



# 音像プラネタリウム方式を用いた 視聴覚併用 MR システムにおける移動音の実現

## Implementation of Moving Sound Image in Audio-Visual Mixed Reality System with the Sound-Image Planetarium

中野 亜美, 中山 雅人, 西浦 敬信, 木村 朝子, 柴田 史久, 田村 秀行

Ami Nakano, Masato Nakayama, Takanobu Nishiura, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura

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 1-1-1)

**概要:**我々は視覚・聴覚の両方で現実世界と仮想世界を融合する複合現実感 (MR) システムの開発を行っており、聴覚的 MR の提示方法として複数の超音波スピーカを用いた「音像プラネタリウム方式」を採用している。さらに我々は、同方式を利用した移動音像を実現するため、複数の超音波スピーカの音を補間する手法を提案している。本稿では、次なるステップとして、同手法を実環境で運用している視聴覚併用 MR システムに導入することを検討する。その際発生する問題点を明らかにするため評価実験を行った。

**キーワード:**複合現実感, 拡張現実感, 超音波スピーカ, 移動音像

### 1. はじめに

現実世界と仮想世界を実時間で融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) の研究の多くは、視覚的な融合に限られているが、我々は視覚的 MR だけでなく聴覚的 MR を同時に実現し、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「2×2 方式視聴覚併用 MR システム」の研究・開発を行ってきた。

その第 1 歩として開発したシステム [1] では、視覚的 MR にはビデオシースルー方式の HMD、聴覚的 MR には開放型ヘッドホンをを用いたバイノーラル再生方式を採用した。一般にバイノーラル再生方式は、予め受聴者の頭部形状を計測し、頭部伝達関数 (HRTF) を用意しておく必要がある。体験者が限定される場合は、この方法で問題ないが、不特定多数の参加者に MR システムを体験させたい場合には、その場で瞬時に個々の体験者全員の HRTF を用意することは事実上不可能である。

そこで我々は、この問題を抜本的に解決すべく、全く新しい音像定位方式を導入することにし、複数の超音波スピーカから放射される音を、壁面、天井、反射板などの実物体に反射させることで、その反射面上に音像を構築する「音像プラネタリウム方式」[2] を考案し、その基幹ユニット実機を開発した。

この方式はスポットライトのように狭く限定された範囲に音を放射可能で、壁面などに反射させても指向特性は失わないという超音波スピーカの性質を利用したものである。ヘッドホンを装着する必要がなく、頭部伝達関数のような個人性による問題が生じない、複数人が実音と人工

音を同時に受聴することを可能にする。また、超音波の反射を利用することで、スピーカを配置していない方向や場所にも音像を構築することが可能である。

音像プラネタリウム方式は、全く新しい原理に基づく、自由度の高い 3 次元音場生成方式として、注目を集め、今後の発展が期待されているが、音像を反射面に構築するため、音像位置を自由に移動させることができず、現段階では固定音の実現に留まっている。そこで我々は、複数の超音波スピーカを用いて、複数の反射面から提示される音像の位置を補間することで任意の位置を自由に移動する音像を実現する方法を提案し、更に、MR による視覚情報を同時に提示することで、音像位置の定位性能が実世界に近いレベルまで向上することを確認した [3]。

しかし、先行研究では、体験者 1 名、体験位置固定という条件のもと、音像を構築する位置 (反射面) を固定して実験を行っていた。このため、実際に同手法を視聴覚併用 MR システムへ導入する際には、構築された音像位置はどの程度離してもよいのか、体験者と反射面との距離や部屋の中での体験者の位置は音像定位に影響しないかなどについて考慮する必要がある。

そこで、本研究では、同手法を視聴覚併用 MR システムへ導入する際、予測される問題点を整理し、それが実際にどのように問題なのかを客観的に確認する実験を行った。

### 2. 音像位置補間方法

一般に、人間が音像方向を判断する手がかりは頭部形状による両耳間時間差および両耳間レベル差であることが

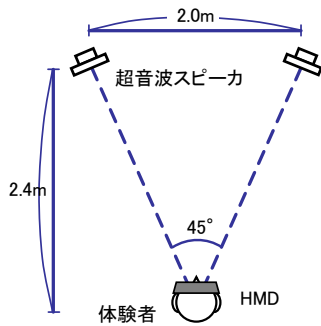


図1 先行研究での実験配置

知られており [4][5], これらを再現することで音像方向を制御可能である [6]. ただし, 時間差を利用した音像位置の補間の場合, 良好な補間を行うために受聴者の耳の位置を固定する必要がある. この制約は MR 空間内の体験者の行動を大きく制限してしまい, 好ましくない. 一方レベル差を利用した方法では, 体験位置こそ固定されるものの, 体験者の頭部移動にもある程度耐えうると考えられ, MR アトラクション作成時の自由度も位相差と比べ高い. そこで, 我々は音像位置の補間方法として, 複数の反射面間での音圧レベル差を用いる方法を採用した.

### 3. 移動音源を実現する際の諸問題

#### 3.1 様々な問題点

先行研究 [3] では, 体験者 1 名, 体験位置固定という条件の下, 図 1 に示す配置で実験を行なったが, 実際に同方式を利用して視聴覚併用 MR システムを実現するには, 以下のような問題が起こりうると予測される.

##### 【単一体験者かつ体験者位置固定の場合】

- ・体験者の配置に起因する問題
- (1) 壁面の影響: 壁面で 2 次反射した音の影響を受ける
- (2) 音の拡散: 拡散すると片耳のみに音を到達させることが難しくなり, 音像の定位性能が低下する [7]
- ・反射音像間の距離に起因する問題
- (3) 音像を 1 点に感じる最大の反射音像間の距離: ある程度離れると音像が 1 点に定位しない
- (4) 音像を 1 点に感じる最大角度: 体験者とそれぞれの反射音像とのなす角度が 180 [deg] の場合, 音像は一点に定位せず, 左右 2 点として聞こえることが予測される  
また, 今後同方式を体験者複数人, 体験位置移動可とした場合には, 更に以下の問題が起こりうる.

##### 【体験者が複数人の場合】

- (5) 他の体験者による妨害: 他の体験者に超音波スピーカの通り道を塞がれ, 体験者に音が届かない
- (6) 体験者間の相互作用: 体験者に反射した音が耳に届き音像位置を正確に把握できなくなる

##### 【体験者が移動する場合】

- (7) 時間差の考慮: 体験者が意図したスポットから移動した場合, 左右の耳に届く音に時間差が発生する. その場合, 時間差を考慮することにより定位性能の低下が避け

られるのか, 考慮しても避けられないものなのかは十分な調査が行われていない

- (8) 非二等辺三角形: 両耳間時間差を考慮せずにレベル差のみで音像位置を制御するためには, 体験者と音像の反射位置を頂点とした三角形が二等辺三角形であることが望ましい. しかし, 体験者が移動すると, その位置に応じて反射音像の位置も変える必要があり, 体験者と音像の反射位置を頂点とした三角形を二等辺三角形に保つことが難しくなると予測される
- (9) 精密な設定にかかる時間: 音の反射位置を精密に設定しなければ音像定位性能が低下することが予測されるが, 精密に設定するには時間がかかる

#### 3.2 単一体験者かつ体験者位置固定の場合の問題

前述の問題の中から, 今回は, まず単一体験者かつ体験者位置固定の場合に起こりうる問題に注目する. (1) の, 壁面からの 2 次反射による影響は, 2 次反射した音が耳に届くことにより, 体験者は後ろにも音が定位しているように錯覚する可能性がある. また, (2) 拡散した音が両方の耳に届いた場合, 良好な音像の定位ができない. この場合, 体験者が音の反射場所から離れるほどその傾向が強くなることが予測される. (3) の音像の補間が可能な反射音像間の距離についても, 当然限界があると予測され, 実際に反射音像をどの程度離すことが可能かについて確認が必要である. (4) は, 反射音像間の距離だけでなく, 体験者とそれぞれの反射音像とのなす角も影響することが予測される. なす角が小さい場合, 音像定位性能が向上し, なす角が大きい場合低下するのではないかと予想できる.

我々は以上の予測を客観的, 主観に確認するため, 評価実験を行った. 4 章でその詳細について述べる.

### 4. 評価実験

評価実験では, 体験者とスピーカの配置による音像定位性能の差異を確認するため, 客観評価実験と音像に関する主観調査を行う. 実験, 調査は, 我々が現在, 視聴覚併用 MR システムを構築している, 直径 7 [m] の全天周ドーム (図 2) 空間で行う.

#### 4.1 音像定位に関する客観評価実験

客観評価実験では, 体験者とスピーカの配置を変えた場合の音像定位性能を客観的に評価する.

##### 4.1.1 両耳間相関度計測実験

体験者, 反射音源, 壁面の位置関係と音像定位性能の関係を確認するため, 正規化両耳間相関関数 (normalized Inter-Aural Cross-correlation Function; IACF) の計測を行い, それをもとに両耳間相関度 (Inter-Aural Cross Coefficient; IACC) を求めた. IACF および IACC は, 以下の式 (1), (2) より求めることができる [8].

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt}}, \quad (1)$$



図2 全天周ドーム外観

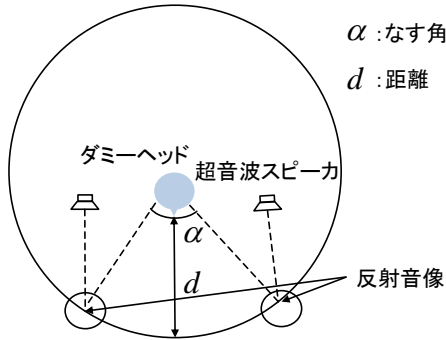


図3 実験配置

表1 実験条件

| $d$ [m] | $\alpha$ [deg] | 反射音像間の距離[m] |
|---------|----------------|-------------|
| 1.75    | 45             | 1.56        |
|         | 180            | 6.10        |
| 3.5     | 45             | 2.70        |
|         | 180            | 6.10        |
| 7.0     | 45             | 6.44        |

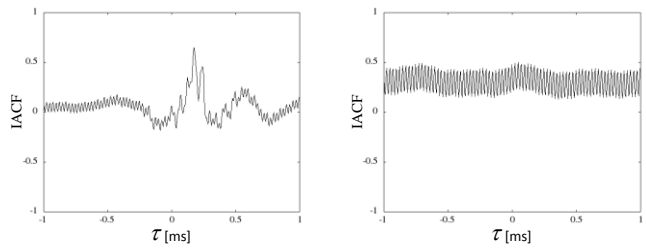
$$IACC_{t_1, t_2} = \max |IACF_{t_1, t_2}(\tau)| \quad (2)$$

IACCは、0から1までの値をとり、値が大きいほど音像定位性能が高いことを示す。また、両耳間時間差 $\tau$  [ms]と音像定位方向 $\theta$  [deg]には式(3)の関係が成り立つ。これにより両耳間時間差から音像定位方向の理論値を算出することができる。なお、定数 $\beta$  [ms/deg]は約 $8.3 \times 10^3$ で定義される[9]。

$$\theta = \tau / \beta. \quad (3)$$

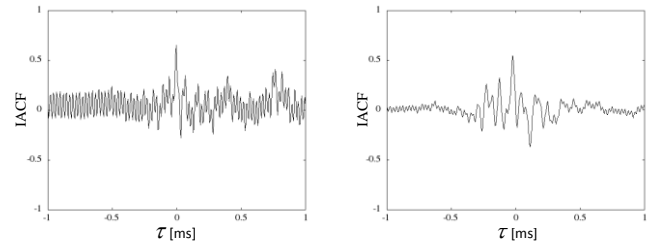
実験は、壁面から体験者までの距離と超音波スピーカ間の角度を図3、表1のように変更した5条件に対して行った。ここで $\alpha$  [deg]は被験者と反射音像を結ぶ線分のなす角、 $d$  [m]は被験者と壁面との距離である。

また、IACFを測定するためには左右の耳に到来する音響信号を同時に収録する必要があるため、収録機材として人間の頭部形状を模倣したダミーヘッドを使用した。収録は超音波スピーカにより所定の位置に音像を提示し、ダミーヘッドに対して正面方向に音像を定位させた。なお、音像は超音波スピーカから放射される超音波を壁面に反射させることで提示した。評価音源はTSP (Time Stretched Pulse) 信号とホワイトノイズである。



(a)  $\alpha = 45$  [deg] (b)  $\alpha = 180$  [deg]

図4 IACFの結果( $d = 1.75$  [m])



(a)  $\alpha = 45$  [deg] (b)  $\alpha = 180$  [deg]

図5 IACFの結果 ( $d = 3.5$  [m])

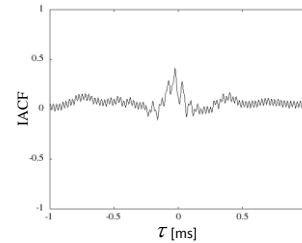


図6 IACFの結果 ( $d = 7.0$  [m],  $\alpha = 45$  [deg])

表2 客観評価実験結果

| $d$ [m] | $\alpha$ [deg] | 指標の値 |                |
|---------|----------------|------|----------------|
|         |                | IACC | $\theta$ [deg] |
| 1.75    | 45             | 0.64 | 20             |
|         | 180            | 0.50 | 5              |
| 3.5     | 45             | 0.65 | -0.6           |
|         | 180            | 0.54 | -3             |
| 7.0     | 45             | 0.41 | -3             |

#### 4.1.2 両耳間相関度計測実験結果

客観評価実験の結果を図4~6に示す。表1のそれぞれの実験条件下でのIACFの値である。また、IACCと音像定位方向を求めた結果を表2に示す。

表2より、IACCの値は、壁面に近い $d = 7.0$  [m]の場合に最も低いだが、IACFの形状にピークが見られることから不安定ながらも音像定位が可能となる可能性もある。 $\alpha = 45$  [deg]の場合、IACCの値が0.6以上と高いことから、概ね良好な音像定位が行えると予想できる。 $\alpha = 180$  [deg]の場合45 [deg]の場合と比べIACCの値が低下しており、IACFの形状にも大きな差異が見られる。180 [deg]のグラフは、小刻みに震えており、目立ったピークがない。このことから、 $\alpha = 180$  [deg]では、 $\alpha = 45$  [deg]と比べ、良好な音像定位が難しいと予想される。

#### 4.2 音像定位に関する主観評価調査

音像定位に関する主観調査は、客観評価実験の結果を主

表 3 音像定位に関する主観調査 (被験者 A)

| $d$ [m] | $\alpha$ [deg] | 知覚された音像数 | 音像位置    |
|---------|----------------|----------|---------|
| 1.75    | 45             | 1        | 手前右寄り   |
|         | 180            | 判別不可     |         |
| 3.5     | 45             | 1        | 左寄り     |
|         | 180            | 2        | 左右の反射位置 |
| 7.0     | 45             | 1        | 正面壁側    |

表 4 音像定位に関する主観調査 (被験者 B)

| $d$ [m] | $\alpha$ [deg] | 知覚された音像数 | 音像位置    |
|---------|----------------|----------|---------|
| 1.75    | 45             | 1        | 手前右寄り   |
|         | 180            | 2        | 左右の反射位置 |
| 3.5     | 45             | 1        | 判別不可    |
|         | 180            | 2        | 左右の反射位置 |
| 7.0     | 45             | 1        | 正面補間直線上 |

表 5 音像定位に関する主観調査 (被験者 C)

| $d$ [m] | $\alpha$ [deg] | 知覚された音像数 | 音像位置    |
|---------|----------------|----------|---------|
| 1.75    | 45             | 1        | 手前右寄り   |
|         | 180            | 2        | 左右の反射位置 |
| 3.5     | 45             | 1        | 判別不可    |
|         | 180            | 2        | 左右の反射位置 |
| 7.0     | 45             | 1        | 正面      |

観でも確認するために行う。

#### 4.2.1 音像定位に関する調査内容

音像定位に関する主観調査では、客観評価実験を行ったすべての配置に対して被験者に音を受聴させ、音像の定位感を回答させた。回答は音像が 1 点に定位していると感じたかと定位位置(前後左右)を自由回答させた。被験者は、正常な聴力を有する成人 3 名(男性 2 名, 女性 1 名)である。また、調査用音源にはホワイトノイズを使用した。

#### 4.2.2 音像定位に関する調査の結果

表 1 に示す 5 つの条件下での、それぞれの被験者が感じた音像の数と、感じた音像の位置の回答結果を表 3~5 に示す。被験者の壁面からの距離によらず、 $\alpha = 45$  [deg] の場合には音像が 1 点に定位し、 $\alpha = 180$  [deg] の場合は 2 点に定位している。

#### 4.3 考察

全体を通して、音像定位に関する主観調査結果と客観評価実験の結果は同様の傾向となった。

$d = 7.0$  [m] の場合、主観調査では音像が 1 点に定位しているが、被験者から非常に分かりにくかったというコメントがあったことから、3.1 節 (1)(2) で予想した、壁面からの 2 次反射や反射音が拡散していることによる影響が伺える。客観評価実験で、IACC の値が最も低かったことから、これらの項目は、音像定位性能が下がる有力な原因と考えられる。また、(3) 反射音像間の距離については、 $d = 3.5$  [m]、 $\alpha = 45$  [deg] のときに、反射音像間の距離が 2.70[m] で良好に音像定位が行えており、 $d = 7.0$  [m]、反

射音像間の距離が 6.44 [m] の場合でも、分かりにくいものの 1 点に音像が定位しており、背後に壁のない状態であれば、より定位性能が高かった可能性もありうる。

音像定位に関する主観調査では、 $\alpha = 180$  [deg] の場合は 2 点に定位し、 $\alpha = 45$  [deg] の場合は 1 点に定位した。客観評価実験でも、 $\alpha = 180$  [deg] の場合は、45 [deg] の場合と比べ、良好な音像定位は難しいという結果となっており、 $\alpha = 180$  [deg] での音像の配置は難しそうである。本稿では、 $\alpha = 45$  と 180 [deg] の場合のみ実験、調査を行ったため、今後 1 点に定位する最大の  $\alpha$  についても調査が必要である。

以上より 3.1 節で提起した問題点のうち、単一体験者かつ体験者位置固定の場合の問題 (1) ~ (4) に関して、音像定位性能に影響を与えることが確認できた。

### 5. むすび

本稿では、音像位置を補間することで移動音像を実現する手法を実際に導入する際に考慮すべき問題点を列挙した。また、この問題点の影響を、客観評価実験と音像定位に関する主観調査により確認した。結果、体験者位置の背後が壁面に近い場合や反射音像と体験者の距離が遠い場合に影響が強く、なす角が大きくなると良好な音像補間が難しいことが分かった。

今後は、それぞれの項目についてより詳細な実験を行うとともに、その他の問題点についても検討し、視聴覚併用 MR システムを構築する上での設計指針を構築したい。

本研究の一部は、科研費・基盤研究 S「複合現実方情報空間の表現力基盤強化と体系化」による。

#### 参考文献

- [1] 比嘉恭太, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: "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] 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", 日本 VR 学会論文誌, Vol. 16, No. 4, pp. 687 - 693, 2011.
- [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", 信学技報 PRMU2012 - 92, Vol. 112, No. 385, pp. 93 - 98, 2013.
- [4] L. Rayleigh: Acoustical observations, Phil. Mag. 3, 6th series, pp. 456 - 464, 1877.
- [5] L. Rayleigh: On our perception of sound direction, Phil. Mag. 13, 6th series, pp. 214 - 232, 1907.
- [6] M. Morimoto, K. Iida and M. Itoh: Upper hemisphere sound localization using head-related transfer functions, Account. Sci & Tech. 24, pp. 267 - 275, 2003.
- [7] 鎌倉友男, 酒井新一: パラメトリックスピーカの原理と応用, 電子情報通信学会技術研究報告 US, Vol. 105, No. 554, pp. 19 - 24, 2005.
- [8] 羽入敬樹: 室内音響指標値, 日本音響学会誌, Vol. 60, No. 2, pp. 72 - 77, 2004.
- [9] 黒住幸一, 大串健吾: 音響信号の両耳間相関関数に基づく音像定位の予測モデル, 同上, Vol. 44, No. 10, pp. 726 - 734, 1988.