

# Multiple Vertical Panning を用いた立体音響システムにおける 移動距離の奥行表現への影響\*

○木村敏幸（東北学院大学）

## 1 はじめに

超臨場感コミュニケーション技術はこれまでに 4K 解像度のデジタルシネマや 8K 解像度の画面テレビに実用化されている。これらに適合した音響として、大画面ディスプレイの前に何も置かずに、複数の人が何も装着せずにどこでも聞いても映像の位置から音が出ているように聞こえる立体音響システムの開発が期待されている。

大画面ディスプレイに適合する立体音響システムとして、これまでに新たなる立体音響システム (Multiple Vertical Panning, 以降「MVP 方式」と呼ぶ) を提案し [1], 実用化の可能性も示してきた [2]. さらに, 近年研究されている裸眼立体映像に適合した奥行きを表現するために, 音量変化による奥行表現手法についても検討してきた [3-5]. Fig. 1 に MVP 方式の基本構成を示す。まず, Fig. 1 の上側に示すように, 映像の位置の上下に 2 個のスピーカを配置する。そして, 音源に音量差をつけて 2 個のスピーカから音を再生 (すなわち「垂直パニング」) すると, 視聴者は 2 個のスピーカの間で音が鳴っているように感じるようになる。その際, 適切な音量差を設定することによって, 視聴者は映像の位置で音が鳴っているように感じるようになる。音が鳴っているのはディスプレイの上下に配置した 2 個のスピーカだけなので, 複数の視聴者はどこにいても常に映像の位置で音が鳴っているように感じることができる。さらに, Fig. 1 の下側に示すように, ディスプレイの上下に複数のスピーカ対を配置することによって, 映像を表現できる位置がディスプレイの上下方向のみならず左右方向にも拡大される。これにより, 複数の視聴者はどこにいても常にディスプレイ上の映像の位置で音が鳴っているように感じることができる。

しかしながら, これまでの奥行表現手法に関する研究では映像の移動距離が一定であった。そこで, 本報告では, 映像の移動距離を変化させた場合も追加して再度視聴覚実験を実施する。

## 2 制作システム

Fig. 2 に制作システムの実行風景を示す。55 インチの映像ディスプレイ (TOSHIBA: 55J20X) の上下

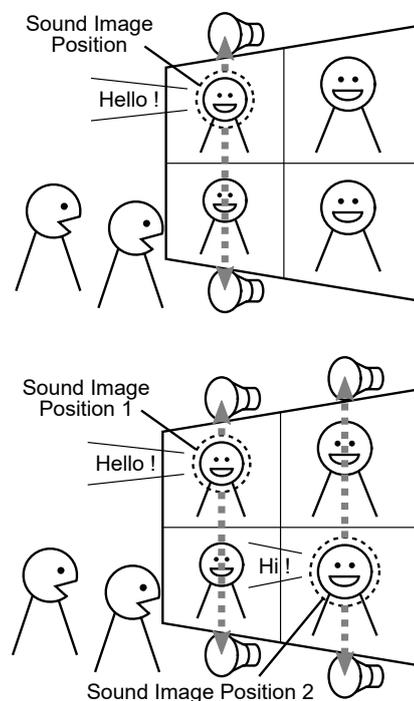


Fig. 1 Basic configuration of a multiple vertical panning (MVP) method [4]

に計 18 個のスピーカで構成された MVP 方式用のスピーカアレイ, 左右にはステレオホニック用のスピーカを配置した。スピーカには市販のスピーカユニット (ダイトーボイス: AR-10N) を市販の密閉型エンクロージャ (ダイトーボイス: EX-10 BK) に取り付けたものを使用した。

Fig. 3 に制作システムの構成図を示す。ソフトウェアにはゲームエンジンの Unreal Engine (ver. 4.25.4) とビジュアルプログラミング言語の Max (ver. 7.3.5) を使用した。Unreal Engine では, 白色球体の 3 次元 CG が上下左右や奥行き方向に移動する映像を映像ディスプレイ上に表示し, 球体の水平位置, 垂直位置, 奥行距離および再生する音の方式を OSC (Open Sound Control) 信号で送信した。一方, Max では, 受信した OSC 信号から再生する音の方式を決定し, 受信した水平位置と垂直位置を基にスピーカから音を再生し, 受信した奥行距離に従って音量を変化させた。

Max における MVP 方式による音の再生は以下の手順により実施した。まずは受信した水平位置を基に,

\* Effect of Moving Distance on Depth Expression in 3D Audio System Using Multiple Vertical Panning. by KIMURA, Toshiyuki (Tohoku Gakuin University)

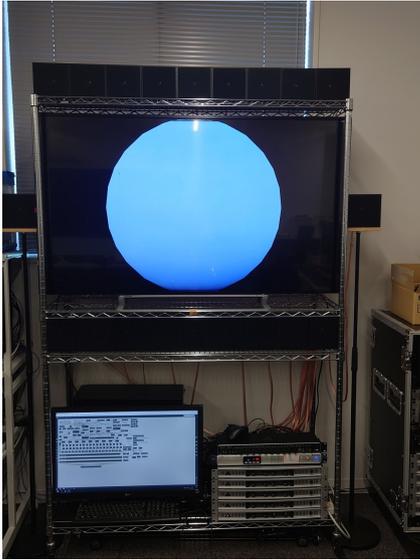


Fig. 2 Image of developed audio-visual display system.

下記の式によってディスプレイ上下に配置した2個の再生用スピーカーを選択する。

$$P'_H = \Delta d \text{round} \left( \frac{P_H + 0.54}{\Delta d} \right) - 0.54 \quad (1)$$

但し、 $P_H$ (= $-0.605 \sim 0.605$ )は受信した水平位置、 $P'_H$ (= $-0.54, -0.405, -0.27, -0.135, 0, 0.135, 0.27, 0.405, 0.54$ )は選択した2個の再生用スピーカーの水平位置を表し、0がディスプレイの横中心位置に相当する。また、 $\Delta d$ (= $0.135$ )は左右のスピーカー間隔を表す。

次に、下記の式によって音源信号  $s(n)$  に上下の音量差をつける。

$$s_U(n) = a_U s(n), \quad s_D(n) = a_D s(n) \quad (2)$$

但し、 $s_U(n)$ 、 $s_D(n)$ は上側及び下側のスピーカーへの音信号、 $a_U$ 、 $a_D$ はそれぞれのゲイン係数を表し、音量差  $\Delta A$ [dB] から下記のように定義される。

$$a_U = \frac{10^{\frac{\Delta A}{20}}}{\sqrt{10^{\frac{\Delta A}{10}} + 1}}, \quad a_D = \frac{1}{\sqrt{10^{\frac{\Delta A}{10}} + 1}} \quad (3)$$

本システムでは音量差  $\Delta A$  は先行研究 [1] に従い、下記のように設定した。

$$\Delta A = \frac{P'_V + 0.1437}{0.1065} \quad (4)$$

但し、 $P'_V$ (= $\frac{2.5}{0.86} P_V + 0.0654$ )は先行研究 [1] とは上下のスピーカー間隔が異なることにより設けた補正した垂直位置であり、 $P_V$ は受信した垂直位置を表す。

最後に、下記の式によって音量を変化させ、選択した2個の再生用スピーカーから再生する。

$$x_U(n) = a_Z s_U(n), \quad x_D(n) = a_Z s_D(n) \quad (5)$$

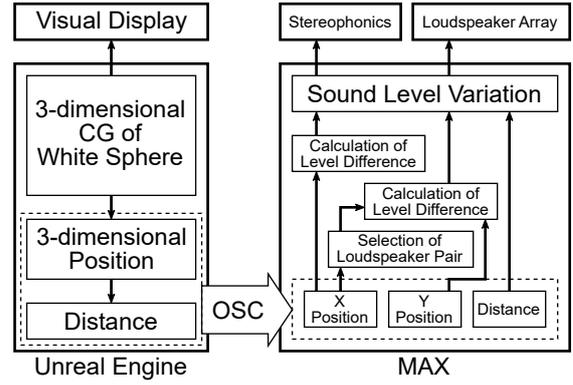


Fig. 3 Configuration of developed audio-visual display system.

但し、 $x_U(n)$ 、 $x_D(n)$ は上側及び下側のスピーカーから再生する音信号、 $a_Z$ は受信した奥行距離に基づくゲイン係数を表す。今回は下記の2種類を設定した。

$$\text{「比例増大」 } a_Z = \frac{\max P_Z - P_Z}{\max P_Z - 1} \quad (6)$$

$$\text{「指数増大」 } a_Z = \frac{1}{P_Z} \quad (7)$$

但し、 $\max P_Z$ (= $10$  or  $100$ )は奥行距離の最大値、 $P_Z$ (= $1 \sim \max P_Z$ )は球体の奥行距離を表す。「比例増大」では距離によって音量を比例的に変化させているのに対し、「指数増大」では点音源の物理的な音量変化を模擬するため、音量を逆数的に変化させている。

一方、従来のステレオホニック方式の場合は、下記の式によって音源信号  $s(n)$  に左右の音量差をつけた音信号をディスプレイの左右に配置した2個のスピーカーから再生した。

$$x_L(n) = a_Z a_L s(n), \quad x_R(n) = a_Z a_R s(n) \quad (8)$$

但し、 $x_L(n)$ 、 $x_R(n)$ は左側及び右側のスピーカーから再生する音信号を表す。 $a_L$ 、 $a_R$ は左右の2個のスピーカーのゲイン係数を表し、本実験ではタンゼント則 [6] に従い下記の式のように設定した。

$$a_L = \frac{1 - \frac{\tan \theta}{\tan \theta_0}}{\sqrt{2 \left\{ 1 + \left( \frac{\tan \theta}{\tan \theta_0} \right)^2 \right\}}} \quad (9)$$

$$a_R = \frac{1 + \frac{\tan \theta}{\tan \theta_0}}{\sqrt{2 \left\{ 1 + \left( \frac{\tan \theta}{\tan \theta_0} \right)^2 \right\}}} \quad (10)$$

但し、 $\theta$ 及び $\theta_0$ はディスプレイ正面の視聴位置における音像及び左右の2個のスピーカーの開き角を表す。本システムでは、下記のように設定した。

$$\frac{\tan \theta}{\tan \theta_0} = \frac{P_H}{0.69} \quad (11)$$

但し、 $P_H$ は受信した水平位置を表す。

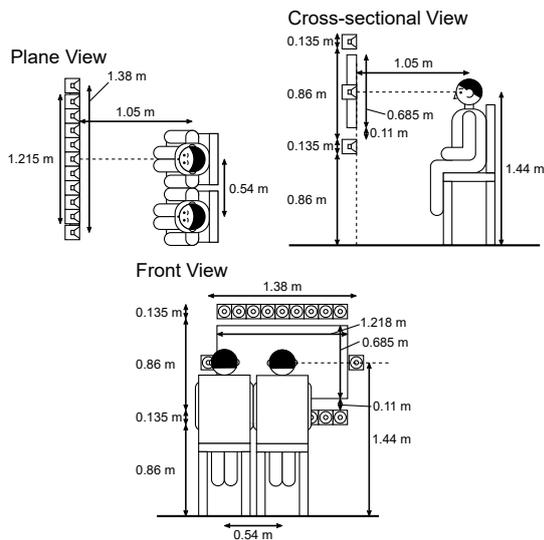


Fig. 4 Position of viewers, visual display and the loudspeakers in the evaluation experiment [5].

### 3 評価実験

#### 3.1 実験環境・条件

実験は暗騒音レベルが 35.8 dBA である研究室の一角にて行った。Fig. 4 に示すように、映像ディスプレイから 1.05 m 離れた地点に 2 カ所の視聴位置（中央，側方）を設定した。視聴位置の高さは視聴者の耳の位置において 1.44 m とした。音圧レベルは中央の視聴位置において最大で約 70 dBA とした。

視聴覚実験では、白球位置を 3 条件（中央，上，左），白球の最大距離を 2 条件（10 m，100 m），音提示手法を 2 条件（MVP，ステレオ），音量変化手法を 3 条件（変化なし，比例増大，指数増大）設定した。音量の変化がない条件では， $a_z$  は常に 1 とした。音には先行研究 [1] にて用いた UFO の音を用いた。実験で使用した白色球体の映像は，Fig. 5 に示すように，画面上の三カ所の位置（中央，上，左）の最大距離から 5 秒間で手前方向に一定速度で移動させ，最小距離の 1 m に達した後で 3 秒間静止させた。

#### 3.2 実験計画・手順

視聴者は聴力が会話域正常な成人 10 名（男性 8 名，女性 2 名）である。実験の流れ図を Fig. 6 に示す。まず，実験を視聴位置及び最大距離ごとに 4 セッションに分割した。視聴位置及び最大距離の順序は視聴者ごとにランダム化した。セッションでは，3 試行の練習試行の後に，計 36 回（= 3 白球位置 × 2 音提示手法 × 3 音量変化手法 × 2 繰り返し）の本試行を実施した。試行の提示順序は視聴者ごとにランダム化した。その際，セッションの間には休憩時間を設けた。

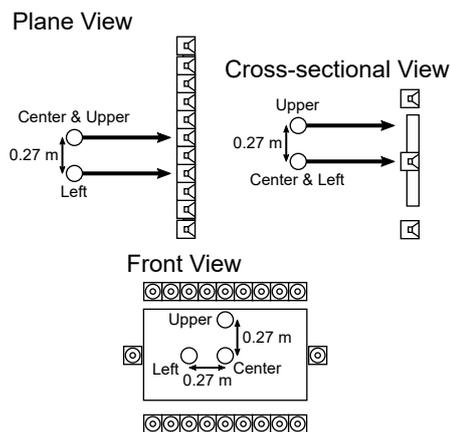


Fig. 5 Position of the sphere object in the evaluation experiment [5].

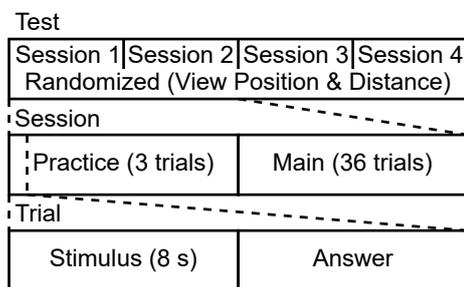


Fig. 6 Flowchart of the evaluation experiment.

視聴者には提示した刺激の映像と音の一致度を評定させた。その際，評定は Table 1 に示すような 5 段階とした。また，評定の際には視聴者は頭部や上半身を自由に動かすことができた。

#### 3.3 実験結果及び考察

白球位置及び視聴位置ごとの平均評定値を Fig. 7 に示す。エラーバーは 95% 信頼区間を表す。

音量変化手法（3 水準），音の再生方式（2 水準）及び移動距離（2 水準）を要因とする三要因分散分析（全て被験者間要因）を白球位置及び視聴位置ごとに js-STAR XR+ にて実施したところ，すべての場合において二次交互作用に有意差は見られない一方で，音量変化手法と移動距離の一次交互作用に 5% 水準での有意

Table 1 Scale of the evaluation experiment.

Grade	Judgment
5	Excellent
4	Good
3	Fair
2	Poor
1	Bad

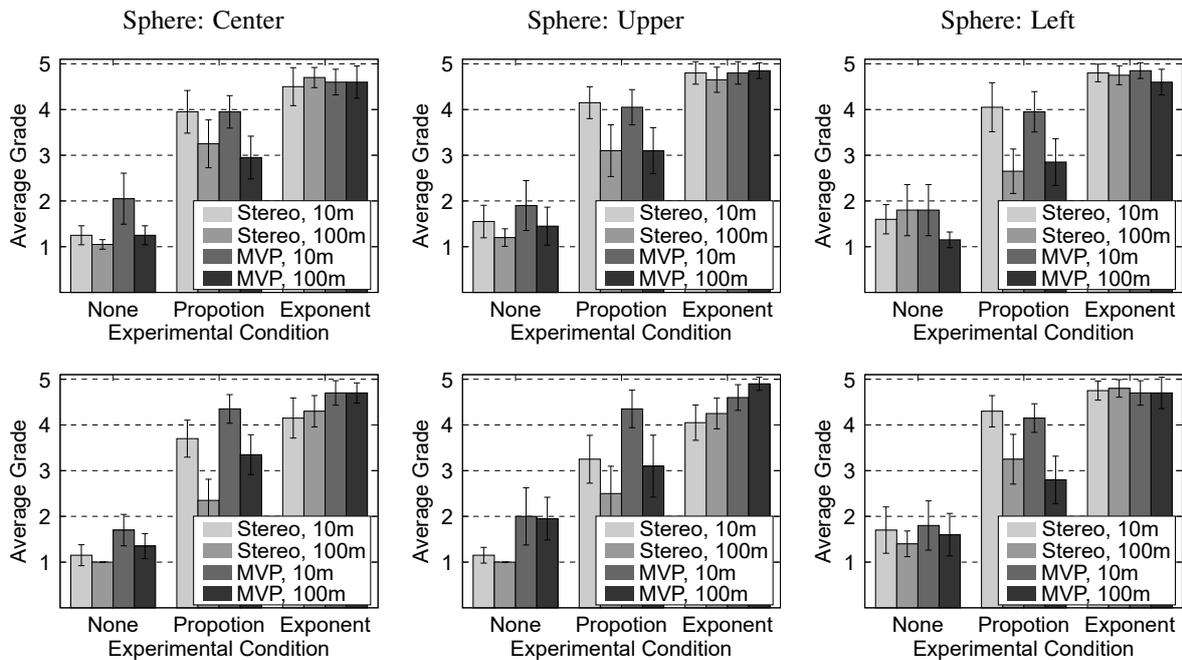


Fig. 7 Results of the evaluation experiment. (Upper: Central, Lower: Lateral viewing position)

差が見られた。単純主効果や多重比較によってさらに詳細に分析したところ、変化なし、比例増大、指数増大の順に平均評定値が有意に上昇していることが示された。従って、MVP方式による奥行表現には指数増大による音量変化が最適であるということが言える。

一方で、白球位置が中央や上で視聴位置が側方の場合において、音の再生方式の主効果に5%水準での有意差が見られた。従って、これらの場合においては、MVP方式はステレオホニックよりも良いということが言える。

#### 4 まとめ

本報告では、これまでに提案してきた MVP 方式による奥行き表現の可能性を検討するために、移動距離を変化させた場合の条件も加えたうえで、映像と音の一致度に基づいた臨場感を評価した。その結果、点音源の物理的な音量変化を模擬すれば最も臨場感が向上するということが分かった。また、MVP方式がステレオホニックよりも臨場感が向上する場合があることも分かった。

今後は球体を反対方向や上下左右方向にも移動させた場合における評価実験を実施する必要があると考えられる。

#### 謝辞

研究の遂行にあたり、システム制作および評価実験を担当して下さった靄島悠太氏に感謝の意を申し上げる。

本報告における評価実験は東北学院大学人間対象研究審査委員会の承認を得たうえで実施した。

#### 参考文献

- [1] T. Kimura and H. Ando: "3D audio system using multiple vertical panning for large-screen multiview 3D video display", *ITE Trans. on Media Tech. and App.*, **2**, 1, pp. 33–45 (2014).
- [2] T. Kimura and H. Ando: "Effect of discretization of sound source position on sense of presence in 3D audio systems using multiple vertical panning", *Trans. of VR Soc. of Jpn.*, **20**, 3, pp. 179–188 (2015).
- [3] 木村敏幸: "Multiple vertical panning を用いた立体音響システムにおける奥行き表現の臨場感への影響", *音講論*, No. 2-1-16, pp. 1265–1268 (2019).
- [4] 木村敏幸: "Multiple vertical panning を用いた立体音響システムにおける奥行き表現の比較検討", *音講論*, No. 2-11-8, pp. 1309–1312 (2021).
- [5] 木村敏幸: "Multiple vertical panning を用いた立体音響システムにおいて奥行き表現手法が映像と音の一致度に及ぼす影響", *信学技報*, No. EA2023-21, pp. 18–23 (2023).
- [6] B. Bernfeld: "Attempts for better understanding of the directional stereophonic listening mechanism", *Proc. 44th Audio Eng. Soc. Convention*, No. C-4, pp. 1–24 (1973).