

研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

(/)

研究題目	接線法を用いたパーソナル音響システムの性能評価:低周波帯と筐体に対するロバスト性	報告書作成者	貝塚勉
研究従事者	貝塚勉		
研究目的	<p>スピーカの近くに居るユーザにだけ音を届けられれば、周囲の人々に迷惑をかけずに音楽等を楽しめる。イヤホンやヘッドホンを装着すれば周囲へ音は漏れないが、耳を塞ぐと不快感や不便が生じるので、それ以外の手段を採用する。すなわち、複数のスピーカを並べてスピーカアレイを構築し、各スピーカから放射される音波を重ね合わせることで、音の届く距離を制御する。音の届く方向(指向性)の制御は既に実用化されているのに対し、音の届く距離の制御は、研究途上にあり、新しい分野である。</p> <p>円弧状の音響ビームを作り出すためのスピーカアレイ技術として、接線法(Zhao, et al., <i>The Journal of the Acoustical Society of America</i>, Vol.137, No. 2, pp.1036-1039, 2015)が海外の研究者により近年考案された。円弧の大きさ(半径と中心角)を制御できるのだが、それは音の届く距離を制御できることを意味する。しかし、接線法の原理上、円弧の外側に顕著な音漏れが生じやすい。そこで、貝塚(本助成の研究従事者)は、音漏れの影響を緩和する方法を考案し、音を近くに閉じ込める性能の基礎検討を計算機シミュレーションによって行い、良好な結果を示した(Kaizuka, <i>JASA Express Letters</i>, Vol.1, No.7, 072801, 2021)。ただし、この基礎検討では、スピーカアレイを自由空間に並べた複数の点音源としてモデル化しており、放射された音の反射や回折を引き起こす障害物(スピーカアレイの筐体等)までは考慮されていなかった。反射や回折は、性能に影響を及ぼす可能性がある。また、性能指標のひとつとして、音圧レベルの空間的な分布は重要だが、この基礎検討では、あるひとつのスピーカアレイについて 2000Hz での音圧レベルが分析されたのみだった。接線法の原理上、音の波長に対するアレイの長さの比率は、性能に影響を及ぼす可能性がある。この比率が低い場合(アレイ長を一定とすると、音の波長が長い場合、言い換えると、周波数が低い場合)、性能の劣化が特に懸念される。</p> <p>そこで、本助成研究では、筐体を考慮したシミュレーションモデルを構築し、筐体に対するロバスト性を評価した。また、波長に対するアレイ長の比に注目し、低周波数帯に対するロバスト性を評価した。</p>		

研究内容

描きたい円弧を想定し、円弧上の各点に関する接線(それぞれ角度の異なる直線)を遅延和ビームフォーミングの原理に基づき描くと、円弧に沿って接線が密に並ぶので、円弧状の音響ビームを作り出せる。これが、接線法の原理であり、その名前の由来である。想定した円弧の範囲に沿って音響ビームが作られるので、円弧の半径と中心角を適宜設定すれば、音の届く距離を制御できることになる。ただし、円弧の外側に接線を描くという原理上、円弧の外側には顕著な音漏れが生じる。そこで2つのスピーカアレイを用い、互いに対向するように円弧を描き、円弧同士の交点を聴取点(ユーザが音を聴く場所)として利用する(説明書の図1)。交点では音圧レベルが倍増するのに対し、円弧の外側同士は重ならないので音漏れ同士は強め合わないため、相対的に音漏れの影響を緩和できる。

COMSOL Multiphysics を用い、有限要素法と境界要素法による音響解析を行った。シミュレーションモデルのジオメトリを図2に示す。筐体を直方体の剛体としてモデル化し、その表面上に一系列に点音源を並べた。音声の再生を想定し、300Hz~3400Hz(音声通話で一般的に用いられる帯域)を分析対象とした。空間エイリアシングを避けるため、各アレイを構成する点音源の間隔を0.05mとした。各アレイは、13個の点音源から構成され、アレイ長は0.6mである。各アレイにより、半径0.6mの四分円を対向するように描く(図1)。例として、(0.52m,0.3m)で円弧同士を交わせ、ここを聴取点とする。

図3は、提案のスピーカアレイにより生成される音圧レベルの空間的な分布を示す。聴取点の音圧振幅値を基準として、音圧レベルを定義した。よって、0dBが聴取点の音圧レベルを意味する。筐体がない場合(上段)とある場合(下段)とを比べると、聴取点の側では、ほとんど差がない。よって、筐体に対するロバスト性は高いと言える。なお、当然だが、聴取点の逆側では、筐体により音の影ができる。

また、図3は、2000Hz、700Hz、300Hzでの結果を示している。各周波数の波長と、波長に対するアレイ長の比(以下、単に「長さの比」と呼ぶ)は、図に記載の通りである。2000Hz(長さの比が3.53)の場合、対向する2つの円弧を見て取れる。遅延和ビームフォーミングのメインローブの幅は、長さの比が高いほど、狭まることが知られている。それに伴い、接線法により描かれる円弧の幅も、狭まるはずである。700Hz(長さの比が1.22)の場合、円弧の幅が広がり、対向する2つの円弧を明確には見て取れない。それでもなお、図4に示される従来のスピーカの場合と比べれば分かるように(聴取点の正面に置かれた1個の点音源としてモデル化した。筐体がない場合を図示。周波数によって図は変わらないため、2000Hzの結果のみ掲載)、スピーカアレイの近くに音を閉じ込める効果は顕著である。300Hz(長さの比が0.53)の場合、円弧の幅が更に広がり、対向する2つの円弧を見て取れない。従来のスピーカの場合と比べると、y方向では音を近くに閉じ込める効果に乏しいが、x方向では音を近くに閉じ込める効果を確認できる。つまり、指向性が高まるのみである。ただし、遅延和ビームフォーミングは、疑似的な平面波を生成するため、球面波よりも緩やかな距離減衰を示すのに対し、提案のスピーカアレイは、球面波と同程度の距離減衰を示していることは、特筆に値する。まとめると、アレイ長が波長程度以上なら、音を近くに閉じ込められ、それを下回っても、球面波と同程度の距離減衰を保ちつつ、指向性を高められる。つまり、低周波でも一定の効果を得られ、その意味でロバスト性は良好と言える。

<p>研究のポイント</p>	<p>スピーカアレイの近くに音を閉じ込める技術として、接線法に基づく方法をこれまでに提案し、その有効性を計算機シミュレーションによって示していた。しかし、スピーカアレイの筐体を考慮しない単純なシミュレーションモデルだったため、筐体による音の反射や回折が音を近くに閉じ込める性能に及ぼす影響を分析できていなかった。また、原理的に低い周波数における性能の劣化が懸念されるところ、その点の分析も十分行われていなかった。本研究では、筐体を考慮した、より現実的なシミュレーションモデルを作成し、性能を評価した。また、周波数と性能の関係を議論するにあたり、波長に対するアレイ長の比を本質的に重要な無次元の指標として採用した。これは、接線法が遅延和ビームフォーマに基づく方法であるところ、遅延和ビームフォーマのメインローブの幅が前記の比に依存することが知られており、この比が低い場合(つまり、周波数が低い場合)、遅延和ビームフォーマのメインローブの幅が広がり、それに伴って接線法で描く曲線の幅も広がると考えられ、そのことが音を近くに閉じ込める性能にどこまで影響するのかを分析した。</p>
<p>研究結果</p>	<p>筐体の有無による性能の違いを比較したところ、殆ど差がないことを確認できた。波長に対して筐体の大きさが数倍の場合でも、筐体のない場合に対する顕著な差はなかった。したがって、筐体に対するロバスト性は高いと言える。</p> <p>アレイ長(提案の方法では、同じ長さのアレイを2つ用いるが、ここで言うアレイ長とは、アレイ1つの長さ)が波長と同程度以上なら、音を近くに閉じ込めやすい。アレイ長が波長より短いと、音を近くに閉じ込めにくいだが、それでもなお、球面波と同程度の距離減衰を保ちつつ、球面波よりも指向性を高められる(指向性を高める従来技術の遅延和ビームフォーマでは、疑似的な平面波を生成するため、球面波よりも緩やかな距離減衰を示し、望むか望まないかに関わらず遠くまで音が届いてしまうのとは、対照的である)。つまり、低周波も含めて一定の性能を発揮でき、その意味で周波数に対するロバスト性は良好と言える。</p> <p>以上の前向きな結果を踏まえ、スピーカアレイの試作および性能評価実験の準備に着手した。</p>
<p>今後の課題</p>	<p>本助成研究では、アレイ長と波長との関係について分析を行ったが、アレイ長と聴取点までの距離との関係も性能に影響を及ぼすと考えられる。両者の比を無次元の指標として、体系的な分析を今後行っていこうと考えている。また、聴取点の場所を定めたとき、その点で交わる円弧の半径、中心角、中心座標の設定(これにより、円弧状の何処が交点となるのかも決まる)も、得られる性能に影響を及ぼすと考えられる。描く円弧の設定によって、必要なアレイの長さ、ひいては、必要なスピーカの数が決まる。これらの事項を総合的に勘案し、できるだけ少ない数のスピーカ、できるだけ短い寸法のアレイで、所望の性能を達成することを今後検討していく。計算機シミュレーションと実験の両面から提案の方法のPOC(proof of concept)を行っていく。</p>