

境界音場制御の原理に基づく没入型聴覚ディスプレイの小型化の試み -カプセル型オーディオルームの提案-*

☆唐津佑宜, △内海覚, 渡邊祐子 (東京電機大), 伊勢史郎 (東京電機大/ JST CREST)

1 はじめに

境界音場制御の原理 [1] に基づく三次元音場再現の技術は実用のレベルに近づきつつある [2]。この技術を用いれば忠実な音場再現はもちろん、再現した音場を共有し遠隔地にいながら会話や音楽によるコミュニケーションが可能になる。我々は、このような音場共有を実現するための没入型聴覚ディスプレイとして“音響樽” [3][4] を開発してきた。音響樽は内部で楽器演奏を行うため十分に広い空間を有しているが [5], 楽器を持ち込まずに通常の会話や音場再生などの用途に機能を限定することによりシステムの小型化が期待できる。そこで本研究ではヒトが没入可能な最小サイズの没入型聴覚ディスプレイの実現を目指し、カプセル型の小型再生室を開発する。

2 システムの構成

2.1 小型再生室の外形

境界音場制御の原理に基づいた三次元音場再現システム (以降 BoSC システム) は、再現音場の逆システムを設計することにより音場再現を実現している。すなわち逆システムの性能が音場再現精度を左右するといえる。室内に多数のスピーカを配置する場合には、その逆システムの性能は室内の音響特性によって異なるため、一定の質を保証するためには外部の音響特性の影響を受けない密閉された空間として音場再生室を実現することが望ましい。また音場再生室は多数のスピーカを配置したときの重量に耐えるための構造的な強さが必要であり、容易に運搬できるように筐体は分解可能であることが望ましい。以上の要件を満たしながら、外見上のデザインのインパクトを保つことを目標として前後非対称の曲面壁で覆われたカプセル状 (外寸 1700mm × 1600mm × 1400mm) の形状を採



Fig. 1 左：小型再生室, 右：音響樽

用した。筐体は5つのパーツで構成され、スチール製のフレームの表面を木製の合板で覆っている (Fig. 1)。これによって逆システムの設計に影響を与える壁面のモードの偏りを軽減しながら、分解可能で高い強度を期待できる。

2.2 スピーカシステムの選定

2.2.1 選定の要件

BoSC システムは逆システムの性能が音場再現精度に影響を与えるため、逆システムを設計しやすいスピーカシステムを選定する必要がある。通常、スピーカシステムの伝達特性は周波数振幅特性が平坦であることが望まれるが、逆システム設計においては周波数振幅特性の平坦さよりも、位相特性も含めた連続性、すなわち時間特性の単純さが重要であることが経験的に知られている。またスピーカシステムは、筐体内に設置可能な大きさや重量で、かつ再生室内で心理的な圧迫感を与えないものが好ましい。

以上を考慮して従来の音響樽で用いている 12cm のフルレンジユニット (Fostex FX120) と、さらに小型 (8cm) のフルレンジユニット (Aura NS3-193-8A) の二種のスピーカユニットを選んだ。そ

*Development of an immersive auditory display based on the boundary surfaced control principle
-Proposal of a capsule shaped audio room- by KARATSU, Yuki, UTSUMI, Satoshi, WATANABE, Yuko (Tokyo Denki University), ISE, Shiro (Tokyo Denki University/ CREST, JST)



Fig. 2 作成したスピーカ (左から、音響樽と同等のエンクロージャ、12cm ユニット小型エンクロージャ、8cm 木製エンクロージャ、8cm アクリルエンクロージャ)

これらのスピーカユニットの大きさから、前者は48ch、後者は96chを想定して設置方法とエンクロージャを検討した。

2.2.2 物理評価

12cm と 8cm のスピーカユニットにそれぞれのユニット用エンクロージャを設計した。12cm のスピーカユニットには音響樽と同様のエンクロージャ(外寸230mm×150mm×120mm)とより小さいエンクロージャ(外寸150mm×150mm×120mm)、8cm のスピーカユニットには木製(MDF)(外寸115mm×115mm×115mm)とアクリル製(外寸95mm×95mm×95mm)のそれぞれ2種類のエンクロージャ(Fig. 2)を製作した。ただし8cm のスピーカユニットの2つのエンクロージャは内寸が等しい。アクリルエンクロージャは木材よりも強度が高いことから外寸は小さくでき、かつ軽量となる。それぞれについて周波数特性を無響室において計測した。各スピーカの周波数特性を Fig. 3 に示す。Fig. 3 から、エンクロージャの違いによる大きな特性の変化は見られず、両ユニットとも極端なピークディップは見られなかった。したがってどちらのユニットも逆システムの設計に大きな影響は与えないと考えられる。

次にスピーカ数による音場再現精度を比較するため、音響樽において48chと96chの条件で再現精度をシミュレーションした。SNRが前者は6.7dB、後者は16.4dBとなり、96chの方が約10dB再現精度が高いことを確認した。

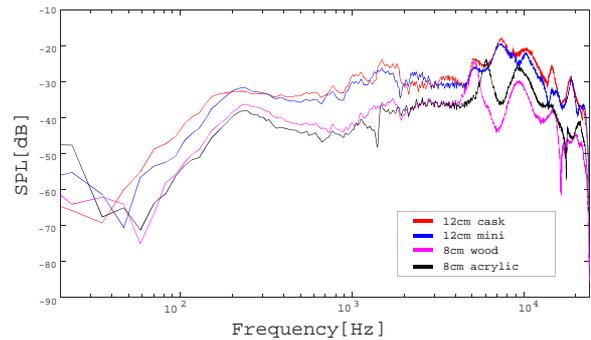


Fig. 3 各スピーカユニットの周波数特性

2.2.3 心理評価

スピーカを設置した際のスピーカの数と大きさが内装の印象に与える影響を評価する。12cm と 8cm のユニットを想定した各スピーカのモデルを再生室内部に設置し、研究室関係者7名に内部の印象のアンケートを行った。被検者には再生室に入ってもらい、完成した再生室を想定してもらったためスピーカ間に吸音材を敷き詰めたイメージ画像を見せながら、落ち着き、安心感、美しさ、広さ、バランス、開放感、好みの7項目についての印象を7段階の得点で評価してもらった。スピーカの配置と吸音材を敷き詰めたイメージ図を Fig. 4, Fig. 5 に示す。結果として落ち着きと安心感においては12cmのユニット、美しさと広さ、バランス、開放感、好みでは8cmのユニットが高い評価を得る傾向を見せた(Fig. 6)。特に再生室は居住空間が限られることから、広さや開放感を重視しており、どちらの項目も8cmのユニットが高い評価を得ていることが分かる。

以上から周波数特性による逆フィルタの設計のしやすさ、エンクロージャの大きさによる設置の容易さ、スピーカ数に起因する音場再現性能、見た目の印象の観点から、8cmのユニットとアクリルエンクロージャと96chの配置案を採用した。

2.3 96ch デジタルアンプ

96個のスピーカユニットを駆動するためには96chスピーカアンプが必要となるが、市販のスピーカアンプで構成すると装置規模が大きくなり、大量の音響信号ケーブルで装置を接続する

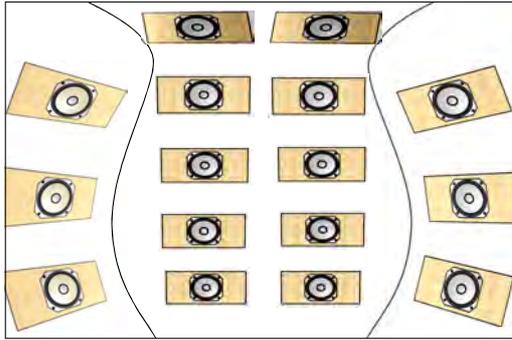


Fig. 4 12cm ユニットの配置案(上)と吸音材を含めた内装イメージ(下)

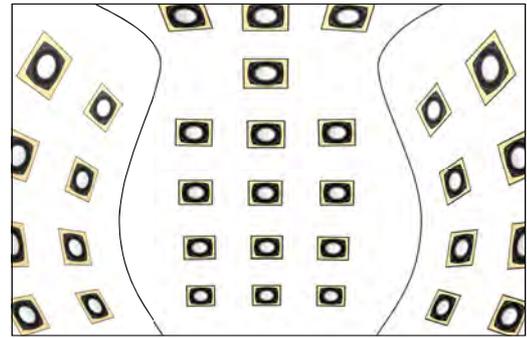
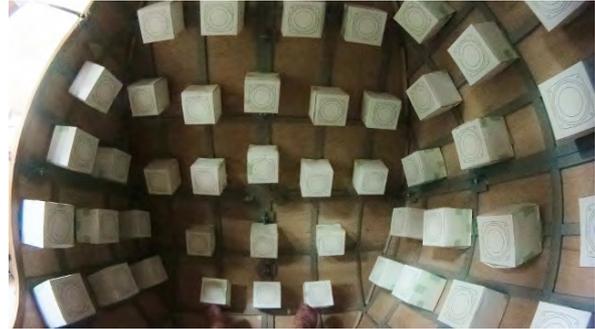


Fig. 5 8cm ユニットの配置案(上)と吸音材を含めた内装イメージ(下)

必要が生じるため、接続ミスのトラブルが生じたり、また見栄えも悪くなる。そこで光 MADI 信号 (64ch) から 8ch を選択し、スピーカ出力信号を生成する小型デジタルアンプ (8ch D 級アンプ) を開発した (Fig. 7)。6 台のデジタルアンプを光ケーブルでディジーチェーン接続すれば 48ch デジタルアンプを構成することができ、それを 2 系統用いることにより 96ch デジタルアンプを実現することが可能となる。すなわち、光 MADI 出力コネクタを 2 系統もつ PC1 台で 96ch デジタルアンプを制御することができる。上記の構成では MADI の 49 から 64ch を使用しないため、それらのチャンネルにコントロール信号を載せることができる。そこで本システムでは 64ch にボリューム情報を載せることにより全てのデジタルアンプのボリューム調整が可能となるようにした。デジタルアンプには 1 次ローパスフィルタが含まれているが、96ch 出力時に暗騒音が生じたため、出力段に 3 次チェビシェフ型ローパスフィルタ (カットオフ周波数 20kHz) を接続した。使用する電源は 35V6.7A (安定化電源) 3 台、12V13A 2 台、5V15A 2 台である。

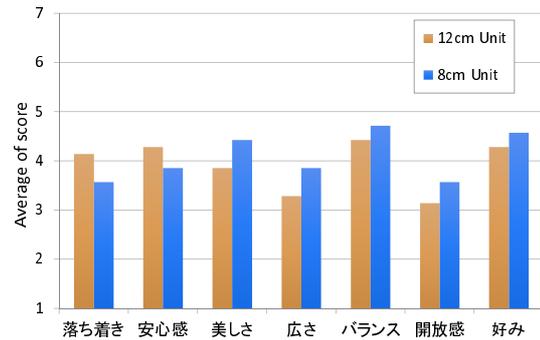


Fig. 6 各項目の平均態度得点 青:12cm ユニット, 赤:8cm ユニット

3 課題

3.1 逆システムの設計可能性

音響樽では最適化正則化パラメータ法 [6] を用いることにより逆システムの設計が可能であったが、音響樽内部の低域モードに相当すると考えられる低域の周波数帯域で正則化パラメータは大きな値が必要となった。これは低域周波数では逆システム設計が難しくなると解釈できる。小型再生室においても逆システム設計が難しくなる周波数帯域が存在するはずであり、それが聴感的にどのように作用するのかを今後検討す



Fig. 7 開発したデジタルアンプ

る必要がある。

3.2 キャリブレーション

内部に取り付ける 96 個のスピーカの動作確認はこれまで一つ一つ手作業で確認していたが、空間が狭いため従来の方法では確認作業に時間がかかることが予想される。いくつかのマイクロホンを常設してスピーカの自動キャリブレーションを行うような仕組みを検討する必要がある。

3.3 ユーザーインターフェース

再生室内部でタブレット型端末等を使用して音源の選曲、ボリューム調整、イコライザ調整、アンケート回答などが行えるような無線のユーザーインターフェースが望まれる。

3.4 コンテンツの充実

再生室が小型化し、使いやすいユーザーインターフェースが実現されればコンテンツの不足が顕在化する可能性が高い。現在の収録システムは主にケーブル、マイクアンプ、レコーダ装置などの重量が大きく、収録の手間は非常に大きい。コンテンツの充実を促進するためには、ノート PC とマイクロホンのみで手軽に収録できるような装置を開発する必要がある。

3.5 映像情報の付加

BoSC システムは高い精度で音場を再現しているが、視覚情報を組み合わせることでより没入感を得られる可能性がある。現在、没入型ディ

スプレイにはヘッドマウントディスプレイがあるが、頭部にディスプレイ装置を取り付けるので自然な状態での受聴を妨げる懸念がある。そこでプロジェクタによる映像投影を検討する。プロジェクタは頭部の動きを妨げない一方で、裸眼での 3D 表現による奥行き表現はできない。つまり視覚的に忠実な映像再現ではなく、音のコンテンツに適したイメージを投影することで高い没入感を獲得する。そのためには映像の投影範囲や歪補正、音と映像の同期などの課題がある。

4 おわりに

本稿では、小型再生装置の筐体と再生系の基本的な構成について検討した。音場共有を目的としていた従来の音響樽と異なり、小型再生室は音を聴くという用途に限定することでオーディオシステムとしての位置付けができる。筐体は小さく、様々な場所への設置が可能になる。加えて従来と同等の音場再現を期待できる。また MADi インターフェースにより 2 本のケーブルだけで制御が可能であり、設置の効率化も図れる。今後は再生システムの実装に向けて、逆システムの設計、居住性、操作性、映像情報、コンテンツなど検討する必要がある。

参考文献

- [1] 伊勢史郎, "キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理", 音学誌, 53(9), 706-713, 1997
- [2] 伊勢史郎, "境界音場制御 ([小特集] 音場再生技術の研究動向)", 音学誌 67(11), 532-537, 2011
- [3] 伊勢史郎 "音楽の技能を遠隔伝送するための没入型聴覚ディスプレイ装置" 音響樽の開発", 音講論 (春), 1287-1290, 2014.
- [4] 伊勢他, "深いコミュニケーションを可能とする空間創造の試み—プロジェクトの基本方針—", 音講論 (春), 585-586, 2007.
- [5] 伊勢史郎 "境界音場制御の原理に基づく音場収録・再生システムの現状と課題", 音講論 (秋), 2014.
- [6] 伊勢史郎 "没入型聴覚ディスプレイ装置" 音響樽"における逆システム設計法の検討", 音講論 (秋), 591-594, 2014.