



令和4年度研究助成 【サウンド技術振興部門】より

2時刻のアレイ信号に基づく高速な 広帯域信号処理手法の構築

九州大学芸術工学府技術職員

岩見 貴弘

1. はじめに

アレイ信号処理は電磁気や音響、画像など様々な分野に渡って広く用いられている。近年ではセンサの小型化や計算機の性能向上を背景に急速に普及が進んでおり、今後このような技術は更に重要なものとなっていくだろう。

さて、既存の多くのアレイ信号処理手法を考えるとその多くは狭帯域信号に対する所謂周波数領域手法であることに気づく^{1), 2)}。これは例えばある狭帯域の電波のみを拾うような処理に対しては有効であるが、音響分野においては実音場が狭帯域（殆ど純音しか鳴っていない）という状況は稀である。また、広帯域の信号に対してこのような手法を適用するためには、ある時間幅の各マイク入力に対して離散Fourier変換を施し、各周波数ビンについて手法を適用、その後全ての結果を統合するような処理が必要となる。そのためこれらの手法は計算量が大きく、また信号取得時間のボトルネックが生じる。

そこで本研究では瞬時音場から得られる情報に着目し、少ない時刻情報（2時刻）のアレイ信号のみから同等の処理を実現する手法の構築を試みる。提案する手法は、再生核Hilbert空間（更に言うとも帯域制限空間）の性質を用いることにより、任意の空間次元及び

素子配置のアレイに適用可能であり、空間の次元や周波数範囲に計算量が依存しない。本稿では、提案手法の着想と簡単な概要について述べたい。

2. 1時刻のアレイ信号から分かること

前述の通り、多くのアレイ信号処理手法は周波数領域で考えられる。これはある意味で長い時間区間の情報を用いるものである。しかし、そもそもある一瞬を切り取った瞬時音場から分

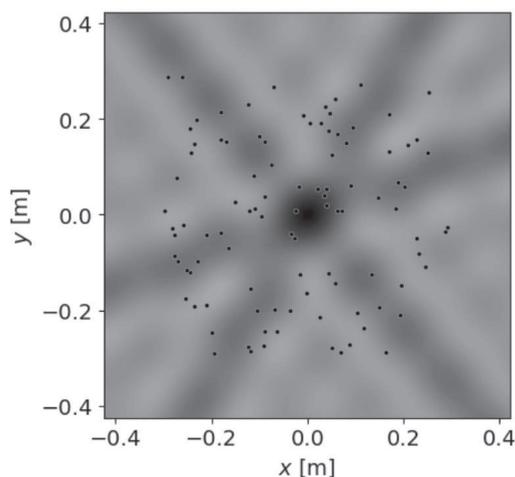


図1 広帯域瞬時音場の例（110, 150, 220度の3方向から到来している音場。黒点はランダムに配置したマイクロホン）

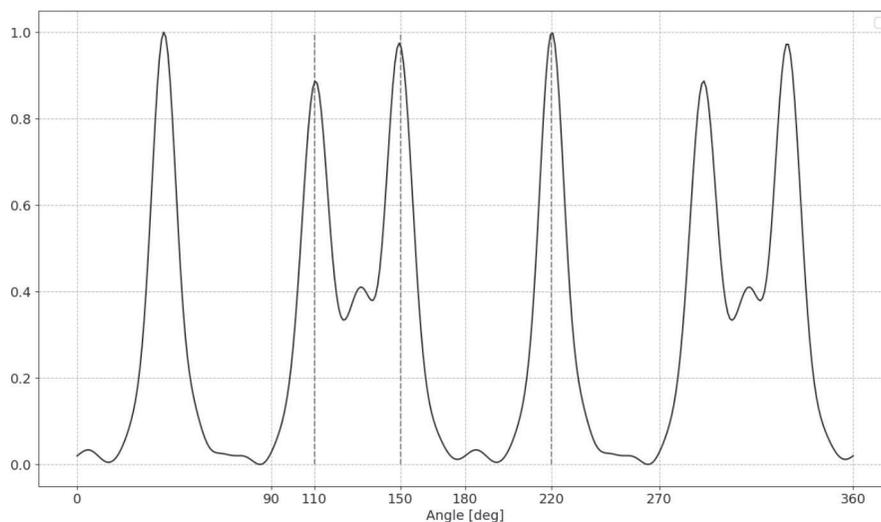


図2 瞬時アレイ入力から推定した到来パワー

かることは少ないのだろうか。まず私はこの疑問の解決に取り組んだ。

図1に示すような複雑な2次元瞬時音場を見て音の到来方向を推定出来るか考えてみる。ここで1時刻のアレイ信号を取得することは、画像の輝度値を離散的に得ることに対応することに注意されたい。勿論このような音場の到来方向を人間が直感的に当てるのは難しいであろう。しかし音場が斉次波動方程式に基づくことに着目すれば、瞬時音場は逆空間Fourier変換の形で書け、このときの係数を推定することで音の到来“軸”が分かることをこれまでの研究で明らかにした。これは、波数スペクトルを球状に制限した関数空間（球状帯域制限空間と呼称している）の再生核を用いた瞬時音場の表現を用いることで実現している。図1の瞬時音場に対してマイクアレイ入力から到来パワーを推定した結果が図2である。

これを見ると180度周期で同じ形をしていることが分かる。これが到来“軸”という所以である。本稿では数式による詳細な説明を避けるが、これは直感的には図3のような単純な瞬時

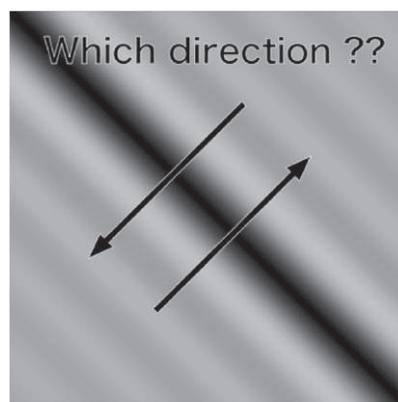


図3 単純な広帯域音場の例（実際は45度方向から到来している平面波音場）

音場を測定できたとしても、進行“軸”は分かるが進行“方向”までは分からないことに起因する。

到来“方向”までは推定出来ないまでも、1時刻のアレイ信号のみから進行“軸”なら十分に推定できることが分かった。もし到来を半空間に限定すれば、収録のボトルネック無しに高速な到来方向推定が可能となる。この他、瞬時

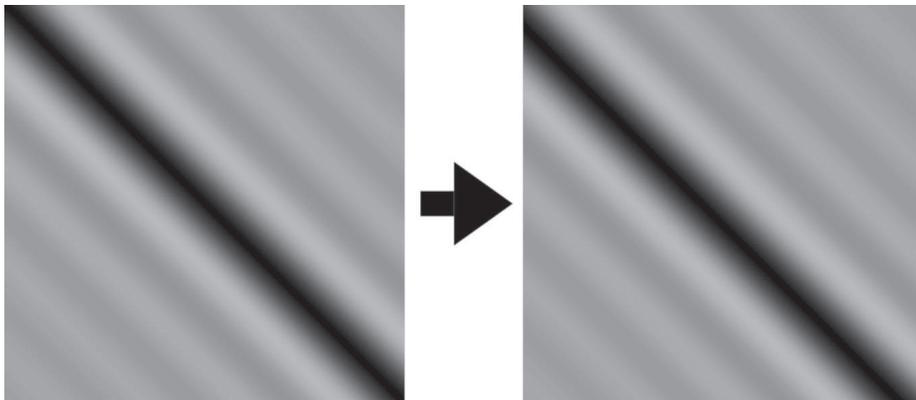


図4 図3の瞬時音場（左）と1サンプル後の瞬時音場（右）

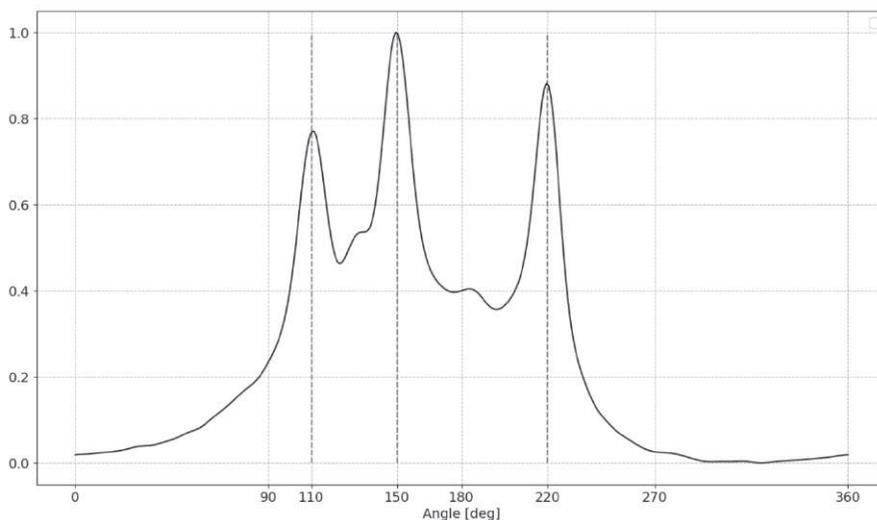


図5 提案手法による2時刻のアレイ入力からの到来方向推定結果

音場の補間や軸ビームフォーミングの手法も構築している。しかし、到来を半空間に仮定することは非常に限定的であり、ある軸に関するアレイ処理では実用性に欠ける。そこで、本研究では必要最低限の時刻情報を用いることでこの問題を解消し、高速なアレイ信号処理理論を構築する。

3. 2時刻のアレイ信号に基づく手法の検討

図4は、図3の瞬時音場に加えて、その直ぐ後の時刻の瞬時音場を示したものである。これについて「左の音場の直後が右の音場のとき、どちらに進んでいるだろうか？」と聞かれれば、注意深く見ることで左下に進んでいることが分かるのではないだろうか。本研究の着想はこのような単純な洞察から来ている。1時刻だと分

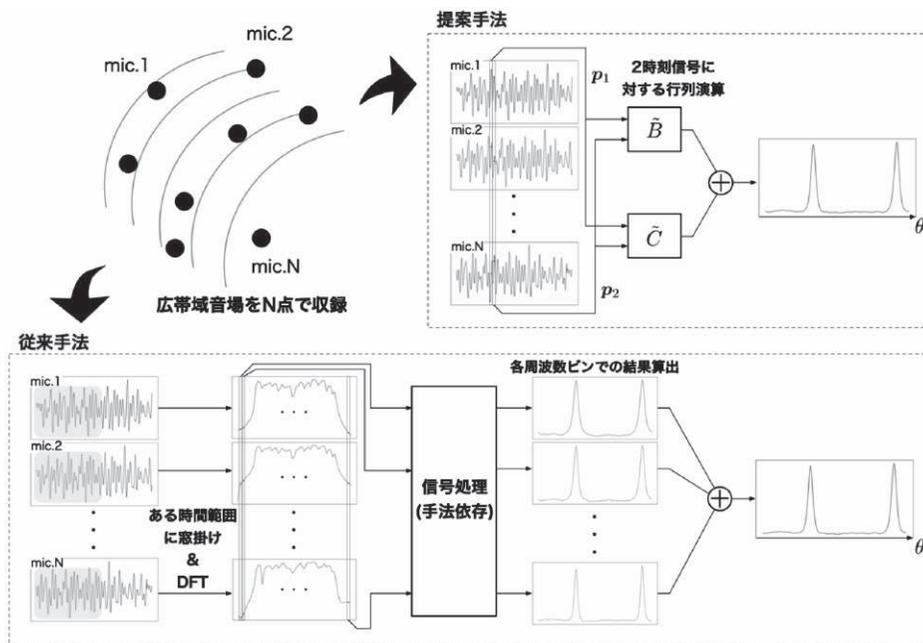


図6 従来(周波数領域)手法と提案手法の信号処理の流れ

からないなら2時刻という訳である。

後はどのようにこの着想を手法に落とし込むかという課題が残されているが、これは時刻 t_1, t_2 に対する波数スペクトルの連立方程式を立式し、線形逆問題を解くことで解決した。この逆問題に登場する行列は $|t_2 - t_1| < 1/2W$ (W は上限周波数) のとき、すなわち2時刻の差が上限周波数の2倍分の1より小さいときには必ず正則になることが示せる。つまり、先の式を満足するような十分近い2時刻のアレイ入力信号のみから到来方向を推定可能である。これによって図1の音場の到来方向を推定した結果を図5に示す。これを見ると、図2で生じていた逆方向のピークが消失し、正しく到来方向を推定出来ていることが分かる。ここで比較のため従来(周波数領域)手法と提案手法の流れを図6に示す。従来手法では、まずある時間区間のアレイ入力を必要とするために、該当区間の収録が完了するまで処理を待つ必要があるが、提

案手法では2時刻のアレイ入力のみが必要であるため収録遅延は非常に短い。更に従来手法はその後DFTを行い各周波数ビンで処理、最後に統合処理のように続くが、提案手法は瞬時アレイ入力値をベクトルにしたもの2時刻分に対して2つの行列を作用させるのみで処理が完了する。ここで用いる行列は、設定した2時刻の差(サンプリング周期)とアレイの素子配置のみで決定されるため事前に計算することが可能である。

この他にも2時刻のアレイ入力に基づくビームフォーミング手法や瞬時音響インテンシティ場推定手法を提案しており、いずれも従来手法に比べて非常に高速であり、遜色ない性能を有することを確認している。

4. 今後の展望

現状は基礎的な理論構築及び単純な音場における数値シミュレーションを行った段階であ

る。アレイの大きさや素子配置をどのようにすれば良いかや、用いる時刻差と上限周波数の関係、ノイズに対する頑健性等は今後調査したい。また、実装に関しては現在2次元の96ch平面アレイでの簡単な実験を行い性能を検証しているが、3次元アレイに関しては行えていない。これは本手法が中空のある程度稠密なアレイに対して用いる手法であるのに対して、3次元の格子状アレイのようなものは現状殆ど流通していないためである。今後はこのような3次元マイクアレイの設計・制作も含めて進めていく必要があると考えている。また、本手法は2時刻のアレイ信号のみから実行可能であるため、サンプリングする毎に前時刻の信号と合わせて計算することが可能である。しかしながら現在主流の録音方式はバッファリング方式であるため、バッファサイズ分の信号を取得するまで計算を開始することが出来ず、この利点を完全に活かすことは難しい。これもよりアナログ処理に寄せることで克服できたと考えている。

最後に、音響学では多くの場面で単一周波数を仮定しがちである。これは波動方程式であればFourier変換することでHelmholtz方程式というより単純な支配方程式に変換されること、

Rayleigh積分やKirchhoff-Helmholtz積分など応用に有力な公式が多く知られていること、更には周波数領域での理解は我々人間の聴覚の仕組みとの親和性が高いこと等様々な要因が考えられる。しかし広帯域信号を対象に考えると、必ずしも周波数領域からスタートしないアプローチが、幾つかの側面で利点があるのではないかと考えている。本研究がこのような新たなアプローチの1つのきっかけになると幸いである。

謝辞

本研究の一部は、一般財団法人カワイサウンド技術・音楽振興財団の研究助成によって遂行されました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Van Trees Harry L. Optimum array processing : Part IV of detection, estimation, and modulation theory, John Wiley & Sons, 2004.
- 2) B. Rafaely, "Fundamentals of Spherical Array Processing," Springer, Berlin, Germany, 2015.