

Multiple Vertical Panning を用いた立体音響システムにおける 移動距離及び視聴位置の奥行表現への影響

木村 敏幸[†]

[†] 東北学院大学情報学部データサイエンス学科 〒984-8588 仙台市若林区清水小路 3-1

E-mail: †t-kimura@m.ieice.org

あらまし Multiple Vertical Panning を用いた立体音響システムにおいて音量変化による奥行表現手法をこれまで検討してきたが、移動距離や視聴位置を変化させた場合については検討していなかった。本研究では、移動距離や視聴位置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。

キーワード 超臨場感コミュニケーション、立体音響システム、垂直パニング、奥行表現

Effect of Moving Distance and Viewing Position on Depth Expression in 3D Audio System Using Multiple Vertical Panning

Toshiyuki KIMURA[†]

[†] Department of Data Science, Faculty of Informatics, Tohoku Gakuin University

3-1, Shimizu-koji, Wakabayashi-ku, Sendai, Miyagi, 984-8588 Japan

E-mail: †t-kimura@m.ieice.org

Abstract While the depth expression techniques using volume changes have been previously investigated in 3D audio systems using Multiple Vertical Panning, the cases where movement distance or listening position was varied had not been examined. In this study, the sense of presence based on the degree of coincidence between video and sound was evaluated, while also considering conditions where movement distance and viewing position were varied.

Key words ultra-realistic communication, 3D audio system, vertical panning, depth expression

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解像度の大型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]。

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評価実験を実施する[6]。さらに、これまでの研究において検証が十分ではな

かった視聴位置による影響を、追加の評価実験を実施することで検討する。

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

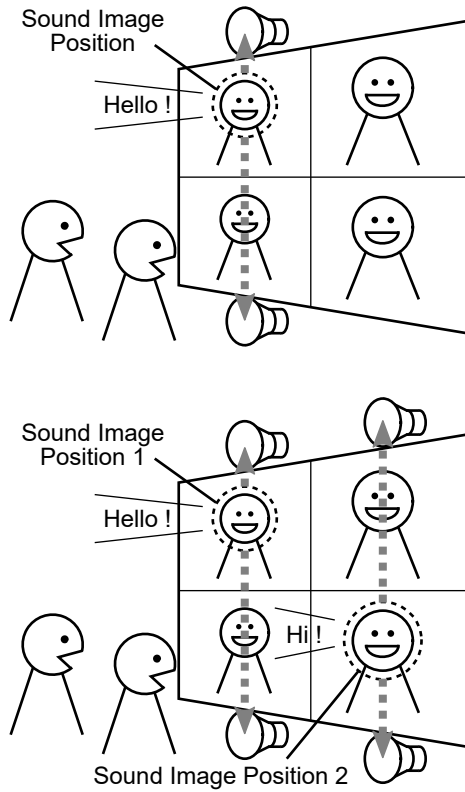


図1 Multiple Vertical Panning (MVP) 方式の基本構成 [4]

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

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 [6]

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) に取り付けしたものを使用した。

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 [7] (ver. 4.25.4) とビジュアルプログラミング言語の Max [8] (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、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を選択する。

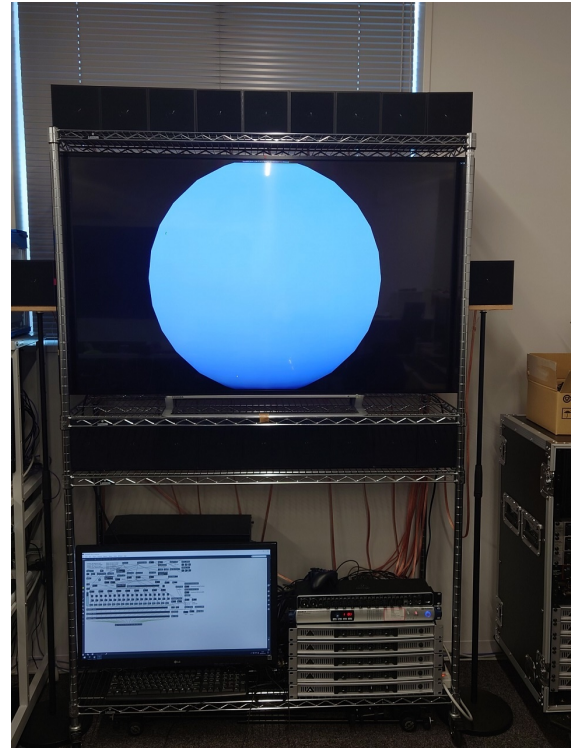


図2 制作システムの実行風景

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

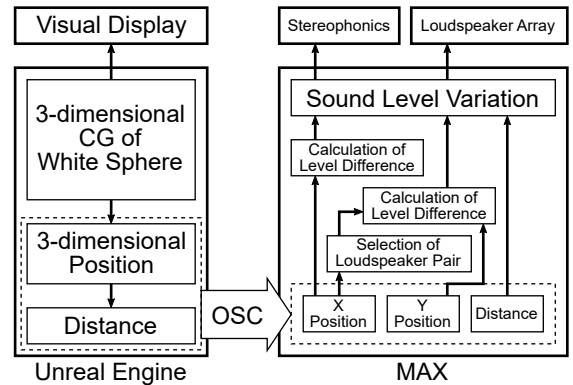


図3 制作システムの構成図

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

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

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 ΔA [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、 $P'_V \left(= \frac{2.5}{0.86} P_V + 0.0654 \right)$ 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。

$$\text{「比例増大」 } a_Z = \frac{\max P_Z - P_Z}{\max P_Z - 1} \quad (9)$$

$$\text{「指数増大」 } a_Z = \frac{1}{P_Z} \quad (10)$$

但し、 $\max P_Z (=10 \text{ or } 100)$ 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個のスピーカから再生した。

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

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

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 は左右の2個のスピーカのゲイン係数を表し、本実験ではタンゼント則[9]に従い下記の式のように設定した。

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

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

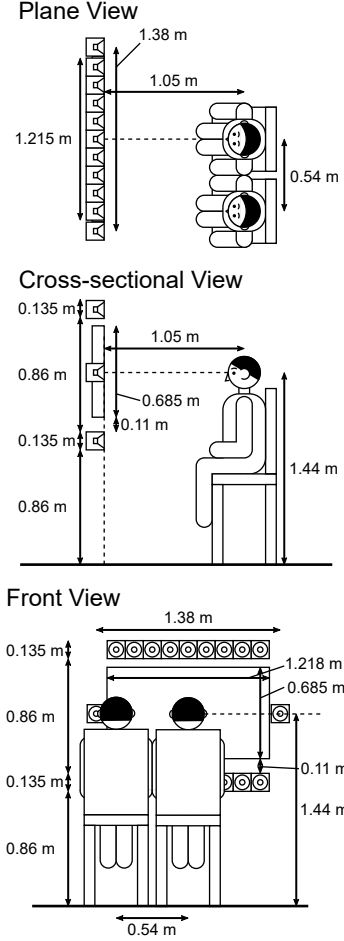


図4 評価実験における視聴者、映像ディスプレイ、スピーカの配置[5]

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

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。

4. 評価実験[6]

4.1 実験環境・条件

実験は暗騒音レベルが 35.8 dBA である研究室内の実験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。

評価実験では、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

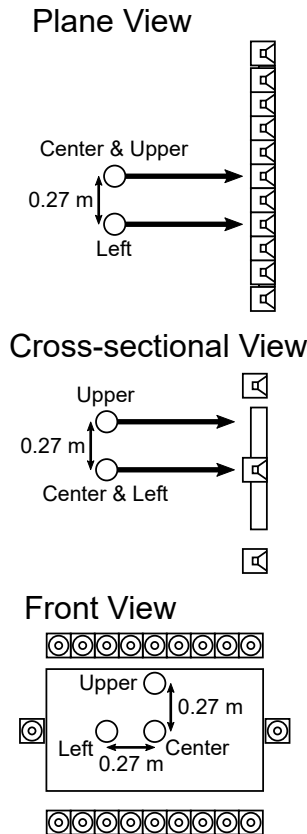


図5 評価実験における球体の位置 [5]

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

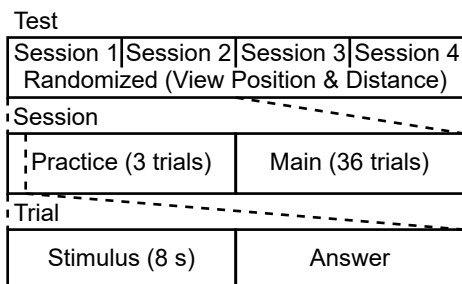


図6 評価実験の流れ図

Fig. 6 Flowchart of the evaluation experiment.

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1mに達した後で3秒間静止させた。

4.2 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。

表1 Scale of the evaluation experiment.

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

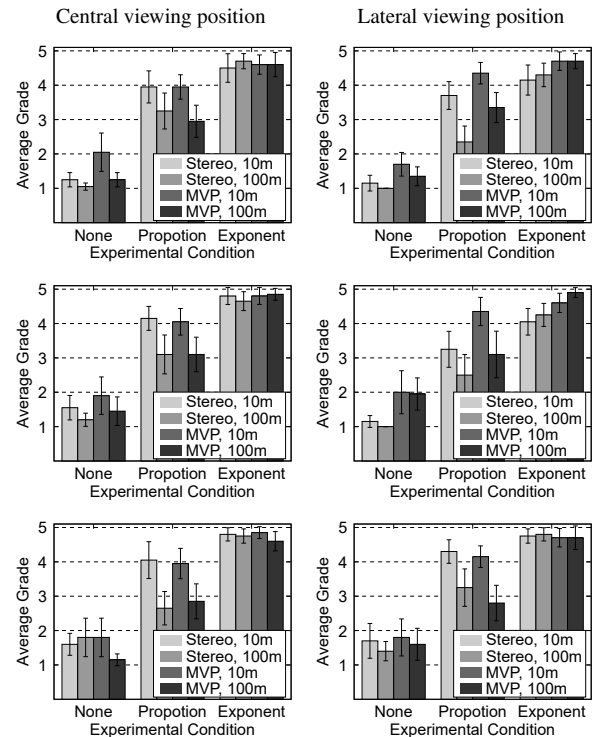


図7 評価実験の結果（上：白球位置中央，中：白球位置上，下：白球位置左）

Fig. 7 Results of the evaluation experiment. (Upper: Central, Middle: Upper, Lower: Left sphere object position)

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。

4.3 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+[10]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

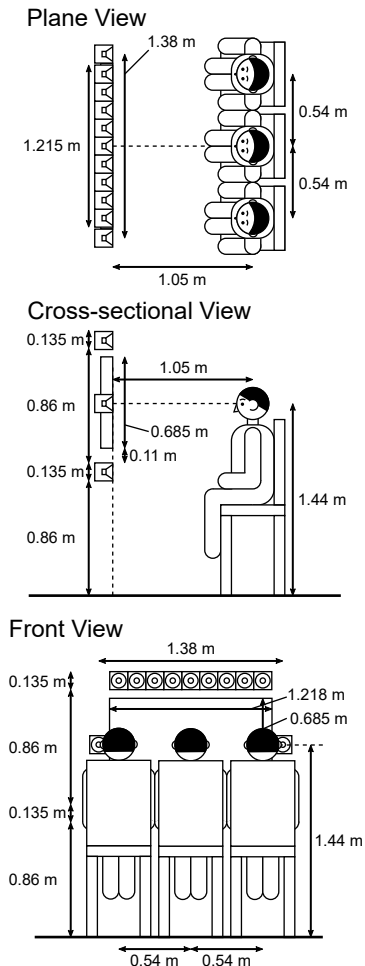


図8 追加評価実験における視聴者、映像ディスプレイ、スピーカの配置
Fig. 8 Position of viewers, visual display and the loudspeakers in the additional evaluation experiment.

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クよりも良いということが言える。

5. 追加評価実験

5.1 実験環境・条件

実験は暗騒音レベルが35.8 dBAである研究室内の実験室の一角にて行った。Fig. 8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（左側、中央、右側）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。

追加評価実験では、白球位置を3条件（中央、上、左）、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3カ所の位置（中央、上、左）の100 m奥から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。

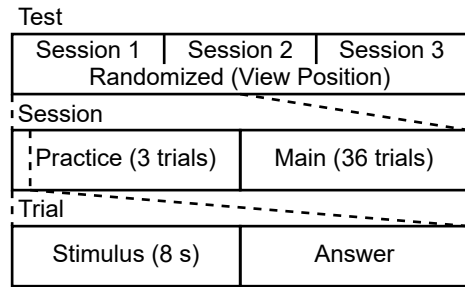


図9 追加評価実験の流れ図
Fig. 9 Flowchart of the additional evaluation experiment.

5.2 実験計画・手順

視聴者は聴力が会話域正常な成人男性10名である。実験の流れ図をFig. 9に示す。まず、実験を視聴位置ごとに3セッションに分割した。視聴位置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。

視聴者には提示した刺激の映像と音の一致度を評価させた。その際、評価はTable 1に示すような5段階とした。また、評価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。

5.3 実験結果及び考察

白球位置及び視聴位置ごとの平均評価値をFig. 10に示す。エラーバーは95%信頼区間を表す。

視聴位置（3水準）、音量変化手法（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）を白球位置ごとにjs-STAR XR+ [10]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、視聴位置と音の再生方式の一次交互作用に有意差が見られた。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、白球位置が中央や上のときは左や右の視聴位置、白球位置が左のときは右の視聴位置においてステレオよりもMVP方式の方が有意に上昇していることが示された。従って、これらの場合においては、MVP方式はステレオホニクよりも良いということが言える。

一方で、音量変化手法に関しては、すべての白球位置において主効果に有意差が見られた。多重比較を実施したところ、どの場合においても指数増大>比例増大>変化なしの順に評価が有意に高くなった。従って、奥行き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。

6. 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、移動距離や視聴位置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

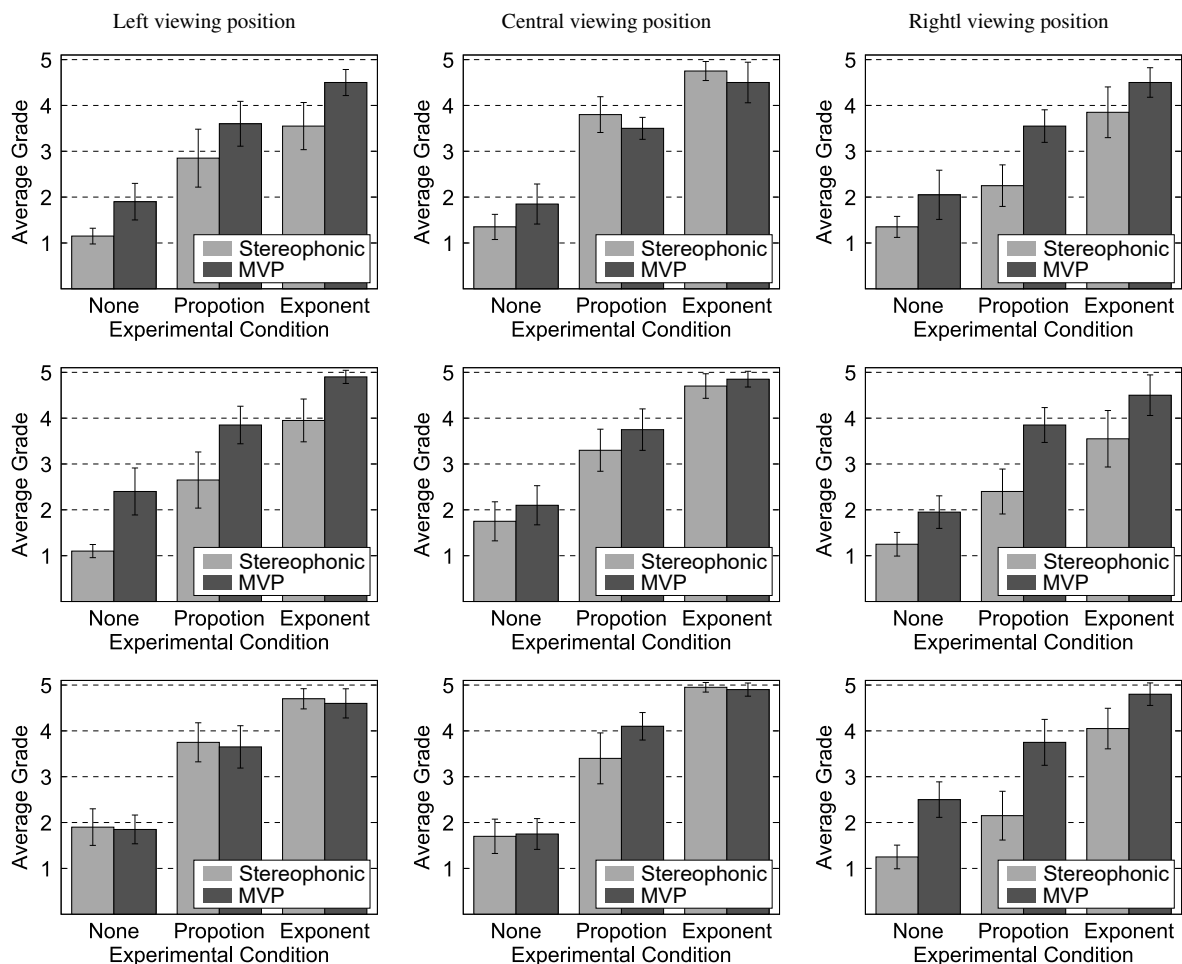


図 10 追加評価実験の結果（上：白球位置中央，中：白球位置上，下：白球位置左）
Fig. 10 Results of the additional evaluation experiment. (Upper: Central, Middle: Upper, Lower: Left sphere object position)

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龍島悠太氏及び追加評価実験を担当して下さいました長田悠世氏に感謝の意を申し上げます。本報告における 2 つの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。

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., vol.2, no.1, pp.33–45, Jan. 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., vol.20, no.3, pp.179–188, Sept. 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, Sept. 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, March 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, Aug. 2023.
- [6] 木村敏幸, "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き表現への影響," 音講論, no.1-R-13, pp.409–412, Sept. 2024.
- [7] Unreal Engine. <http://www.unrealengine.com/>.
- [8] Max. <http://cycling74.com/products/max/>.
- [9] B. Bernfeld, "Attempts for better understanding of the directional stereophonic listening mechanism," Proc. 44th Audio Eng. Soc. Convention, no.C-4, pp.1–24, Feb. 1973.
- [10] js-STAR XR+. <https://www.kisnet.or.jp/nappa/software/star/>.