



Phantom Walls : 聴覚刺激を用いた感覚代替による空間知覚とナビゲーション手法の提案

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

池田匠¹⁾, 脇坂崇平¹⁾, 南澤孝太¹⁾

Takumi IKEDA, Sohei WAKISAKA, and Kouta MINAMIZAWA

1) 慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科 (〒 223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1, takumi.i@kmd.keio.ac.jp, wakisaka@kmd.keio.ac.jp, kouta@kmd.keio.ac.jp)

概要: 滑らかな空間知覚を確立するための新しい手法である Phantom Walls を提案する。バーチャル空間内にスピーカーが配置されており、体験者の位置や向きに応じて動的に、スピーカーの配置・音量・音の高低を調整することにより、目に見えない”phantom”な壁を聴覚により表現している。体験者は聴覚の世界を聴くことにより目に見えない”phantom”な壁を知覚し、避けて歩き回ることができる。

キーワード: 空間知覚, 感覚代替, ナビゲーション

1. はじめに

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 [1] 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 [2, 3] 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。我々は本研究において、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 (図 1)、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・音の高低に関する 3 つの基本法則を構成した。

本発表では、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予備的検証を行う。

2. デザインと実装

聴覚の世界を構成しているバーチャル空間内に配置されたスピーカーは、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

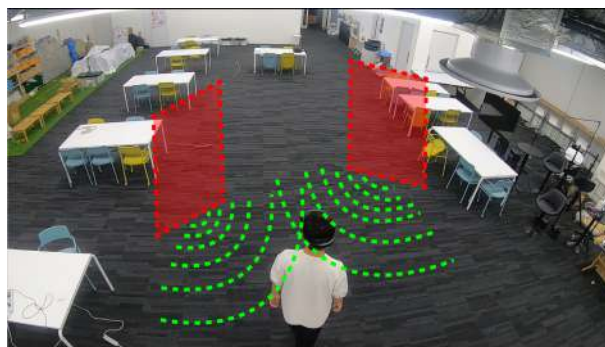


図 1: 目に見えない壁から圧力のような感覚を受けるイメージ図

量やピッチ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している。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、ピッチに関する法則の 3 つの法則により聴覚の世界は創られている。これらの法則を適用することにより、体験者は歩きながら頭を回転させることで音場を聴き、周囲の空間を知覚することができる聴覚の世界を創ることができる。

2.1 スピーカーの位置配置に関する法則 (位置法則)

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 つのスピーカーが配置されている。1 つのスピーカーを用いて壁を表現したいため、疑似的に面状の音源に感じさせる必要がある。そこで、スピーカーは常に壁の表面上で体験者に最も近い位置に移動させた。この法則により、体験者がまっすぐ歩いているときに、常に自分の右側から同じように音が聴こえていた場合は右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 2 に示す。

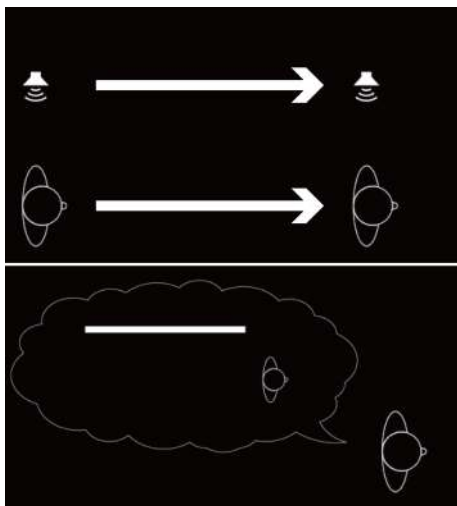


図 2: 位置法則のイメージ図

2.2 音量に関する法則 (音量法則)

目に見えない phantom wall と体験者との距離が近くなるほど音の大きさは大きくなる。体験者は、障害物との距離が近くなると、音の大きさが大きく聞こえ、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に示す。距離と音の大きさの関係は、ナビゲーションの体験のために図5に示す関係に調整されている。

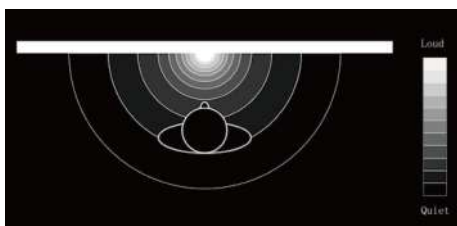


図 3: 音量法則のイメージ図

2.3 ピッチに関する法則 (ピッチ法則)

体験者に対する壁の角度によって音のピッチが変化する。体験者の頭の向きが壁に対して垂直である場合、音のピッチは最も低くなり、体験者の頭の向きが壁に対して平行である場合、音のピッチは最も高くなる。音のピッチは角度によって線形に変化している。音は純音ではなく、複合音を使用している。理由は、純音を使用すると、ピッチ変化が音の大きさの主観的評価に与える影響が大きくなってしまうと考えたからである。ピッチ法則のビジュアルイメージを図4に示す。

3. 実験

3.1 実験目的

Phantom Walls は 2 章で記述した聴覚の世界を創るための 3 つの法則によって目に見えていない壁を感じることができる。聴覚により提示された壁とぶつからないための距離、壁の角度という情報を知覚することが可能であるかの検証、複数の壁が配置された聴覚の世界を聴くことにより

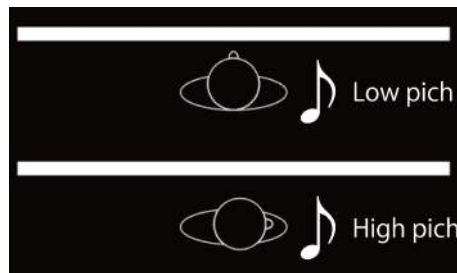


図 4: ピッチ法則のイメージ図

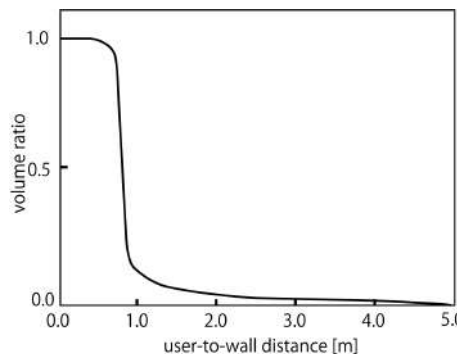


図 5: 体験者と壁との距離と音量の関係

壁を避けて歩くことが可能であるかの検証を目的として実験を行った。

3.2 実験条件

バーチャル空間に配置したスピーカーの音量は図5に示したパラメーターで実験を行った。音のピッチが一番早い時が一番遅いときの 1.5 倍とした。

3.3 実験手続き

実験には 3 人の被験者が参加した。参加者は HMD (Meta Quest Pro) を装着し、左手用のリモコンを把持した。実験は、チュートリアルと 4 つの実験項目から成る。

3.3.1 チュートリアル

参加者は聴覚で表現された世界に慣れるために、図6に示す壁の配置された空間を視覚がある状態で 1 分間、視覚がない状態で 1 分間、上記を 2 セット計 4 分間練習を行った。

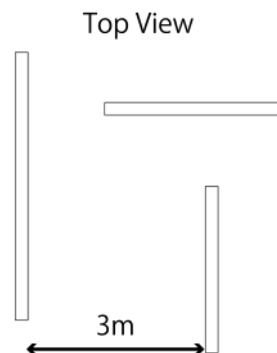


図 6: 聴覚の世界に慣れるための壁が配置された空間を上から見た図

3.3.2 実験 1：壁にぶつからないための距離の知覚実験

参加者は自身の正面で距離 2m、3m、5m の場所に壁が置かれた状態でまっすぐ壁に歩いて近づき、壁からの距離が 0.66m の地点で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。

3.3.3 実験 2：参加者に対する壁の角度の知覚実験

参加者は自身の正面に角度 0° 、 45° 、 90° 、 135° の壁が置かれた状態でその場で首を回転させ、壁の角度を口頭で実験者に伝え、実験者はその回答を PC に記録した。4 つの条件を各 3 回ランダムな順番で行った。各試行では制限時間を 10 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。

3.3.4 実験 3：ナビゲーション実験

参加者は複数の壁が配置された空間を 1 分間自由に歩き回った。参加者が歩いた軌跡を記録した。

3.4 実験結果

実験参加者をそれぞれ参加者 1、参加者 2、参加者 3 とする。実験 1 の結果をゆっくり歩いた時の 0.66m との誤差の平均、早歩きした時の 0.66m との誤差の平均として以下の表 1 に示す。

表 1: 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

実験 2 の結果は、 0° 、 90° と 45° 、 135° で正答率に大きく違いが生じた。結果を全体の正答率、 0° 、 90° の正答率、 45° 、 135° の正答率として以下の表 2 に示す。

表 2: 参加者に対する壁の角度の知覚実験の正答率

参加者 No.	正答率 [%]	正答率 (0° , 90°) [%]	正答率 (45° , 135°) [%]
1	83.3	83.3	83.3
2	67.7	33.3	100
3	67.7	50	83.3

実験 3 の結果を 3 人の参加者の歩いた軌跡として以下の図 7 に示す。

4. 考察

4.1 実験 1：壁にぶつからないための距離の知覚実験

結果から、参加者 1、参加者 2 については壁から 0.66m の地点を大きくとも $\pm 0.25m$ の範囲で知覚できていたことが分かる。この結果は、図 5 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いえる。参加者 1 および参加者 2 は「音量の変化で

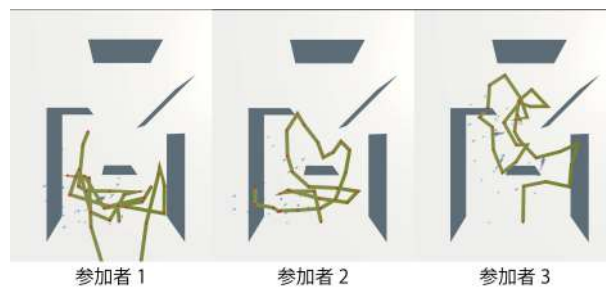


図 7: 複数の壁を避けながら 1 分間歩き回った軌跡

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。このことから、本研究の目指している圧力のようなものを目に見えない壁から感じることができると壁にぶつからないための距離知覚の精度が向上するのではないかと考察する。

参加者 3 は終始確信度は高かったものの、精度が他の参加者よりも低かった。その理由は「音圧の変化を直観的に感じる」という知覚が立ち上がっていなかったからである可能性がある。この知覚を立ち上げるためにチュートリアルは自由に歩くのではなく、「壁に垂直に近づいていく」等の決められた課題を与えることも検討したい。本実験の精度と「音圧の変化を直観的に感じる」という感覚の関係性に関してはサンプル数を増やして実験を行い、相関関係があるのか今後検証していく。ゆっくり歩いた場合と早歩きをした場合で、早歩きをした時の方が大きく差が出ると考えていたが、その傾向がみられたのは参加者 3 のみであった。

4.2 実験 2：参加者に対する壁の角度の知覚実験

結果は、全参加者とも 67.7% を超えていた。 0° 、 90° の正答率と 45° 、 135° の正答率では全参加者が 45° 、 135° の正答率の方が 0° 、 90° の正答率と同じか上回っているという結果となった。この結果は、 45° 、 135° の壁はスピーカーは壁の表面上で体験者に最も近い位置に移動するという法則によって参加者の聴こえる音は左右の耳で聴こえる大きさが異なるため、常に左右の耳で同じ大きさに聴こえる 0° 、 90° の壁よりも判別がしやすかったのではないかと考察する。参加者 2 の 0° 、 90° の誤回答はすべて 0° と 90° を逆に答えていたため、勘違いで誤回答をした可能性もある。

4.3 実験 3：ナビゲーション実験

全参加者を通じて壁にぶつかったり貫通したりすることは参加者 3 の 1 回のみであり、Phantom Walls により壁にぶつかることなく歩くことが可能であると示された。全参加者から「壁が複数あるため実験 1、実験 2 と比べて難しかった」というコメントを得た。そのうち、参加者 1、参加者 2 は「複数の壁の音が同時に聴こえているため壁の配置を頭でイメージすることはできないが、音圧を体で感じたら別の方向に進むという方法でぶつからないように意識していた」とコメントしていた。このことから、聴覚で得た情報を頭の中で処理しているのではなく、Phantom Walls を用いることにより聴覚の世界での壁の知覚が立ち上がっていると考えられる。

参加者 1 から「音量の情報の方がピッチの情報よりかなり使用する比重が大きかった」というコメントを得た。また、参加者 2 から「まっすぐ歩いていき、音圧を体で感じたら次に進む方向を確認するためにピッチの情報を使っていた」というコメントを得た。ただぶつからずに歩くだけでなく、周囲の空間を知覚したうえで歩くためにはピッチの情報も活用することが必要だと考える。ピッチの情報を活用できるようになるためのタスクについて今後検討していく。

全参加者とも同じ場所をうろろ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る。壁にぶつからないように何かを見つけるタスクや壁にぶつからないように特定の方向に一定の距離進むまでにかかる時間を競うなど、探索における利益が大きくなるタスクを与えることにより、この行動は防げると考えられるため、次回以降の実験ではナビゲーションタスクを変更する。

5. アプリケーションと今後の展望

バーチャル空間内では、聴覚の世界を聴くことで静止している障害物だけでなく、動いている障害物も避けることができる(図 8)。実空間の障害物を知覚して歩く場合、現在は図 9 に示すように実空間の障害物に対応させて目に見えない壁およびそれを知覚するための音場を創るためにスピーカーをバーチャル空間内に配置することで、実空間の障害物を避けて歩いているため、実空間の障害物に合わせたリアルタイムでの音場の生成は実現できていないが、Phantom Walls と SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) というリアルタイムのマッピング技術と組み合わせることで、屋内外の様々な環境でこのシステムはリアルタイムに機能することが可能である(図 10)。

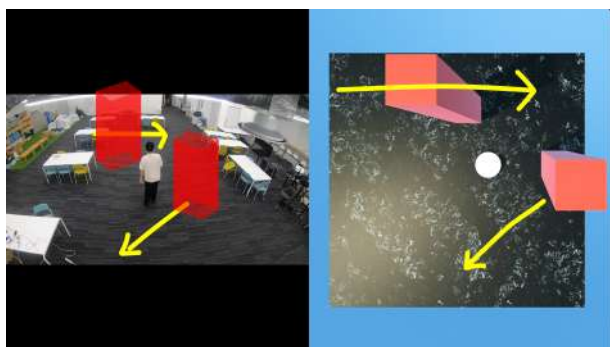


図 8: バーチャル空間内にて体験者が動いている障害物を避けて歩く

6. おわりに

本研究では、視覚を用いない空間知覚とナビゲーションを実現する Phantom Walls という手法を提案し、壁との距離の知覚実験、壁との角度の知覚実験、複数の壁を避けながら歩き回る実験について報告した。Phantom Walls を使っ



図 9: 実空間の壁に対応させた Phantom Walls



図 10: 実空間の障害物を避けて歩くイメージ図

て空間的な音から目に見えない壁の圧力を感じさせることができることが示された。また、複数の壁を避けながら歩き回ることが示された。

今後はより解像度の高い空間知覚を実現するため、スピーカーのパラメーターの再検討やピッチの変化の活用を促すタスク、聴覚を使った知覚をより確実に立ち上げるためのチュートリアルについて検討していく。

謝辞

本研究は JST ムーンショット型研究開発 Cybernetic being プロジェクト (JPMJMS2013) の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Andrew J. Kolarik and Silvia Cirstea and 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.
- [2] Chebat, Daniel-Robert AND Maidenbaum, Shachar AND Amedi, Amir : Navigation Using Sensory Substitution in Real and Virtual Mazes, *PLOS ONE*, Vol. 10, pp. 1–18, 2015.
- [3] Neugebauer, Alexander AND Rifai, Katharina AND Getzlaff, Mathias AND Wahl, Siegfried : Navigation aid for blind persons by visual-to-auditory sensory substitution: A pilot study, *PLOS ONE*, Vol. 15, pp. 1–18, 2020.