

# ライブーム：超指向性スピーカを用いた複数人AR体験のための仮想オブジェクト音像提示システム

福島 拓<sup>1,a)</sup> 下田 桂輔<sup>2</sup>

受付日 2022年4月11日, 採録日 2022年10月4日

**概要：**本論文では、同一空間上で複数人がAR空間を共有している状況に適用可能な仮想オブジェクト音像提示システムについて述べる。既存の手法では仮想オブジェクトの定位感や実在感が十分でないという問題や、複数人でAR体験をする際に他者とのインタラクションが困難になるという問題が存在していた。そこで本研究では、超指向性スピーカとムービングヘッドを用いた音像提示手法を提案した。本論文の貢献は以下である。(1) 超指向性スピーカを用いた複数人AR体験のための仮想オブジェクト音像提示システムを提案し、実現した。(2) 提案手法は既存手法(HRTF)と比較して、利用者間のインタラクションが増える傾向にあることを示した。(3) 提案手法は既存手法と比較して、定位感や存在感が同等以上であることを示した。

**キーワード：**AR, 超指向性スピーカ, 複数人, スマートフォン

## LIVEEM: Sound Image of Virtual Objects Presentation System for Multi-person Augmented Reality Experience Using Parametric Speaker

TAKU FUKUSHIMA<sup>1,a)</sup> KEISUKE SHIMODA<sup>2</sup>

Received: April 11, 2022, Accepted: October 4, 2022

**Abstract:** This study develops a sound image presentation system for that multiple people in same place are sharing an augmented reality (AR) space. Existing sound image presentation systems are limited by various problems such as insufficient localization and realistic sensation of virtual objects and difficulty in interaction with others when multiple people share an AR space. In this study, we propose a sound image presentation method using a parametric speaker and moving head. The major contributions of this study are as followings. (1) We proposed and developed a sound image of virtual objects presentation system for multi-person AR experience using a parametric speaker. (2) The proposed method increased the interaction between users compared to the existing method (HRTF). (3) The proposed method was as good as or even better than the existing method in terms of localization and realistic sensation of virtual objects.

**Keywords:** AR, parametric speaker, multi-person, smartphone

### 1. はじめに

近年、AR市場は拡大し続けており、ARサービスもそ

れにともない普及している[1]。利用シーンは多岐にわたり、スマートフォンゲームや音楽ライブなどのエンタテインメント、商品のプロモーション、教育・訓練などで活用されている。特に、エンタテインメント分野では、ARライブなどで複数人が同時に同じ空間を共有する事例も存在する。また、カメラで取得した画像の特徴量から空間認識を行うマーカーレスのARシステムの開発が今後も進められていくと考えられ、AR機能を搭載するスマートフォンにより手軽にAR体験ができるようになりつつある。しかし

<sup>1</sup> 大阪工業大学情報科学部  
Faculty of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology, Hirakata, Osaka 573-0196, Japan

<sup>2</sup> 大阪工業大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology, Hirakata, Osaka 573-0196, Japan

a) taku.fukushima@oit.ac.jp

スマートフォン AR においては、仮想空間を描画する画面領域が小さく視野角が狭いといった特徴があり、仮想オブジェクトの出現位置が把握しにくいという課題がある。さらに、AR コンテンツの仮想オブジェクトは AR 空間上を自由に動き回るため、出現場所やコンテンツの演出によっては発見できなかったり、見失ったりするという問題が発生する。

そこで、仮想オブジェクトの音とその出現位置から発生しているかのように知覚させるさまざまな音源定位手法が存在している。一般的な HRTF (Head Related Transfer Function) を用いた手法では、多くの場合イヤホンやヘッドホンを使用する必要がある。イヤホンなどをつけたユーザは現実空間上の周囲の音が聞こえにくいいため、他ユーザとコミュニケーションをとることや、周囲の状況に気づくことが難しいという課題がある。

これらをふまえて、本研究では、(1) 複数人でのインタラクションを可能とするために耳を塞がない、(2) 手軽に体験可能とするために、システム利用者が使用する機材は通常所持していると考えられるもののみとする、の2つのコンセプトを満たした仮想オブジェクトの音源定位を目指す。実現のために、我々は超指向性スピーカを用いた音像提示手法を提案する。これは床面などに超指向性スピーカを向けて反射音を発生させることで、あたかもその場所から音が提示されているように知覚させる手法である。これにより、別の位置にいる複数人が体験しても同じ位置からの音を聞くことを可能とする。また、利用者が用意する機材はスマートフォンのみとし、手軽に利用可能とする。本論文では、複数人で AR 空間を共有している状況下において、前述のコンセプトを満たす提案システムを適用した環境により、仮想オブジェクトの定位感や実在感、利用者間のインタラクションへの影響を調査する。本環境の実現により、複数人で視聴可能なスマートフォンを用いた AR ライブ\*<sup>1</sup>や、屋内小規模スペースでの AR 広告、AR 観光案内などに応用が可能となると考えられる。

## 2. 関連研究

### 2.1 超指向性スピーカによる音源定位手法

超指向性スピーカとは、超音波を使って音に直進性を持たせたスピーカであり、パラメトリックスピーカとも呼称されている。可聴音を直進性の高い超音波に変調して空気中に放射すると空気中で復調され、スピーカを向けた方向に可聴音を届けることができるため、特定の人物のみに音を提示する研究が行われている [2]。音源定位を可能とした従来研究には、音像プラネタリウム方式を用いた手法 [3] や視聴者に追尾して適切な音を提示する手法 [4] が存在する。しかしながら、これらの研究では特定の人物の頭部を検出

したうえで、直接または反射板を利用して超指向性スピーカの音を届けているため、本研究で適用対象としている複数人が同時に視聴する環境での利用は困難である。本研究では、仮想オブジェクトの位置に超指向性スピーカの音を当て、乱反射した音を利用者に届けることで、複数人が同時視聴可能な環境での仮想オブジェクトの実在感向上を目指す。また、フレキシブルパラメトリックスピーカを用いてオーディオスポットを制御する手法 [5] や Multi-PAL を用いて 3 次元音場を生成する手法 [6] では、複数人への音像提示を可能としている。しかし、仮想音源の位置をある程度固定する必要があるため、AR オブジェクトのような自由に動き回る音源には対応していない。

北岸らは、講師・受講生間などの 1 対多コミュニケーションを目的として、影と移動軌跡の描画による視覚定位と、移動する足音音源による音源定位で表現される講師の分身エージェントを提案している [7]。プロジェクトで影と移動軌跡の描画、超指向性スピーカと 2 軸のサーボモータで足音音源の提示を行っているため、分身エージェントと音源の動的な提示が可能となっている。この研究では、講義での利用を想定しているために影と移動軌跡、足音のみで分身エージェントの位置を表現している。また、石井らは超指向性スピーカを用いて遠隔コミュニケーション支援を行っている [8]。作業指示を行うアバタを遠隔地にプロジェクトで投影し、投影場所に超指向性スピーカで音声を同時に提示することで、アバタから音声が聞こえてくるように感じるものである。これらの研究と本研究とは音像の提示方法は同様である。しかし、これらの研究では映像を実空間に投影していることに対し、本研究では AR で提示している点が相違点となる。また、石井らは遠隔コミュニケーション支援を目的としているが、本研究では同一空間の利用者間のインタラクションを目的としている点が相違点となる。

以上のように、超指向性スピーカを用いた音源定位手法はいくつかの分野で提案されている。しかし、AR 空間で動き回るオブジェクトに対応したうえで複数人が視聴可能な環境において、超指向性スピーカが使用可能であるかの検証はなされていない。また、同一空間での利用者間のインタラクションの活性化につながるかどうかの検証はなされていない。本論文ではこれらについて検証を行う。

### 2.2 複数人で AR 空間を共有するシステム

伊藤らは AR 空間における Web アプリケーションの実行環境を開発 [10] し、その特徴として多人数と AR 空間を共有して同じ位置に同じオブジェクトを配置する機能をあげている。南田らは音楽フェスなどにおける待ち合わせ支援を行うシステムを開発している [11]。これは、GPS と ARWorldMap を併用して、GPS だけでは困難な局所的な場所を同定するものである。このシステムにより、音楽ラ

\*<sup>1</sup> 例：[https://snowmiku.com/2019/collabo\\_campaign.html#collabo\\_odori.2](https://snowmiku.com/2019/collabo_campaign.html#collabo_odori.2)

イブなどの比較的狭い範囲であっても、共通の待ち合わせ場所を誘導することができる。これら2つは仮想オブジェクトの実在感向上を目的としておらず、AR空間を共有して別の目的を達成するものである。

金子らのSymPhonicAudio [12]では、複数のスマートフォン端末からの音をサラウンド音響として動的に生成し現実空間への音像定位を行っている。このシステムでは音源の定位感には問題があったものの、コミュニケーションのとりやすさや一体感があるという点は優れていた。つまり、複数人で空間を共有し、周囲の音が聞こえる環境でAR体験を行うことで、コミュニケーションのとりやすさや一体感について向上すると考えられる。SymPhonicAudioの特徴として「体験の共有」「多人数に対応」「手軽さ」をあげており、この観点は本研究でも参考にした。文献 [12]では複数の音源を用いて音像定位を行っているが、本研究では1つの音源のみにより定位感を高めることを目指す。

### 3. 提案システム

#### 3.1 概要

本研究では複数人が同じ空間を共有するAR体験を可能とすることを目的として、スマートフォンARアプリ(3.2節)と音源発生装置(3.3節)で構成される仮想オブジェクト音像提示システム「ライブーム」を開発している。本システムは、ARライブ会場などに設置し、その場に訪れた複数人がAR体験を実施することを想定している。ARライブや対戦ゲームなど複数人の体験共有型リアルタイムコンテンツに対応するため、仮想オブジェクトにリアルタイムで追従が可能な、超指向性スピーカとムービングヘッドを用いた音源定位手法を採用する。システムの利用例を図1に示す。アプリに重畳表示される仮想オブジェクト

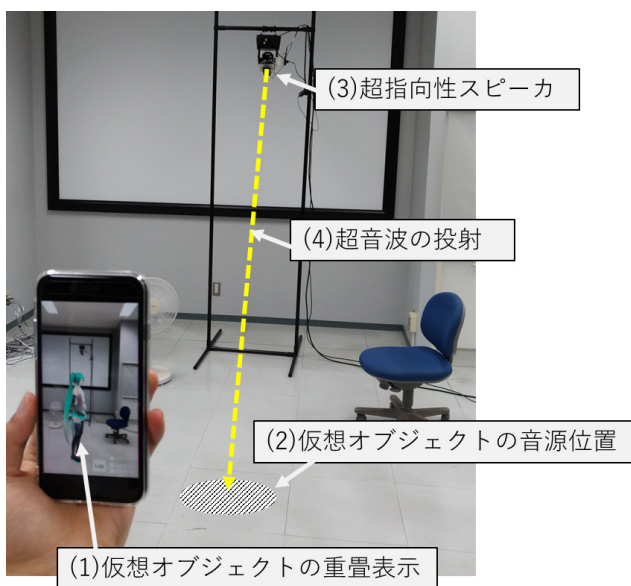


図1 本システムの利用例  
Fig. 1 Usage example of proposed system.

(図1(1))の実空間での位置を計算し、その場所を仮想オブジェクトの音源位置(図1(2))とする。仮想オブジェクトの音源位置に超指向性スピーカ(図1(3))を向け、超音波をその場所に投射する(図1(4))と、音源位置で乱反射した音が利用者に届く。このことで、あたかもその場に音源があるように知覚させる。また、仮想オブジェクトの移動に合わせて超指向性スピーカの投射方向・角度を動的に変更することで、オブジェクトベースの音響システムを物理的に実現している。

なお、本システムを正常に動作させるためには、超指向性スピーカと反射面との間の空間、および、反射面にほかの物体が存在しない状態とする必要がある。このため、上記の空間や地点およびその周辺にシステム利用者が入らないように空間設計をする必要がある。また、超指向性スピーカの音が利用者に届く必要があるため、比較的小規模な空間での利用となる。

システム構成を図2に示す。ユーザはスマートフォンARアプリを使用してAR体験を行う。このときアプリは角度情報と音声の再生信号を音源発生装置の制御用PCに送信する。なお、実験に対応するため、同時にイヤホンなどに立体音響を出力する機能も実装した。

本手法の予備調査の結果、動き回る仮想オブジェクトや連続的な音を発する仮想オブジェクトにおいて、実在感や定位感が得られる可能性があることが示唆された [13]。特に、仮想オブジェクトが自分の周囲を横切るときに、実在感が得られやすいことが分かった。また、音源定位精度の向上を目的として、反射面素材の比較実験を行った結果、適度に音の反射が発生するカーペットなどの素材において音源定位感が比較的高まることが示された [14]。これは、音の反射を起こしにくい素材の場合は利用者に届く音圧が小さくなること、音の反射を起こしやすい素材の場合は正反射して壁などでさらに反射するため、距離感がつかみに

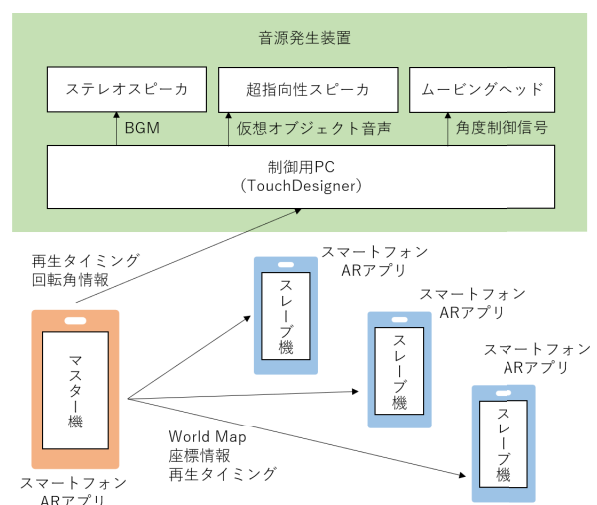


図2 システム構成  
Fig. 2 System configuration.



くくなるのがそれぞれ理由としてあげられた。

### 3.2 スマートフォン AR アプリ

Unity で作成したアプリケーションであり，iOS アプリとして動作する．AR の制御部分は AR フレームワークである ARKit [15] を使用した．最初に iOS 端末のカメラで空間キャリブレーションを行うことで，World Map が生成され，任意の場所に選択した仮想オブジェクトを出現させることができる．出現させた仮想オブジェクトはあとから位置や向きを微調整する機能も実装した．仮想オブジェクトにはあらかじめアニメーションが設定されており，再生ボタンを押すことでアニメーションと音声再生される．音声は後述の音声発生装置で再生されるが，実験での比較用としてスマートフォン上で HRTF を用いた立体音響 [16] も再生することができる．また，アニメーション再生前に，超指向性スピーカの位置をアプリ上で設定しておくことで，超指向性スピーカと仮想オブジェクトとの仰俯角や方位角が計算される．計算された数値と音声の再生情報は，OSC (OpenSound Control) 通信を使用して外部に出力できる．このアプリは複数人での利用に対応しており，World Map を複数端末と共有できる．1 台をマスタ機として設定することで，スレーブ機の画面に表示されている仮想オブジェクトの座標やモーシヨンの再生タイミングがマスタ機のものと同期される．

### 3.3 音像発生装置

超指向性スピーカ K-02617 (有限会社トライステート，FM 変調，周波数特性：400 Hz~5 kHz) とムービングヘッド LM70S (BETOPPER，可動域：540 度 (方位角)，180 度 (仰俯角)，方位角の 180 度回転に約 0.7 秒要する)，制御用の PC，一般的なステレオスピーカから構成される．スマートフォン AR アプリから送信される超指向性スピーカの仰俯角や方位角，仮想オブジェクトの音声の再生タイミングを制御用 PC で取得し，ムービングヘッドに回転角情報を，超指向性スピーカに音声を送る．これにより，音像を仮想オブジェクトの移動に合わせて追従させることができ，移動するユーザや複数人ユーザで音像の共有が可能となる．ムービングヘッドの制御は TouchDesigner (Derivative) を使用している．

## 4. 実験

本実験では，複数人で AR 体験を行う環境へ提案システムを適用する．実運用上のコンテンツとして「AR ライブ」を想定して実験を行った．AR ライブとはバーチャルキャラクターが AR 空間上で歌って踊るライブのことである．本論文では 4 人の被験者グループに AR ライブを 2 回体験してもらった．被験者は大阪工業大学の学生であり，参加総数は 16 人である．2 回の AR ライブは，イヤホン (HRTF)

手法と超指向性スピーカ手法 (提案手法) とを 1 回ずつ実施した．イヤホン手法は 1 章で述べたコンセプトの 1 つである「耳を塞がない」を満たしていないものの，一般的な AR ライブで用いられているため比較対象とした．手法と後述するタスクについては順序効果を考慮して順序を入れ替えている．本実験では，AR 空間で動き回るオブジェクトに対応したうえで複数人が視聴可能な環境において，提案環境の利用可能性の評価を行う．本評価では，定位感と実在感を評価軸とし，イヤホン手法と比較する．また，被験者間のインタラクション活性化の有無についても評価する．本評価では，被験者間のインタラクションの変化を比較する．

実験環境を図 3 に示す．本実験は屋内で行い，仮想オブジェクト移動エリアや被験者周辺には床面にカーペットを敷いている．被験者の周囲に仮想オブジェクト移動エリアを設定し，その範囲内で仮想オブジェクトが移動するように設定した．その際，仮想オブジェクト移動エリアから 2m 離れた位置に超指向性スピーカを設置し，被験者に超指向性スピーカからの音声が直接当たらないようにした．

実験ではまず，被験者にはスマートフォンで周囲を見渡してもらい，空間キャリブレーションを行った．その状態であらかじめ設定しておいた World Map を適用し，座標空間をすべての端末で同期した．1 回のライブは 4 分程度である．また，ライブ中の特定のタイミングで被験者の視野外と予想される場所に仮想オブジェクトが瞬間移動する演出を含めた．これは音を頼りに視野外にある仮想オブジェクトを探させることを促しており，定位感の評価に使用する．また，被験者には 1 回目のライブ中に 4 人中 2 人に対してペンライトを振るように，2 回目のライブ中に 1 回目のライブとは別の 2 人に対してキャラクターに手を振るように，それぞれ実験中のタスクとして依頼した．これは，被験者間のインタラクションを促すことを目的としており，

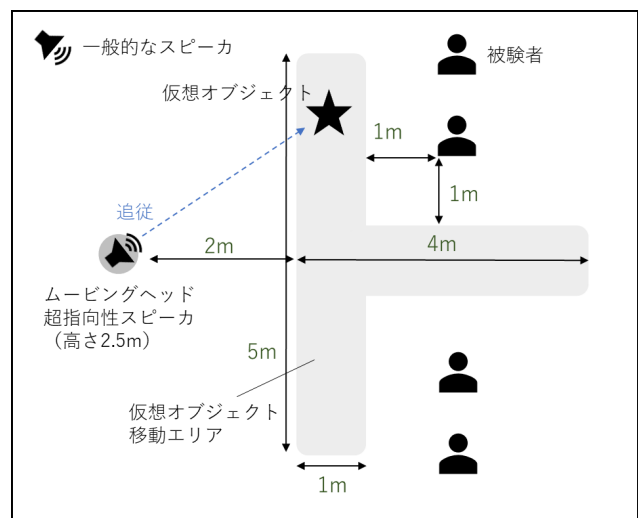


図 3 実験環境

Fig. 3 Experimental environment.

表 1 主観評価アンケートの結果  
Table 1 Questionnaire results.

質問	音源提示手法	評価段階					中央値	最頻値
		1	2	3	4	5		
(1) 同時にライブを見ている周りの観客の存在感があった	イヤホン	0	6	3	6	1	3	2, 4
	超指向性スピーカ	1	2	0	12	1	4	4
(2) 他の観客の行動に自分もつられた	イヤホン	1	6	3	5	1	3	2
	超指向性スピーカ	0	3	2	9	2	4	4
(3) 他の観客がいることで、より雰囲気を楽しむことが出来たり、 気分が盛り上がったたりした	イヤホン	0	3	5	6	2	3.5	4
	超指向性スピーカ	0	0	3	10	3	4	4
(4) キャラクターが存在する方向が分かった	イヤホン	0	2	4	5	5	4	4, 5
	超指向性スピーカ	0	0	4	10	2	4	4
(5) キャラクターとの距離感が分かった	イヤホン	0	3	6	5	2	3	3
	超指向性スピーカ	0	1	4	8	3	4	4
(6) キャラクターを見失ってもすぐに発見できた	イヤホン	0	5	5	5	1	3	2, 3, 4
	超指向性スピーカ	0	3	4	8	1	4	4
(7) キャラクターがその場に実在していたように感じた	イヤホン	0	1	3	11	1	4	4
	超指向性スピーカ	0	0	1	13	2	4	4
(α) イヤホンと超指向性スピーカではどちらが臨場感を得られましたか	-	1	3	2	3	7	4	5

・表中の評価段階の数字は人数を表す。  
 ・(1)~(7) の評価段階：1：強く同意しない，2：同意しない，3：どちらともいえない，4：同意する，5：強く同意する  
 ・(α) の評価段階：1：イヤホン，2：ややイヤホン，3：どちらでもない，4：やや超指向性スピーカ，5：超指向性スピーカ  
 (実際のアンケートでは、1：1 回目，2：やや 1 回目，3：どちらでもない，4：やや 2 回目，5：2 回目 としたが、本表では書き換えている。)

一般的なライブ中の行動の中から他者に影響を与える可能性のある行動を選定した。また、超指向性スピーカ手法では歌声を超指向性スピーカから、音楽を一般的なスピーカからそれぞれ提示した。イヤホン手法では両者をイヤホンから提示している。また、音量は両手法間で同程度となるように調整している。

実験では、毎回の AR ライブ終了時にアンケート（リッカートスケール、自由記述）を行った。また、被験者間のインタラクションの確認や瞬間移動時の行動分析のために実験中の被験者の様子をビデオで撮影した。

### 5. 実験結果と考察

本章では、実験結果と考察について述べる。主観評価アンケートの結果を表 1 に示す。また、本章で記述している被験者のコメントはすべてアンケートの自由記述から得られたものである。

#### 5.1 観客同士のインタラクション

表 1(1)~(3) に観客同士のインタラクションについて質問したアンケート結果を示す。いずれの質問も、超指向性スピーカのほうが評価が高い傾向にある。特に「(3)ほかの観客がいることで、より雰囲気を楽しむことができた、気分が盛り上がったたりした」という質問では、ウィルコクソンの符号付き順位和検定において 5%水準で有意差 ( $p = .045$ ) が認められた。これは、イヤホンの場合、周囲の環境音が聞こえず、自分の世界に没入しやすくなること

表 2 被験者の行動

Table 2 Actions of the examinees.

被験者の行動	イヤホン	超指向性スピーカ
他者の動作をヒントにキャラクタに気づく	2.50	2.75
他者の動作につられる	1.00	3.25
キャラクタの場所を指し示す	0.00	0.75
声を出してコミュニケーションをとる	0.50	1.75

・単位は回である。  
 ・1 回のライブにおける被験者 4 人の行動の平均回数である。  
 ・「他者の動作につられる」は、動作をしていない状態から、他者の身振り手振りやリズムをとる動作につられた場合を示す。

が理由として考えられる。

また、超指向性スピーカ手法時のライブでは、他者とのインタラクションや他人を見て楽しむなどの行動がみられた。表 2 に実験中にみられた被験者の行動を示す。表 2 は被験者の行動を実験中のビデオ映像で確認し、著者の 1 人が分類したものであり、1 回のライブにおける被験者の行動の平均回数を示している\*2。他者の動作に関する判定では、他者を見た後に他者の視線を追ってキャラクタの位置に視線を移した回数、他者を見た後に他者と同様かつ被験者が行っていなかった行動をとった回数、をそれぞれ基準とした。表 2 より、他者の動作をヒントに（瞬間移動した）キャラクタに気づくという行動については同程度であった。しかし、他者の身振り手振りなどにつられたり、

\*2 すべての被験者がいる行動を 1 回ずつとった場合は、1 回の実験で 4 人の被験者がいるため、表中には平均 4 回と提示する。

声を出して他者とコミュニケーションをとったりするなどの利用者間でのインタラクション行動は超指向性スピーカを用いた場合に増える傾向にあることが分かる。さらに、イヤホン時のライブでもイヤホンを外して他者とインタラクションをとろうとする被験者も存在した。観客同士のインタラクションに関する質問で高評価をつけた被験者は、「周りが(タスクに関する行動を)やっているなら自分もやろうと思った」「周りが楽しそうであればこちらも楽しむことができた」と言及しており、他者の行動が自分のAR体験の満足感につながっている可能性がある。また、イヤホン手法の被験者からは、存在感について「イヤホンの音しか聞こえなかった(ため、ほかの観客の存在感はなかった)」との意見が得られている。このような被験者の行動から、複数人でのAR体験の場において、耳を塞がずに現実空間の音を聞くことを可能にする重要性が示唆された。

### 5.2 定位感と実在感

表1(4), (5)に仮想オブジェクトの定位感についての質問のアンケート結果を示す。どちらの質問も手法間で有意差はなかった。表1(4)より、ほとんどの被験者が3以上をつけており、両手法ともに仮想オブジェクトの方向が把握できる傾向が示された。一方、表1(5)では、仮想オブジェクトの距離感について質問しているが、中央値、最頻値から、超指向性スピーカのほうが仮想オブジェクトの距離感が分かりやすい傾向にあることが分かる。文献[13]で

表3 キャラクタを見失ってから再び発見するまでの時間

Table 3 Time from losing sight of the character to discovering it again.

ライブ回	音源提示手法	平均値	標準偏差
1回目	イヤホン	12.0	3.2
	超指向性スピーカ	8.4	2.3
2回目	イヤホン	2.7	1.0
	超指向性スピーカ	4.9	1.9

・単位は秒である。

表4 ほかの観客の影響に関するアンケート結果

Table 4 Results of the questionnaire for the influence of other examinees.

質問	音源提示手法	ライブ回	評価段階					中央値	最頻値
			1	2	3	4	5		
(1) 同時にライブを見ている周りの観客の存在感があった	イヤホン	1回目	0	2	0	5	1	4	4
		2回目	0	4	3	1	0	2.5	2
	超指向性スピーカ	1回目	0	1	0	7	0	4	4
		2回目	1	1	0	5	1	4	4
(2) 他の観客の行動に自分もつられた	イヤホン	1回目	0	3	1	3	1	3.5	2,4
		2回目	1	3	2	2	0	2.5	2
	超指向性スピーカ	1回目	0	2	2	3	1	3.5	4
		2回目	0	1	0	6	1	4	4

・表中の評価段階の数字は人数を表す。

・評価段階：1：強く同意しない，2：同意しない，3：どちらともいえない，4：同意する，5：強く同意する

は、超指向性スピーカはユーザの近くの仮想オブジェクトや目の前を通り過ぎる仮想オブジェクトに対して実在感や定位感が得られやすい可能性が示唆されている。本実験でも、近くにいるときの仮想オブジェクトと遠くにいるときの仮想オブジェクトの距離感の違いが顕著に感じられたことで、「近くに来た」という体験がライブの満足度や臨場感の向上につながった可能性がある。このことが、表1(α)において超指向性スピーカのほうが評価が高くなっている理由として考えられる。

表1(6)では、キャラクタが被験者の視野外に瞬間移動したときに、すぐに発見できたかどうかを質問している。イヤホン手法のほうが比較的ばらつきが大きく、評価が低い傾向にある。また、キャラクタが被験者の視野外に瞬間移動したときに、被験者が再びキャラクタを視認するまでの時間の平均値を表3に示す。表3はキャラクタが瞬間移動した時間と被験者が再度発見したと考えられる時間を著者の1人がビデオ映像から計測し、算出している。イヤホン手法で1回目のライブを行った被験者に着目すると、キャラクタを見失ってから再び発見するまでの平均時間が12.0秒となっている。一方、超指向性スピーカで1回目のライブを行った被験者は、平均8.4秒であり3.6秒早くキャラクタを見つけている。超指向性スピーカ手法でライブを行った被験者の自由記述でも、「声を頼りに探した」「遠くから近くに来たときが分かりやすい」といった意見がみられ、音の定位感でキャラクタを発見していることがうかがえる。なお、2回目のライブではイヤホン手法の方が発見までの時間が短くなっている。この理由として、他者の存在感などの変化が考えられる。表4は、表1(1), (2)をライブ回ごとに分けた結果である。表4より、超指向性スピーカでは1回目と2回目ではほぼ変化はなかった。しかし、2回目にイヤホン手法であった被験者は、存在感や他者の行動につられたかどうかの観点から、ほかの観客を気にしていない人が比較的多かったことが分かる。また、アンケートやライブ中の行動観察から、1回



目のライブではキャラクタが瞬間移動したことに戸惑う様子がみられたが、2回目はキャラクタが瞬間移動しても冷静に探す様子がみられた。これらのことから、瞬間移動が予期できており、他者の存在を気にしない傾向にあった2回目のライブのイヤホン手法では、キャラクタが消えてから探す行動に移るまでの時間が短く、結果的に瞬間移動したキャラクタを早く発見できていたと考えられる。

表1(7)に仮想オブジェクトの実在感について質問したアンケート結果を示す。この表からはイヤホンと超指向性スピーカにあまり差はなかった。どちらも実在感を得られているため、超指向性スピーカはイヤホンと同程度の効果があることが示された。スピーカの自由記述では、「近くに来ているときに実在感があった」「近づいたり遠ざかったりするときに実在感があった」という意見がみられた。文献[13]と同様に、提案手法は仮想オブジェクトとユーザが近距離の場合に実在感を得られる可能性がある。また、「瞬間移動する部分で非現実感があった」という意見もあり、実在感の定義が人によって違うため、あまり差が出なかったことも理由として考えられる。

### 5.3 議論

本研究では、超指向性スピーカを用いて現実空間に仮想オブジェクトの音像を提示する手法を提案した。5.1節より、提案手法の方がより雰囲気を楽しめたり気分が盛り上がったことが示された。また、観客同士のインタラクションも増える傾向にあることが示された。このインタラクションが増える傾向は文献[12]と同様であり、複数人でのAR体験において耳を塞がない音像提示手法が観客同士のインタラクションにおいて重要であると考えられる。また、5.2節より、仮想オブジェクトの定位感や実在感については、イヤホン手法(HRTF)と同等以上の結果が得られた。これらの結果から、利用者が特殊な機材を用意しない環境において、定位感、実在感、利用者間のインタラクションの各条件を総合した観点から、本手法は複数人でAR体験をより適切に実施可能とする手法であると考えられる。

なお、骨伝導イヤホンや外音とり込み機能付きのイヤホンなどの活用により、同様の効果が得られる可能性がある。しかし、イヤホンの所有者は調査対象者の半数、その中でオープンイヤ型イヤホンは約2割である[17]など、現時点では十分に普及しているとはいえない。このため、本手法は利用者が手軽に参加可能とするために、利用者側の機材をスマートフォンのみとしていた。このことにより、街歩き中に参加を想定していなかったイベントを見つけた場合などでもすぐに体験可能であるという利点が本手法には存在しているが、今後これらの機材との比較が必要であると考えられる。

また、本実験では、超指向性スピーカと反射面との水

平距離を最長6m、反射面と利用者との水平距離は最長約5m、仮想オブジェクトの数は1つと設定しており、この範囲であれば大きな問題は生じていなかった。複数の超指向性スピーカを用いることで、さらに広い領域でのAR体験や複数の仮想オブジェクトの配置も可能であると考えられるが、本論文では性能調査を十分に行えていないため、今後調査が必要である。

## 6. おわりに

本論文では、複数人でのスマートフォンAR体験において、超指向性スピーカによる音源定位手法を提案し、実験を行った。本論文の貢献は以下である。

- (1) 超指向性スピーカを用いた複数人AR体験のための仮想オブジェクト音像提示システムを提案し、実現した。
- (2) 提案手法は既存手法(HRTF)と比較して、利用者間のインタラクションが増える傾向にあることを示した。
- (3) 提案手法は既存手法と比較して、定位感や存在感が同等以上であることを示した。

今後は、超指向性スピーカを複数台設置して視聴可能範囲を拡張させたり、会場設置のサラウンドスピーカやスマートフォンのスピーカと併用したりすることを検討する。また、5.3節で述べた内容や、どのようなARライブの表現が本手法に適用可能であるかなどの調査を実施する。

## 参考文献

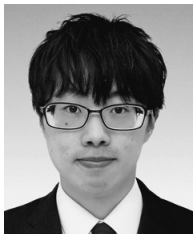
- [1] 情報通信白書令和元年版, 総務省, 入手先 (<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r01/html/nd112130.html>) (参照 2022-04-11).
- [2] Muramatsu, N., Ohshima, K., Kawamura, R., Wei, O.C., Sato, Y. and Ochiai, Y.: Sonoliards: Rendering Audible Sound Spots by Reflecting the Ultrasound Beams, *UIST '17*, pp.57–59 (2017).
- [3] 伊藤仁一, 中山雅人, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 複数の超音波スピーカを用いた音像位置の補間と視覚補助に基づく移動音像の実現, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.112, No.385, pp.93–98 (2013).
- [4] 池田輝政, 遠藤正隆, 中嶋裕一, 三浦哲郎, 菱田隆彰: 顧客の意思を付度するデジタルサイネージ広告システム, 情報処理学会エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集, pp.439–440 (2017).
- [5] 小森慎也, 益永翔平, 生藤大典, 中山雅人, 西浦敬信: フレキシブルパラメトリックスピーカを用いたオーディオスポットの制御, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.20, No.3, pp.189–198 (2015).
- [6] 小森慎也, 大上佳範, 中山雅人, 西浦敬信: マルチパラメトリックアレイスピーカを用いた音像ホログラムの構築, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J101-D, No.3, pp.578–587 (2018).
- [7] 北岸佑樹, 田中友樹, 米澤朋子: 多人数講義における講師分身エージェントを用いたコミュニケーションの促進, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.118, No.404, pp.107–114 (2018).
- [8] 石井健太郎, 谷口祐司, 大澤博隆, 中臺一博, 今井倫太: 身体性遠隔コミュニケーションにおけるユーザとアバタの視点の一致, 情報処理学会インタラクション 2012, pp.49–56 (2012).

- [9] 森川大輔, 石井 裕, 渡辺富夫: VR 空間における複数非参加者を含む雑音環境を利用した発話支援システム, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.22, No.4, pp.403–410 (2020).
- [10] 伊藤栄俊, 岩田 知, 高田智紀, 大園忠親, 新谷虎松: Wedge: AR 空間における Web アプリケーション実行環境の開発とその応用, 情報処理学会インタラクション 2019, 3B-30 (2019).
- [11] 南田宗太郎, 大園忠親, 新谷虎松: 音楽フェスにおけるサークルの自発的形形成支援のための AR システムの試作, FIT2019 情報科学技術フォーラム, No.4, pp.409–410 (2019).
- [12] 金子翔麻, 渡邊恵太: SymPhonicAudio: 複数のスマートフォンを同期し現実空間への音像定位を動的に行う手法の提案, 情報処理学会インタラクション 2018, 1B-39 (2018).
- [13] 下田桂輔, 福島 拓: 超指向性スピーカを用いた仮想オブジェクトの存在感向上手法の検討, 情報処理学会研究報告, デジタルコンテンツクリエーション (DCC), Vol.2020-DCC-24, No.28, pp.1–6 (2020).
- [14] 下田桂輔, 福島 拓: 超指向性スピーカを用いた実空間と仮想空間の共有感向上手法の検討, 情報処理学会関西支部大会, C-05, pp.1–4 (2020).
- [15] ARKit4, Apple, available from (<https://developer.apple.com/jp/augmented-reality/arkit/>) (accessed 2022-04-11).
- [16] ResonanceAudio, Google, available from (<https://resonance-audio.github.io/resonance-audio/>) (accessed 2022-04-11).
- [17] オープンイヤラボ、イヤホンに関する調査を実施～イヤホンは使い分ける時代へ！使う人の半数は複数台持ち！～, アダプティブ株式会社, 入手先 (<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000014.000017157.html>) (参照 2022-07-17).



福島 拓 (正会員)

1986 年生。2008 年和歌山大学システム工学部中退。2013 年同大学大学院システム工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。現在, 大阪工業大学情報科学部講師。CSCW, HCI の研究に従事。本会シニア会員。



下田 桂輔

1996 年生。2019 年大阪工業大学情報科学部卒業。2021 年同大学大学院情報科学研究科修了。同大学院在学中, 仮想オブジェクトの存在感向上に関する研究に従事。