

令和 4 年 5 月 2 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04399

研究課題名(和文)高周波音を用いた高精度音源定位法の開発

研究課題名(英文)A study on high resolution sound source localization method using high frequency components

研究代表者

陶山 健仁 (Suyama, Kenji)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：50303011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マイクロホン対による音源定位の推定精度向上法について検討した。音源定位精度向上にはマイクロホン間隔の拡張と高周波音の利用があげられるが、これらはいずれも推定結果に不定性をもたらす空間エイリアシングの要因となる。この問題の解決のために、不定性を含む全ての推定結果候補に対して信頼性を重み付けて真の音源方向付近の推定結果のみ抽出する逐次更新ヒストグラム法と、マイクロホン間の伝搬遅延特性を時間領域でモデル化して不定性を排除する手法について検討した。実環境実験を通して、手法の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コロナ禍を経験した我々にとって、機器に対する音声コマンド機能の重要性はますます高まっている。音声コマンドは音声認識によって実現され、音声認識性能は受信信号の品質に依存する。その際、音源方向によって選択的に受信するマイクロホンアレー技術が重要になる。その際、音源方向の検出がポイントであるが、コスト減を考慮して2マイクロホンを利用した場合、精度が劣化する。推定精度向上にはマイクロホン間隔拡張や高周波音の利用が有効であるが、空間エイリアシングによる推定結果の不定性の要因となる。本研究の成果は、不定性のある状況において、正解方向を検出する技術を明らかにしており、学術的・社会的意義が高いと考えられる。

研究成果の概要(英文)：A method for improving the estimation accuracy of sound source localization using a pair of microphones was studied. For this purpose, it is effective to expand microphone width and to use high-frequency signal components. However, those factors cause a spatial aliasing that brings ambiguity among estimation results. In order to resolve this difficulty, two kind of methods have been developed from different points of view each other. The first method, which is called as the sequential updating histogram method, extracts estimation results having relatively high reliability among all estimation results, in which of course a lot of incorrect results due to ambiguities are involved. The second method estimates directly by modeling a propagation delay characteristics of sound signals between microphones in a time domain, where the spatial aliasing does not occur. The effectiveness of the methods were shown through actual room experimental results.

研究分野：信号処理

キーワード：デジタル信号処理 音響信号処理 音源定位 モデル化 マイクロホン

1. 研究開始当初の背景

空間的に複数のマイクロホン配置した受音系であるマイクロホンアレーは、マイクロホンの位置の違いを利用した空間的信号処理が可能である。音源定位は、マイクロホンアレーの受信信号から音源方向を検出する技術である。音源定位結果に基づき、音源方向ごとに信号の抽出・抑圧が可能となるため、単一マイクロホンと比べて効果的な雑音除去、音源分離などが可能である。音源定位はマイクロホン間の音波の到達時間差に基づいて行われる。装置コスト減を考慮し、最小限のマイクロホン数である 2 マイクロホンを用いる場合、推定精度は劣化する。音源定位性能の向上には、空間解像度向上を狙ったマイクロホン間隔の拡張、暗騒音レベル、残響の影響の小さい高周波数帯域の利用が効果的である。しかし、これらの条件は推定結果に不定性をもたらす要因となり、一意に音源方向を検出できない状況となる。この問題の解決が本研究に対する学術的問いである。

2. 研究の目的

マイクロホンアレーは、空間を伝搬する音波をマイクロホン位置でサンプリングするモデルとして考えられるため、時間領域のサンプリング定理と同様の議論が波長（空間周波数）とサンプリング間隔（マイクロホン間隔）の間に成立する。想定している状況は、空間サンプリング定理を満たさないため、空間エイリアシングが発生し、マイクロホン間の位相差に曖昧さが生じ、結果として音源定位結果に不定性が残る。そのため、音源定位性能向上には不定性を含む状況において真値を抽出する手段が必要となる。

本研究では、その解決法として、つぎの 2 つの視点からの手法の確立を目的とする。

- 不定性を含む位相差候補に対する信頼性評価による正解音源方向の検出
- 不定性を含まない時間領域処理により空間領域の不定性を解消

3. 研究の方法

2 つの視点から手法を検討した。

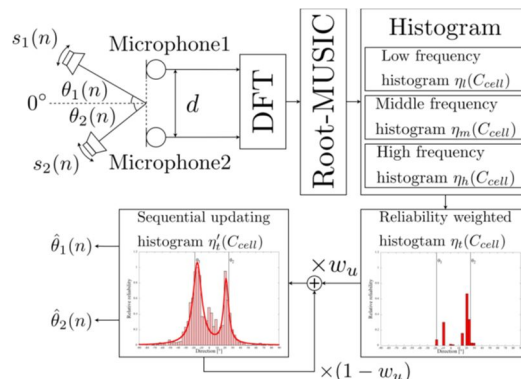


図 1: 逐次更新ヒストグラム法の流れ

不定性を含む位相差候補に対する信頼性評価による正解音源方向の検出

従来開発されてきた音源定位手法のうち、信号部分空間の直交性を利用する手法は、低 S/N 環境においても推定精度が高いが、空間エイリアシングが発生する周波数において、位相差に 2π の整数倍の不定性が生じる。整数は周波数とマイクロホン間隔によって決まる。

そこで、図 1 に示すように、周波数帯域ごとに信号部分空間の直交性を利用する Root-MUSIC の推定結果に対して、不定性を考慮した位相差候補を列挙し、そのヒストグラムを作成する。真の音源方向に対する候補の方向は共通であり、空間エイリアシングによる偽りの候補の方向は周波数によって異なるため、ヒストグラムの段階で真の音源方向に多くの候補が集まるが、鋭いピークが形成されるほどではない。そこで、空間エイリアシングが発生しない低周波数帯域のヒストグラムを $\pm 2\pi$ だけ不定性をもつ中間周波数帯域のヒストグラムに対する信頼性とみなして重みづける。その結果を、 $\pm 2\pi, \pm 4\pi$ の不定性をもつ高周波数帯域のヒストグラムに対する信頼性とみなして重みづける。

さらに、高周波数帯域のヒストグラムをフレーム毎に逐次更新し、ピークの強調を試みる。最終的に、逐次更新ヒストグラムに尖度の高い分布関数を当てはめ、ピーク方向を検出し、推定音源方向とする。この手法は複数音源定位が可能である。

不定性を含まない時間領域処理により空間領域の不定性を解消

マイクロホン間隔を拡大した場合、もしくは高周波信号を用いた場合、周波数 f が $d < c/2f$ を満たさない場合、空間エイリアシングが生じマイクロホン間の位相差に不定性が生じる。本研究で想定しているマイクロホン間隔、周波数帯域はどれもこの条件を満たさない条件である。先に音波が到来するマイクロホンを基準に考えると、他方のマイクロホンの受信信号は基準マイクロホンから到達時間差だけ遅れて受信される。これをマイクロホン間の伝搬遅延特性とみなし、時間領域で推定系を構築すると、この系は時間的サンプリング定理を満たすため、エイリアシング問題の影響を受けない。推定した系の群遅延特性を求めるとマイクロホン間の到達時間

差が推定可能となる。

そこで、図2に示す伝搬遅延特性のモデル化による手法を検討した。近似モデルにはARMAモデルを利用するが、時間領域処理のため因果性を満たす必要があり、伝搬遅延特性をモデル化するためには、音源方向によって基準となるマイクロホンを切り替える必要がある。そこで、正方向か負方向かおおまかに判断する方向推定を最初に実行する。本研究では、低周波数帯域の信号に対するヒルベルト変換による解析信号を用いた方向推定を使用した。モデル化のための適応フィルタの学習則にはRLSアルゴリズムを用い、任意の周波数における群遅延から得られる推定結果のヒストグラムを作成し、と同様に逐次更新、ピーク検出により最終的な音源方向を算出する。この手法は、現時点で単一音源定位のみ可能である。

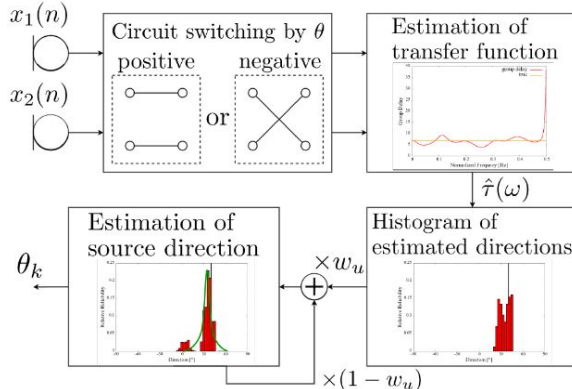


図2: 伝搬遅延特性のモデル化による手法の流れ

4. 研究成果

実環境実験によって性能検証を行った。

逐次更新ヒストグラム法による音源定位

マイクロホン間隔 23[cm]の測定系によって室環境で収録した音響信号に対して、Root-MUSICで用いる相関行列算出で必要な忘却係数について検証を行った。その結果、0.75 ~ 0.85程度に設定すれば十分であることを明らかにした。これは音声の母音部の平均的な長さである0.2[s]を検出する長さに相当する。一方、ヒストグラム作成時のセル幅は、低周波数帯域が 6° 、中間周波数帯域が 2° 、高周波数帯域が 4° 程度に設定すれば、最終的に使用したい高周波数帯域の不定性を含む推定結果から良好な結果を取捨選択できることを明らかにした。

低周波数帯域、中間周波数帯域のヒストグラムは最終的に高周波数帯域の結果を選択する目安としての役割をもつため、真の音源方向付近に一樣分布するヒストグラムが望ましい。低周波数帯域は空間エイリアシングの影響を受けないが暗騒音レベルが高いため、推定に失敗するケースが多く、推定結果の分散も大きくなり一樣分布に近づけるためにはセル幅も大きめに設定する必要がある。一方、中間周波数帯域は推定精度が高いため、セル幅を小さく設定すれば1つのセルに入る推定結果を高々数個に限定することができるため、一樣分布に近づく。高周波数帯域に含まれる真値付近の結果は分散も小さいため、中間周波数帯域よりやや広めに設定すれば1つのセルにほとんどの結果を含めることが可能となり、鋭いピークを形成できる。検証結果はこれを裏付ける結果である。

伝搬遅延特性のモデル化による手法

伝搬遅延特性のモデル化に基づく手法に対して、で使用した音響信号を用いて性能検証を行った。図3に検証結果を示す。図3の横軸は音源方向、縦軸はRMSE、IDは逐次更新ヒストグラム法のRMSEに対する伝搬遅延特性のモデル化法のRMSEであり、 $ID < 1$ のときモデル化が有効であることを示している。結果から、特にブロードサイド方向に対して、モデル化法の有効性が確認できる。一方、 $[-30^\circ, 30^\circ]$ の正面方向付近は逐次更新ヒストグラムが有効であることを明らかにした。

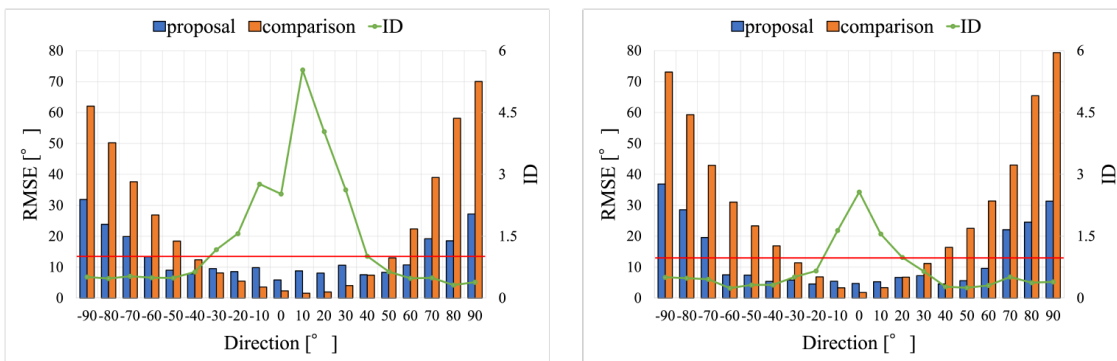


図3: 伝搬遅延特性のモデル化による手法 (左: 残響時間 0.6[s], 右: 残響時間 1.3[s])

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 菊池慶樹, 陶山健仁
2. 発表標題 2マイクロホンによる複素重み付け加算回路を用いた3音源分離
3. 学会等名 電子情報通信学会回路とシステム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳥生翼, 陶山健仁
2. 発表標題 音声信号の局在時間を考慮した複数音源追尾
3. 学会等名 電子情報通信学会回路とシステム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松永 拳, 陶山 健仁
2. 発表標題 逐次更新ヒストグラムに基づく全方位音源追尾の性能検証
3. 学会等名 電気学会システム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西牧 駿, 陶山 健仁
2. 発表標題 スパース尺度に基づく抑圧処理による音源分離の改良
3. 学会等名 電気学会システム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shun Nishimaki and Kenji Suyama
2. 発表標題 A Preprocessing for Sound Source Separation Using Complex Weighted Sum Circuits
3. 学会等名 IEEE ISPACS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Matsunaga and Kenji Suyama
2. 発表標題 Performance Verification of Omnidirectional Sound Source Tracking by Circular Microphone Array
3. 学会等名 IEEE ISCIT 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiki Kikuchi and Kenji Suyama
2. 発表標題 Effective Sound Source Arrangement for Three Sound Localization Using Two Microphones
3. 学会等名 ITC-CSCC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥生 翼, 陶山 健仁
2. 発表標題 階級幅を調整する音源方向推定値分布に基づく複数音源追尾
3. 学会等名 2021年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳥生 翼, 陶山 健仁
2. 発表標題 逐次更新ヒストグラムによる複数音源追尾手法の考察
3. 学会等名 電気学会システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊池 慶樹, 陶山 健仁
2. 発表標題 複数2マイクロホンペアを用いた全方位音源追尾
3. 学会等名 2021年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳥生 翼, 陶山 健仁
2. 発表標題 音源追尾性能向上のための逐次更新ヒストグラム生成方法
3. 学会等名 第34回 回路とシステムワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀 智也, 陶山 健仁
2. 発表標題 マイクロホン間の伝搬遅延特性の推定に基づく音源定位
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部第27回学生研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------