

振り子型マイクロホンによる単チャンネル音源方向定位*

☆ 高橋祐芽, 赤石夏輝, 矢田部浩平 (農工大)

1 はじめに

音源方向定位ではマイクロホンアレイが一般的に用いられる。一方で、単一のセンサを移動させて、ドプラ効果による周波数変調の情報に基づいて信号の方向定位を行う手法が提案されており [1], センサを等速円運動させた場合の方向定位の性能がシミュレーションによって評価されている。本稿では、円軌道よりも簡易な、単振動を行う「振り子型マイクロホン」を用いて音源方向定位を行う手法を提案し、実測によって適用可能性を評価する。

2 振り子型マイクロホンのモデル

本稿では、振り子の先に計測点を持つ「振り子型マイクロホン」を用いて、静止音源から放射される信号を録音する。簡単のために、音源と観測点の高さは同じとし、音波は球面波で進行すると仮定する。振り子は単振動するため、この測定系は [1] における平面上的センサの等速円運動を軸上に簡易化したものとみなせる。測定系の模式図を図-1 に示す。マイクロホンは振動中心を原点とし、 y 軸方向に振幅 d [m] で単振動する。また原点から音源までの距離を l [m] とし、音源方向（方位角）を θ [rad] とする。

音源方向の情報はドプラ効果による観測信号の周波数変調に含まれる。これを確かめるために、図-1 の測定系で観測される信号の瞬時周波数を求める。単振動を行う観測点の、時刻 t [s] での y 座標 y_p [m] および速度 v_p [m/s] は、以下のように表せる。

$$y_p(t) = d \sin(2\pi f_p t + \phi) \quad (1)$$

$$v_p(t) = 2\pi f_p d \cos(2\pi f_p t + \phi) \quad (2)$$

ただし、 f_p [Hz] は振り子の周波数、 ϕ [rad] は振り子の初期位相である。また、時刻 t での音源位置と観測点の距離 $r(t)$ [m] は三平方の定理によって

$$r(t) = ((l \cos \theta)^2 + (y_p(t) - l \sin \theta)^2)^{1/2} \quad (3)$$

となり、時刻 t の観測信号の位相部分 $p_o(t)$ [rad] は

$$p_o(t) = 2\pi f_b \cdot (t - r(t)/c) \quad (4)$$

となる。ただし、 c [m/s] は音速、 f_b [Hz] は観測信号の基本周波数である。時刻 t での観測信号の瞬時周波数 $f(t)$ [Hz] は、式 (4) を時間微分することで、

$$f^{(\theta, \phi)}(t) = 2\pi f_b \cdot \left(1 - \frac{(y_p(t) - l \sin \theta) v_p(t)}{c r(t)} \right) \quad (5)$$

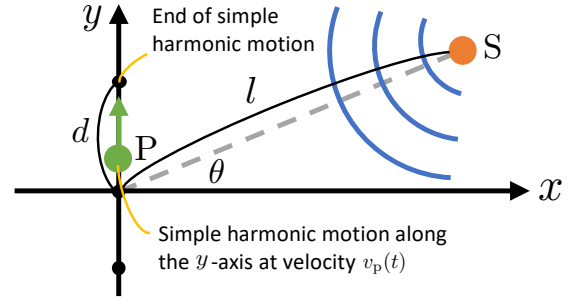


図-1 振り子型マイクロホンを用いた測定系の模式図。緑点 P が観測点、橙点 S が音源である。音源から放射された音波は青色のような球面波で伝達する。

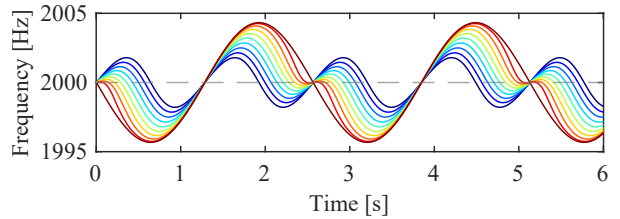


図-2 観測信号の瞬時周波数の例。パラメータ d, l, f_p, f_b は 4 章の実験のものに合わせており、破線で f_b を示している。 $\phi = 0$ として、 θ を 0 から $\pi/2$ までの $\pi/20$ 刻みで変えた場合の瞬時周波数を示しており、線が青い方が 0、線が赤い方が $\pi/2$ に近い。

のように求まる。

式 (5) を見ると、観測信号の瞬時周波数は方位角 θ の値に依存することがわかる。 θ が異なる場合の瞬時周波数の例を図-2 に示す。 f_b を中心として時間ごとに瞬時周波数が変化しており、 θ の値が 0 に近いとき（青）と $\pi/2$ に近いとき（赤）を比べると、周期や変化度合いが変わっていることが分かる。したがって、観測信号の瞬時周波数の情報が得られれば、それに基づいて音源の方位角を推定できると考えられる。

3 瞬時周波数に基づく音源方向推定

提案手法では、各時刻での瞬時周波数を求め、カーブフィッティングを行うことで方位角を推定する。このとき、時刻 t_n ($1 \leq n \leq N$) [s] で観測された瞬時周波数を $\tilde{f}_n$ [Hz] として、以下の最適化問題を解く。

$$\underset{\theta, \phi}{\text{minimize}} \quad \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N |f^{(\theta, \phi)}(t_n) - \tilde{f}_n|^2 \quad (6)$$

なお、初期位相 ϕ は時刻 t_1 での振り子の状態で定めることができるが、測定条件などによってこの状態が

*Single-channel sound source localization using pendulum microphone. By Yume TAKAHASHI, Natsuki AKAISHI and Kohei YATABE (Tokyo University of Agriculture and Technology).

表-1 各条件での θ と ϕ の推定結果および式 (6) の目的関数値. 真値が存在しない ϕ の項目以外は, 全探索と勾配法を比べたときに良い方のスコアを太字で示している.

		0°		30°		60°	
		θ	ϕ	θ	ϕ	θ	ϕ
全探索	推定	-1	168	30	-157	64	107
	絶対誤差	1	-	0	-	4	-
	目的関数値	291.38		298.89		66.57	
勾配法	推定	0.89	-11.8	29.9	-157.2	64.2	107.3
	絶対誤差	0.89	-	0.02	-	4.18	-
	目的関数値	291.30		298.84		66.41	

正確に分からない場合も考慮するために, 振り子の初期位相 ϕ も最適化変数としている.

4 実験

提案手法の有効性を実測による実験で検証した. 信号には $f_b = 2$ kHz の正弦波を使用し, サンプリング周波数は 44.1 kHz とした. STFT では, 46 ms のハン窓を 3 ms ずつシフトした. 音源とマイクロホンの振動中心 (原点) の距離は $l = 0.3$ m とした. マイクロホンは振幅 $d = 0.3$ m, 周波数 $f_p = 0.39$ Hz で振り子運動させ, 10 s 間録音した. このうち分析には, 外れ値を多く含む区間を除く約 6 s の信号を用いた. 方位角 θ は 0°, 30°, 60° の 3 条件で実験を行った. 以降, 見やすさのために θ と ϕ は度数表記とする.

式 (6) を解くために, 全探索と勾配法を用いた. 全探索は, 変数が θ と ϕ の 2 つのみであり, どちらも有限であるため容易に適用可能である. 実験では, θ の探索範囲を -90° から 90° の 1° 刻み, ϕ の探索範囲を -180° から 180° の 1° 刻みとした. 勾配法は, 式 (6) が微分可能であるために適用可能であり, 全探索よりも精度の高い推定値が得られる可能性がある. 勾配法のステップサイズを 10^{-3} とし, 反復回数を 100 回とした. また, 勾配法は初期値の影響を受けるため, 2 通りの初期値を試した. この初期値では, θ はランダムに設定した一方で, 振り子のトラッキングなどで大まかな位置の把握が可能な ϕ に関しては, 把握された ϕ に近い値と遠い値に設定した.

図-3 の上段に, 全探索における目的関数値と勾配法の推定値の推移を示す. 図-3 の下段に, 観測信号の瞬時周波数と勾配法によって推定された瞬時周波数を示す. また, 結果を表-1 に示す. 各方位角の条件で, 全探索と勾配法の両方で θ を精度よく推定できた. 実際に, 図-3 の下段で, 式 (5) と勾配法による推定値で与えられる瞬時周波数が, 瞬時周波数の変位が小さい範囲において観測値と近くなったことが分かる. また, 勾配法では全探索より目的関数値が小さい解が得られた. この結果から, 全探索よりも精度の高い解を低い計算コストで推定できると考えられる.

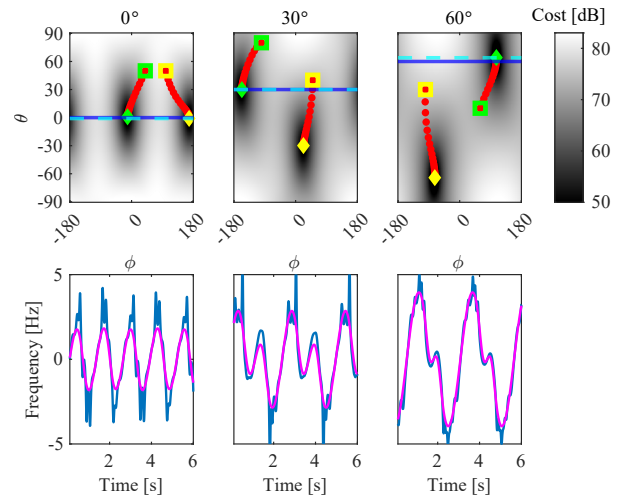


図-3 各条件での θ と ϕ を式 (6) に代入して得られる目的関数値 (上段) と, 観測信号の瞬時周波数と勾配法によって推定された瞬時周波数 (下段). 上段では, 全探索における式 (6) の目的関数値を対数表示しており, 暗いほど値が小さい. 真の θ を青の実線, 全探索で推定された θ を水色の破線で示した. また, 勾配法で推定した際の θ と ϕ の初期値を四角, 最終反復での推定値をひし形で表示し, 更新の過程での推定値を赤で示した. それぞれの条件で, 初期条件の ϕ が実測の ϕ と近い場合を緑, 遠い場合を黄で示した. 下段では, 観測信号の瞬時周波数を青, 勾配法によって得られた推定値を式 (5) に代入して与えられる瞬時周波数をマゼンタで示した.

提案手法の性質について詳しく議論する. 表-1 において, 音源の方位角が大きくなるほど絶対誤差が大きくなった. この結果には, 図-2 で示された方位角が大きい (赤色) ほど瞬時周波数の変化の違いが小さくなり, 方位角の特徴を推定しづらくなる性質が現れていると考えられる. また, 全探索の 0° の場合や勾配法の初期値が悪い場合 (図-3 黄色印) において, θ が真の値の負値で推定される場合があった. これは, ϕ が未知の場合, 提案するモデルでは $-\theta$ と θ を区別できないことが原因である. このことは図-3 上段の目的関数値の 0° に関する対称性にも現れている. 精度改善のためには, ϕ の初期値の推定方法, 目的関数, 測定系の工夫が必要だと考えられる.

5 むすび

本稿では, 振り子型マイクロホンを用いて, 観測信号の瞬時周波数に基づき音源の方位角を推定する手法を提案した. 実測によって, 0° から 90° の範囲では方位角をある程度の精度で推定できることが分かった. 今後は, 測定系を工夫しつつ, 音声信号の定位への適用可能性を検証する.

参考文献

- [1] Y. Hioka and M. Kishida, "Direction of arrival estimation of harmonic signal using single moving sensor," *IEEE Sens. Array Multichannel Signal Process. Workshop*, pp. 1–4 (2014).