

聴空間共有を実現する音響樽の構想*

○伊勢史郎（京大・工/JST CREST）

1 はじめに

境界音場制御の原理に基づく音場収録・再生技術を用いることにより、遠隔に位置する複数のヒトが同時にある音響空間を感じながらコミュニケーションをとる技術（以降、聴空間共有技術と呼ぶ）が実用に近づきつつある。この技術を用いれば、通常の会話はもちろん演奏をはじめとする音楽的なコミュニケーション行為も実環境と同じ感覚で実現することが可能となる。本稿では聴空間共有技術を実用レベルに近づける一つの戦略として音響樽という概念を提案し、その全体構想について述べる。

2 背景

ヒトの長い進化の過程において、音という道具はコミュニケーションの中心をなしてきたが、近年の情報技術の進歩はその形態を急激に変化させている。情報技術によって大量の情報を瞬時に伝送することが可能となったが、伝送される内容は記号化しやすい情報に偏る傾向がますます強まっている。

一方、建築の分野において公共施設は地域のコミュニティがコミュニケーションを維持するために重要な機能を果たしている。しかし、その運営コストは人口減少、過疎化などにより日増しに高まり、廃止になる公共施設も少なくない。近年の情報化社会は多くの利便性をもたらしたが、ヒトが集まり、音を発し、音を聴くという原初的な活動の機会が減れば、社会的なリスクは高まると考えられる。

このような問題意識に立ち、人々が空間を共有するためのインターフェース技術を確立することが今後の情報社会において深いコミュニケーションを維持するためにも重要と考える。空間共有技術は視覚に関してはバーチャルリアリティの分野で多くの研究がなされており、HMD（ヘッドマウントディスプレイ）をはじめとする頭部装着型やCAVEをはじめとする没入型のディスプレイ装置が実用レベルに達している。聴覚に関しては、立体音響

（Stereophonic sound）という言葉が1930年代のオーディオ技術の研究当初から用いられているが、視覚の三次元空間提示技術に比べると聴覚の立体音響技術は空間共有のためのインターフェースとしては未熟であることは認めざるを得ない。

聴覚の分野ではダミーヘッドを用いたバイノーラル録音・再生技術が商用レベルに達しており、またその応用型として頭部伝達関数を利用する方法が提案されている。これらはヘッドフォンなどにより耳元で音圧信号を生成する手法であり、視覚ディスプレイに例えるとHMD（頭部装着型）に相当するが、受聴者の頭部運動に対応することが現段階では容易ではない。一方、境界音場制御の原理に基づく音場再生システム（以降Boundary Surface Controlの頭文字をとってBoSCシステムと呼ぶ）が注目を集めている。この技術は視覚ディスプレイに例えるとCAVE（没入型）に相当し、頭部運動にも対応するため高い臨場感をもつ音場の再生が可能となる。本稿では情報空間に接続するための音響インターフェースとしてBoSCシステムを用いた聴空間共有システム「音響樽」を提案し、その構成と応用方法について述べる。

3 聴空間共有システム

3.1 境界音場制御の原理

ある空間に領域 V の音場（原音場）、それとは別の空間に領域 V' （ V と合同とする）の音場（再生音場）を想定する。これらの音場において音圧に関するヘルムホルツ方程式 $(\nabla^2 + k^2)p(\mathbf{r}) = 0$ を積分方程式として表したキルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式が成立する。

$$\iint_S G(\mathbf{r}|\mathbf{s}) \frac{\partial p(\mathbf{r})}{\partial n} - p(\mathbf{r}) \frac{\partial G(\mathbf{r}|\mathbf{s})}{\partial n} \delta S = p(\mathbf{s}) \quad \mathbf{s} \in V \quad (1)$$

$$\iint_{S'} G(\mathbf{r}'|\mathbf{s}') \frac{\partial p(\mathbf{r}')}{\partial n'} - p(\mathbf{r}') \frac{\partial G(\mathbf{r}'|\mathbf{s}')}{\partial n'} \delta S = p(\mathbf{s}') \quad \mathbf{s}' \in V' \quad (2)$$

*Concept of "onkyo-taru" to realize sound field sharing, by ISE Shiro (Kyoto Univ. / JST CREST)

領域 V が領域 V' と合同であれば、グリーン関数およびその法線方向微分は領域 V と領域 V' において同じ値になる。式で表わすと

$$\forall \mathbf{r} \in S \quad \forall \mathbf{r}' \in S' \quad \forall \mathbf{s} \in V \quad \forall \mathbf{s}' \in V'$$

$$G(\mathbf{r}|\mathbf{s}) = G(\mathbf{r}'|\mathbf{s}') \quad \frac{\partial G(\mathbf{r}|\mathbf{s})}{\partial n} = \frac{\partial G(\mathbf{r}'|\mathbf{s}')}{\partial n'} \quad (3)$$

が成り立つ。したがって、式(1),(2),(3)から

$$\forall \mathbf{r} \in S \quad \forall \mathbf{r}' \in S' \quad p(\mathbf{r}) = p(\mathbf{r}') \quad \frac{\partial p(\mathbf{r})}{\partial n} = \frac{\partial p(\mathbf{r}')}{\partial n'}$$

$$\Rightarrow \forall \mathbf{s} \in V \quad \forall \mathbf{s}' \in V' \quad p(\mathbf{s}) = p(\mathbf{s}') \quad (4)$$

が導かれる。式(4)は原音場においてある領域を囲む境界面上の音圧と粒子速度(音圧勾配)を計測し、それらが再生音場において(相対的に)同じ位置で再生されたとき、原音場における領域内音場は再生音場に完全に再生されることを意味する。これを境界音場制御の原理と定義する[1]。

3.2 音場再現システム

図1のように原音場での収録信号から得られる逆システムの入力信号ベクトルを $[x_j](\in C^M)$ 、逆システムの伝達関数マトリクスを $[h_{ji}](\in C^{M \times L})$ 、再生音場におけるスピーカからマイクロホンへの伝達関数マトリクスを $[g_{ij}](\in C^{L \times M})$ 、再生音場におけるマイクロホンからの出力信号ベクトルを $[y_j](\in C^M)$ とすると次式が成り立つ。

$$[y_j] = [x_j][h_{ji}][g_{ij}] \quad (5)$$

ただし、 $x_j = p(\mathbf{q}_j)$ 、 $y_j = p(\mathbf{q}'_j)$ である。ここで原音場における境界上音圧を再生音場において再生するためには $[y_j] = [x_j]$ となる

$[h_{ji}]$ を求めればよい。 $[g_{ij}]$ が正則であれば $[h_{ji}] = [g_{ij}]^{-1}$ を求めればよいが、現実には $[g_{ij}]$ は正則とならない場合が多い。そこで正則化一般逆行列

$$[h_{ji}] = \left([g_{ij}]^\dagger [g_{ij}] + \beta I_M \right)^{-1} [g_{ij}]^\dagger \quad (6)$$

を用いる。ただし $[\cdot]^\dagger$ は行列の共役転置、 β は正則化パラメータ、 I_M は M 次元単位行列である。正則化パラメータを加えることにより、行列の対角成分が大きくなるためその逆行列から安定したFIRフィルタを設計することが可能となる。理論的には正則化パラメータを加えないほうが音場再現精度は高くなるはずだが、現実のシステムでは線形時不変性が成立せず、むしろ正則化パラメータを加えないと音場再現精度が低くなり聴き苦しい音が再生される可能性がある[2,3]。

3.3 BoSC システムの実現

BoSC マイクロホン写真を写真1に示す。80個の全指向性マイクロホン(DPA-4060BM)をC80フラーレン分子構造を元にして作成したアルミフレームの接点80か所(ゆえに3.2節 $M = 80$ となる)に取り付けた。一人分の頭が入る程度の空間領域の大きさを想定し、フレーム全体の直径は約46cmである。

再生音場を生成するためのBoSC再生系の外形となる音響樽を写真2に示す。水平断面は9角形であり、上中下の三段構成となる。上段と下段は同じ形であり、垂直となる中段と20度の傾きをもつ。内装なしの状態ですべて天井と床面は直径1640mm、中段は直径2130mmの円が内接する9角形の水平断面となる。また天井高は2245mmである。

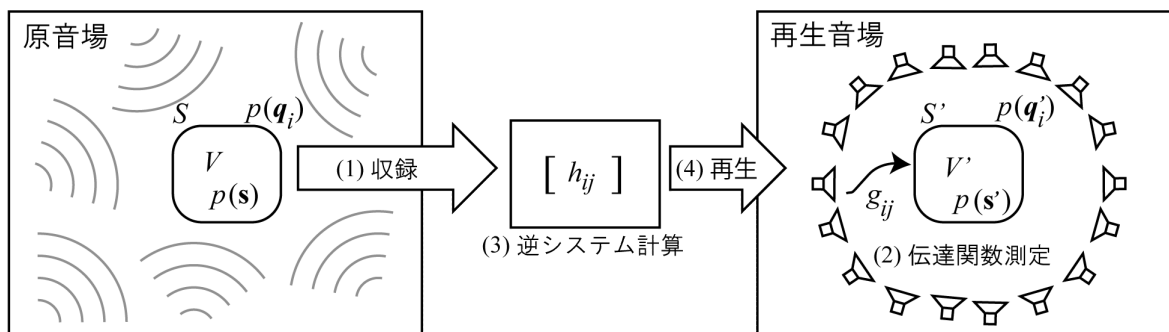


図1 境界音場制御の原理に基づく音場再現システム (BoSC システム)

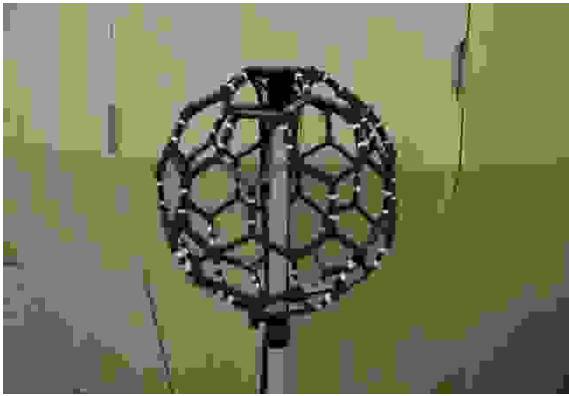


写真1 BoSC マイクロホン



写真2 音響樽外形



写真3 音響樽内部のスピーカ配置

音響樽内部におけるスピーカ配置を写真3に示す。上中下の各面にそれぞれ3個, 4個, 3個, 天井に6個の合計96個(ゆえに 3.2 節 $L = 96$ となる)のスピーカを取り付けた。写真3の白い部分は吸音材として取り付けたポリウール(60mm)であり, 全壁面に充填し, また信号処理システムおよびスピーカアンプなどの電気装置は床下(60mm)に設置する予定である。各壁面は分解可能であり22個(上段9個, 中下段9個, 天井2個, 床2個)のパーツで構成されるため, 配送が容易となる。

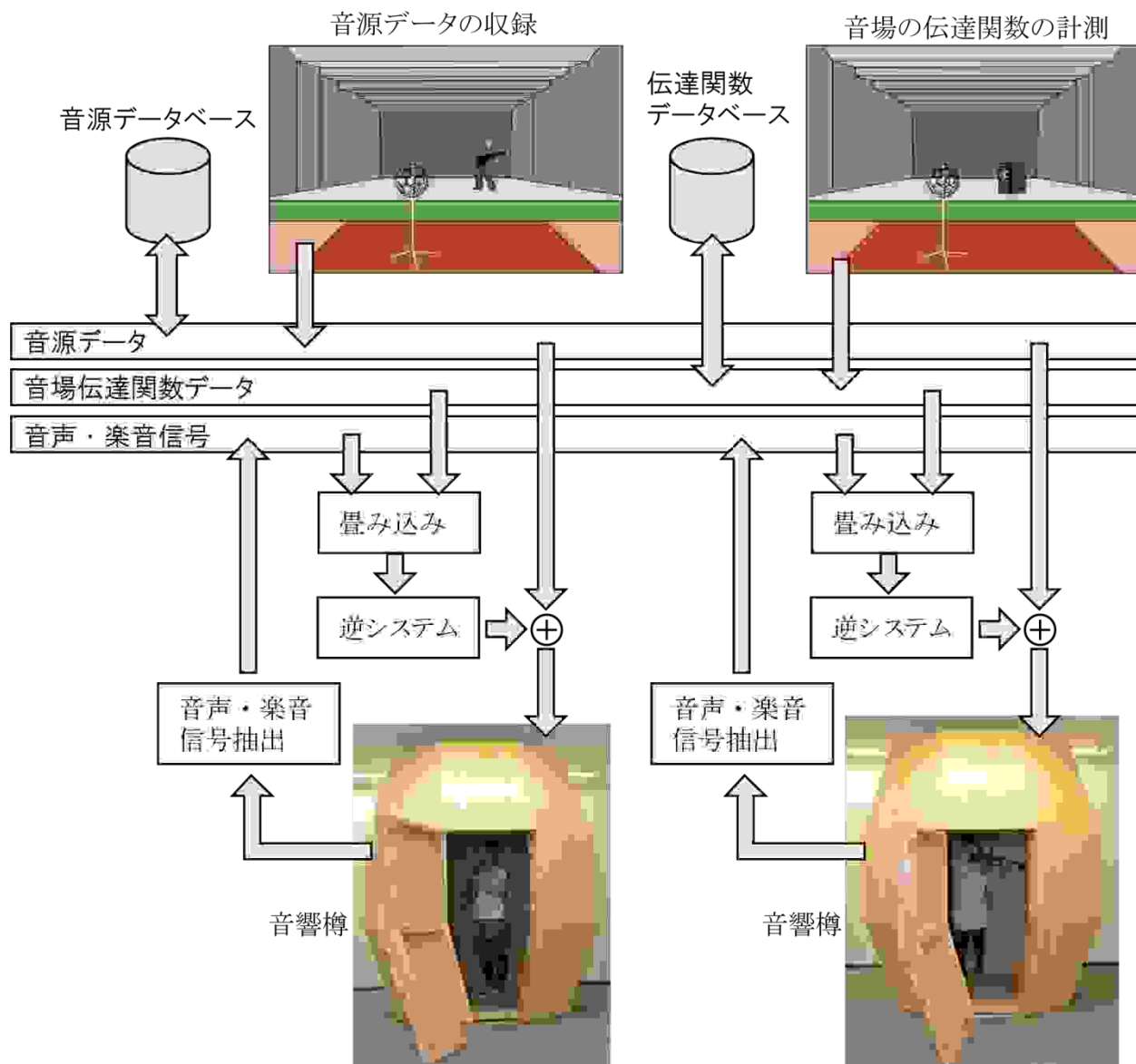
3.4 聴空間共有システム

BoSC システムを用いることにより音場共有を実現することが可能である[4]。京都大学桂キャンパスとNICT けいはんな研究所を超高速度・高機能研究開発テストベッドネットワーク(JGN2 plus)により接続し, 従来型BoSCシステムで音場共有実験を行った。この音場共有システムを用いることで遠隔地の人同士が自然な会話を行うことが可能であることを確認した[5-7]。しかし, 従来型BoSCシステムでは音場再生の空間が狭いため演奏を行うことは極めて難しい。そこで新型BoSC再生システムとなる音響樽は演奏行為には十分な広さをもつように配慮した。

聴空間共有システムはBoSC マイクロホンを入力インターフェース, 音響樽を出力インターフェースとして備えるネットワークシステムであり, 3D音源データや音場伝達関数データを蓄積するためのサーバーも含めたものである。その全体構成を図2に示す。

4 むすび

境界音場制御の原理に基づく聴空間共有システムはこれまでにない新しいコミュニケーション空間の実現を可能とする。音響樽は現代の情報社会における空間共有の必要性を多くの人に感じてもらうためのテストベッドともいえる。音響樽(あるいはその発展形)が住宅設備の一つとして重要な機能を担い, 生活に不可欠なコミュニケーションツールとなるのも夢ではないと我々は考える。



謝辞 京都大学工学研究科・建築家 竹山聖氏に樽という発想を提供していただいた。ここに謝意を表す。

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," 日本音響学会誌, Vol. 53, pp. 706-713, 1997.
- [2] H. Tokuno, o. Kirkeby, P.A. Nelson and H. Hamada, "Inverse Filter of Sound Reproduction Systems Using Regularization", IEICE Trans. Fundamentals, vol. 80-A, no. 5 (1997).
- [3] S. Enomoto, Y. Ikeda, S. Ise and S. Nakamura, "Three-dimensional sound field reproduction and recording system based on boundary surface control principle," Proc. ICAD 2008, (2008).
- [4] 伊勢史郎, 豊田政弘, 榎本成悟, 中村哲, "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—," 日本音響学会講演論文集, pp. 585-586, 3 2007.
- [5] 榎本成悟, "三次元音場通信システム," 音響技術, No.148(Vol.38 no.4), pp.37-42 (2009).
- [6] 榎本成悟, 池田雄介, 伊勢史郎, 中村哲, "境界音場制御の原理に基づく3次元音場再現システムによる空間を共有したコミュニケーションの実現" 日本音響学会講演論文集, pp. 1411-1414 (2009)
- [7] Y. Ikeda, S. Enomoto, S. Ise and S. Nakamura, "Three-party sound field sharing system based on the boundary surface control principle", Proc. ICA 2010, (2010).