■ハウリング抑圧に関する参考文献（年代順）

詳細な書誌情報はリンク先をご覧ください（IEEE Explore、CiNii、J-GLOBALの該当ページへのリンクです）

- 音響系におけるハウリング除去に関する検討
  適応フィルタを用いたハウリング・キャンセラにリミッタ（Limiter、振幅制限回路）を組み込んだ文献で、見つけることの出来た最も古いものです．　ブロック・ダイアグラム（図４、図５）中に「LIM」と表記されたブロックがあります．　しかし本文ではLIMブロックが何であるかについては一切触れられていません．
- ハウリング ： 何故発生するか-どう予測し，止めるか
  易しい解説です．
- Steady-state analysis of continuous adaptation in acoustic feedback reduction systems for hearing-aids
  詳細な解析をおこなっていますが、これだけを読んでもなかなか理解しがたいです．
- 適応フィルタと遅延回路によるハウリングキャンセラの拡声装置への適用
  ハウリング問題に真正面から取り組んだ論文です．　この論文中のシミュレーション結果は、ハウリング抑圧に興味の無い人にとっては失望させられるものかもしれませんが、専門家にとってはこの時点でこれだけのことをやった／これだけのことが出来たということが分かる貴重な文献です
- 適応フィルタと遅延回路を用いたハウリングキャンセラの改良
  理論的にはハウリング抑圧は解決済みの問題になりました．　極論するならば、もはやハウリング抑圧は学術的な研究テーマに成りえません．　ただし実用レベルのハウリング・キャンセラを実現出来るかどうかは別の問題（工学的問題）で、多くの課題が残されています．
- フィードバック系の適応フィルタの解析
  数式を使って理論的解析をおこなっていますが、分かりやすく適応フィルタの収束特性を示すグラフ（学習曲線のグラフ）はひとつだけです ．
- Fifty Years of Acoustic Feedback Control: State of the Art and Future Challenges
  この論文（総説）の著者の人はシミュレーションしかやらないようで、なぜ実時間動作するハウリング・キャンセラの実現を目指そうとしないのかが不可解です

適応フィルタと遅延回路を用いたハウリングキャンセラの改良

■ ハウリング

・音響系を含むシステムで生じる発振現象

・閉じたループを一カ所で切り開いた開ループ伝達特性をH(ω)とすると，下記の条件をともに満たす周波数ωで発振する

$$1 < \left| H(\omega) \right| \qquad \angle H(\omega) = 2n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \ldots)$$

拡声システム

通信システム

■ 無響室内で観測したハウリング

波形

スペクトログラム

- 励振信号は暗騒音，アンプ内部のノイズ等
- ハウリング音の振幅は，はじめ指数関数的に増大するがやがて振幅一定の飽和状態（定常状態）に達する
- 飽和状態では高調波歪みが生ずる

■ ハウリング・キャンセラ無しの拡声システム

・マイクの振動膜の変位量，スピーカのボイスコイルとコーン紙の変位量，マイク・アンプの電源電圧，パワー・アンプの電源電圧は有限

→ 拡声システムは有限振幅特性を有する

・飽和するのがハウリングの物理現象としての本質的性質

→ 電子回路の発振器も飽和状態の出力を利用

（飽和しない弛張発振回路等は例外的）

■ シミュレーションで発生したハウリング（１/２）

・回路の非線形性の影響により，特異なハウリング波形が生ずる場合がある（飽和することに変わりはない）

■ シミュレーションで発生したハウリング（2/2）

飽和するまでの間に複雑な挙動を示す場合がある

■ 発振回路（電子回路）と拡声システムの相違

・発振回路は一つの周波数で発振するように設計する

・拡声システムの開ループ利得が大きければハウリングはあらゆる周波数で発生する（音響系の位相回転大）

発振回路

拡声システム

■ 現状のハウリング・キャンセラ製品

市販製品は周波数特性平坦化によるハウリング・マージン向上の効果しかない（ノッチフィルタを用いたものが主流）

■ ハウリング・キャンセラ付き拡声システム（１／２）

・システム同定の構成の適応システムの出力から入力に（遅延回路を経て）フィードバックがかかっている

・D/A変換器，A/D変換器も有限振幅特性を有する

■ ハウリング・キャンセラ付き拡声システム（２／２）

・スピーカ／マイク間の音響系の信号の結合の有無はシステムの安定性とは無関係

→ スピーカ／マイク間の信号経路を切断しても安定性を保証できない（閉じたループが存在）

→ 音響系の信号の結合があっても，適応システム（＋delay）の伝達特性が安定条件を満たせばハウリングは生じない

・当たり前の話のはずだが，過去に上記の事実を指摘した人・断言出来た人はいない（はず）

→ 有限振幅特性を有する現実の適応ハウリング・キャンセラの安定条件が明らかでなかったから

■ 有限振幅特性を有するシステム

■ リミッタ回路を追加したハウリング・キャンセラ

・リミッタ回路のリミット値Kを適切に設定することにより，適応システムの線形動作を保証出来る

$$G_{ALL} = G_{DA} G_{PA} G_{SP} G_{AC} G_{MIC} G_{MA} G_{AD}$$

・拡声システムは有限振幅特性を有する複数の構成要素の従属接続（D/A・A/Dも有限振幅特性を有する）

・K_{DA}，K_{PA}，K_{SP}，K_{MIC}，K_{MA}，K_{AD} は各構成要素のリミット値

■ リミッタ回路のリミット値Kの設定

$$K \le K_{DA}$$

$$K \cdot G_{DA} \le K_{PA}$$

$$K \cdot G_{DA} \cdot G_{PA} \le K_{SP}$$

$$K \cdot G_{DA} \cdot G_{PA} \cdot G_{SP} \cdot G_{AC} \le K_{MIC}$$

$$K \cdot G_{DA} \cdot G_{PA} \cdot G_{SP} \cdot G_{AC} \cdot G_{MIC} \le K_{MA}$$

$$K \cdot G_{DA} \cdot G_{PA} \cdot G_{SP} \cdot G_{AC} \cdot G_{MIC} \cdot G_{MA} \le K_{AD}$$

$$K_1 = K_{DA}$$

$$K_2 = K_{PA} / G_{DA}$$

$$K_3 = K_{SP} / (G_{DA} \cdot G_{PA})$$

$$K_4 = K_{MIC} / (G_{DA} \cdot G_{PA} \cdot G_{SP} \cdot G_{AC})$$

$$K_5 = K_{MA} / (G_{DA.} \cdot G_{PA} \cdot G_{SP} \cdot G_{AC} \cdot G_{MIC})$$

$$K_6 = K_{AD} / (G_{DA} \cdot G_{PA} \cdot G_{SP} \cdot G_{AC} \cdot G_{MIC} \cdot G_{MA})$$

$$K = \min(K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6)$$

・パワーアンプ，スピーカ，マイク，マイクアンプ，A/D変換器のダイナミックレンジに十分なマージンがあれば，次式の設定でよい

$$K = \frac{K_{DA}}{G_{ALL}} = \frac{K_{DA}}{G_{DA} G_{PA} G_{SP} G_{AC} G_{MIC} G_{MA} G_{AD}}$$

■ 収束特性のシミュレーション（１/７）

・入力信号は振幅制限した白色雑音（-1 ＜ s[n] ＜ 1）
・適応アルゴリズムはLMSアルゴリズム
・$(e[n]-s[n])^2$ を学習曲線としてプロット

■ 収束特性のシミュレーション（２/７）

・音響系のインパルス・レスポンス h[n] の周波数特性

・最大 20dB の利得を有する

■ 収束特性のシミュレーション（３/７）

・学習曲線は二つに折れ曲がる

■ 収束特性のシミュレーション（４/７）

・遅延回路の遅延Ｄが小さいと収束特性が悪化する

■ 収束特性のシミュレーション（５/７）

・適応フィルタのタップ長よりも遅延回路の遅延Ｄを大きくすると飽和状態での収束特性が悪化する

■ 収束特性のシミュレーション（６/７）

■ 収束特性のシミュレーション（7/7）

・開ループ利得が変化しても，飽和状態解消後の収束特性はほとんど変わらない（フィードバックの影響）

■ 音声信号を用いたシミュレーション

・起動時に発生したハウリングは2000サンプルまでに抑圧
・加法性雑音に相当する入力信号 s[n] のレベルに応じて収束誤差は変化するがハウリング発生には至らない

■ 無響室内での実験（１/４）

・リミッタ回路のリミット値Ｋの設定が最適値とは異なっていたが，実験ではハウリング抑圧に成功した

DSP Board TMDSDSK6713 (Texas Instruments)

■ 無響室内での実験（２/４）

・拡声システムのスピーカ，マイク間の距離は２ｍ
・拡声対象信号はアンプ内蔵スピーカから出力

■ 無響室内での実験（３/４）

- 途中でハウリング・キャンセル動作を停止しても，動作再開すれば再び発生したハウリングを抑圧

■ 無響室内での実験（４/４）

拡声システムのスピーカとマイクの間を人間が歩行

Ａ，Ｃ，Ｅ，Ｇ：静止　　Ｂ，Ｄ，Ｆ：歩行

・歩行により音響系の伝達特性が大きく変化

→ 適応フィルタの収束が追いつかずハウリング発生

→ しかし，再び自動的にハウリングは抑圧される.

■ 起動時に発生するハウリングの抑制

抑制処理なし

抑制処理あり（K, μ可変）

■ 適応ハウリング・キャンセラの特性（１/２）

- （原理的には）スピーカとマイクの距離が短いほど動作が安定する
  → 相対的に残響の影響が小さくなるため
- （原理的には）パワー・アンプの利得が大きいほどハウリング抑圧特性が向上する
  → 相対的に加法性雑音 s[n] が小さくなるため
- 暗騒音が増大する
  → 暗騒音も増幅するため

オープン・フィッティング補聴器やハンズフリー通話システムの性能改善を期待出来る（ただし一般的な拡声システムのハウリング抑圧はいまだ技術的に困難？）

■ 適応ハウリング・キャンセラの特性（２/２）

・変動の大きい残響と加法性雑音s[n]が適応フィルタの収束特性を悪化させる