指向性のある音声の到達範囲を可視化するARシステム

海野 亮[1]　塚田 学[1]　落合 秀也[1]　江崎 浩[1]

概要：近年，視聴環境の多様化や高品質化が進み，映像や音声の活用に関する研究も盛んに行われている．そして，パラメトリックスピーカという，超音波を利用することで超指向性のある音を出力できるデバイスが注目されている．パラメトリックスピーカの持つ特性を活用するためには，音声がどの領域でよく聴こえているのかを理解することが重要であると考えられるが，それを直感的に理解することは困難である．そこで，本研究ではiPad Proの裏面にパラメトリックスピーカを固定し，Augmented Reality技術を用いて音声の到達範囲を可視化した．パラメトリックスピーカの音声の到達範囲を音圧測定により調査し，測定結果から音声の到達範囲を表現する楕円錐体のオブジェクトを生成した．複数の周波数の音源に対して同様のオブジェクトを生成した後，音声を出力した際に対応するオブジェクトがiPad Proのカメラの映像に重ねて表示されるアプリケーションを実装した．このアプリケーションを用いて到達範囲の境界部分の音圧測定を行い，可視化領域が設定した閾値に沿っていることを確認した．

MAKOTO UNNO[1]　MANABU TSUKADA[1]　HIDEYA OCHIAI[1]　HIROSHI ESAKI[1]

1. 序論

近年，動画配信サービスや立体音響設備，Cross Reality(XR) などの普及や発展に伴い，視聴環境の多様化や高品質化が進んでいる．視聴環境に関する研究の一つとして，オブジェクトベースのメディアとインターネットを前提とした視聴空間の研究を行うSoftware Defined Media(以下，SDM)[1], [2] が挙げられる．

SDMとは，映像や音響システムのIPネットワーク化を背景に，これらの設備機能を抽象化して管理し，視聴空間をソフトウェア制御することを目的とした研究である．SDMの持つSDMアーキテクチャでは，意思決定を行うアプリケーションと実際の映像や音響の入出力を行うデバイスを引き離して扱っている．これにより，映像音響システムの構成を目的に応じて柔軟に変更することが可能になる．また，SDMアーキテクチャに基づく音声映像に関する試作システムが構築されている．そのシステムを利用して，LiVRation[3], [4] やSDM360^2 [5]，Web360^2[6] などの，映像や音声の新たな演出に関するアプリケーションが開発されている．

SDMで注目している視聴サービスに関する技術の一つとして，パラメトリックスピーカが挙げられる．これは，超音波の技術を用いることで音に鋭い指向特性を持たせることのできるスピーカであり，従来のスピーカと異なる特性を活かした利用方法が検討されている．ところで，音波は通常は目で見ることができないため，音がどの領域でよく聴こえているのかを理解することが難しい．しかしながら，パラメトリックスピーカの特性を活用するためには，それを理解することは非常に重要である．この問題はパラメトリックスピーカの活用を困難にしているだけでなく，その普及の妨げにもなっていると考えられる．

これらを踏まえ，本研究では，Augmented Reality(以下，AR) を利用して，パラメトリックスピーカから発せられる音波の到達範囲を可視化する．それによりパラメトリックスピーカの特性の理解を容易にし，その活用や普及を促すことが本研究の目的である．

本論文では，第2章で本研究で使用するパラメトリックスピーカについて説明する．第3章で，関連研究としてARを用いて音場を可視化した事例について述べる．第4章では，パラメトリックスピーカからの音声を可視化するために行った測定について述べ，さらに音声の到達範囲を可視化するために実装したアプリケーションの構成について説明する．第5章では，このアプリケーションを用いて再度

[1] 東京大学

実施した音圧測定の結果から，可視化の程度を評価する．第 6 章では，本研究の総括と今後の展望について述べる．

2. パラメトリックスピーカの特性と課題

パラメトリックスピーカとは，超音波の技術を用いることで音に鋭い指向特性を持たせることのできるスピーカである．通常のスピーカは低い周波数の音波を放射するため，回折効果の影響を受けやすく，音が拡散しやすい．一方，パラメトリックスピーカでは，高い直進性を持つ超音波を可聴波を用いて変調したものを空気中に放射し，それを空気中で復調している [7]．このようにして，可聴域の音波であっても超指向性を保持したまま伝搬することを可能にしている．

また，パラメトリックスピーカの特徴として，反射波も放射波と同様に鋭い指向特性を持つこと，その際の音像は反射位置に定位することが挙げられる．この特徴を示す例として，観測者の正面にあるパラメトリックスピーカが，天井に向けて音波を放射した場合を考える．すると，観測者はスピーカから放射された音波を直接観測するのではなく，天井で反射した音波を観測することで音を聴くこととなるため，天井から音が鳴っているかのように感じられる．

パラメトリックスピーカを活用することで特定の狭い範囲に限定して音を流すことが可能である．そのため，駅などの公共施設での注意喚起や博物館や観光地などでの展示物の説明や案内などといった活用例が考えられる．実際の活用事例として，清水寺の拝観入口に超指向性スピーカが導入されている [8]．

また，反射によって発生する現象を利用する案として，複数のパラメトリックスピーカからの放射波を室内の壁，天井および床に反射させてあらゆる方向に音像を構築することで，3D 音場を実現する方法が提案されている [9]．

パラメトリックスピーカの特性を活用することで，利用者の意図に応じた特定の範囲にいる観測者にのみ音を聴かせることが可能となる．しかし，そのためにはパラメトリックスピーカをどのように配置するかという点が特に重要になると考えられる．観測点のわずかな差異による音の聞こえやすさの変化が，通常のスピーカと比べて大きくなるからである．一方で，空気中の音波を目で確認することは非常に困難である．そのため，パラメトリックスピーカから音波がどのように出ているかを直感的に理解することは難しい．

パラメトリックスピーカを任意の場所に設置した際の音声の到達範囲を可視化することができれば，パラメトリックスピーカの設置や調整が容易となり，パラメトリックスピーカがより活用されやすくなると考えられる．

パラメトリックスピーカを任意の場所に設置した際の音声の到達範囲を可視化することができれば，パラメトリックスピーカの設置や調整が容易となり，パラメトリックスピーカがより活用されやすくなると考えられる．

3. AR を利用した音声の可視化

3.1 AR および HMD を用いた音場の可視化

AR 技術を用いて空間の音場や音の大きさの可視化を行っている例として，シースルーヘッドマウンドディスプレイ (以下，STHMD) を用いた音場情報の測定およびその可視化技術が挙げられる [10]．STHMD にはステレオカメラが装着されていて，マーカを感知するのに用いる．測定に用いるマーカは測定に用いる 4 点マイクと音場に取り付けてあり，前者はカメラと 4 点マイクの相対的な位置を把握するために用いられる．一方で，後者は音場から発せられる音の強さや方向を示すために用いられ，マーカに円錐型のオブジェクトを重ね合わせ，その大きさや色，向きによって音場の可視化を実現している．また，マーカを音源付近の広範囲に取り付けることで，音場の測定できる範囲も広範囲となる．

3.2 AR を利用した iOS 端末向けの音の可視化アプリケーション

前述の技術では，カメラとしての STHMD とは別にマイクやマーカを取り付ける必要があった．その一方で，「ミミガー AR」という，空間の音の大きさを測定し，その結果をマーカレス AR を用いて記録する，iOS 端末向けのアプリケーションがリリースされている [11]．測定を開始すると，測定結果が一定の時間間隔で画面の中央に，測定した音の大きさに応じた色でプロットされる．

前述の STHMD を用いての測定と比較すると，測定が手軽であるというメリットがある．一方で，マイクは端末に付属しているものを利用することとなるため，測定精度は低くなると考えられる．また，測定範囲はカメラの中央の一点となる．

4. 提案手法

前章では空間の音場や音の大きさを測定し，それらを表現する研究や製品を取り上げた．本章では測定する対象の音源がパラメトリックスピーカであることを踏まえて，AR を用いて音源を可視化する手法を提案する．また，その実現のために行ったパラメトリックスピーカの音圧測定について説明する．

4.1 手法の概要

本研究では，図 1 のように，パラメトリックスピーカをアプリケーションを実装したタブレット端末の背面に固定することとする．このようにして，端末を動かした際のその端末のカメラから音の可視化を図ることとする．本研究で用いるパラメトリックスピーカは Panasonic からの提供によるもので，二つのスピーカアレイから成る．このパラ

メトリックスピーカの基本特性を表 1 に示す．また，パラメトリックスピーカを固定するタブレット端末として，iOS 12.4.1 がインストールされた Apple iPad Pro 10.5 インチを用いた．この端末のカメラの画角は，水平方向が 63 度，垂直方向が 50 度である．

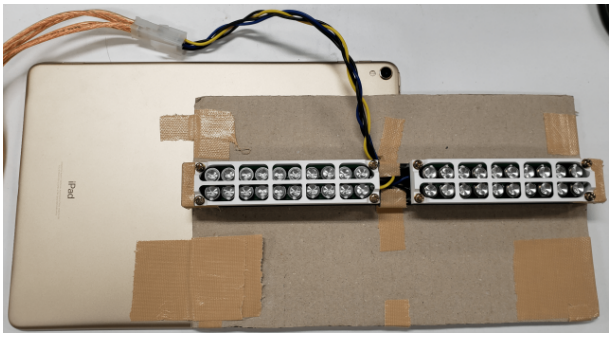


図 1: パラメトリックスピーカを iPad Pro に固定した様子.

表 1: 本研究で用いるパラメトリックスピーカの基本性能.

キャリア周波数	45 kHz
出力周波数帯	500 Hz-10 kHz
最大音圧	65 dB
外寸 (スピーカアレイ部分)	120 mm × 25 mm × 10 mm

ここで，本研究で実装したアプリケーションを図 2 に示す．以下，このアプリケーションの構成について説明し，その実現までの過程を述べる．

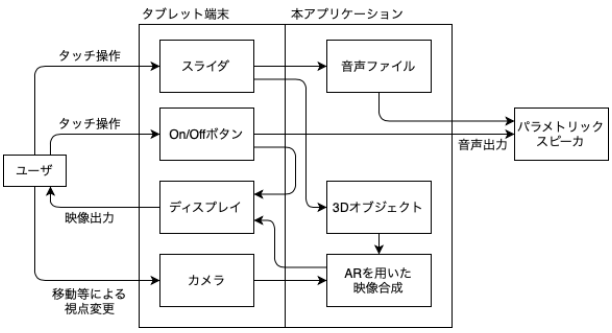


図 2: 本アプリケーションの構成図.

パラメトリックスピーカからの放射音のみを考えたとき，iPad Pro がどのような位置や角度にあっても，端末のカメラから見た放射音の相対的な位置の分布は変化しない．このことから，パラメトリックスピーカの音場の分布を一度測定し，観測した値を用いて生成した三次元のオブジェクトを AR を用いてカメラと連動した位置に配置することで，放射音の可視化は実現できると考えられる．これの実現のために，まずパラメトリックスピーカから放射される音の大きさについての測定を行った．

4.2 測定方法

パラメトリックスピーカから発せられる音の分布を，以下のように測定した．

まず，パラメトリックスピーカを取り付けた iPad Pro を三脚を用いて固定した．そのスピーカから正弦波の音源を出力し，音圧を図 3 の位置でそれぞれ測定した．また，音圧測定には，騒音測定アプリケーションをダウンロードしたスマートフォンを用いた．スマートフォンを固定した三脚を測定位置に移動させ，各点および各周波数で 15 秒間測定し，その平均値を測定結果とした．これにより，水平方向に対しての音圧を調査した．また，パラメトリックスピーカを 90 度回転させて測定することで鉛直方向の音圧測定を行った．

これらに加えて，異なる周波数の音源を用いての測定を行った．実験に用いたパラメトリックスピーカの出力周波数帯のうち，500 Hz から 4 kHz までの周波数の正弦波による音源を 7 種類 (500 Hz，700 Hz，1 kHz，1.4 kHz，2 kHz，2.8 kHz，4 kHz) 作成し，それぞれ測定した．

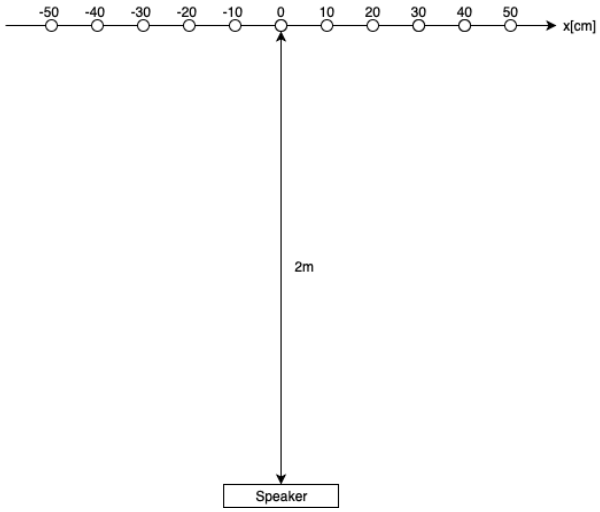
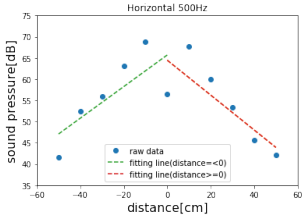


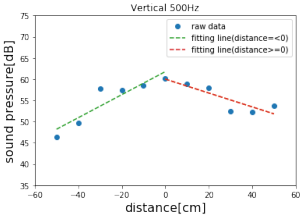
図 3: パラメトリックスピーカと音圧測定地点の位置関係.

4.3 測定結果

上記の測定を行った結果を図 4 から図 10 に示す．それぞれのグラフにおいて，青色プロットは測定値，緑色破線は $x \leq 0$ の測定値の近似直線，赤色破線は $x \geq 0$ の測定値の近似直線である．

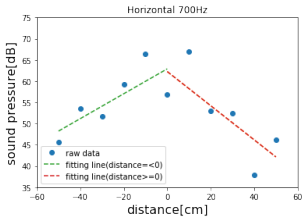
各周波数，各方向での測定において，図 3 の $x = 0$(以下，原点) の音圧が 60 dB 程度になるように音量調整を行い，その音量設定を維持してその他の点の測定を行った．一方，4 kHz の音を出力した際，10-15 秒間に 1 度の割合で一時的に音圧が 20dB 程度下がる現象が発生した．これにより，測定値が他の周波数の値よりも小さくなる傾向が見られた．

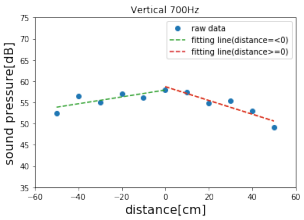




(a) 水平方向距離-音圧特性.　(b) 垂直方向距離-音圧特性.

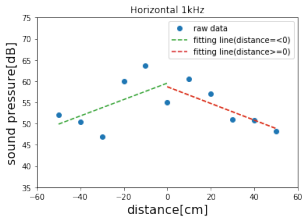
図 4: 500 Hz の音に対する距離-音圧特性.

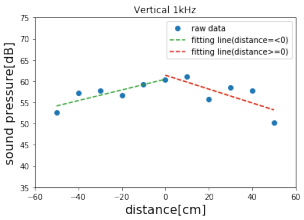




(a) 水平方向距離-音圧特性.　(b) 垂直方向距離-音圧特性.

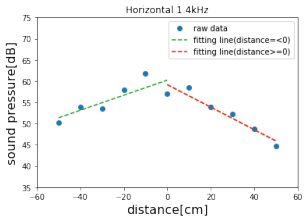
図 5: 700 Hz の音に対する距離-音圧特性.

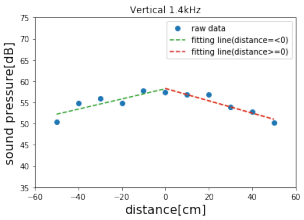




(a) 水平方向距離-音圧特性.　(b) 垂直方向距離-音圧特性.

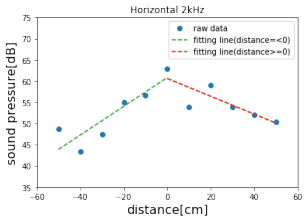
図 6: 1 kHz の音に対する距離-音圧特性.

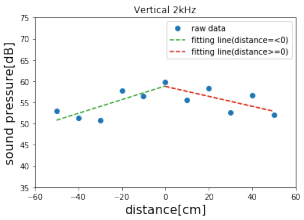




(a) 水平方向距離-音圧特性.　(b) 垂直方向距離-音圧特性.

図 7: 1.4 kHz の音に対する距離-音圧特性.



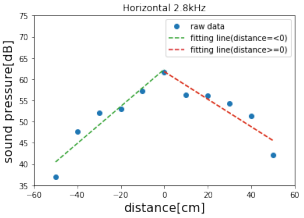


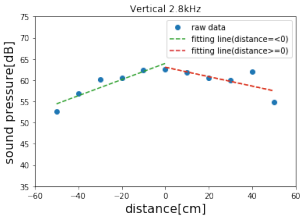
(a) 水平方向距離-音圧特性.　(b) 垂直方向距離-音圧特性.

図 8: 2 kHz の音に対する距離-音圧特性.

4.4　実装

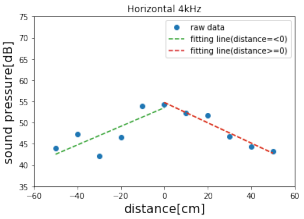
これらの測定結果から音声の到達範囲を表現するオブジェクトを生成することを考える．まず，オブジェクトの

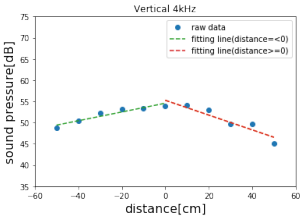




(a) 水平方向距離-音圧特性.　(b) 垂直方向距離-音圧特性.

図 9: 2.8 kHz の音に対する距離-音圧特性.





(a) 水平方向距離-音圧特性.　(b) 垂直方向距離-音圧特性.

図 10: 4 kHz の音に対する距離-音圧特性.

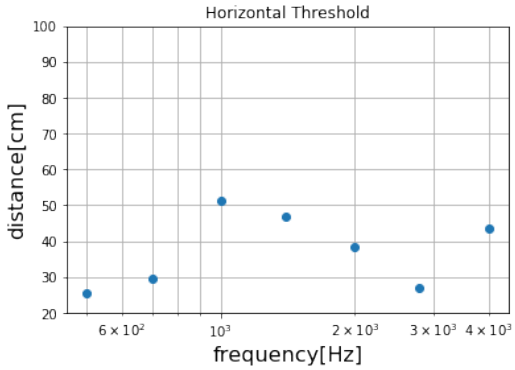
形状について，パラメトリックスピーカ上に頂点を取り，パラメトリックスピーカに平行かつ図 3 の x 軸を含む平面に底面を持つ楕円錐と推定した．今回利用するパラメトリックスピーカが直方体に近い形状をしていることがその理由である．

次に，楕円錐の底面を決定する．推定時の条件設定から，楕円錐の高さは底面の形状に関わらず 2 m となるため，底面を決定すれば生成する楕円錐が決定する．ここで，音圧の閾値を (原点における音圧)-10 dB に設定し，水平方向と鉛直方向に対して，それぞれの近似直線から閾値を取る座標の絶対値，すなわち原点からの距離を求めた．各周波数に対して，その値の平均値をプロットしたものを図 11 に示す．

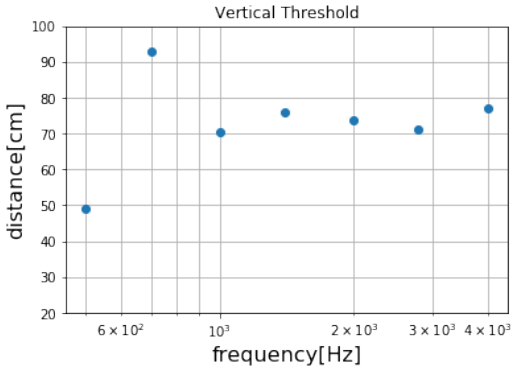
これらの値を元に楕円錐の長軸および短軸の長さを決定した．これにより楕円錐の形状が決定することができたため，各周波数の音声の到達範囲を表現するオブジェクトを生成した．さらに，それぞれの周波数の音源を出力した時に，対応するオブジェクトを iPad Pro のカメラ映像に重ね合わせるようなアプリケーションを実装した．これにより，オブジェクトが表示された領域の音圧が閾値以上であることを表現し，パラメトリックスピーカからの放射音の到達範囲の可視化を実現した．生成されたオブジェクトの例として，500Hz の音波の到達範囲を表現するオブジェクトを図 12 に示す．これらの実装には，Unity Version 2019.2.3f1 を用いた．また，音声の到達範囲を表現するオブジェクトは，Deform[12] を利用して Unity 内で生成した．

4.5　操作方法

ここで，実装したアプリケーションの操作方法を説明す



(a) 水平方向.



(b) 垂直方向.

図 11: 閾値を取る座標の絶対値の平均.

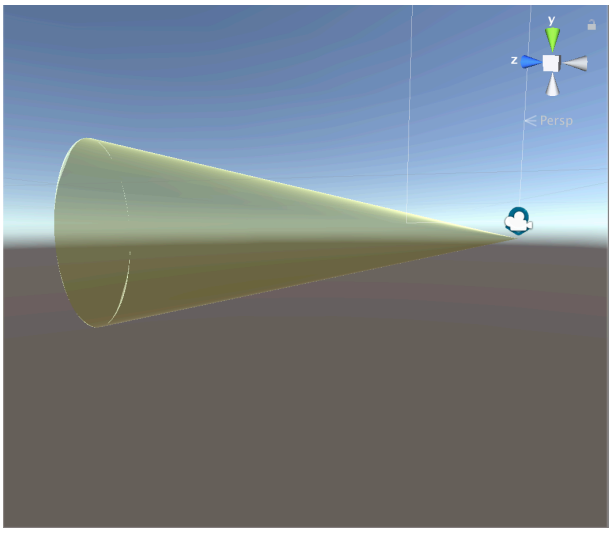


図 12: 500 Hz の音声の到達範囲を表現するために生成したオブジェクト.

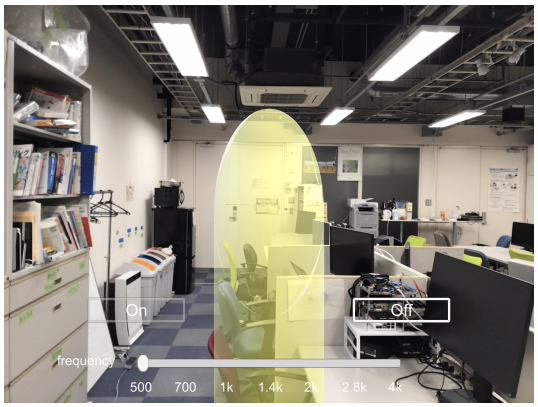


図 13: 本アプリケーションを用いて 500 Hz の音声を可視化した例.

る．本アプリケーション使用時の例を図 13 に示す．

本アプリケーションを起動すると，iPad Pro に搭載されたカメラからの映像と，On/Off ボタン，スライダが表示される．画面下部の On/Off ボタンは音声の再生や停止を行うと同時に，音声の到達範囲の表示，非表示を制御している．また，それらのボタンの下部にあるスライダは出力する音声の周波数を決定するものである．スライダ上の 7 点のいずれかにハンドルが位置する仕様となっており，これによりユーザは 7 つの異なる周波数の音源から 1 つを選択する．

画面下部の On ボタンを押すことにより，スライダの示す周波数の音源が再生される．それと同時に，それぞれの周波数に対応するオブジェクトが，頂点が iPad Pro のカメラの 7 cm 下にあるパラメトリックスピーカ上にあり，かつ底面がパラメトリックスピーカの面と平行になるように，カメラの映像に重ねて表示される．Off ボタンを押すと音声が停止し，音声の到達範囲が非表示となる．

5. 評価

水平方向および垂直方向において，iPad Pro の画面に表示された到達範囲と実際の音の分布が一致するかどうかをこのアプリケーションを用いて再度測定を行った．原点と，図 14 に示すような，音声の到達範囲を表現するオブジェクトの底面の長軸上および短軸上の境界部分の 4 点において，音圧測定を行った．ここで，境界部分の 4 点のうち，iPad Pro 側から見て左にある点を B_l，右にある点を B_r，上にある点を B_t，下にある点を B_b とする．各点における音圧測定の結果を表 2 および表 3 に示す．また，原点と境界部分での音圧の差を表 4 に示す．表 3 および表 4 において，700 Hz での B_b の欄が未測定となっているが，これは該当場所が画面の外部に表示されてしまうためである．

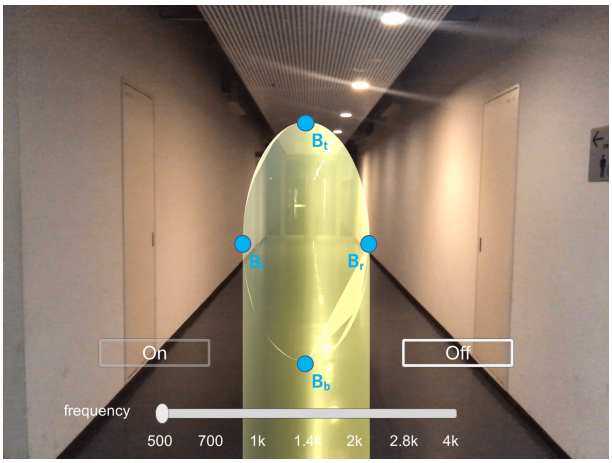


図 14: 音圧測定を行った境界部分 4 点のイメージ図.

表 2: 原点および境界部分の音圧 (水平方向).

周波数 [Hz]	音圧 [dB]		
	原点	B_l	B_r
500	59.9	50.8	50.1
700	58.6	50.0	50.0
1000	59.1	49.1	50.3
1400	57.1	46.8	46.0
2000	61.9	51.9	50.9
2800	59.5	50.0	49.3
4000	54.7	41.3	45.5

表 3: 原点および境界部分の音圧 (垂直方向).

周波数 [Hz]	音圧 [dB]		
	原点	B_t	B_b
500	62.8	51.9	51.8
700	57.4	38.0	未測定
1000	61.0	51.7	52.9
1400	62.9	53.2	52.3
2000	59.0	50.2	50.0
2800	60.3	49.0	45.6
4000	50.2	39.7	40.2

表 4: 原点と境界部分との音圧の差.

周波数 [Hz]	原点との音圧の差 [dB]			
	B_l	B_r	B_t	B_b
500	-9.1	-9.8	-10.9	-11.0
700	-8.6	-8.6	-19.4	未測定
1000	-10.0	-8.6	-9.3	-8.1
1400	-10.3	-11.1	-9.7	-10.6
2000	-10.0	-11.0	-8.8	-9.0
2800	-9.5	-10.2	-11.3	-14.7
4000	-13.4	-9.2	-10.5	-10.0

本研究では，測定結果と設定した閾値をもとに，それ以上の音圧となる領域を表すオブジェクトを生成することで音声の可視化を実現している．そのため，生成されたオブジェクトの境界部分では，音圧が閾値と等しくなると考えられる．今回の実装では，閾値を (原点における音圧)-10 dB と設定した．一方で，測定した延べ 27 点の境界部分の音圧のうち，原点の音圧との差が 8 dB 以上 12 dB 以下であった点は延べ 24 点であった．これに該当しない 3 点は，700 Hz での B_t，2.8 kHz での B_b，4 kHz での B_l である．このうち，700 Hz での B_t および 2.8 kHz での B_b に関して，閾値をとる座標を決定するための測定にて発生した測定誤差により，閾値をとる点までの距離が大きくなってしまった可能性が考えられる．第 4 章の測定において，測定値から近似直線を得た．閾値をとる点までの距離はこの直線の傾きの逆数に比例するため，特に直線の傾きが小さい傾向にあった垂直方向において，測定誤差が大きな影響を与えた可能性がある．また，4 kHz での B_l について，4 kHz の音源を出力した際に観測された，10-15 秒間に 1 度の割合で一時的に音圧が下がる現象が影響を与えた可能性が大いにあると考えられる．以上より，境界部分の音圧は閾値に対して概ね誤差 2 dB 以内に分布していると考えられる．

6. 結論

本研究では，あるパラメトリックスピーカの距離-音圧特性を測定し，その結果と AR を利用してパラメトリックスピーカからの音声の到達範囲を可視化する手法を提案した．パラメトリックスピーカを iPad Pro の裏に固定し，その状態でパラメトリックスピーカから 7 種類の周波数の音源に対して，水平方向，垂直方向に対して距離-音圧測定を行った．測定結果と設定した閾値をもとに楕円錐を生成し，対応する周波数の音源の出力と同時に，iPad Pro のカメラからの映像に重ね合わせることで可視化を行った．また，実装したアプリケーションを用いて音圧の測定を再度行うことにより，可視化領域が設定した閾値に沿っていることを確認した．

今後の課題として，パラメトリックスピーカからの反射音の可視化を行うことが挙げられる．現在の手法では，測定を元に生成したオブジェクトは，対応した周波数の音が出力される際にそのまま現実空間に重ねて表示されるだけである．反射波を可視化する手法の案の一つとして，iPad Pro のカメラが底面や床を認識した際に，その距離に応じて生成されたオブジェクトを加工して表示するという方法が考えられる．この手法について，AR 開発プラットフォームの水平面および垂直面検出機能を活用することで実現できると考えられた．しかし，それらの平面検出機能を実際に利用してみたところ，壁や床の色などの環境によって検出性能の低下が見られた．また，壁や床を検出できるような環境であっても，端末からの距離が 2 m ほど離

れるとほとんど検出が不可能になった．本研究では反射音の可視化には至らなかったが，パラメトリックスピーカの普及に伴って反射波を活用する事例は増加すると考えられるため，反射音の可視化を行う手法の需要は大いにあると考えられる．

本研究では，パラメトリックスピーカで再生することのできる音声ファイルは 7 種類に限定されている．本アプリケーションの応用の一例として，任意の音声に対して可視化を行うことが考えられる．ユーザの指定した音声ファイルをパラメトリックスピーカによって再生させながら，その音声データの周波数成分を解析し，代表値の周波数に対してその到達範囲を表示するといった手法が考えられる．

参考文献

[1] Manabu Tsukada, Keiko Ogawa, Masahiro Ikeda, Takuro Sone, Kenta Niwa, Shoichiro Saito, Takashi Kasuya, Hideki Sunahara, and Hiroshi Esaki. Software defined media: Virtualization of audio-visual services. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–7. IEEE, 2017.

[2] 塚田学, 小川景子, 池田雅弘, 曽根卓朗, 丹羽健太, 齊藤翔一郎, 粕谷貴司, 砂原秀樹, 江崎浩. Software defined media: 視聴空間サービスのソフトウェア制御. 日本ソフトウェア科学会学会誌『コンピュータソフトウェア』「ネットワーク技術」特集, Vol. 34, No. 3, pp. 37–58, 2017.

[3] Takashi Kasuya, Manabu Tsukada, Yu Komohara, Shigeki Takasaka, Takuhiro Mizuno, Yoshitaka Nomura, Yuta Ueda, and Hiroshi Esaki. Livration: Remote vr live platform with interactive 3d audio-visual service. In *IEEE Games Entertainment Media Conference (IEEE GEM) 2019*, pp. 1–7, Yale University, New Haven, CT, U.S., 2019.

[4] 粕谷貴司, 塚田学, 菰原裕, 高坂茂樹, 水野拓宏, 野村譲誉, 上田雄太, 江崎浩. インタラクティブな遠隔ライブ VR 配信プラットフォーム. 情処論文誌：デジタルコンテンツ (DCON) トランザクション, Vol. 7, No. 2, pp. 1–14, 2019.

[5] 塚田学, 菰原裕, 新居英明, 粕谷貴司, 高坂茂樹, 小川景子, 江崎浩. SDM360^2：インタラクティブ 3D コンテンツの自由視聴点再生. 情処論文誌：デジタルコンテンツ (DCON) トランザクション, Vol. 6, No. 2, pp. 10–23, 2018.

[6] Shin Kato, Tomohiro Ikeda, Mitsuaki Kawamorita, Manabu Tsukada, and Hiroshi Esaki. Web360^2: An Interactive Web Application for viewing 3D Audio-visual Contents. In *17th Sound and Music Computing Conference (SMC)*, Torino, Italy, 2020.

[7] 西浦敬信. パラメトリックスピーカを用いた音場再生技術. 日本音響学会誌, Vol. 71, No. 2, p. 89–94, 2015.

[8] 音羽山清水寺様 | 納入事例 | 指向性音響システム | 三菱電機エンジニアリング株式会社. http: //www.mee.co.jp/sales/acoustics/kokodake/case/case_detail08_2.html.

[9] 森勢将雅, 杉林裕太郎, 栗元総太, 西浦敬信. 音像プラネタリウム: 超音波スピーカを利用した 3 次元音場再生方式 (¡ 特集¿ 教育・訓練・協調). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 4, pp. 687–693, 2011.

[10] Atsuto Inoue, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, and Yusuke Ikeda. Visualization of 3d sound field using see-through head mounted display. In *ACM SIGGRAPH 2017 Posters*, pp. 1–2. 2017.

[11] エヴィクサー、新しい音響測定アプリ「ミミガー ar」をリリース〜arkit を活用し、見えない・聞こえない音のシームレスな可視化を iphone で実現〜—エヴィクサー株式会社- evixarinc. https://www.evixar.com/archives/8517.

[12] Github - keenanwoodall/deform: A fully-featured deformer system for unity. https://github.com/keenanwoodall/Deform.