果、音像定位の移動によって、歩行者ナビゲーションを行うことは聴き馴染みのある楽曲であれば可能であり、音楽聴取の妨害にもなっていなかった。また、実験結果から、右左折の精度には聴き馴染みがあるかどうかに関係しており、学習効果はみられなかった。この実験によって、歩行者ナビゲーションと音楽聴取の両立ができたといえる。

7.2 今後の課題

今後の課題としては 6 つ挙げられる。1 つ目はこの提案方法を用いて道で歩行者ナビゲーションを行った場合に反応時間などの結果にどのような影響が出るのかを検証する必要があることが挙げられる。音像定位を移動させた際に視覚情報として右左折可能な道が確かめられる場合には、音像定位の移動をある程度予測することができるため、早く反応できることが考えら

れる。2 つ目は音像定位の距離の変化が鮮明に感じられるように音響効果を付与した場合の音楽聴取への影響を検証する必要があることが挙げられる。音楽聴取の妨害になってしまう範囲でより音像定位の距離の変化を感じられるような音響効果についてよりよい付与方法を検証する必要がある。3 つ目は今回検証していない曲について検証する必要があることが挙げられる。今回は JASRAC 賞から楽曲を選定したが、すべてボーカルの曲であったり、楽曲のジャンルが偏っていたりしている。聴き馴染みのある楽曲という条件を満たしつつ、クラシックなどのボーカルがない楽曲や、楽曲のテンポが途中で変わる楽曲などの場合には歩行者ナビゲーションとして使用することが可能なかを検証する必要がある。4 つ目は年齢と提案方法との関係を検証する必要があることが挙げられる。今回行った歩行実験は全員が筑波大学の大学生であり、年齢層が偏っている。聴覚は加齢に伴って老化するので、年齢に関係なくこの提案方法が有効であるのかや、歩行者の年齢によって右左折の精度や反応時間にどのような変化があるのかを検証する必要がある。5 つ目はこの提案方法を歩行者ナビゲーションとして使用するためには地図機能や位置情報機能の連携やそれらの機能を備えたシステムの構築が必要である点が挙げられる。これにはまず最適なシステムを構築するためにどのような方法が良いのかを検討する必要がある。6 つ目は経路の修正方法がないことである。右左折が適切に行われず歩行者が経路を間違えてしまった場合にそれをどのように知らせ、どう修正するのかを検討する必要がある。本研究の有用性をより確かにするため、上記の課題を解決した上で、歩行実験を行う必要があると考えられる。

文 献

- [1] 岩谷幸雄. 頭部伝達関数による音像定位. 日本音響学会誌, Vol. 73, No. 3, pp. 173–180, 2017.
- [2] 渡邊淳司, 安藤英由樹, 朝原佳昭, 杉本麻樹, 前田太郎. 靴型インタフェースによる歩行ナビゲーションシステムの研究. 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 5, pp. 1354–1362, 2005.
- [3] 山本篤史, 屋代智之. 振動を用いた歩行者ナビゲーションの提案. 情報処理学会研究報告高度交通システム (ITS), Vol. 2003, No. 56, pp. 55–62, 2003.
- [4] 小林亮介, 杉本麻樹. 音楽のテンポ変化による歩行速度変化を利用した待ち合わせ到着時刻ナビゲーションシステム. 研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC), Vol. 2015-EC-38, No. 2, pp. 1–4, 2015.
- [5] 吉崎大輔, 平原達也. 他受聴者の頭部回転運動に追従して移動する音像の定位. 日本音響学会講演論文集, pp. 467–468, 2012.