

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560459

研究課題名(和文) 可変くし形フィルタを用いた適応ハウリング抑圧

研究課題名(英文) An adaptive comb filter and its application to howling canceller

研究代表者

飯國 洋二 (Iiguni, Youji)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：80168054

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：ノッチゲインと除去帯域幅を決める二つの設定係数を、それぞれ線形位相FIRフィルタに置き換えることで、ノッチゲインと除去帯域幅を周波数ごとに任意に設定する方法を導出した。ノッチゲインを自動設定するためにノッチゲイン用FIRフィルタを自動更新するアルゴリズムを導出した。ノッチフィルタの出力に線形予測器を縦続接続し、その出力の相関が小さくなるように除去帯域幅係数を自動更新するアルゴリズムを導出した。そして、実験を行い性能を評価した。

研究成果の概要(英文)：In the conventional comb filter, notch gain and bandwidth are determined by two setting parameters. A comb filter with flexible notch gain and bandwidth is designed by replacing the setting parameters by two linear phase FIR filters. The FIR filters are designed by taking the inverse Fourier transform of a desired notch bandwidth and a desired notch gain. We put an adaptive line enhancer at the filter output so that a correlated signal is extracted from its input signal. The appropriate notch gain and bandwidth are adaptively adjusted so that the adaptive line enhancer removes the correlation signals from the input signals. Experiential results show the effectiveness of the proposed method.

研究分野：信号解析

キーワード：くし型フィルタ 周期性雑音 ノッチゲイン 除去周波数 除去帯域幅

1. 研究開始当初の背景

くし型フィルタは、周波数軸上で等間隔に零点を持つフィルタであり、雑音の周波数とくし型フィルタの零点の周波数(ノッチ周波数)を一致させることで、周期性雑音を除去することができる。従来のくし型フィルタでは、ノッチ周波数での除去量を定めるノッチゲインと、ノッチ周波数でパワーが半分になる除去帯域幅が、周波数によらず一定であった。ノッチ周波数が雑音の周波数に完全に一致する場合は、除去帯域幅を狭くすればよい。しかし、実際には周波数がゆらぐため、帯域幅が狭いと誤差により除去性能が劣化する。さらに、所望信号が雑音と同じ周波数成分を共有する場合は、ノッチ周波数でのゲインを一定にすると所望信号が劣化する。従って、ゲインと除去帯域幅が柔軟に設定できれば、性能が向上すると考えられる。

ハウリングは単一の周波数成分が励起されて生じる発振現象であり、基本波と高調波からなる調波構造と見なせるので、くし形フィルタによりハウリング基本周波数とその高調波成分が同時に除去できる。音声や楽音も基本波と高調波からなる典型的な調波構造を持つので、調波構造を打ち消すようにくし形フィルタを用いれば音高が推定できる。そして、ノッチゲインと除去帯域幅をそれぞれノッチ周波数ごとに任意に調整できれば、推定精度が向上する。

2. 研究の目的

- (1) くし型フィルタのノッチゲインと除去帯域幅をノッチ周波数ごとに任意に調整できるくし型フィルタを設計する。
- (2) 雑音信号の周波数ゆらぎと振幅ゆらぎに対応するために、ノッチゲインと除去帯域幅を自動的に調整するくし型フィルタとその調整アルゴリズムを導出する。
- (3) 基本波と高調波からなる調波構造を持つ楽音について音高が精度よく推定できることを確かめる。

3. 研究の方法

- (1) 従来は固定だったノッチゲイン設定係数を、所望の特性を持つ線形位相 FIR フィルタに置き換えることで、周波数に応じてノッチゲインを任意に設定する方法を導出する。次に、従来は固定だった除去帯域幅設定係数を、所望の特性を持つ線形位相 FIR フィルタに置き換えることで、周波数に応じて除去帯域幅を任意に設定する方法を導出する。そして、二つの線形位相 FIR フィルタを独立に設定できるようにする。
- (2) くし型フィルタの出力に含まれる相関成分を適応推定するために、その出力パワーを最小化するようにゲイン設定用の線形位相 FIR フィルタを更新する。これにより、雑音振幅の変動に対応できるようにする。くし型フィルタの出力に線形予測器を縦続接続し、その出力の相関が小さくなるように除去帯

域幅設定係数を更新する。これにより、雑音周波数の変動に対応できるようにする。そして、それぞれの更新アルゴリズムを融合する。

4. 研究成果

(1) 従来のくし型フィルタの伝達関数は、

$$C_f(z) = 1 - \frac{1-b}{2} \cdot \frac{1+A(z)z^{-(N-L)}}{1-bA(z)z^{-(N-L)}}(1-g)$$

で与えられる。ただし、 $b(-1 < b < 1)$ は除去帯域幅設定定数、 $g(0 \leq g \leq 1)$ はゲイン設定係数、 N は整数遅延、 $A(z)$ は小数遅延 d を持つ次数 L の全域通過フィルタである。そして、ノッチ周波数 ω_m 、除去帯域幅 W_m 、ノッチゲイン g はそれぞれ次のように特徴づけられる。

$$\omega_m = \frac{2\pi m}{N+d}, \quad (m = 1, 2, \dots)$$

$$W_m = \frac{2}{N} \cos^{-1} \left(\frac{2b}{1+b^2} \right)$$

$$g = |C_f(e^{j\omega_m})|$$

除去帯域幅設定係数 b を伝達関数 $B(z)$ をもつ線形位相 FIR フィルタに置き換え、 $B(z)$ を所望のフィルタに設計することで、任意の除去帯域幅を持つくし形フィルタを設計した。伝達関数とデータの流れを以下に示す。

$$C_{fb}(z) = (1 - Q_{fb}(z)(1-g))z^{-M}$$

$$Q_{fb}(z) = \frac{1-B(z)}{2} \cdot \frac{1+A(z)z^{-(N-L)}}{1-B(z)A(z)z^{-(N-L)}}$$

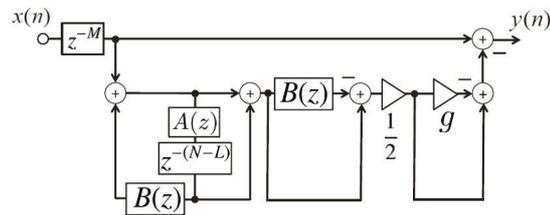


図1 除去帯域幅を指定できるくし型フィルタ

ゲイン設定係数 g を伝達関数 $G(z)$ をもつ線形位相 FIR フィルタに置き換え、 $G(z)$ を所望のフィルタに設計することで、任意のゲインを持つくし形フィルタを設計した。伝達関数とデータの流れを以下に示す。

$$C_g(z) = (1 - Q_g(z)(1-G(z)))z^{-P}$$

$$Q_g(z) = \frac{1-b}{2} \cdot \frac{1+z^{-N}}{1-bz^{-N}}$$

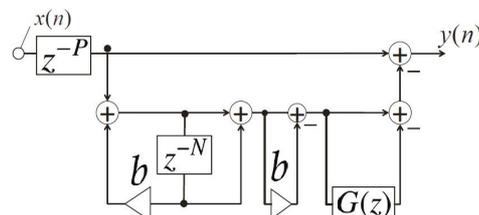


図2 ゲインを指定できるくし型フィルタ

上で述べた二つを融合させることにより除去帯域幅とノッチゲインを任意に指定できるくし型フィルタを設計した。ただし、因果性を保証するために、 $M+L \leq N$ でなければならないことを示した。伝達関数とデータの流れを次に示す。

$$C_{fbg}(z) = (1 - Q_{fbg}(z)(1 - G(z)))z^{-(M+P)}$$

$$Q_{fbg}(z) = \frac{1 - B(z)}{2} \cdot \frac{1 + A(z)z^{-(N-L)}}{1 - B(z)A(z)z^{-(N-L)}}$$

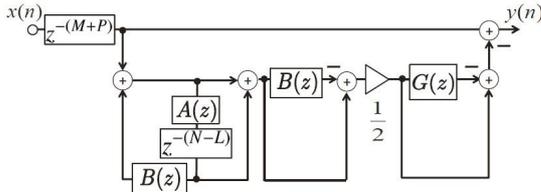


図 3 ゲインと除去帯域幅を指定できるくし型フィルタ

ノッチ周波数を $\omega = 0.11$, 所望の除去帯域幅とゲインを以下に設定した。

$$B(e^{j\omega}) = 1 - 2\text{sgn}(\omega) \sin \omega$$

$$G(\omega) = 0.5 - \omega/2\pi$$

これは除去帯域幅を以下に設定したことに相当する。

$$W(\omega) = \frac{2}{N} \cos^{-1} \left(\frac{1 - 2 \sin \omega}{2 \sin^2 \omega - 2 \sin \omega + 1} \right)$$

そして、FIR フィルタで $N=12$ とすれば、所望の除去帯域幅とゲインを十分な精度で近似できることを確認した。 $C_{fbg}(z)$ の周波数応答を図 4 に示す。所望の応答が得られていることが確認できる。

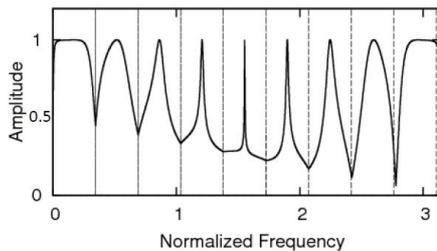


図 4 $C_{fbg}(z)$ の周波数応答

(2) 除去周波数と除去量は時間とともに変化し、しかもその値は未知である。そこで、それぞれの変化に対応するために、ノッチゲインと除去帯域幅を自動調整する。あらかじめ設計しておいた $G(z)$ が真値と乖離してくると、フィルタ出力の相関が大きくなる。そこで、出力が相関を持たないように、フィルタ出力のパワーを最小化するように次式で $G(z)$ を時間更新する。ただし、所望信号の自己相関の長さを l ($l \leq P$) として、相関のある入力に対応する係数は 0 としている。また、安定性の条件から $0 < \mu < 2$ である。

$$\gamma_i(n+1) = \begin{cases} \gamma_i(n) + \mu \frac{u(n-i)y(n)}{\sum_{\ell} u(n-\ell)} & (I+1 \leq i \leq P) \\ \delta_i & (-I \leq i < I+1) \\ \gamma_{-i}(n+1) & (-P \leq i < -I) \end{cases}$$

除去帯域幅設定値 b が所望の値と乖離すると出力 y の相関が大きくなる。そこで、出力が相関を持たないようにするために、フィルタ出力のパワーを最小化、つまりくし型フィルタ出力の相関成分 $s(n)$ のパワーを最小化するように次式で b を更新する。ただし、安定性条件 $|b| < 1$ を満たすように更新し、安定条件を逸脱する場合は更新を停止する。

$$b(n+1) = b(n) + \mu \frac{t(n-N)s(n)}{\sum_{\ell} t(n-N-\ell)}$$

ノッチゲインと除去帯域幅を自動調整するくし型フィルタのデータの流れ図を以下に示す。

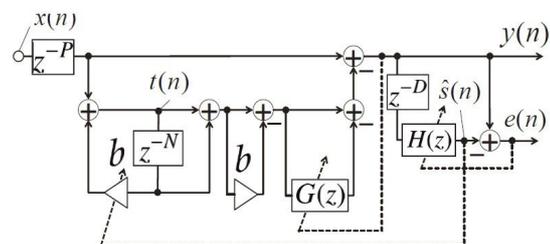


図 5 ノッチゲインと除去帯域幅を自動調整するくし型フィルタ

(3) 所望信号を白色雑音、周期雑音の基本周波数 $\omega = \pi/10$, $N=P=20$, $l=0$, $d=1$ として実験を行った。図 6 に観測信号のパワースペクトルを示す。図 7 に適応線形予測 (M1), 除去帯域幅とゲインを指定したくし型フィルタ (M2), それらを適応的に設定したくし型フィルタ (M3) の結果を示す。この図より M3 が優れていることがわかる。周期雑音に摂動を与えた結果を図 8 に示す。同様に、M3 が優れていることがわかる。DMOS を評価したところ、M2 が 3.8, M3 が 4.8 であった。

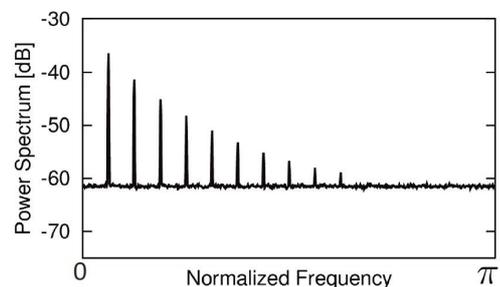


図 6 観測信号のパワースペクトル

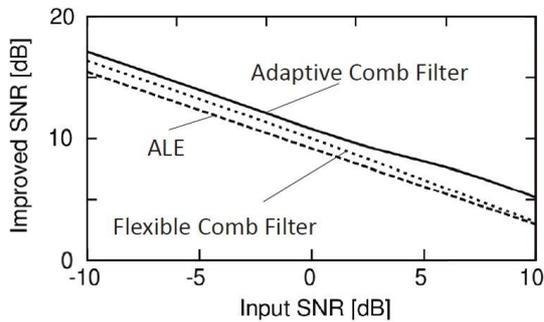


図7 ISNRの比較(摂動なし)

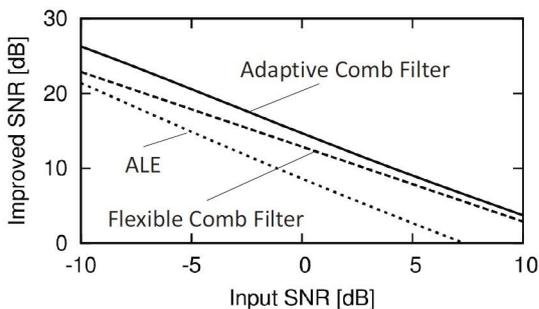


図8 ISNRの比較(摂動あり)

ハウリングは、基本周波数と高調波のうち一つの周波数成分が励起されるのに対し、楽音は基本周波数と高調波ともに含んでおり、くし形フィルタの応用例としてより適当である。そこで、バイオリンを対象として、除去帯域幅を周波数に比例するように設計し音高を推定した。結果を図9に示す。帯域幅を任意に設定する効果が確かめられた。

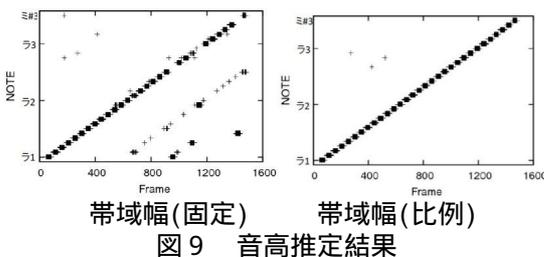


図9 音高推定結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

中谷一輝, 藤本太平, 川村新, 飯國洋二, 逆ノッチフィルタを用いた音声強調による能動騒音制御, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol.135, pp.244-253, 2015, DOI: 10.1541/ieejeiss.135.244.

S.Kohmura, A.Kawamura, and Y.Iiguni, A Zero Phase Noise Reduction Method with Damped Oscillation Estimator, IEICE Trans. Fundamentals, 査読有, Vol.E97-A, pp.2033-2042, 2014,

DOI: 10.1587/transfun.E97.A.2033.

Y.Sugiura, A.Kawamura, and Y.Iiguni, A Comb Filter with Adaptive Notch Gain and Bandwidth, IEICE Trans. Fundamentals, 査読有, Vol.E96-A, pp.790-795, 2013,

DOI: 10.1587/transfun.E96.A.790.

Y.Sugiura, A.Kawamura, and Y.Iiguni, Performance Analysis of an Inverse Notch Filter and Its Application to F0 Estimation, Scientific Research, Circuits and Systems, 査読有, Vol.4, pp.112-117, 2013,

DOI: 10.4236/cs.2013.41017.

A.Sogami, Y.Sugiura, A.Kawamura, and Y.Iiguni, An Adaptive Howling Canceller Using 2-Tap Linear Predictor, Scientific Research, Circuits and Systems, 査読有, Vol.4, pp.9-13, 2013, DOI: 10.4236/cs.2013.41002.

[学会発表](計 5 件)

K.Matsumoto, N.Hayasaka, and Y.Iiguni, Noise Robust Speaker Identification by Dividing MFCC, 6th Int. Symp.on Communications, Control and Signal Processng (ISCCSP), Paper ID 1569865761, 2014.

Y.Sugiura, A.Kawamura, and Y.Iiguni, A Comb Filter with Adaptive Notch Gain for Periodic Noise Reduction, Proc. of APSIPA 2012, paper no.37, 2012.

S.Kohmura, A.Kawamura, and Y.Iiguni, An Efficient Zero Phase Noise Reduction Method for Impact Noise with Damped Oscillation, Proc. of ICASSP 2013, AASP-P11.10, pp.892-895, 2013.

6. 研究組織

(1)研究代表者

飯國 洋二 (IIGUNI, Youji)

研究者番号: 80168054

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし