

球面スピーカアレーによる高精細音響再生に関する研究

代表研究者

羽田 陽一

電気通信大学 大学院情報理工学研究科

1 研究調査の要旨

近年、4Kや8Kテレビといった高精細な映像通信が普及しつつあるが、音響再生に関して言えば、5.1chや22.2chといった方式が提案されてはいるが、家庭に広く普及しているとは言えない。本研究は、スピーカアレーを用いて狭指向性再生を実現することで、比較的小型な装置で高精細な音響再生が行えるかを検討することを目的とする。スピーカアレーとしては、360度あらゆる方向に指向性のビームを向けることが可能な球面スピーカアレーを用いる。一般に表面が球状である球面スピーカアレーを作成することは困難であるため、本研究では市販されている正12面体スピーカアレーと、3Dプリンタにより作成した正20面体スピーカアレーを用いて指向性再生の検討を行った。まず、任意の方向に対して鋭い指向性ビームを形成するための手法として、球面調和関数領域における拘束条件付き最小分散ビームフォーマを提案し、前方のみに強い指向性を再生できることを確認した。次に、ビームの幅をさらに狭くするために、適応的な重み付き最小二乗法によるフィルタ設計を試みた。この手法は、一度最小二乗法で作成したフィルタで再生した指向特性を評価し、サイドローブなどの音漏れが大きな方向に対して重みを付与する最小二乗解を逐次的に計算することで、狭指向性を実現する方法である。この手法により、ある程度鋭い指向性が作成できることが分かったが、実際の再生音は球面調和関数領域での設計の方が良く、今後球面調和関数領域の設計に応用する必要があることが分かった。最後に、球面スピーカアレーによって生成した指向性ビームでどのような音像が知覚できるかの受聴実験を行った。壁からの反射音のある通常の部屋で指向性ビームを再生すると、ビームが壁から反射し、その反射位置に音が定位することが分かった。また、奥の壁でビームを反射させると、奥行き方向に対して、距離感のある音像定位再生ができることが分かった。このことから指向性ビームを再生することで、実際にはスピーカのない位置に音像を定位させる、あるいは奥行き方向の距離感まで含めた高精細な音響再生が行える可能性があることが分かった。

2 研究背景

「人と人」、あるいは「人とモノ」の間において、「音」はコミュニケーションを支える重要な要素である。近年、デジタル信号処理の発展により、コミュニケーションは、スマートフォンに代表されるような手軽なものから、4Kや8Kテレビに代表されるような高精細かつ高臨場感な通信まで多様化してきている。しかしながら、映像技術に比べ、音の高臨場感再生や高精細な再生が手軽に、あるいは簡易な形態で一般家庭に普及しているとは言い難い。

そこで、本研究では、スポーツ中継においてはあたかもそのフィールドにいるかのような臨場感や、音楽演奏会の中継においては楽器が本来持つ音の放射指向特性までも再現する高精細かつ簡易な音の再生技術の検討を行う。このような音響再生技術が確立できると、チケットの入手困難が懸念される東京オリンピック・パラリンピックを家庭においても高臨場で観戦できる、あるいは海外での著名なバイオリニストの演奏などを目の前で演奏しているかのように聞くことができるようになる。また、目指す再生技術は、放送メディアや蓄積メディアの再生のみならず、高臨場感テレビ会議システムのようなリアルタイムコミュニケーションへの応用も念頭に置くものであり、結果として場の雰囲気まで伝わり、実対面での会議を減らすことができると思う。

高臨場感音響再生を支える主要な技術は、(1)波面合成[1]、(2) Ambisonics[2]、(3)指向性スピーカアレー[3]の3つに分類することができる。(1)の波面合成技術は、キルヒホッフ・ヘルムホルツ境界積分方程式に基づいて音場再現をする技術であり、受聴者前方に配置した直線スピーカアレーを用いる。また、近年空間フーリエ変換を用いる手法[4]が提案され、実時間処理も行えるようになってきている。(2)の Ambisonics は、半径1.5m程度の円周上あるいは球面上に配置したスピーカアレーの内側の中心点において音を受聴するシステムであり、平面波の球面調和関数展開に基づいている[5]。(1)、(2)とも物理的な音圧再現を目指しており、臨場感の再現精度は高いが、システムが大きくなるという欠点を持つ。一方、(3)の指向性スピーカア

レーは、デジタル信号処理を用いて、ある方向の音だけを強調する再生技術であり、従来は直線アレーを基本形状として研究が進められてきた[3]が、近年、球面上にスピーカを複数配置した球面スピーカアレーの研究が進展している[6] [7]。その理由の一つとして、ネオジム磁石の開発により、直径 2.5cm 程度の小型でありながら高出力のスピーカが市販され、球面や多面体に実装できるようになったことが考えられる。ただし、球面や多面体といったバッフルの制作には手間がかかるため、現在のところ正 12 面体スピーカアレーに関する検討が主である[8]。このような背景のもと、本研究では正多面体を利用した球面スピーカアレーを用いた指向性再生技術に取り組む。

3 球面調和関数展開による指向性再生の原理

3-1 スピーカアレーを用いた指向性再生の原理

本研究の目的のひとつは、球面スピーカアレーを用いて 3 次元空間内に任意の指向性を形成することである。本報告では、球面スピーカアレーとして、球表面での動径方向速度が 0 である剛球バッフル上に、等間隔に M 個のスピーカが配置されたものを仮定する。また、座標系としては、図 1 に示す極座標系を用いる。

今、図 2 にあるように座標の中心に M 個(ここでは $M=12$)のスピーカ素子を持つ半径 a の球面スピーカアレーがあり、これを用いて半径 r 上の観測点 (r, θ, ϕ) における音圧を制御することを考える。一般に指向性とは半径 r が無限遠方であるときの音の放射特性であるが、ここでは指向性を実際に観測することを考え、半径 r 上での音圧分布を指向性として読み替えることとする。また、信号は単一の周波数に分解されていることを仮定するが、最後に周波数合成を行うことで帯域信号に対して適用可能となる。

指向性を制御するために、各スピーカ素子の前段にフィルタ $w(\theta_{si}, \phi_{si})$ ($i=1, \dots, M$) が設置されているがこの結果、スピーカアレーから放射された音を観測点で観測すると、以下の音圧が得られる。

$$p(r, \theta, \phi) = \sum_{i=1}^M G(r, \theta, \phi | a, \theta_{si}, \phi_{si}) w(\theta_{si}, \phi_{si}) \quad (1)$$

ここで、 $G(r, \theta, \phi | a, \theta_{si}, \phi_{si})$ は i 番目のスピーカから観測点 (r, θ, ϕ) までの伝達関数である。この式を複数の観測点に対する式として行列表現すると、以下の式となる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{G}\mathbf{w} \quad (2)$$

ここで、

$$\mathbf{p} = \left(p(r, 0, 0) \quad p(r, \theta_n, \phi_n) \quad \dots \quad p(r, \theta_N, \phi_N) \right)^T \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} G(r, 0, 0 | a, \theta_{s1}, \phi_{s1}) & G(r, 0, 0 | a, \theta_{s2}, \phi_{s2}) & \dots & G(r, 0, 0 | a, \theta_{sM}, \phi_{sM}) \\ G(r, \theta_1, \phi_1 | a, \theta_{s1}, \phi_{s1}) & G(r, \theta_1, \phi_1 | a, \theta_{s2}, \phi_{s2}) & \dots & G(r, \theta_1, \phi_1 | a, \theta_{sM}, \phi_{sM}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G(r, \theta_N, \phi_N | a, \theta_{s1}, \phi_{s1}) & G(r, \theta_N, \phi_N | a, \theta_{s2}, \phi_{s2}) & \dots & G(r, \theta_N, \phi_N | a, \theta_{sM}, \phi_{sM}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{w} = \left(w(\theta_{s1}, \phi_{s1}) \quad w(\theta_{s2}, \phi_{s2}) \quad \dots \quad w(\theta_{sM}, \phi_{sM}) \right)^T \quad (5)$$

である。指向性スピーカアレーを設計するということが、観測音圧 \mathbf{p} が所望の指向特性と等しくなるようにフィルタ係数 \mathbf{w} を決定する問題となる。

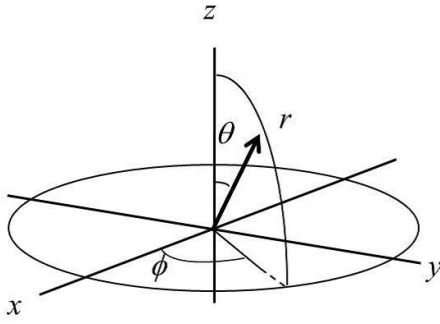


図1 極座標系

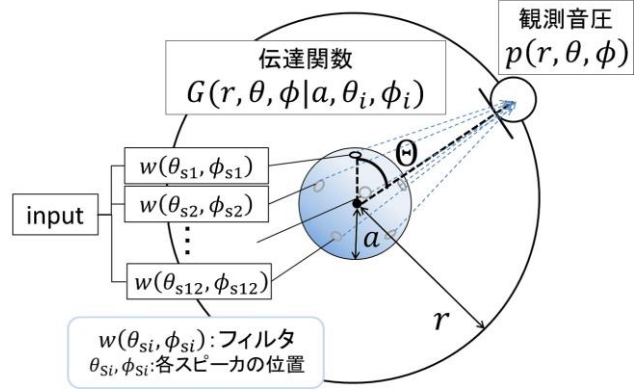


図2 スピーカアレーと観測点の関係

3-2 球面調和関数展開に基づくフィルタ設計

球面スピーカアレーを用いて任意の指向特性を合成する方法として、球面調和関数展開を用いる方法が知られている。ここでは、まず球面調和関数展開[9]について説明する。球面調和関数展開は直交展開であり、極座標表示での θ 、 ϕ 方向に対する任意の特性 $d(\theta, \phi)$ は、球面調和関数 $Y_n^m(\theta, \phi)$ とその係数 A_{nm} で展開することができる[9]。

$$d(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_{nm} Y_n^m(\theta, \phi) \quad (6)$$

$$Y_n^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} P_n^m(\cos \theta) e^{jm\phi} \quad (7)$$

ここで、 n, m は展開次数、 $P_n^m(\cos \theta)$ はルジャンドル陪関数である。この変換の逆変換は以下で計算できる。

$$A_{nm} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi Y_n^m(\theta, \phi)^* d(\theta, \phi) d\phi \sin \theta d\theta \quad (8)$$

さて、半径 a の剛球上にある点音源から半径 r 上のある観測点までの自由空間での伝達関数は、球面調和関数を使って以下のように記述できることが知られている。

$$G(r, \theta, \phi | a, \theta_{si}, \phi_{si}) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{4\pi}{a^2 k} \frac{h_n^{(2)}(kr)}{h_n^{(2)}(ka)} Y_n^m(\theta, \phi) Y_n^m(\theta_{si}, \phi_{si})^* \quad (9)$$

ここで、 k は波数 ($k=2\pi f/c$, c は音速)、 $h_n^{(2)}$ は第二種ハンケル関数である。また、フィルタ係数 $w(\theta_{si}, \phi_{si})$ は、球面調和関数展開すると、以下のように書ける。

$$w(\theta_{si}, \phi_{si}) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n w_{nm} Y_n^m(\theta_{si}, \phi_{si}) \quad (10)$$

これらの式を(1)式に代入すると、球面調和関数の直交性から、観測点での音圧は、

$$p(r, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n w_{nm} \frac{4\pi}{a^2 k} \frac{h_n^{(2)}(kr)}{h_n^{(2)}(ka)} Y_n^m(\theta, \phi) \quad (11)$$

となる。ここで、球面調和関数展開の逆展開を使うとフィルタ係数が、以下の式で計算できることが分かる。

$$w_{nm} = \frac{a^2 k}{4\pi} \frac{h_n^{(2)}(ka)}{h_n^{(2)}(kr)} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi Y_n^m(\theta, \phi)^* p(r, \theta, \phi) d\phi \sin \theta d\theta \quad (12)$$

このようにして求めた w_{nm} を(10)式に代入することで、解析的にスピーカアレーのフィルタ係数を決定することができる。

図3に12個のスピーカ素子を持つ正12面体スピーカアレーに対して、前述した方法で求めたフィルタ係数を用いた場合の指向特性図を示す。図4は3次元空間において斜め上方向に指向性を作った結果(1000Hz)である。図では、中心からの大きさが指向性の強さを表している。図から分かるように斜め上方向に強い指向性が出ているが、そのちょうど反対側にも音が放射されていることが分かる。本研究においては、所望の方向にのみ音を強く出し、その他の方向への放射はなるべく小さくすることを目指す。

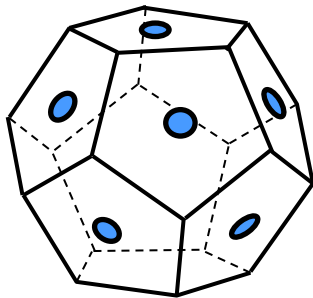


図3 正12面体スピーカアレー

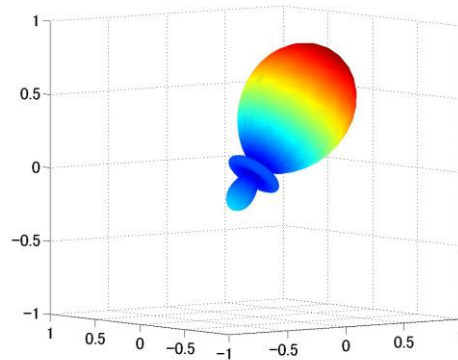


図4 解析解による指向特性図

4 狭指向性再生のためのフィルタ設計

本節においては、任意の方向にのみ音を強く放射するためのフィルタ設計法を2つの観点から検討したので、その結果について報告する。

4-1 球面調和関数領域における最小分散法を用いたフィルタ設計

指向性を生成するための技術は、アレーアンテナやマイクロホンアレーで発展してきており、任意の指向特性を生成する方法としていくつかの方法が提案されてきている。本研究では、所望の方向に音を強く放射しつつ、いくつかの方向に音を出さないという拘束条件を付加可能な最小分散ビームフォーマ[10][11]に着目した。通常、最小分散ビームフォーマは、(1)式のような形式、すなわち、スピーカ素子の位置でのフィルタ係数 $w(\theta_{si}, \phi_{si})$ を求める式に対して適用するものである。しかしながら、本研究においては、(11)式のように、フィルタ係数を球面調和関数領域での係数 w_{lm} として求める際に最小分散ビームフォーマを適用することを検討した。今、(11)式を行列表現として、 $\mathbf{p}=\mathbf{Y}\mathbf{A}$ と表し、拘束する方向ベクトルを \mathbf{C} 、その拘束条件を \mathbf{f} とすると、最小分散ビームフォーマの原理に基づいた球面調和関数領域でのフィルタ係数 \mathbf{A} は以下の式で求められる。

$$\mathbf{A} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{C}(\mathbf{C}^H\mathbf{R}^{-1}\mathbf{C})^{-1}\mathbf{f} \quad (13)$$

ここで、 $\mathbf{R}=\mathbf{Y}^H\mathbf{Y}$ である。

図5、図6に球面調和関数領域での最小分散ビームフォーマに基づいて作成した指向特性図(1000Hz)の計算機シミュレーション結果を示す。指向性の向いている方向は、図4と同じであるが、図5においては、目的方向と反対の方向に出ている音(サイドローブ)を抑圧するために、反対方向にヌル(音圧が0となる点)を制約条件として付加しており、後ろ側への音の放射が少なくなっていることが分かる。ただし、側方にはまだサイドローブが現れている。そこで、側方にもヌルを付加してフィルタ設計を行った。その結果の指向特性図を図6に示す。図から分かるように最小分散ビームフォーマを用いることで、所望の方向にのみ音を放射可能となったことが分かる。また、球面調和関数領域でフィルタ係数を設計しているため、式(10)を用いることで、指向性の全体の形を保ったまま任意の方向に指向性を回転できるという特徴も併せ持つ。なお、周波数合成を行う際には、球面調和関数の次数を周波数によって適切に選択する必要がある。

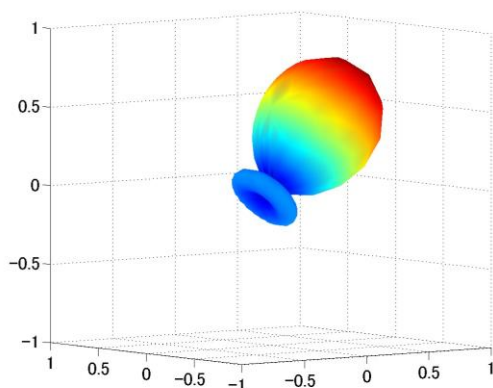


図5 反対方向にヌルを付加した結果

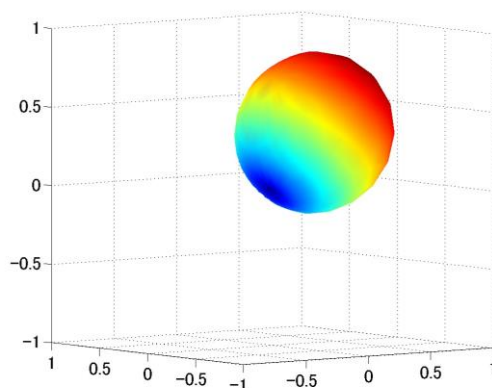


図6 反対方向と側方にヌルを付加した結果

4-2 適応的重み付き最小二乗法によるフィルタ設計

スピーカアレーのフィルタ係数 \mathbf{w} は(2)式で示した音圧 \mathbf{p} を再現するように決定される。このとき、目標とする音圧を \mathbf{d} とすると、目標値 \mathbf{d} と実際に放射される \mathbf{p} との間の2乗誤差を最小にすることでフィルタ係数を決定する方法として、最小二乗法[12]が知られており、最小二乗法の評価関数は以下のように記述できる。

$$J = (\mathbf{d} - \mathbf{G}\mathbf{w})^H (\mathbf{d} - \mathbf{G}\mathbf{w}) \quad (14)$$

最小二乗法は、目標特性との誤差の二乗和を最小にするだけなので、実際に観測される音圧は目標音圧のものとは異なり、目的方向以外に現れるサイドローブの音圧まで制御しきれないという問題点がある。また、計算過程において逆行列を計算しなければならず、フィルタ係数が不安定になる場合があるという問題点もある。

そこで、本報告では、サイドローブを抑圧するために、重み付き最小二乗法の検討を行った。今、各観測点に対応する重み係数を a_i ($i = 1 \sim M$) とすると、重み係数を対角成分にもつ対角行列 \mathbf{A} は以下のようにかける。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_M \end{pmatrix} \quad (15)$$

これを用いて、前述の評価関数に重みを導入すると、以下の式のように書き換えることができる。

$$J = (\mathbf{d} - \mathbf{G}\mathbf{w})^H \mathbf{A}(\mathbf{d} - \mathbf{G}\mathbf{w}) \quad (16)$$

通常、重み係数の値は、観測点における誤差の分散、つまり観測点において付加される雑音の分散によって決定される[12]。しかしながら、本報告における誤差は、理想的な指向性を事前に作成し、あるフィルタを用いて観測された音圧と理想的な指向性の音圧の誤差となっている。つまり誤差が大きいうことは、その観測点を精度悪く評価したといえる。そこで誤差が大きく精度が悪い観測点に、大きな重みをつけることによって精度をよくした上で再度計算を行う適応的な重み付き最小二乗法を検討する。ここで、理想的な目標特性は窓関数の組み合わせによって作ることとした。これは、音の放射が球面状になることから、指向性をもった音の放射特性は、回転楕円体で描かれるような特性になると考えたからである。また、緩やかな音圧変化を表現するために、用いる窓はハミング窓とした。重み係数は、理想的な指向特性と、フィルタ係数を用いて観測される指向特性の音圧レベルを計算し、どちらも最大音圧レベルが 30dB になるように正規化し、その差の絶対値をとったものを用いることとした。ただし、目標方向にはあまり重みをつけないようにするため、目標特性の逆の窓を掛ける。つまり、目的方向は再現精度が悪くても良く、サイドローブでは再現精度を高くすることで、サイドローブをより抑えたフィルタ設計が行える。

5 正 20 面体スピーカアレーを用いた指向性再生

5-1 3D プリンタを用いた正 20 面体スピーカアレーの作製

球面スピーカアレーによる指向性再現実験のためには実機が必要となるが、容易に入手可能な多面体スピーカとしては正 12 面体スピーカしかない。このため、本研究においては、3D プリンタを利用して、小型のスピーカを配置した正 20 面体スピーカアレーの作成を行った。この際、図 7、図 8 に示すように正 20 面体の枠と、スピーカを配置する面とを個別に印刷し、あとで結合する方法をとった。実験当初、素材の強度や組み立ての都合により、スピーカボックスとしての作りが甘く、再生音に非線形成分が重畳するなどの問題が発生した。これに対して、スピーカボックスの結合部分を埋める、スピーカ装着面にリブを挿入するなどの作業を行い、極力高域成分での非線形歪が発生しないように作成を行った。作成したスピーカアレーの半径は 7cm であり、直径 2.5cm のスピーカ素子が 20 面体の各面に配置されている (図 9)。

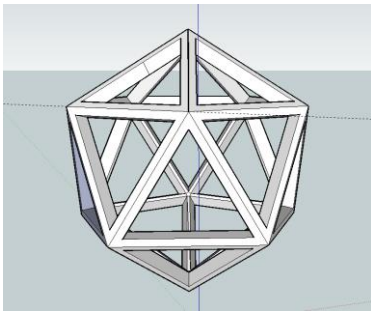


図 7 正 20 面体の枠構造

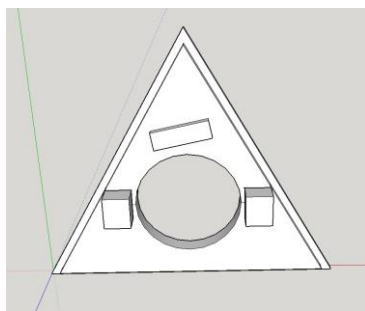


図 8 スピーカ設置面 (裏)



図 9 完成したアレー

5-2 指向特性再生結果

目的方向に指向性が形成され、その他の方向のサイドローブが抑圧されているフィルタ係数が算出できるか確認を行った。今、図 1 に示す極座標系において、 $\theta = 90^\circ$ 、 $\phi = 180^\circ$ の方向にビームを作ること考える。このとき、図 10 に示すような指向特性を理想的な目標特性とする。図 10 は、中心からの距離と色が音圧レベルを表し、最大音圧レベルが 30dB となるように正規化してある。また、この図は z 軸の正の方向から x-y 平面を見たものである。周波数は 1000Hz とし、伝達関数行列は無響室において測定した正 20 面体スピーカアレーのインパルス応答をフーリエ変換したものを利用した。インパルス応答は、半径 0.5 m の同心円状に 19 個のマイクロホンに 10° おきに設置した、半円形マイクロホンアレーの中心にスピーカアレーを設置し、スピーカアレーを 10° ごとに回転させ、重複も含めて $19 \times 37 = 703$ 個の観測点で測定した。また、計算過程であられる逆行列に対して正規化パラメータとして元の行列の対角成分の最大値の 100 分の 1 の値を付加した。また、フィルタによって形成される指向性の違いを比較するため、重みのない最小二乗法によるフィルタの計算も行った。図 11、図 12 にそれぞれのフィルタ係数によって得た指向特性の図を示す。これらの図から、提案手法においてサイドローブを抑圧しながら、指向性を形成できることがわかった。ただし、実際に音を再生した場合、球面調和関数領域で設計した音に比べ指向性を感じることができなかった。これは、帯域全体に渡り安定したフィルタ係数を求めることができていないことが原因と考えられ、今後の課題である。

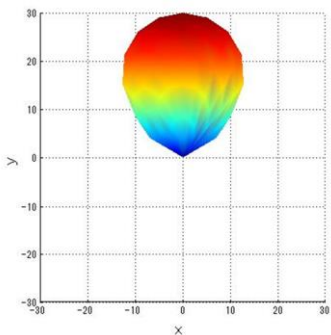


図 10 目標とする指向特性

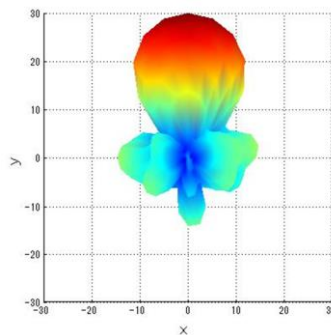


図 11 従来の最小二乗法

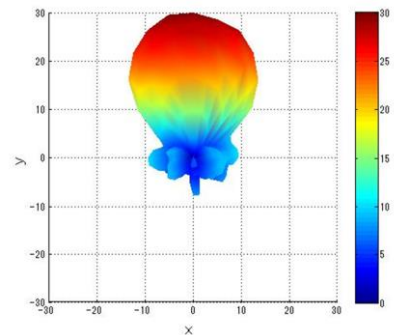


図 12 提案手法

6 インタラクティブ指向性再生による高精細再生実験

本節においては、単に指向性のある音を受聴者に聞かせるのではなく、指向性の方向を受聴者自ら操作することにより、静的に指向性再生音を聴くよりも高精細で面白い受聴体験ができるのではないかと考え、インタラクティブな指向性再生実験を行うこととした。受聴者が自分自身で指向性を操れるようにするために、本研究ではジャイロセンサを用いてユーザの指し示す方向を求め、それに基づいてインタラクティブに目的とする指向特性を回転させるシステムを構築した。その後、受聴者が指示した方向に対して指向性を向けた場合について、どの方向に定位したのかを確認するとともに、その要因について考察を行った。

6-1 リアルタイム再生システムの構築

受聴者が自分自身で指向性の向きを操作できるようにするために、ジャイロセンサを使ってユーザの指し示す方向角を取得することにした。本報告では、ジャイロセンサからの出力をパソコンに取り込むため、容易にプログラミング可能な Arduino を用いてジャイロセンサを扱うこととした。Arduino を通してジャイロセンサから 3 軸の回転角度を取得し、その値をパソコンに転送し、その後、回転角に対応した指向性を持つフィルタ係数を求める。ジャイロセンサによる回転角度の取得は 50 ms 毎に行う。また、取得角度には誤差が生じるため、誤差を補正するための値を、ジャイロセンサを静止した状態で取得した角度の長時間平均値として求めた。

ジャイロセンサから取得した値に対応したフィルタ係数を求めながら、連続して音響信号を再生させるための処理をリアルタイムにパソコンで行うため、フィルタの畳み込み処理を時間領域ではなく、フレーム処理として実行した。本実験は、サンプリング周波数を 48kHz として行う。まず、音声などの音響信号を 4800 点のフレームで切り出し、一つ前のフレームと並べてバッファに格納する。このときのバッファ長は 9600 点となる。次に、このバッファを高速フーリエ変換することで周波数領域に変換する。一方、指向性を実現するための時間領域フィルタの後ろに 4800 点のゼロを詰め、同様に高速フーリエ変換を行うことで、周波数領域フィルタとする。この周波数領域のフィルタと周波数領域に変換した信号とを乗算し、その結果を高速逆フーリエ変換する。計算した信号の後半を出力信号とする。求めた出力信号を再生している間に、4800 点先の次のフレームを用いて再び上記のように出力を求める。これを繰り返すことで連続した信号の再生を行う。信号の再生は 100 ms 毎に行い、ジャイロセンサからの回転角度の取得は 50 ms 毎に行うので、リアルタイムに指向性を回転させることができる。図 13 に実験システムの概略図を示す。ジャイロセンサの値の取得とフィルタの計算、およびフィルタリング処理は全て同一のパソコンで行った。

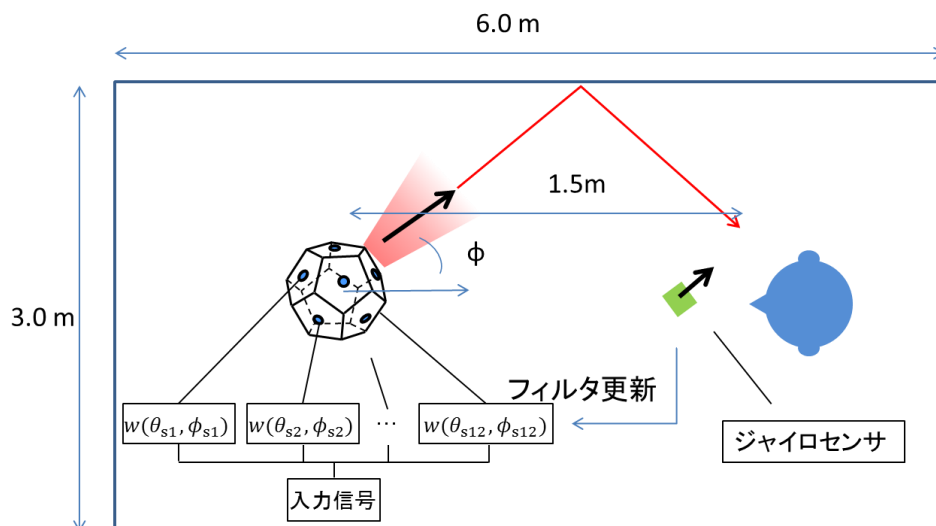


図 13 ジャイロセンサを用いたリアルタイム指向性回転システムの概略図

6-2 聴取実験

反射のある室内において、構築したシステムを用いた聴取実験を行った。部屋の寸法とスピーカアレーと受聴者の位置関係は図 13 に示した通りである。まず最初に報告者らが部屋の壁にメインローブを向けて聴

取を行ってみた。すると、実際のスピーカアレーの位置ではなく、メインローブの方向の壁に音像が定位しているように感じられた。また、他の方向に対してもスピーカアレーから音が出ているというよりはビームが壁から反射して聞こえるような感じであった。この結果から、音像の定位が変化する要因は壁の反射による影響であると予測した。ただし、ビームを受聴者の正面に向けたときには、受聴者の後ろから聞こえるような定位感は得られなかった。

本報告では、4名の被験者に対して指向性再生音を提示し、聴取実験を行った。部屋の形状が描かれた紙を用意し、その紙に室内のどの場所に音像が定位したかを書かせた。このとき、 $\phi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ のうち、ある一方向をランダムに選択し、その方向にメインローブを持つ指向性を再生した。再生音は音声とし、8秒間信号を再生して3秒間のインターバルを設けた。結果を、左右の音像位置と音像の距離に分けてまとめた。左右の音像位置は、受聴者の右側 ($\phi = 90^\circ$)の壁に定位したときを1、中央に定位したときを0、左側 ($\phi = 270^\circ$)の壁に定位したときを-1として回答結果を算出した。音像距離は、受聴者の前方 ($\phi = 180^\circ$)の壁に定位したときを1、実際のスピーカアレーの距離に定位したときを0、受聴者の後方 ($\phi = 0^\circ$)の壁に定位したときを-1として回答結果を算出した。図14に左右の音像位置の受聴結果を、図15に音像距離の受聴結果を示す。各円の位置はメインローブの呈示角度に対する回答音像位置であり、複数の被験者が同じ位置に回答したとき、円を大きくしている。破線は指向性のビームが壁から反射する位置に定位が得られると想定した回答の曲線である。図14より、左右の定位については、個人差はあるがメインローブの方向に音像が定位する傾向があることがわかった。また、図15より音像の距離については、メインローブが $\phi = 180^\circ$ に近づくにつれて受聴者正面の壁側に音像が定位することがわかった。メインローブを $\phi = 0^\circ$ 方向付近に向けるときは、受聴者の後方の壁（背中側の壁）に音像が定位することはなく、実際のスピーカ位置かそれよりも前方に定位する傾向があった。

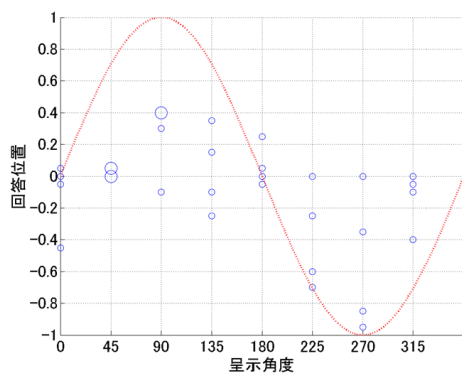


図 14 左右の音像位置の回答結果

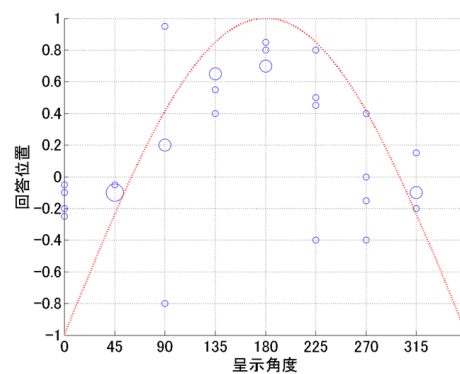


図 15 音像の距離に関する回答結果

6-3 音像定位の客観的考察

メインローブの向きによる音像定位の変化する要因を調査し、音像知覚の手がかりと関連付けて考察することを目的として、音像定位知覚の客観考察を行うこととした。まず、観測信号を得るため、それぞれのスピーカから TSP 信号を出力しダミーヘッドでインパルス応答を測定した。次に、各スピーカのフィルタと測定したインパルス応答を畳み込んだ信号を、指向性再生時のダミーヘッドでの観測信号とした。低周波数の雑音を除去するため、通過帯域 500 - 3400 Hz のバンドパスフィルタを観測信号に畳み込んだ。この観測信号から、方向知覚と距離知覚について検証を行った。

(1) 水平方向定位について

メインローブの方向を水平方向に回転させたときの受聴者が知覚する音像の方向について検証した。音像の方向知覚の手がかりとされる、ILD (Interaural level difference) を用いて方向知覚を評価する [13] [14]。ILD は両耳間のレベル差であり、値が 0 になるとき音像は中心に、左右のレベル差が ± 10 dB 程度で左右に音像を知覚する。ILD は左右の観測信号の音圧パワーをの比として計算することができる。実験によって得られた角度ごとの ILD を図 16 に示す。横軸がメインローブの方向、縦軸が ILD を表している。メインローブの方向によって、ILD が変化しており、指向性を回転させることで、水平面上における方向知覚が変化することがこのデータからも言える。

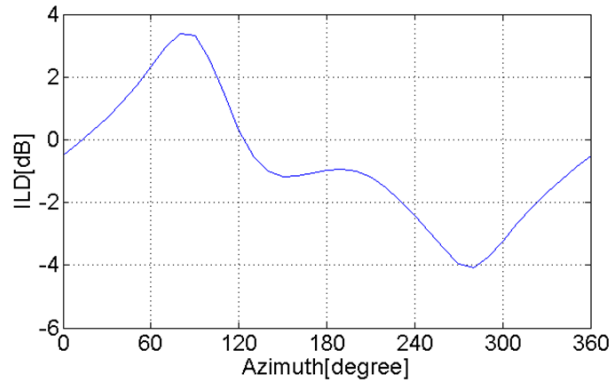


図 16 水平方向に対する指向性メインローブ方向と両耳間レベル差

(2) 奥行き方向定位について

聴取実験では、メインビームを $\phi = 0^\circ$ 方向に向けると、スピーカ付近に音像を感じ、 $\phi = 180^\circ$ に向けると奥の壁に音像が定位して聞こえた。この現象を客観的に説明するために、メインビームを $\phi = 0^\circ$ に向けたフィルタと $\phi = 180^\circ$ に向けたフィルタを用いて、音像の奥行き感について考察する。従来から、正面方向の距離知覚に影響を与える要因として、音圧レベル、反射音、音色が知られている[14][15]。ここでは、絶対的な距離知覚の手がかりとされる、反射音の影響について考察する。反射の影響の評価方法として、直接音と間接音のエネルギー比である直間比 (DRR: Direct-to-reverberation ratio)[16][17]を用いることとする。直間比が高いほど音像は近くに知覚され、低いほど音像は遠くに知覚される。

右耳の観測信号を図 17 に示す。図 17(a) は主ビームを $\phi = 0^\circ$ に向けたフィルタによる観測信号であり、図 17(b) は $\phi = 180^\circ$ に向けたフィルタによる観測信号である。この図から、メインビームを $\phi = 180^\circ$ に向けたとき、直接音が小さくなり第一反射音が大きくなるのがわかる。ここで、この直接音はスピーカアレーの指向性後方に漏れ出したサイドローブから放射された音が観測された信号である。表 1 に上述の 2 つの観測信号について DRR の算出結果をまとめた。ただし、 $\phi = 180^\circ$ 方向の観測信号ではサイドローブからの直接音が小さいので無視し、第一反射音を直接音とみなして DRR を算出した。スピーカアレーから $\phi = 180^\circ$ 方向の壁までの距離は約 2 m であり、直接音と第一反射音の経路差は約 4 m なので、時間差は約 12 ms となる。よって、全ての観測信号において第一ピークの前後 12 ms を直接音、その後ろ 20 ms を間接音として DRR を算出した。結果より、 $\phi = 0^\circ$ 方向にメインローブを向けたとき DRR が大きく、 $\phi = 180^\circ$ 方向にメインローブを向けたとき DRR が小さくなった。このことから、メインビームを向ける方向によって、受聴者耳元での直接音・間接音比が変化し、これが音像の奥行き感に影響を与えていると考えられる。

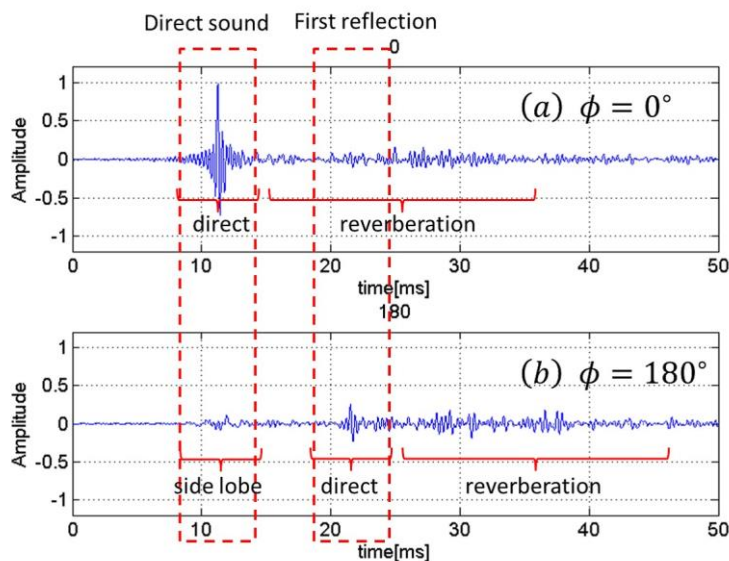


図 17 主ビームの向きの違いによる耳元での観測音圧波形の違い

表 1: DRR

| メインビームの方向 | DRR [dB] |
|--------------------|----------|
| $\phi = 0^\circ$ | 12.33 |
| $\phi = 180^\circ$ | 1.56 |

7 まとめ

正 12 面体および正 20 面体スピーカアレーを用いた高精細な指向性再生の検討を行った。指向性ビームを形成するための手法として、球面調和関数領域における拘束条件付き最小分散ビームフォーマと、適応的な重み付き最小二乗法によるフィルタ設計を検討した。両者とも鋭い指向性が作成できることが分かったが、実際の再生音は球面調和関数領域での設計の方が良いことが分かった。これは、球面調和関数の次数選択を適切に行うことで全帯域に渡り安定してフィルタ係数が求められたことが要因と考えられる。また、球面スピーカアレーによって生成した指向性ビームでどのような音が知覚できるかの受聴実験を行った。その結果、指向性ビームが壁から反射し、そちら側から音が聞こえることが分かり、実際にはスピーカのない壁に音像を定位させる、あるいは奥の壁にビームを反射させえることで音像の距離感も変更可能であることが分かった。これらの結果より、指向性制御を用いることで従来よりも高精細な音響再生が行える可能性があることが分かった。

【参考文献】

- [1] A. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel, "Acoustic control by wave field synthesis," J. Acoust. Soc. Am., vol. 93, no. 5, pp. 2764–2778, May 1993.
- [2] M. A. Gerzon, "Ambisonics in Multichannel Broadcasting and Video," J. Audio Eng. Soc., vol. 33(11), pp. 859-871, 1985.
- [3] D. G. Meyer, "Digital control of loudspeaker array directivity," J. Audio Eng. Soc., vol. 32, no. 10, pp. 747-754, 1984.
- [4] J. Ahrens, "Analytic Methods of Sound Field Synthesis," Springer, 2012
- [5] J. Daniel, S. Moreau, R. Nicol, "Further investigations of high-order ambisonics and wavefield synthesis for holophonic sound imaging," Audio Engineering Society Convention 114, 2003.
- [6] A. M. Pasqual et al, "Theoretical and experimental analysis of the electromechanical behavior of a compact spherical loudspeaker array for directivity control," J. Acoust. Soc. Am. 128, pp. 3478–3488, 2010.
- [7] 羽田陽一, 古家賢一, 島内末廣, "球調和関数展開に基づく多重極音源を用いた指向性合成", 日本音響学会誌 Vol.69, no.11, pp. 577-588, 2013.
- [8] B. Rafaely, "Spherical loudspeaker array for local active control of sound," J. Acoust. Soc. Am, vol. 125 (5), pp. 3006-3017, 2009.
- [9] E. G. ウィリアムズ, 吉川茂, 西條献児訳, 「フーリエ音響学」, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2005.
- [10] 浅野 太, 「音のアレー信号処理」, コロナ社, 2011.
- [11] 菊間 信良, 「アダプティブアンテナ技術」, オーム社, 2003.
- [12] C.M. ビショップ, 元田浩, 栗田多喜夫訳, 「パターン認識と機械学習」, 丸善出版, 2012.
- [13] 飯田一博, 森本政之, 「空間音響学」, コロナ社, 2010.
- [14] 中山靖茂, 桑田聡, 渡辺 馨, 和泉 吉則, "直間比による音像の距離知覚と3次元音響再生への応用," 信学技報, SP2003-39, 2003.
- [15] 西村 明, 佐々木 實, "音の距離知覚の手がかりに関する研究," 信学技報, EA93-40, 1993.

- [16] P. Zahorik, "Direct-to-reverberant energy ratio sensitivity," J. Acoust. Soc. Am., 112, pp. 2110-2117, 2002.
- [17] Y. Hioka, K. Niwa, S. Sakauchi, K. Furuya and Y. Haneda, "Estimating direct-to-reverberant energy ration using D/R spatial correlation matrix model," IEEE trans. on audio, speech, and language process., vol. 19, no. 8, pp. 2374-2384, 2011.

〈発 表 資 料〉

| 題 名 | 掲載誌・学会名等 | 発表年月 |
|--|-------------------------------------|------------|
| Interactive directivity control using dodecahedron loudspeaker array | Proceedings of NCSP' 16 | 2016 年 3 月 |
| 適応的な重み変更を用いた最小二乗法による正 20 面体スピーカアレーの指向性制御 | 電子情報通信学会応用音響研究会 信学技報, EA2015-105 | 2016 年 3 月 |
| 正 20 面体スピーカアレーの指向性制御を用いたトランスオーラルシステムの検討 | 電子情報通信学会応用音響研究会 信学技報, EA2015-1 | 2015 年 7 月 |
| 正 12 面体スピーカアレーを用いた球面調和関数領域の MV ビームフォーマ | 日本音響学会 2015 年春季研究発表会 | 2015 年 3 月 |
| 球面調和関数領域の MV ビームフォーマによる正 12 面体スピーカアレーの指向性制御 | 電子情報通信学会応用音響研究会 信学技報, EA2014-112 | 2015 年 3 月 |