

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

○伊勢史郎（東京電機大/JST, CREST）

1 研究の背景

ヒトが発する音の中には言語化可能な意味情報だけではなく言語化不可能な多様な感情や身体的な情報が含まれている。インターネットや携帯電話の普及はコミュニケーションの形態を様変わりさせたが、伝達される情報は意味化しやすい言語的な情報に占められており、感情の伝達はむしろ難しさが増しているとも言える。ヒトにとって音という道具は社会の根幹を維持するために必要な道具であり、今後も変わりはないが、音という道具を使う技能を発揮するための情報技術との共存を考える必要がある。

世界共通言語である音楽を演奏する技能や聴く技能は最も洗練された文化的な産物であるが、急速に進展する情報技術との関わりは一向に深まらない。これはヒトが音を扱う技能を十分に発揮することができるインターフェースがないためである。そのような背景のもとに我々は音の技能、特に音楽の技能を発揮することが可能な情報技術とのインターフェースとして没入型聴覚ディスプレイ装置“音響樽”を開発した。

2 音場再現の理論

2.1 キルヒホッフ - ヘルムホルツ積分方程式

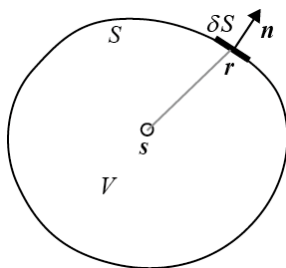


図1 閉曲面Sで囲まれた領域V

図1のような音源を含まない閉曲面Sで囲まれた領域Vを想定する。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は次式のようにになる。

$$\iint_S G(\mathbf{r}|\mathbf{s}) \frac{\partial p(\mathbf{r})}{\partial n} - p(\mathbf{r}) \frac{\partial G(\mathbf{r}|\mathbf{s})}{\partial n} \delta S = \begin{cases} p(\mathbf{s}) & \mathbf{s} \in V \\ 0 & \mathbf{s} \notin V \end{cases} \quad (1)$$

ここで $G(\mathbf{r}|\mathbf{s})$ はグリーン関数と呼ばれ、 $(\nabla^2 + k^2)G(\mathbf{r}|\mathbf{s}) = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{s})$ を満たす関数であり、自由音場の点 $\mathbf{r}$ に点音源（モノポール音源）がある場合の点 $\mathbf{s}$ における音圧に等しい。また $\partial G(\mathbf{r}|\mathbf{s})/\partial n$ は法線 n 方向に設置した二重音源（ダイポール音源）と解釈できる。

2.2 ホイヘンスの原理に基づく音場制御理論

一般に場を表す微分方程式を積分表示したときに境界上に現れるグリーン関数はその場を生成する源と考えられてきた[1]。したがって、式(1)は次のように解釈できる。領域 V 内の音場 $p(\mathbf{s})$ は、境界面 S 上に配置された振幅 $\partial p(\mathbf{r})/\partial n$ のモノポール音源と振幅 $-p(\mathbf{r})$ のダイポール音源によって生成される。ここにホイヘンスの原理における音源の性質の数学的表現が現れていることがわかる。これを音場制御の原理として説明すると、次のようになる。領域 V 内の音場 $p(\mathbf{s})$ を再生するためには、原音場において境界面 S 上で音圧 $p(\mathbf{r})$ とその勾配 $\partial p(\mathbf{r})/\partial n$ を計測し、再生音場において同じ形の境界面上にモノポール音源とダイポール音源を配置し、振幅がそれぞれ $\partial p(\mathbf{r})/\partial n$ と $-p(\mathbf{r})$ となるように調整すればよい。

2.3 境界音場制御の原理

一方、積分方程式の解釈としてグリーン関数およびその法線方向微分をモノポール音源、ダイポール音源と考えるのではなく、境界要

* Development of an immersive auditory display “Sound Cask” for transferring musical skill in a remote environment”, ISE, Shiro (Tokyo Denki University/CREST, JST).

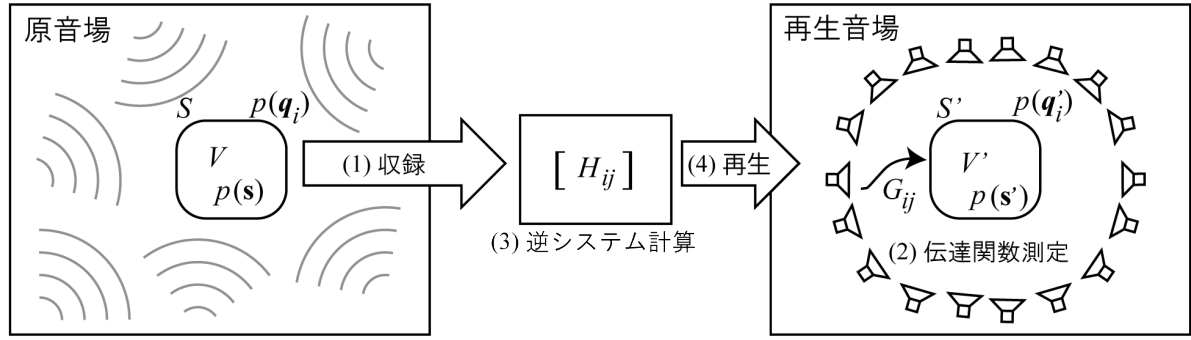


図2 境界音場制御の原理による音場再現

素法などの数値計算手法で用いられるのと同様に係数と考える方法もある。すなわち領域 V 内のある点 s の音圧は境界面 S 上の離散点の音圧と音圧勾配にある係数を乗じ、それらの総和から求めることができる。数学的に表現すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} \forall \mathbf{r} \in S \quad \forall \mathbf{r}' \in S' \quad p(\mathbf{r}) &= p(\mathbf{r}') \frac{\partial p(\mathbf{r})}{\partial n} \\ &= \frac{\partial p(\mathbf{r}')}{\partial n'} \\ \Rightarrow \forall \mathbf{s} \in V \quad \forall \mathbf{s}' \in V' \quad p(\mathbf{s}) &= p(\mathbf{s}') \end{aligned}$$

この式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。従来のホイヘンスの原理に基づく音場再現において不可欠であったモノポール音源やダイポール音源が境界音場制御の原理に基づく方法では不必要となる[2]。

2.4 逆システムの設計

境界音場制御の原理に基づく音場再現システム(以降 Boundary Surface Control の頭文字をとって BoSC システムと呼ぶ)を図2に示す。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 $[X_j](\in \mathbb{C}^M)$ 、逆システムの伝達関数マトリクスを $[H_{ji}](\in \mathbb{C}^{M \times L})$ 、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 $[G_{ij}](\in \mathbb{C}^{L \times M})$ 、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 $[Y_j](\in \mathbb{C}^M)$ とすると次式が成り立つ。

$$[Y_j] = [X_j][H_{ji}][G_{ij}] \quad (8)$$

ただし、 $X_j = p(\mathbf{q}_j)$ 、 $Y_j = p(\mathbf{q}'_j)$ である。ここで式(7)が成立するためには $[Y_j] = [X_j]$ 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

$$[H_{ji}] = ([G_{ij}]^\dagger [G_{ij}] + \beta I_M)^{-1} [G_{ij}]^\dagger \quad (9)$$

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[3]。安定した逆フィルタ設計手法として条件数を一定以上の数値に抑えることが可能な最小誤差緩和アルゴリズムによる方法も有効である[4]。

3 システムの実現

3.1 收音システム

一人の受聴者の頭部を取り囲む大きさを想定し、また堅固な力学的な構造で支えるフレーム構造として、直径約 45cm の C80 フラーレン分子構造の形状のマイクロホンフレームを開発した。フレームの節の部分 80 か所に小型無指向性マイクロホン(DPA4060)を取り付けた(図3)。

3.2 再生システム

受聴者を取り囲む閉じた境界面に高い精度で音圧波面を生成するためには、できるだけ多くの方向から波面を供給可能な音響装置の構成が必要となる。またスピーカを取り付けるためのフレームとして、より堅固な力学的構造が安全面からも重要となる。そのためには建築物に取り付けるのが容易であるが、多くの人に音場を体験してもらうために分解、運搬、組立が可能なスピーカフレームが望ましい。また精度の高い逆システムを設計するた



図3 BoSC マイクロホン

めには壁面やスピーカのエンクロージャーなどによる音響的な境界条件の影響が懸念される。すなわちモードが小さく、かつ偏りが少ない境界条件をもつ音場再生室が必要となる。このように多数のスピーカを支える堅固な力学構造、分解、運搬、組立の容易さ、壁面のモードの偏りなどを考慮して、天井を含む床以外の壁面に 96 個のスピーカを取り付け、スピーカ以外の壁面をポリウール (120mm 厚) で覆った平面の断面が 9 角形となる樽型形状の音場再生室を開発した (図 2)。

3.3 音場共有システム

2つの音響樽をネットワークで接続することにより遠隔に位置する複数のヒトが同一の音響空間を感じながら、すなわち音場共有しながらコミュニケーションをとることが可能となる[5]。例えばコンサートホールなどにおいて計測したインパルス応答と逆システムを畳み込み、図5のように音響樽においてリアルタイムで再生することにより、アンサンブル演奏が可能となる。

4 進捗状況と問題点

試験的な実験として2つの音響樽をインターネットを介さずに直接接続することにより2名の演奏家によるアンサンブル実験を行った。以下に述べるような問題点が明らかになった。

4.1 遅延の影響

オーケストラなどにおいて演奏者が 10 m 程度離れる場合、音速 340 m/s とすれば約 30 ms の遅延が生じる。2名のアンサンブル演奏に関して 20ms 以内であれば演奏に影響はないという報告[6]に基づき、現在のところ 20ms



図4 音響樽

の遅延で抑えることを目標としている。音場共有システムの実現において、遅延が生じる要因はインターネットにおけるパケット通信で生じる遅延、伝達関数のリアルタイム畳み込みにおいて生じる遅延、逆システムの精度を保つために必要な遅延、オーディオ入出力ドライバのバッファサイズによる遅延など複数にわたる。これらの中で比較的深刻な遅延は逆システムの精度を保つための遅延である。現在の設計手法では逆システムの初期設計時に 43 ms の遅延を有しているため、それだけで大幅に目標値である 20 ms を超える。そこで逆システムの先頭部分を切り詰めることにより遅延を小さくする方法について検討している[7,8]。より小さな遅延で音場再現精度を保つことができる逆システムの設計方法を見出すことが課題の一つである。

4.2 フィードバックの影響

音場共有システムは自分が発した音に残響が付加されたフィードバック経路と通信相手の空間を介するフィードバック経路が存在する。通常の通信システムでは信号のレベルでフィードバックキャンセルを行うが、本システムではフィードバック信号に含まれる伝達関数の信号長は長く、またチャンネル数も多いためハードウェアとして実現することが難しい。そこで楽音を收音するためのマイクロホンの位置で再生音が無音となるように逆システムを設計する手法[9]を検討している。

4.3 楽器の指向性再現

楽器による音の指向性分布は演奏における楽

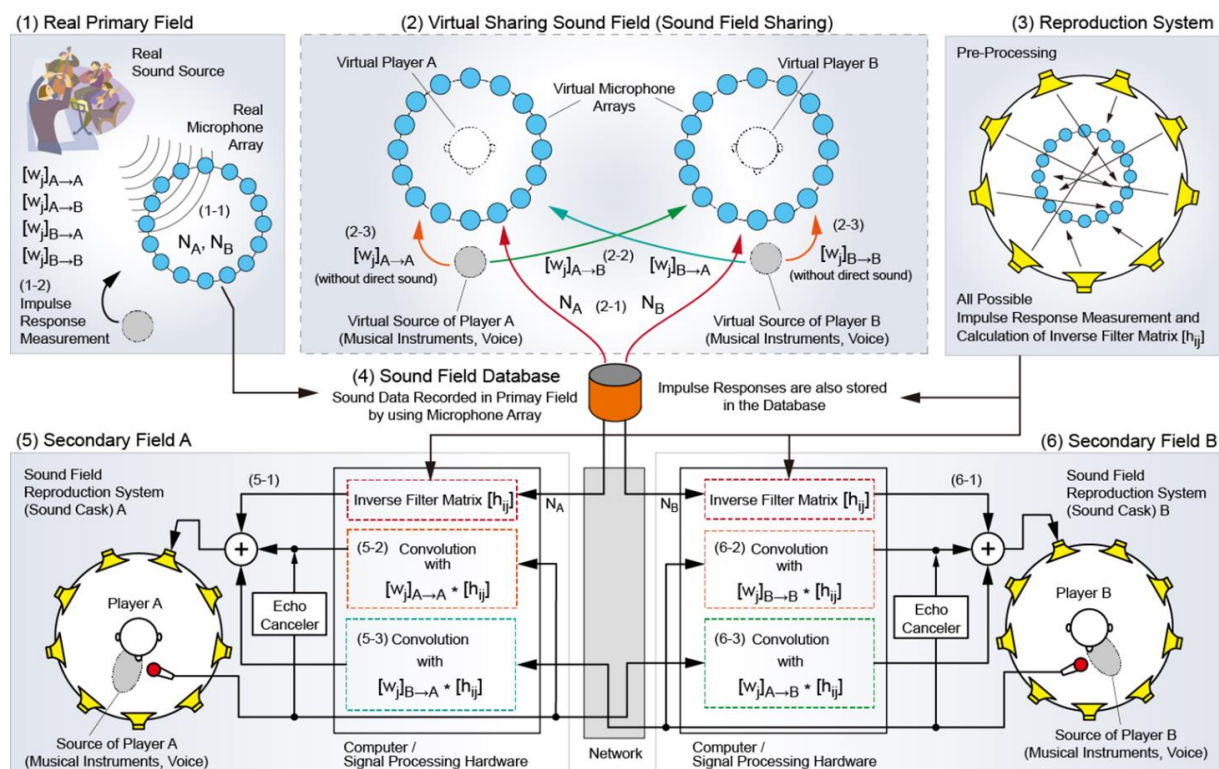


図5 聴空間共有システムの全体構成

器の向きによって変化する。原理的には BoSC システムによって音源の指向性の変化も含めて音場再現が可能であるが、信号処理の計算量が膨大になるため、リアルタイムで行う場合には収音用のマイクロホン数を少なくする必要がある。現在のところ 18 個のマイクロホンがあれば比較的高い精度で音源の指向性の変化を再現できることが確認されている[10, 11]。

4.4 音場再生室内の響きの除去

コンサートホールなどの大空間では床の反射音以外には 20 ms (3.4 m) 以内に反射はないが、音響樽のような狭い室内ではスピーカエネクロージャにおける高音域の反射音や 120mm 厚のポリウールでは抑えきれない低音域の反射が存在する。これらの反射を低減することが課題の一つである。

5 まとめ

2つの音響樽をインターネットを介さずに直接接続することにより二名の演奏家によるアンサンブル実験を行うことは可能である。しかし、前述したとおり逆システム設計における遅延の影響、フィードバックの影響、音場再生室内の響きの影響など数々の問題がある。

またインターネット接続における遅延の問題も存在する。例えば日本とアメリカ・ヨーロッパの距離（地球の 1/4 周換算）では光ケーブルを直線的に引いたとしても約 66 ms の遅延が生じる。したがって海外とは難しいが国内であれば満足のいくアンサンブル演奏を遠隔環境で実現することが可能である。

参考文献

- [1] G. F. Roach, Green's Functions - 2nd ed., Cambridge University Press, 1992.
- [2] 伊勢, 音学誌, 53(9), 706-713, 1997.
- [3] 李他, 音学誌, 69(6), 276-183, 2013.
- [4] 開原他, 信学技報, 105(556), 7-12, 2006.
- [5] 伊勢, 音講論(秋), 3-5-13, 2011.
- [6] 長尾他, 音講論(春), 2-6-5, 2011.
- [7] 渡邊他, 音講論(秋), 1-Q-27, 2014.
- [8] 吉田他, 音講論(秋), 1-Q-28, 2014.
- [9] 河野他, 音講論(秋), 1-Q-32, 2014.
- [10] 池田他, 音講論(秋), 1-Q-29, 2014.
- [11] 唐津他, 音講論(秋), 1-Q-30, 2014.