

## ゼロクロスに基づく実時間ハウリング検出

### Real-Time Howling Detection Based on the ZeroCross

○松塚 春男 (岩手大・院), 西山 清 (岩手大)

○Haruo Matsuzuka, Kiyoshi Nishiyama

岩手大学, Iwate University

キーワード : ハウリング (howling), 検出 (detection), ゼロクロス (zero cross)

連絡先 : 〒020-8551 盛岡市上田4-3-5 岩手大学 工学部 情報システム工学科 西山研究室  
西山清, Tel.: (019)621-6475, Fax.: (019)621-6475, E-mail: nishiyama@cis.iwate-u.ac.jp

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

通信や制御の分野においてシステム同定が広く用いられている。特に、時変システムの同定問題はモバイル通信の普及と共にますます重要となっている。

デジタルフィルタは周波数で信号の成分を分別処理するのに適しているが、その用途はかなり限定される。ウィナーフィルタは制約条件が強く、現在では画像処理の一部で利用されるに留まっている。適応フィルタは、最近のDSP(digital signal processor)の普及に伴い実時間処理が可能となり、システム同定やキャンセリングなど広い範囲で実際に適用されている。しかし、収束性などに難点があり、様々な工夫がなされている。

カルマンフィルタは、宇宙工学、制御工学、通信工学、情報工学に留まらず、土木工学、社会・経済学、統計学、などの多くの分野に応用されてきた。このようにカルマンフィルタがその適用範囲を広げ、発展してきた理由は、状態変数と呼ばれ

る概念を取り入れ、実時間上で取り扱った点にある。現在、カルマンフィルタの理論は単なるフィルタの範疇を超え、汎用性をもった推定理論の1つとなっている。

最後に、 $H_{\infty}$ フィルタであるが、これは新しい理論であり、まだ応用例が少ないが、カルマンフィルタと比べて雑音の特性やモデル誤差などの外乱が推定精度へ及ぼす影響が少なく、すなわち外乱にロバストであることが知られている。また、最終的に得られたアルゴリズムはカルマンフィルタと大変に類似したものとなり、ある極限においてカルマンフィルタのアルゴリズムと完全に一致し、また $H_{\infty}$ フィルタの特殊な場合が適応フィルタにおけるLMSアルゴリズムと完全に一致する。このように $H_{\infty}$ フィルタの枠組みからカルマンフィルタや適応フィルタを統一的にとらえることが可能である。

拡声装置使用時に発生するハウリングは、聴衆にとって不快なものであり、音響技術者はその発生を防ぐために、運用中絶えず注意を払わなければならない。ハウリングは拡声音がマイクロホン

へ正帰還することによって生じるものであり、スピーカやマイクロホンの指向性の制御、グラフィックイコライザによる帰還系の振幅周波数特性の平坦化により、発生をある程度は軽減できる。また、運用前にあらかじめ、あるいは運用中にハウリングを検出し、その周波数の利得を小さくするノッチフィルタを自動的に挿入する装置も実用されている。更に音場の振幅周波数特性の近接した山・谷を平坦化するために、拡声音を一定の周波数だけ偏奇したり、周波数揺らぎを与える方法や、音声の拡声を対象として、ハウリングによって生じる卓越周波数成分を取り除くためにPARCOR分析・合成する方法も提案されている。

## 1.2 研究の目的

スピーカからマイクロホンへ帰還される信号を帰還系と同一システムによって得て、マイクロホンの出力信号から減算すれば、ハウリングを根本的に発生させないようにすることができる。系が時不変であれば、帰還系のインパルス応答をあらかじめ測定して用いることも可能であるが、一般には時変であり、運用中に逐次、帰還系のシステム同定を行わなければならない。運用中にもトレーニング信号を流す方法も提案されている。また、帰還音の推定に対して障害となる直接音を除去するために、話者方向を既知として話者方向の感度を零にするアレーマイクロホンを用いる例もある。

本論文では、ゼロクロスに基づくハウリング検出法を提案し、シミュレーションによってハウリング検出の性能を評価する。

## 2. ハウリング現象とそのメカニズム

ハウリングはマイク～アンプ～スピーカ間でループ状態ができたときに起こる現象である。マ

イクとスピーカが同じ空間にあり、スピーカからの出力が十分に大きい場合、マイクをスピーカに近づけるとスピーカから出力された信号がマイクへ帰還し、振幅の大きな信号が得られる。

ハウリング状態では、マイクに対して話しかけた音声の周波数成分全域がそのまま大きくなっていくのではなく、ある一部の周波数成分が大きくなっている。このハウリングを起こす周波数成分は空間によって異なり、また同じ空間でもその状態に応じて変化することがある。

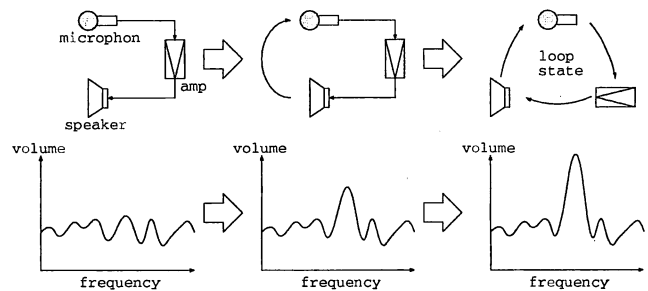


Fig. 1 ハウリングの原理

## 3. ゼロクロスに基づくハウリング検出法

本論文は、ゼロクロスに基づくハウリングの検出のための新しい方法を提案する。はじめに入力信号のゼロクロス間の距離を測定する。このゼロクロス間の距離の分散値が、ある閾値を下回れば、ハウリングとして検出される。

ゼロクロスとは、音声信号の振幅の変位の符号が反転することである(図2)。現在の時刻の振幅の変位の符号に対して1サンプル前の時刻の振幅の変位の符号が異なるとき、ゼロクロスが起きていると言う。

ゼロクロス測定 $Z_k$ は

$$Z_k = \frac{|(\text{sgn}\{\tilde{y}_k\} - \text{sgn}\{\tilde{y}_{k-1}\})|}{2} \quad (1)$$

のように算出される。ここで、符号関数 $\text{sgn}\{\cdot\}$ は

$$\text{sgn}\{\tilde{y}_k\} = \begin{cases} +1 & \tilde{y}_k \geq 0 \\ -1 & \tilde{y}_k < 0 \end{cases} \quad (2)$$

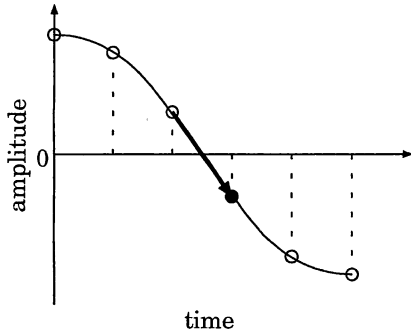


Fig. 2 ゼロクロス

で定義される。符号の変化が $\tilde{y}_k$ と $\tilde{y}_{k-1}$ の間で生じたならば $Z_k = 1$ となり、そうでなければ $Z_k = 0$ となる。ゼロクロスが生じたとき、ベクトル $t_Z(i)$ ,  $i = [0 \dots M_k - 1]$ に格納されていたサンプルインデックスは1つ後ろにシフトされ、 $t_Z(0)$ に時刻 $k$ が格納される(図3)。ベクトル $t_Z(i)$ は、先入れ先出し法(FIFO方式)で連続的に更新される。

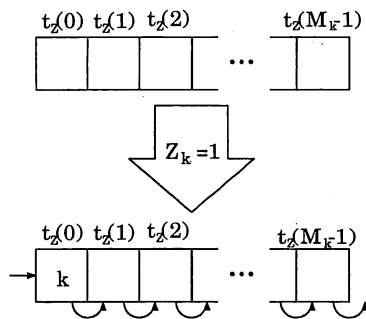
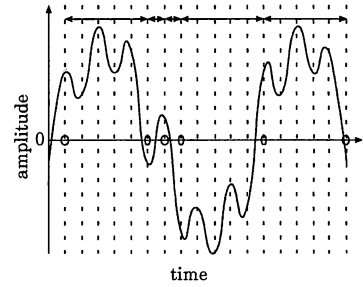
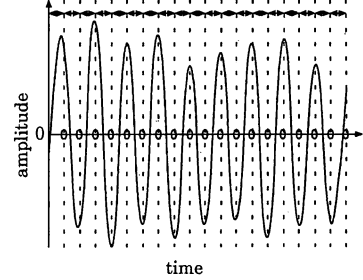


Fig. 3 ベクトル $t_Z(i)$ ,  $i = [0 \dots M_k - 1]$

図4は音声信号とハウリング信号のゼロクロス測定と $M_k = 2$ のときのゼロクロスのサンプル間の距離である。図4より、音声信号ではゼロクロスが起こる時間間隔にばらつきがあるのに対し、ハウリング信号ではゼロクロスが起こる時間間隔が近いことがわかる。ハウリングはある一定の周波数において発生し、その振幅は他の周波数成分に対して支配的であるため、ゼロクロスが起こる時間間隔が近くなる。ゼロクロス間の距離の分散値を算出すると、音声信号に対してハウリング信号



(a)ハウリングでない音声信号



(b)ハウリング信号

Fig. 4 ゼロクロス測定( $M_k = 2$ のときの例)

の分散値が低くなるので、音声信号とハウリング信号を分離することができる。

$\tilde{y}_k$ のゼロクロスのサンプル間の距離の算出には以下の式を用いる。

$$D_k = t_Z(0) - t_Z(M_k - 1) \quad (3)$$

ここで、 $M_k$ はゼロクロス間の距離を算出するのに制御するために用いられる。式(3)は一定の分散のベクトルに帰着する。 $D_k$ の低分散はある音声成分が存在することを示している。

もし、 $D_k$ をエルゴードランダムデータとして扱うならば、ゼロクロス間のサンプル距離の分散 $\sigma_{D|k}^2$ の推定値は

$$\hat{\sigma}_{D|k}^2 = \hat{\mu}_{D|k}^2 - \hat{\psi}_{D|k}^2 \quad (4)$$

によって与えられる。ここで、 $\hat{\mu}_{D|k}^2$ ,  $\hat{\psi}_{D|k}$ はそれぞれ二乗平均推定値と平均推定値であり、以下のよう

$$\hat{\mu}_{D|k}^2 = \lambda_Z \hat{\mu}_{D|k-1}^2 + (1 - \lambda_Z) D_k^2 \quad (5)$$

$$\hat{\psi}_{D|k} = \lambda_Z \hat{\psi}_{D|k-1} + (1 - \lambda_Z) D_k \quad (6)$$

ここで、 $\lambda_z$ は時定数であり、 $0 \leq \lambda_z \leq 1$ である。

与えられた分散の推定値が閾値を下回るとき、ハウリングとして検出される。

$$H_z D(k) = \begin{cases} 1 & \hat{\sigma}_{D|k}^2 \leq \alpha \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

図5は、ゼロクロスに基づくハウリング検出アルゴリズムのフローチャートである。

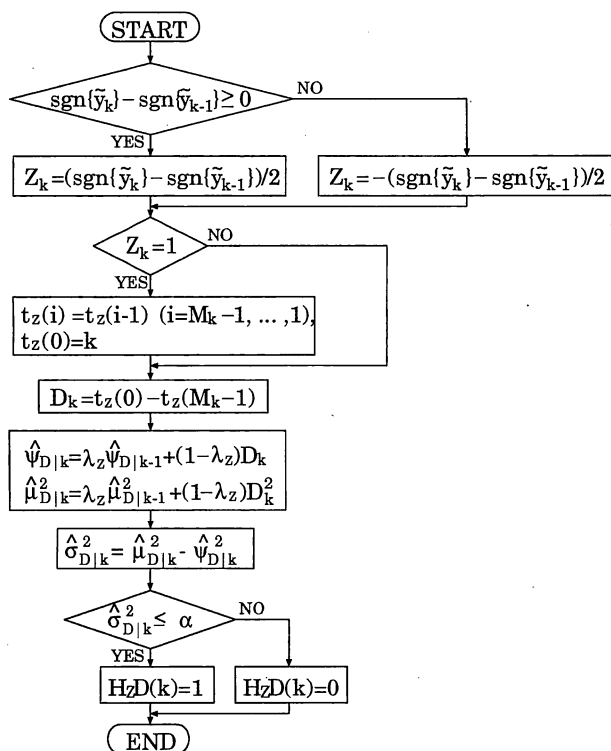


Fig. 5 ゼロクロスに基づくハウリング検出アルゴリズムのフローチャート

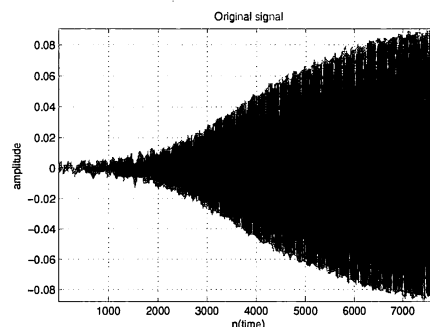
( $\alpha = 3.2$ ,  $M_k = 80$ ,  $\lambda_z = 0.99$ )

## 4. シミュレーション

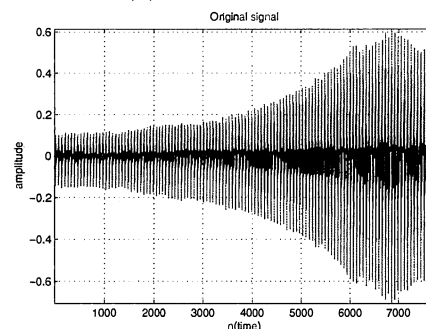
### 4.1 シミュレーション条件

ハウリング検出法の検出性能をシミュレーションにより評価する。シミュレーションでは実際にマイクをスピーカに近付けて発生させたハウリング信号と、マイクに対して話しかけたときの音声信号を用いた。ゼロクロスに基づくハウリング検出では、 $M_k = 80$ ,  $\lambda_z = 0.99$ 、ハウリング検出の

閾値 $\alpha = 3.2$ とする。



(a)ハウリング信号



(b)音声「あ」音

Fig. 6 シミュレーションに用いた信号

### 4.2 シミュレーション結果

図6(a)のハウリング信号に対するシミュレーション結果を図7に、図6(b)の音声「あ」音に対する、シミュレーション結果を図8にそれぞれ示す。各図において、1段目は元の信号、2段目はゼロクロス間の距離、3段目はゼロクロス間の距離の分散の推定値、4段目は検出結果を表している。

図7より、 $n = 1200$ 前後でゼロクロス間の距離がほぼ一定となり、これ以降、分散の推定値が小さくなっていくことが分かる。そして、 $n = 2000$ で分散の推定値は、閾値を下回り、ハウリングとして検出されている。これ以降も分散の推定値は閾値よりも小さい値を取り続け、ハウリングとして正常に検出され続けている。

また、図6(b)のような音声信号に対しては、ゼロクロス間の距離が一定にはならず揺らいでいることが分かる。このため分散の推定値はハウリ

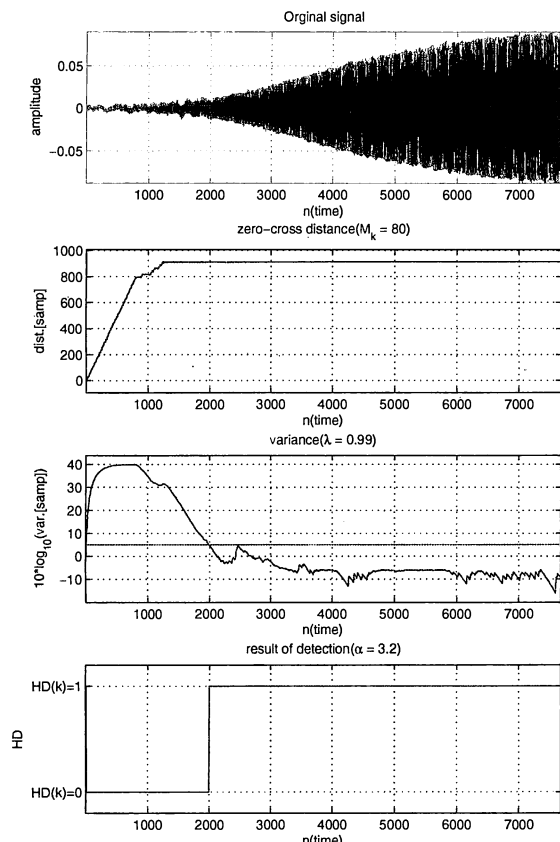


Fig. 7 ハウリング信号に対する検出結果;  
 $(M_k = 80, \lambda_Z = 0.99, \alpha = 3.2)$

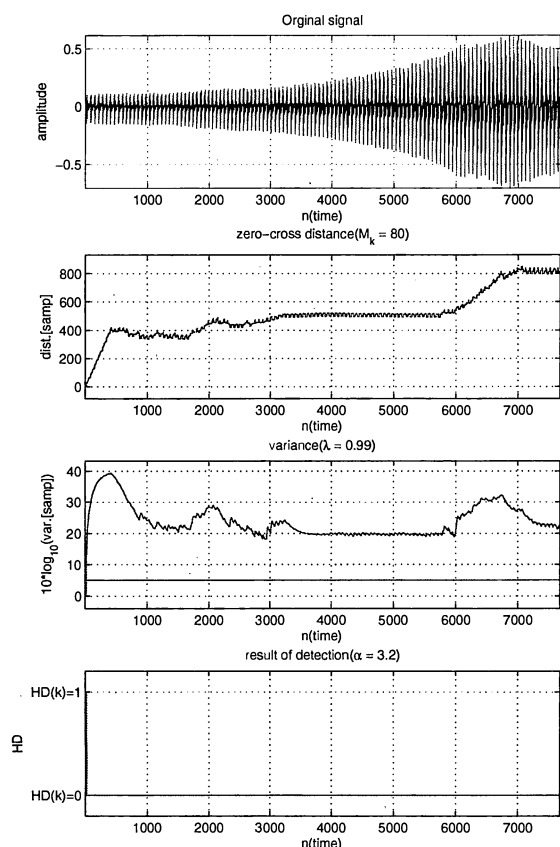


Fig. 8 音声「あ」音に対する検出結果;  
 $(M_k = 80, \lambda_Z = 0.99, \alpha = 3.2)$

ング信号と比べて大きい値を取り続け、閾値より小さくなることはなかった。その結果、誤検出は起こらなかった。

## 5. おわりに

ゼロクロスに基づくハウリング検出法を提案し、シミュレーションによって検出性能を評価した。

ゼロクロスに基づくハウリング検出器は、ゼロクロス間の距離を算出するサンプル間 $M_k$ によって分散の推定値の動向が変化する。 $M_k$ を小さくすると、ハウリングが起きたときにゼロクロス間の距離の分散の推定値はすぐに小さくなるが、ハウリング信号に似た音声信号の場合に似たような動向を示すため誤検出をしてしまうというトレードオフがあることがわかった。

今後の課題として、検出精度の向上があげられる。ハウリングの検出漏れがなく、ハウリングでない音声信号に対して誤検出を起こさない必要がある。また、ハウリングの発生からハウリングとして検出されるまでの時間の短縮も必要である。

## 参考文献

- 1) 西山 清: MATLABで学ぶ信号処理の基礎, 科学技術出版, 2003.
- 2) Nils Westerlund, Mattias Dahl, Nedelko Grbic: "Detection And Attenuation of Feedback Induced Howling in Hearing Aids Using Subband Zero-Crossing Measures", Proceedings of the Eighth International Symposium on Signal Processing and Its Applications, pp.751-754, 2005.