



# 遮音・反響音が多層空間における 奥行き知覚に与える効果の考察

田中章範<sup>1)</sup>, 池田聖<sup>2)</sup>, 柴田史久<sup>1)</sup>, 木村朝子<sup>1)</sup>

1) 立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1)

2) 立命館大学 情報理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1)

**概要:** 奥行き方向に複数の遮蔽物が存在するような空間 (以下, 多層空間) では, 複合現実により遮蔽物の奥に存在する仮想物体を提示すると, 視差だけでは奥行き把握が難しい. 一方, 仮想物体の視覚情報に三次元音響を利用した聴覚情報を併用することで, 空間定位精度が向上することが知られている. そこで本研究ではこれに, 遮蔽物による遮音や反響音等の音質の劣化を加えることで, 仮想物体の奥行き把握精度を改善できるかことを実験により確認した. 規模の異なる二つの環境で, 劣化のない音と実際の多層空間で録音した音を比較し, 後者の奥行き把握精度が高いことを確認した.

**キーワード:** 多層空間, 複合現実, 三次元音響, 空間定位

## 1. はじめに

Head-Mounted Display (HMD) を用いた拡張現実感 (Augmented Reality; AR) や, 複合現実感 (Mixed Reality; MR) では, 現実世界に立体視可能な仮想物体を重畳描画することができる. これらを利用することで探索支援を含む, 様々な作業支援をハンズフリーで行うことができる.

探索支援とは探索物を見つけやすくする技術であり, AR/MR 技術を用いた研究では, 探索物のある位置に目印となる仮想物体を配置し探索物を見つけやすくするもの [1] や, 矢印の CG モデルで探索物の方向を示す手法 [2] やがある. また, 左右のスピーカの音量変化で音像定位させる三次元音響による聴覚情報を用いた支援 [3] などもある.

これらの探索支援の課題について図書館やロッカールームといった奥行き方向に複数の遮蔽物が存在するような多層空間においては図 1 のような位置関係で仮想物体を配置した場合, 奥行き把握が難しいという問題がある. 仮想物体の見え方は図 2 のように, 視差による影響でどの層にあるかの判断が難しい.

奥行きを把握する方法としては俯瞰図を出す方法や距離の数値を出す方法などが考えられる. しかし, これらは視界内の情報が多くなり, 現実世界の情報を認識しづらくなる. 音による奥行き手掛かりの提示では, そのような問題は生じない. 従来の 3 次元音響では, 音源からの距離によって音量や左右差が変化するため奥行きを把握させることができる [3]. しかし, 多層空間などの複雑な環境では, こう

した変化は単純ではないため奥行き把握が難しい.

本研究では多層空間において, 遮音・反響音を用いることで探索物の位置, 奥行きの把握を支援する際, 音が奥行き知覚にどう影響を与えるかを調査した. 具体的には探索物のある位置に仮想物体を配置し, HMD の三次元音響機能機能を用いて提示される音 (以下: 劣化のない音) と, 実多層空間で実際にスピーカを配置し録音した距離や方向に加え遮音や反響音も感じられる音 (以下, 劣化のある音) を使う. これらの音を比較して, 仮想物体の奥行き知覚への有効性を評価する.

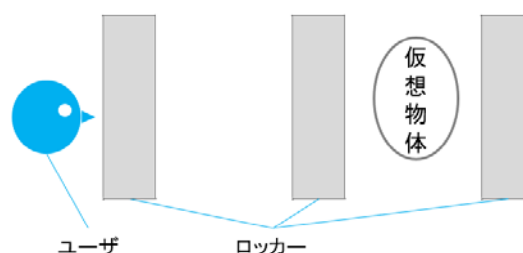


図 1: ユーザと仮想物体の位置関係



図 2: 実際の仮想物体の見え方

Akinori TANAKA, Sei IKEDA, Fumihisa Sibata, and Asako KIMURA

## 2. 実験 1：近距離対策

本章では、近い距離の多層空間において、音質を変化させることで、仮想物体の音源定位精度の向上を確認する実験について述べる。

### 2.1 実験目的

音量の大きさや左右差だけでなく、音質の変化も用いることで音源となる仮想物体の奥行きを知覚精度の変化を確認する。そのため、劣化なしの音と劣化ありの音を比較する。この実験では遮音や反響音が奥行き知覚正確立と回答時間を調べた。

### 2.2 実験内容

この実験では、仮想物体とそれを音源とする劣化のない音と劣化のある音を実験協力者が視聴し、音源がどの層にあるかをキー入力で答えさせた。実験には光学透過型 HMD である Microsoft HoloLens を実験協力者が装着し、多層空間における仮想物体の位置を答えさせた。実験では実験協力者の答えと正誤、仮想物体が現れてから答えるまでに時間のデータを集めた。実験は机の上にアタッシュケースを置き、音源となる仮想物体がアタッシュケースの上かアタッシュケースの中、机の下のどこにあるかをキー入力で答えさせた。結果の分析には Microsoft Excel の t 検定を用いた。

#### 2.2.1 実験条件

実験の環境、音源、仮想物体について説明する。実験環境は次のように設定した

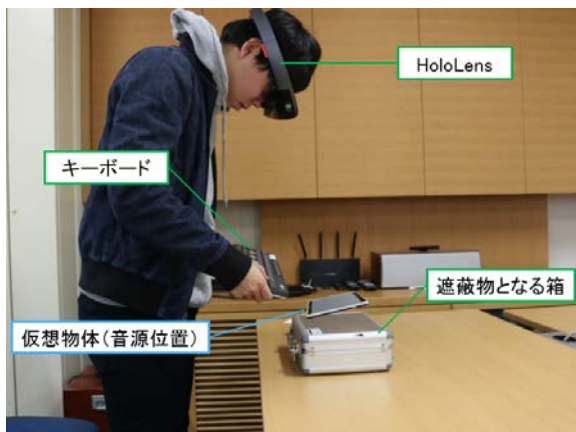


図 3：実験の様子



図 4：実験中の仮想物体の見え方

- ・高さ約 0.7m の机の前で実験協力者が立つ。
- ・机の上に横幅 28cm, 縦幅 20cm, 高さ 9cm のアタッシュケースを設置する
- ・実験協力者がアタッシュケースを見下ろした上体で実験を実施する。視点とアタッシュケースの距離は実験協力者の身長によるが約 60cm に設定する

音源として

- ・高低差のある音として「iPhone の着信音」,
- ・似たような高低差の音として「数匹の猫の鳴き声」,
- ・単調な音としてテレビなどで使用される「テストトーン (正弦波 1kHz)」.

仮想物体は次のように設定した

図 4, 図 5 のような iPhone, 猫, カラーバーのテクスチャを貼付した直方体のモデルを仮想物体に使用。

#### 2.2.2 実験手順

Step1: 実験協力者は HoloLens をする。HoloLens のディスプレイの中央には「Press Enter Key」という文字列が表示される。

Step2: 図 3 のように実験協力者には遮蔽物を見下ろした状態でなるべく頭部を動かさないように指示する。

Step3: エンターキーを押すと画面の文字列が消え、音源となる仮想物体が現れる。それをテンキーにシールを貼付した「上」、「中」、「下」のボタンで答える。

Step4: ボタンを押すと仮想物体は消え再び「Press Enter Key」という文字列が画面中央に現れる。

Step5: Step3, Step4 を 9 回繰り返す。画面中央に「Thank you」という文字列が現れると終了する。Step1 から Step5 を劣化なしの音と劣化ありの音の 2 回行う。

#### 2.2.3 実験協力者と実験順序

実験協力者にはランダムに仮想物体が出現すると説明する。しかし音の変化に対する順序による影響を考慮し、仮想物体の出現パターンはあらかじめ決めている。

実験協力者にはあらかじめ決めた順番通りに行う順序 A と逆の順序から行う順序 B のグループ、加えて劣化ありと劣化無しの音を聞く順序効果も考慮するため、実験の組み合わせは表 1 のようになる。つまり、「出現パターン」と「音の順序」を組み合わせた 2×2 の 4 通りのパターンを実験協力者に取り組みさせる。

実験協力者は各パターン 5 人ずつ募り、19 才から 20 才合計 20 人(男性 18 人, 女性 2 人)が参加した。



(a) 猫



(b) カラーバー

図 5：仮想物体のテクスチャ

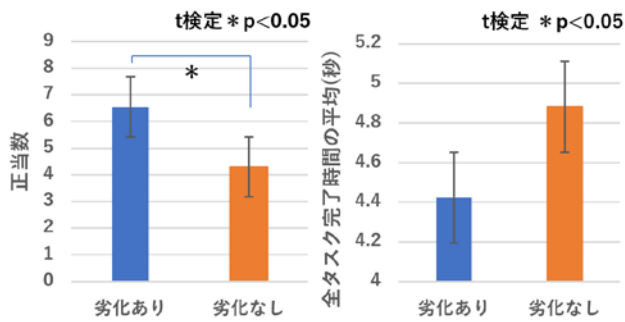


図 6：実験 1 の結果

### 2.3 実験結果と考察

実験による結果を図 6 に示す。正当数の結果を見ると今回の実験環境では劣化なしの音と劣化ありの音の間に有意な差が存在した。次にキーを入力要する時間の平均には、劣化ありが劣化無しに比べ短かったが有意な差はなかった。この原因として、音源の位置がわからない場合当てずっぽうに回答したり、長時間をかけて回答えす場合があり、ばらつきが生じたためだと考えられる。劣化ありの時間が短いことから、劣化ありの音を時間を掛けて聞き、正答率を訳ではない。

実験協力者の自由コメントとして、大多数の者に「劣化のある音がわかりやすい」というものが得られた。他には「箱の中の音はわかりやすい」「訓練すればええそう」「視覚情報だけでは判断できない」という回答も得られた。

劣化のある音はない音に比べ、奥行の知覚に優れていることが分かった。また劣化無しの正答率が半分程度であるから、頭部を動かさずに視覚情報のみで奥行を把握することは容易ではないことが分かった。

## 3. 実験 2：室内規模対象

この章では、ロッカールームのような多層空間にお奥行知覚特性を確認する実験について説明する。

### 3.1 実験の目的

前章の実験 1 と同様、劣化のない音とある音で音源となる仮想物体が何層先に存在するか回答させる実験を行う。実験 1 では、実験協力者の手元にある多層空間で行ったが、今回はロッカールームのような比較的規模の大きい環境で実験する。

実験 1 の場合、劣化のない音は距離による減衰が大きく現れると考えられる。ロッカーによる遮音や部屋の反響音を含めた劣化が、奥行知覚に大きな影響を与えることを確認する。また、前回の実験のコメントで「訓練すれば精度があがりそう」といったコメントを多くもらえたため、実験の施行を二回行いその影響も調査する。

### 3.2 実験の内容

前回の実験と同様に実多層空間で録音した劣化のある音源と、仮想空間で音源を配置した劣化のない音源を用い、仮想物体の位置をキー入力で答えさせる。図 6 に示す多層空間の位置に音源となる仮想物体が現れる。実験では実験協力者の答えと正誤、仮想物体が現れてから答えるまでに時間のデータを集める。

### 3.2.1 実験条件

実験環境は次のように設定した。

- ・図 7, 図 8 のような、遮蔽物となるロッカーが 3 つある多層空間で行う。
- ・部屋の広さは縦約 8m, 横約 7m, 高さは約 2.5m ある
- ・ロッカーの大きさは横幅 3.5m, 縦幅 0.9m, 高さ 2m それらが 0.6m 間隔で置かれている。

音源は次のように設定した。前回実験で「訓練すれば効果がありそう」というコメントと「iPhone が一番わかりやすい」というコメントが多かったこと、また音源別の正答率を見た結果、どの音源も音質変化による奥行知覚に効果が出ていたが、一番正答率がよかった「iPhone の着信音」を使用する。

仮想物体は次のように設定した。各層に 3 つの型、直方体、球体、カプセル型のモデルを使用する。3 つの型の仮想物体×3 層で合計 9 個、仮想物体を用意した。これらはそれぞれ計上が異なる仮想物体であり、仮想物体の大きさを比較して回答できないようにする。また、実験協力者には先入観をなくすために、仮想物体は形や大きさもランダムに出現すると告げた。

### 3.2.2 実験手順

- Step1: 実験協力者は部屋を一周し、部屋の大きさや音の反響具合を確認する。
- Step2: 実験協力者は HoloLens を装着する。HoloLens のディスプレイの中央には「Press Enter Key」という文字列が表示される。
- Step3: 実験協力者はロッカーと正対し、その場をなるべく動かないようにし、回答する。
- Step4: エンターキーを押すと画面の文字列が消え、音源となる仮想物体が現れる。テンキーには「前」、「中」、「奥」シールが貼付したボタンで答える。
- Step5: 答えると仮想物体は消え再び「Press Enter Key」という文字列が画面中央に現れる。
- Step6: Step4, Step5 を 9 回繰り返し、画面中央に「Thank you」という文字列が現れると終了。これらを劣化あり、なしの音で試行を行う。

### 3.2.3 実験順序と実験協力者

前回の実験と同様に、今回も順序による影響を考慮し、実験協力者にはランダムに仮想物体が出現すると説明する。前回同様に出現パターンと音の順序、加えて仮想物体の形状と出現する位置も考慮する。直方体、球体、カプセル型の仮想物体をそれぞれ 1 つずつ含んだグループ作る。このグループを 1, 2, 3 とすると、このグループが手前の層、中央の層、一番奥の層それぞれ同じ回数出現するパターンは、手前から順に①: 1→2→3, ②: 2→3→1, ③: 3→1→2 の 3 パターンが考えられる。

これらの実験の組み合わせを表 2 に載せる。実験協力者は「出現順序」「音の順序」「仮想物体の形状と位置」を組み合わせた 2×2×3 の 12 通りのいずれかについて取り組ませる。



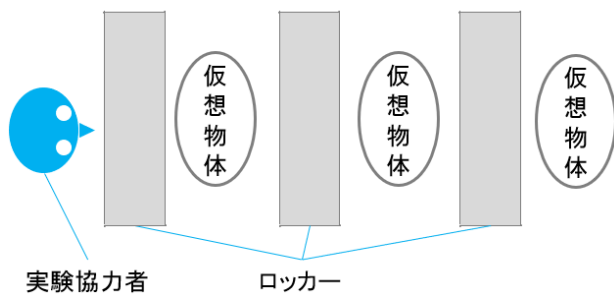


図 7：実験環境の平面図



図 8：実験の様子

実験協力者は、各パターン 2 人ずつ募り、18 才から 22 才の合計 24 人(男性 18 人、女性：6 人)が参加した。

### 3.3 実験結果と考察

実験結果を図 9、図 10 に示す。まず正答率について、一回目の試行で劣化のある音が劣化のない音に比べ、正答率が高い有意差を確認し、2 回目の施行でも同様、有意差を確認できた。次に全タスク完了時間について 1 回目の施行では、劣化のある音が劣化のない音に比べ、全タスク完了時間が早い有意差を確認できなかったが、2 回目の施行では有意差を確認できた。コメントとして、「劣化のある音のほうが各層の違いが顕著に表れている」、「劣化のない音は良く聞くと変化がわかる」といったコメントがもらえた。

考察として 2 回目の時間結果は、訓練を行った効果や、同じ音源の効果など多く要因が考えられる。今後の展望として、正答率ではなく時間を評価する実験を行い、タスク完了時間に与える影響を詳しく評価する必要がある。

### 4. むすび

本稿では、多層空間における遮音・反響音を用いた奥行知覚の影響について述べた。多層空間で音を用いた探索支援を行う際、音量や左右差の変化により定位できる従来の 3 次元音響より、それに加え遮音や反響音など音質も変化させた音を用いることで、より精度の高い探索支援を行えることを確認した。そのために仮想空間で音源を配置した劣化のない音と実環境でスピーカを配置し、録音した劣化のある音を実験に用い、二つの音を用いた評価実験を行った。また今回は実環境で音を録音したが、RGB 画像から各物体の反射率や吸音率を割り当て、仮想空間において実空間の音響を再現する[4]技術を用いれば用意に再現することができる。

評価実験として、まず手元の近い距離の多層空間を想定

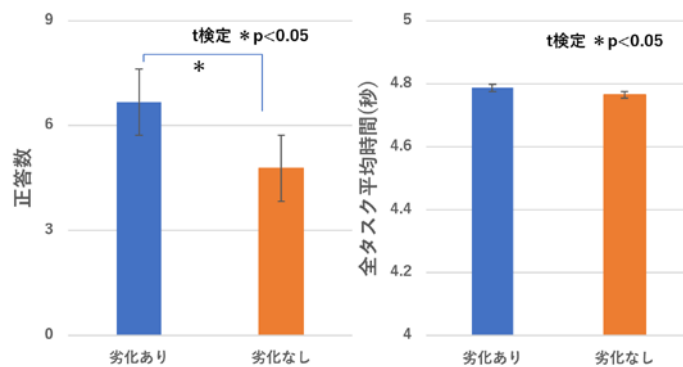


図 9：1 回目の結果

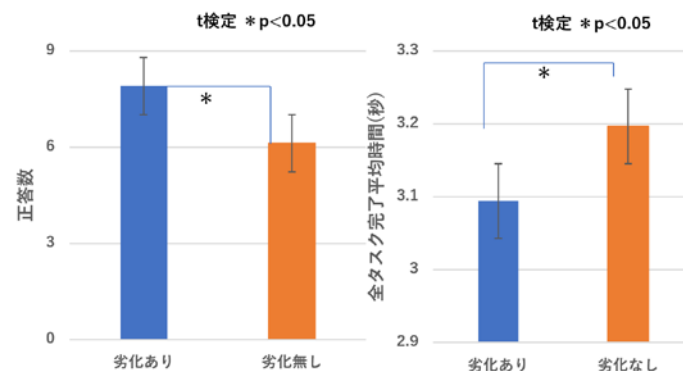


図 10：2 回目の実験結果

し、遮音は奥行知覚に有効かを調査したところ、劣化のある音に対して全タスク完了時間に差は無かったが正答率に有意差が確認できた。次に、ロッカールームのような多層空間で練習を行った後に実験を行ったところ、前回と同様に正答率に有意差が確認できた。また 2 回目の試行で全タスク完了時間に有意差を確認したが、様々な要因が考えられるため、今後は時間を測ることに特化した評価実験を行い詳しく調査していく。

今回の条件においては、遮音や反響音を用いることで正答率に関して奥行知覚の精度が向上したことを確認した。

### 参考文献

- [1] 山崎他: 複合現実感技術を用いた商品物流における仕分け作業支援, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 19, No. 3, pp. 413 - 422 (2014)
- [2] U Rehman and S Cao: Augmented reality-based indoor navigation using google glass as a wearable head-mounted display, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.1452 - 1457, (2015).
- [3] A Jayakody, *et al*: AVII [Assist Vision Impaired Individual]:An intelligent indoor navigation system for the vision impaired individuals with VLC, proc. 23th IEEE Information and Automation for Sustainability, pp.16 - 19, (2016).
- [4] C Schissler, *et al*: Acoustic classification and optimization for multi-modal rendering of real-world scenes, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 24, No.3, pp. 1246 - 1259, (2017)