

Multiple Vertical Panning を用いた立体音響システムにおける 水平パニングの影響

木村 敏幸[†] 安藤 広志^{††}

[†] 東北学院大学工学部電気情報工学科 〒 985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1

^{††} 国立研究開発法人情報通信研究機構 ユニバーサルコミュニケーション研究所

〒 619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2

E-mail: †t-kimura@m.ieice.org, ††h-ando@nict.go.jp

あらまし 筆者らはこれまでに大画面裸眼立体映像提示システム (REI) に適合する立体音響システム (Multiple Vertical Panning, MVP 方式) を提案してきた。本報告では、提案方式を遠隔会議システムに応用するために、MVP 方式において水平パニングを付加しても臨場感に影響がないのかを視聴覚実験によって検討した。その結果、ディスプレイの 4 隅にスピーカを配置しなければディスプレイの上下にスピーカを 2 個ずつ配置しただけでも十分に性能が維持されることが分かった。

キーワード 大画面裸眼立体映像提示システム, Multiple Vertical Panning, Scheffé の一対比較法, 水平パニング

Effect of the Horizontal Panning in 3D Audio System Using Multiple Vertical Panning

Toshiyuki KIMURA[†] and Hiroshi ANDO^{††}

[†] Department of Electrical Engineering and Information Technology, Faculty of Engineering,
Tohoku Gakuin University 1-13-1, Chuo, Tagajo, Miyagi, 985-8537 Japan

^{††} Universal Communication Research Institute,
National Institute of Information and Communications Technology
2-2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto, 619-0288 Japan

E-mail: †t-kimura@m.ieice.org, ††h-ando@nict.go.jp

Abstract We previously proposed a 3D audio system using the multiple vertical panning (MVP) method to develop a 3D audio system that matches a multi-view 3D video display system (REI display). In this paper, in order to apply our proposed method to the teleconference system, we performed an audio-visual psychological experiment and evaluated the effect of the horizontal panning on the sense of presence in our proposed method. We found that the performance is maintained when four loudspeakers were placed at the position except the edges of the display.

Key words multi-view 3D video display, multiple vertical panning, Scheffé's paired comparison, horizontal panning

1. はじめに

独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) では次世代の立体映像技術として裸眼立体映像技術に着目し、これまでにプロジェクタアレイを用いた方式を提案し、200 インチの画面を持った大画面裸眼立体映像提示システムを開発してきている [1]. Fig. 1 にシステムの基本構成を示す。プロジェクタアレイを構成する各プロジェクタより視差付き映像をフレネルレンズに向かって再生する。その際、フレネルレンズの前に配置した拡散スク

リーンの拡散特性 (水平方向には狭い角度で拡散, 垂直方向には広い角度で拡散) によって視差付き映像は水平方向にのみ提示される。これにより、観察者は水平位置に応じた視差付き映像を観察できるので、特殊な眼鏡なしに同時に複数の人が見る位置に応じた自然な立体像を観察できるようになる。

我々はさらに大画面裸眼立体映像提示システムに適合する立体音響システムとして、今までとは異なる観点に基づいた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、MVP 方式が十分な性能を有

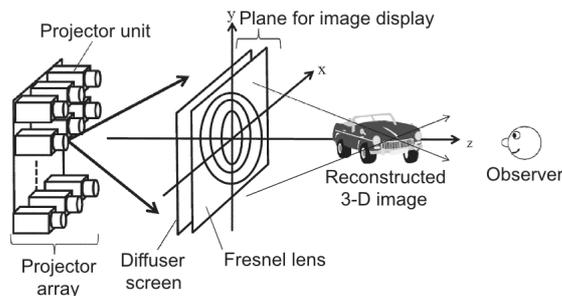


図1 大画面裸眼立体映像ディスプレイ (REI) の基本構成 [2]

Fig. 1 Basic configuration of a large-screen multi-view 3D video display system (REI display) [2].

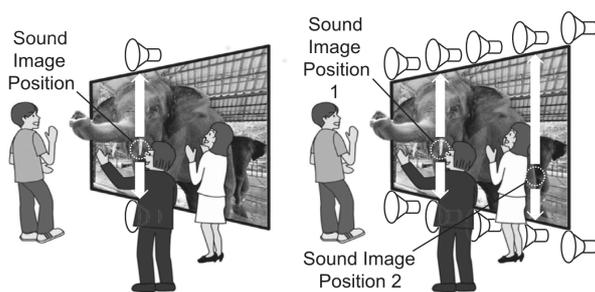


図2 Multiple Vertical Panning (MVP) 方式の基本構成 [3]

Fig. 2 Basic configuration of a multiple vertical panning (MVP) method [3].

することを実証し [3], スピーカをスクリーン上部及び下部に 5 個ずつ配置しても視聴者は臨場感の違いを識別することができないということも示してきた [4]. MVP 方式の基本構成を Fig. 2 に示す. まず, Fig. 2 の左側に示すように, 立体像の位置の上下に 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, 視聴者は立体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スクリーンの上下に配置した 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立体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. 2 の右側に示すように, スクリーン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スクリーン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大画面裸眼立体映像提示システムがスクリーン上に描写する立体像の位置で音が鳴っているように感じることができる.

これまでの MVP 方式に関する研究では, 音源の近接に収録用マイクロホンを設置し, 音源信号の位置情報を伝送することを前提としてきた. しかしながら, 多人数が参加する遠隔通信会議システムの場合, 音源の近接に収録用マイクロホンを設置することに手間がかかるし, 人数が多くなりすぎると伝送量が非常に多くなってしまふ. このような問題を解決するためには, 位置情報を伝送する必要のない収録用マイクロホンアレイを開発する必要がある.

本研究では, 垂直方向の音量差を再現するために, 音源が想定される位置 (遠隔通信会議システムにおいては話者) の上下に超指向性マイクロホンを設置することを想定する. その際, 先の研究 [4] にて言及した伝送量の問題に基づき, マイクロホンの数はスピーカの数と同じにする. すると, 超指向性マイクロホンの收音方向に音源が存在しない場合, 水平方向に隣り合う超指向性マイクロホンが同時に音を収録するので, 得られた音源信号は水平パニングが付加されたものと同じになることが予測される. そこで, 本報告では MVP 方式において音源信号に水平パニングを付加しても臨場感に影響がないのかを視聴覚実験によって評価する.

2. 視聴覚実験 1

2.1 実験環境・条件

実験は 200 インチ背面投影型映像スクリーンが設置されている会議室にて行った. スクリーンの後方には 2 台のプロジェクタが設置されており, それぞれ左目用と右目用の映像が投影される. プロジェクタとスクリーンの間には偏光フィルタが設置されているので, 視聴者は偏光方式の立体メガネをかけることによって立体映像を観ることができる. 部屋の残響時間は 402 ms, 部屋の暗騒音レベルは 38 dBA だった.

Fig. 3 に示すようにスクリーンの上下に計 82 個のスピーカを配置した. スクリーンは会議室の壁面に設置されており, スピーカをスクリーンの真上と真下に配置することができないため, スピーカはスクリーンより 0.275 m 前方に配置した. スピーカは市販のスピーカユニット (Fostex: FE103En) を自作の密閉型エンクロージャ (11 cm (幅) × 25 cm (奥行) × 11 cm (高さ)) に取り付けしたものを用いた. 大画面裸眼立体映像提示システムの視聴範囲 (最適視聴距離は 5.5 m) を考慮して, スクリーンから 3.5, 5.5, 7.5 m 離れた地点に 3 か所の視聴位置 (以降「前方位置」「中心位置」「後方位置」と呼ぶ) を設定した. 大画面裸眼立体映像提示システムの最適な視聴幅はスクリーンから 5.5 m 離れた場合, スクリーン正面を中心として左右に 2 m である. そこで, スクリーン正面から 5.5 m 離れ, さらに 2 m 左側に移動した視聴位置 (以降「側方位置」と呼ぶ) をもう 1 か所設定した. 計 4 か所の視聴位置の高さは視聴者の耳の位置において 1.5 m とした. 音圧レベルは中心位置において約 70 dBA に設定した.

実験に用いた立体映像を Fig. 4 に示す. この立体映像 (5 秒間) は UFO (Fig. 4 内の白色の枠線) が音を出しながら画面内を動き回り, UFO が星やボール (Fig. 4 内の黒色の枠線) に当たると星やボールの場所から音が再生されるという内容である. 立体映像の最適視聴距離は 5.5 m, 視差は 0.0625 m とした. また, 大画面裸眼立体映像提示システムは視聴位置が左右方向に移動するとそれに合わせて立体像の見え方が変わるので, 本実験においても視聴位置が左右方向に移動するたびにその位置に合わせた立体映像を提示した.

本実験で設定した音の再生条件を Fig. 5 に示す. 条件 (a)-(f) における灰色のスピーカは音が再生されないスピーカ, スクリーン上の黒色の矢印はパニングの方向を表す. 条件 (e) と

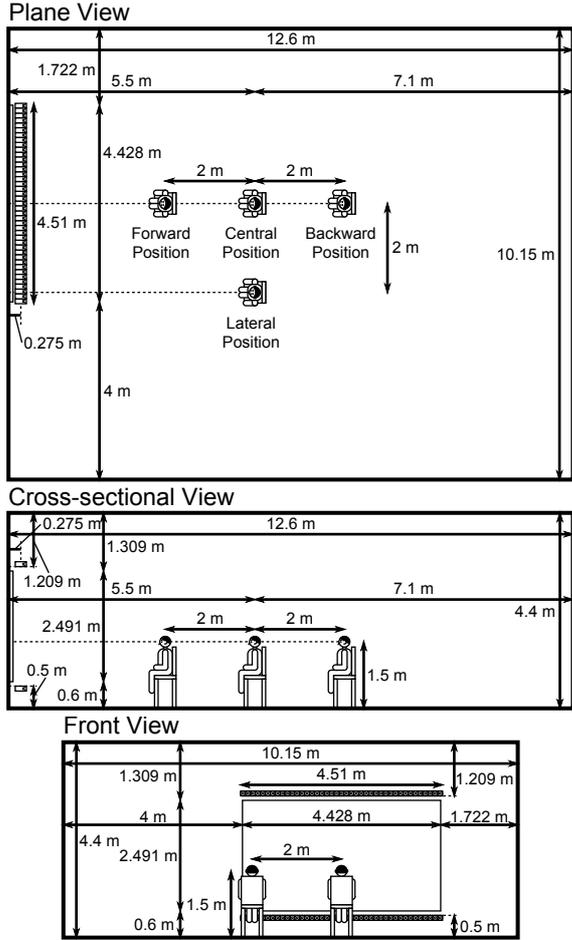


図3 視聴覚実験1における視聴者、スクリーン及びスピーカアレイの配置
Fig.3 Position of viewers, screen and the loudspeaker array in first audio-visual experiment.

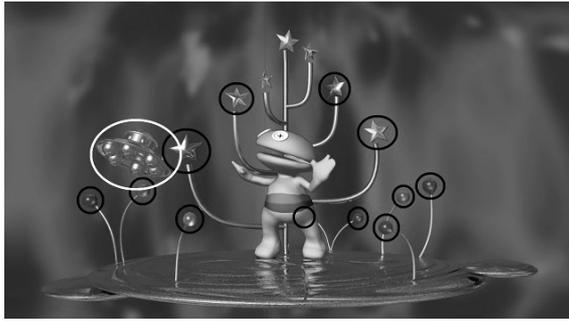


図4 視聴覚実験1にて用いた立体映像
Fig.4 3D video in first audio-visual experiment.

(f) は前の実験 [4] においてスピーカの数えこれを以上増やしても臨場感の違いが識別できないと判断された条件である。一方、条件 (a) は前の実験 [4] において明らかに臨場感に違いがあると判断された条件であり、今回の実験における視聴者の臨場感の識別能力を検査するために設定した。

時刻 $T = \frac{m-1}{F_v}$ において位置 (P_H, P_V) の立体像から音が再生される場合の各条件における再生音の合成は下記の手順により実施した。但し、 $F_v (=30 \text{ fps})$, $m (=1, \dots)$ は映像のフレームレート及びフレームインデックスを表す。また、 $P_H (=$

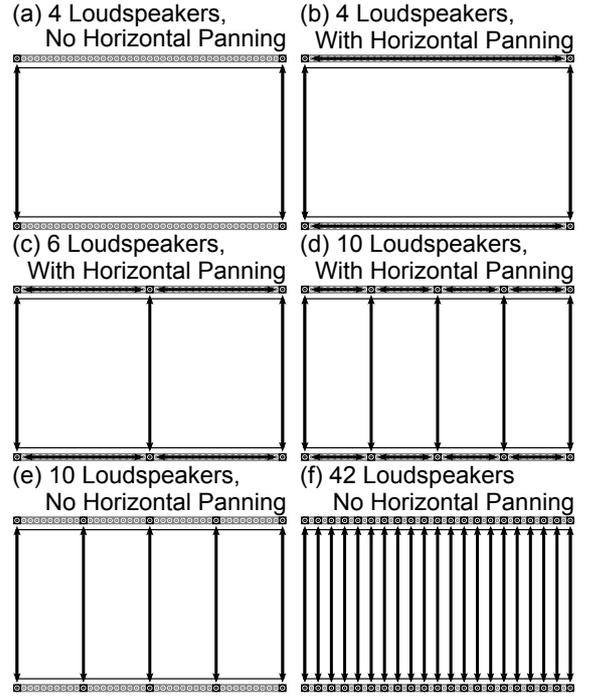


図5 視聴覚実験1にて用いた音条件
Fig.5 Sound conditions used in first audio-visual experiment.

2.214~2.214) は立体像の横位置を表し、0 がスクリーンの横中心位置に相当する。一方、 $P_V (= -1.2455 \sim 1.2455)$ は立体像の縦位置を表し、 -0.3455 が視聴者の耳の高さに相当する。

まず、下記の式によって提示する立体像の横位置 P_H に最も近いスクリーン上下に配置した2個の再生用スピーカの横位置 $P'_H (= -2.2, \dots, 2.2)$ を選択する。

$$P'_H = \Delta d_H \text{ round} \left(\frac{P_H + 2.2}{\Delta d_H} \right) - 2.2 \quad (1)$$

但し、 Δd_H は左右のスピーカ間隔を表し、Fig. 5 の条件 (a) と (b) では 4.4 m, 条件 (c) では 2.2 m, 条件 (d) と (e) では 1.1 m, 条件 (f) では 0.22 m となる。さらに、水平パニングを付加する場合 (本実験では条件 (b)-(d) に相当) は下記の式によって水平パニングを担当する2個の再生用スピーカの横位置 P'_{HP} も設定する。

$$P'_{HP} = P'_H + \text{sign}(P_H - P'_H) \Delta d_H \quad (2)$$

次に、水平パニングを付加しない場合 (本実験では条件 (a), (e), (f) に相当) は最初に選択した上側及び下側の再生用スピーカから音源信号 $s(n)$ に上下の音量差をつけた音信号 $x_U(n)$, $x_D(n)$ を下記の式によって再生する。

$$x_U(n) = a_U w(n) s(n) \quad (3)$$

$$x_D(n) = a_D w(n) s(n) \quad (4)$$

$$(n = \frac{F_s}{F_v} (m-1), \dots, \frac{F_s}{F_v} m + L F_s)$$

一方、水平パニングを付加する場合 (本実験では条件 (b)-(d) に相当), 下記の式に従って最初に選択した上側及び下側の再生用スピーカからは音信号 $x_{U1}(n)$, $x_{D1}(n)$ を、水平パニングを担

当するために設定した上側及び下側の再生用スピーカからは音信号 $x_{U2}(n)$, $x_{D2}(n)$ を再生する.

$$x_{U1}(n) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{P_H - P'_H}{\Delta d_H}\right) a_U w(n) s(n) \quad (5)$$

$$x_{D1}(n) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{P_H - P'_H}{\Delta d_H}\right) a_D w(n) s(n) \quad (6)$$

$$x_{U2}(n) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{|P_H - P'_H|}{\Delta d_H}\right) a_U w(n) s(n) \quad (7)$$

$$x_{D2}(n) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{|P_H - P'_H|}{\Delta d_H}\right) a_D w(n) s(n) \quad (8)$$

$$(n = \frac{F_s}{F_v}(m-1), \dots, \frac{F_s}{F_v}m + LF_s)$$

但し, $F_s(=48 \text{ kHz})$, $n(=0, \dots)$ は音の標本化周波数及び標本時間, $w(n)$, $L(=1 \text{ ms})$ は下記のように定義される音の窓関数及びそのクロスフェード時間を表す.

$$w(n) = \begin{cases} \frac{1}{LF_s} \{n - \frac{F_s}{F_v}(m-1)\} & (n = \frac{F_s}{F_v}(m-1), \dots, \frac{F_s}{F_v}(m-1) + LF_s) \\ 1 & (n = \frac{F_s}{F_v}(m-1) + LF_s, \dots, \frac{F_s}{F_v}m) \\ -\frac{1}{LF_s} (n - \frac{F_s}{F_v}m) + 1 & (n = \frac{F_s}{F_v}m, \dots, \frac{F_s}{F_v}m + LF_s) \end{cases} \quad (9)$$

また, 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.

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

$$a_D = \frac{1}{\sqrt{10^{\frac{\Delta A}{10}} + 1}} \quad (11)$$

本実験では音量差 ΔA は先行研究 [3] に従い, 下記のように設定した.

$$\Delta A = \frac{\alpha P_V + 0.1437}{0.1065} \quad (12)$$

但し, $\alpha(= \frac{2.7}{2.5})$ は先行研究 [3] では上下のスピーカ間隔が 2.5 m であったのに対し, 今回の実験における上下のスピーカ間隔が 2.7 m であることにより設けた補正係数である.

2.2 実験計画・手順

視聴者はメガネあり立体映像が鑑賞可能で, かつ日常生活において聴力に異常の見られない 27-38 歳の計 9 名 (男性 5 名, 女性 4 名) である. 評価手法には Scheffé の一対比較法 (浦の変法) [5] を用いた. 実験の流れ図を図 6 に示す. まず, 評価指標を 2 種類 (「音の位置の一致度」「音の動きの一致度」) 設定し, 実験全体を評価指標ごとに 2 つに分割した. 「音の位置の一致度」とは「星やボール (Fig. 4 内の赤色の枠線) の音が常に映像の位置で鳴っているように感じるか」ということを表し, 「音の動きの一致度」は「UFO (Fig. 4 内の黄色の枠線) の音が常に映像の位置に合わせて動いているように感じるか」ということを表す. さらに, 視聴位置ごとに分割を行い, 計 8 つのセッションを設定した. 各セッションにおいて 6 回の練習試行の後, 30 回の本試行を行った. 練習試行は図 5 における 3 つの実験

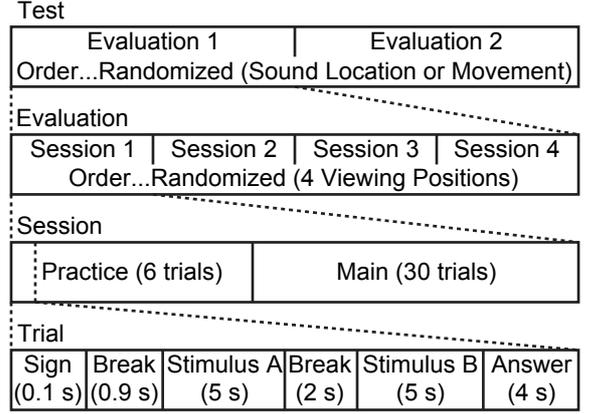


図 6 視聴覚実験の流れ図

Fig. 6 Flowchart of the audio-visual experiment.

表 1 Scheffé の一対比較法の評価

Table 1 Scale of Scheffé's paired comparison.

Grade	Judgment
3	Very good
2	Fairly good
1	Little good
0	The same
-1	Little bad
-2	Fairly bad
-3	Very bad

条件 [条件 (a), (c), (f)] の順列の総数 ($3 \times 2 = 6$) であり, 本試行は図 5 における 6 つの実験条件 [条件 (a)-(f)] の順列の総数 ($6 \times 5 = 30$) である. 評価指標, 視聴位置及び試行の提示順序は視聴者ごとにランダム化した.

視聴者には先に提示した刺激音 (A) を基準にして後に提示した刺激音 (B) の音の位置や動きの一致度を聴取者に評定させた. その際, 評定は表 1 に示すような 7 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.

2.3 実験結果及び考察

得られた実験結果を 8 種類 [=評価指標 (2) \times 視聴位置 (4)] のセッションごとに Scheffé の一対比較法 (浦の変法) に基づいて分散分析を行ったところ, 1 つのセッション (側方位置, 音の位置) を除く全てのセッションにおいて実験条件に基づく主効果が 0.1% 有意であった. その結果, 音の再生条件による影響に有意差が見られると判断されたので, セッションごとに平均評定値を算出し, 評定値の差によって水平パニングによる臨場感への影響を検討することにした.

平均評定値をセッションごとに Figs. 7-8 に示す. エラーバーはヤードスティックによる 95% 信頼区間を表す. 太い点線は最も高い平均評定値のボーダーラインを表し, 矢印はそれよりも平均評定値が有意に低いことを示す. 条件 (a) では音像が左端や右端に偏っており, 映像位置と音像位置のずれを明らかに知覚できるので, 1 つのセッション (側方位置, 音の位置) を除く全てのセッションにおいてボーダーラインよりも平均評定値が有意に低くなっている. ゆえに, この結果から見ると視聴者は

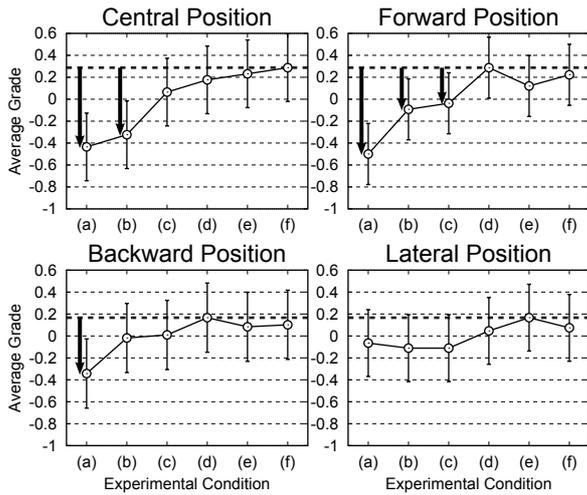


図7 視聴覚実験1の結果(音の位置)

Fig. 7 Results of first audio-visual experiment (Sound location).

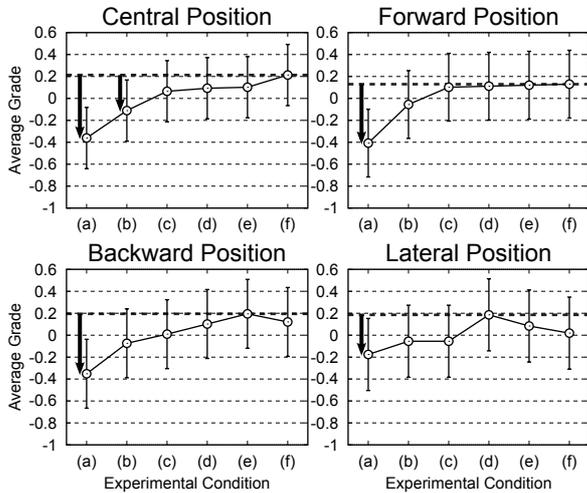


図8 視聴覚実験1の結果(音の動き)

Fig. 8 Results of first audio-visual experiment (Sound movement).

臨場感の違いをおおむね正しく識別していると考えられる。

検討した音の再生条件の中で最も平均評定値が高い条件を基準として水平パニングによる臨場感への影響を検討する。条件(d)-(f)の場合は全てのセッションにおいて最も平均評定値が高い条件との有意差は見られない。つまり、条件(d)と(e)に着目して考察した場合、前の実験[4]によって構築されたシステムに水平パニングを付加しても、視聴者は臨場感の違いを識別できないということが言える。従って、MVP方式を用いた遠隔会議システムを構築する場合、指向性マイクロホンアレイを收音システムに適用しても十分に性能が維持されると考えられる。

また、条件(b)と(c)に着目すると、どちらの条件も一部のセッションにおいて最も平均評定値が高い条件よりも有意に平均評定値が低い。従って、水平パニングを付加してもスピーカ数を削減することは困難であると言える。

3. 視聴覚実験2

第2章では実験条件に用いたスピーカ配置はステレオホニッ

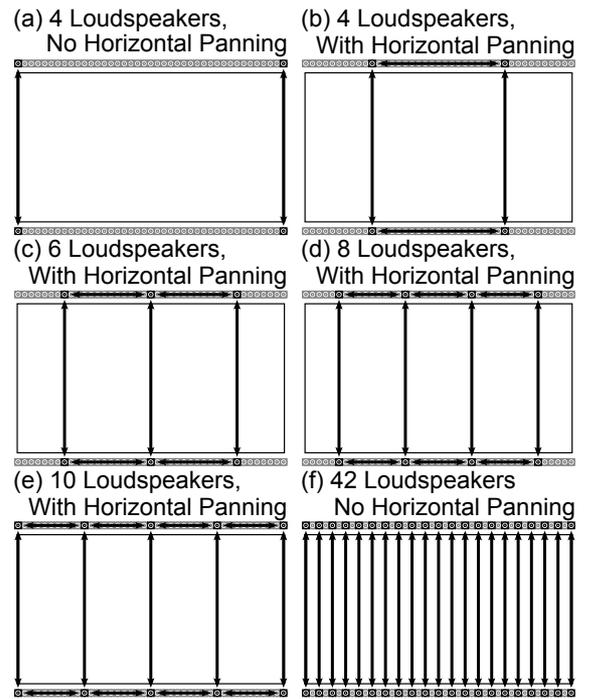


図9 視聴覚実験2にて用いた音条件

Fig. 9 Sound conditions used in second audio-visual experiment.

クのような従来のスピーカ配置との互換を取るために必ず映像ディスプレイの4隅にスピーカを配置していた。しかし、遠隔通信会議システムに応用する場合は従来のスピーカ配置と互換をとる必要がないため、映像ディスプレイの4隅にスピーカを配置する必要がなくなる。そこで、第3章では実験条件に映像ディスプレイの4隅にスピーカを配置しない条件を設定し、再度同じ実験を実施してその性能を評価する。

3.1 実験環境・条件

実験環境及び実験に用いた立体映像は2.1節と同じである。

本実験で設定した音の再生条件をFig. 9に示す。条件(a)-(f)における灰色のスピーカは音が再生されないスピーカ、スクリーン上の黒色の矢印はパニングの方向を表す。条件(e)と(f)は前の実験[4]においてスピーカ数をこれ以上増やしても臨場感の違いが識別できないと判断された条件である。一方、条件(a)は前の実験[4]において明らかに臨場感に違いがあると判断された条件であり、今回の実験における視聴者の臨場感の識別能力を検査するために設定した。また、再生音の合成手順は2.1節と同じである。

3.2 実験計画・手順

視聴者はメガネあり立体映像が鑑賞可能で、かつ日常生活において聴力に異常の見られない22-39歳の計9名(男性5名、女性4名)である。そのうち、男性1名が第2章の実験にも参加している。評価手法及び実験の流れは2.2節と同じである。各セッションにおいて6回の練習試行の後、30回の本試行を行った。練習試行は図9における3つの実験条件[条件(a), (c), (f)]の順列の総数(3×2=6)であり、本試行は図9における6つの実験条件[条件(a)-(f)]の順列の総数(6×5=30)である。評価指標、視聴位置及び試行の提示順序は視聴者ごとにランダム

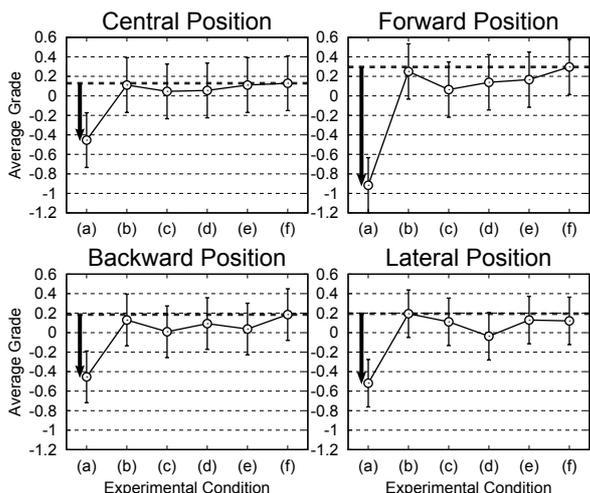


図 10 視聴覚実験 2 の結果 (音の位置)

Fig. 10 Results of second audio-visual experiment (Sound location).

イズした。また、評価方法は 2.2 節と同じである。

3.3 実験結果及び考察

得られた実験結果を 8 種類 [=評価指標 (2)× 視聴位置 (4)] のセッションごとに Scheffé の一対比較法 (浦の変法) に基づいて分散分析を行ったところ、全てのセッションにおいて実験条件に基づく主効果が 0.1% 有意であった。その結果、音の再生条件による影響に有意差が見られると判断されたので、セッションごとに平均評定値を算出し、評定値の差によって水平パニングによる臨場感への影響を検討することにした。

平均評定値をセッションごとに Figs. 10-11 に示す。エラーバーはヤードスティックによる 95% 信頼区間を表す。太い点線は最も高い平均評定値のボーダーラインを表し、矢印はそれよりも平均評定値が有意に低いことを示す。条件 (a) では音像が左端や右端に偏っており、映像位置と音像位置のずれを明らかに知覚できるので、全てのセッションにおいてボーダーラインよりも平均評定値が有意に低くなっている。ゆえに、この結果から見ると視聴者は臨場感の違いを正しく識別していると考えられる。

検討した音の再生条件の中で最も平均評定値が高い条件を基準として水平パニングによる臨場感への影響を検討する。条件 (b)-(f) の場合は全てのセッションにおいて最も平均評定値が高い条件との有意差は見られない。つまり、ディスプレイの 4 隅にスピーカを配置しない場合、スピーカの数 を 4 個に減らしたとしても、視聴者は臨場感の違いを識別できないと言えよう。従って、MVP 方式を用いて遠隔通信会議システムを構築する場合、ディスプレイの 4 隅にスピーカを配置しなければスピーカ数は 4 個に減らすことが可能であると考えられる。

4. おわりに

本発表では、我々が従来提案している立体音響システム (MVP 方式) を用いた遠隔通信会議システムを構築する場合に臨場感に影響が生じるのかを視聴覚実験によって検討した。その結果、ディ

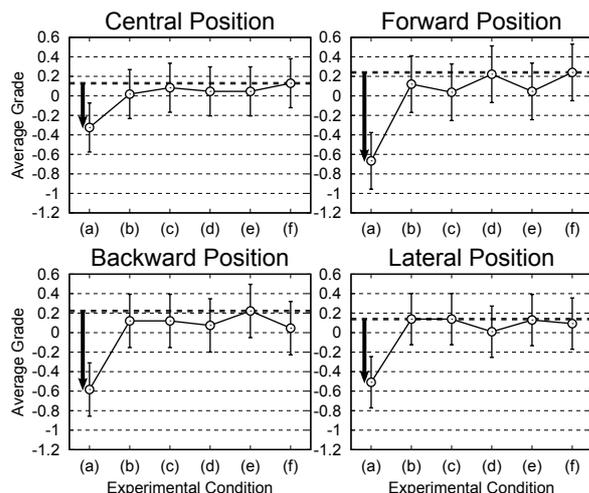


図 11 視聴覚実験 2 の結果 (音の動き)

Fig. 11 Results of second audio-visual experiment (Sound movement).

スプレイの 4 隅にスピーカを配置しなければディスプレイの上下にスピーカを 2 個ずつ配置しただけでも十分に性能が維持されることが分かった。

5. 謝 辞

視聴覚実験の実施にあたり、実験環境の構築にご協力下さった岩澤昭一郎主任研究員及び榎本成悟研究員、立体映像を提供して下さった牧野真緒研究員に感謝の意を申し上げます。本発表における視聴覚実験は独立行政法人情報通信研究機構倫理規定に従い実施した。

文 献

- [1] S. Iwasawa, M. Kawakita, and N. Inoue, "REI: an automultiscopic projection display," Proc. Int. Conf. on 3D System and App., no. Selected paper 1, pp.1-4, June 2013.
- [2] M. Kawakita, S. Iwasawa, S. Yano, R. Lopez-Gulliver, S. Yoshida, S. Gurbuz, D. Moldovan, H. Ando, and N. Inoue, "Three-dimensional image system without special glasses," J. National Inst. Info. Comm. Tech., vol.57, no.1/2, pp.47-58, March/June 2010.
- [3] 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.
- [4] 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. VR Soc. Jpn., vol.20, no.3, pp.179-188, Sept. 2015.
- [5] H. Scheffé, "An analysis of variance for paired comparisons," J. Am. Stat. Assoc., vol.47, pp.381-400, 1952.