

2024 年度 卒業論文

論文題目

メタバースにおける HMD を通した
聴覚的な擬似気配の提示の試み

指導教員

舟橋 健司 准教授

名古屋工業大学

創造工学教育課程 情報・社会コース

2021 年度入学 33119015 番

木下 栞

目次

第1章 はじめに	1
第2章 聴覚的な擬似気配の提示手法	5
2.1 人間の聴覚特性	5
2.2 スピーカの特徴	6
2.3 提案手法	8
第3章 評価実験	10
3.1 評価システム	10
3.2 評価手順	11
3.3 結果と考察	13
第4章 むすび	18
謝辞	20
参考文献	21

第1章 はじめに

近年、VR技術の発達により遊園地やゲームセンター、さらには家庭でのエンターテインメント体験が大きく進化している。これらの普及に伴い、教育や医療、建築など様々な分野でVRを用いたサービスが広まっている。VR技術は視覚、聴覚、そして時には触覚を含む感覚を総合的に刺激することで、体験者を現実とは異なる仮想世界へと引き込むことができる。これらの感覚刺激により、従来のアトラクションやゲームの枠を超えた圧倒的な没入感を提供できるようになった。中でも、ユニバーサルスタジオジャパンで体験できるXRライドでは、VR体験にライドアトラクションならではの疾走感と重力が加わることで、世界最高の体験ができると謳っている[1]。

ところで、HMD（Head Mounted Display）はVRサービスを利用するために有効な装置の一つである。HMDは左右の目の視差を用いた立体映像を提示する装置であり、臨場感溢れる映像空間を表現できる。HMDは様々な企業により製品化されており、医療分野でも用いられている[2][3]。家庭用に2016年にSONYから発売されたPlayStation VRや[4]、2012年にOculusから発売されたOculus Riftなどを筆頭に開発が進んでいる。近年では、Apple Vision ProやMeta Quest 3などのビデオシースルー機能を搭載したMRデバイスが登場した。

これらの技術の発展に伴って、メタバースの利用が広がっている。メタバースには明確な定義がないが、国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センターでは、本人のアバターを介して場所や身体条件などの制約を超えたインタラクションが可能で、継続的に存在するリアルとバーチャルが融合した新たな活動空間と定義している[5]。具体的な実用例として、「バーチャル渋谷」があげられる。デジタル空間上にもう一つの「渋谷区」を作り、新たな文化を発信していく都市連動型メタバースである。過去には、サッカー観戦イベント、ハロウィーンイベントを開催し

ている [6]. 総務省の 2022 年版情報通信白書によると, 日本のメタバース市場 (メタバースプラットフォーム, プラットフォーム以外 (コンテンツ, インフラ), XR (VR, AR, MR) 機器の合計) は, 2026 年度には 1 兆 42 億円まで拡大すると予測されている [7]. このように, 近年メタバースが注目されている [8].

メタバースの体験では, 主に HMD が利用されるが, 場合によっては PC モニタやスピーカが使われることもある. HMD の種類や PC モニタのサイズによって異なるものの, ユーザの視野はおおよそ 110 度程度に限定される. この狭い視野のため, 後方はもちろん, 横から他の参加者が近づいてきても視覚的に気付くことは難しい. システム側はユーザの視野外を含む全方向のデータを保有しており, 画面の隅に「レーダー」のようなインターフェースを表示したり, 接近情報を音声で通知したりすることが可能である. しかし, このような情報提示は量が多くなりがちで, ユーザが目前のタスクやコミュニケーションに集中できなくなる恐れがある.

一方で, 現実の環境においては視野が広いものの, 後方を直接視認することはできない. それでも, 誰かが後方から近づく際に, 明確な足音や床に映る影といった具体的な手がかりがなくても, 「何となく気配を感じる」ことがある. このような感覚は, 必ずしも正確ではなく, またタスクに集中しているときには全く気付かない場合もあるが, 余裕があるときに自然に気付くことが多い. この「気配」のような不確実な情報の認識は, 目の前のタスクを大きく妨げることなく, 周辺情報を適度に把握できる手段として有用であると考えられる.

気配とは, 明確に見えたり聞こえたりしないものの, 周囲の状況から漠然と感じ取る様子を指す. 気配の主な要因としては, 物や人の影による視覚情報, 足音などの小さな音による聴覚情報, 風や空気の動き, 準静電界 [9] などによる触覚情報が挙げられる. しかし, これらの情報を明確に知覚している場合は, 気配とは表現されない.

メタバース環境では, システムが把握している背後の情報を利用し, ランプの点灯やベルを鳴らすといった通知を行うことが可能である. しかし, このような直接的な合図は気配とは言えない. 人間の脳が処理する情報には無意識に処理されるものも多く含まれ, 日常生活で取捨選択される情報の約 9 割は無意識のうちに処理されていると考えられている [10]. なお, 霊的な感覚としての気配についてはここで

は対象外とする。ここでは、明確な五感の知覚を促すのではなく、無意識に存在を感じ取る仕組みとしての気配を考える。

気配を人工的に再現する試みとして、いくつかの研究が行われている。鈴木らは、ブラウン管テレビを用いて気配を知覚させる研究を実施した [11]。具体的には、ブラウン管テレビが発する準静電界を利用して体毛を刺激し、気配を再現した。また、伊勢は没入型聴覚ディスプレイ「音響樽」を開発し [12]、このシステムでは頭部周囲に 3D 波面を生成することで、実空間と同様に頭部を動かしながら周囲の情報を知覚できる仕組みを提案した。これにより、人間の息遣いや歩行音などを再現することが可能となる。さらに、柄沢らはさりげない触覚提示を目指し、非接触型の触覚提示技術を提案した [13]。具体的には、狭い密室で超低周波をスピーカから発生させることで触覚を生み出す方法を示している。松尾らは PSD 距離センサと密閉型イヤホンで構成されたヘッドバンドを用いて気配の知覚を促す研究を行った [14]。距離センサがある方向からの障害物に反応すると距離を換算し、障害物間の距離が小さくなるにつれて、その方向から雑音の音量を小さくイヤホンから提示する。このシステムにより、全周囲からの環境雑音があたかも近づいてくる障害物によって遮られているような効果を得ることができる。この障害物方向からの雑音を消去するシステムにより、気配の再現を試みた。気配の人工的な再現を試みる研究は他にも、例えば湿気や水蒸気を利用した研究 [15] や、一部の音の強調による研究 [16]、耳に静電気や冷気を提示することで、触覚情報を用いた気配の提示を行う研究 [17] などがあり、バーチャルリアリティ、メタバースへの導入も有効であり可能だろう。しかし、これらは特別な機器や環境が必要であり、HMD のみで家庭で利用できるタイプのシステムには適さない。

当研究室では、特別な機器や環境を必要とせずに、視覚提示機能のみを利用して、気配のような不確実な情報提示手法を新たに提案している [18]。またそのような不確実な情報提示が可能であるかどうか確認している。気配自体が科学的に定義できているわけではないが、当研究ではいわゆる気配そのものではなく、視覚提示のみで体験者が「気配のようだ」と感じる何かを提示できる可能性について確かめることを目的としている。例えば視野外に人が現れた場合に、薄い人型のシルエットを短い時間だけ重畳表示する。体験者の意識下においては見えたとは知覚されないような

薄さ，短さにする必要がある．その上で無意識に何かを感じ取れる必要もある．ところで，薄いシルエットを表示する場合には，背景の色や模様などに大きく影響を受けるだろう．背景に合わせてシルエットの薄さや提示時間を自動的に調節することも考えられるが，背景によっては，意識下においては知覚されずに無意識に何かを感じ取れるような，適切なパラメータが存在しないかも知れない．そこで本研究では，同様に特別な機器や環境を必要とせず標準的な聴覚提示機能のみを利用して，気配の情報提示手法を新たに提案し，有効性を確認する．例えば，背後などの視野外に人が現れた場合に，短い時間だけ音を提示したり提示中の音を変化させたりする．体験者の意識下においては聞こえた，あるいは変化したと知覚されないような小ささ，短さにする必要がある．視覚を対象とした場合と同様に，その上で無意識に何かを感じ取れる必要もある．体験者による評価を行い，この擬似気配提示手法の有効性や，擬似気配を感じられるような音の変化や短さについて検討する．

本論文では，第2章において聴覚，音の仕組みについて説明し，第3章では構築した評価システムを用いて行った参加者による評価の概要と手順，またその結果と考察を述べる．最後に第4章で本論文のむすびと今後の課題について述べる．

第2章 聴覚的な擬似気配の提示手法

本章では、聴覚により気配のような何かを感じられる新たな手法について考える。具体的には、もともとBGMがステレオ（左右2チャンネル）で流れていることを前提として、左右の一方の音の高さ（周波数）を短い時間だけ変更することで、擬似的な気配を実現したい。

2.1 人間の聴覚特性

人体の感覚は、外部や内部からの刺激を受け取り、それを脳に伝えることで成立する。感覚には視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚といった五感だけでなく、体内の状態を監視する内臓感覚や平衡感覚など様々なものが含まれる。これらの感覚を担う感覚器官や神経系は、それぞれ特定の刺激に対して応答するが、すべての刺激に反応するわけではない。この刺激が感覚を生じさせるために越えなければならない最低限の強度を「刺激閾」という[19]。例えば音を例にとると、聴覚は一定の音の強さ以上でなければ音として感知されない。可聴範囲が刺激閾である。刺激閾の役割は、感覚器官が不要な刺激に反応しすぎないようにすることである。私たちの周囲には、常に様々な刺激が存在しているが、刺激閾のおかげで、重要な刺激にのみ集中して反応することができている。刺激閾は感覚の個別性にも寄与している。刺激に反応する閾値が人によって異なるためである。年齢や健康状態、疲労なども刺激閾に影響を与える要因である。年齢を重ねると聴覚や視覚の刺激閾の下限が高くなり、小さな音や弱い光に対する感度が低下することがある。刺激閾の下限付近、例えば聴覚においては、完全に「聞こえる」状態と「聞こえない」状態の間に、曖昧な中間状態が存在しているかもしれない。

脳には聴覚情報により音源の3次元位置を特定する能力がある。人間には耳が2つしかないが、周囲の音声の3次元位置を推定できる。人間は、HMDを含むヘッドホ

ン装着時にも、タイミング、位相、音量、スペクトル変化などのオーディオの手がかりを利用して音声の位置を推定することができる。両方の耳に音が届く時間の差に基づいて、音声の位置を特定することができる。これを両耳間時間差 (ITD) と呼ぶ [20]。また、両方の耳に聞こえる音量レベルの差に基づいて、音声の位置を特定することもできる。これを両耳間レベル差 (ILD) と呼ぶ。人間が利用する位置特定技法は、信号の周波数成分に大きく依存している。特定の周波数 (音源に応じて 500 から 800Hz の任意の周波数) より低い音声は、音量レベルに基づいて区別することは困難であるが、左右の耳の間のタイミング情報 (位相) を混同することなく利用できる。反対に、おおよそ 1500Hz より高い周波数の音声は、半波長が標準的な頭より小さいため、位相情報を利用して音声の位置を特定することができないが、頭影によって生じる音量の差、つまり自分の頭が音源から遠いほうの耳の障害物となっているために生じる音響減衰を利用することで特定できる。

2.2 スピーカの特徴

スピーカとは、電気信号を音に変える装置、すなわち電氣的振動を物理的振動に変える音響装置の一種である [21][22][23]。スピーカの特徴は、主に次のような項目により表される。

1. 出力音圧レベル (dB)

スピーカ正面 1m の距離における 1W の入力に対する音圧レベル (dB) であり、スピーカから出てくる音の大きさを示す目安で、能率や感度を表す。

2. 許容入力 (W)

スピーカが正常に動作する入力電力の最大値であり、電力 = 電圧 × 電流 = 電圧 × 電圧 / インピーダンスである。PC 用であれば 10W から、広い部屋でも 15W 程度で十分だろう。

3. インピーダンス (Ω)

スピーカの抵抗値であり、一般的には、この数値が小さいほうが大きな音が出るが、流れる電流が大きくなるので負担がかかる。例えば 32 Ω を超えるスピーカはインピーダンスが高いといえるだろう。

4. 周波数特性 (Hz)

スピーカにおいては、音圧周波数特性、位相周波数特性、群遅延周波数特性、歪み周波数特性などがある。単に周波数特性という場合は主に音圧周波数特性を指し、再生周波数帯域を示す。例えば下が 40Hz 以下であれば低音がよく出る、上が 13kHz 以上であれば高音まで出る、と考えてもよいだろう。

5. クロスオーバー周波数 (Hz)

ひとつのスピーカユニット (driver) で人間の可聴域 (およそ 20-20,000Hz) 全てを再生することは困難であるため、特定の周波数帯を対象とするユニットを複数組み合わせることで、全体として広い周波数域をカバーすることが多い。各ユニットの音域の境界にあたる周波数を示す。

例えば文献 [24] の安価なイヤホンは、「テクニカルデータ」として、再生できる音の周波数帯域が 20~23,000Hz、出力音圧レベル 102dB/mW、最大入力 40mW、インピーダンス 24 Ω 、などと記されている。しかし、文献 [25]、[26] によると、価格や性能は当時のものであるが、「A スピーカは約 3 万円の製品。40Hz~20kHz となっています。」、「B スピーカ。4 万円台の製品で、25Hz~20kHz となっています。」、「C スピーカ、2 万円弱で 40Hz から 20kHz。」、「D スピーカ、1 万円ちょっとの製品で 50Hz から 20kHz。」、「E スピーカ。80Hz から 12kHz。さすがに安い。5 千円を割っています。」などと記述されている。加えて、「図 4-9 のスピーカを例にとれば、60Hz ぐらいから 14kHz ぐらいまでの間は、デコボコしながらも、まあ 90dB あたりを上下しているのに対して、20Hz と 20kHz のあたりでは、70dB かそれ以下にさがっています。すると、このスピーカには次のようなことがいえます。・音の強弱に関係なく、とにかく「音が聴こえる」という条件であれば、このスピーカの周波数範囲は 20Hz から 20kHz だ、と表現しても、べつに間違いでもインチキでもない。・逆に、音が平均的に出る範囲、という条件をつければ、このスピーカの周波数範囲は、せいぜい 60Hz から 14kHz になる。」、「たとえば同じスピーカでも ± 3 dB という条件をつければ、図 4-10 のように周波数範囲 50Hz から 16kHz、と表現できるわけですし、 ± 10 dB と幅をもたせれば、図 4-11 のように 25Hz から 18kHz、と書くことができるわけです。 ± 10 dB のような大きな幅をもたせれば、カタログ

の表現などには非常に有利になるわけですが、実際に耳に平均的に聴こえる範囲というなら、やはり $\pm 3\text{dB}$ からせいぜい $\pm 6\text{dB}$ どまりの幅です。」とある。大きな音であれば再生周波数帯域は広いが、小さな音では狭いともいえるだろう。

2.3 提案手法

刺激閾の下限付近の、聞こえると聞こえないの中間状態では、明確に音が聞こえたと認識されるわけではないものの、何か微妙な変化や刺激があったような気配のようななにかが感じ取れるかもしれない。この境界に注目することで、あたかも何かが近づいて、あるいは存在しているかのような擬似的な気配を実現できるのではないかと考えた。しかし、大きな音を提示してしまえば、明確に認識されてしまう。極めて小さな音では、スピーカから発声されないかもしれない。そこで、聞こえると聞こえないの中間ではなく、「変化したと気づく」と「変化していないと感じる」の中間状態で、明確に音が「変化した」と認識されずに、気配のようななにかを感じさせられるのではないかと考えた。まず、BGMがステレオ(左右2チャンネル)で流れていることを前提に、次の3つの手法を検討する。一方の音を、わずかな時間の間だけ

1. 音量をわずかに増加、または減少させる。
2. 周波数をわずかに上昇、または下降させる。
3. 発声時刻をわずかに遅らせる。

いずれも、左右のうち変化した側に気配を感じることを期待する。それぞれを、少人数に対して様々な変化量、様々な提示時間において予備的に評価した。手法1では、音量を増減したときに「明確に違いが分かる」という意見と「違いが分からない」という意見の2つに明確に分かれた。人は音量差を手がかりに音源の方向を判断するため、一方の音の音量を増減すると、変化した側に限らず、音が大きい側に音源があると感じた。また、音量の変化により音質が変わるように感じた。音量が大きくなときに歪みが発生し、音が「荒く」聞こえたと考えられる。手法2では、周波数を昇降したときに「明確に違いが分かる」という意見、「違いが分からない」と

いう意見，に加えて「よく分からない」という意見もあった．また，左右での周波数差により音源の方向について特段の知覚はなかった．手法3では，手法3では手法1と同様に，発声時刻をわずかに遅らせたときに「明確に違いが分かる」という意見と「違いが分からない」という意見の2つに明確に分かれた．また，遅れた側とは反対側から音が聞こえるように感じるがあった．音が片方の耳に遅れて到達すると，脳はその時間差を手がかりに音源の方向を判断するためだと考えられる．定位が不自然になる状態を「不快」と感じることもあり，聴覚疲労を引き起こしたようであった．これらの結果により，手法1は「中間状態」があまり期待できなさそうである．手法3は不快感による疲労が心配である．手法2は右(後方)と左(後方)の気配を区別することは難しそうであるが，違うのか違わないのかよく分からない，という意見が最も疑似的な気配の実現に近そうである．このような聴覚の特性，スピーカの特性，および予備評価の結果を踏まえたうえで，聴覚を通して疑似的な気配を知覚させたい．ステレオ2チャンネルの音楽をもとに，周波数の変化量とその提示時間を適切に調節して一方のチャンネル(右か左)のみ部分的に加工した音楽を提示することで，聴覚を通した擬似気配の提示を試みる．

第3章 評価実験

本章では、提案手法による擬似気配提示システムの概要、および評価について説明する。体験評価では、ステレオ2チャンネルで提示されているBGMに対する周波数の変化量とその提示時間の適切な調節の、擬似気配の知覚に対する有効を検証する。

3.1 評価システム

体験評価においてはHMD, Meta Quest 3を利用した。提示情報は聴覚情報だけであるが、評価時にスピーカを使用すると、外部の音が影響しやすく、結果に悪影響を与える可能性がある。ヘッドホンを使用すれば、完全な遮音でなくても一定の外部ノイズの軽減が期待できるだろう。また、体験参加者が過度に音の変化に集中してしまうことは避けた。そこで、注意を分散させる目的でサブタスクを導入する。サブタスクに聴覚情報を利用しては、やはり変化に集中してしまったり、あるいは逆に鈍感になってしまう恐れもある。そこで、比較的实现の容易な視覚情報による刺激を提示する。すなわち体験評価時に参加者は目を開けているわけであるが、やはり外部の、例えば窓外の風景はもちろん、室内の調度類の影響も避けた。そこで、図3.1のように視覚的に外界と遮蔽が容易なHMDとその付属のスピーカ(ヘッドホン)を利用する。評価システムはUnityにより構築した。HMDを通して視聴する空間は、図3.2のように、前方にサブタスクのための机を置き、聴覚情報提示のための仮想の音源を正面から右、および左90度の位置に設置した。HMDに投影する風景は図3.3のように、ビデオシースルー機能によりシンプルな壁などに限定した実際の体験環境を背景に、サブタスクのための机などをCGで描画した。HMDの視野角が100度程度であり、窓などは映らないような位置で体験してもらうことを想定した。また、BGMにはフリーBGM素材のmorningを使用した[27]。作者の



図 3.1: 体験の様子

コメントには「ポップ/カントリー. 休日の朝, 列車に揺られているイメージ. 明るい感じ.」とある. スペクトル解析の結果を図 3.4 に示す. グラフ全体が滑らかに減衰しており, 楽曲全体のバランスは良好で, 特定の帯域に過度な偏りがない. また, 音楽のどの時刻においても, 音の高さの変化による聞こえ方の差異はほとんどなさそうである.

3.2 評価手順

ステレオ 2 チャンネルの BGM に対して, 音の高さ (周波数) を一方のチャンネル (右か左) のみ部分的に加工した音楽を提示することで, 聴覚を通した擬似気配の提示を試みた. 変化させる周波数の差やその変化している時間を変更することで, 様々なパターンに対して体験者に評価してもらった. 評価に先立ち, 参加者にデモンストレーションを行った. 変化させる周波数の差 δ は +0.5 から +4.0 Hz まで 0.5 間隔で 8 通りの値とし, 変化している時間 t は 1 から 5 秒までの 1 秒間隔で 5 通りの値とし, 合計 40 パターンを用意した. 大学生 (大学院生を含む) の参加者 10 人に 40 パターン全てを 1 回ずつ, ランダムな順に割り当てた. 全試行数は 400 回だった. 周波数を変化させるタイミングは試行開始後 3 秒から 8 秒の間でランダムに設定して, 変化のタイミングが予測できないようにした. なお 1 試行が 20 秒で終了するように変化

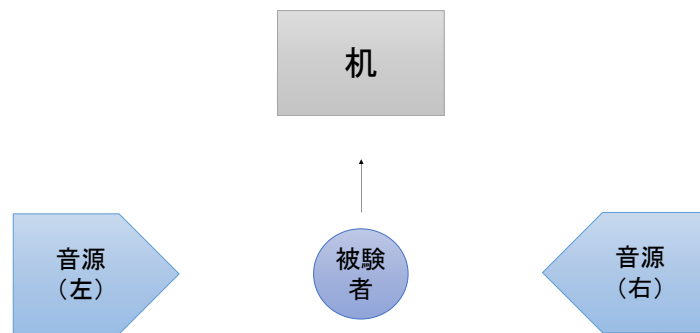


図 3.2: 仮想空間内の配置



図 3.3: 仮想空間内の様子

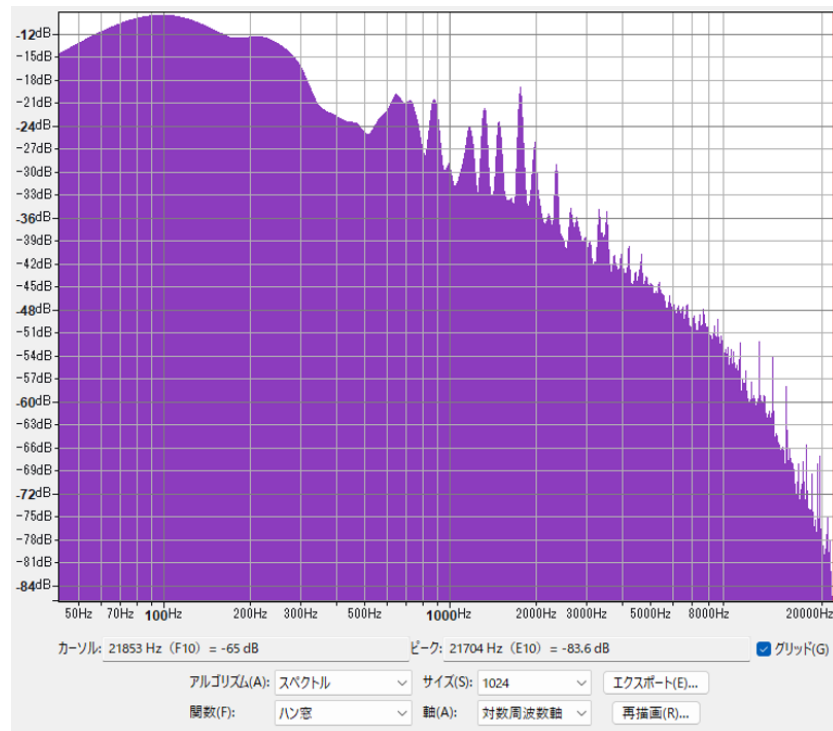


図 3.4: スペクトル解析の結果

開始時刻に応じて、(変化している時間が長い場合は変化タイミングがあまり遅くならないように) 設定した。周波数を変化させる方向 (チャンネル) も左右ランダムであった。なお、評価時には参加者の周囲に人は一切おらず、実際の気配が影響することはなかった。参加者には、意識の上で音の変化に注目してしまうことのないように、ボールの入ったカップを見続ける、注視していないと見失う程度の難易度の「スリーシェルゲーム」をしてもらった。各試行中、体験者に気配 (のようなもの) を感じたら、その時点でボタンを押してもらった。各試行後、体験者に音の変化に気づいたか否か、気づかなかった場合は気配 (のようなもの) を感じたかどうか報告してもらった。なお予備調査において、方向について特段の知覚はなかったが、参考としてその方向 (左右どちらか) についても報告してもらった。

3.3 結果と考察

結果を整理するために、各パターンについて、以下の回数を数える。これらは互いに排反である。気配提示を主目的とし、その方向は重視しておらず、また予備調

査からも周波数が変化した側としなかった側のいずれに気配を感じるのか、そもそも不明であったため左右の方向についての報告は考慮しなかった。憶測による回答を防ぐため、気配を感じたとボタンを押した時刻の正誤を考慮した。なお、サブタスクであるスリーシェルゲームの正答率は93.5%であった。体験者はサブタスクに集中していたと考えられる。

- A : 音の変化自体に気づいた (audible)
- N : 気配は感じられなかった (音の変化にも気づかなかった) (not felt)
- P : 気配を感じる時刻が正しかった (音の変化には気づかず、気配を感じた) (presence)
- F : 気配を感じる時刻が間違っていた (音の変化には気づかず、気配を感じたと報告したが、時刻が違った) (false)

擬似気配を感じてもらうためには、まず音の変化に気づいてしまってはならない。その上で、感じた気配のタイミングが正しいことを期待したい。そこで A と P に注目する。一方で気配は常に感じられるとは限らず、また常に正しいとは限らないので、ここでは N と F の数値は考慮しない。なお、参加者には気配を感じている間中、ボタンを押し続けてもらったが、特にボタンを押した最初の時刻のみに注目した。すなわち、 P は周波数が変化している時間の開始時刻以後、かつ少し遅れて気配を感じることも考慮して終了時刻の3秒後までにボタンを押したことを意味している。ボタンを離した時刻については考慮しなかった。まず、 δ と t の組み合わせごとの結果を表3.1に示す。なお、スリーシェルゲームで誤答だった場合も除外していない。特に P と A を図3.5、図3.6に示す。また A はできるだけ避けたい対象であり、 P はできるだけ期待したい対象である。そこで、 δ と t の組み合わせに対する擬似気配提示の有効度合いとして P と A の差を図3.7に示す。この P ができるだけ大きく、かつ A ができるだけ小さい、言い換えれば P から A を差し引いた値が十分に大きければ、その組み合わせは擬似気配を感じさせるのに有効であり、そのような組み合わせが見つかれば本手法が有効であると考えられる。まず、 P と A それぞれの回数に注目する。図3.5より一部のパターン ($(\delta, t) = (+2.5, 3) \sim (+1.0, 4)$) において P の値

表 3.1: 各周波数差 δ , 変化時間 t に対する A, N, P, F の表 ($A/N/P/F$)

$\delta \backslash t[s]$	1	2	3	4	5
+ 0.5	0/10/ 0/ 0	1/ 8/ 0/ 1	1/ 9/ 0/ 0	1/ 9/ 0/ 0	0/ 8/ 1/ 1
+ 1.0	1/ 9/ 0/ 0	0/ 9/ 1/ 0	2/ 6/ 0/ 2	6/ 1/ 2/ 1	4/ 5/ 1/ 0
+ 1.5	0/ 8/ 1/ 1	0/ 9/ 0/ 1	1/ 7/ 1/ 1	1/ 6/ 1/ 2	3/ 6/ 1/ 0
+ 2.0	0/ 9/ 1/ 0	1/ 7/ 1/ 1	1/ 5/ 4/ 0	1/ 8/ 0/ 1	2/ 7/ 1/ 0
+ 2.5	1/ 9/ 0/ 0	8/ 1/ 1/ 0	3/ 7/ 0/ 0	3/ 4/ 1/ 2	4/ 4/ 2/ 0
+ 3.0	4/ 5/ 1/ 0	5/ 3/ 1/ 1	10/ 0/ 0/ 0	3/ 6/ 1/ 0	10/ 0/ 0/ 0
+ 3.5	4/ 3/ 1/ 2	10/ 0/ 0/ 0	7/ 2/ 0/ 1	0/10/ 0/ 0	3/ 4/ 2/ 1
+ 4.0	9/ 1/ 0/ 0	8/ 1/ 0/ 1	10/ 0/ 0/ 0	1/ 8/ 0/ 1	7/ 0/ 0/ 3

が高くなっている．また図 3.6 より A はいずれの変化時間においても，周波数差が大きくなるにつれ増加傾向にあることが分かる ($t=4$ において全般に少ないのは，意味のある結果ではなく，誤差によるものと考えている)．次に P と A の差に着目する．図 3.7 より，一部のパターン，特に $(\delta, t) = (+2.0, 3)$ で P が A を上回っている．一方で P の値が高かった $(+1.0, 4)$ では A の値がさらに高く，下回ってしまっている (前述の通り誤差の影響による可能性がある)．全体に， $(\delta, t) = (+2.0, 1) \sim (+0.5, 5)$ を中心に帯状にやや上回る可能性が読み取れる．評価で試みた範囲において，十分に周波数差が大きい場合は変化時間に関わらず意識下において知覚されやすいのだろう．比較的，周波数差が大きい場合には変化時間を短くすることで提示前後による瞬間的な変化と捉えられ，反射的な知覚を促されたのだろう．周波数差が特に小さい場合，短い変化時間では意識下で知覚されにくい，変化時間を少しだけ長くすることで無意識下での知覚を促されたのだろう．今回の評価では，明らかな有効性を示すことはできなかったが，周波数差と変化時間 (δ, t) が $(+2.0, 3)$ を含む $(+2.0, 1)$ $(+0.5, 5)$ を中心とする帯状のあたりにおいて，音の周波数を変化させることが擬似的な気配の提示に有効であることが期待できる．

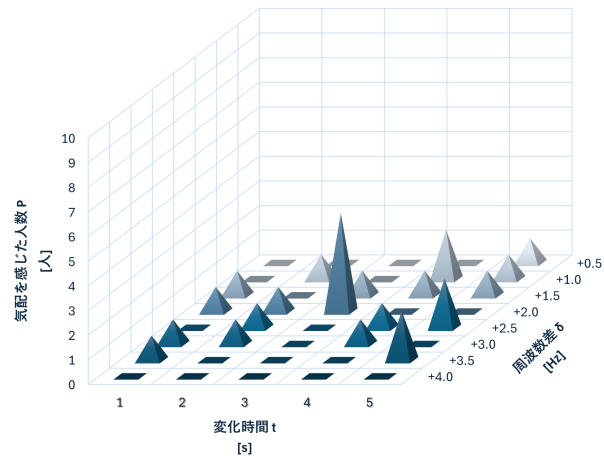


図 3.5: P: presence のグラフ

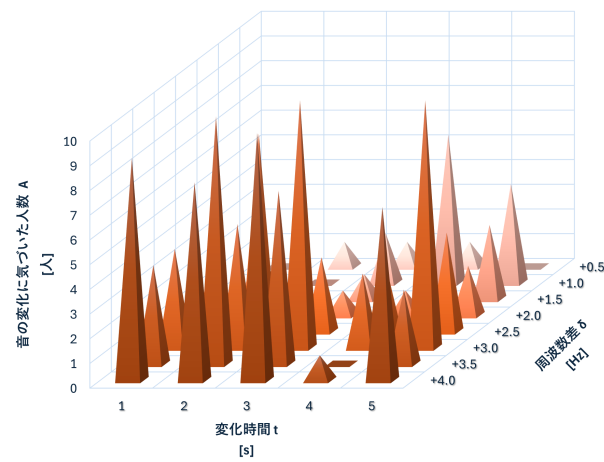


図 3.6: A: audible のグラフ

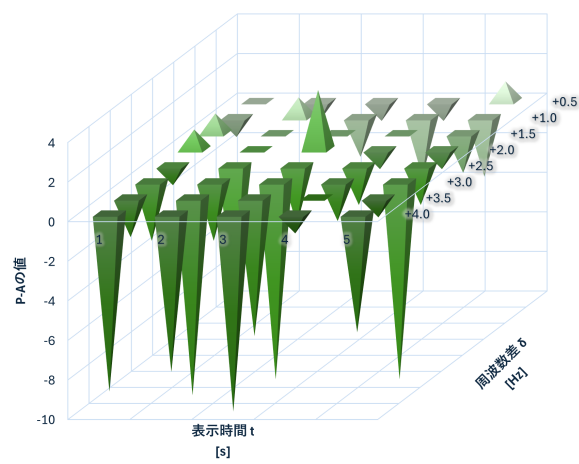


図 3.7: P と A の差 ($P-A$) のグラフ

第4章 むすび

本研究では、ヘッドホン以外の特別な機器や環境を必要とせず、標準的な聴覚提示機能のヘッドホンのみを利用した擬似的な気配の提示手法を提案した。具体的には、ステレオ2チャンネルのBGMに対して、音の高さ(周波数)を一方のチャンネル(右か左)のみ部分的に加工した音楽を提示することで、聴覚を通した擬似気配の提示を試みた。変化させる周波数の差や変化している時間を変更することで、様々なパターンに対して評価した。HMDの内蔵スピーカを通して参加者に体験してもらったところ、周波数差と変化時間の軸におけるある直線を中心とする帯状のあたりにおいて、特にある特定の周波数差と変化時間において、本手法の情報提示の可能性が示唆された。一方で、ある特定の变化時間において、周波数差の大きさに関わらず変化に気づくことが多く、一部の結果に誤差の可能性も疑われた。今後は、この条件について再調査を行い、結果の信頼性を確認する必要がある。さらに、周波数差が十分に大きい場合、変化時間に関係なく知覚されるため、不要な条件を除外する。そして、周波数差が比較的小さい範囲について、細かい間隔で評価し、また同様に変化時間の調査間隔も細かく設定することで、パターン間の関係性や連続性を確認し、気配提示に最適な条件を見出したい。関連する研究である視覚を通した気配提示は、ユーザーの視力やHMD画面の明るさ、コントラストの影響を受けるため、状況によっては適切な効果を得られない可能性がある。一方、聴覚を通した気配提示も、ユーザーの聴力や周囲の環境音の影響を受け、気配提示に必要な成分を含む音が他の音に埋もれたり、適切に知覚されなかったりするかもしれない。それぞれの弱点を補うために、視覚を通した気配提示と、本研究で提案する聴覚を通した気配提示を併用した場合の効果についても検証したい。具体的には、視覚と聴覚の情報がどのように相互補完的に作用するのか調査し、単独の提示方法と比較した際の認識率やユーザーの負担、VR酔いの影響などを評価したい。また、視覚と

聴覚のどちらを優先的に用いるべきか，あるいは状況に応じた最適な提示方法の組み合わせが存在するのか検討し，より実用的で直感的な気配提示手法を確立したい．さらに，予備実験において除外した「音量をわずかに増加，または減少させる場合」や「発声時刻をわずかに遅らせる場合」についても検討を行い，より効果的な擬似気配の提示を実現したい．

謝辞

本研究を進めるにあたって，日頃から多大なご尽力をいただき，ご指導を受け賜りました名古屋工業大学，舟橋健司 准教授，伊藤宏隆 助教に心から感謝致します．最後に，本研究に多大なご協力をいただきました舟橋研究室諸氏並びに被験者の皆様に深く感謝致します．

参考文献

- [1] Universal Studios, NEWS RELEASE,
<https://www.usj.co.jp/company/news/2024/0513/index.html> (2025.1.24 閲覧)
- [2] 清水一秀, “脳神経外科における 3D ヘッドマウントディスプレイ (3D-HMD) を用いた経鼻内視鏡手術”, JSCAS, 19(4), 316-327 (2017)
- [3] 小林 正佳, 畑崎 聖二, “内視鏡下頭蓋底手術へのヘッドマウントディスプレイの応用”, 耳鼻咽喉科展望, 59(6), 324-328 (2016)
- [4] SONY, PlayStation VR, <https://www.playstation.com/ja-jp/ps-vr/>
- [5] 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター, 科学技術未来戦略ワークショップ報告書, “社会課題解決に向けたメタバース”, <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2023-WR-01.html> (2025.1.24 閲覧)
- [6] KDDI 株式会社, © 渋谷 5G エンターテイメントプロジェクト, <https://vcity.au5g.jp/shibuya>
- [7] 総務省, 令和 5 年版情報通信白書, “ICT サービス及びコンテンツ・アプリケーションサービス市場の動向”, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r05/html/nd247520.html> (2025.1.14 閲覧)
- [8] 黒川茂莉 (編集チームリーダー), “接近するバーチャルとリアル-メタバース・デジタルツインの現在と未来-(小特集)”, 電子情報通信学会誌, 106(8), 697-753 (2023)
- [9] 滝口清昭, 遠山茂樹, “犬は主人を電界で見分ける?-歩行による人体の電界発生とその伝搬-”, 国際生命情報科学会誌, 21(2), 428-441 (2003)

- [10] ジェラルド・ザルトマン著, 藤川佳則・阿久津聡訳, “心脳マーケティング”, ダイヤモンド社 (2005)
- [11] K. Suzuki, K. Abe, H. Sato, “Proposal of perception method of existence of objects in 3d space using quasi-electrostatic field”, In Proceedings of International Conference on Human-Computer Interaction (2020)
- [12] 伊勢史郎, “聴覚的リアリティを実現する音のデザイン—ヒトとモノの動きがもたらすリアリティの本質—”, 日本音響学会誌, 74(11), 598-602 (2018)
- [13] M. Karasawa, H. Kajimoto, “Presentation of a feeling of presence using an electrostatic field”, In Proceedings of CHI 2021 Extended Abstracts (2021)
- [14] 松尾佳菜子, 岡野裕, 橋本悠希, 梶本裕之, “音響的影の提示による気配感覚の増強”, 日本バーチャルリアリティ学会第12回大会論文集(2007年9月福岡) (2007)
- [15] K. Hokoyama, Y. Kuroda, K. Kiyokawa, H. Takemura, “Mugginess sensation: Exploring its principle and prototype design”, In Proceedings of IEEE World haptics, 563-568 (2017)
- [16] S. Zhao, A. Ishii, Y. Kuniyasu, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, H. Kajimoto, “Augmentation of acoustic shadow for presenting a sense of existence”, In Proceedings of International Workshop on Modern Science and Technology, 563-568 (2012)
- [17] 鈴永紗也, 川崎祐太, 西村賢人, 岸楓馬, 北川玲音, 桑山佳汰, 角谷星哉, “メリーさんの電話”, 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2B-09 (2019)
- [18] K. Funahashi, Y. Matsunoo, “A visual approach to pseudo unseen presence in the metaverse using HMD”, In Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Telexistence (2023)
- [19] 岡本康秀, 神崎晶, 井上泰宏, 齊藤秀行, 貫野彩子, 久保田江里, 中市健志, 森本隆司, 原田耕太, 小川 郁, “周波数選択性測定の臨床応用”, Audiology Japan 55, 642~649 (2012)

- [20] MetaHorizon, “ 没入感のあるエクスペリエンスにするためのサウンド設計 ”, https://developers.meta.com/horizon/design/audio-intro-sounddesign?locale=ja_JP (2025.1.31 閲覧)
- [21] 佐伯多門, “ スピーカー&エンクロージャー大全：スピーカーシステムの基本と音響技術がわかる ”, 誠文堂新光社 (2018)
- [22] 大賀寿郎, “ オーディオトランスデューサ工学：マイクロホン, スピーカ, イヤホンの基本と現代技術 ”, コロナ社 (2013)
- [23] 田中茂良, “ マイクロホン・スピーカ談義 ”, 兼六館出版 (1998)
- [24] audio-technica, ATH-CK350X, <https://www.audio-technica.co.jp/product/ATH-CK350X>(2025.1.31 閲覧)
- [25] 瀬川冬樹, “ オーディオ ABC 上巻・下巻 (FM 選書) ”, 共同通信社 (1977)
- [26] K. Miyazaki, “ audio sharing ”, <http://www.audiosharing.com/> (文献 25 が公開されている, オーディオ ABC 第 4 章 2. スピーカの音域, http://www.audiosharing.com/people/segawa/audio_abc/abc_13_1.htm) (2025.1.31 閲覧)
- [27] しゃろう, “ Morning ”, <https://dova-s.jp/bgm/play2452.html> (2014)