パノラミックサウンド収音システムを用いた

2 次元音場再現性の評価

電気・化学専攻　医用工学領域　2281247　佐藤　渉
（主査：桐生昭吾教授　　副査：桃沢愛准教授，和多田雅哉教授）

1. はじめに

1.1. はじめに

VR 技術を活用した様々なエンターテインメントにおいて臨場感や没入感を表現する場合，音で方向や距離感を表現することがある．その手段の 1 つとして，2 次元的あるいは 3 次元的な音の広がりを収音し再生することで人々に臨場感を体験させることのできる空間音響技術が存在する．2 次元の空間情報を収音するには原理的に 3 点計測が必須となり，同様に 3 次元の空間情報を収音するには 4 点計測が必須となる．だが，一般的に普及しているステレオフォーマットでは同時に 3 チャンネル以上を扱うことができない．そこで，わずか 2 チャンネルで 2 次元の空間情報を扱うことのできる手法としてパノラミックステレオ方式[1,2]が提案されている．

提案システムでは 2 本の単一指向性マイクロフォンを片方は前に，他方は後ろに向けて，なおかつそれらを左右に仰角方向上向きに傾けている配置をすることで（図 1），2 次元の空間情報を扱うことができる．

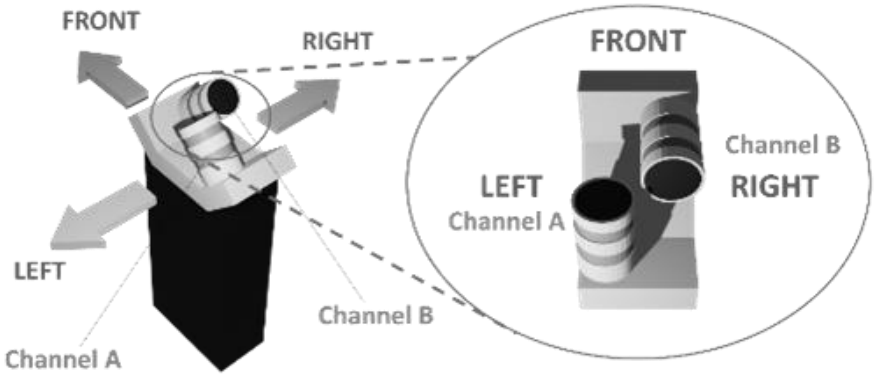

図 1：パノラミックステレオ収音システムの外観（左）とその上面図（右）

2. 研究目的

今回，自由音場および実環境での提案システムの 2 チャンネル間レベル差と 2 チャンネル間位相差が理論値通りとなるのかを検証することに加えて，提案システムを用いて 2 次元空間情報を収音し被験者に対してヘッドフォン再生して聴取実験を行い音源定位ができるかどうか検証することを研究の目的とした．

さらに，既存のステレオ技術では聴取者が定められた聴取点の空間音響しか聞くことができないといった課題に対して，本研究では複数の拘束条件を与えることでステレオ信号でも

2 次元聴取エリア内の聴取点を聴取者自身で自由に動かすことができる自由聴取点再生について提案している．そこで，提案手法で収音したステレオ信号を使い，聴取者による聴取点操作が可能か検証することも本研究の目的とした．

3. 2 次元ステレオ方式の原理

3.1. 2 次元平面内の空間音響計測

3.1.1. 音源方向によるチャンネル間レベル差の理論値

提案方式における 1 次元的な空間情報（前後）の推定方法はチャンネル間レベル差を利用している．単一指向性マイクロフォンの感度特性（図 2 左）はマイクロフォンの向いている正面 0°で最大，背面±180°で最小となる．提案システムではこの単一指向性マイクロフォン 2 本使ってその片方を前向きに，他方を後ろ向きに仰角 45°上向きで配置することで，音波の伝搬方向に依存したチャンネル間レベル差を生み出している．この 2 チャンネル間レベル差を利用して伝搬方向のうち前後方向の推定を行う．

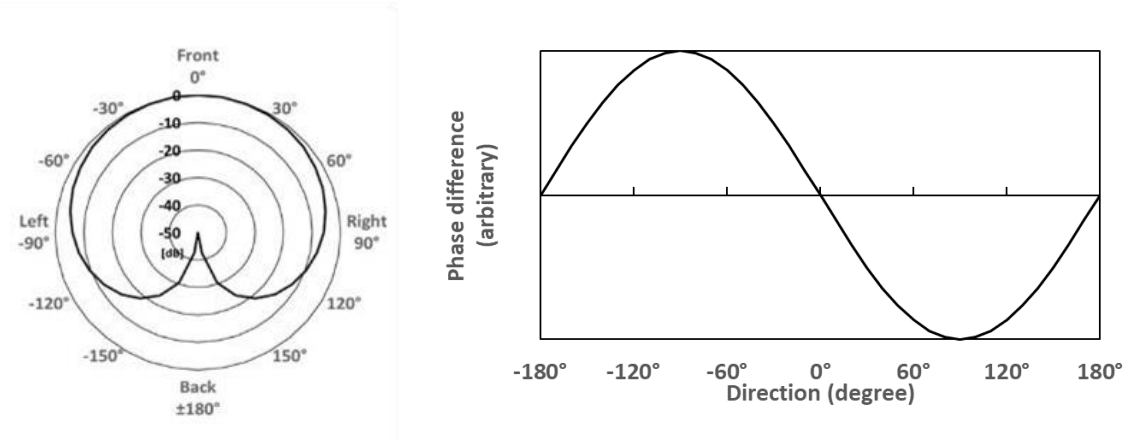

図 2：単一指向性マイクロフォンの理想的な指向特性（左）と
提案システムの 2 チャンネル間レベル差の理論値（右）

3.1.2. 音源方向によるチャンネル間位相差の理想値

伝搬方向のうち左右方向の推定には 2 チャンネル間位相差を使用する．提案システムでは 2 本のマイクロフォンに間隔 X（図 3 左）を設けて配置をしている．この間隔によって音波の伝搬方向に依存する 2 チャンネル間位相差（図 3 右）が生じる．具体的に提案システムの正面（0°）または背面（±180°）からの音に対してはチャンネル間の位相差は最小となる．一方，提案システムの側面（±90°）からの音に対してはそれぞれ正、または負に最大となることから 2 チャンネル間位相差は左右方向を推定する手がかりとなる．

図 2 右と図 3 右からわかる通り，2 チャンネル間レベル差と 2 チャンネル間位相差は互いに直交性を持つことから，周波数 bin 毎の 2 次元の空間情報の推定が可能となる．

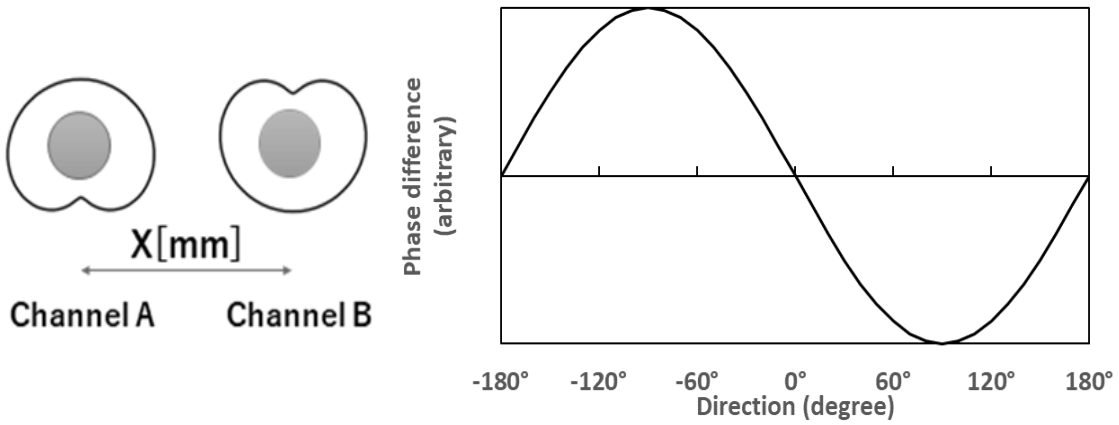

図 3：提案システムを上から見た時の各チャンネルのポーラパターン（左）と
提案システムの 2 チャンネル間位相差の理想値

3.2. 自由聴取点再生

近年発展がめざましいメタバースなどの映像技術では，ユーザがバーチャル空間内を自由に動き回ることができる．バーチャルではない実環境で録音したコンテンツにおいても，よりインタラクティブ性の高い操作を実現するには，聴取点を固定した再生手法だけではなく，聴取点を聴取者自身の意思で動かせることが望ましい．

そこで，2 次元空間音響再生における自由聴取点再生手法について検討した．

3.2.1. 空間音響推定

観測点における波の空間情報は，周波数 bin ごとの伝搬方向と伝搬速度であり，伝搬方向は水平角と仰角である．水平角は 2 チャンネル間レベル差と 2 チャンネル間位相差を併用することで推定できる．また仰角（の絶対値）が大きくなるほど 2 チャンネル間レベル差とチャンネル間位相差がともに小さくなることを利用すれば，2 チャンネル間レベル差と 2 チャンネル間位相差だけから仰角（の絶対値）も推定できる．しかし伝搬速度が速くなっても同様にチャンネル間差は小さくなるので，伝搬速度がわからない限り仰角を正しく突き止めることはできない．一方，さまざまな条件下で実際に周波数 bin ごとの伝搬速度を測定したところ，伝搬速度が $\frac{2c}{\sqrt{3}}$ (c は音速) をこえるのは稀なことを確認している．

そこで本研究では伝搬速度の違いを無視，すなわちすべて音速とすることで仰角の絶対値を特定した．しかし，提案システムの性質上仰角の符号を決定することはできないので，本研究では次項で述べるような拘束条件を与える．

3.2.2. 拘束条件

提案システムでは 2 次元の情報しか扱えず，伝搬方向の上下の判別，すなわち仰角の符号の判別ができない．そこで「すべての音源は計測点よりも下側に存在する」という拘束条件を与える（図 4 左）．これによって，仰角の符号は常に負と定められる．これは観測エリア，例えば部屋の天井付近に提案収音システムを設置する状況を想定するといえる．さらに，「すべての音源は同一 2 次元水平面内にあるもの」とする．この拘束条件を与えることにより，

それまで水平角と仰角という角度で表されていた伝搬方向を 2 次元平面上の座標，つまり点として扱えるようになる（図 4 右）.

伝搬方向が座標となったことにより，観測点から見た伝搬方向だけでなく，任意（仮想）の聴取点から見た伝搬方向も利用することができる.

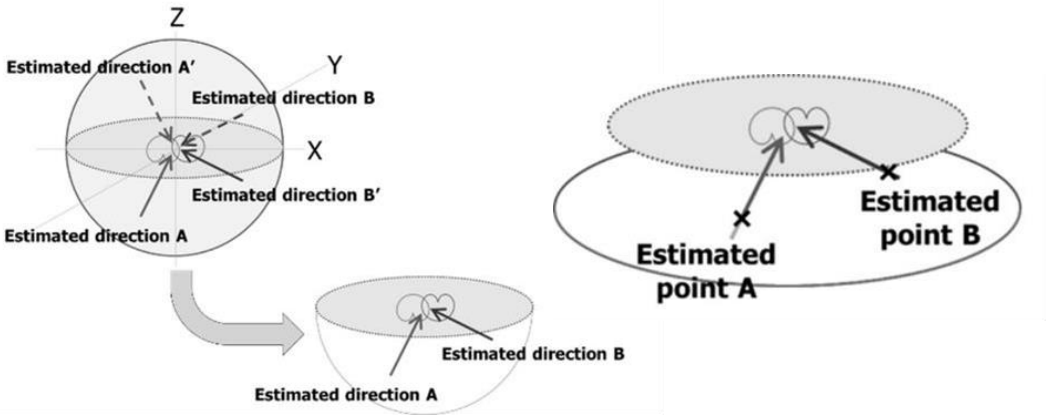

図 4：拘束条件 1 つ目「すべての音源は観測点よりも下側に存在」（左）と
拘束条件 2 つ目「すべての音源は同一平面に存在」（右）

3.2.3. 制約

伝搬方向の推定において伝搬速度の違いを無視しているため，推定には誤差が含まれる．この誤差は聴取点が観測点から離れるほど大きくなる.

また音源が多数ある状況で推定された伝搬方向はあくまで観測点における合成波の伝搬方向である．観測点と異なる聴取点では当然合成波の合成比率も異なるため，伝搬方向も違ってくる．特に聴取点が個々の音源の近傍になるとき，本来ならその音源からの直接波が優勢になるはずであり，本手法ではそれを再現することはできないので聴取点が音源近傍になると精度が下がる.

4. 各種実験方法とその結果

4.1. 自由音場および実環境下でのチャンネル間差計測

提案システムの空間特性が理論値通りになるか調査することを目的とし，等方性かつ均質の媒質中での境界の影響を無視できるような環境（自由音場）と残響のある実環境下で 2 チャンネル間レベル差および 2 チャンネル間位相差を実測し検証を行った.

4.1.1. 方法

検査信号は量子化 bit 数 16bit，サンプリング周波数 44.1kHz，1 周期のサンプル数が 512 の Time stretched Pulse 信号を 36 回連続で繰り返す信号を使用した．測定環境は自由音場とされる産業技術総合研究所の無響室と残響の影響が無視できないような環境である東京都市大学世田谷キャンパス 1 号館地下 1 階の教室を選定した．測定手順については，部屋の中心に提案システムを配置しその同一水平面上に 100[cm]の間隔を空けてスピーカを配置した．スピーカからは TSP 信号を再生，提案システムで収音を実施した．その際，スピーカの位置は固定し，提案システムを 10°毎に回転させて計 36 方向分の収音を実施した.

評価方法として TSP 信号は周期的に繰り返し提示されていたが，冒頭部分と最後部分を除く中央付近の 1 周期分の波形データを抽出する．抽出した波形データに対し，表計算ソフトを用いて FFT を行い，周波数 bin 毎の振幅情報と位相情報を取得し，2 チャンネル間のレベル差と位相差を算出した．

4.1.2. 実験結果と考察

提案システムを用いて自由音場および実環境下で収音を実施した時の 2 チャンネル間のレベル差（図 5）と 2 チャンネル間の位相差（図 6）を示す．図を見やすくするため 1000[Hz] 毎の 6 帯域に分けて示しており，一本一本のプロットが各周波数 bin に対応している．またグラフの縦軸は図 5 ではチャンネル間レベル差，図 6 ではチャンネル間位相差とし，横軸は図 5，図 6 ともに提案システムからみた音源の方向を表している．図 5 から各周波数帯域において理論値通り正面 0°で正に最大，背面 180°で負に最大となる傾向が見られ，図 6 より低周波数帯域を除く広い帯域で理論値通りとなり 2 チャンネル間差を利用した伝搬方向の推定が可能であることが示された． だが，低周波数帯域において理論値とは異なる値となりマイクロフォン自体の位相特性を計測するといったさらなる検討が必要である．また，図 6 の実環境での結果では自由音場での結果と比較すると低周波数帯で乱雑になっており，低域ほど残響の影響を受け結果に反映されたと推測できる．

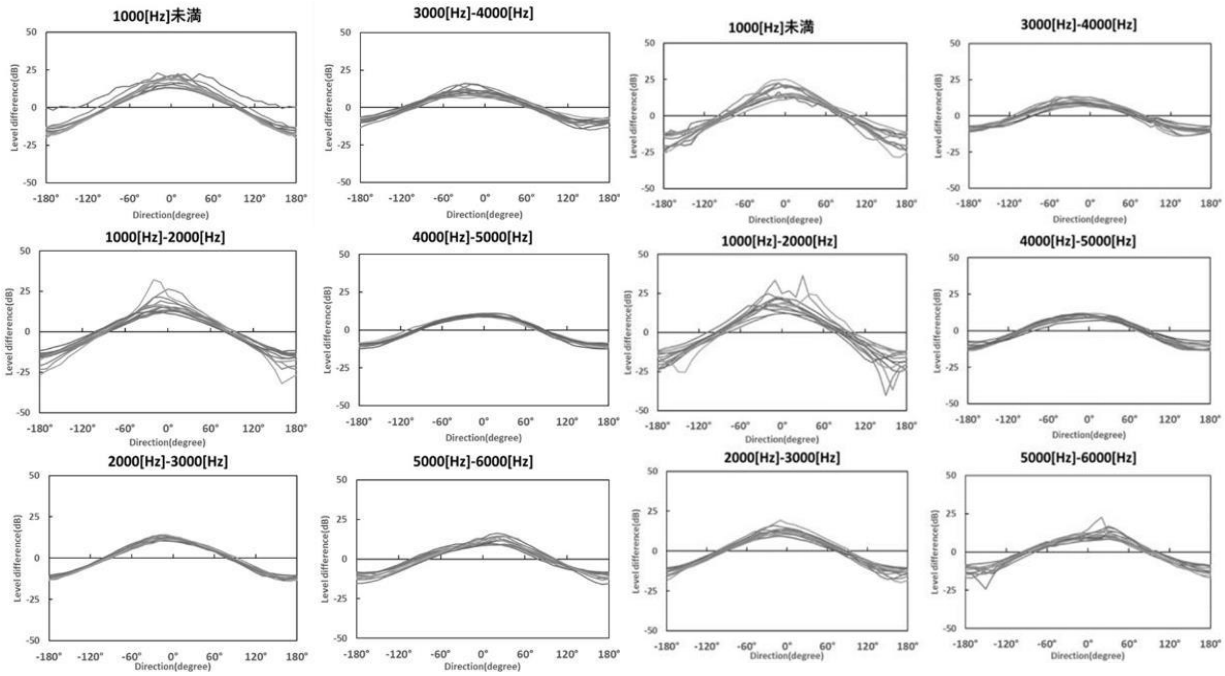

図 5：提案システムで収音した時のチャンネル間レベルの結果

左上より 6 つの帯域は自由音場での結果，右上より 6 つの帯域は実環境での結果である

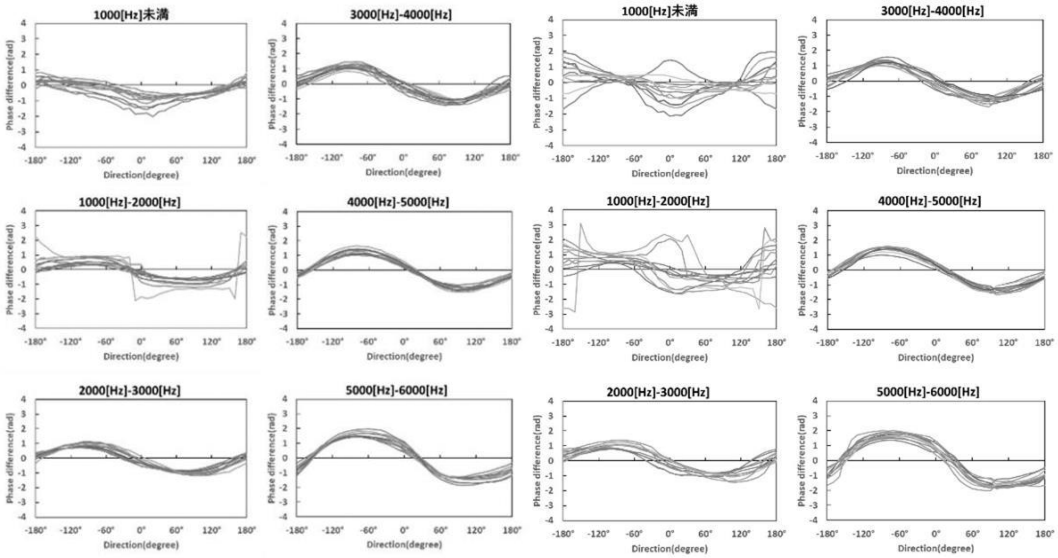

図 6：提案システムで収音した時のチャンネル間位相差の結果

左上より 6 つの帯域は自由音場での結果，右上より 6 つの帯域は実環境での結果である

4.2. 音源定位実験

4.2.1. 実験用音源の制作方法

音源定位実験用にフリー音源サイト[3]からライオンの音声をダウンロードし利用規約に則って本研究で利用した. 収音場所は東京都市大学世田谷キャンパス 3 号館会議室を選定した. 使用したデバイスの配置方法として会議室の中心に提案システムを配置し，そこから 100[cm]離した位置にスピーカを配置した． その際，スピーカの位置は固定し，音源を提示する毎に提案システムを 30°回転させ計 12 方向分の収音を実施した.

4.2.2. 音源定位実験方法

被験者はパソコンの画面（図 7）に表示された仮想聴取エリアのイメージを見ながら提案方式で再現した信号をヘッドフォン再生で聴取した．このとき，被験者は聴取点を上下軸まわり回転させながら信号を聴取し，パノラミックステレオ収音システムに対して異なる方向から到来するライオン音声の方向を推測し，予め提示された被験者の頭の周り 360°を 12 分割した方向（30°毎）の選択肢の中から回答を行った.

図 7：音源定位実験時のパソコン表示画面例

4.2.3. 結果と考察

図 8 は音源定位実験結果をバブルチャートにしたものであり，横軸は音源を提示した方向で縦軸は被験者が知覚した音源の方向，バブルの大きさは被験者人数（被験者の回答数）に比例している．図 8 より音源を提示した時の位置と被験者が知覚した音源の方向に強い相関が見られ，相関係数は r = 0.9985 であった．これは，提案システムで収音した時の音源の方向と，提案システムが推定した音源の伝搬方向が概ね一致しており，被験者による水平角の判定ができていたということである．

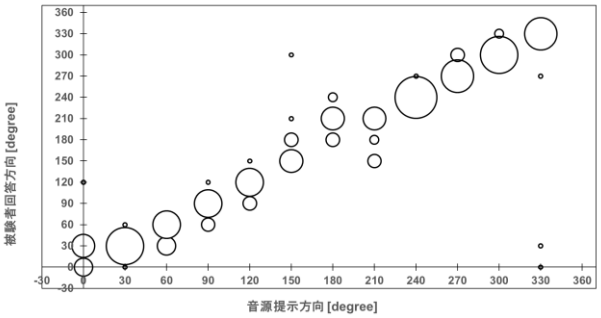

図 8：音源定位実験結果

4.3. 音源探索実験

4.3.1. 実験用音源の制作

音源の収音場所として東京都市大学世田谷キャンパス 3 号館会議室を選定した．音源制作時の配置方法は提案システムを鉛直下向きに 1 台配置，机上にスピーカを提案システムから見て左側に配置しスピーカからライオンの音声を提示した．机上から提案システムまでの高さは 55[cm]，提案システムの真下にある音源と同一水平面のポイントからの距離は 50[cm] である．

4.3.2. 音源探索実験方法

作成した実験用音源を用いて聴取実験を行った．被験者はパソコンの画面に表示された仮想聴取エリアのイメージ（図 9）を見ながら,提案方式で再現したライオンの音声をヘッドフォン再生で聴取した．このとき,被験者はマウスを使用して仮想聴取エリア内の定められた範囲内で自由に聴取点移動とパンニングが許可されており，ライオンの音声がどの点から聞こえるか回答をした．

図 9：音源探索実験時の表示画面

4.3.3. 結果と考察

音源探索実験結果を図 10 に示す．図 10 中の数字のある座標の位置は被験者が知覚した音源の位置であり，数字の大きさは被験者の回答に比例し合計人数は 7 名である．被験者に対し音源探索実験の感想を聞いてみたところ「図 10 中の位置に近づくほど音源の位置が分からなくなってしまった」といった意見が挙がった．この意見の考えられる理由として，暗騒音の影響と認知心理学上の問題点が挙げられる．

今回実験用音源の収音を実施した場所が防音室などではなく一般的な会議室であり，暗騒音が十分に低くなかったため，音源が本当に一つとは言えず合成比率の問題が生じてしまったのではないかと考えられる．次に認知心理学上の問題として，音源が明らかに聴取点よりも右または左にあるときには明確な両耳間差が生まれるので知覚上はっきりと定位感が生じるのに対し音源位置と聴取点が重なるあるいは近づくと，両耳間差がなくなり定位感を感じにくくなってしまったと考えられる．

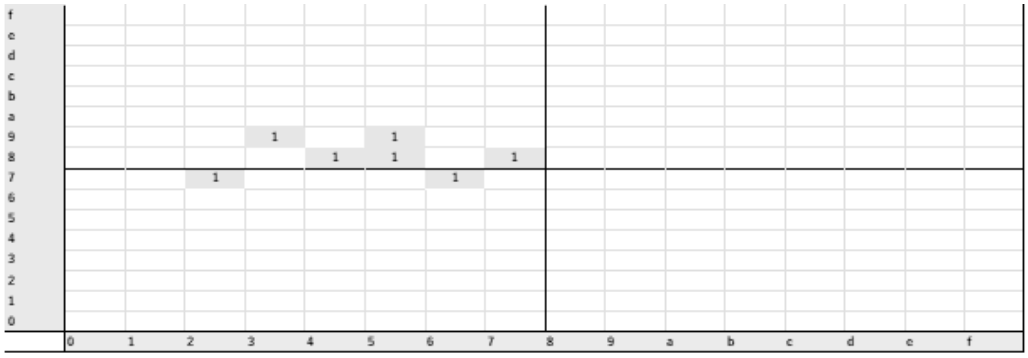

図 10：音源探索実験結果

5. まとめ

近年重要視されている没入感や臨場感のある音の再現がステレオフォーマットに対応したわずか 2 チャンネルのマイクロフォンとわずかな拘束条件を満たすだけで可能である．この提案手法が一般的に普及すれば現状の 2 次元の空間音響再生を行うために必要な設備の大幅なコストダウン等が見込まれ，空間音響が VR を活用したエンターテインメントに加えてより多くの場面や多くの人に使われ今以上に身近なものになることが想定される．

6. 参考文献

[1]堀地　悠矢,“2 本のマイクロホンによる 2 次元空間音響情報の収音･再生に関する研究”，東京都市大学，卒業論文, pp.4-25　(2020)

[2]藤原　汐里，“パノラミックステレオ信号のマルチスピーカ再生に関する研究”，東京都市大学，卒業論文，pp.25-26　(2021)

[3] 効果音ラボ - フリー、商用無料、報告不用の効果音素材をダウンロード，https://soundeffect-lab.info/ (最終アクセス；2024 年 1 月 8 日)