

Title	Phantom Walls : 聴覚刺激を用いた感覚代行による空間知覚手法の提案
Sub Title	Phantom Walls : spatial perception and navigation method through sensory substitution using auditory
Author	池田, 匠(Ikeda, Takumi) 南澤, 孝太(Minamizawa, Kōta)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2023
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2023年度メディアデザイン学 第1048号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002023-1048">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002023-1048</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2023年度

Phantom Walls: 聴覚刺激を用いた  
感覚代行による空間知覚手法の提案



慶應義塾大学  
大学院メディアデザイン研究科

池田 匠

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に  
修士(メディアデザイン学)授与の要件として提出した修士論文である。

池田 匠

研究指導委員会：

南澤 孝太 教授 (主指導教員)

砂原 秀樹 教授 (副指導教員)

論文審査委員会：

南澤 孝太 教授 (主査)

砂原 秀樹 教授 (副査)

稲蔭 正彦 教授 (副査)

修士論文 2023 年度

# Phantom Walls: 聴覚刺激を用いた 感覚代行による空間知覚手法の提案

カテゴリ：サイエンス / エンジニアリング

## 論文要旨

視覚を用いない障害物知覚の方法はいくつかあり、人の能力として備わっているもの（あるいは訓練により身につけられるもの）、何らかの人工的道具を用いることにより実現するものなど、多岐にわたっている。例えば、環境音や自発音の反響音を聴くことによって障害物の空間配置を知覚する反響音定位や、白杖等の道具を使った接触により障害物を知覚する方法、聴覚や触覚などの他の知覚に視覚情報を代替する感覚代替などがあげられる。これらの既存手法が示すように、空間知覚は、様々な全く異なるアプローチで成立させることができる。本研究において、これまでにない新しい空間知覚へのアプローチと手法 Phantom Walls を提案する。

本手法では、空間的な音から体性感覚へのクロスモーダル効果を応用することで、目に見えない壁から“幻”の圧力のようなものを発生させ滑らかで直感的な空間知覚を実現することを試みる。Phantom Walls においては目に見えない壁 (phantom wall) がバーチャルなスピーカーによって表現される。複数の壁が存在していても整合性の取れた空間知覚が立ち上がるように、スピーカーの配置・音量・テンポに関する3つの基本法則を構成した。

本論文では、個々の基本法則が知覚上成立しているかどうか、また実際にそのような法則が支配する世界においてユーザが空間知覚・ナビゲーションを行うことができるかどうかについての検証を行う。

キーワード：

感覚代行, 空間知覚, ナビゲーション, 体性感覚, 空間音響

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

池田 匠

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2023

# Phantom Walls: Spatial Perception and Navigation Method through Sensory Substitution Using Auditory

Category: Science / Engineering

## Summary

There are several methods of perceiving obstacles that do not use vision, some of which are inherent to human abilities (or can be acquired through training), and some of which are realized by using some artificial tools. For example, there are reverberation localization, which perceives the spatial arrangement of obstacles by listening to the echoes of environmental or spontaneous sounds, the method of perceiving obstacles through contact with a tool such as a white cane, and sensory substitution, which substitutes visual information for other perceptions such as hearing or touch. As these existing methods show, spatial perception can be established through a variety of completely different approaches. In this study, we propose a new and unprecedented approach to spatial perception and a method, Phantom Walls.

By applying cross-modal effects from spatial sound to somatosensory perception, this method generates a kind of "phantom" pressure from invisible walls. The work attempts to realize a smooth and intuitive perception of space. In Phantom Walls, invisible walls (phantom walls) are represented by virtual speakers. In order to create a consistent spatial perception even in the presence of multiple walls, we have constructed three basic rules for speaker placement, volume, and tempo of sound.

In this paper, we examine the perceptual validity of each of the basic laws and whether users can actually perceive and navigate space in a world governed by such laws.

Keywords:

sensory substitution, spatial perception, navigation, somatosensory, spatial acoustics

Keio University Graduate School of Media Design

Takumi Ikeda

# 目 次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1. 人の行動と空間知覚	1
1.2. 視覚障害者の空間知覚	2
1.3. 視覚を用いず空間知覚はつくれるか	4
1.4. 本研究の目的	4
1.5. 本論文の構成	4
<b>第 2 章 関連研究</b>	<b>6</b>
2.1. 人間の空間知覚	6
2.2. 視覚障害者の空間知覚と感覚代行を用いたナビゲーション	7
2.3. クロスモーダリティを活用した空間知覚拡張	11
2.3.1 触覚を利用した空間知覚拡張	12
2.3.2 聴覚を利用した空間知覚拡張	13
2.3.3 空間知覚拡張の現在	14
2.4. 本章のまとめ	15
<b>第 3 章 聴覚刺激を用いた空間知覚拡張手法の提案</b>	<b>17</b>
3.1. 時間的・空間的に連続な空間知覚	17
3.2. 空間音から体性感覚へのクロスモーダル効果	18
3.3. Phantom Walls の提案	19
3.4. ユースケース	20
3.5. 空間知覚を成立させる音のデザイン	21
3.5.1 空間知覚に必要な要素	21
3.5.2 体性感覚を感じさせ、強めるための調整	22

---

3.5.3	音源の再生速度とテンポについて . . . . .	23
3.6.	Phantom Walls を構成する 3 つの法則 . . . . .	26
3.6.1	スピーカーの位置配置に関する法則（位置法則） . . . . .	26
3.6.2	音量に関する法則（音量法則） . . . . .	29
3.6.3	テンポに関する法則（テンポ法則） . . . . .	34
3.6.4	音色のデザイン . . . . .	36
3.7.	実装 . . . . .	38
3.8.	ユーザーテスト . . . . .	38
3.8.1	予備実験 . . . . .	38
3.8.2	Embodied Media Project オープンラボ&ARTBAY TOKYO . . . . .	41
3.9.	チュートリアルデザイン . . . . .	48
3.10.	本章のまとめ . . . . .	49
<b>第 4 章</b>	<b>Phantom Walls の評価</b> . . . . .	<b>50</b>
4.1.	実験 A: Phantom Walls を用いた空間知覚実験 . . . . .	50
4.1.1	目的 . . . . .	50
4.1.2	概要 . . . . .	50
4.1.3	結果と考察 . . . . .	53
4.2.	実験 B: Phantom Walls の長期体験による空間知覚の変化 . . . . .	61
4.2.1	目的 . . . . .	61
4.2.2	概要 . . . . .	62
4.2.3	結果と考察 . . . . .	62
4.3.	実験 C: 視覚障害者における Phantom Walls を用いた空間知覚実験 . . . . .	63
4.3.1	目的 . . . . .	63
4.3.2	概要 . . . . .	63
4.3.3	結果と考察 . . . . .	64
4.4.	Phantom Walls のデモ展示 . . . . .	67
4.4.1	概要 . . . . .	67
4.4.2	結果 . . . . .	69
4.5.	考察 . . . . .	71

4.6. 本章のまとめ . . . . .	71
<b>第 5 章 Conclusion</b>	<b>72</b>
謝辞	74
参考文献	75

# 目 次

2.1	Sunu Band . . . . .	10
2.2	Aux Deco を着用している様子 . . . . .	10
2.3	Aux Deco の仕組みイメージ図 <sup>4</sup> . . . . .	11
2.4	ウォークリーダー . . . . .	11
2.5	Haptic Rader . . . . .	12
2.6	echo . . . . .	13
2.7	Superhuman Sports Grand Challenge2020 Sense Challenge . . . . .	13
2.8	Sight . . . . .	14
2.9	Project Guideline の仕組み . . . . .	15
3.1	目に見えない壁から“圧力”や“反発”のような感覚を受けるイメージ図 . . . . .	19
3.2	基準の波形と再生速度を変化させたときの波形の比較 . . . . .	24
3.3	等ラウドネス曲線 . . . . .	25
3.4	位置法則のイメージ図 . . . . .	27
3.5	音量法則のイメージ図 . . . . .	29
3.6	体験者と壁との距離と音量の関係（初期版） . . . . .	29
3.7	体験者と壁との距離と音量の関係（最新版） . . . . .	32
3.8	テンポ法則のイメージ図 . . . . .	34
3.9	体験者の頭に対する壁の角度とテンポの関係 . . . . .	34
3.10	同じ音程を鳴らし続ける音色 . . . . .	36
3.11	1つの音程を休符で区切った音色 . . . . .	37
3.12	最終的に使用している音色 . . . . .	37

3.13	予備実験でのチュートリアルの壁の配置を上から見た図 . . . . .	39
3.14	予備実験での壁の配置を上から見た図 . . . . .	40
3.15	予備実験での参加者が歩いた軌跡 . . . . .	40
3.16	Embodied Media Project オープンラボでのチュートリアル の壁の配置を上から見た図 . . . . .	42
3.17	Embodied Media Project オープンラボでのチュートリアル の壁の配置を体験者の目線で見た図 . . . . .	42
3.18	ARTBAY TOKYO でのチュートリアル の壁の配置を体験者の目線で見た図 . . . . .	43
3.19	Embodied Media Project オープンラボ・ARTBAYTOKYO での迷路 . . . . .	44
3.20	Embodied Media Project オープンラボ・ARTBAYTOKYO での体験風景 . . . . .	45
3.21	Embodied Media Project オープンラボでの参加者が歩いた軌跡 .	46
3.22	ARTBAY TOKYO での体験者の軌跡 1 . . . . .	47
3.23	ARTBAY TOKYO での体験者の軌跡 2 . . . . .	48
3.24	迷路体験のためのチュートリアル . . . . .	49
4.1	実験 A でのチュートリアル の壁の配置を上から見た図 . . . . .	51
4.2	実験 A 空間配置課題の壁の配置 を上から見た図 . . . . .	52
4.3	実験 A 迷路課題の壁の配置 を上から見た図 . . . . .	53
4.4	実験 A 空間配置課題参加者 1 の結果 . . . . .	53
4.5	実験 A 空間配置課題参加者 2 の結果 . . . . .	54
4.6	実験 A 空間配置課題参加者 3 の結果 . . . . .	54
4.7	実験 A 空間配置課題参加者 4 の結果 . . . . .	55
4.8	実験 A 空間配置課題参加者 5 の結果 . . . . .	55
4.9	実験 A 空間配置課題参加者 6 の結果 . . . . .	56
4.10	実験 A 迷路課題参加者 1 の結果 . . . . .	56
4.11	実験 A 迷路課題参加者 2 の結果 . . . . .	57
4.12	実験 A 迷路課題参加者 3 の結果 . . . . .	57

4.13	実験 A 迷路課題参加者 4 の結果 . . . . .	58
4.14	実験 A 迷路課題参加者 5 の結果 . . . . .	58
4.15	実験 A 迷路課題参加者 6 の結果 . . . . .	59
4.16	Phantom Walls による知覚が身体化した例 . . . . .	62
4.17	空間配置課題視覚障害者の方の結果 . . . . .	64
4.18	迷路課題視覚障害者の方の結果 1 . . . . .	65
4.19	迷路課題視覚障害者の方の結果 2 . . . . .	65
4.20	SA デモでのチュートリアルの壁の配置を上から見た図 . . . . .	68
4.21	SA デモでのチュートリアルを体験者が見た図 . . . . .	68
4.22	SA デモでの体験コンテンツ . . . . .	69
4.23	SA デモでの体験の様子と歩いた軌跡 1 . . . . .	70
4.24	SA デモでの体験の様子と歩いた軌跡 2 . . . . .	70

# 表 目 次

3.1	位置法則の検証 . . . . .	28
3.2	参加者と壁から 0.66m 地点との距離 . . . . .	31
3.3	参加者と壁、参加者と壁から 0.66m 地点との距離 . . . . .	33
3.4	角度の知覚 . . . . .	35

# 第 1 章 序

# 論

## 1.1. 人の行動と空間知覚

私は、オリエンテーリング（森の中で地図とコンパスを持ち決められた地点をまわる速さを競う競技）というスポーツをしている。そのなかで、地図を読みながら森の中を走っているとよく倒木や岩などにつまづいたり、足をぶついたりすることがある。走っていても数秒に一回進行方向を確認することで私は目の前にある障害物を避けることができるが、進行方向を確認することで地図から目を離すことになり、読図がおろそかになってミスをしたり、読図をするために立ち止まる必要が出てきたりと、タイムが遅くなってしまう。そのことから、目で見えていなくても障害物を知覚して避けたいと考え、視覚に依らない空間知覚ができるような人間の知覚能力の拡張に興味を抱いた。

人間の情報入力の約 80%は視覚と言われている。そのため、人間は音や気配を感じたり、触れたりすることで視覚を使わずにさまざまな感覚を使って空間知覚をしているが、空間知覚の約 80%は視覚に依存しているともいえる。しかし、自分が実際に森を走っていて障害物を知覚するときに視覚を用いなくても障害物を無意識に知覚して避けていることが度々ある。視覚が空間知覚に大きな影響を与えることは確かであるが、視覚を用いずとも他の感覚を使った空間知覚も十分に可能なのではないかと考え、視覚を用いない空間知覚を実現したいと考えた。

## 1.2. 視覚障害者の空間知覚

視覚障害者は普段から視覚を用いない空間知覚をしているので、まず視覚障害者の空間知覚について考える。視覚障害者の空間知覚方法はいくつかあり、何らかの人工的道具を用いたり他者の介助を受けることで実現するもの、人の能力として備わっているもの（あるいは訓練により身につけられるもの）など多岐にわたる。例えば、晴眼者に手引きをしてもらう方法、白杖を使って接触により障害物を知覚する方法、盲導犬を使い導いてもらう方法、ナビゲーションシステムなどを使う方法、エコロケーション [1] によって周囲の障害物を知覚する方法などがある。

実際に視覚を用いない空間知覚を体験してみたいと思い、視覚障害者の方が案内人となり、完全な暗闇の世界を体験するイベントである“DIALOGUE IN THE DARK”<sup>1</sup>に参加した。体験内容は、裸足になり、完全な暗闇の中を周りの案内人や参加者の声と手渡される白杖のみで歩き回ること、視覚以外の感覚を使って空間を感じたり、普段は意識していない感覚に意識を向けるというものだった。見知った場所ではない初めて入る部屋の中で真っ暗闇の中歩くのは、白杖をもっていたり、案内人の方のガイドがあってもかなり恐怖を感じた。しかし、想像していた以上に自分や他人の声の反響によって部屋のサイズがある程度予想できたり、壁との距離が大まかに知覚できたりすることが分かった。音がしない中で白杖を用いて暗闇を歩くことが何も見えない所を手探りで歩く感覚だったのに対して、自分の声の反響や周囲の音に注意を向けながら歩くことは、鮮明には何が自分の周りにあるのか把握することはできないけれどぼんやりと周りの状況が見えているような感覚だった。

また、ブラインドサッカーの選手が講師となり開催するブラインドサッカーワークショップである“OFF TIME”<sup>2</sup>に参加した。体験内容は、アイマスクを付けて目隠しをした状態で音や声を頼りに動いたり走ったり、ブラインドサッカー用の

---

1 一般社団法人ダイアログ・ジャパン・ソサエティ DIALOGUE IN THE DARK, <https://did.dialogue.or.jp/totonou/>

2 日本ブラインドサッカー協会 OFF TIME, <https://www.offtime.jp/>

鈴が入っていて転がると音が鳴るボールを蹴るというものだった。音が鳴るボールが移動したときにおおよそのボールの場所やどの方向にボールが移動したかなどを音で聴いて感じる事ができた。多くの方がワークショップに参加していたため、複数のブラインドサッカー用ボールの音が同時に聴こえてくることも多くあったが、距離感や方向の感覚から自分の聞きたい音を聴き分ける感覚を味わう事ができた。

これらの体験を通じて、普段は視覚的に見えているせいで特に意識していなかった感覚が空間知覚には役立っていることが実感できた。案内人や講師の視覚障害者の方に普段どのように空間を知覚しているのか尋ねると、エコロケーションという自発音や環境音の反響音を聴くことで周囲の空間を知覚する方法を最も使っていて、その補助として白杖等の道具を使っていることが分かった。エコロケーションを使うことで人の位置や空間のどこに物が位置しているか、前から歩いてくる人が自分の右から来るのか左から来るのか、階段が登りなのか下りなのかまでも把握することができると仰っていた。エコロケーションを使った空間知覚のメリットとしては、誰でも練習することで習得することができる事が挙げられる。デメリットとしては、習得するまでに時間がかかるため、後天的に視覚障害になった方などはすぐには使えるようにならないことや、大雨などの時は反響音がかき消されてしまい何も情報が得られなくなってしまうことから、環境に左右されやすい事が挙げられる。このデメリットの部分が、現在視覚障害を持っている人が感じている課題であることが分かった。また、「空気感」や「雰囲気」、「肌感覚」で障害物が近づいたことや街を歩いているときの建物の並びなどが分かるが、言語化が難しいと仰っていた。晴眼者の人数名に話を聞いたところ、「空気感」、「雰囲気」、「肌感覚」を意識して空間の知覚している人はいなかった。そのため、同じ空間にいたとしても視覚障害者の方が知覚している空間と晴眼者が知覚している空間は異なっている可能性がある。

習得難易度が低く（習得時間が短く）、環境に左右されない視覚に依らない新しい空間知覚を創ることができれば、同じルールの下で視覚の有無に関わらず空間を同じ質で知覚をすることができるようになる。

### 1.3. 視覚を用いず空間知覚はつくれるか

視覚を用いず空間知覚を実現したいという動機を持ち、視覚障害者の方が知覚している方法での空間知覚を体験したところ、視覚を使わなくても視覚と同じように知覚できる情報があることに気づいた。人間拡張という分野の研究があり、2010年から国際会議も開かれている。この人間拡張は大きく4つの分野があり、身体拡張、存在拡張、認知拡張、そして知覚拡張である。現在実現している技術としては、身体拡張においては、義足やパワーアシストスーツ、存在拡張においては、デジタルアバターや遠隔操縦ロボット、認知拡張においては、脳内チップ、知覚拡張においては、コンタクトやARグラスなどが挙げられる。これらの技術は人間の本来持つ能力を超えるものであり、同様に人間が現在知覚できる空間知覚の能力を超えた空間知覚を拡張するシステムを創ることも可能であると考えた。

### 1.4. 本研究の目的

そこで、本研究では視覚を用いず本来の人間の持つ空間知覚の能力を超えた空間知覚ができるシステムを実現し、障害物にぶつからずに歩くことを実現することを目的とした。

### 1.5. 本論文の構成

本論文は五章で構成される。本章では、空間知覚に興味をもったきっかけ、完全な暗闇での体験を経験し、視覚障害を持つ方へのインタビューから現在の視覚を用いない空間知覚の課題を知り、そこから視覚を用いない空間知覚ができるシステムを実現したいという本研究の目的を述べた。

第二章では、人間はどのようにさまざまな感覚を知覚しているのか、空間知覚に用いられている感覚等を調査した。次に、人間の情報入力約80%といわれる視覚を失っている視覚障害者の空間知覚と、感覚を別の感覚により代用する感覚代行を用いた歩行補助を行う技術を紹介した。そして、クロスモーダリティを活

用し、人間が本来持つ空間知覚の能力を超えた空間知覚の拡張を行っている研究や作品を紹介した。

第三章では、時間的・空間的に連続な空間知覚を定義し、空間音から体性感覚へのクロスモーダル効果を活用して空間知覚を行う手法である Phantom Walls を提案した。次に、Phantom Walls を実現するために必要な空間知覚を成立させるための音をデザインし、Phantom Walls の音の世界を構成する3つの法則を定義した。そして、提案した手法についての予備実験を行い、Phantom Walls がデザイン通りに機能しているか検証した。また、新たな方法を用いて空間知覚をする際のトレーニングの重要性について触れ、Phantom Walls を用いて空間知覚を行う際の適切なチュートリアルを設計した。

第四章では、第三章で提案した手法についての実証実験を行った。また、提案した手法の Limitation や Future Work について述べた。

第五章では、本論文についてまとめた。

## 第 2 章

# 関 連 研 究

### 2.1. 人間の空間知覚

私たち人間は、普段無意識のうちに空間知覚を行って生活をしている。特に、ものに触れたり移動をしたりする際には必ず空間知覚をする必要がある。まずは、人間がどのように感覚器官を用いて事象を知覚しているのかを調査した。Mather ら [2] や清水ら [3,4] は以下のように述べている。感覚器官（耳、手、目など）で感覚刺激（音、振動、光など）を受容し、それが神経系を通じて脳に伝達され、感覚として知覚する。そして、知覚した感覚を過去の経験や知識と照合・他の感覚と統合し、情報処理をすることで認知をする。kenyon ら [5] によると、同じ感覚刺激を受容したとしても、知覚する人の経験や知識により認識は異なることが分かっている。

人間の情報入力の約 80%は視覚である [6] と言われており、空間知覚には主に視覚が用いられるが、視覚の他にも聴覚や触覚なども空間知覚をする際に用いられる。稲上ら [7] は、人間は移動中に限られた視野だけでなく、自身の後方の空間も含めて周囲の空間全体を意識していることを示唆している。視界に入らない空間も意識しているということは、視覚以外の感覚も空間知覚に寄与していることが分かる。

Wade ら [8] によると、視覚を用いた空間知覚では、空間内の観察対象の位置や奥行きを知覚、静止している環境に対する観察対象の変位による物体の移動の知覚、静止している観察対象に対する観察者の変位による観察者の移動の知覚などが可能である。奥行きを知覚は特に空間知覚において重要な要素である。Wheatstone [9] によると、両眼視差という左右の目で見える見え方の違いにより人間は奥行きの

知覚をしている。大山 [10] によると、輻輳（ふくそう）と呼ばれる観察対象物にピントを合わせた際の眼球の筋肉の緊縮から奥行きを知覚をしたり、単眼運動視差といい単眼でも観察対象または観察者が移動することで視点が変わっていくことで奥行きを知覚することができる。また、市原ら [11] によるとコントラストの違いによっても奥行きを知覚することができる。視覚を用いた空間知覚は完全な暗闇などの光のない空間では機能しない。

聴覚を用いた空間知覚では、Wallach [12] により頭を動かすことで3次元空間内において音の方向定位が可能であることが分かっている。これも両眼視差と原理は似ており、Perisaら [13] によると、両耳間の音の到達時間差や周波数の差を利用して方向を知覚している。音による距離知覚は両耳間の刺激の強度差やラウドネス、運動視差、直接音と残響音の比率などにより成立する。また、Wightman [14] によると、複数の音を知覚したとき、音のペア間の相対的な空間距離を知覚することも可能である。Bronkhorstら [15] によると音による距離知覚の精度は自由音場では低いが、室内ではより高い精度で知覚することができる。Oechsleinら [16] によると、Doppler [17] の発見したドップラー効果を用いて、移動する音源が近づいてくるのか遠ざかっているのかを知覚することもできる。音を用いた空間知覚は音のない環境では機能しない。

触覚を用いた空間知覚では、自身の身体をスケールにすることで触れるだけで物体の位置や自身の向きとの相対的な方向、大きさなどを知覚できる。また、触れることができないことでその空間に何も無いということを知覚することもできる。

これらの感覚による知覚を統合することで、人間は空間知覚を行っている。周囲の空間を知覚をすることで私たち人間は安全にナビゲーションをすることが可能となる。

## 2.2. 視覚障害者の空間知覚と感覚代行を用いたナビゲーション

人間の情報入力約80%は視覚であるといわれていることから、人間の空間知覚の大部分を占めるのは視覚を用いた空間知覚であるといえるが、その視覚を失っ

てしまっている視覚障害者はどのように空間を知覚をしていて、またどのようにナビゲーションを行っているのだろうか。視覚障害者といっても障害の種類は様々であり、視力障害、視野障害、色覚障害、光覚障害がある。

John ら [18] によると、相対距離の知覚は晴眼者、後天的盲目、先天的盲目の順に精度が高いことから視覚経験の差が距離知覚に影響を及ぼしている可能性がある。Lessard ら [19] によると、音を用いた空間知覚は晴眼者に比べて視覚障害者の方が正確にできることがわかっている。

Daniel kish というアメリカのエコロケーションの専門家は、全盲でありながらも白杖を用いずに歩いたり、自転車に乗ったりすることができる。エコロケーションというのは、コウモリやイルカが用いる技術であり、自らが発した超音波の反響音を聴くことにより、目で見えていなくても空間を知覚することができるという技術である。人間は超音波を発することができないので代わりに自発音や環境音の反響音を聴くことにより、空間を知覚する。エコロケーションは、視覚障害者しかできないかというそうではなく、Liam ら [20] によると、10 週間のトレーニングにより視覚障害の有無や年齢に依らず誰でもエコロケーション技術を身につけることができる。このことから、トレーニングをすることで知覚は他の知覚の有無に依らず誰でも向上させることができると考えられる。

エコロケーションは視覚障害者が空間知覚をする方法の一例であり、他にも様々な方法で視覚障害者は空間知覚やナビゲーションをしている。最もよく知られている方法だと白杖を用いる方法が挙げられる。白杖は長い杖で、白杖を用いて地面をなぞったり叩いたりすることで周囲の空間に障害物がないかを知覚する。杖 1 本で空間知覚をすることができるが、杖の届く範囲の空間しか知覚することができないという欠点もある。白杖は他の空間知覚やナビゲーション方法と併用されることも多い。

盲導犬を使った方法もよく知られている方法である。トレーニングを受けた犬が障害物の有無や階段の存在を視覚障害者に伝えることで安全にナビゲーションをすることができる。白杖との違いとしては、白杖の届かない範囲や、動く障害物の存在に関しても盲導犬により知覚することができる。

また、晴眼者による手引きもよく知られている方法である。これは晴眼者が視

覚障害者の先導をし、手を引くことで空間を知覚しナビゲーションする方法である。この方法は言葉を使ってコミュニケーションが取れるため、最も安全にナビゲーションができる。

ここまでは人間が持っている感覚を用いた空間知覚の方法について述べたが、感覚代行という技術を用いて視覚を補い、ナビゲーションをするための空間知覚を補助する装置である歩行支援装置を使った空間知覚・ナビゲーションの方法も存在する。感覚代行とは、感覚代行研究会<sup>1</sup>によって以下のように説明されている。

感覚代行 (sensory substitution) とは、障害などで損なわれた感覚の機能を、残された感覚で代行することをいいます。例えば、視覚障害者が点字で読書をしたり、聴覚障害者が手話で会話をする 것도感覚代行の1つです。前者は視覚の機能である読書を触覚で「代行」しており、後者は聴覚の機能である会話を視覚で「代行」していると考えることが出来ます。

視覚障害者の歩行支援装置は基本的に屋外でのナビゲーションを補助する目的なので、障害物をセンシングデバイスでセンシングしてそれを音や振動によってフィードバックすることで空間知覚を補助している。センシングデバイスは主に超音波デバイス、カメラデバイス、LiDAR (Light Detection And Ranging) などがある。超音波デバイスを用いてセンシングするものは、Kay の Sonic Torch [21] や Dodds らの Nottingham Obstacle Detector [22]、Aziz らのブラインドエコロケーションデバイス [23]、Jeong らの開発した ETA (Electronic Travel Aid) システム [24]、Bouhamed らの階段検知用の電子白杖 [25] などがある。カメラデバイスを用いてセンシングするものは、vOICe という視覚から聴覚への感覚代替デバイスや Neugebauer らの視覚障害者のナビゲーション研究 [26] などがある。LiDAR を用いてセンシングするものは、Farcy らの Tom Pouce [27] や Maidenbaum らの EyeCane [28]、Gomez らの RoboGuideDog [29] などがある。研究レベルではさまざまなセンシングの方法やフィードバックの方法が行われている。

---

1 2002-2023 Association of Sensory Substitution/感覚代行研究会 <https://www.sensory-substitution.gr.jp/association/index.html>

実用できるレベルに製品化されているものも存在する。視覚情報を振動として提示している Sunu Band<sup>2</sup> (図 2.1) は白杖を用いた歩行を補助するためのデバイスであり、超音波で障害物との距離を測定し、振動としてフィードバックするリストバンド型の装置である。



(<sup>1</sup>より引用)

図 2.1 Sunu Band

振動を提示する場所もさまざまであり、梶本ら [30] の研究をもとにつくられた AuxDeco<sup>3</sup> (図 2.2) は図 2.3 に示すように、カメラで撮影した映像を電気刺激に変換し、それをおでこに提示することによりユーザーは前方の障害物の輪郭をイメージすることができる。



図 2.2 Aux Deco を着用している様子

---

2 Sunu Band — Sunu, Inc., <https://sunu.io/>

3 AuxDeco — 株式会社アイプラスプラス, <https://www.eyepplus2.com/>



図 2.3 Aux Deco の仕組みイメージ図<sup>4</sup>

視覚情報を音として提示しているウォークリーダー<sup>5</sup>（図 2.4）は、白杖を用いた歩行を補助するデバイスであり、超音波で障害物との距離を測定し、2m,1.5m,1m でそれぞれ音色が変化することで前方の障害物との距離感を把握できる装置である。



（<sup>5</sup>より引用）

図 2.4 ウォークリーダー

## 2.3. クロスモーダリティを活用した空間知覚拡張

本来であれば別々の感覚であるものが互いの感覚に影響を与えるクロスモーダル効果と呼ばれる現象がある。例えば、かき氷のシロップは着色料と香料が異なるだけで他の成分は全く同じであることはよく知られている。これは味覚に色という視覚情報や匂いという嗅覚情報が影響を及ぼしているからである。

4 VICTORIA Co.,Ltd. オーデコ事業部, <https://www.victoria.ne.jp/page0103.html>

5 ウォークリーダー — 西無線研究所, <http://www.nishimusen.co.jp/MJNH101/MJNH101.htm>

クロスモーダリティを活用することで、本来の人間が持つ空間知覚の能力を超えた人間の空間知覚の拡張を試みている事例を紹介する。

### 2.3.1 触覚を利用した空間知覚拡張

Alvaro ら [31] の提案した Haptic Rader<sup>6</sup> (図 2.5) は、頭につける振動型デバイスであり、頭の周囲を覆うようにセンサーがついている。このセンサーが障害物を検知すると、検知した障害物の方向の振動子が振動する。これにより、視野外の後方から障害物が近づいてきた場合なども知覚することができる。視覚では視野の範囲内の空間知覚しかできないが、このデバイスを使うことで疑似的に視野を 360° に拡張することが可能となる。



(<sup>6</sup>より引用)

図 2.5 Haptic Rader

echo<sup>7</sup> (図 2.6) は、空間との距離を認識して振動する服である。服にセンサーと振動子がついており、10m 先の障害物を検知し、振動により存在を伝える。また、手にもセンサーと振動子がついており、2m 先の障害物を検知し、振動により存在を伝える。目で知覚するのと同じように、この服を身につけることにより服が身体の一部となり、感覚器官になったかのように空間を知覚することができる。

---

6 Haptic Rader, <https://ishikawa-vision.org/perception/HapticRadar/index-j.html>

7 echo — Rhizomatiks Research, <https://research.rhizomatiks.com/s/works/echo/>



図 2.6 echo

(7より引用)

持丸ら [32] の Superhuman Sports Grand Challenge2020<sup>8</sup>の Super Sense Challenge (図 2.7) では、古川ら [33] の Synesthesia Wear を用いて空間を認知する感覚を拡張している。Synesthesia Wear は振動子が大量についたジャケットであり、周辺の障害物と近接の状態になるとそのジャケットから振動を感じることで空間を知覚する。



図 2.7 Superhuman Sports Grand Challenge2020 Sense Challenge

(8より引用)

### 2.3.2 聴覚を利用した空間知覚拡張

Sight<sup>9</sup> (図 2.8) は、普段目にしていて映像を音として変換し、耳で聴こえるようになる感覚拡張デバイスである。可視光画像から障害物を、赤外線を用いた画

---

8 Superhuman Sports Grand Challenge — 超人スポーツ協会, <https://superhuman-sports.org/challenge/>

9 Sight, <https://thesight.jp/>

像から空間の広がりや深さを推定し、それらを音に変換している。変換された音を聴くことにより、周囲の空間構造を知覚することができる。



図 2.8 Sight

(<sup>9</sup>より引用)

### 2.3.3 空間知覚拡張の現在

ここまでさまざまな空間知覚の拡張を試みている事例を紹介したが、現在空間知覚の拡張研究において最先端の研究を紹介する。Google Research の研究開発プロジェクトである Project Guideline<sup>10</sup>は、視覚障害を持つランナーの単独走行を可能にするものである。Android スマートフォンにより動作する機械学習技術を用いた画像認識モデルを使用することで、スマートフォンを腹部に装着しカメラで地面を撮影することで、地面にあらかじめ引かれた色のついた線を認識し、その線がランナーに対して右にあるのか左にあるのかを判断し、ヘッドフォンを通じてランナーに音声でフィードバックをする (図 2.9)。ランナーはその音声フィードバックを頼りにすることで地面に引かれた線から外れないようにランニングをすることができる。

---

10 Project Guideline — Google Research, 2021, <https://projectguidelinejp.withgoogle.com/>, <https://japan.googleblog.com/2021/08/project-guideline.html>

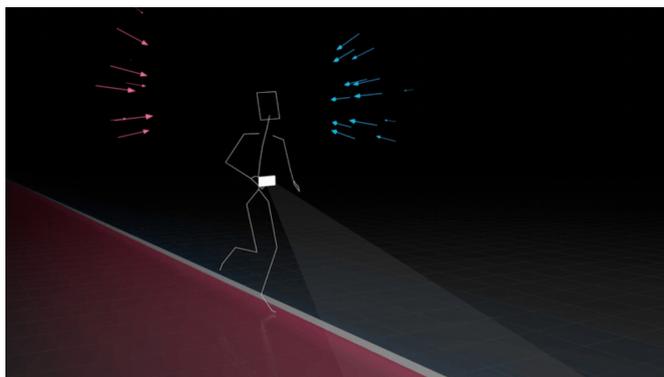


図 2.9 Project Guideline の仕組み

(10より引用)

Project Guideline を用いて全盲のランナーである御園政光さんは2021年5月に伴走者を使わずに単独で10kmを走りきることに成功している。

## 2.4. 本章のまとめ

まず人間はどのようにさまざまな感覚を知覚しているのか、空間知覚に用いられている感覚やそれらの感覚を用いてどのようなことが知覚できるのかを調査した。空間知覚において視覚の影響がとても大きいことが分かったが、視覚以外の感覚でも距離感や方向、動く物体が近づいているのか遠ざかっているのかなど、さまざまな要素を知覚できることが分かった。次に、空間知覚の大部分の役割を担う視覚を失っている視覚障害者の空間知覚と、感覚を別の感覚により代用する感覚代行を用いた歩行補助を行う技術や実用レベルで製品化されているものを紹介した。感覚代行を用いた歩行補助装置は、主に触覚を使ってフィードバックを行うものと聴覚を用いてフィードバックを行うものが見られた。そして、クロスモーダリティを活用し本来の人間のもつ空間知覚の能力を超えた空間知覚の拡張を行っている研究や作品を触覚を用いるものと聴覚を用いるものについて紹介した。また、現在の空間知覚拡張研究の最先端の技術を用いて全盲のランナーが10kmの単独走を成功させた例を紹介した。視覚を用いない空間知覚はすでにさまざまな方法で実現されていることが分かったが、特定の方向や特定の距離感しか知覚で

きないものも多くみられた。また調査により、聴覚は物体との距離や方向などさまざまな要素を知覚できることが分かった反面、触覚を用いて感覚提示をしているものが多くみられた。そこで、聴覚を用いて時間・空間的に連続な空間知覚を成立させたいと考えた。

## 第 3 章

# 聴覚刺激を用いた空間知覚拡張手法 の提案

### 3.1. 時間的・空間的に連続な空間知覚

第 2 章で紹介したように、空間知覚の方法はさまざまであり、既存手法が示すように、視覚を用いない空間知覚は、さまざまな全く異なるアプローチで成立させることができる。しかし、時間的・空間的に連続な空間知覚を実現できているものは多くはない。例えば、第二章で紹介した Sunu Band はリストバンドを向けた方向の障害物との距離を知覚することはできるが、向けている方向以外の情報を得ることはできないため、これは空間的に連続な知覚ではないと言える。同じく第二章で紹介したウォークリーダーは、2m,1.5m,1m という障害物から特定の距離の地点では距離を知覚することが可能であるが、音色が切り替わるタイミング以外では距離を知覚することが難しい。よってこれは常に距離感を知覚できるわけではないため、時間的に連続な空間知覚ではないと言える。

第二章で紹介した Haptic Rader は、360°の方向に障害物があってもその存在を知覚することができるため、これは空間的に連続な空間知覚が実現できていると言える。同じく第二章で紹介した Project Guideline は常に地面に引かれた線に対して自分が右にいるのか左にいるのかを知覚することができるため、これは時間的に連続な空間知覚が実現できているといえる。これらのように、時間的に連続な空間知覚を成立させているものや空間的に連続な空間知覚を成立させているものは存在している。時間的に連続な空間知覚と空間的に連続な空間知覚を同時に成立させることで、人間の空間知覚を今まで以上に拡張することができるため、

本研究では時間的・空間的に連続な空間知覚を成立させることを目指す。

また、空間知覚に基づく移動とナビゲーションとは全く異なるものである。空間知覚に基づく移動は障害物の位置や形状、自分との相対的な関係を自身で知覚し、それをどのように避けるか自分で判断するが、ナビゲーションとはどのように動けば障害物にぶつからないかを指示するものであり、自身で障害物を知覚せずともぶつからずに歩くことができる。

本研究で実現したいことは、視覚を用いずに周囲の空間を時間的・空間的に連続に知覚できるように人間の知覚を拡張し、それによって目で見えていない障害物を避けて歩くことである。

そこで、本研究では音を使って空間知覚を立ち上げることとした。既存の研究では音を用いた聴覚フィードバックにより知覚させるものと、振動や電気刺激を用いた触覚フィードバックにより知覚させるものが見られた。本研究において音を用いることにした理由としては大きく二点あり、一点目は第二章で述べたように人間にはもともと音像定位能力という音を聴いたときに、聴こえてくる音の方向や距離を感覚的に理解する能力が備わっていることと、音は大きさ、高さ、テンポ、再生速度など変化を連続的に知覚することができる要素が多いからである。二点目は触覚によるフィードバックは振動や電気刺激を与えるデバイスを身体に装着する必要があるが、聴覚によるフィードバックはヘッドホンなどを装着するだけでよいため、今回提案するシステムを応用する際に応用できる幅が大きいからである。

### 3.2. 空間音から体性感覚へのクロスモーダル効果

音を用いて空間知覚を立ち上げるといっても、障害物の場所を音によってアラートのように知らせるだけでは単に音と障害物の情報のパターンマッチングになってしまい、音を使って空間知覚ができていたとは言えない。パターンの記憶ではなく空間知覚を立ち上げるためには、頭で考えて情報を処理して判断するのではなく、より直観的に得た情報を解釈できる必要がある。そこで、音を使って耳への刺激だけではなく、障害物がある場所にある感覚をクロスモーダルに他の感覚

に提示することによって実際に障害物があるように知覚させることとした。第2章3節でも述べたように、クロスモーダル効果を利用することで感覚や錯覚を強めることができるため、効果的であると考えた。

障害物に使づいたときに、それ以上近づくとぶつかってしまうように感じさせたいため、“圧力”や“反発”のような感覚を空間音を用いて提示することにした。以下の図3.1に目に見えない壁から“圧力”や“反発”のような感覚を受けるイメージ図を示す。“圧力”や“反発”のような感覚を障害物から感じるにより、思わず直観的に避けたいような音をデザインする。

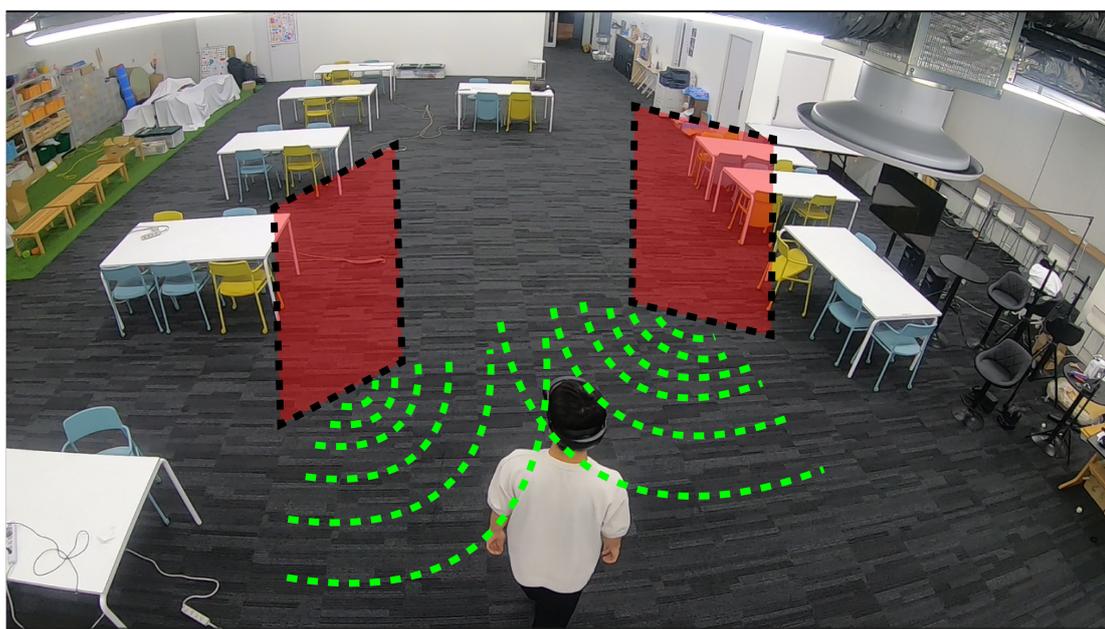


図 3.1 目に見えない壁から“圧力”や“反発”のような感覚を受けるイメージ図

### 3.3. Phantom Walls の提案

前節までで述べたように、音を使って視覚を用いずとも空間知覚を成立させ、目に見えていない障害物を避けて歩くことができることを目指し、それを実現するシステムである Phantom Walls を提案する。空間音から体性感覚へのクロスモー

ダル効果を利用することにより、“圧力”や“反発”のような感覚を体験者に感じさせ、それにより障害物がそこに実際に存在するかのような感覚を提示する。また、現在の視覚障害者の方が音による空間知覚をする際に抱えている課題として環境の影響を受けやすいというものが挙げられた。そこで、VR技術を使うことで外の環境に左右されないシステムを提案する。具体的には、バーチャル空間に障害物を配置し、その障害物1つ1つにスピーカーを対応させることにより、障害物から音が鳴るバーチャルな音の世界を構築する。そして、体験者の位置や向きなどの動きに合わせて音の聴こえ方を調整することにより、障害物と自身の位置関係や距離を知覚できるようにした。

本研究では障害物の概形の知覚は目指していないため、分かりやすくするために障害物はすべて壁とした。

### 3.4. ユースケース

ユースケースとしては、現在のVRコンテンツは視覚を使うことが大前提とされているため、視覚障害を持った人は同じように楽しむことができない。そのため視覚がある人もない人も同じように遊ぶことができるVRコンテンツに応用することや、現実世界のオブジェクトとPhantom Wallsのバーチャル空間のオブジェクトの位置を同期させることにより、視覚障害を持った方の現実世界での歩行補助としても使うことができる。また、視覚障害者の方も晴眼者と同等のゲーム体験ができるようなブラインド e-sports への応用や、ブラインドサッカーは個人練習をすることが難しい競技であるが、ブラインドサッカーの個人練習をする際の音のシミュレーションにも応用することが可能である。

他にも、VRゴーグルを安全に使用するための機能であるガーディアン機能（あらかじめVRコンテンツをプレイする際に使用する現実世界の空間を指定し、VRコンテンツをプレイ中にその空間から出そうになった時にアラートを出して知らせる機能）は現在、指定した現実世界の空間から出そうになるとVRコンテンツのプレイが中断され、アラートが出されるため、VRコンテンツをプレイする際の没入感が下がってしまう。そこで、VRコンテンツをプレイする際の没入感を

保ちつつ安全にプレイできるようにするために Phantom Walls をガーディアン機能として応用することも可能である。

## 3.5. 空間知覚を成立させる音のデザイン

### 3.5.1 空間知覚に必要な要素

上述した Phantom Walls のコンセプトをもとに、Phantom Walls を実現するための音の世界を構築する法則を考える。視覚を用いずに周囲の壁を知覚してぶつからずに歩き回るためには、以下の3つの要素を知覚する必要があると考えた。

1. 壁の長さの知覚
2. 壁と自身との距離の知覚
3. 壁と自身の角度の知覚

壁の長さの知覚・壁と自身との距離の知覚は、どれくらいの長さの壁があるのか、またその壁と自身との距離はどのくらいなのかを知覚することは、ぶつからずに歩き回るために必須の情報であるため、必要である。壁と自身との角度の知覚は、これ自身はなくてもぶつからずに歩き回することは可能であるが、壁と自身の角度が認識できた方が次にどちらの方向に進めば壁にぶつからずに進めるのかが分かるため、手探り状態で歩くのではなく、視覚で見えているかのように進む方向を決めて歩くことができる。

この3つの要素をどのように音を用いて表現するか、また、空間音から体性感覚を感じさせるためにはどのような調整をすればよいか、視覚を用いない空間知覚を成立させるための音源の条件等を検討する。

音の要素で変化を知覚できそうなものは、音の大きさ、音の高さ、音の音色、音源の再生速度、音源のテンポなどがあげられる。音と結び付けた情報のパターンマッチングではなく、最終的にはトレーニングをすることで、音を聴くことで壁の存在や位置、角度を直観的に知覚できるような新しい知覚を立ち上げる。逆さメガネという上下や左右が反転して見えるメガネをかけて生活をするという実

験があるが、着用してすぐは混乱して思ったように移動をしたり手足を動かしたりすることができないが、着用時間が長くなりその感覚に慣れることで頭で考えなくても直観的に移動をしたりものを持ったりすることができるようになる。このようにいったん知覚が立ち上がれば対応関係にはあまり意味がなくなる。そこで、音の要素をランダムに試すことは新たな知覚の獲得においてはあまり意味がないと考え、後述するさまざまな音の要素の関係から相互に干渉することのないように音の要素を検討していく。

### 3.5.2 体性感覚を感じさせ、強めるための調整

空間音を用いて、壁からの“圧力”や“反発”のような体性感覚を誘発させるために、壁にそれ以上近づきたくないと感じさせるような感覚を提示することとした。上述した変化を知覚できそうな音の要素のうち、“圧力”や“反発”を感じさせるのに最も適しているのは音の大きさであると推察する。ホラー映画のビックリシーンやテーマパークの演出などで効果音が急に大きくなった時に驚いた経験がある人は多くいると思う。音の大きさの変化が小さいとただの音量の変化としてしか感じることはできないが、音の大きさの変化を大きくすることで音量変化以上の感覚を誘発できると考え、“圧力”や“反発”のような感覚を音の大きさの変化により実装することとした。

音の高さの変化によっても体性感覚を感じることができるかを予備的に3人に実験したところ、音の高さの変化よりも音量を変化させたときの方が“圧力”や“反発”のような体性感覚を感じると全員がコメントしていた。よって今回は音の高さの変化は採用しなかった。

岡ら [34] により、ラウドネス（音を人間が実際に聴いた時の体感の大きさ）の弁別閾は音の聴こえる方向によって変わり、1.5dBの音圧の変化があれば $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 方向から聴こえる音に関しては音量の変化を知覚できることが分かっている。デシベルという単位は、基準となる音の大きさからの相対的な音の大きさであり、基準となる音の大きさからの比率を  $x$  としたとき、 $20 \times \log 10_x$  で表される。よって、1.5dBというのは、音の大きさの比率で表現すると、基準となる音の大きさの約1.2倍である。

単なる耳で知覚する刺激の変化ではなく、体性感覚を感じるような変化を実感できる音量変化を音量の比率を変えながら試したところ、音量変化が大きいほど体性感覚を強く感じる事ができた。

### 3.5.3 音源の再生速度とテンポについて

音源の再生速度とテンポの変化は似ているが、どちらが知覚する際に Phantom Walls に適しているかを検討する。図 3.2 の黒い波形を基準の波形とする。

音源の再生速度を上げた場合、波形はそのまま時間軸方向に圧縮されてしまうため、図 3.2 の赤色の波形のようになる。このとき、波の振幅は変化しないが、周波数は大きくなる。そのため、音の大きさは変化しないが、音の高さが上がってしまう。音源の再生速度を下げた場合、波形はそのまま時間軸方向に引き伸ばされてしまうため、図 3.2 のようになる。

このとき、波の振幅は変化しないが、周波数は小さくなる。そのため、音の大きさは変化しないが、音の高さが下がってしまう。分かりやすいように以下の図 3.2 に基準の波形と再生速度を変化させたときの波形を重ねたグラフを示す。

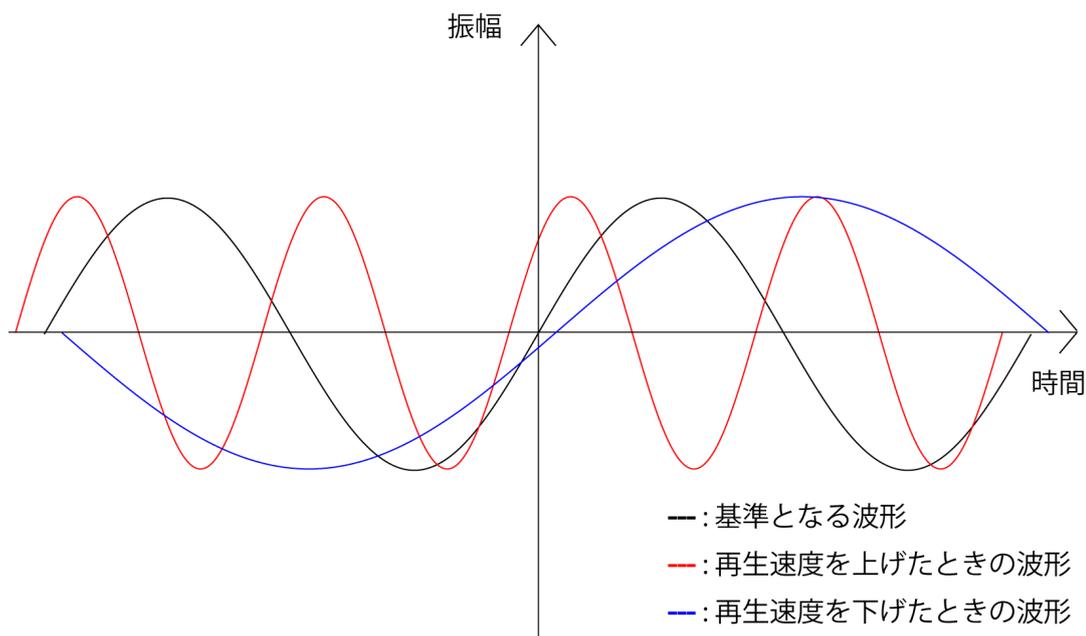
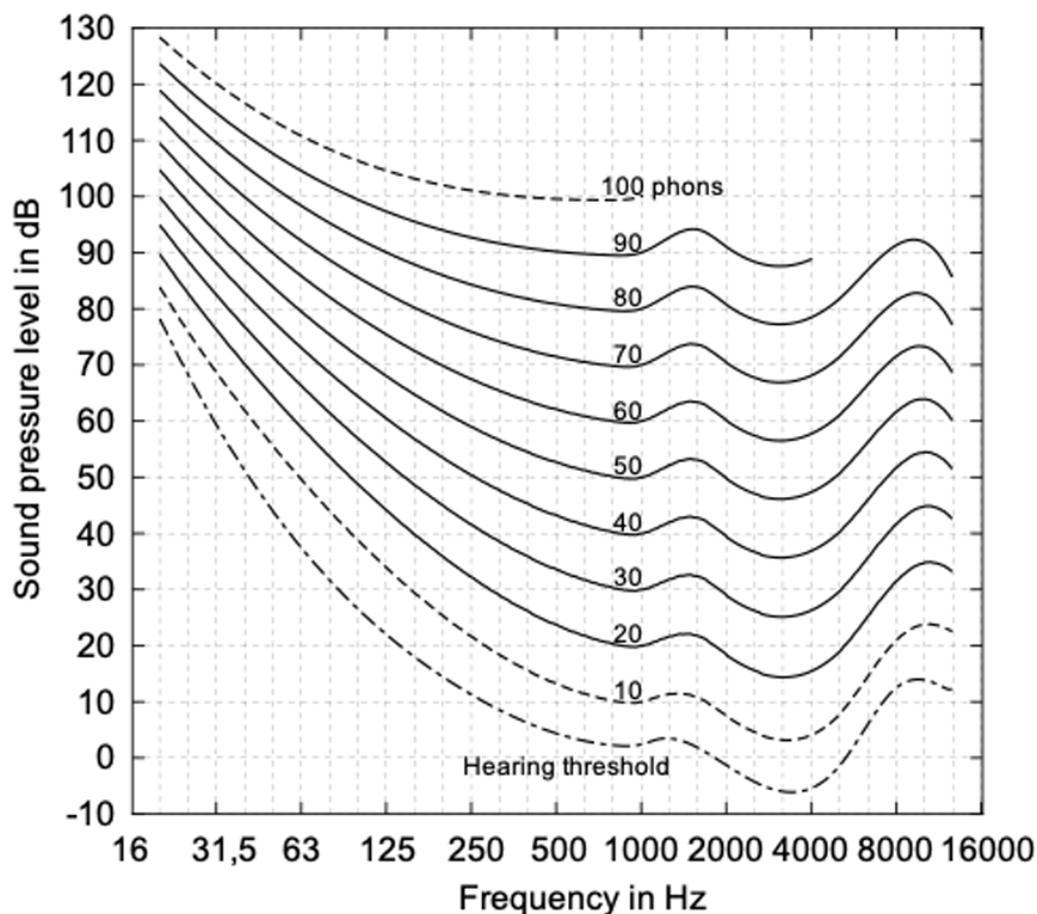


図 3.2 基準の波形と再生速度を変化させたときの波形の比較

実は、音は同じ音圧の音だとしてもその周波数によって人間が聴こえる大きさ（ラウドネス）には違いがある。以下の図3.3に等ラウドネス曲線と呼ばれる音の周波数と人間が感覚的に同じ音の大きさに聴こえる音圧レベルを曲線で結んだグラフを示す。



(Revision of ISO 226 “Normal Equal-Loudness-Level Contours” from 2003 to 2023 edition:  
the background and results [35] より引用)

図 3.3 等ラウドネス曲線

前節で述べたように、体性感覚を感じさせるために音の大きさの変化を利用する。そのため、音の大きさに変化がなくても、再生速度を変化させることによって音の高さが変化してしまうと実際に人間が耳で音を聴いた時の体感の音の大きさが変わってしまう。よって、再生速度を変えてしまうのは適切でない。

対して、音源のテンポを変化させるというのは、音の波形を変えることなく、純粹に音源の再生時間を長くしたり短くしたりすることである。音源のテンポを変化させても音の高さや音の大きさは変化しないため、このシステムに適している。

## 3.6. Phantom Walls を構成する 3 つの法則

Phantom Walls では、バーチャル空間に配置した壁をあたかも現実に存在するかのように音を用いて表現する。バーチャル空間内に配置された壁には 1 枚の壁に対して 1 つのスピーカーがペアリングされている。スピーカーは、体験者が移動すると、体験者と目に見えない phantom wall との位置関係に応じて移動したり、音量や音源のテンポが変化することで連続的に phantom wall と体験者との関係を音により表現する。以下に示すスピーカーの位置配置に関する法則、音量に関する法則、テンポに関する法則の 3 つの法則により音の世界を構成した。今回設定した 3 つの法則のパラメータは、自身で試しながら空間知覚が成立する組み合わせを 1 つ見つけたものであり、これ以外の音の要素の組み合わせやパラメータで空間知覚を成り立たせることもできうる。今回設定した以外の音の要素の組み合わせやパラメータの可能性については 4 章の考察で述べる。

### 3.6.1 スピーカーの位置配置に関する法則（位置法則）

この法則によって、壁の長さの知覚を行う。バーチャル空間内に配置されている目に見えない phantom wall にはそれぞれ 1 つのスピーカーを配置した。疑似的に面状の音源に感じさせたいため、スピーカーは常に壁の表面上で体験者と最も近い位置にくるように移動させた。この法則により、体験者がまっすぐ歩いているときに常に自身の左側から同じように音が聴こえていた場合は左側に壁が存在しているように感じる事が可能となる。位置法則のビジュアルイメージを図 3.4 に示す。

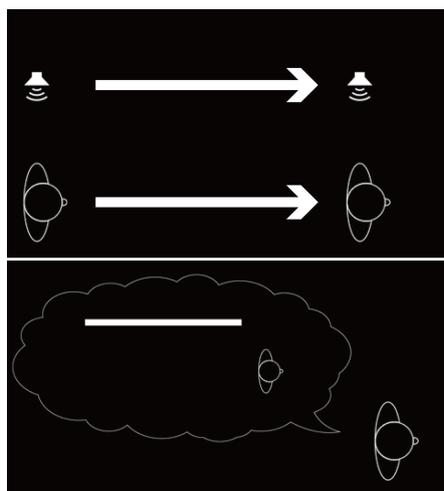


図 3.4 位置法則のイメージ図

また、現実世界で視覚を使ってものを見る場合、壁の後ろのものは壁が透明でない限りは見ることはできない。しかし、音は壁を越えて聞こえてきてしまうため、空間内に多くの壁が配置されていた場合多くの音が同時に聞こえてきてしまい、知覚が難しくなる。よって、現実世界で透視ができないのと同じように、視覚で空間を知覚したときに死角になって見えないはずの壁からは音が聞こえないようにした。

#### 予備的検証

バーチャル空間内の 1 枚の壁に 1 つのスピーカーを配置し、スピーカーの位置を体験者の位置に応じて動かすことで疑似的に面状の音源を表現する場合と、バーチャル空間内の壁に一定の感覚で音源を固定する場合とでどちらが壁を表現するのに適しているかを確かめるために、予備的検証を行った。

#### 検証

参加者は、HMD (Meta Quest Pro) を被り、ヘッドホン (SONY、MDR-HW700DS) を着用し何も見えていない状態で、自身の左側に 4m にわたり壁が自身と平行に置

かれた状態でまっすぐ歩いて1つのスピーカーが自身に追従しているのか、0.5mおきにスピーカーが固定されているのかを実験者に口頭で伝えた。2つの条件を各5回ランダムな順番で行った。各試行の後に口頭で確信度を実験者に伝え、実験者はその回答をPCに記録した。すべての試行が終わったあと、各参加者からコメントをもらった。

### 検証結果・考察

実験参加者は6名であった。それぞれの参加者を参加者1-6とする。結果を各参加者の正答率として以下の表3.1に示す。

表 3.1 位置法則の検証

参加者 No.	正答率 [%]
1	60
2	90
3	100
4	90
5	90
6	50

参加者1と参加者6はスピーカーが追従してくるものと固定されているものとの違いが全く分からなかったとコメントしていた。参加者2、3、4、5に関しては、違いを知覚することができていた。どのような違いがあったか質問したところ、固定している方は微妙に音量が大きくなったり小さくなったりしている感覚があったというコメントや、歩いていると自分の後ろに若干音が残るような感覚があった、歩くと音量や響きが揺らいでいる感覚があったというコメントを得られた。逆に追従している方はどうであったか質問すると、ずっと音が一定であった、歩いても後ろに残るような感覚がしなかった、ずっと音の質が変わらなかったというコメントが得られた。2種類を聞き分けることができていた参加者にどちらが壁のように感じるができるか質問したところ、全員が追従している方が壁のように感じられたとコメントしていた。固定されている方は凸凹しているよ

うなイメージだったというコメントをしている参加者もいた。このことから、壁を表現するためにはバーチャル空間内に配置した壁に等間隔でスピーカーを配置するのではなく、1つのスピーカーを配置してそれを壁の範囲内で常に体験者の最も近い位置に移動させる方が適していると思われる。

### 3.6.2 音量に関する法則（音量法則）

この法則によって、壁と自身との距離の知覚を行う。目に見えない phantom wall と体験者との距離が近くなればなるほど音の大きさは大きくなる。そして体験者は、壁との距離が十分近くなると、聴こえる音の大きさの差により音による“圧力”や“反発”に近い感覚を感じる。音量法則のビジュアルイメージを図 3.5 に示す。

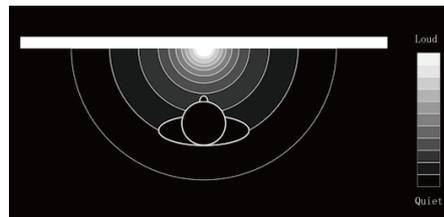


図 3.5 音量法則のイメージ図

壁からの距離と音の大きさの関係は、歩行ナビゲーション体験のために以下の図 3.6 に示す関係に調整した。

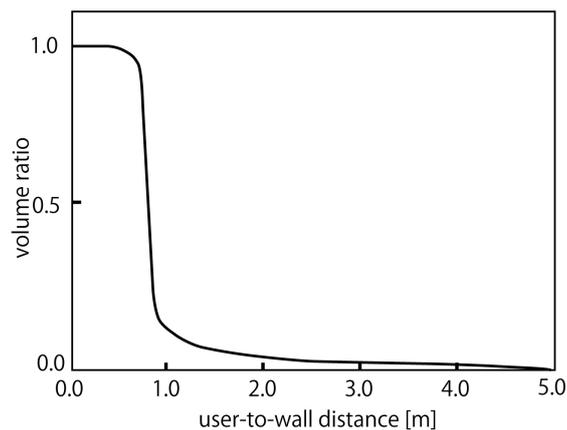


図 3.6 体験者と壁との距離と音量の関係（初期版）

目に見えない phantom wall から発せられる音は最大で 5m 遠くから聴こえ、近づくにつれてだんだん音量が大きくなっていく。phantom wall から 5m 3m までは、緩やかに音量を上げていく。ここは正確に距離を知覚する必要はなく、先の方に壁が存在するということを知覚させる。3m 2m、2m 1m にかけて約 6dB ずつ音を大きくし、だんだん壁に近づいてきている感覚を提示する。そして、phantom wall からの距離が約 0.8m から 0.66m にかけて音量が約 6.3 倍、デシベルで表すと約 16dB 急激に大きくなる。ここで体験者は壁からの“圧力”や“反発”のような感覚を感じ、目の前に壁があることを知覚することができる。

植木岳雪の研究 [36] により、大学生男子の歩幅の平均は、約 71cm であることが分かっている。そのため、壁の手前で安全に停止するために、10cm 程度余裕を持たせて壁から約 0.8m の地点から“圧力”や“反発”に近い感覚を感じさせている。壁からの“圧力”や“反発”のような感覚を最大限感じさせつつも、5m 先の地点から歩いて、だんだんと壁に近づいていく感覚を得られるように距離と音の関係を調整した。

### 予備的検証

壁との距離と音の大きさの関係が適切であるかどうかを検証するために、予備的検証を行った。

#### 検証 1

参加者は、HMD (Meta Quest Pro<sup>1</sup>) を被り、何も見えていない状態で、自身の正面のそれぞれ距離 2m、3m、5m 先に壁が置かれた状態でまっすぐ歩いて壁に近づき、壁からの距離が 0.66m の地点で音量変化により壁の存在を知覚したらリモコンのボタンを押し、HMD の座標を記録した。ゆっくり歩きと早歩きで 3 つの距離の条件を各 2 回ランダムな順番で行った。各試行では、ゆっくり歩く時の制限時間を 20 秒、早歩きの時の制限時間を 10 秒とした。また、各試行の後に口頭

---

1 Meta Quest Pro — Meta, <https://www.meta.com/jp/quest/quest-pro/>

で確信度を実験者に伝え、実験者はその回答を PC に記録した。すべての試行が終わったあと、各参加者からコメントをもらった。

### 検証 1 結果・考察

実験参加者は 3 名であった。それぞれの参加者を参加者 1-3 とする。結果をゆっくり歩いたときの壁から 0.66m 地点との誤差の平均、早歩きしたときの壁から 0.66m 地点との誤差の平均として以下の表 3.2 に示す。

表 3.2 参加者と壁から 0.66m 地点との距離

参加者 No.	誤差 (ゆっくり) [m]	誤差 (早歩き) [m]
1	0.13	0.25
2	0.04	-0.02
3	0.65	1.03

結果から、参加者 1、参加者 2 については、早歩きの場合でも壁から 0.66m の地点を大きくても平均して 0.25m 越えた地点で止まることができていた。この結果は、図 3.6 に示した体験者と壁との距離と音量の関係が壁にぶつからない程度に適切に設定できていると言える。参加者 1 および参加者 2 は「音量の変化ではなく体に響くような音圧の変化が直観的に感じられた」とコメントしていた。対して参加者 3 は、ゆっくり歩いた時は平均して 0.66m の地点を 0.65m 越えてしまっていて、早歩きだと 1.03m 越えてしまっているため、見えない壁にぶつかってしまっている。参加者 3 は「音圧の変化を直観的に感じられた」というコメントをしていなかったため、意図していた“圧力”や“反発”のような感覚を感じることはできていなかったと考えられる。この感覚を知覚できるかどうかは距離知覚の精度を上げるために大切であることが分かった。

予備的検証を経て、以下の図 3.7 のように壁からの距離と音の大きさの関係を調整した。

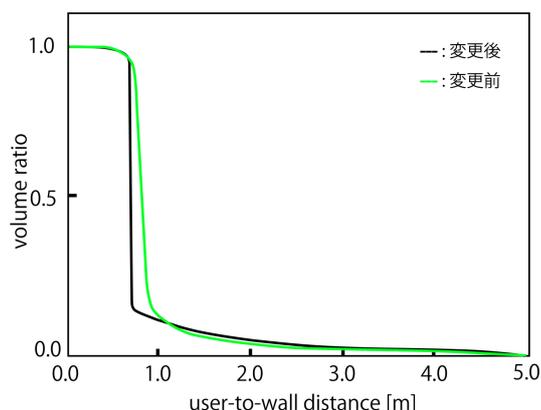


図 3.7 体験者と壁との距離と音量の関係（最新版）

変更した点は、以前は壁から約0.8mから0.66mにかけて音圧を約16dB上昇させていたところを、壁から0.7mから0.66mにかけて音圧を約16dB上昇させることにした。これにより、よりシャープに音圧が変化するため、“圧力”や“反発”のような感覚をより感じやすくした。視覚を用いないで歩く場合、目が見えている状態よりも歩幅が小さくなるため、“圧力”や“反発”のような感覚を感じさせる地点は壁から0.7mでも壁にぶつかる前に安全に停止することができると考えた。

## 検証 2

体験者と壁との距離と音量の関係を変更したうえでもう一度機能検証を行った。参加者は、HMD (Meta Quest Pro) を被り、ヘッドホン (SONY、MDR-HW700DS) を着用し何も見えていない状態で、自身の正面のそれぞれ距離 2m、3m、5m 先に壁が置かれた状態でまっすぐ歩いて壁に近づき、壁からの距離が 0.7m の地点で音量変化により壁の存在を知覚したらリモコンのボタンを押し、HMD の座標を記録した。3 つの距離の条件を各 5 回ランダムな順番で行った。各試行の後に口頭で確信度を実験者に伝え、実験者はその回答を PC に記録した。すべての試行が終わったあと、各参加者からコメントをもらった。

## 検証 2 結果・考察

実験参加者は 6 名であった。それぞれの参加者を参加者 1-6 とする。結果を最も壁から離れて止まった際の壁からの距離、最も壁の近くで止まった際の壁からの距離、壁から 0.66m 地点との誤差の平均として以下の表 3.3 に示す。

表 3.3 参加者と壁、参加者と壁から 0.66m 地点との距離

参加者 No.	距離（遠い） [m]	距離（近い） [m]	誤差 [m]
1	0.65	0.45	0.09
2	0.45	0.03	0.40
3	0.79	-0.01	0.30
4	0.68	0.34	0.16
5	0.56	0.27	0.18
6	0.58	0.07	0.28

結果から参加者 3 以外は音量が急激に変化したのを知覚してから壁までの間で全 15 回の試行すべてで止まれていることが分かる。参加者 3 に関しても壁にぶつかってしまったのは 1 回だけで残りの 14 回の試行では壁の手前で止まることができていた。参加者からのコメントでは、全員が急激な音量変化を知覚できていたと答えていた。このことから Phantom Walls の音量法則は設計通りに機能しているといえる。参加者によって静止する位置の平均にばらつきがあるのは歩幅の違いによるもので、現在の体験者と壁との距離と音量の関係では歩幅が大きかったり早歩きをすると壁にぶつかってしまうことがある。もっと歩幅を大きくしたり速く歩いても壁にぶつからないためには、急激に音量を大きくして壁からの“圧力”や“反発”のような感覚を感じさせる地点を今よりも壁から遠くに設定する必要があるが、細かい解像度での空間知覚とトレードオフの関係なので今回のシステムではゆっくり歩くことを想定して現在の体験者と壁との距離と音量の関係を用いる。

### 3.6.3 テンポに関する法則（テンポ法則）

この法則によって、壁と自身の角度の知覚を行う。体験者の頭に対する壁の角度によって音源のテンポが変化する。体験者の頭の向きが壁に対して垂直である場合、音源のテンポは最も低くなり、体験者の頭の向きが壁に対して平行である場合、音源のテンポは最も高くなる。最も音源のテンポが速いときは、最も音源のテンポが遅いときの 2 倍のテンポとなっている。音源のテンポは角度によって線形に変化している。テンポ法則のビジュアルイメージを図 3.8 に、体験者の頭に対する壁の角度とテンポの関係を図 3.9 示す。

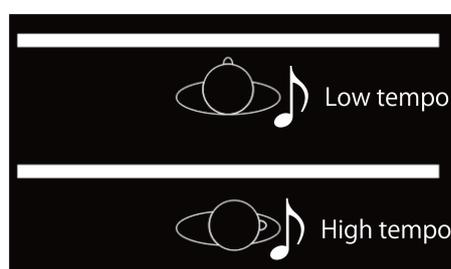


図 3.8 テンポ法則のイメージ図

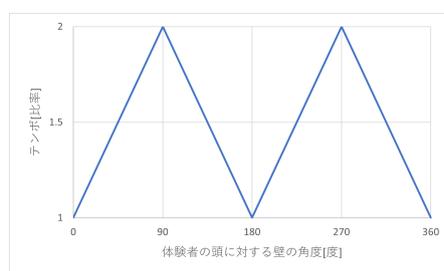


図 3.9 体験者の頭に対する壁の角度とテンポの関係

#### 予備的検証

壁と自身の角度をテンポによって知覚できているかどうかを検証するために、予備的検証を行った。

## 検証

参加者は、HMD (Meta Quest Pro) を被り、ヘッドホン (SONY、MDR-HW700DS) を着用し何も見えていない状態で、自身の正面にそれぞれ角度 0°、45°、90°、135°の壁が置かれた状態で場所は移動せずに頭の向きだけを回転させて壁の角度が分かったら実験者に口頭で伝えた。4つの距離の条件を各5回ランダムな順番で行った。各試行では壁の角度を判断する際の制限時間は15秒とした。また、各試行の後に口頭で確信度を実験者に伝え、実験者はその回答をPCに記録した。すべての試行が終わったあと、各参加者からコメントをもらった。

## 検証結果・考察

実験参加者は6名であった。それぞれの参加者を参加者1-6とする。結果を各参加者の正答率として以下の表3.4に示す。

表 3.4 角度の知覚

参加者 No.	正答率 [%]
1	80
2	95
3	95
4	90
5	100
6	100

結果から6人中5人の参加者が正答率90%を超えていた。テンポの違いは分かりやすかったというコメントが多く得られた。Phantom Wallsのテンポ法則は設計通りに機能しているといえる。一人の参加者からは壁が自分に対して垂直方向にあるときはそのまま前に進むと壁にぶつかってしまうからテンポが速い方が焦る感じがして良い気がするというコメントをもらった。音による知覚が身体化して新しい知覚として立ち上がってしまえば自分のイメージとのズレというのは影響を与えないが、音による知覚を身体化させるまでにかかるトレーニングの時間は自身のイメージと合っているほうが短くなるのではないかと考えられる。

### 3.6.4 音色のデザイン

上述した3つの法則により Phantom Walls は成り立つが、どんな音色を使用しても視覚を用いない空間知覚が成立するわけではない。Phantom Walls を成立させるための音色に必要な要素を検討する。

まず、急にテンポが変化する音色を使用すると、テンポ法則と干渉してしまい壁の方向を認識しづらくなってしまうため、テンポが一定の音色が適している。次に、高い音や低い音が入り混じったメロディラインが複数ある音色を使用すると高い音と低い音では同じ音圧でも人間が聴こえる音の大きさは違うため、音量法則と干渉してしまい、壁との距離を認識しづらくなる。そのため、メロディラインは1つの音色で、同時に鳴る音は1音の音色が適している。また、テンポを利用しているため、以下の図 3.10 のように1つの音程を鳴らし続けることはテンポを変えても変化が知覚できないため、適切ではない。

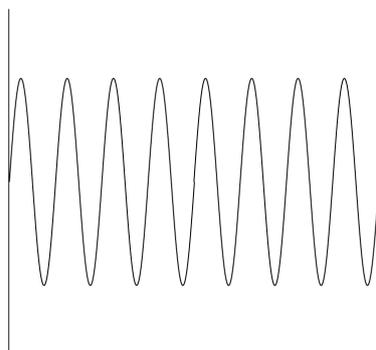


図 3.10 同じ音程を鳴らし続ける音色

以下の図 3.11 のように1つの音程でも休符で区切ることで、最低限テンポを知覚することができるので、Phantom Walls を成立させることができる。

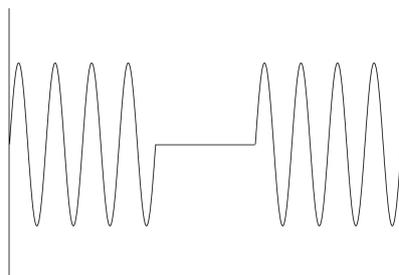


図 3.11 1つの音程を休符で区切った音色

しかし、これだと音の伸びる時間でしかテンポを知覚することができないため、非常にテンポの知覚が難しくなり、認知負荷が高くなる。さまざまな音程を増やすことで、認知負荷は改善され、よりテンポの変化を知覚しやすくなる。音の変化を感じることに集中しすぎてしまうと、直観的な知覚を妨げてしまうため、テンポを変えたときに何も意識せずともテンポが変わったことが分かるような音色を使うことが大切である。

以上を踏まえて、最終的に使う音色は以下の図 3.12 とした。



図 3.12 最終的に使用している音色

## 3.7. 実装

Phantom Walls は、Unity<sup>2</sup>を使用して開発した。体験者の位置と頭の向きの特ラッキングには、Meta Quest<sup>2</sup><sup>3</sup>を使用している。音の提示は、ワイヤレスで疑似的に9.1chのサラウンド音場を再現できるヘッドホンであるSONYのMDR-HW700DS<sup>4</sup>を使用している。音源の制作には、Cakewalk by BandLab<sup>5</sup>を使用した。

## 3.8. ユーザーテスト

Phantom Walls のユーザーテストとして、仮想の壁を音を使って避ける体験を行う体験会を3回開催した。1回目は、予備実験として3人の参加者を集めて行った。2回目は、Embodied Media Project のオープンラボでの展示として、3回目は、ARTBAY TOKYO ART FESTIVAL 2023<sup>6</sup>での展示として行った。ユーザーテストの目的は、Phantom Walls を使って見えない壁を避けて歩く体験が可能かどうかを試すためである。

※ユーザーテストは、final product の前に行ったものであり、HMD は Meta Quest Pro を、音の提示は Meta Quest Pro のスピーカーを使用した。

### 3.8.1 予備実験

日時・場所

日時 2023年7月20日

---

2 Unity — Unity Technologies, <https://unity.com/ja>

3 Meta Quest2 — Meta, <https://www.meta.com/jp/quest/products/quest-2/>

4 MDR-HW700DS — SONY, <https://www.sony.jp/headphone/products/MDR-HW700DS/>

5 Cakewalk by BadLab — BandLab Technologies, <https://www.bandlab.com/products/cakewalk?lang=ja>

6 ARTBAY TOKYO ART FESTIVAL 2023 — ARTBAY TOKYO, <https://artbaytokyo.com/>

場所 東京ポートシティ竹芝<sup>7</sup>オフィスタワー 8FCip エリア

### 概要

まず、Phantom Walls の音の世界に慣れてもらうために参加者に 6 分程度のチュートリアルを行った。はじめに Phantom Walls の音の世界を構築しているルールについて説明した。その後、参加者に HMD を装着してもらい、以下の図 3.13 に示した壁の配置で 1 分間壁が視覚的に見える状態で歩き回ってもらい、1 分間何も見えない状態で歩き回ってもらった。それを 2 セット計 4 分間行った。図 3.13 のカメラのマークは体験者の初期位置である。

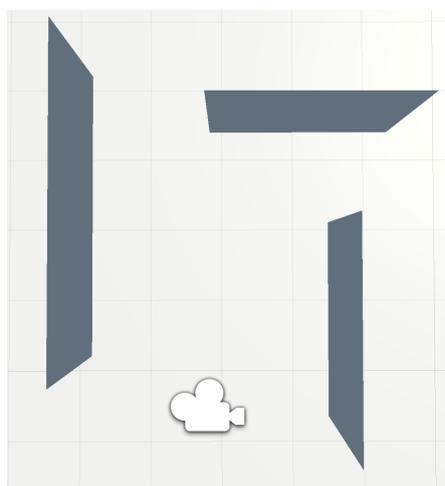


図 3.13 予備実験でのチュートリアルの壁の配置を上から見た図

チュートリアルが終わったら、目が見えない状態で音だけを頼りに以下の図 3.14 に示した壁を配置した空間を 1 分間自由に歩き回ってもらい、参加者が歩いた軌跡を記録した。体験終了後、参加者から感想をコメントしてもらった。図 3.14 のカメラのマークは体験者の初期位置である。

---

<sup>7</sup> 東京ポートシティ竹芝 (TOKYO PORTCITY TAKESHIBA) <https://tokyo-portcity-takeshiba.jp/>

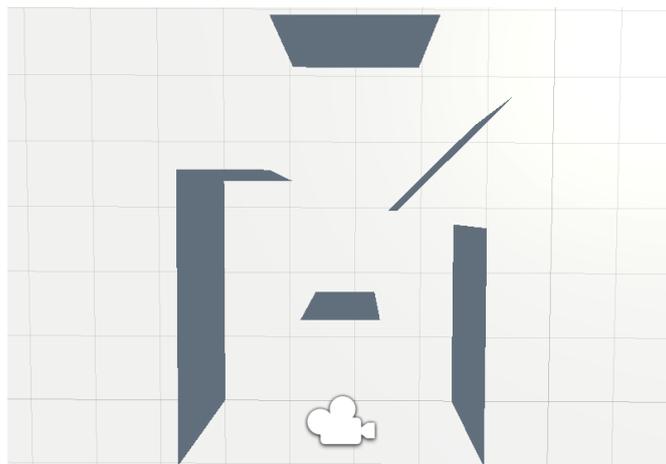


図 3.14 予備実験での壁の配置を上から見た図

### 結果と考察

参加者が歩いた軌跡を記録した結果を以下の図 3.15 に示す。

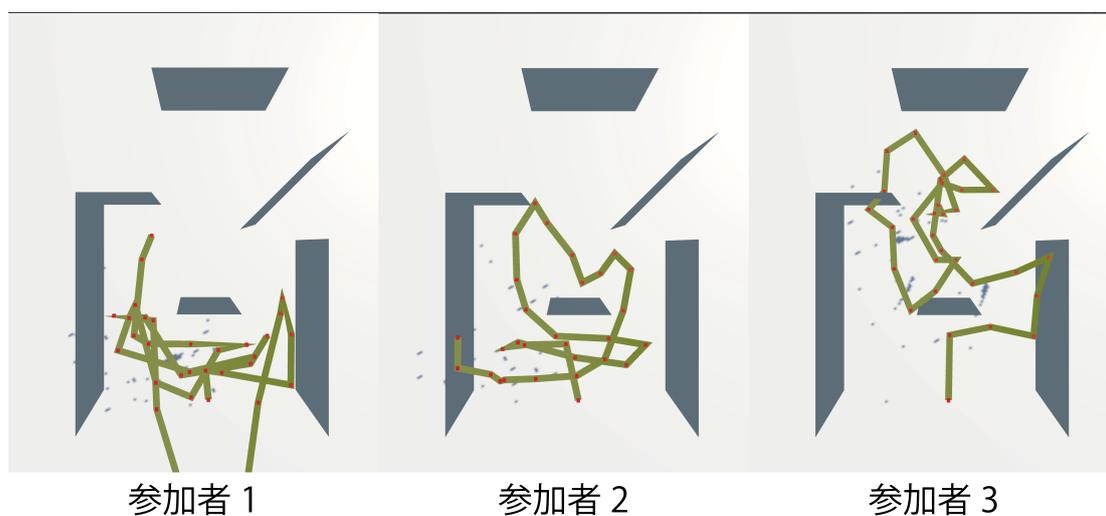


図 3.15 予備実験での参加者が歩いた軌跡

3人の参加者に1分自由に歩き回ってもらったが、壁にぶつかったのは参加者3の1回だけであり、Phantom Wallsを使って壁を知覚して避けることは可能であ

ると考えられる。軌跡を見てみると、全参加者とも同じ場所をうろうろと往復していることが多かった。これは、自由に歩くタスクを与えてしまったために、壁がないとわかっているところを往復するという行動が見られたと考えられる。探索が必要なタスクに変更することでこれは避けられるため、タスクを迷路に変更した。

### 3.8.2 Embodied Media Project オープンラボ&ARTBAY TOKYO

#### 日時・場所

Embodied Media Project オープンラボ

日時 2023年8月27日

場所 日本科学未来館<sup>8</sup>

ARTBAY TOKYO

日時 2023年9月23日、24日

場所 日本科学未来館

#### 概要

まず、Phantom Wallsの音の世界に慣れてもらうために参加者にHMDを装着してもらい、3分程度の簡単なチュートリアルを行った。チュートリアルでは、バーチャル空間に配置されている壁が可視化されており、目で見える状態で自身の壁との距離や壁との角度がどのように音で表現されているかを確認してもらった。以下の図3.16にEmbodied Media Project オープンラボでのチュートリアルの壁の配置を上から見た図を、図3.17に壁の配置を体験者の目線で見た図を示す。図3.16のカメラのマークは体験者の初期位置であり、壁の前の青いラインは壁から

---

8 日本科学未来館 (Miraikan) , <https://www.miraikan.jst.go.jp/>

70cm の地点であり、この線を境に急激に音圧が上がることで、“圧力” や “反発” のような感覚を感じさせる地点である。以下の図 3.18 に ARTBAY TOKYO でのチュートリアルの壁の配置を体験者の目線で見たとした図を示す。ARTBAY TOKYO ではチュートリアルスペースが少なかったため、1 枚の壁しか置くことができなかった。

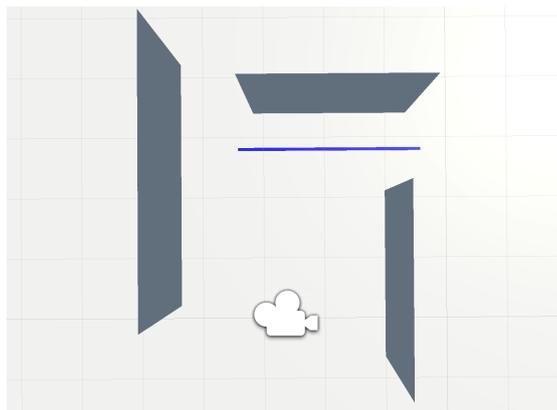


図 3.16 Embodied Media Project オープンラボでのチュートリアル壁の配置を上から見た図

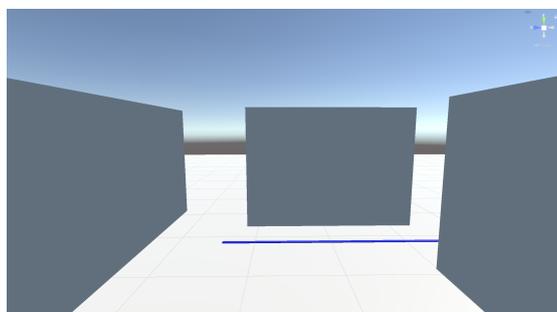


図 3.17 Embodied Media Project オープンラボでのチュートリアル壁の配置を体験者の目線で見たとした図

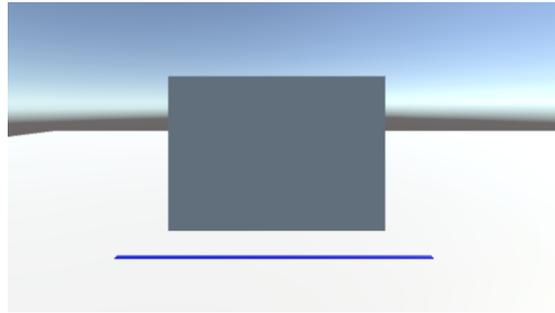


図 3.18 ARTBAY TOKYO でのチュートリアル壁の配置を体験者の目線で見  
た図

チュートリアルの手順を以下に示す。チュートリアルの内容は口頭で伝えた。

1. この世界では壁から音が鳴ることを伝える。
2. 正面の壁に向かって青いラインまでゆっくり歩いて近づいてもらう。
3. 壁との距離が近づくほど音が大きくなることを確かめてもらい、この法則で壁との距離が分かることを伝える。
4. 青いラインのところで急激に音量が大きくなり、“圧力”や“反発”のような感覚を感じてもらう。青いラインよりも壁に近づいてもそれ以上音の大きさはほとんど大きくなることを伝える。
5. 壁との向きに応じて音のテンポが変わることを伝える。
6. 壁に対し垂直な場合テンポが遅く、壁に対し平行な場合テンポが速くなることを確かめてもらい、この法則で壁の向きが分かることを伝える。
7. 一度自由に歩き回ってもらう。
8. チュートリアルでは壁が見えているが、本番は何も見えないため、練習のために目をつむって歩いてもらう。

チュートリアルが終わったら、目が見えない状態で音だけを頼りに迷路を体験してもらい、参加者が歩いた軌跡を記録した。以下の図 3.19 に迷路の壁の配置を上から見た図を示す。

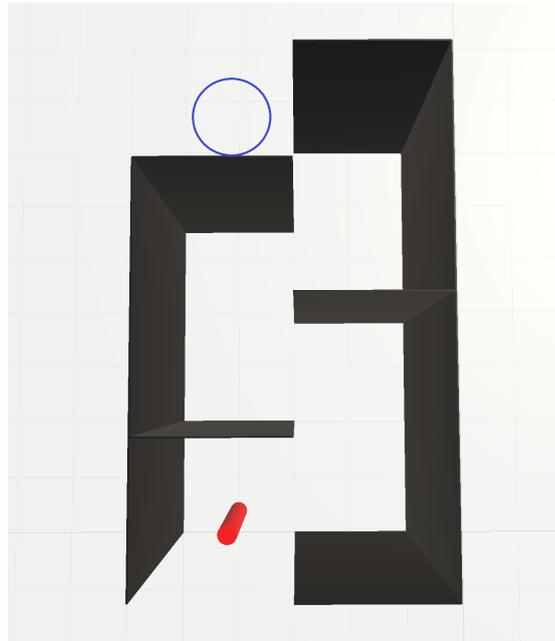


図 3.19 Embodied Media Project オープンラボ・ARTBAYTOKYO での迷路

迷路のスタート地点は、赤い円柱がある地点であり、ゴール地点は青丸のエリアである。何も見えない状態で歩いていると、自分が今どちらの方向を向いているのかが分からなくなるため、体験者にリモコンを持ってもらい、リモコンのボタンを押すことでゴールから音が鳴るようにした。また、見えない壁に参加者がぶつかったときに壁にぶつかったことが分かるように、音声案内で「壁にぶつかりました」と伝えた。参加者がゴール地点にたどり着いたら、音声案内で「ゴールです」と伝え、HMDを外してもらい、最後に参加者が歩いた軌跡をモニターに表示して見せた。

参加者の体験風景を以下の図 3.20 に示す。



図 3.20 Embodied Media Project オープンラボ・ARTBAYTOKYO での体験風景

### 結果と考察

参加者が迷路を歩いた軌跡を記録した結果を以下の図 3.21 に示す。

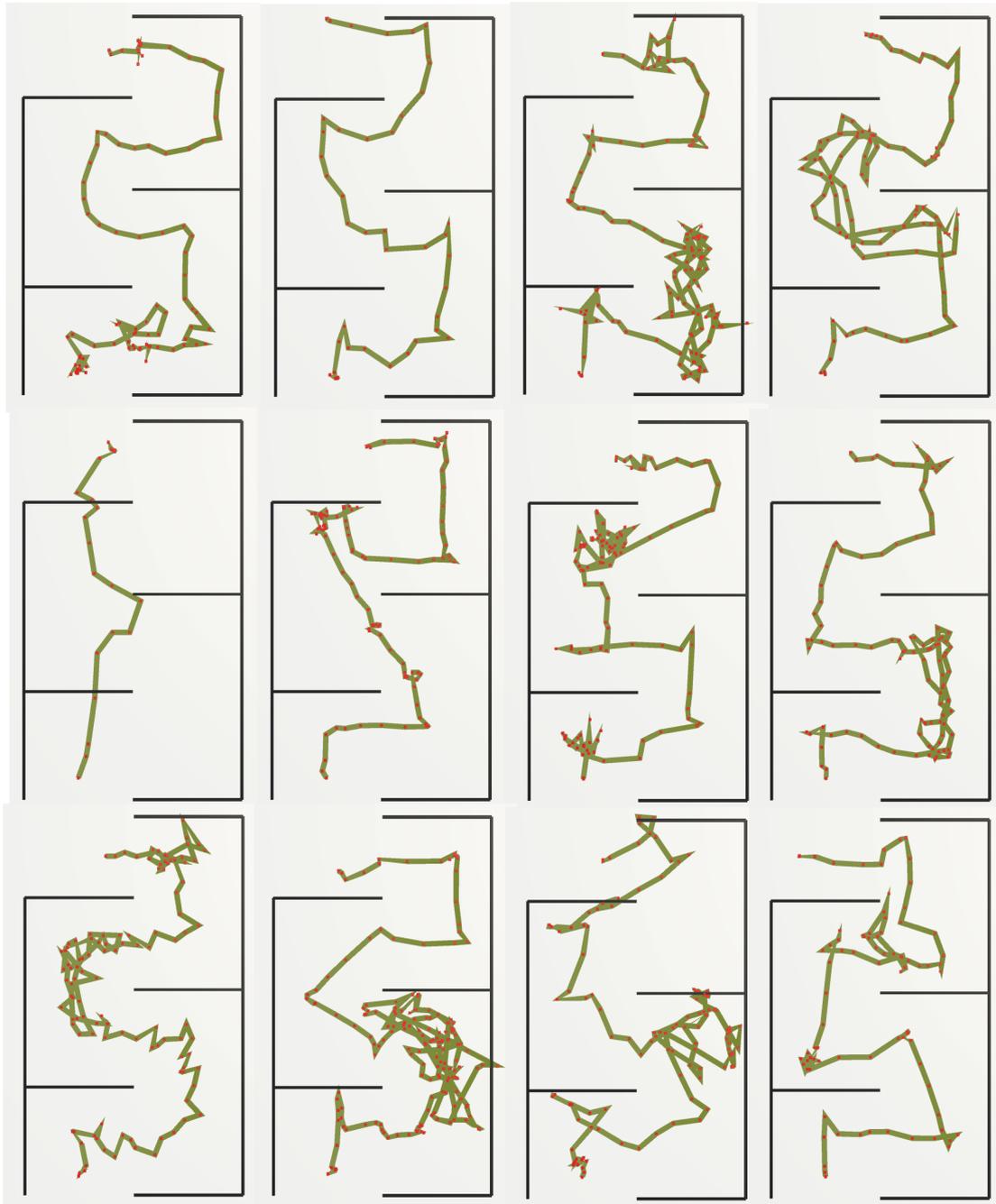


図 3.21 Embodied Media Project オープンラボでの参加者が歩いた軌跡

Embodied Media Project オープンラボでは12名に体験をしてもらった。12名が体験したところ、壁にぶつかったのは4名であり、その中でも完全に壁を知覚できなかったのは1名であった。初めて体験するにも関わらず、多くの人が壁を知覚することができていた。この結果は、チュートリアルの効果が高かったと思われる。しかし、迷うことなくスムーズに迷路のゴールまでたどり着けている人は1名だけであり、ほとんどの体験者はうろうろと往復していた。往復している場所は迷路を上から見たときの右下の部分と左上の部分が多かった。この場所は複数の壁に囲まれており、複数の音がさまざまな方向から聴こえてくる。しかし、迷路を上から見たときの右上の部分も同じ構造であるのにそこではうろうろと往復している人はあまり見られていない。これは慣れからくるものだと考えられる。チュートリアルで壁に囲まれた角の部分を実践することでより知覚しやすくなると思われる。

ARTBAY TOKYOでは約70名に体験をしてもらった。Embodied Media Project オープンラボと少しだけ壁の配置が異なる迷路を行った。以下の図3.22のように壁を避けながら歩いている人に比べ、図3.23のように壁にぶつかってしまったり、複数の壁に囲まれた場所でスタックしてしまっている人がかなり多くみられた。

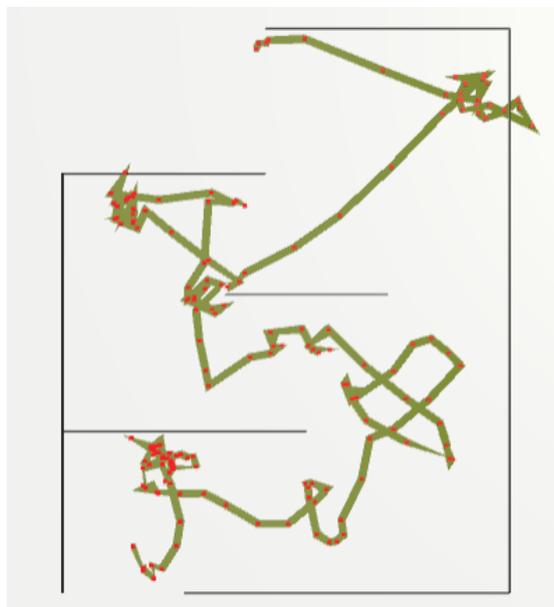


図 3.22 ARTBAY TOKYO での体験者の軌跡 1

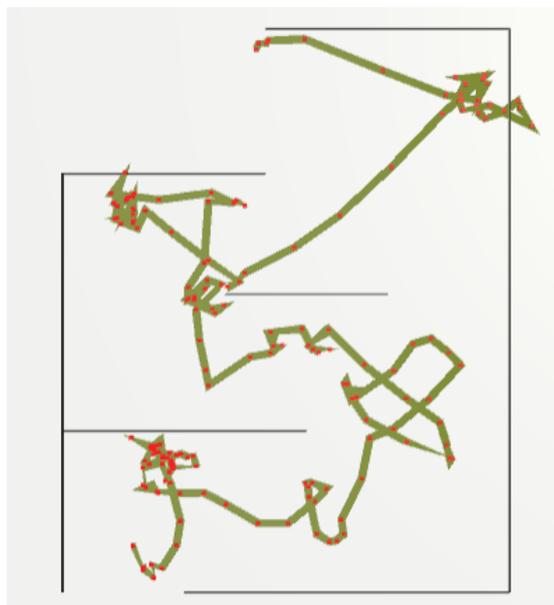


図 3.23 ARTBAY TOKYO での体験者の軌跡 2

この結果から、新しい知覚を立ち上げる際にはその知覚の法則に慣れるためのチュートリアル設計が大切であることが分かった。

### 3.9. チュートリアルデザイン

Embodied Media Project オープンラボでは、複数の壁で囲まれた場所でスタックしてしまっている人が多くみられた。ARTBAY TOKYO ではそれ以上に複数の壁で囲まれた場所でスタックしてしまう人や壁にぶつかってしまう人が多かった。Embodied Media Project オープンラボと ARTBAY TOKYO での違いはチュートリアルくらいのものであったため、チュートリアルの内容によって体験の質が大きく影響を受けると考えられる。Embodied Media Project オープンラボでも ARTBAY TOKYO でも迷路の中には壁が垂直に交わっている角や、角にさらに別の壁が近くにある状況などがあったが、チュートリアルシーンでそのような音を体験することができていない。角では2方向から大きな音量の音が聴こえ、その2つの音のピッチも異なる。さらに他の壁も近くにある場合は混乱してしまい

音を聴き分けることが難しくなる。そこで、迷路体験をする際にはチュートリアルでは、以下の図3.24のように角が体験できる場所をつくっておき、スペースがあるならさらにその近くにもう一枚別の壁を配置することとした。

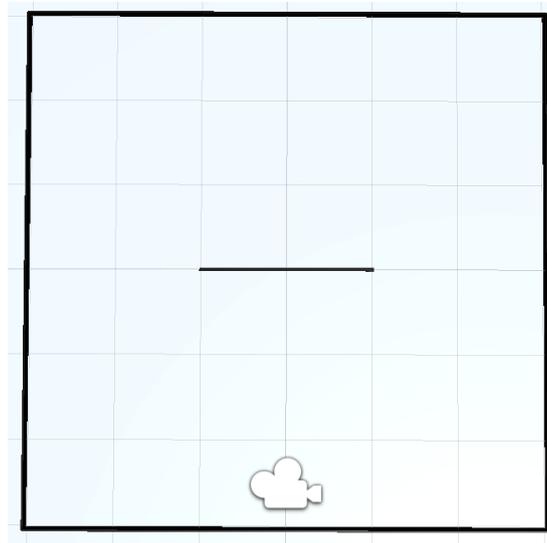


図 3.24 迷路体験のためのチュートリアル

### 3.10. 本章のまとめ

本章では、まず本研究で実現したい時間・空間的に連続な空間知覚について定義し、空間音から体性感覚へのクロスモーダル効果を用いて目には見えていない壁を知覚させる Phantom Walls を提案し、ユースケースを想定した。次に Phantom Walls を実現するために空間知覚を成立させるための音のデザインを行った。そして最終的に3つの法則によって空間知覚をするための音の世界を構成した。その後、予備的検証を行い Phantom Walls がデザインした通りに成立していることを確認した。次に、Phantom Walls を成立させるために音色に必要な条件を検討した。最後にユーザーテストを行い、得られた結果をもとに適切なチュートリアルをデザインした。

## 第 4 章

# Phantom Walls の評価

### 4.1. 実験 A: Phantom Walls を用いた空間知覚実験

#### 4.1.1 目的

Phantom Walls を用いて壁の空間的な配置を認識できるかどうか、および壁を知覚してぶつからないで歩くことが可能であるかを検証する。

#### 4.1.2 概要

まず、Phantom Walls の音の世界に慣れてもらうために参加者に 5 分程度のチュートリアルを行った。はじめに Phantom Walls の音の世界を構築しているルールについて説明した。その後、参加者に HMD およびヘッドホンを着用してもらい、以下の図 4.1 に示した壁の配置で 2 分間壁が視覚的に見える状態で歩き回ってもらい、1 分間自分で目を開けたり閉じたりしながら何も見えない状態で歩き回ってもらった。図 4.1 のカメラのマークは参加者の初期位置である。

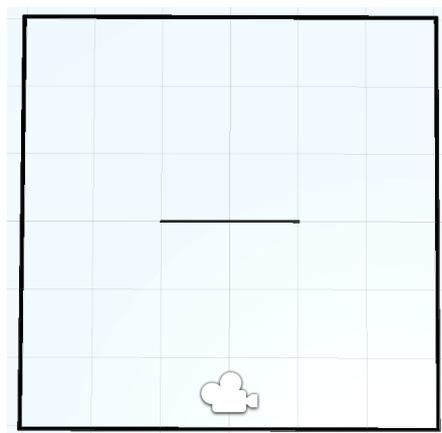


図 4.1 実験 A でのチュートリアルの壁の配置を上から見た図

チュートリアルが終わったら、参加者は以下の図 4.2 に赤く示した壁を配置した空間の四角い枠線の中を 1 分間自由に歩き回り、どのように壁が配置されていたかをスケッチした。6 種類の壁の配置を 1 から 6 まで順番に体験した。体験中は赤い壁は透明になっており、参加者からは見えないようになっている。歩き回れる範囲を示している床の黒い線は参加者から見えるようになっている。

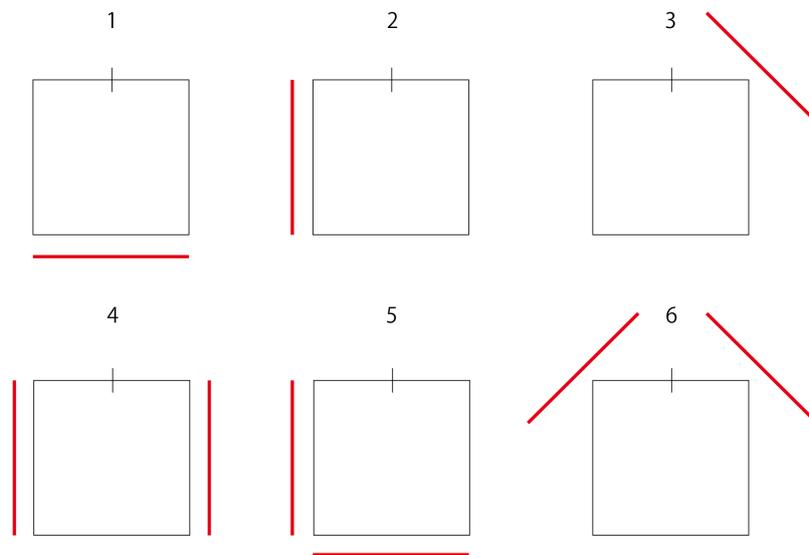


図 4.2 実験 A 空間配置課題の壁の配置を上から見た図

次に、参加者には目が見えない状態で音だけを頼りに以下の図 4.3 に示す 3 種類の迷路を歩いてもらい、参加者が歩いた軌跡を記録した。図 4.3 のカメラのマークは参加者の初期位置であり、赤い円で囲った部分はゴール地点である。最後に各参加者からコメントをもらった。

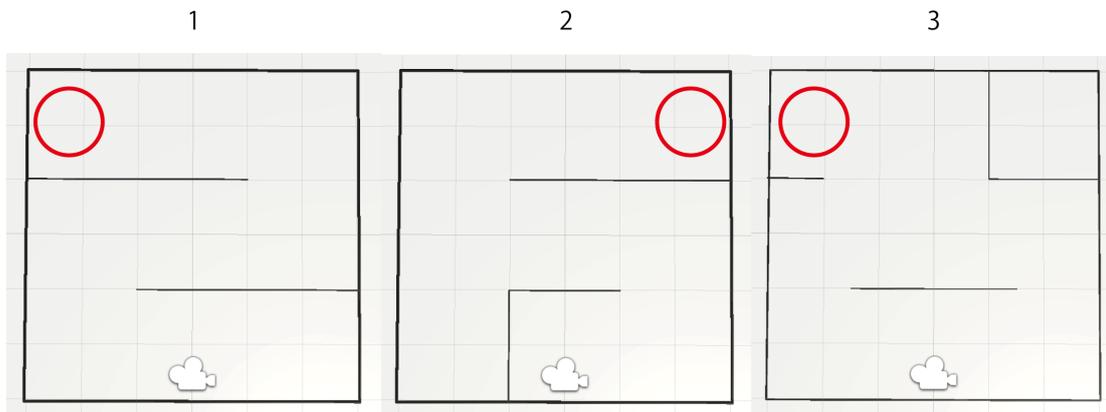


図 4.3 実験 A 迷路課題の壁の配置を上から見た図

#### 4.1.3 結果と考察

実験参加者は6名であった。それぞれの参加者を参加者 1-6 とする。参加者 1-6 の空間配置課題の結果を図 4.4-4.9 に示す。

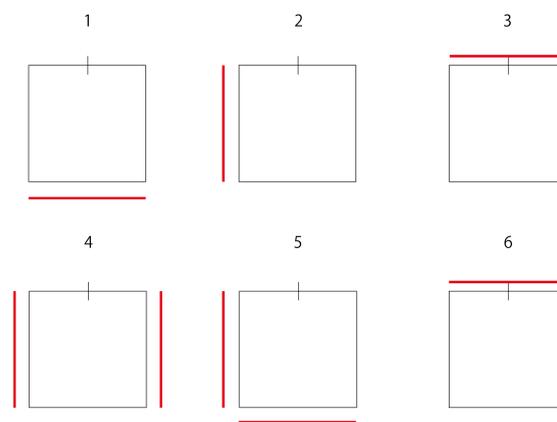


図 4.4 実験 A 空間配置課題参加者 1 の結果

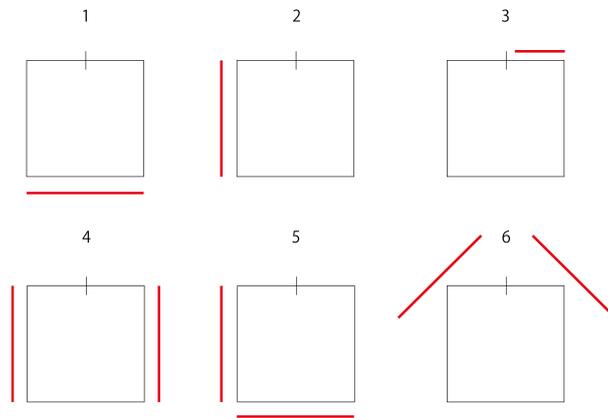


図 4.5 実験 A 空間配置課題参加者 2 の結果

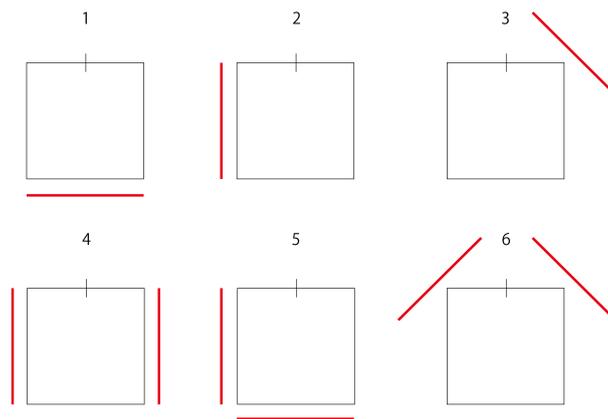


図 4.6 実験 A 空間配置課題参加者 3 の結果

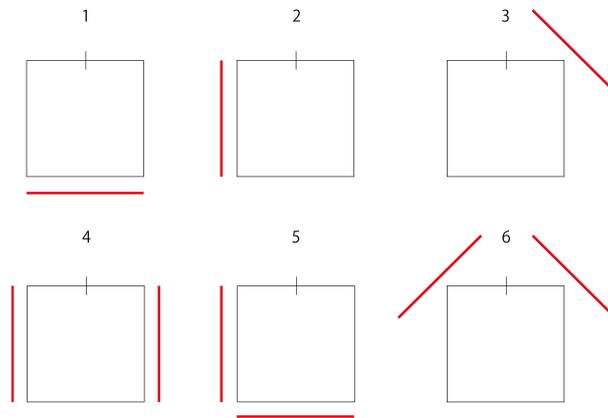


図 4.7 実験 A 空間配置課題参加者 4 の結果

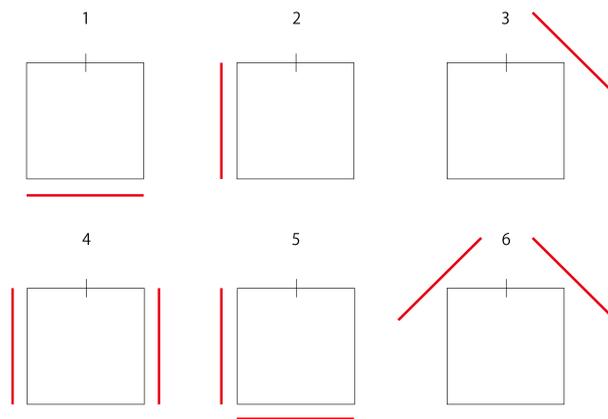


図 4.8 実験 A 空間配置課題参加者 5 の結果

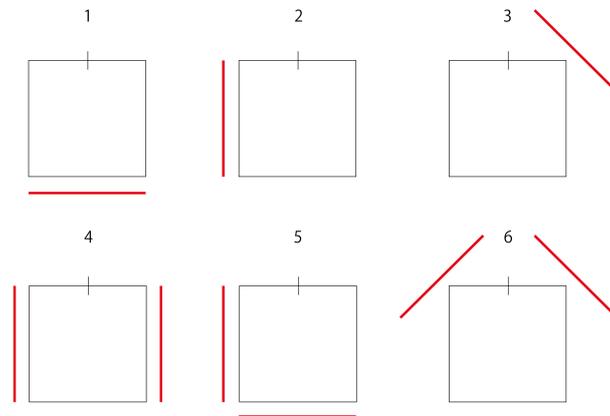


図 4.9 実験 A 空間配置課題参加者 6 の結果

参加者 1-6 の迷路課題の結果を図 4.10-4.15 に示す。

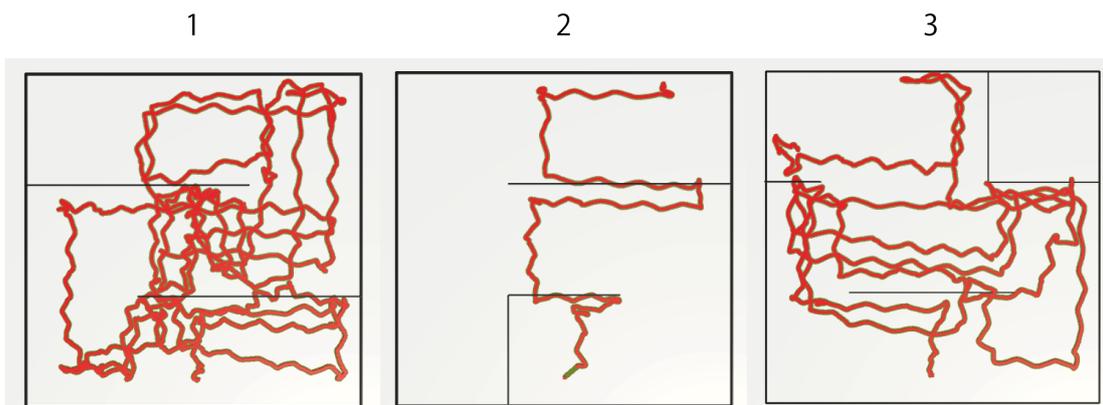


図 4.10 実験 A 迷路課題参加者 1 の結果

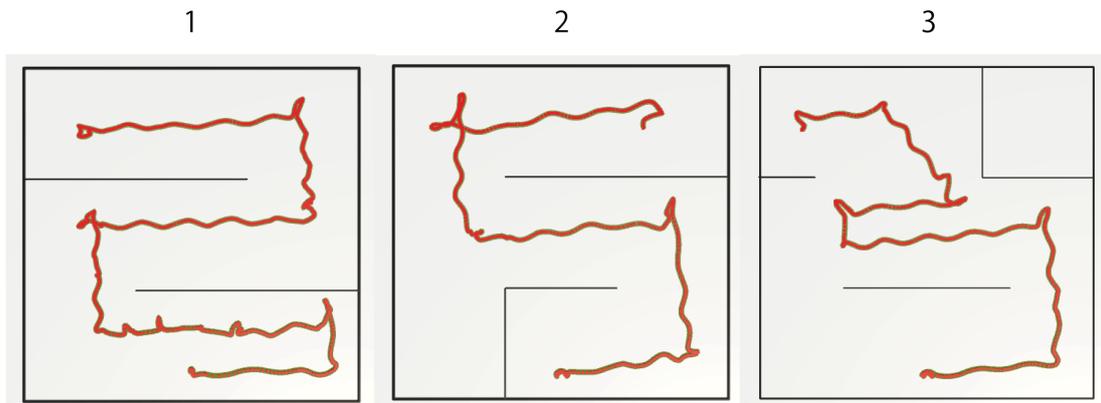


図 4.11 実験 A 迷路課題参加者 2 の結果

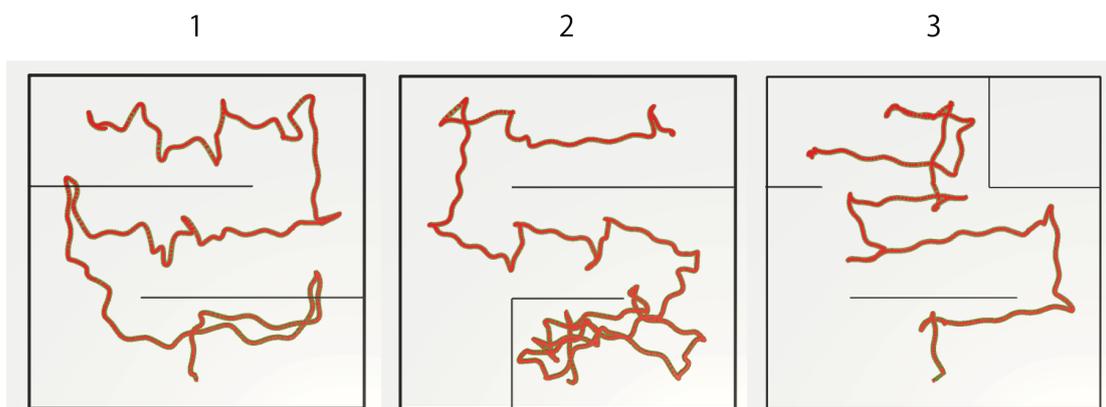


図 4.12 実験 A 迷路課題参加者 3 の結果

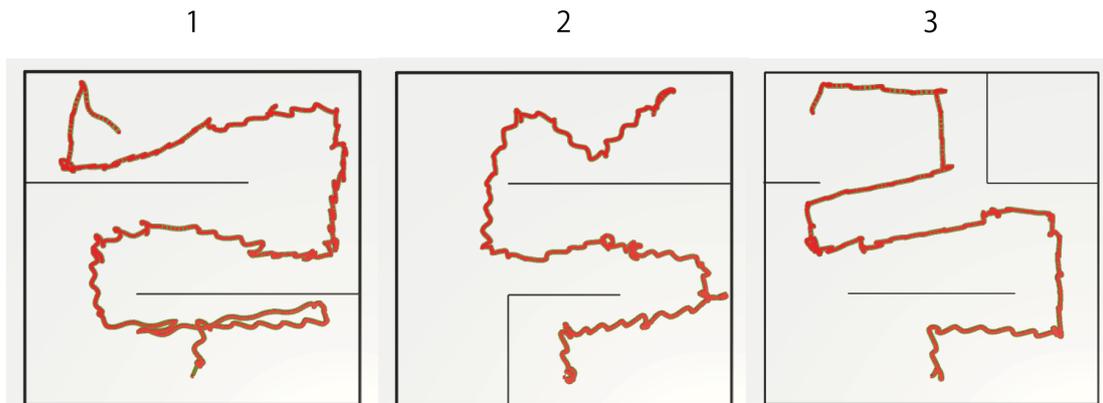


図 4.13 実験 A 迷路課題参加者 4 の結果

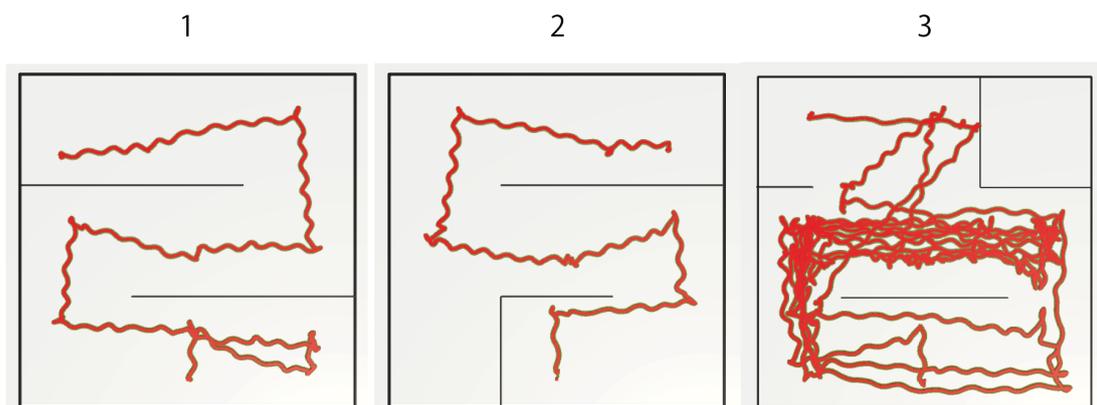


図 4.14 実験 A 迷路課題参加者 5 の結果

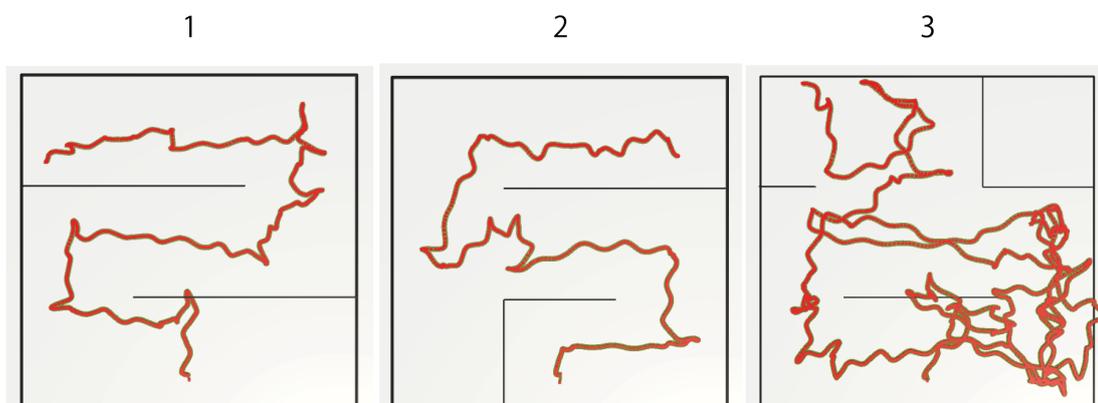


図 4.15 実験 A 迷路課題参加者 6 の結果

空間配置課題については、参加者 1 は 6 つ中 2 つを間違えており、参加者 2 は 1 つを間違えていた。そのほかの参加者はすべての課題において壁の位置と角度を当てることができていた。間違えた参加者 1, 2 はともに配置された壁の角度が 45 度のものであった。参加者 2 は、空間配置課題 3 において音の大きさの知覚によって壁の配置を予想して角度の差に気づけなかったが、空間配置課題 6 のときは壁が 2 枚あったので角度の差に気づいたと述べていた。また、参加者 1 はテンポの違いを意識していなかったと述べていた。テンポは絶対的な値（何 BPM かなど）を知覚することは難しいため、1 枚ではなく複数枚の壁が配置されていると相対的なテンポの差に気が付きやすいのだと考えられる。歩きながら頭を振ることで壁が 1 枚しか配置されてなくてもテンポから角度を予測することが可能であるが、このシステムへの慣れが足りていなかったと推測できる。逆に正確に知覚することができていた参加者 3-6 は実験中に首を振って角度を確かめる姿が観測された。

迷路課題については、空間配置課題で正答率が低かった参加者 1 は壁に何度も衝突する結果となった。迷路課題 1 については 10 分経過した時点でゴールまでたどり着けていなかったため打ち切りとした。参加者 1 のコメントとしては、音量の変化によって壁のある方向や近づいたことは頭ではわかっていたが、複数の壁に囲まれていたことでどちらの方向に進めば壁にぶつからないのかが分からな

かったと述べていた。これは、複数枚の壁に囲まれた状況でテンポによる角度の知覚ができていなかったためであると考えられる。複数枚の壁に囲まれていた場合でも音の聴こえてくる方向、音量、テンポを聴くことでどちらの方向へ進めばぶつからないかを知覚することは可能であるが、システムへの順応が足りていなかったために混乱してしまっていた。参加者3は迷路課題1では2回壁にぶつかってしまっているが、その後は壁にぶつからずに歩くことができている。これに関して、参加者3は音量変化自体は知覚することができていたが、1回目は歩幅を大きく歩いていたためぶつかってしまった、それ以降は歩幅を調節して歩いていたためぶつからなかったと述べていた。このことから、知覚できている情報から体に落とし込むことで音による空間知覚が身体化し、技能が向上していくことが考えられる。参加者3は軌跡を見ると、壁に接近した際に逆側に一瞬戻るような挙動をしている場面がみられるが、これは急激な音量変化によって“圧力”や“反発”のような体性感覚を感じ後ずさっているものであると推測できる。コメントでも複数の方向から音がもよもよと聴こえていてどんな壁の配置になっているか分かりにくい、壁に接近することで壁がどこにあるのかのイメージが急に鮮明になると述べていた。参加者6は参加者3と同じようにはじめは歩幅を大きくしてぶつかってしまったが、その後は歩幅を小さくしたと述べていた。迷路課題1、2はスムーズにできていたが、迷路課題3ではかなりの回数壁にぶつかってしまっていた。コメントでは、音量とテンポを聴きながらどのように壁が配置されているかと自分の相対的な位置をイメージしていて、迷路課題1、2ではそれが上手くいっていたが、迷路課題3では複数の壁に囲まれていろいろな方向から音が聴こえてきた時点で自分の相対的な位置や頭の中でマッピングしていた壁の位置が全く分からなくなり、どちらに進めばいいのか分からなくなったと述べていた。参加者6は空間配置課題ではすべての配置を当てることができていたが、このようなコメントが得られたことから音による空間知覚が身体化しておらず、頭の中でパターンマッチングをしている状況であったことが推測される。参加者2、4、5は3つある迷路課題のうち一度も壁にぶつからずにゴールまでたどり着けている。参加者2、5は特に音による知覚を自身の身体に落とし込んでいるように観察された。両者とも自然とテンポを聞き分けることによって壁に対して平行に進

むことでぶつからずに歩いたり、参加者3でも見られたように壁に接近して急激に音量が大きくなった地点で一瞬後ずさるような挙動を見せている。参加者2からは音の世界を構築するルールを理解したら頭で考えなくても避けて歩けたというコメントがあった。参加者5からは、やるにつれて聴き方がだんだんわかるようになって最初は頭の中で考えていたが、最後は体でできるようになったというコメントや、音が複数聴こえたときに立体的に壁が頭の中でイメージできた、何も見えていない状態ではあったが恐怖心がなかったというコメントを得た。軌跡を見ても参加者6は他の参加者と比較して軌跡のブレが少なく、淡々と同じリズムで歩き続ける姿が観察された。壁に接近したり複数の壁が近くにあったりする状況でも歩くペースが変わらずに淡々と歩いているのは、音による空間知覚が身体化されて自身の新たな知覚として機能しているのではないかと推察できる。

迷路課題では参加者のうち4人が壁に近づいたときに体性感覚を感じたと述べていた。表現の仕方はそれぞれで、「巨大な何かが迫りくる感覚」、「音圧」、「思わずうっとなる感覚」などと表現されていた。クロスモーダリティを活用し空間音から体性感覚を感じさせるという点はテンポによる角度の知覚よりもより自身の中で新たな知覚として立ち上がりやすいと推測できる。その理由は、テンポの知覚よりも直観的に理解しやすいためであると考えられる。

## 4.2. 実験 B:Phantom Walls の長期体験による空間知覚の変化

### 4.2.1 目的

Phantom Walls を使った音による空間知覚に最も慣れている筆者が壁の配置された空間をどの程度スムーズに避けて歩くことができるかを検証し、Phantom Walls の長期体験による空間知覚の変化を検証する。

### 4.2.2 概要

HMD およびヘッドホンを装着し、複数の迷路課題の中からランダムに選ばれたもの（図 4.3 の 2）を目が見えない状態で音だけを頼りに歩き、歩いた軌跡を記録した。

### 4.2.3 結果と考察

結果は以下の図 4.16 に示す。

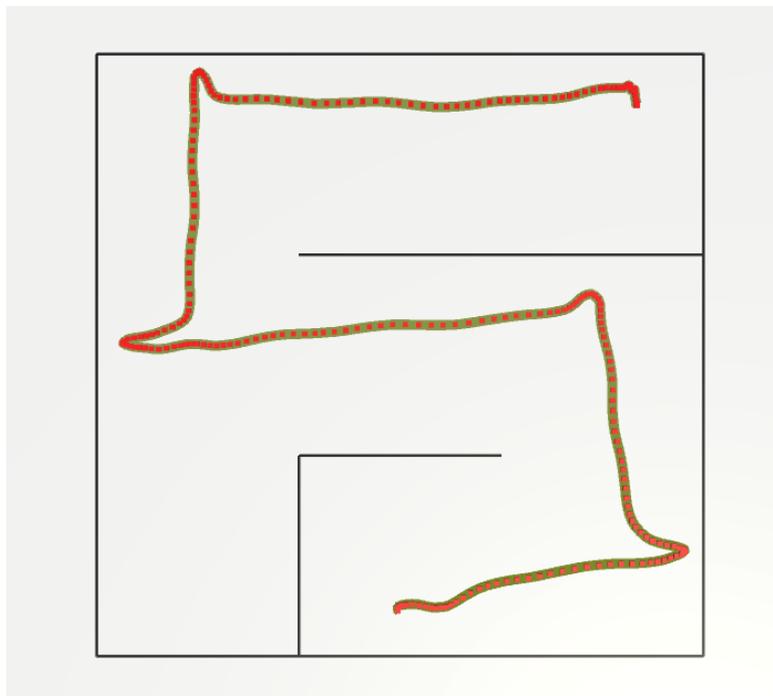


図 4.16 Phantom Walls による知覚が身体化した例

筆者はこのシステムの開発をするにあたって半年間このシステムを使用していた。このシステムを体験した中では最も音による空間知覚を身体化させて自身の新しい知覚として立ち上げられていると推察される。軌跡から実験 A に参加してもらった参加者と比較してふらふらせずになっすぐ歩いていること、壁に接近した時に体性感覚を感じて壁の存在を知覚し一瞬後ずさるような挙動をしているこ

と、テンポから壁に対する自身の角度を知覚し壁にぶつからないように壁に対して平行に歩くことができていることが分かる。筆者自身は音を聴いて空間知覚をする際に何も考えずに音だけを聴いて歩くことができるようになっていた。このシステムを使い始めたころは筆者も頭の中でテンポや聴こえてくる音の方向を考えて壁がどのような配置で置かれているのかを考えながら歩いていた。しかし使い続けているうちに徐々に考えずとも直観的にどこにどんな壁があるのか知覚できるようになった。このように音と壁との距離や角度という一見関係ない情報を結びつけたものでも最初はパターンマッチング的な処理をしているが使い続けることでだんだんと自分の身体感覚の一部とすることができる。音のパターンの暗記ではなく、首を振るであったり歩くというような身体動作と結びつけることがより新たな知覚を立ち上げることに重要であると考えられる。自身の中で新しい知覚が成り立つことにより初めて見る壁の配置だとしても迷わずにどちらに進めばいいかが直観的に知覚することができる。

### 4.3. 実験 C: 視覚障害者における Phantom Walls を用いた空間知覚実験

#### 4.3.1 目的

Phantom Walls を使って、視覚に障害がある方も晴眼者と同様に空間知覚をして壁を避けて歩くことが可能であるかを検証する。

#### 4.3.2 概要

参加者は内田佳さんという方で、視覚は両眼とも 0.05、視野は両眼とも約 25° の弱視者の方である。まず、Phantom Walls の音の世界に慣れてもらうために内田さんに 10 分程度のチュートリアルを行った。はじめに Phantom Walls の音の世界を構築しているルールについて説明した。その後、参加者に HMD およびヘッドホン装着してもらい、図 4.1 に示した壁の配置で 5 分間壁が視覚的に見える

状態で歩き回ってもらい、2分間自分で目を開けたり閉じたりしながら何も見えない状態で歩き回ってもらった。内田さんは弱視であるため、視覚的に壁が見える状態でも正確に壁の位置を判別できないため、HMDのコントローラーを手渡し、壁に接触している状態のときはコントローラーを振動させることで壁の位置や角度と音との対応関係を学習した。図4.1のカメラのマークは参加者の初期位置である。

チュートリアルが終わると、実験Aで行ったものと同様の空間配置課題に取り組んでもらった。その後、実験Aの迷路課題2、3に取り組んでもらった。最後にインタビューを行った。

### 4.3.3 結果と考察

空間配置課題の結果を以下の図4.17に、迷路課題の結果を以下の図4.18、4.19に示す。

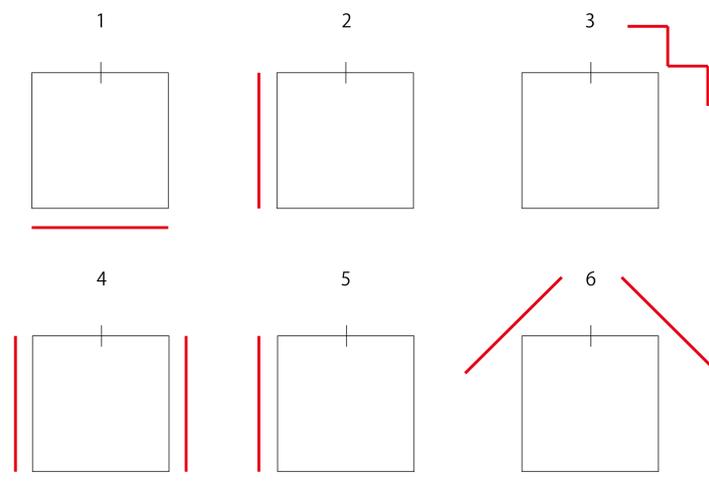


図 4.17 空間配置課題視覚障害者の方の結果

4. Phantom Walls の評価4.3. 実験 C: 視覚障害者における Phantom Walls を用いた空間知覚実験

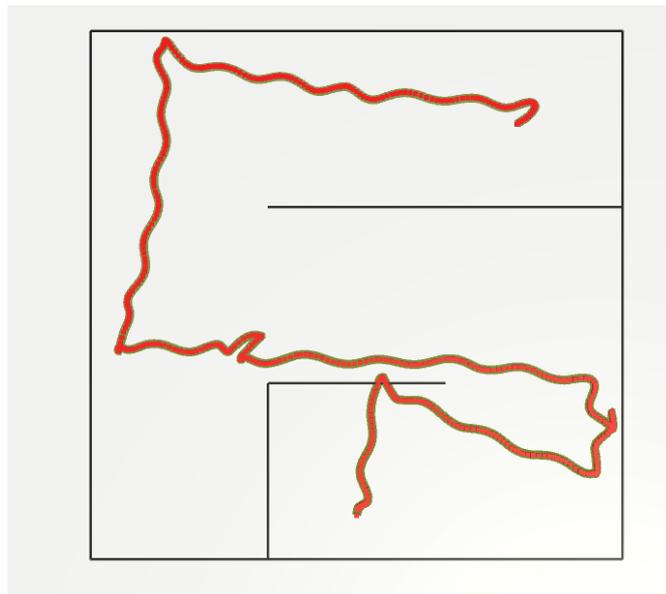


図 4.18 迷路課題視覚障害者の方の結果 1

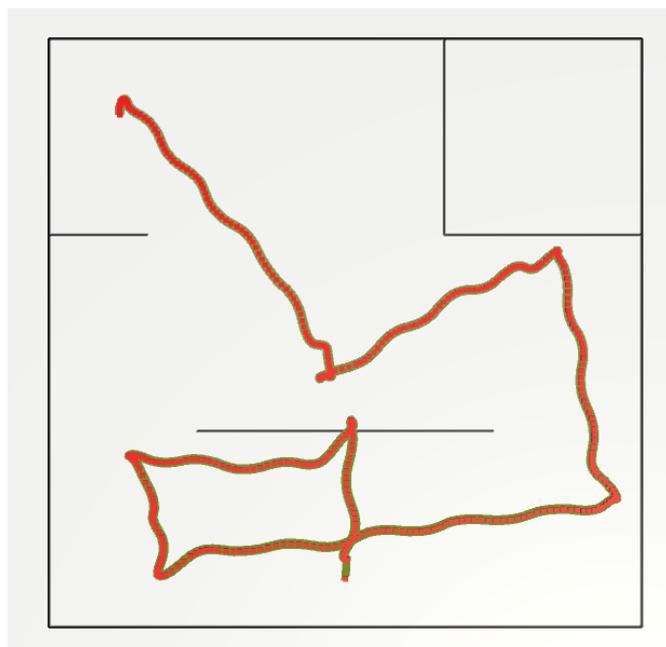


図 4.19 迷路課題視覚障害者の方の結果 2

空間配置課題は6つの課題のうち課題3以外はすべて壁の配置を知覚すること

ができていた。課題3については階段状にあると知覚していたが、課題6を行っているときに45°の角度で1枚の壁があったと気づいていた。迷路課題に関しては、どちらの課題も最初に壁にぶつかっていたが、これは普段から視覚的に見えにくい環境で歩くことに慣れているため、晴眼者が視覚がない状態で歩くときよりも歩行速度がかなり速かったからである。内田さん自身も壁と近いことを知覚できていたけれどすぐにぶつかってしまったと述べていた。結果を見ると、空間配置課題に関しては晴眼者と同程度の結果が得られたと考えられる。迷路課題に関しては、この日初めて使ったシステムでありまだ自身の知覚としては立ち上がっていないはずなのに晴眼者と比較してかなりスムーズに知覚ができていた。晴眼者は壁と壁に囲まれた角であったり、複数の壁に囲まれている状況でどちらに歩けばよいのか音を聴きながら検討している時間が見られたが、内田さんは角や複数の壁に囲まれている状況であっても立ち止まることなく瞬時にどちらへ進むかの判断をしていた。音の大きさとテンポをよく聞いて考えながら知覚をしていたため、音による新しい知覚が立ち上がっていたとは考えにくいだが、複数の音が同時に鳴っているときの聞き分けは普段から鳴れているとのことだったので、その影響はかなり大きいと考えられる。以上より視覚障害者の方でも Phantom Walls は晴眼者と同様に使うことができるといえる。普段から音の聞き分けなどに慣れているため Phantom Walls を用いて音による空間知覚を自身の身体に新しい知覚として立ち上げるのは晴眼者よりも短い時間でできるのではないかと推察される。

インタビューでは音を用いた空間知覚や今 Phantom Walls について話を伺ったので以下に記載する。普段音を用いて空間知覚をしている視覚障害者の方は、今回の現実世界とは異なる音の法則で創られた聴覚世界を知覚する際に普段の音を使った空間知覚と混同してしまいうまくいかない可能性があると考えていたという話をしたところ、むしろ日常的に障害物のない場所を探して歩くというよりは反響音を用いて障害物の位置や距離を特定し、それを避けて歩くことをしているため、壁自体から音が出るこのシステムは視覚障害者の音を用いた空間知覚に似ているため、むしろ理解しやすかったと述べていた。また、実際の空間の広さよりも Phantom Walls を用いて音を使って歩いた空間の方が広く感じた述べていた。これは原因は分からないが、晴眼者からの体験者からは一度も出たことがな

いコメントであったため、普段音を用いて空間知覚をしていることが関係していると考えられる。この感覚を応用することにより Blind Redirected Walking などに応用できる可能性があると考えられる。他にも骨伝導イヤホンなど耳を塞がないタイプのイヤホンを使うことで、現実世界の障害物をエコロケーションを使うことで避けながら Phantom Walls を用いて仮想空間の壁も同時に避けながら歩くということも可能だと思うと述べていた。現実世界の音とイヤホンを通じた音ではそもそもの音の質が全く違うため混同することはないとのことである。このことから Phantom Walls を屋外で機能させることも十分可能であると考えられる。また、内田さんはブラインドサッカー選手として活躍されている人でもあり、普段ブラインドサッカーは全体の練習に参加する以外に練習する方法が少ないが、Phantom Walls を使うことで家などでも個人練習などをするのに応用できると考えていると述べていた。

## 4.4. Phantom Walls のデモ展示

SIGGRAPH Asia 2023 に参加し、Phantom Walls のデモ展示を行った。

開催日時・場所

日時 2023 年 12 月 13 日、14 日、15 日

場所 ICC Sydney, Austraria

### 4.4.1 概要

体験概要としては、まず音の世界に慣れるために 5 分間程度のチュートリアルを行った。はじめに Phantom Walls の音の世界を構築しているルールについて説明した。その後、体験者に HMD およびヘッドホンを着用してもらい、以下の図 4.20 に示した壁の配置で 1 分間壁が視覚的に見える状態で歩き回ってもらい、1 分間自分で目を開けたり閉じたりしながら何も見えない状態で歩き回ってもらった。

展示スペースが  $4\text{m} \times 3.5\text{m}$  しか与えられていないため初めから認知負荷が高くないようにチュートリアルは箱型の単純なものとした。また、デモコンテンツとして音や知覚の世界観に合わせてチュートリアルでの視覚的に見える壁は以下の図 4.21 のようにもやもやとした霧のような見た目とした。

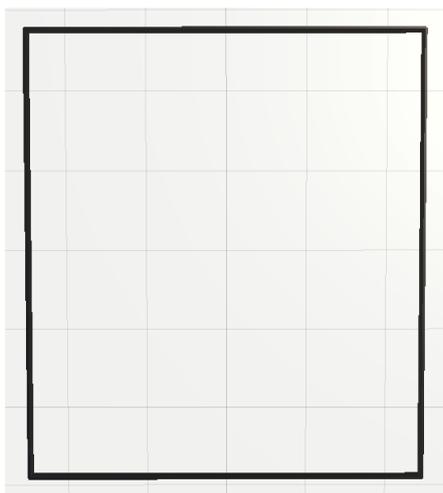


図 4.20 SA デモでのチュートリアルの壁の配置を上から見た図

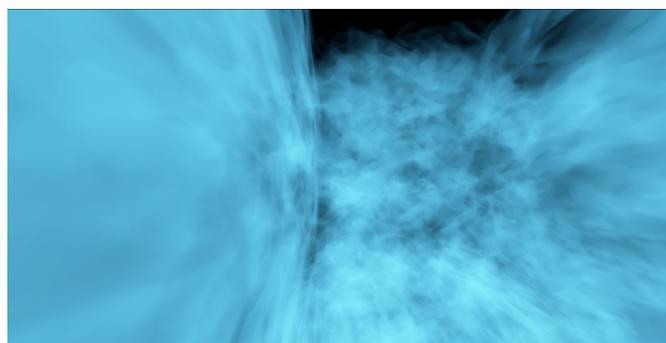


図 4.21 SA デモでのチュートリアルの壁を体験者が見た図

コンテンツとしては、展示スペースが  $4\text{m} \times 3.5\text{m}$  しか与えられていないため、迷路を体験しているときに壁の配置を変えることで実際の広さよりも広く感じさせるように工夫した。具体的には、以下の図 4.22 のようにはじめは左図のような壁の配置になっており、スタートから中間地点までいくと、右図のように壁

の配置が変化してゴール地点が現れるというものになっている。短い時間で多くの人が体験できるようにするために壁の配置は易しく設定した。

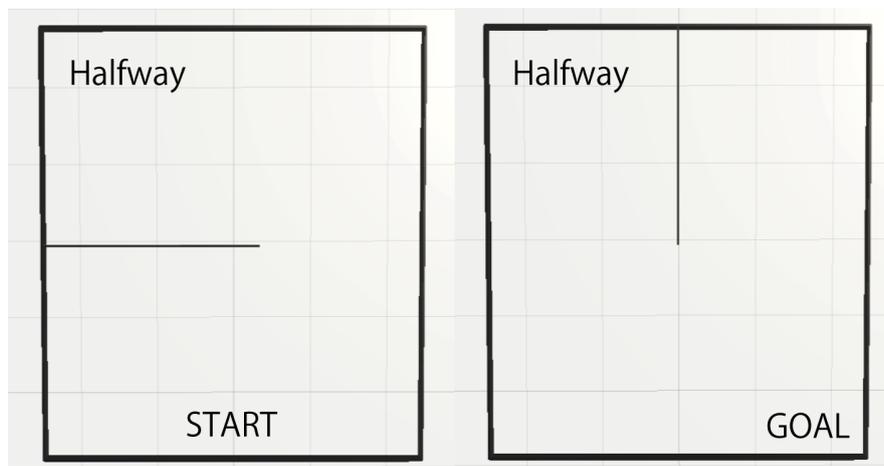


図 4.22 SA デモでの体験コンテンツ

#### 4.4.2 結果

3日間で約70名の体験者に体験をしてもらった。易しい壁の配置にしていたこともあり、ほとんどの体験者が壁にぶつからずにゴールまでたどり着くことができた。当日の体験者の様子と歩いた軌跡をスタートから中間地点までを以下の図4.23に、中間地点からゴールまでを図4.24に示す。

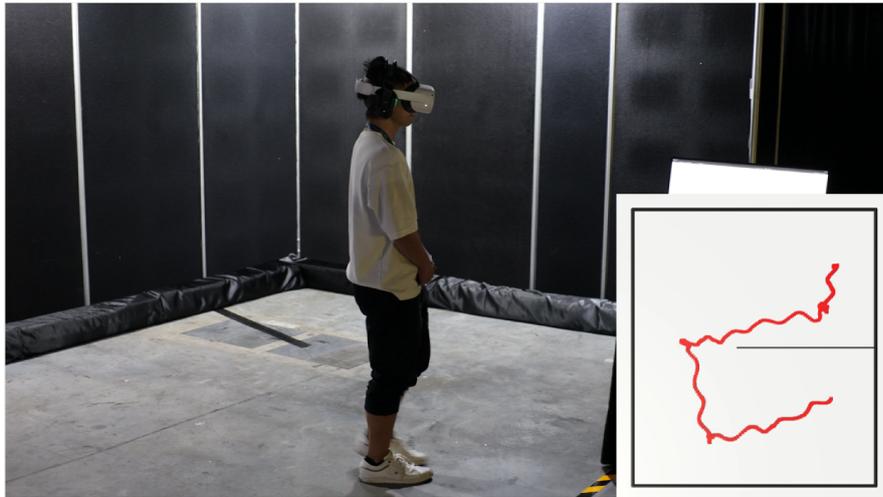


図 4.23 SA デモでの体験の様子と歩いた軌跡 1

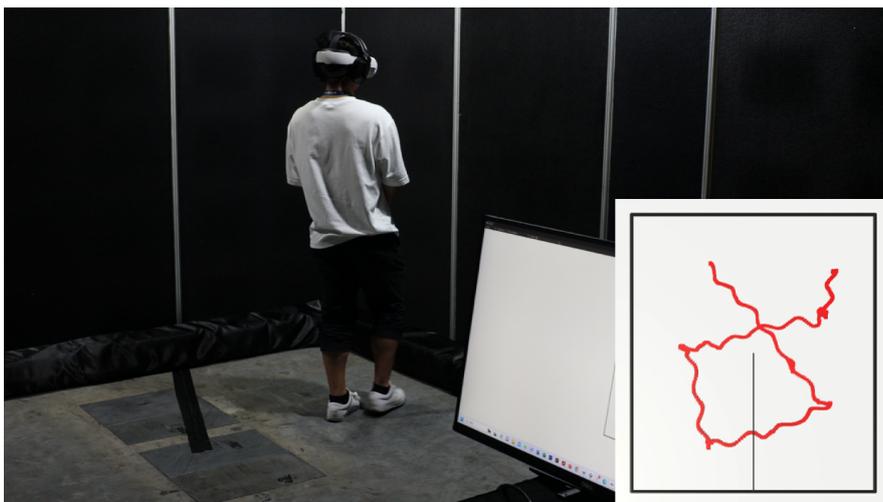


図 4.24 SA デモでの体験の様子と歩いた軌跡 2

体験者からは単純な法則だけでも意外に空間知覚ができるというコメントが最も多かった。法則を増やすことでより知覚できる要素が増えるというコメントも得た。この話は後述する考察で詳しく述べる。

## 4.5. 考察

Phantom Walls を用いることで音による空間知覚をすることができることが分かったが、今回設定した法則以外での空間知覚が成り立つことも十分に考えられる。音による空間知覚を身体化し自身の感覚の一部となるまで使うことで新しい知覚は立ち上がるが、その際に設定する法則のパラメータや組み合わせによって知覚できる要素が変わる。現在の Phantom Walls で知覚できるものは、壁の長さ、壁との距離感、壁との角度だけである。これが現在の Phantom Walls の Limitation であるが、音の法則を増やすことにより壁の高さであったり壁に開いている穴であったり、そもそも壁ではない障害物の輪郭だったりを知覚することができると考えられる。また、現在の Phantom Walls はゆっくり歩行することを前提に設計されているため、大きな歩幅で歩いたり、早歩きをすると壁にぶつかってしまう恐れがある。走ったり大きな歩幅で歩くためには、急激な音量変化を与えて壁の存在を体性感覚として伝える地点を現在の 0.7m よりも遠くに設定する必要がある。しかし、そうすると今度は空間知覚の解像度が落ちてしまう。そこで、例えば体験者の歩行速度に合わせて自動的にパラメータを調整することで走っているときは大雑把な空間知覚が、歩いているときは空間解像度の高い空間知覚を実現することができると推測する。

## 4.6. 本章のまとめ

実験 A により Phantom Walls を用いて空間知覚を成立させることができることが分かった。実験 B により Phantom Walls を用いて音による空間知覚を身体化させ、自分の身体の新しい感覚として立ち上げた筆者が迷路を歩いて Phantom Walls の空間知覚の可能性を模索した。実験 C により Phantom Walls を視覚障害者の方でも晴眼者と同様に使うことができることを示した。次に、Phantom Walls を使ったコンテンツを SIGGRAPH Asia2023 で行った展示の結果をまとめた。最後にここまで行った実験や検証から得られたことを考察した。

## 第 5 章

# Conclusion

本論文では、空間音から体性感覚へのクロスモーダル効果を用いて“圧力”や“反発”のような感覚を感じさせることにより、壁を知覚し避けて歩くことができるシステムである Phantom Walls を提案し、検証、考察した。

第一章では、はじめに空間知覚に興味を持ったきっかけを述べ、完全な暗闇での体験を経験し、視覚障害を持つ方へのインタビューから現在の視覚を用いない空間知覚の課題を知り、そこから視覚を用いずに人間の空間知覚の能力を拡張するシステムをつくりたいという研究の目的を述べた。

第二章では、まず人間はどのようにさまざまな感覚を知覚しているのか、空間知覚に用いられている感覚等を調査した。そして空間知覚の大部分を占める視覚を失っている視覚障害者の空間知覚と、感覚を別の感覚により代用する感覚代行を用いた歩行補助を行う研究や方法を紹介した。さらに、クロスモーダリティを活用した空間知覚の拡張を行っている研究や作品を紹介した。

第三章では、時間的・空間的に連続な空間知覚を定義し、空間音から体性感覚へのクロスモーダル効果を活用して空間知覚を行う手法である Phantom Walls を提案した。次に、Phantom Walls を実現するために必要な空間知覚を成立させるための音をデザインし、Phantom Walls の音の世界を構成する 3 つの法則を定義した。そして、提案した手法についての予備実験を行い、Phantom Walls がデザイン通りに機能しているか検証した。また、新たな方法での空間知覚をする際のトレーニングの重要性について触れ、Phantom Walls を用いて空間知覚を行う際の適切なチュートリアルを設計した。

第四章では、第三章で提案した手法についての実証を行った。また提案した手法の Limitation や今後どのように発展させられるかについて考察した。

本論文で提案した Phantom Walls は、視覚を用いなくても、音により壁からの”圧力”や”反発”を感じることで壁の存在を知覚してぶつからずに歩くことができることが分かった。障害物に開いている穴や、障害物の輪郭の形状など Phantom Walls では実現できないことも多くあるが、現在視覚を用いることが前提とされている VR 体験がほとんどの中、視覚の有無に依らずに同じように体験できる VR 体験や、視覚障害者の歩行支援などにもこの手法は応用できると考えられる。

これまでさまざまな空間知覚方法が確立されているが、人間の知覚は技術によってまだまだ拡張をすることが可能であると考えられる。本研究が、知覚拡張研究や感覚代行研究の進展に貢献できることを期待する。

# 謝 辞

本研究の指導教員であり、幅広い知見からの的確な指導と暖かい励ましやご指摘をしていただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の南澤孝太教授に心から感謝いたします。常に的確なアドバイスを下さり、研究だけでなく、これからの人生にも役立つような助言をたくさんいただきました。忙しい中大人数の同期の発表練習に何時間も付き合っていたいただいたことは感謝してもしきれません。いつも複数のミーティングを掛け持ちしながらアドバイスを学生にしている姿はまさにロボットでした。

同研究科の副指導教員である砂原秀樹教授は、発表の際にいつも自分の抜けている論理の部分を指摘して下さりありがとうございました。心から感謝いたします。

研究指導や論文執筆など数多くの助言を賜りました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の稲蔭正彦教授に心から感謝いたします。

研究の方向性について様々な助言や指導をいただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の脇坂崇平特任助教に心から感謝いたします。配属されてからの約2年間、研究のメンターとして、そして人生のメンターとして面倒を見て下さり本当にありがとうございました。荒くれものの多い Emergent Perception チームを2年間引っ張っていただきありがとうございました。いつも休日や平日も夜遅くまで研究相談に乗っていただいたおかげで国際学会に投稿したりさまざまなイベントで展示をしたりと貴重な体験ができました。

最後に、長い学生生活を支えてくれた両親に心から感謝いたします。

## 参 考 文 献

- [1] Andrew J. Kolarik, Silvia Cirstea, Shahina Pardhan, and Brian C.J. Moore. A summary of research investigating echolocation abilities of blind and sighted humans. *Hearing Research*, Vol. 310, pp. 60–68, 2014. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378595514000185>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.heares.2014.01.010>.
- [2] George Mather. Essentials of sensation and perception. 2011. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:142330379>.
- [3] 豊清水. 感覚知覚のメカニズム. 繊維機械学会誌, Vol. 37, No. 10, pp. P389–P395, 1984. URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1390001204296069248>, doi:10.4188/transjtmsj.37.10\_p389.
- [4] 清水豊. 感覚情報の知覚メカニズム. 繊維製品消費科学会誌, Vol. 28, No. 7, pp. 266–270, 1987. doi:10.11419/senshoshi1960.28.266.
- [5] George Kenyon and Kabir C. Sen. The perception process. 2015. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:142122079>.
- [6] 宏加藤. 「視覚は人間の情報入力の80%」説の来し方と行方. 筑波技術大学テクノレポート, Vol. 25, No. 1, pp. 95–100, 12 2017. URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1050282812406394112>.
- [7] Makoto Inagami, Ryuzo Ohno, and Rieko Tsujiuchi. Phenomenal awareness of the surrounding space: An ecological perspective. 認知科学,

- Vol. 15, No. 1, pp. 134–143, 2008. URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1390282679459617920>, doi:10.11225/jcss.15.134.
- [8] Nicholas J. Wade and Michael T. Swanston. Visual perception: An introduction. 1991. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:142606705>.
- [9] C. Wheatstone. Xviii. contributions to the physiology of vision. —part the first. on some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 128, pp. 371–394, 1838. doi:10.1098/rstl.1838.0019.
- [10] 正大山. 立体視覚. テレビジョン, Vol. 16, No. 2, pp. 103–108, 1962. URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1390282680370799872>, doi:10.3169/itej1954.16.103.
- [11] Shigeru Ichihara, Norimichi Kitagawa, and Hiromi Akutsu. Contrast and depth perception: Effects of texture contrast and area contrast. *Perception*, Vol. 36, pp. 686 – 695, 2007. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:284532>.
- [12] Hans Wallach. On sound localization. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 10, pp. 270–274, 1938. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:222611098>.
- [13] D. Perisa, Bojan Ivanević, and Kristian Jambroić. Sound localization. *Proceedings. Elmar-2004. 46th International Symposium on Electronics in Marine*, pp. 278–282, 2004. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:41769185>.
- [14] Frederic L. Wightman and Doris J. Kistler. Auditory space perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 68, , 1980. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120871526>.

- [15] Adelbert W Bronkhorst and Tammo Houtgast. Auditory distance perception in rooms. *Nature*, Vol. 397, No. 6719, pp. 517–520, 1999.
- [16] Manuel Oechslin, Martin T. Neukom, and Gerald Bennett. The doppler effect — an evolutionary critical cue for the perception of the direction of moving sound sources. *2008 International Conference on Audio, Language and Image Processing*, pp. 676–679, 2008. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14785906>.
- [17] Christian Doppler and Frantisek Josef Studnica. *Ueber das farbige licht der doppelsterne und einiger anderer gestirne des himmels*. 1903.
- [18] John J. Rieser, Jeffrey J. Lockman, and Herbert L. Pick. The role of visual experience in knowledge of spatial layout. *Perception & Psychophysics*, Vol. 28, pp. 185–190, 1980. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:31784424>.
- [19] Nadia Lessard, Michel Paré, Franco Lepore, and Maryse Lassonde. Early-blind human subjects localize sound sources better than sighted subjects. *Nature*, Vol. 395, pp. 278–280, 1998. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:204997088>.
- [20] Liam J. Norman, Caitlin Dodsworth, Denise Foresteire, and Lore Thaler. Human click-based echolocation: Effects of blindness and age, and real-life implications in a 10-week training program. *PLOS ONE*, Vol. 16, No. 6, pp. 1–34, 06 2021. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252330>, doi:10.1371/journal.pone.0252330.
- [21] L. Kay. An ultrasonic sensing probe as a mobility aid for the blind. *Ultrasonics*, Vol. 2, No. 2, pp. 53–59, 1964. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0041624X64903828>, doi: [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(64\)90382-8](https://doi.org/10.1016/0041-624X(64)90382-8).

- [22] Dr. A. G. Dodds, Dr. J. D. Armstrong, and Dr. C. A. Shingledecker. The nottingham obstacle detector: Development and evaluation. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, Vol. 75, No. 5, pp. 203–209, 1981. URL: <https://doi.org/10.1177/0145482X8107500503>, arXiv:<https://doi.org/10.1177/0145482X8107500503>, doi:10.1177/0145482X8107500503.
- [23] Izzatdin Abdul Aziz, Sajee Mahamad, Mazlina Mehat, and Nazleeni Samiha. Blind echolocation using ultrasonic sensors. In *2008 International Symposium on Information Technology*, Vol. 4, pp. 1–7, 2008. doi:10.1109/ITSIM.2008.4631900.
- [24] Gu-Young Jeong and Kee-Ho Yu. Multi-section sensing and vibrotactile perception for walking guide of visually impaired person. *Sensors*, Vol. 16, No. 7, 2016. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/7/1070>, doi:10.3390/s16071070.
- [25] Sonda Ammar Bouhamed, Imene Khanfir Kallel, and Dorra Sellami Masmoudi. New electronic white cane for stair case detection and recognition using ultrasonic sensor. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 4, No. 6, 2013.
- [26] Alexander Neugebauer, Katharina Rifai, Mathias Getzlaff, and Siegfried Wahl. Navigation aid for blind persons by visual-to-auditory sensory substitution: A pilot study. *PLOS ONE*, Vol. 15, No. 8, pp. 1–18, 08 2020. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237344>, doi:10.1371/journal.pone.0237344.
- [27] René Farcy, Roger Leroux, Alain Jucha, Roland Damaschini, Colette Grégoire, and Aziz Zogaghi. Electronic travel aids and electronic orientation aids for blind people: Technical, rehabilitation and everyday life points of view. In *Conference & Workshop on Assistive Technologies for People*

- with Vision & Hearing Impairments Technology for Inclusion*, Vol. 12, p. 12, 2006.
- [28] Shachar Maidenbaum, Shlomi Hanassy, Sami Abboud, Galit Buchs, Daniel Robert Chebat, Shelly Levy-Tzedek, and Amir Amedi. The “eyecane”, a new electronic travel aid for the blind: Technology, behavior & swift learning. *Restorative neurology and neuroscience*, Vol. 32, No. 6, pp. 813–824, 2014.
- [29] Javier V Gomez and Frode Eika Sandnes. Roboguidedog: Guiding blind users through physical environments with laser range scanners. *Procedia Computer Science*, Vol. 14, pp. 218–225, 2012.
- [30] Hiroyuki Kajimoto, Yonezo Kanno, and Susumu Tachi. A vision substitution system using forehead electrical stimulation. In *ACM SIGGRAPH 2006 Sketches*, SIGGRAPH '06, p. 39–es, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/1179849.1179898>, doi:10.1145/1179849.1179898.
- [31] Alvaro Cassinelli, Carson Reynolds, and Masatoshi Ishikawa. Augmenting spatial awareness with haptic radar. In *2006 10th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pp. 61–64, 2006. doi:10.1109/ISWC.2006.286344.
- [32] 持丸正明, 村井昭彦, 田中孝之, 栗田雄一, 南澤孝太, 稲見昌彦. 超人スポーツ・グランドチャレンジ 2020. *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 45, No. 2, pp. 80–83, 2021. doi:10.3951/sobim.45.2\_80.
- [33] Taichi Furukawa, Nobuhisa Hanamitsu, Yoichi Kamiyama, Hideaki Nii, Charalampos Krekouiatis, Kouta Minamizawa, Akihito Noda, Junko Yamada, Keiichi Kitamura, Daisuke Niwa, Yoshiaki Hirano, and Tetsuya Mizuguchi. Synesthesia wear: Full-body haptic clothing interface based on two-dimensional signal transmission. In *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies*, SA '19, p. 48–50, New York, NY, USA, 2019. Associa-

- tion for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3355049.3360524>, doi:10.1145/3355049.3360524.
- [34] 飯田 一博岡 龍也. 音像距離とラウドネスに関する音圧レベルの弁別閾の比較. 日本音響学会講演論文集, pp. 869–870, 2013.
- [35] Yôiti Suzuki, Hisashi Takeshima, and Kenji Kurakata. Revision of iso 226 “normal equal-loudness-level contours” from 2003 to 2023 edition: the background and results. *Acoustical Science and Technology*, pp. e23–66, 2023.
- [36] 岳雪植木. 身長と歩幅の関係 : 大学生の事例から. 帝京科学大学教育・教職研究 = Journal of educational research and teacher development, Teikyo University of Science, Vol. 7, No. 1, pp. 55–58, 10 2021. URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1050290473037636736>.