

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*

○木村敏幸 (東北学院大学)

1 はじめに

我々はこれまでに大画面ディスプレイに適合した立体音響システム (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, MVP 方式による音の奥行き表現も検討してきたが [3], 奥行き表現に関するこれまでの研究ではステレオホニックのような従来方式とは比較してこなかった.

そこで, 本報告では, ステレオホニックの音も再生できる視聴覚提示システムを制作し, 制作したシステムを用いて臨場感を評価することによって, MVP 方式による奥行き表現の可能性を検討する.

2 MVP 方式の原理 [1,2]

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, 音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.

3 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

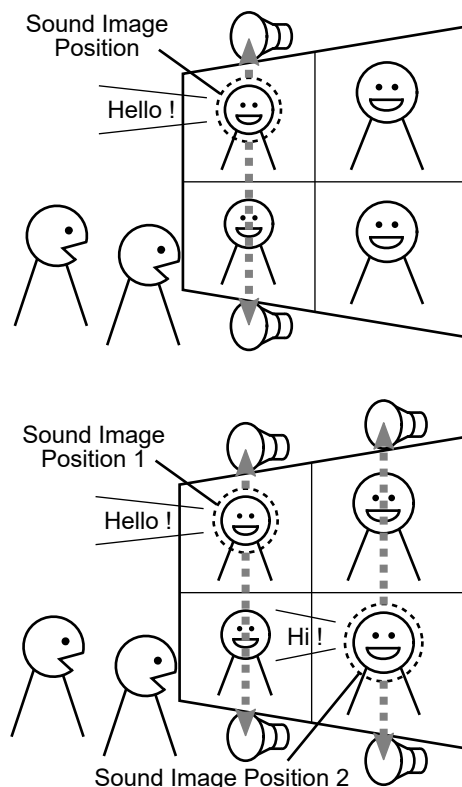


Fig. 1 Basic configuration of the multiple vertical panning (MVP) method.

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 [4] (ver. 4.16.3) とビジュアルプログラミング言語の Max [5] (ver. 7.3.5) を使用した. Unreal Engine では, 四角錐の 3 次元 CG が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, 四角錐の水平及び垂直位置, 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, 受信した水平及び垂直位置を基にスピーカから音を再生し, 受信した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, 下記の式によってディスプレイ上下に配置した 2 個

* Comparative study of the depth expression in 3D audio system using multiple vertical panning. by KIMURA, Toshiyuki (Tohoku Gakuin University)

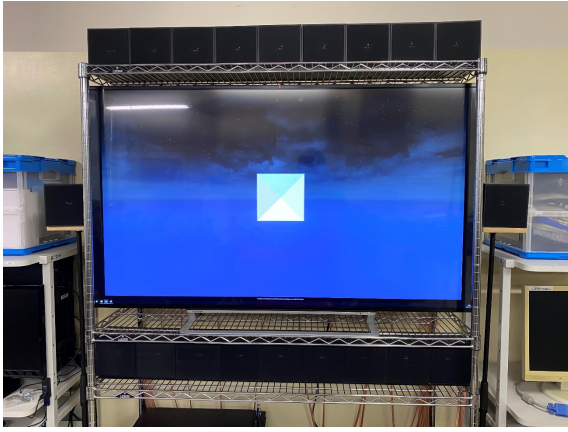


Fig. 2 Image of developed audio-visual display system.

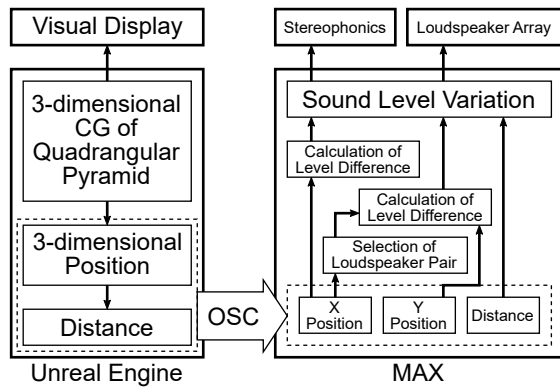


Fig. 3 Configuration of developed audio-visual display system.

の再生用スピーカを選択する。

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

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。

$$s_U(n) = a_U s(n) \quad (2)$$

$$s_D(n) = a_D s(n) \quad (3)$$

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

$$a_U = \frac{10^{\frac{\Delta A}{20}}}{\sqrt{10^{\frac{\Delta A}{10}} + 1}} \quad (4)$$

$$a_D = \frac{1}{\sqrt{10^{\frac{\Delta A}{10}} + 1}} \quad (5)$$

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

$$\Delta A = \frac{P'_V + 0.1437}{0.1065} \quad (6)$$

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から再生する。

$$x_U(n) = a_Z s_U(n) \quad (7)$$

$$x_D(n) = a_Z s_D(n) \quad (8)$$

但し、 $x_U(n)$ 、 $x_D(n)$ は上側及び下側のスピーカから再生する音信号、 a_Z は受信した距離に対応するゲイン係数を表す。今回は下記の 2 種類を設定した。

$$\text{(Method 1)} \quad a_Z = 1 - \frac{P_Z}{10} \quad (9)$$

$$\text{(Method 2)} \quad a_Z = \frac{1.05}{1.05 + P_Z} \quad (10)$$

但し、 $P_Z(=0 \sim 10)$ は受信した距離を表す。Method 1 では先行研究 [3] のように距離によって音量を比例的に変化させているのに対し、Method 2 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 個のスピーカから再生した。

$$x_L(n) = a_L s(n) \quad (11)$$

$$x_R(n) = a_R s(n) \quad (12)$$

但し、 $x_L(n)$ 、 $x_R(n)$ は左側及び右側のスピーカから再生する音信号を表す。 a_L 、 a_R はそれぞれ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。

$$a_L = \frac{1 - \frac{\tan \theta}{\tan \theta_0}}{\sqrt{2 \left\{ 1 + \left(\frac{\tan \theta}{\tan \theta_0} \right)^2 \right\}}} \quad (13)$$

$$a_R = \frac{1 + \frac{\tan \theta}{\tan \theta_0}}{\sqrt{2 \left\{ 1 + \left(\frac{\tan \theta}{\tan \theta_0} \right)^2 \right\}}} \quad (14)$$

但し、 θ 及び θ_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。

$$\frac{\tan \theta}{\tan \theta_0} = \frac{P_H}{0.69} \quad (15)$$

但し、 P_H は受信した水平位置を表す。

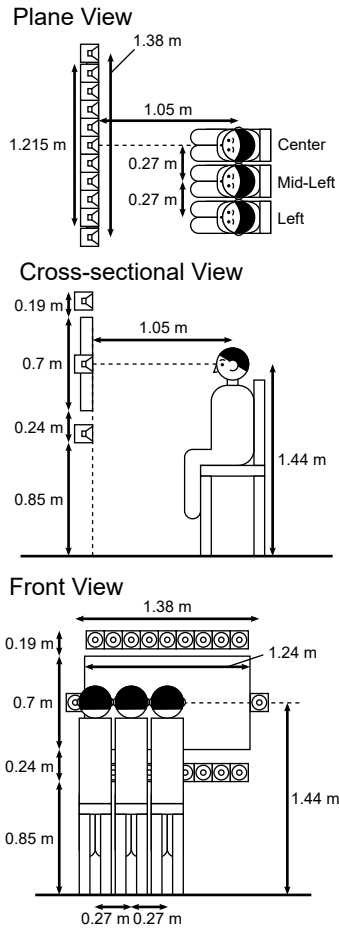


Fig. 4 Position of viewers, visual display and the loudspeakers in the evaluation experiment.

4 評価実験

4.1 実験環境・条件

実験は暗騒音レベルが 40.2 dBA である研究室の試験室にて行った。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 3 カ所の視聴位置を設定した。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。

今回の実験では Table 1 に示すような計 12 種類の実験条件を設定した。すべての実験条件において、四角錐は最も遠い位置から最も近い位置に一定速度で移動させた。また、本実験では音には白色雑音を用いた。音量の変化がない条件では、 a_z は常に 1 とした。

4.2 実験計画・手順

視聴者は 12 名である。実験の流れ図を Fig. 5 に示す。セッションでは、Table 1 で示した計 12 種類の実験条件を 2 回繰り返した計 24 回の本試行を行った。試行の提示順序は視聴者ごとにランダム化した。

視聴者には提示した刺激音の臨場感を評定させた。

Table 1 Experimental conditions in the evaluation experiment.

Index	Quadrangular pyramid	Sound level variation	Sound playing	
(i)	Center	No variation	Streophonic	
(ii)			MVP	
(iii)			Method 1	Streophonic
(iv)	Center	No variation	MVP	
(v)			Method 2	Streophonic
(vi)			MVP	
(vii)	Left	No variation	Streophonic	
(viii)			MVP	
(ix)			Method 1	Streophonic
(x)	Left	No variation	MVP	
(xi)			Method 2	Streophonic
(xii)			MVP	

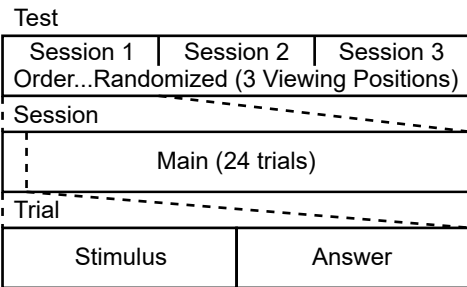


Fig. 5 Flowchart of the evaluation experiment.

その際、評定は Table 2 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。

4.3 実験結果及び考察

実験条件ごとの平均評定値を Fig. 6 に示す。エラーバーは 95% 信頼区間を表す。四角錐位置ごとに視聴位置 (3 水準)、表現手法 (3 水準) 及び音の再生方式 (2 水準) を要因とする三要因分散分析 (全て被験者間要因)[7] を実施したところ、四角錐が中心の場合は、視

Table 2 Scale of the evaluation experiment.

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

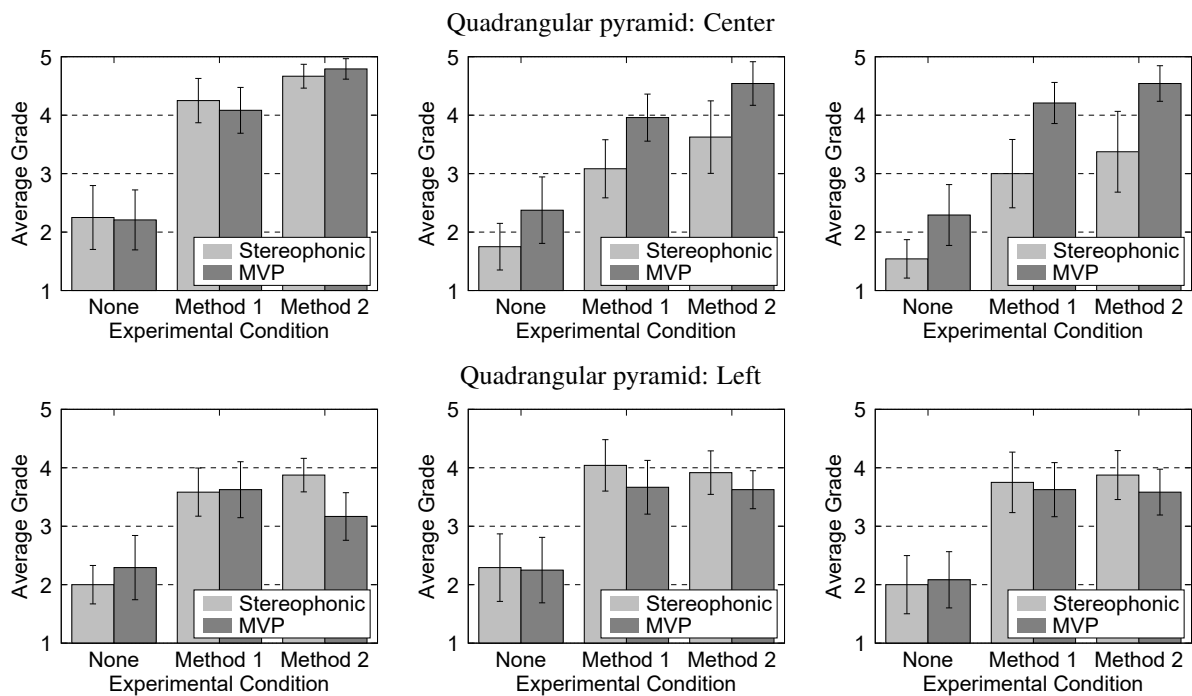


Fig. 6 Results of the evaluation experiment. (Left: Central, Center: Mid-left, Right: Left viewing position)

聴位置と音の再生方式に関する1次交互作用と表現手法に関する主効果が0.1%水準で有意であった。視聴位置と音の再生方式の1次交互作用に関する単純主効果を実施したところ、視聴位置が中心位置以外の場合、音の再生方式による主効果が0.1%水準で有意であった。従って、四角錐が中心にあり視聴位置が中心位置以外の場合、MVP方式はステレオホニックよりも臨場感が高いということが言える。

さらに、表現手法の主効果に関して多重比較を実施したところ、すべての表現手法の組み合わせに対して5%水準で有意差があった。従って、四角錐が中心の場合、表現手法としては音量を変化させないよりも音量を変化させた方が臨場感が有意に向上し、点音源の物理的な音量変化を模擬すればさらに臨場感が向上するということが言える。

一方で、四角錐が左側の場合、三要因分散分析では表現手法に関する主効果のみが0.1%水準で有意であり、多重比較でもMethod 1とMethod 2の間には有意差が見られなかった。つまり、四角錐が左側の場合、音量を変化させると視聴位置や音の再生方式に関係なく臨場感が向上するということが言える。これは映像の位置が左側のスピーカに近接することによってステレオホニックの場合でも常に腹話術効果が起こりやすくなるためであると考えられる。

5 おわりに

本報告では、MVP方式による奥行き表現の可能性を検討するために、ステレオホニックの音も再生でき

る視聴覚提示システムを制作し、臨場感を評価した。その結果、映像が中心にあり視聴位置が中心位置以外の場合、MVP方式はステレオホニックよりも臨場感が向上することが分かった。また、点音源の物理的な音量変化を模擬すればさらに臨場感が向上することも分かった。

今後は映像の位置を詳細に変化した場合の臨場感への影響をさらに検討する必要がある。

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古田航大、阿部駿平氏に感謝の意を申し上げる。

参考文献

- [1] T. Kimura *et al.*, ITE Trans. on Media Tech. and App., 2 (1), pp. 33–45, 2014.
- [2] T. Kimura *et al.*, Trans. VR Soc. Jpn., 20 (3), pp. 179–188, 2015.
- [3] 木村敏幸, 音講論 (秋), No. 2-1-16, pp. 1265-1268, Sep. 2019.
- [4] Unreal Engine, <http://www.unrealengine.com/>.
- [5] Max, <http://cycling74.com/products/max/>.
- [6] B. Bernfeld, Proc. 44th Audio Eng. Soc. Convention, C-4, pp. 1–24, Feb. 1973.
- [7] 森敏昭, 吉田寿夫編著, “心理学のためのデータ解析テクニカルブック,” 北大路書房, 1990, pp. 121–133.