

研究報告

PWM 信号のための音場再生方式の一検討

INVESTIGATION OF THE SOUND-FIELD PLAYBACK SYSTEM FOR PWM SIGNALS

辻一郎

Ichiro TSUJI

概要

本論文は、独自に開発したシンセサイザー [1] から出力される PWM (Pulse Width Modulation) 信号を再生するための音場再生方式を提案する。このシンセサイザーから出力される PWM 信号は、デジタル信号処理または、アナログ信号処理されて、アンプで増幅してスピーカ装置で再生される。スピーカ装置は、フロントロードホーン型のスピーカの上部にバックロードホーン型のスピーカを接続したものである。スピーカ装置に信号を入力することにより、スピーカ装置は、固有振動を発生して、入力信号に対して効果音を付加することができる。さらに、5 つスピーカ装置を用いることにより、臨場感のある音場を再生することができる。また、スピーカ装置の代わりに、5 つの超磁歪素子を用いたヘッドフォン装置を用いて、頭部で臨場感ある音場を再生することもできる。本論文は、このシンセサイザーから出力される PWM 信号を再生するためのスピーカ装置について説明する。次に、スタジオで、このシンセサイザーにより演奏を行い、5 つのスピーカ装置が、臨場感ある音場を再生できることを評価する。また、応用例として、4 つのスピーカ装置を用いて、2 チャンネルオーディオ信号を再生する方法について説明する。最後に、このシンセサイザーから出力される PWM 信号を再生するためのヘッドフォン装置について説明する。

This paper proposes a sound-field playback system for playing back the PWM (Pulse Width Modulation) signal outputted from the synthesizer, which is developed uniquely. The PWM signal outputted from this synthesizer is processed using digital or analog signal processing. This signal is then amplified using an amplifier, and is played back through a speaker unit. A speaker unit connects a back loading horn-type speaker to the upper part of a front loading horn-type speaker. By inputting a signal to a speaker unit, a speaker unit generates a characteristic vibration and adds a sound effect to the input signal. Further,

by using five speaker units, a sound field with an evident presence can be played back. Moreover, this system can play back the sound field in which a feeling of its presence exists around the head when the headphone unit is used, which has five super magnetostrictive elements instead of the speaker units. This paper explains the speaker unit for playing back the PWM signal outputted from this synthesizer. A player performs in a studio using this synthesizer and observes that five speaker units can play back the sound field in which a feeling of its presence exists. Moreover, as application, playing back a two-channel audio signal is explained by using four speaker units. Finally, the headphone unit is explained for playing back the PWM signal outputted from this synthesizer.

1. はじめに

立体音場を再生する手法は、技術的手法として、サラウンド方式、トランスオーラルシステム [2]、境界音場制御 [3] などが挙げられ、芸術的手法として、電子音楽を立体的に再生する装置であるアコースモニウム [4] が挙げられる。本音場再生方式は、臨場感ある音場を 5 チャンネルスピーカで再生する芸術的手法であり、スピーカ装置自体で、入力信号に対して新たに効果音を加える。5 つのスピーカ装置の配置により、音像定位が前後左右及び、上下に広がる。さらに、入力信号の PWM 信号は、あらかじめ、デジタル信号処理または、アナログ信号処理がされているため、音響効果が一層豊かになる。また、スピーカ装置の代わりにヘッドフォン装置を用いた場合は、超磁歪素子と振動板を頭頂部と顎下部に装着して、ヘッドバンドにより振動板を固定する。これにより、音像定位が頭部全周に定位するため、スピーカ装置とは異なる臨場感ある音場が再生できる。

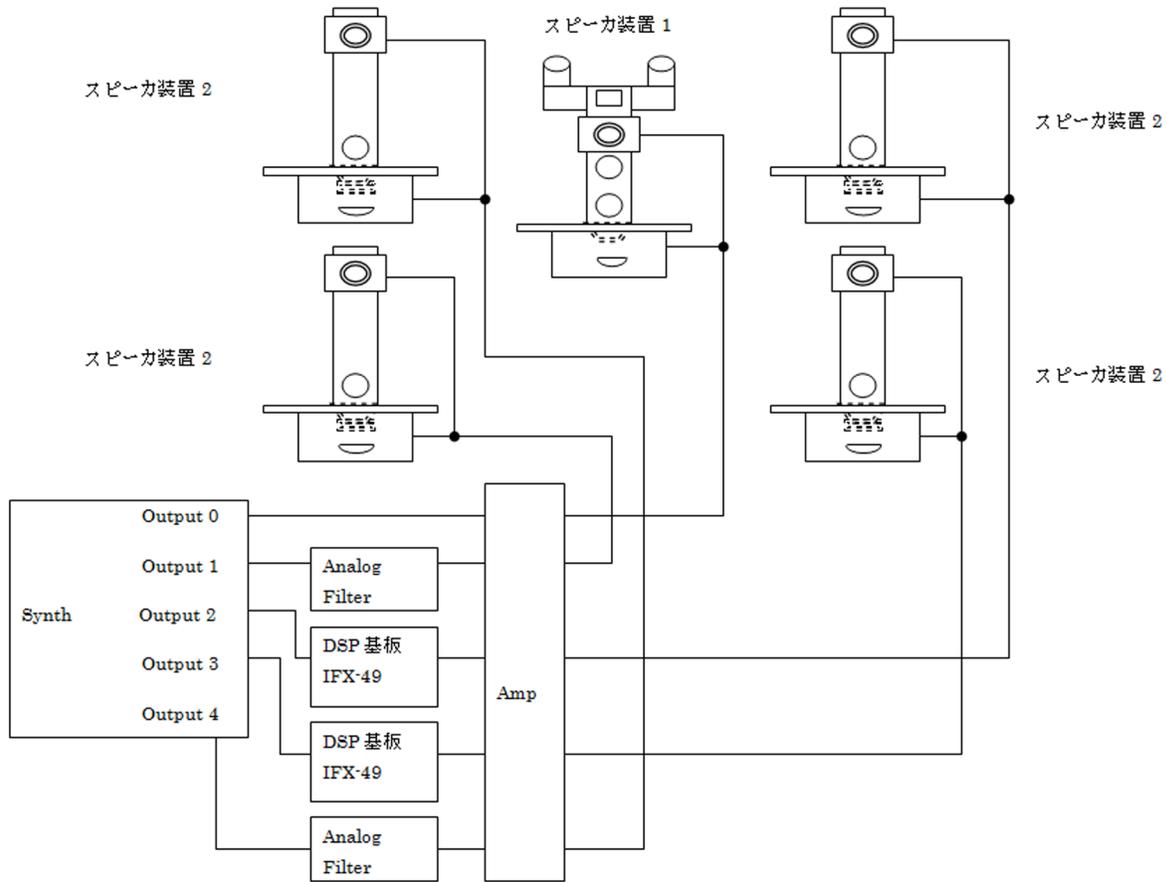


図 1. 本音場再生装置の構成

2. 本音場再生装置の構成

本音場再生装置の構成を図 1 に示す。このシンセサイザーの出力端子を Output 0、Output 1、Output 2、Output 3 及び、Output 4 とする。Output 0 からは、PWM 信号をコンピュータ上の Pure Data¹ でデジタル信号処理された信号が出力される。Output 1、Output 2、Output 3 及び、Output 4 は、PWM 信号が出力される。Output 0 の出力信号は、アンプに入力されて、アンプの出力信号は、スピーカ装置 1 に入力されて再生される。Output 2 の出力信号は、マルツエレクト社² のデジタル信号処理基板 IFX-49⁵ (以下、IFX-49 と省略する) に入力されて、コーラスエフェクトが掛かる。コーラスエフェクトの変調周波数は、ランダムに自動変更される。また、スイッチの切り替えにより、左チャンネルをビブラートエフェクト、右チャンネルをトレモロエフェクトに変更できる。IFX-49 の出力信号は、アンプに入力されて、アンプの出力信号は、スピーカ装置 2 に入力されて再生される。Output 3 の出力信号は、IFX-49 に入力される。IFX-49 により、リングモジュレーターエフェクトが掛かる。リングモジュレーターエフェクトの変調周波数は、ランダムに自動

変更される。また、スイッチの切り替えにより、リングモジュレーターエフェクトの変調周波数が一定になる。IFX-49 の出力信号は、アンプに入力されて、アンプの出力信号は、スピーカ装置 2 に入力されて再生される。Output 1 と Output 4 の出力信号は、アナログフィルタに入力される。アナログフィルタにより、ローパスフィルタ、バンドパスフィルタ及び、ハイパスフィルタが掛かる。各アナログフィルタの出力信号は、アンプに入力されて、アンプの各出力信号は、各スピーカ装置 2 に入力されて再生される。アナログフィルタの次数は 2 次で、ローパスフィルタとバンドパスフィルタは、バイカッド回路を用いて設計し、ハイパスフィルタは、Sallen-Key 回路を用いて設計した。[6]

2.1. スピーカ装置の原理

スピーカ装置 1 とスピーカ装置 2 は、音響管にデジタル信号処理または、アナログ信号処理された PWM 信号をスピーカを用いて入力することにより、固有振動を発生させる。これにより、効果音が PWM 信号に付加される仕組みになっている。気柱の固有振動は、

¹ <https://puredata.info/>

² <http://www.marutsu.co.jp/>

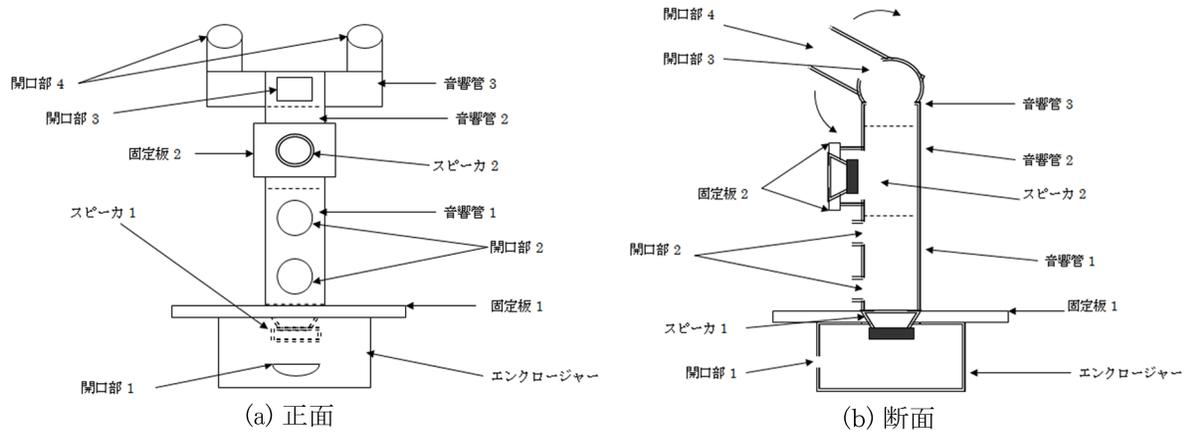


図 2. スピーカ装置 1 の構成

開管の長さを L 、音速 v として次式で表される。

$$f_n = \frac{v}{2L}n \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

2.2. スピーカ装置 1 の構成と周波数特性

図 2 にスピーカ装置 1 の正面図と断面図を示す。スピーカ装置 1 の下部に設置されたエンクロージャの上面に、低音域と中音域の信号を再生するためのスピーカ 1 を上方向に装着する。そして、このスピーカ 1 の上に、音響管 1 を垂直に伸びるように装着して、フロントロードホーン型のスピーカにする。エンクロージャは、受聴者の正面方向に対応する面の中心部に開口部 1 を設けて、中音域と低音域の信号を出力する。音響管 1 の最上部と最下部を、受聴者の正面方向に向けて音響管 1 を伸ばして開口部 2 を設ける。スピーカ 1 から出力する信号を音響管 1 に入力して、固有振動を発生させて臨場感のある中音域と低音域の信号を、開口部 2 より出力する。この音響管 1 の上に垂直に伸びるように音響管 2 を装着する。この音響管 2 の縦方向における中点に、受聴者の正面方向に向けて、全音域の信号を再生するためのスピーカ 2 を装着してバックロードホーン型のスピーカにする。音響管 2 の上に、垂直に音響管 3 を装着する。音響管 3 に受聴者の正面方向に向けて開口部 3 を設ける。音響管 3 は、左右横方向に延長して、音響管 3 の左右の先端を 90 度に受聴者の正面方向に曲げて、開口部 4 を設ける。90 度に曲げた音響管 3 を縦方向の斜め上方に向ける。音響管 2 に装着したスピーカ 2 の背面から出力する信号を、音響管 2 と音響管 3 に入力して固有振動を発生させ、臨場感のある中音域の信号を開口部 3 と開口部 4 から出力する。スピーカ装置 1 は、開口部 2、開口部 3 及び、開口部 4 を設けることにより、通常のオーディオ信号も臨場感ある音で再生できるように考慮した。

無響室で、efu³ のソフトウェア WaveGene と WaveSpec-

³ <http://efu.jp.net/index.html>

tra を用いて、スピーカ装置 1 の周波数測定を行った。図 3 にスピーカ装置 1 の各開口部とスピーカ 2 の周波数特性を示す。図 3 より、約 400Hz から 2kHz の間で共振現象が現れていることがわかる。

2.3. スピーカ装置 2 の構成と周波数特性

図 4 にスピーカ装置 2 の正面図と断面図を示す。スピーカ装置 1 と同様に、スピーカ装置 2 の下部に設置されたエンクロージャの上面に、低音域と中音域の信号を再生するためのスピーカ 1 を上方向に装着する。このスピーカ 1 の上に音響管 1 を垂直に伸びるように装着して、フロントロードホーン型のスピーカにする。エンクロージャは、受聴者の正面方向に対応する面の中心部に開口部 1 を設けて、中音域と低音域の信号を出力する。音響管 1 の最上部に受聴者の正面方向に向けて、全音域の信号を再生するためのスピーカ 2 を装着してバックロードホーン型のスピーカにする。音響管 1 でスピーカ 1 から出力する高音域の信号が減衰するため、スピーカ 2 で高音域の信号を補正するようにする。音響管 1 の最下部を、受聴者の正面方向に向けて音響管 1 を伸ばして開口部 2 を設ける。音響管 1 の最上部の上方向に開口部 3 を設ける。スピーカ 1 から出力する信号を音響管 1 に入力して固有振動を発生させて、効果音を付加した中音域と低音域の信号を開口部 2 より出力する。同じく効果音を付加した中音域の信号を開口部 3 より出力する。

スピーカ装置 1 と同様に無響室で、efu のソフトウェア WaveGene と WaveSpectra を用いて、スピーカ装置 2 の周波数測定を行った。図 5 にスピーカ装置 2 の各開口部とスピーカ 2 の周波数特性を示す。図 5 より、約 200Hz から 2kHz の間で共振現象が現れていることがわかる。

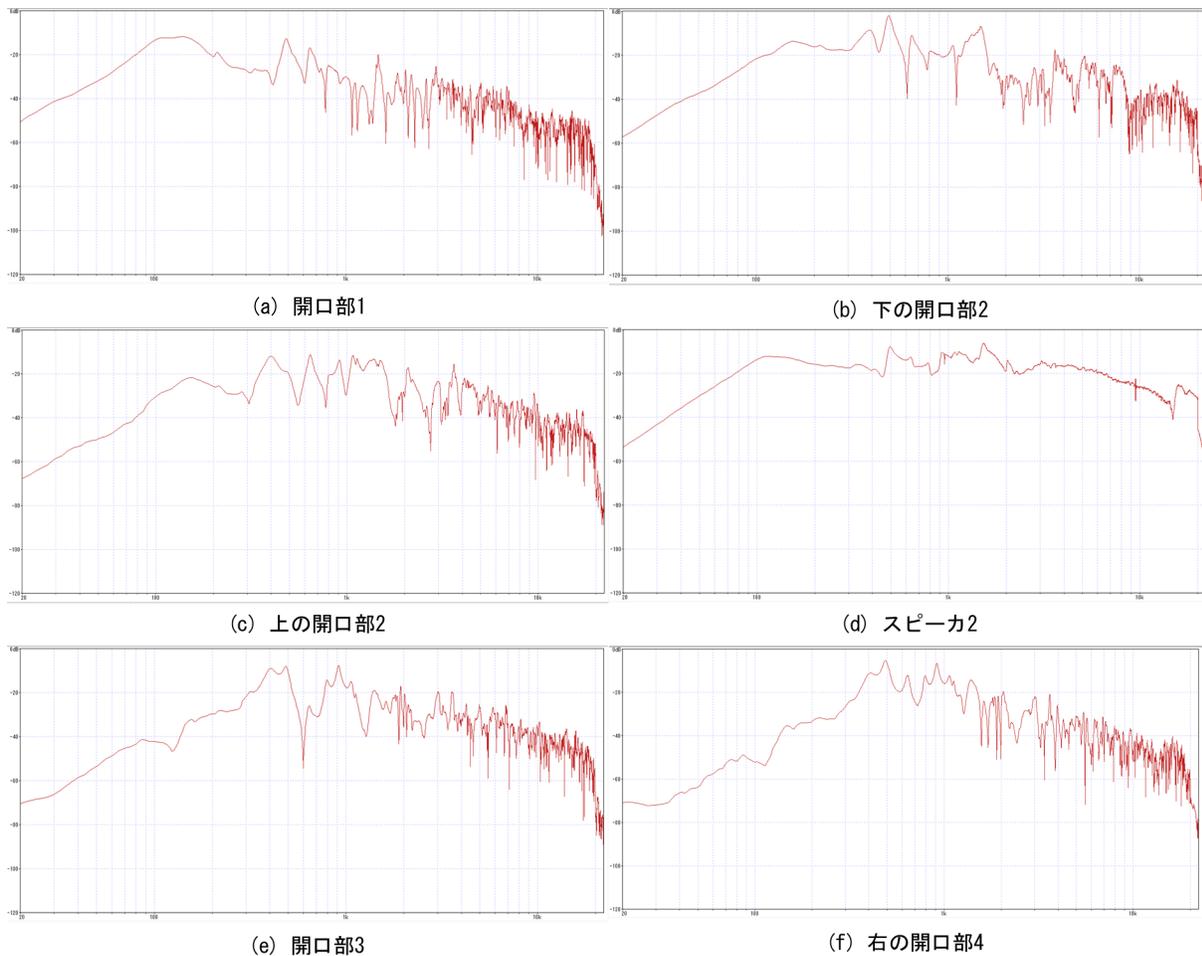


図 3. スピーカ装置 1 の周波数特性

2.4. スピーカ装置 1 の製作

スピーカ装置 1 を製作した。図 2 より、エンクロージャーは木製で、縦 26 cm、横 26.5 cm、高さ 17 cm、板の厚さ 1 cm である。固定板 1 は、木板で、縦横 30 cm、厚さ 0.5 cm である。固定板 2 は、木板で、縦 15 cm、横 20 cm、厚さ 0.5 cm である。音響管 1 と音響管 2 は、塩化ビニールパイプと VU 継手 90°Y を用いた。音響管 3 は、塩化ビニールパイプ、VU 継手 90°Y 及び、VU 継手 90° エルボを用いた。VU 継手 90°Y は、開口部 2、開口部 3 及び、固定板 2 の装着に用いられる。VU 継手 90° エルボは、開口部 4 に用いられる。スピーカ 1 とスピーカ 2 は、東京コーン紙製作所⁴ の口径 7.7 cm のフルレンジスピーカを用いた。エンクロージャーの開口部 1 は、長半径 2.75 cm、短半径 2 cm の半楕円形とした。開口部 2 と開口部 4 は、直径 11.5 cm の円形とした。開口部 3 は、縦 7.5 cm、横 8.5 cm の長方形とした。固定板 1 と下の開口部 2 の間隔は 5 cm とした。下の開口部 2 と上の開口部 2 の間隔は 16.5 cm とした。上の開口部 2 とスピーカ 2 の間隔は 11.5 cm とした。スピーカ 2 と開口部 3 の間

隔は 17 cm とした。右の開口部 4 と左の開口部 4 の間隔は 33.7 cm とした。音響管 1 は、VU 継手 90°Y に、最上部と最下部を受聴者の正面方向に 5 cm 伸ばして開口部 2 を設けた。固定板 1 と音響管 1 は、L 字型金具とネジを用いて装着した。スピーカ 1 は、固定板 1 の中心に直径 7.7 cm の円形の穴を開けて、ネジを用いて装着した。固定板 2 と音響管 2 は、L 字型金具とネジを用いて装着した。スピーカ 2 は、固定板 2 の中心に直径 7.7 cm の円形の穴を開けて、ネジを用いて装着した。

2.5. スピーカ装置 2 の製作

スピーカ装置 2 を製作した。図 4 より、エンクロージャー、固定板 1、固定板 2、スピーカ 1 及び、スピーカ 2 は、スピーカ装置 1 と同様のものを用いた。エンクロージャーの開口部 1 の形状も、スピーカ装置 1 と同様である。音響管 1 は、塩化ビニールパイプと VU 継手 90°Y を用いた。VU 継手 90°Y は、開口部 2、開口部 3 及び、固定板 2 の装着に用いられる。開口部 2 と開口部 3 は、直径 11.5 cm の円形とした。固定板 1 と開口部 2 の間隔は 5 cm とした。開口部 2 とスピー

⁴ <http://www.toptone.co.jp/index.html>

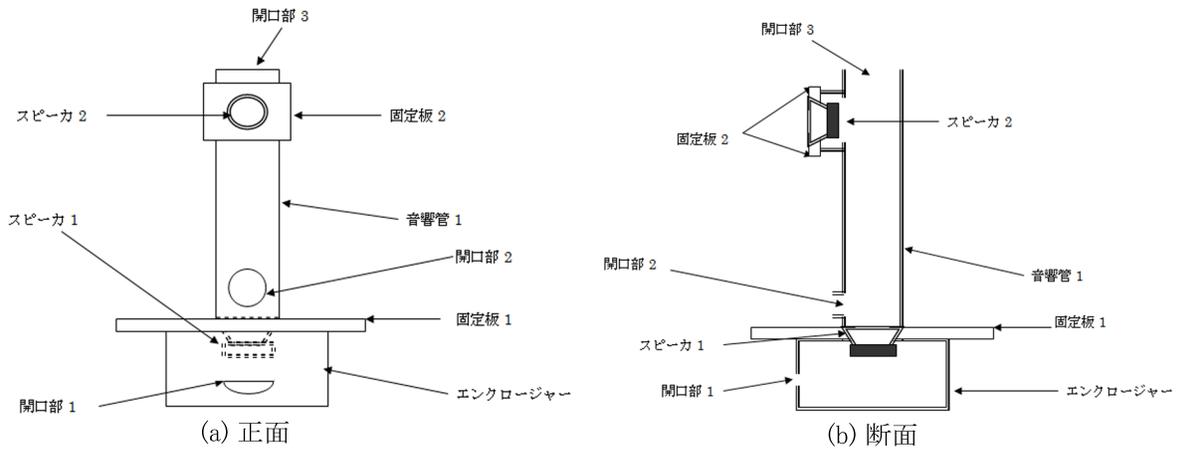


図 4. スピーカ装置 2 の構成

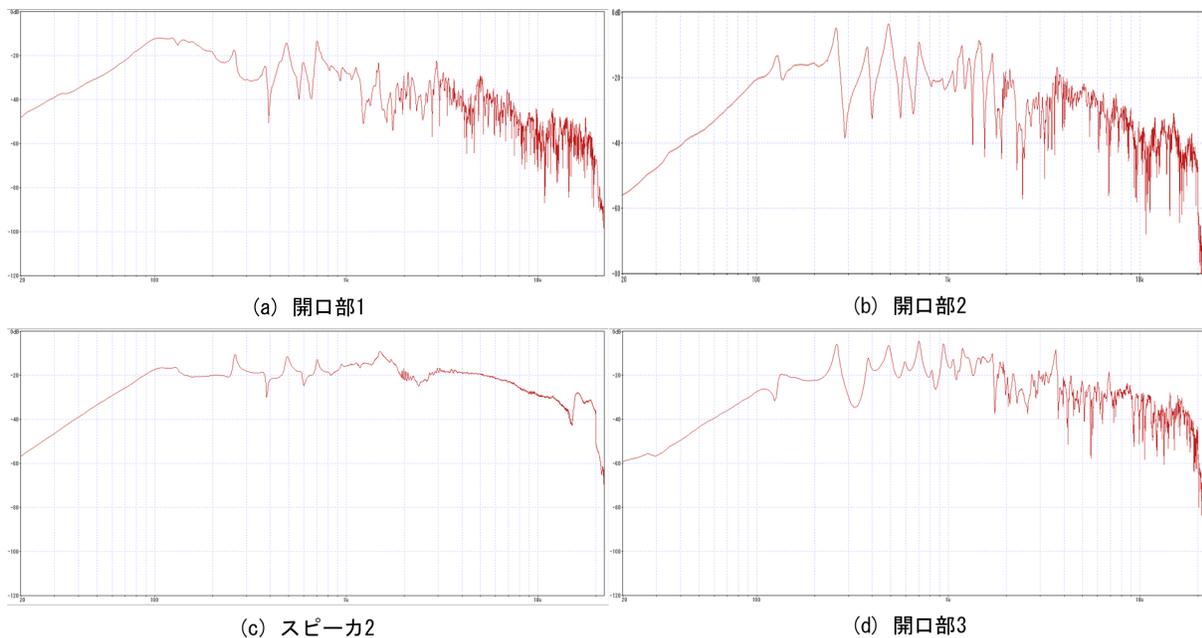


図 5. スピーカ装置 2 の周波数特性

カ 2 の間隔は、105 cm とした。スピーカ 2 と開口部 3 の間隔は、5cm とした。音響管 1 は、VU 継手 90°Y により、最下部を受聴者の正面方向に 5 cm 伸ばして開口部 2 を設けた。固定板 1 と音響管 1 の装着、スピーカ 1 と固定板 1 の装着、固定板 2 と音響管 1 の装着及び、スピーカ 2 と固定板 2 の装着は、スピーカ装置 1 と同様である。

3. 本音場再生装置を用いた演奏

本音場再生装置の写真を図 6 に示す。シンセサイザーの Output 2 と Output 3 から出力される PWM 信号は、IFX-49 を介して、Output 1 と Output 4 から出力される PWM 信号は、アナログフィルタを介した。これらの信号と Output 0 の出力信号を、6 入力 6 出力

可能なアンプに入力して、スピーカ装置 1 とスピーカ装置 2 で再生した。Output 0 から出力される PWM 信号は、スピーカ装置 1 で再生し、Output 1、Output 2、Output 3 及び、Output 4 から出力される 4 つの PWM 信号は、スピーカ装置 2 で再生した。Output 1、Output 2、Output 3 及び、Output 4 の PWM 信号を再生する 4 つのスピーカ装置 2 は、正方形を描くように角に配置した。Output 0 の PWM 信号を再生するスピーカ装置 1 は、その重心に配置した。下方から上方と演奏者の正面方向に向けて音を再生し、左右前後にスピーカ装置を配置することにより、臨場感ある音場を再生することができた。シンセサイザーによる演奏内容は、筆者の作品“Atonalism”から Atonalism 1、Atonalism 2、Atonalism 3 及び、Atonalism 4 の 4 曲を演奏した。



図 6. 本音場再生装置

4. スピーカ装置 1 を用いた応用例

応用例として、図7に示すように、左チャンネルの入力信号 L と右チャンネルの入力信号 R を、サラウンドアンプに入力して、加算減算によるサラウンド処理を行う。サラウンド処理して増幅器で増幅した6つの信号は、左右のスピーカ装置1と前後のスピーカ装置3に入力されて再生される。スピーカ装置3は、スピーカ装置1のバックロードホーン型スピーカーを取り外したものである。図8にスピーカ装置の配置方法を示す。スピーカ装置1を受聴者の真横に配置することにより、右のスピーカ装置1から出力される信号が右耳に、左のスピーカ装置1から出力される信号が左耳に伝わりやすいようにする。[7] 図7より、左チャンネルの入力信号 L と右チャンネルの入力信号 R を加算器で加算して、反転増幅器で符号を反転した信号 $L+R$ に、左チャンネルの入力信号 L を加算器で加算して、反転増幅器で符号を反転する。この信号をアンプで増幅して求められた信号 L_1 を、左のスピーカ装置1のスピーカ1に入力する。右チャンネルの入力信号 R と左チャンネルの入力信号 L を加算器で加算して、反転増幅器で符号を反転した信号 $R+L$ に、右チャンネルの入力信号 R を加算器で加算して、反転増幅器で符号を反転する。この信号をアンプで増幅して求められた信号 R_1 を、右のスピーカ装置1のスピーカ1に入力する。信号 L_1 と信号 R_1 は、中音域と低音域において、左右の音像定位に広がりのある音を再生できる。左チャンネルの入力信号 L から右チャンネルの入力信号 R を減算器で減算した信号 $L-R$ に、左チャンネルの入力信号 L を加算器で加算する。この信号をアンプで増幅して求められた信号 L_2 を、左のスピーカ装置1のスピーカ2に入力する。右チャンネルの入力信号 R から左チャンネルの入力信号 L を減算器で減算した信号 $R-L$ に、右チャンネルの入力信号 R を加算器で加算する。この信号をアンプで増幅して求められた信号 R_2 を、右のスピーカ装置1のスピーカ2に

入力する。信号 L_2 と信号 R_2 は、高音域において、左右の音像定位に広がりのある音を再生することができる。左チャンネルの入力信号 L と右チャンネルの入力信号 R を加算器で加算する。加算された信号は、1次のパッシブローパスフィルタを通す。この信号をアンプで増幅して求められた信号 C_1 を、前方のスピーカ装置3のスピーカ1に入力する。信号 C_1 と同様の方法で信号 C_2 を求めて、後方のスピーカ装置3のスピーカ1に入力する。信号 C_1 と信号 C_2 は、中音域と低音域を強調させて音を前方と後方に定位させる。サラウンドオンの時の増幅器からの各出力信号は、次式で表される。 $Amp1$ 、 $Amp2$ 、 $Amp3$ 、 $Amp4$ 、 $Amp5$ 及び、 $Amp6$ は、増幅器に入力される各信号の増幅率を表す。 T は、ローパスフィルタの伝達関数を表す。

$$\begin{aligned}
 L_1 &= (L + (L + R)) \times Amp3 \\
 & \quad (\text{スイッチ 3 オン}) \\
 R_1 &= (R + (R + L)) \times Amp4 \\
 & \quad (\text{スイッチ 4 オン}) \\
 L_2 &= -(L + (L - R)) \times Amp1 \\
 & \quad (\text{スイッチ 1 オン}) \\
 R_2 &= -(R + (R - L)) \times Amp2 \\
 & \quad (\text{スイッチ 2 オン}) \\
 C_1 &= -(L + R) \times T \times Amp5 \\
 C_2 &= -(L + R) \times T \times Amp6 \quad (2)
 \end{aligned}$$

サラウンドオフの時の増幅器からの各出力信号は、次式で表される。特に入力信号がバイノーラル信号の場合は次式を用いる。

$$\begin{aligned}
 L_1 &= -L \times Amp3 \\
 & \quad (\text{スイッチ 1 オフ、スイッチ 3 オフ}) \\
 R_1 &= -R \times Amp4 \\
 & \quad (\text{スイッチ 2 オフ、スイッチ 4 オフ}) \\
 L_2 &= -L \times Amp1 \\
 & \quad (\text{スイッチ 1 オフ}) \\
 R_2 &= -R \times Amp2 \\
 & \quad (\text{スイッチ 2 オフ}) \\
 C_1 &= -(L + R) \times T \times Amp5 \\
 C_2 &= -(L + R) \times T \times Amp6 \quad (3)
 \end{aligned}$$

5. ヘッドフォン装置の構成

ヘッドフォン装置の構成を図9に示す。ヘッドフォン装置は、電気信号を振動に変換する超磁歪素子、超磁歪素子の振動を伝える振動板1、振動板2及び、振動板3、超磁歪素子の上部と下部に振動板1を装着するためのネジ1とナット1、超磁歪素子の上部に振動

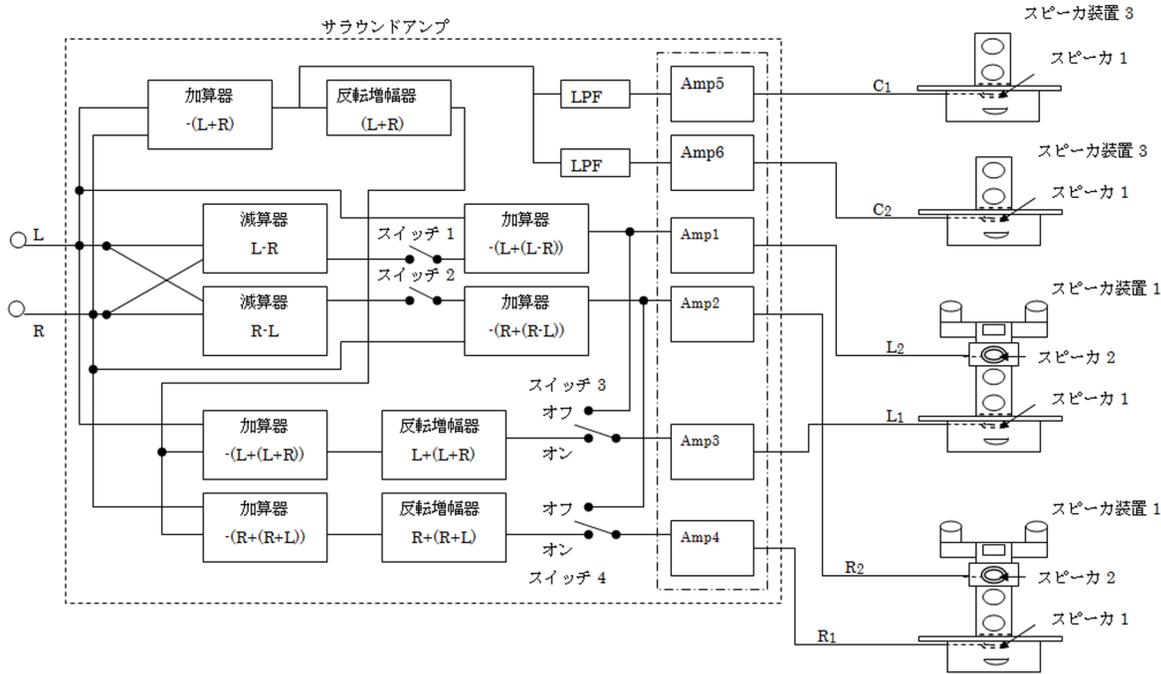


図7. サラウンドシステムの構成

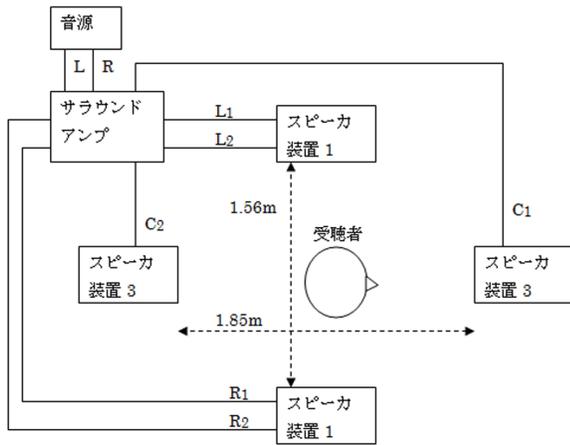


図8. スピーカ装置の配置

板1を装着するためのネジ2とナット2、振動板1と振動板2を装着するためのネジ3とナット3、振動板1と超磁歪素子を頭頂部に固定するためのヘッドバンド及び、ヘッドバンドの顎下部に超磁歪素子と振動板3を装着するための接続アダプターからなる。超磁歪素子は、木材やプラスチックなどの固体に接触することで、振動を音に変換することができる。超磁歪素子にアンプの出力信号が入力され振動に変換される。この振動は、振動板1、振動板2、振動板3及び、ヘッドバンドに伝えられる。振動板1は、頭頂部へ振動を伝え、振動板2は、頭部の前方と後方へ振動を伝え、振動板3は、顎下部へ振動を伝える。ヘッドバンドは、頭頂部から顎下部にかけて振動を伝える。振動板1、振

動板3及び、ヘッドバンドの振動は、頭蓋骨に伝わり、直接、聴覚神経に伝わる骨導音である。さらに、振動板1、振動板2及び、ヘッドバンドの振動は、空気に伝わり耳の鼓膜を振動させて聴覚神経に伝わる気導音である。つまり、受聴者は、骨導音と気導音を知覚するようになる。図10は、ヘッドフォン装置の振動分布のイメージ図である。

5.1. ヘッドフォン装置の製作

ヘッドフォン装置を製作した。図9より、超磁歪素子は、ジグボ社⁵の小型GMM (Giant Magnetostrictive Material) エキサイタを用いた。振動板1は木板で、横20cm、縦30cm、厚さ5.5mmである。振動板2はアルミ板で、横20cm、縦23cm、厚さ1mmである。振動板2の上部3cmは、90度に曲げて振動板1と装着しやすくする。ヘッドバンドは硬質塩ビ板で、横3.5cm、縦83.5cm、厚さ1mmである。ネジ1は、直径5mm、長さ8cmである。ネジ2は、超磁歪素子にあらかじめ備え付けられており、直径4mm、長さ9.2mmである。ネジ3は、直径3mm、長さ1.5cmである。図11より、頭頂部には、超磁歪素子を3つ用いる。中央の超磁歪素子は、上部の振動板1の重心に装着する。右の超磁歪素子は、上部の振動板1の重心から右へ横4cm、前方へ縦10cmの所に装着する。左の超磁歪素子は、上部の振動板1の重心から左へ横4cm、後方へ縦10cmの所に装着する。このような超磁歪素子の装着位置により、通常のスtereo再生である左右のみの1次元

⁵ <http://www.jigboinc.com/>

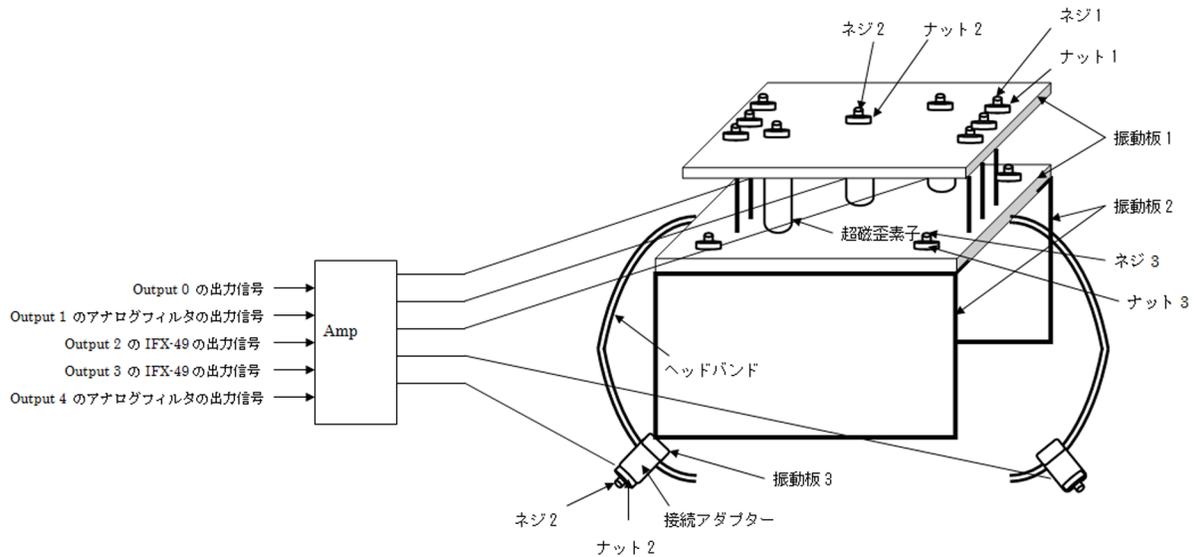


図 9. ヘッドフォン装置の構成

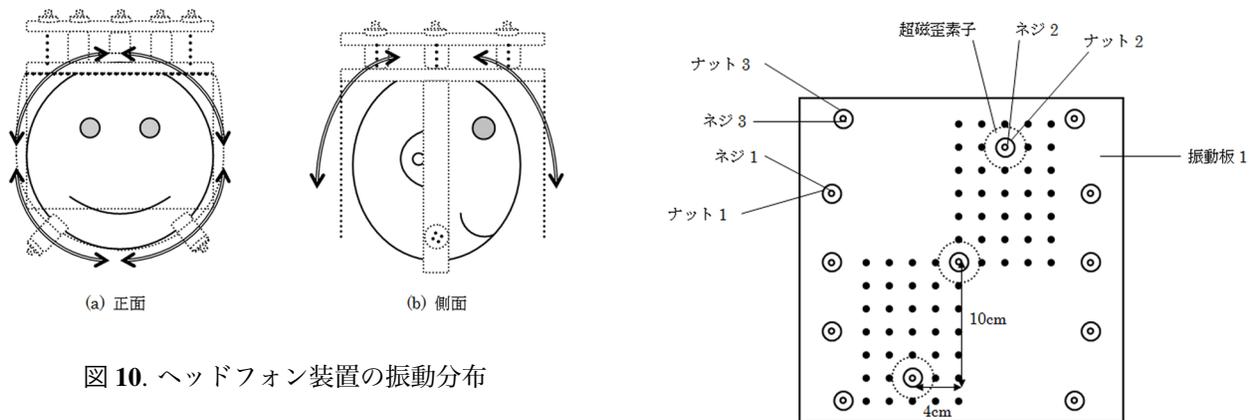


図 10. ヘッドフォン装置の振動分布

図 11. 頭頂部の超磁歪素子の装着位置

な音像定位だけでなく、左右前後の 2 次元的な音像定位を頭頂部で作り出すことができる。振動板 2 の出力が高い場合は、振動板 1 と振動板 2 の間に厚さ 1mm のゴム板をはさみ、ネジ 3 とナット 3 で装着する。ヘッドバンドの顎下部に装着する超磁歪素子と振動板 3 は、接続アダプターを用いて装着する。接続アダプターは、顎下部に装着できるように移動調整できるようにした。図 12 に接続アダプターの側面図を示し、図 13 に実際のヘッドフォン装置を装着した写真を示す。

に定位させることができるため、臨場感がスピーカ装置とは異なる。今後は、更に、新しい音響効果を生み出すために、デジタル信号処理とアナログ信号処理の再検討及び、スピーカ装置とヘッドフォン装置の音質の再検討が必要と思われる。

6. まとめ

PWM 信号を音響管を用いてスピーカで再生する装置は、エフェクターの役割を持ち、上下方向の音像定位情報を与えることができるため、臨場感ある音場を再生するには有効な手段である。あらかじめ、PWM 信号は、デジタル信号処理または、アナログ信号処理されているため音響効果が豊かである。また、超磁歪素子を用いたヘッドフォン装置は、音像定位が頭部全周

7. 参考文献

- [1] 辻一郎, “USB 接続デバイスを用いたシンセサイザーの開発”, 先端芸術音楽創作学会, Vol.7, No.1, pp.6-11, 2015.
- [2] 辻一郎, 中井博文, “2 チャンネルスピーカ再生における立体音場再生方式”, テレビ学技報, CE92-34, pp33-38, 1992.
- [3] 伊勢史郎, “キルヒフホッフ-ヘルムホルツ積分方

8. 著者プロフィール

辻一郎 (Ichiro TSUJI)

1966年生まれ。平成3年国士舘大学電気工学科卒業。同年、(株)日本電気ホームエレクトロニクス入社。開発研究所にて2チャンネルスピーカ再生における立体音場再生方式の研究に従事、その後、(株)日本電気に移動して、ワークステーション用3次元コンピュータグラフィックスのファームウェアの開発、マルチメディア関連の開発に従事。平成10年退社。現在、某アパレルメーカー勤務。

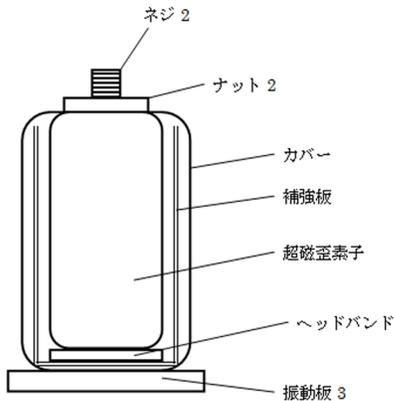
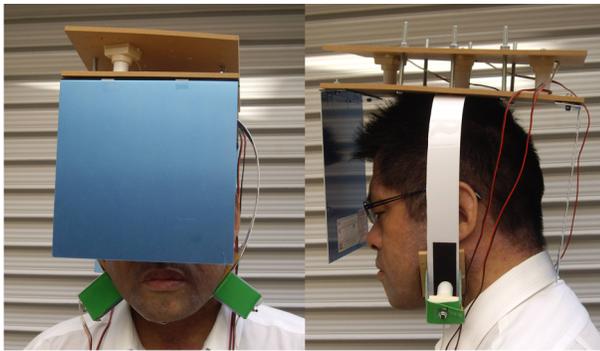


図 12. 接続アダプター



(a) 正面

(b) 側面

図 13. 実際のヘッドフォン装置

程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理”,
日本音響学会誌, vol.53, pp.706-713, 1997.

- [4] 檜垣智也, 中村磁延, “アコースモニウム GRM のスピーカレイアウトの考察 -MULTIPHONIES 04 GRM を題材に”, 先端芸術音楽創作学会, Vol.6, No.4, pp.12-18, 2015.
- [5] 金子真也, 祖父江達也, 中村晋一郎, 坂口純一, 「音遊び! Blackfin DSP 基板でディジタル信号処理初体験」, CQ 出版社, 2015.
- [6] M.E. Van Valkenburg (柳沢健 監訳, 金井元 訳), 「アナログフィルタの設計」, 秋葉出版, 1985.
- [7] 浜田晴男, 得能宏則, O. Kirkeby, P.A. Nelson, “新しい音場再生方式 (Stereo Dipole) に関する研究”, 信学技報, EA96-2, pp9-17, 1996.