

可聴音を用いた周波数自動選択に基づく距離推定法の検討

高尾麻衣子¹, 干場功太郎¹, 中臺一博^{1,2}

1 東京工業大学 2 (株) ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン

1 はじめに

音響信号を用いた距離計測は、低侵襲かつ比較的安価で構成できるため、古くからさまざまな研究が行われている [1–3]。中でも CSP 法 (Cross-power Spectrum Phase Analysis) [4] は、ノイズロバスト性が高い手法としてしばしば用いられる。また、われわれは、居住環境で可聴音を用いた距離推定を想定し、尤度関数重みを導入した WELL (WEighted LikeLihood) 法 [5] を提案した。しかし、これらの手法を用いて高精度に計測を行うためには、さまざまな状況に応じた、最適な周波数重みフィルタを自動で算出する必要がある。本稿では、得られた受信信号と参照信号から、最適な周波数重みフィルタを自動生成する手法を提案する。本手法では、CSP 法や WELL 法に限らず、さまざまな手法に対し汎用的に使用することが可能である。シミュレーションにより評価実験を行い、本手法の有用性を確認した。

2 周波数重みフィルタの自動生成

提案する周波数フィルタの自動生成について述べる。ここでは、送波器から信号を送波した際の、計測対象からの反射波を用いて距離推定を行うことを考える。受波器にて得られる受信信号を $s(t)$ 、CSP 法や WELL 法などで用いられる参照信号を $s_{ref}(t)$ とし、それらをフーリエ変換したものを $S(\omega)$ 、 $S_{ref}(\omega)$ とする。参照信号には、送波器への入力信号や、別の受波器にて得られた受信信号など、雑音成分が少ない信号が用いられる。 $S(\omega)$ 、 $S_{ref}(\omega)$ の振幅成分 $|S(\omega)|$ 、 $|S_{ref}(\omega)|$ を、それぞれ面積で正規化したものを $|S(\omega)|'$ 、 $|S_{ref}(\omega)|'$ とする。受信信号と比べ参照信号は SNR (Signal-to-Noise Ratio) が高いため、 $|S_{ref}(\omega)|'$ と比べ $|S(\omega)|'$ では信号成分が小さく、雑音成分が大きくなる。そこで、周波数重みフィルタ $W(\omega)$ を以下のように算出する。

$$W(\omega) = \begin{cases} 1 & \text{if } |S(\omega)|' \leq |S_{ref}(\omega)|' \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

このようなフィルタを導入することにより、信号成分である可能性の高い周波数成分のみを用いて高精度な距離推定を行えることが期待できる。

3 評価実験

シミュレーションを用いた評価実験を行い、本手法の有用性について考察を行う。

3.1 実験状況

実験状況について述べる。本実験では、Fig. 1 に示されるように設置された送波器、受波器を用い、計測対象である壁までの距離を推定することを考える。はじめに、送波器から TSP (Time Stretched Pulse) 信号を用

Assessment of distance estimation using audible sound based on spectral autoselection

Maiko Takao¹, Kotaro Hoshiba¹, Kazuhiro Nakadai^{1,2}

1 Tokyo Institute of Technology 2 Honda Research Institute Japan Co., Ltd.

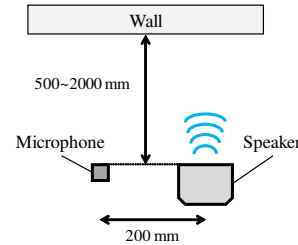


Fig. 1 Measurement configuration.

Table 1 Frequency range.

R1	1–2 kHz
R2	1–3 kHz
R3	1–4 kHz
R4	1–5 kHz
R5	1–6 kHz
R6	1–7 kHz
R7	1–8 kHz
R8	0–8 kHz

Table 2 Distance between transducers and the target.

D1	500 mm
D2	1000 mm
D3	1500 mm
D4	2000 mm

い、インパルス応答を計測する。送波器には GENELEC 8010APM, 受波器には MEMS マイクロホンを使用し、それらをシステムインフロンティア社製の多チャンネル音響信号収録装置 RASP-24* に接続し、同期収録を行う。音響信号は、サンプリング周波数 16 kHz, 量子化ビット数 24bit で収録される。得られたインパルス応答に任意の信号を畳み込むことで、送信信号としてさまざまな信号を用いた際の受信信号を計算機上で再現する。得られた受信信号と、畳み込んだ入力信号を参照信号として用い、CSP 法にて処理を行う。CSP 法により、送波器から受波器への直接波と、壁からの反射波それぞれの到達時間を算出することで、送受波器・壁間の距離を推定する。以下のように、通常の CSP 法の結果 r と、提案手法により求めた周波数重みフィルタ W を適用した結果 r_W をそれぞれ算出し、比較を行う。

$$r(t) = \text{FFT}^{-1} \left(\frac{S(\omega) * S_{ref}(\omega)}{|S(\omega)| |S_{ref}(\omega)|} \right) \quad (2)$$

$$r_W(t) = \text{FFT}^{-1} \left(\frac{S(\omega) * S_{ref}(\omega)}{|S(\omega)| |S_{ref}(\omega)|} \cdot W(\omega) \right) \quad (3)$$

CSP 法では、推定精度は SNR によらず、受信信号に含まれる目的信号の帯域幅と雑音の帯域幅によって決まるため、目的信号の帯域幅を Table 1 のように変化させ、目的信号以外の帯域に雑音を加えた。また、送受波器と計測対象の距離を Table 2 のように変化させ、計測精度の比較を行った。送信信号と雑音には、相関関係のないホワイトノイズを使用した。

3.2 実験結果

実験結果について述べる。Fig. 2 に、距離が D2 の場合の結果を示す。(a) は R8, (b) は R2 を帯域幅として使用した場合の結果である。横軸が信号の到達時間であり、縦軸が相関値を表す。どちらの場合も、4 ms 付近

*http://www.sifi.co.jp/system/modules/pico2/index.php?content_id=4

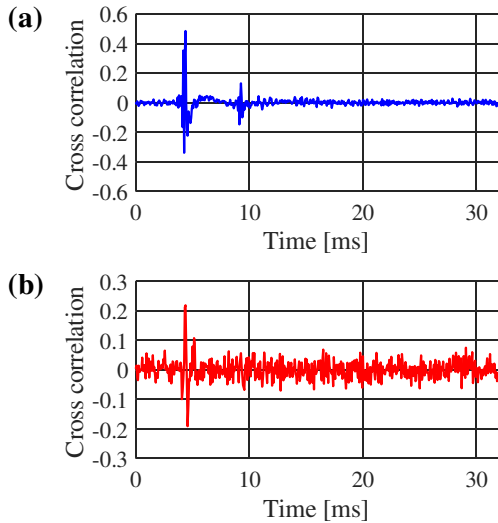


Fig. 2 Result of CSP method. (a) D2 and R8, (b) D2 and R2.

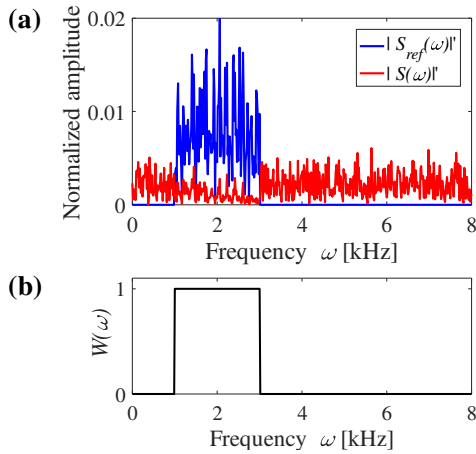


Fig. 3 (a) $|S(\omega)|'$ and $|S_{ref}(\omega)|'$, (b) $W(\omega)$.

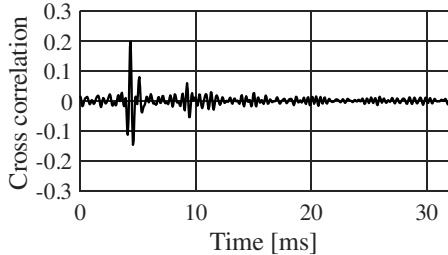


Fig. 4 Result of CSP method with proposed filter (D2 and R2).

で直接波が到達していることがわかる。また、Fig. 2(a)のように目的信号の帯域幅が十分に大きい場合、9 ms 付近に反射波によるピークを確認することができるが、Fig. 2(b)のように目的信号の帯域幅が小さい場合、ノイズに埋もれてしまい、反射波のピークを確認することができない。そこで、Eq. (1)に従い、周波数重みフィルタを算出した。Fig. 3(a)に $|S_{ref}(\omega)|'$ と $|S(\omega)|'$ 、Fig. 3(b)に Fig. 3(a)から算出した $W(\omega)$ を示す。提案手法により、送信信号の帯域である 1–3 kHz のみを使用するフィルタが算出できていることがわかる。算出した $W(\omega)$ を Fig. 2(b)に適用した結果を Fig. 4 に示す。目的信号の帯域以外に存在した雑音が抑圧され、9 ms 付近に反射波によるピークを確認することができた。

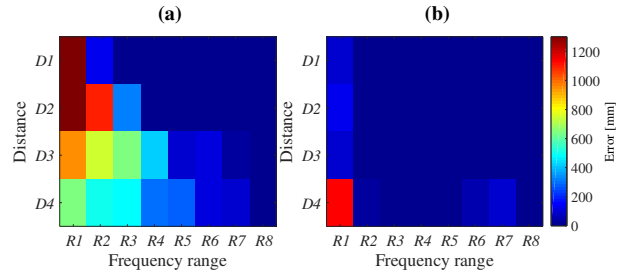


Fig. 5 Error between true and estimated distance. (a) CSP method, (b) CSP method with proposed filter.

3.3 考察

前節の試行を各条件につき 100 回行い、真値と推定値との誤差の平均を示したものが Fig. 5 である。横軸が帯域幅、縦軸が距離を表す。(a)が通常の CSP 法の結果、(b)が提案手法を適用した結果である。通常の CSP 法では、帯域幅が狭くなるにつれ、また距離が遠くなるにつれ誤差が大きくなり、最大で 1000 mm を超えていることがわかる。これは、雑音の影響が大きくなることに加え、直接波に対する反射波の振幅が小さくなるためと考えられる。提案手法を適用した結果、ほぼすべての条件において精度が向上し、1 条件を除けば誤差が 150 mm 以下となった。以上の結果から、提案手法の有用性が確認できた。本稿では CSP 法に適用し評価を行ったが、受信信号と参照信号を用いる手法であればどのような手法にでも適用することができるので、WELL 法における精度向上も期待できる。しかし、実際の実環境では、入力信号と受信信号の目的信号成分の周波数特性が大きく異なった場合、精度が劣化する可能性がある。また、今回は単純な 0/1 のハードマスクとして重みを定義したが、これを発展させてソフトマスクにすればより性能の向上が望めよう。

4 まとめ

本稿では、音響信号を用いた高精度な距離推定手法の実現に向け、さまざまな状況に応じた、最適な周波数重みフィルタの自動算出方法を提案した。本手法では、受信信号と参照信号の比較により、目的信号である可能性の高い周波数のみを使用するような周波数重みフィルタを算出することで、高精度な距離推定を実現した。シミュレーションによる評価実験を行い、提案手法の有用性を確認することができた。今後は、シミュレーションではなく実データを用いて有効性の評価を行っていききたい。

謝辞 本研究は、科研費 16H02884, 16K00294, 17K00365 および、JST ImpACT タフロボティクスチャレンジの助成を受けた。

参考文献

- [1] 松野他, “2 球体の超音波 (50kHz) 反射パルス波形情報利用のための実験に基づく検討”, 日本水産学会誌, Vol. 56, No. 8, pp. 1219–1224, 1990.
- [2] 松尾他, “超音波を利用した精密音響測距装置の開発”, 東京大学地震研究所技術研究報告, 東京大学地震研究所, No. 5, pp.65–73, 1999.
- [3] S. Hanabusa *et al.*, “Distance Estimation Based on Interference of Audible Linear Chirp Signal” IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol. 129, No. 11, pp. 2027–2033, 2009.
- [4] M Omologo *et al.*, “Use of the crosspower-spectrum phase in acoustic event location”, IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, Vol. 5, No. 3, pp. 288–292, 1997.
- [5] 高尾他, “可聴音を用いた周波数選択に基づく距離推定法の実環境利用に向けた評価”, 第 49 回 人工知能学会 AI チャレンジ研究会, pp.30–35, 2017.