

# 超音波スピーカによる移動音源の実現と 視覚補助による定位性能の向上(2) —音像の移動範囲の拡張—

Implementation of Moving Sound Source with Parametric Loudspeakers and  
Enhancement of Its Localization Performance with Visual Assistance (2)  
---Extending the Moving Range of Sound Image---

伊藤仁一, 森勢将雅, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行

Yoshikazu Ito, Masanori Morise, Takanobu Nishiura, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura

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

**Abstract:** We develop an MR system that merged the real and virtual worlds in both the audio and visual sense. In this study, we suggested the method to realize the moving sound source when using "Acoustic Planetarium" as an audio presentation. This method is to interpolate the sound image position between multiple sound images on reflecting points which located by parametric loudspeakers, and showing the sight information at the sound image position. In this report, we implemented the method between two points and three points, and performed the experiments of localization to evaluate the effectiveness. As a result, performance of the sound localization improved by showing the sight information. Therefore, the effectiveness of this method was confirmed.

**Key Words:** Mixed Reality, Audio and Visual Senses, Moving Sound Source

## 1. はじめに

現実世界と仮想世界を継ぎ目なく実時間で融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術は, 人工現実感 (Virtual Reality; VR) を発展させたものであり, 盛んに研究が行われている. 一般的に, MR の研究では視覚的な融合が主であるが, 我々は視覚的 MR だけでなく聴覚的 MR を実現し, 視覚・聴覚両面で現実世界と仮想世界を矛盾なく融合する視聴覚併用 MR システムとして, 「2×2 方式視聴覚併用 MR システム」を研究開発した[1].

現在, 我々は従来の視聴覚併用 MR システムの音像提示方式であるバイノーラル再生方式よりも, ヘッドホンが不要で複数人が同時に体験可能となる新しい音像提示方式である「音像プラネタリウム方式」[2]を導入した視聴覚併用 MR システムの実現を目指している. この方式はスポットライトのように狭い範囲に音を放射し, 壁面に反射させても指向特性を失わない超音波スピーカの性質を活かすことにより, 部屋の中央に筐体を置くだけで空間中の任意の場所に音像を定位させるというものである.

しかし, 音像プラネタリウム方式を用いた際, 超音波スピーカによって提示された音像は反射面に構築されるため部屋の壁面や反射板などの位置による制約を受けてしまう. そのため, 超音波スピーカの放射方向を変更せずに任意の場所の移動音源を提示することは困難である. そこで, 本研究では音像プラネタリウム方式における移動音源

を実現する方法を提案するとともに, これを受聴者の前方2点間および3点間に適応し実験を行うことで, その有効性を確認する.

## 2. 移動音源の実現方法

### 2.1 提案手法

音像プラネタリウム方式において, 音像を移動させる場合, 超音波スピーカの放射方向を変えることで, 任意の位置に音像を構築することも可能である. しかし, 物理的にスピーカ方向を制御すると駆動音が発生してしまうことやリアルタイムに放射方向を変更できない可能性が考えられる. そのため, 本稿ではスピーカの方向は変えずに, 複数の反射面に放射する音の音圧レベルを変更するだけで, あたかも音像が反射面間を移動するように受聴者に知覚させる方法を検討する.

本研究では, 複数の反射面は受聴者を囲むように反射板を配置することで構築し, その反射板の中心を頂点とする多面体の平面上を移動する仮想音源の実現を目指している. このとき, 音像位置の補間を3つの反射板の中心を頂点とする三角形の平面上に対して行い, この3点での補間を複数組み合わせることによって多面体の平面上に仮想音源を移動させる.

2台の超音波スピーカを用いたステレオ再生については研究が行われており, 音が両耳に到達するまでの時間差やレベル差を付与したステレオ再生では定位感が得られ

ることがわかっている[3]. そのため, 超音波スピーカを用いてもパンによる音像位置の補間が可能であると考えられる.

しかしながら, 直接音ではなく反射音を用いていることや 3 台の超音波スピーカを用いた音像位置の補間では, 反射面間の音像位置を補間するのみでは十分な定位性能が得られないことが予想される. そこで, 本研究では仮想音源の位置に MR による視覚情報を提示することで定位性能の向上を図る.

本稿では, 2 点間での移動音源の実現として, 受聴者の前方の左右および上下 2 点間に, 3 点間での移動音源の実現として, 受聴者の前方に正三角形の平面を構築するように反射板を配置し, 超音波スピーカから放射される音の伝達経路の距離が一定になるようにするため, まずは筐体を用いず複数の超音波スピーカを用いて本手法を実装する.

## 2.2 音の補間方法

本研究では受聴者の前方に複数の反射板を配置し, その反射板間において音圧レベル差を用いた音像位置の補間処理を実装する. 超音波スピーカから音を放射することで各反射板の反射面上に構築される音像の音圧レベルを調節し, 反射面間の音像位置を補間する. 2 枚の反射板を使用した 2 点間での音像位置の補間は, 仮想音源の位置と各反射板の中心位置との距離により算出される比によって, 各反射板の位置での音圧レベルを調節する. このとき, 音波のエネルギー和が一定になるように考慮している. これは, 単純に左右の音波の振幅の和が一定になるように振り分けてしまうと音像が中央に定位したときに, 聴覚上の音量が下がってしまうという問題[4]を解決するためである.

図 1 (a) で示した仮想音源の位置  $P$  と 2 枚の反射板の中心位置  $A, B$  での入力信号の増幅率を  $S_1, S_2$  としたとき, 補間式を,

$$S_1 = \sqrt{\frac{PB}{AB}} \quad (2.1)$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{PA}{AB}} \quad (2.2)$$

と定義する. また, この仮想音源の位置と反射板の位置の距離により算出される比による補間式は

$$S_1 = \sqrt{\frac{PA'}{AA'}} \quad (2.3)$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{PB'}{BB'}} \quad (2.4)$$

$$S_3 = \sqrt{\frac{PC'}{CC'}} \quad (2.5)$$

と定義され, 三角形の平面である 3 点間での音像位置の補

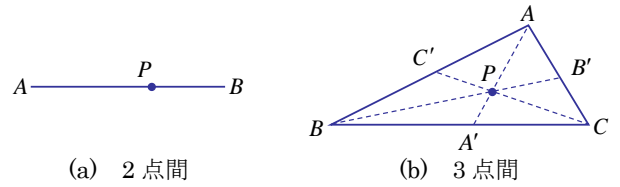


図 1 音像位置の補間

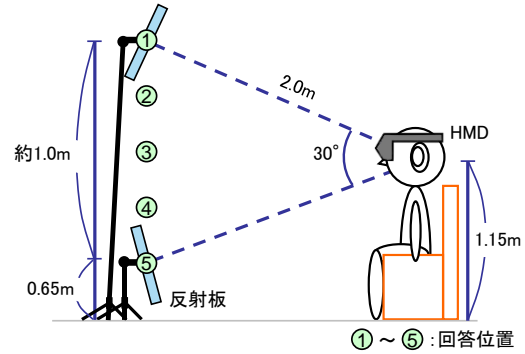


図 2 実験環境

間にも応用可能である (図 1 (b)). なお,  $P$  は仮想音源の位置を,  $A, B, C$  は 3 枚の反射板の中心位置を,  $A', B', C'$  は各頂点と仮想音源を結ぶ直線と対辺との交点を,  $S_1, S_2, S_3$  は  $A, B, C$  での入力信号の増幅率を表す.

## 2.3 システム構成

構成は大きく分けて視覚的 MR の処理ならびに MR 空間を管理する視覚情報生成兼 MR 空間管理処理部と聴覚的 MR を処理する聴覚情報生成処理部の 2 つの処理部からなる[5]. 本システムでは聴覚的 MR を提示する際に, 超音波スピーカと反射板を利用する. 反射板には透明のアクリル板 (500mm×500mm×5mm) を使用する.

## 3. 2 点間での実験

### 3.1 実験の目的と準備

視覚情報 (CG) を提示することによる効果を確認するため, 音像の定位性能の確認実験を行う. 2 点間の移動音源の実現として, 左右 2 点間および上下 2 点間に提案手法を実装し, 実験を行う.

実験環境は 2 台の超音波スピーカと 2 枚の反射板を用いて構築する. 左右 2 点間の実験では左右に配置された反射板間を, 水平方向のみに移動する仮想音源を実装した[5]. 上下 2 点間の実験では図 2 に示すように上下に配置された反射板間を鉛直方向のみに移動する仮想音源を実装した. 超音波スピーカの配置は左右 2 点間の実験と同じで被験者の左右 1.0[m] の距離, 高さ 1.15[m] のところに配置した. 各反射板位置での音圧レベルは, ホワイトノイズを用いて被験者の頭の位置で約 60[dB] となるように調整する.

実験で使用したシステムのサンプリング周波数は 96[kHz], フレーム周期は 85[ms], 映像の処理速度は約 60[fps] である. 実験環境は暗騒音 48[dBA] のオフィス環境で, 被験者は正常な聴力を持つ学生 10 名である.

### 3.2 実験内容

被験者を椅子に座らせ, 椅子の高さを調節し耳の高さを

1.15[m]に合わせた後、2枚の反射板間に仮想音源を移動方向や移動速度などの条件を変えランダムに提示し、移動の開始位置と終了位置を回答させる。実験中、被験者には正面を向いたまま頭を動かさないように指示する。回答位置は反射板間を4等分にした5通りで、左右2点間では左から、上下2点間では上から順に①～⑤の番号を付ける。被験者には実験前に実際に①～⑤からの音を教示する。

提示する仮想音源の移動パターンは、①から⑤、⑤から①、①から③、③から①、③から⑤、⑤から③の6種類で、移動速度は0.5[m/s]、1.0[m/s]の2種類である。音源はヘリコプタのプロペラ音とホワイトノイズの2種類で、プロペラ音にはヘリコプタのCGを、ホワイトノイズには灰色の球のCGを視覚情報として提示する。また、視覚情報なしでも同様に試行し、計48種類の試行を1セットとして2セット行う。被験者には事前に予備実験を実施し、視覚情報のみを頼りに音像の移動を回答していないことを確認する。

### 3.3 実験結果

定位実験の全正答率の平均を図3に示す。正答率は、被験者が回答した開始・終了位置の両方が合っている場合を正答として算出している。全体として左右2点間においては視覚情報がない場合は46.9%、視覚情報がある場合は75.4%の正答率となっており、上下2点間においては視覚情報がない場合は40.2%、視覚情報がある場合は79.3%の正答率となっている。

また、音像の正答位置と被験者が回答した位置のずれについても集計を行った。すべての被験者の各提示パターンにおける開始・終了それぞれの位置でのずれの平均を算出し、仮想音源の全提示パターン（全12パターン）のずれの平均を求めた（図4）。各提示パターンにおいて、開始位置でのずれと終了位置でのずれを合計したものをその提示パターンでのずれとして算出している。なお、ずれは絶対値で集計しており、例えば、正答位置が③の場合に被験者の回答が②であっても④であってもずれは1として

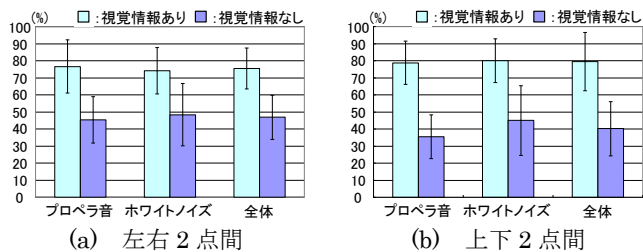


図3 正答率

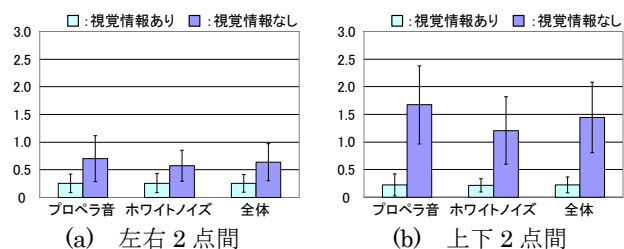


図4 回答のずれ

いる。また、ずれの幅1目盛は2つの反射板間を4等分した長さであり、左右2点間では約0.375[m]、上下2点間では約0.25[m]である。

### 3.4 考察

正答率に注目すると、全体として視覚情報がある場合では視覚情報がない場合よりも正答率が向上している。グラフを見ると上下2点間では左右2点間よりも正答率が大きく向上している。また、全提示パターンのずれの平均のグラフを見ても、視覚情報がある場合では視覚情報がない場合よりもずれが小さくなっている。視覚情報がない場合、全体として上下2点間のずれは左右2点間に比べて小さくなっているのに対し、視覚情報がある場合では、左右2点間のずれよりも僅かだが小さくなっている。これらから、視覚情報を提示することによる効果は左右よりも上下の音像知覚に大きく影響を与えていると考えられる。この回答のずれに関して、移動速度別に集計した結果、左右および上下とも移動速度が0.5[m/s]のときは1.0[m/s]のときよりもずれが小さくなっていた。そのため、移動速度が速い場合よりも遅い方が良好に補間可能であると考えられる。また、全ての結果の視覚情報の有無に対してt検定を行った結果、有意差 ( $p < 0.01$ ) が見られたため、提案手法は有効であると考えられる。

## 4. 3点間での実験

### 4.1 目的と準備

2点間での実験同様、音像の定位性能の確認実験を行う。3点間での移動音源の実現として、本稿では正三角形の平面上に提案手法を実装し、実験を行う。

実験環境は3台の超音波スピーカと3枚の反射板を用いて構築する。反射板および超音波スピーカの配置を図5に示す。上下2点間での実験との配置の違いは、下の反射板が左右2枚に増えている点と超音波スピーカから被験者までの経路長を同じにするため超音波スピーカの配置が異なっている点であり、反射板により構成された正三角形の1辺の長さは約1.2[m]である。三角形の平面上ならば自由に仮想音源を移動させることが可能だが、本実験では上の反射板の中心位置から鉛直方向にのみ移動させ、上下2点間での実験との比較を行う。

### 4.2 実験内容

2点間での実験と同様に被験者には仮想音源の移動を

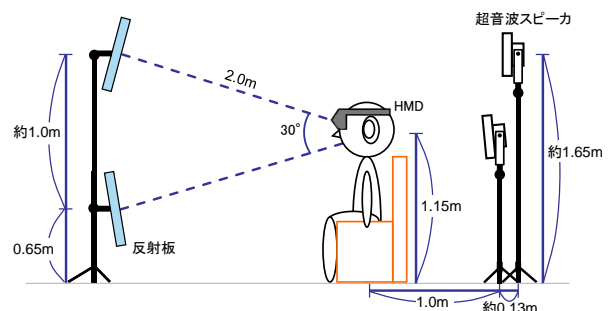


図5 反射板および超音波スピーカの配置

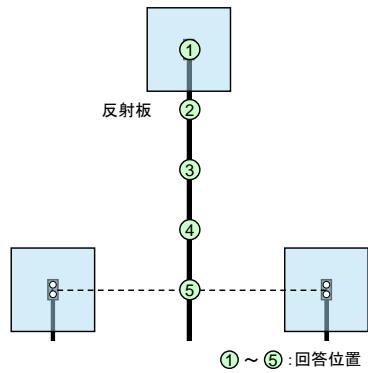


図6 回答位置

回答させる。内容や条件は上下2点間での実験と同様である。ただし、回答位置は、上の反射板の中心位置とその垂線と下2枚の反射板の中心位置を結ぶ直線との交点を4等分した5通りで、上から順に①～⑤の番号を付ける(図6)。被験者は2点間での実験と同じ正常な聴力を持つ学生10名である。

#### 4.3 実験結果と考察

2点間での実験同様、正答率と回答のずれの平均を求めた(図7)。正答率は、全体として視覚情報がない場合は42.1%、視覚情報がある場合は80.8%となっており、視覚情報を提示することで正答率が向上している。回答のずれについても、視覚情報がある場合では視覚情報がない場合よりもずれが小さくなっている。この回答のずれに関して2点間での実験同様、移動速度別に集計を行った。その結果、移動速度が0.5[m/s]のときでは1.0[m/s]のときよりもずれが小さくなっており、ずれの大きさも上下2点間での実験結果とほぼ同じであった。さらに、正答位置ごとに仮想音源の全提示パターンの回答のずれを集計した結果、2点間の補間音である回答位置⑤でのずれの大きさは視覚情報がない場合では、上下のときよりも大きくなっていった。これらから、視覚情報を提示することの効果を確認できる。また、全ての結果の視覚情報の有無に対してt検定を行った結果、2点間での実験と同様に有意差( $p < 0.01$ )が見られたため、提案手法は3点間においても有効であると考えられる。

3点間での補間は2点間での補間よりも定位性能が低下すると予想されたが、上下2点間での実験結果と比較しても、正答率・回答のずれの両者ともほとんど同じ値が得られた。そのため、反射板を3枚、超音波スピーカを3台用いた3点間での補間も2点間と同様に有効であると考えられる。また、被験者からのコメントで回答位置①では1点から音が提示されるのに対し、回答位置⑤では2点から同時に音が提示されているため、上下2点間での実験よりも仮想音源の移動を回答しやすかったとあり、これは正答率が僅かに大きくなっている原因のひとつであると考えられる。しかし、分散が大きくなっているため、個人差による影響が大きいと考えられる。

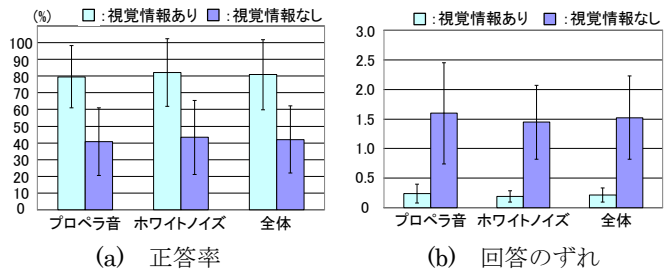


図7 3点間での実験結果

## 5. むすび

本稿では、視聴覚併用MRシステムにおける聴覚的MRの提示方式として、音像プラネタリウム方式を用いた際の移動音源の実現方法を提案するとともに、この提案手法を複数の超音波スピーカ用いて受聴者の前方2点間および3点間に実装し、その有効性を評価するため、定位性能を確認する実験を行った。結果、2点間においても3点間においても、視覚情報がある場合では視覚情報がない場合よりも正答率が向上していた。また、回答のずれを見ても視覚情報がある場合では視覚情報がない場合よりもずれの大きさが小さくなっており、視覚情報を提示することによる効果を確認できた。そして、全ての結果の視覚情報の有無に対してt検定を行った結果、有意差( $p < 0.01$ )が見られたため、提案手法は有効であると考えられる。

また、今回の音像位置の補間では従来法[4]に基づき音波のエネルギー和が一定になるように考慮して実装したが、音像を主観的に等速で移動させるための補間式について今後検討していくことが考えられる。

今後は3点間において、仮想音源を様々な移動させた場合や正三角形以外の平面を構成した場合の定位性能の評価を行うとともに、2点間において提案手法による移動音源を実現可能な限界の距離を調べていく予定である。

**謝辞** 本研究の一部は、科研費・基盤研究A「視聴覚併用複合現実空間の表現力向上に関する研究」による。

#### 参考文献

- [1] 比嘉恭太, 他: “視覚・聴覚の現実と仮想を融合する2x2方式複合現実感システムの実現”, 日本VR学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 227 - 237, 2008.
- [2] 杉林裕太郎, 他: “壁面反射型オーディオスポットを用いた高臨場感3D音場提示手法の検討”, 同学会第15回大会論文集, pp. 204 - 207, 2010.
- [3] 鳥羽正義, 他: “パラメトリックスピーカによるステレオ再生”, 日本音響学会講演論文集, pp. 929 - 930, 2010.
- [4] 大久保洋幸, 他: “CG画像と同期したインタラクティブ音場再生システムについて”, 日本VR学会論文誌, Vol. 5, No. 3, pp. 965 - 974, 2000.
- [5] 伊藤仁一, 他: “超音波スピーカによる移動音源の実現と視覚補助による定位性能の向上”, 信学会総合大会論文集, A-16-7, p. 239, 2010.