

アクティブコントロールのための適応アルゴリズム —プラント特性のバックグラウンド同定に関する検討—

浜田 晴夫* 中村 信一
(*非常勤研究員)

要 旨

本報告では、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)を用いたシステム同定プロセスを提案する。このGAを用いた同定プロセスは、single adaptive notch algorithm (SAN Algorithm)による周期性騒音の制御に適用された。同定プロセスがバックグラウンドで動作し、フィルタ係数を常に更新し続けるため、様々な変動に追従し、また完全に自立システムとして動作することが可能となった。コンピュータシミュレーションと新たに開発した実時間DSPシステムを用いた実験結果についても併せて報告する。

本研究ではANCシステムに遺伝的アルゴリズムを用いたプラント特性のバックグラウンド同定を導入し、自立型ANCシステムを実現することを試みた。具体的には、本バックグラウンド同定手法をSANシステムに導入し、ロバスト性などに関する検討を行った。コンピュータシミュレーションの結果、プラントの遅延に関して理論値に近いプラント特性 C_0, C_1 の同定結果が得られ、また、本アルゴリズムの導入によって制御対象信号の周波数変化に対しても安定度が大きく向上した。さらに、DSPを用いて実時間で動作するシステムを実現し各種実験を行った。

Adaptive Algorithm Used for Active Control —On the Background Identification of the Plant Characteristics—

Haruo Hamada* and Shinichi Nakamura
* Associate Researcher

Summary

This paper describes a new adaptive algorithm for the active noise control of periodic interference noise. The filtered-x algorithm has been used for the controller of the active noise control, however, there are several problems to be solved if it is to be used in the real applications. Especially, system identification of the transfer function between actuator and error sensor is one of the important issues to be resolved because this essential process is needed in advance to the control process and hopefully this process should be made in background during the control to cope with the variations of the plant characteristics due to temperature or other environmental changes. Therefore, the system identification process will be a very important role, especially engine noise reduction system such as exhaust duct application. In this paper, we propose a new system identification process using genetic algorithm (GA). This GA identification process was applied to the single adaptive notch algorithm (SAN algorithm) to control the periodic interference noise. This control system works as a standalone system because the identification process is being executed as a background process and the digital filter coefficients of the controller are automatically up-

dated. The results of computer simulation and experiment using a newly developed real time DSP system are presented in this paper.

1 はじめに

現在、アクティブノイズコントロール(Active noise control: 以下「ANC」と言う。)システムでは、Filtered-xアルゴリズムが広く導入されている。図1に、Filtered-x LMS Algorithm を用いたANCシステムを示す。ここで、図中のPは、プラント特性(2次音源とエラーセンサ間の音響伝達特性)であり、Cは、Pを同定したものを示している。また、Hは騒音源とエラーセンサ間の音響伝達特性を示している。

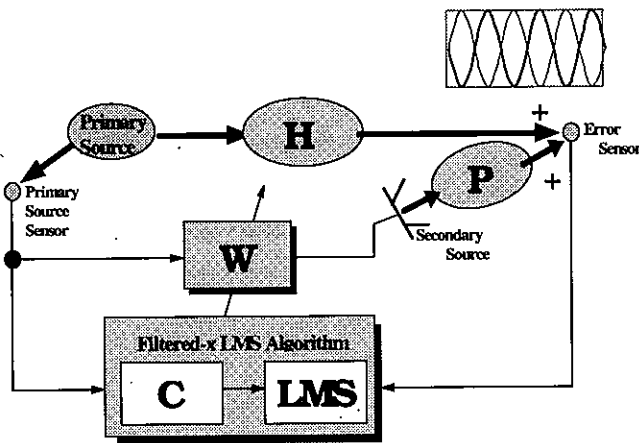


図1 Filtered-xアルゴリズムを用いたANCシステム

Filtered-xアルゴリズムには次に挙げる問題点があることが広く知られている。

- ① 事前にプラント特性Cを同定する必要がある。
- ② 時間の経過と共にプラント特性が変動する場合、十分な消音効果が得られないことがある。

本研究では、実時間でコントロールと同時にプラント特性の同定をバックグラウンドで行うシステムを構築することを目的とし、同定プロセスに遺伝的アルゴリズム(以下「GA」と言う。)を導入する。これにより、システムのPower onと同時に消音が可能となり、また、プラント特性の変化に伴う再同定などは不要となる。

同定プロセスにLMS(最小自乗法)を用いたバックグラウンド同定は、文献1)などで検討が行われている。本研究において同定プロセスにGAを用いた特徴は、適応同定においてLMSのように参照信号を必要とせず、エラー信号のみを用いている点である。これにより安定条

件を満たさない入力信号によってシステムが不安定になることがないため、ロバストな適応同定が可能となる。

図2は図1に示したANCシステムにGAを用いたバックグラウンド同定の制御を導入したものである。Cにおいてプラント特性を同定し、これをCにコピーして用いる。またH'でHの同定を行うプロセスも並行して動作している。ここでH'は、内部モデルのエラーを算出する際に、騒音源からHを通過した信号が得られないために内部モデルに導入したものである。

本稿では、図2のシステム構成を採用し、これをSinusoidalな信号を対象とする適応ノッチフィルタ(Single-frequency adaptive notch filter: 以下「SAN」と言う。)²⁾を制御フィルタとするシステムで検証を行った。コンピュータシミュレーションの他、浮動小数点型DSPを用いて実時間で動作するシステムを実現し、測定を行ったので、その結果について報告する。

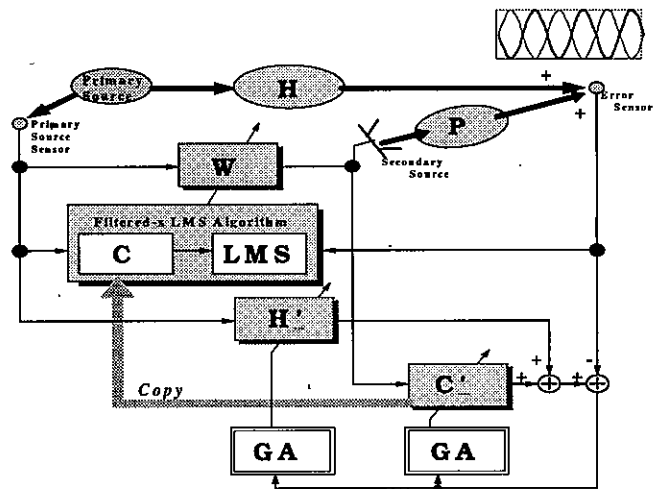


図2 遺伝的アルゴリズムを導入した一般的なANCシステムのブロック図

2 制御方法

(1) システムの制御

図3に、制御フローを示す。また、図4にはGAを用いたプラントのバックグラウンド同定を行うブロック図を示す。

図4のブロック図において、上部はフィードフォワード型のANCシステムであり、下部は、バックグラウンド

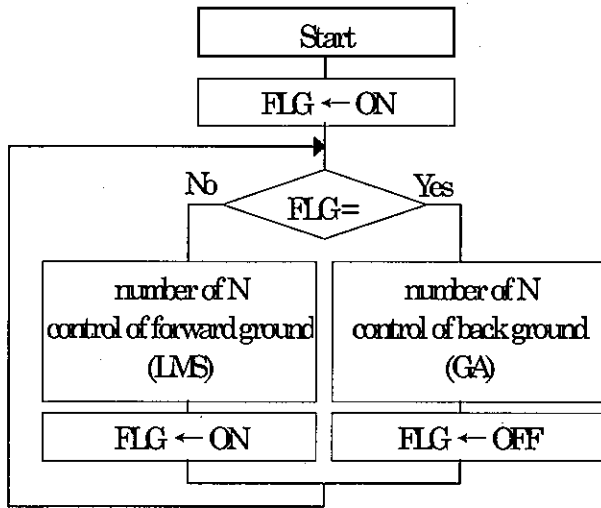


図3 コントロールフローチャート

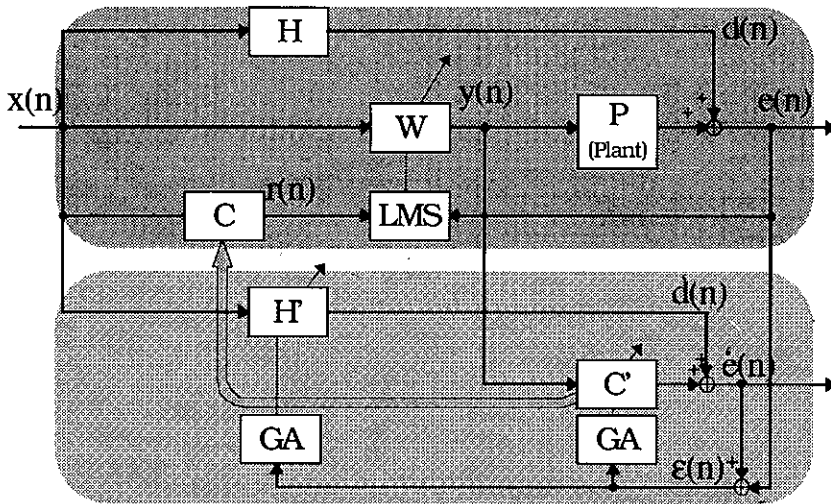


図4 GAを導入した提案するANCシステム

同定を行うための内部モデルである（以下前者を「フォアグラウンド」、後者を「バックグラウンド」と言う。）。

図3に示すようにフォアグラウンドの制御とバックグラウンドの制御は、N回毎に交互に行う。これは、同時に制御を行った場合、互いに競合し、発散することを避けるためである。

図5には、さらにこれをSANシステムに導入したブロック図を示す。

コンピュータを用いたシミュレーション、及び、DSPを用いた実時間システムによる実験では、図5のプラント特性のバックグラウンド同定を導入したSANシステムを用いて行った。これらの結果については、「3シミュレーション」「4 実時間システムによる実験結果」で報告する。

(2) 遺伝的アルゴリズム

GAは、生物の進化にみられるいくつかの過程を模倣し、特に世代交代の進化について着目したアルゴリズムである³⁾。本システムでは一般的なGAを用いたシステムと同様に、①選択及び淘汰②交差③突然変異④評価を用いてフィルタ係数の適応が行われていく。

GAで用いる遺伝子は、フィルタの重みを直接採用したグレーレベル表現とした。すなわち、フィルタ係数の

浮動小数点表現を遺伝子としている。

また、一世代の個体数は実時間で動作することを考慮し16に設定した。選択及び淘汰では上位2位の適応度を持つ個体を選択的に多く次世代に残すエリート法的な方式を採用した。また、交差は一点交差とし、突然変異には「揺らぎ」方式を用いた。「揺らぎ」方式とは、適当な乱数を発生させ、それを遺伝子に加算する方式である。

(3) 評価関数

評価関数は、図4において、エラーセンサから入力したエラー信号(e)と内部モデルのエラー(e')を引いた値(ε)の1周期の自乗平均誤差を求め、その逆数に任意定数constを乗じた(式(1))。

式(1)より、εの降下とともに適応度が上昇することがわかる。ここでεは次式(2)から求める。

$$Fitness = \frac{1}{E[\epsilon^2]} \times const \quad (1)$$

$$\epsilon(n) = e(n) - e'(n) \quad (2)$$

また、図4より、e(n)、e'(n)は以下で定義される。

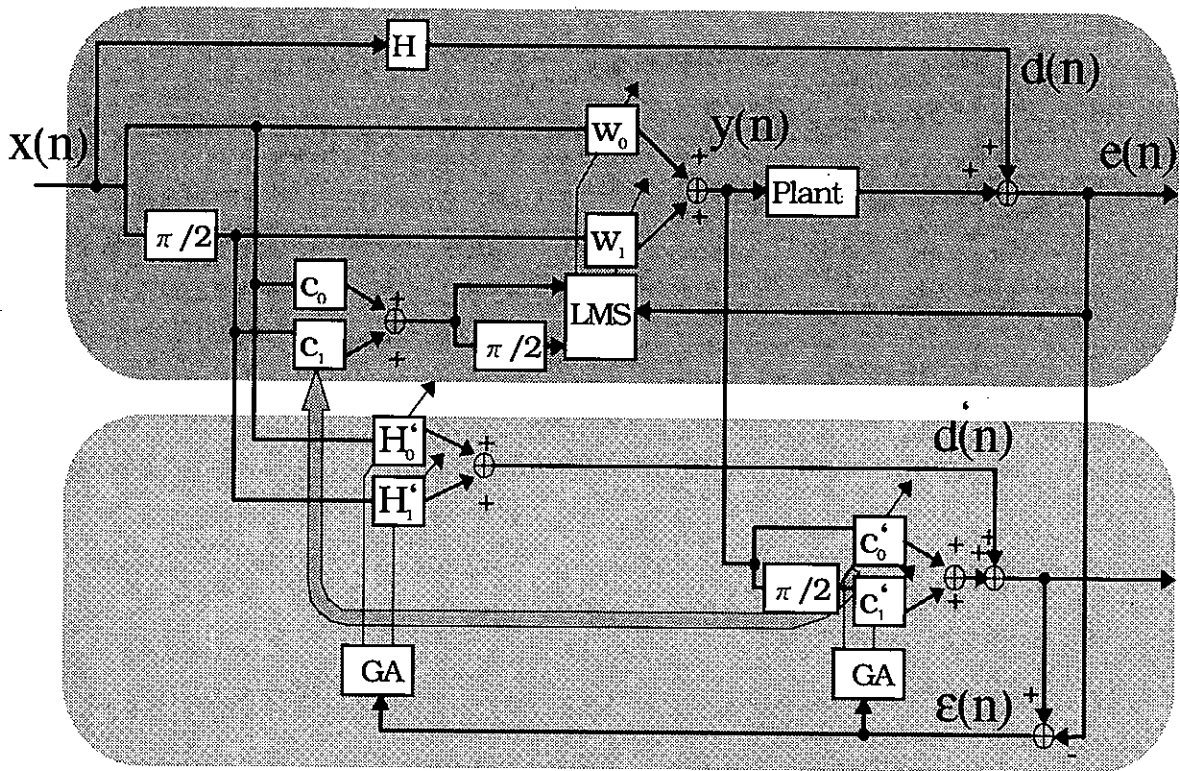


図5 バックグラウンド同定を実現したSAN (Synchronized Adaptive Notch) システム

$$e(n) = d(n) + P^T(n) y(n) \quad (3)$$

$$y(n) = [y(n) y(n-1) y(n-2) \dots y(n-M+1)]^T \quad (9)$$

$$e'(n) = d'(n) + C'^T(n) y(n) \quad (4)$$

$$x(n) = [x(n) x(n-1) x(n-2) \dots x(n-M+1)]^T \quad (10)$$

ここで、簡単のため、プラント特性Pは、M-tapのFIR Filterで同定できるものとし、これをC,C'として、たとえばC'は次式のように表す。

$$C'(n) = [C'(n) C'(n-1) C'(n-2) \dots C'(n-M+1)]^T \quad (5)$$

希望応答 d(n), d'(n)は、それぞれ、

$$d(n) = H^T(n) x(n) \quad (6)$$

である。これらを式(2)に代入し、次式のε(n)の表現を得る。

$$\begin{aligned} \varepsilon(n) &= \{H^T(n)x(n) + P^T(n)y(n)\} - \{H'^T(n)x(n) + C'^T(n)y(n)\} \\ &= \{H^T(n) - H'^T(n)\}x(n) + \{P^T(n) - C'^T(n)\}y(n) \end{aligned} \quad (11)$$

上式より、ε(n)が0となる条件は以下のように表される。

$$d'(n) = H'^T(n) x(n) \quad (7)$$

$$\{H^T(n) - H'^T(n)\}x(n) = \{C'^T(n) - P^T(n)\}y(n) \quad (12)$$

となる。フィルタ出力y(n)は次式で表される。

$$y(n) = W^T(n) x(n) \quad (8)$$

従って、εの降下は、次式を満足するように適応が進むことを意味している。

$$H(n) = H'(n) \text{ かつ } P(n) = C'(n) \quad (13)$$

ここで、

すなわち、GAによってεの値を降下させると、次第にC'がプラントPのよい近似となることがわかる。そこ

で、 C' を C にコピーすることによって、フォアグランドでのFiltered-x アルゴリズムを用いたANCシステムの制御が可能となる。

また、この原理をSANシステムに導入した場合、図5より、式(13)は次式のように表すことができる。

$$H(\omega_0, n) = H'(\omega_0, n) \text{ かつ } P(\omega_0, n) = C'(\omega_0, n) \quad (14)$$

ここで、

$$\omega_0 = 2\pi f_0 T \quad (15)$$

であり、 $H(\omega_0, n), P(\omega_0, n)$ は、それぞれ周波数 f_0 における、音響伝達特性を示している。また、 $H'(\omega_0, n), C'(\omega_0, n)$ は次式で表される。

$$H'(\omega_0, n) = H'_0 \cos(\omega_0 n + \phi) + H'_1 \sin(\omega_0 n + \phi) \quad (16)$$

$$C'(\omega_0, n) = C'_0 \cos(\omega_0 n + \phi) + C'_1 \sin(\omega_0 n + \phi) \quad (17)$$

これらの式より、GAによって、式(14)を満たす H'_0, H'_1 及び C'_0, C'_1 の探索を行えばよいことがわかる。

3 シミュレーション

(1) GAを用いたプラント特性の同定

GAを用いたプラント特性の同定結果について述べる。サンプリング周波数は3.2 [kHz]、入力信号はpure tone 100 [Hz]とした。プラント特性は振幅0.5のインパルスとし、遅延は、tap数で4(45°相当)、12(135°)、20(225°)、28(315°)についてシミュレーションを行った。この結果を理論値と共に表1に示す。

シミュレーション結果は理論値に対して良好な近似を実現していることがわかる。これらの C_0, C_1 を理論値と

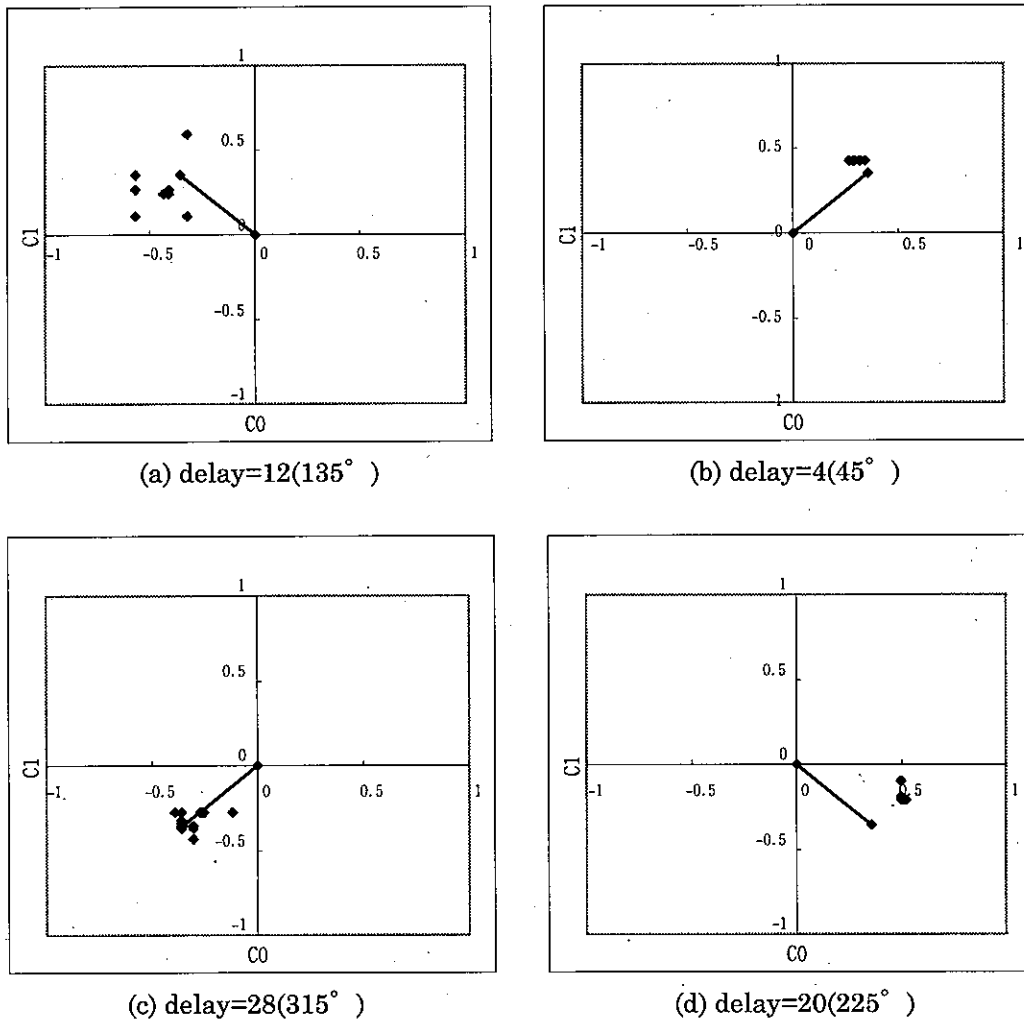


図6 プラント特性 C_0, C_1 の同定結果

共に図6に示す。線分で示されたものが理論値であり、点で記した箇所がGAによって探索された C_0, C_1 の値である。

表1 プラント特性の同定結果

delay	theory		simulation	
	C_0	C_1	C_0	C_1
4(45°)	0.35355	0.35355	0.33938	0.42752
12(135°)	-0.35355	0.35355	-0.41196	0.26583
20(225°)	-0.35355	-0.35355	-0.36043	-0.35574
28(315°)	0.35355	-0.35355	0.50909	-0.20206

(2) 周波数変化に対する安定性

周波数を変化させた場合の安定性について報告する。サンプリング周波数を800 [Hz]、入力周波数は90~110 [Hz]まで Iteration 10000回毎に5 [Hz]ずつ高くした。プラント特性は、無響室にて実際に測定したものを使用した(32tap、2次音源-エラーセンサ間: 15cm)。この制御結果を図7に示す。横軸は Iteration、縦軸は1周期の自乗平均誤差である。

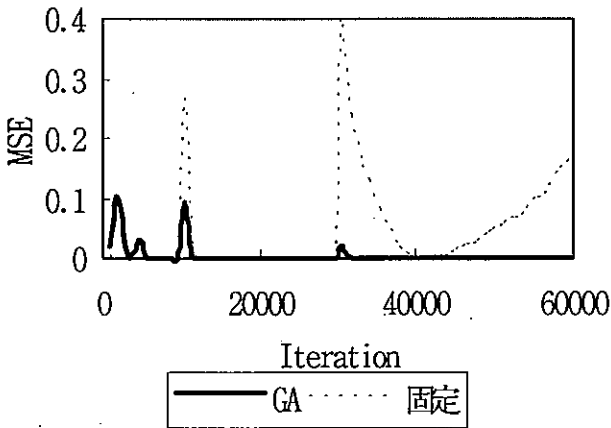


図7 入力ファレンス信号の周波数変動に対するロバスト性

実線は GAを用いた場合の制御結果であり、点線は90 [Hz] でプラントを同定した値を C_0, C_1 に代入し、これを固定してシミュレーションを行った場合の結果である。 C_0, C_1 を固定すると40000回(105→110 [Hz]に変化)以降、発散に向かっていく。この結果より、バックグラウンドでプラント特性の同定を行った場合は、周波数の変化に対するロバスト性が向上することがわかる。

4 実時間システムによる実験結果

浮動小数点型DSPを用いて、実時間システムを実現したので、その結果について述べる。サンプリング周波数を3 [kHz]とし、入力周波数を300 [Hz]とした場合の結果を図8に示す。これは、制御時と非制御時のエラー信号のパワースペクトルを示したものである。ここで点線は非制御時の場合であり、実線は制御時の応答を示す。

図8から、300 [Hz]における、制御時と非制御時を比較すると、制御時には40~50 [dB]程度の消音量が得られていることがわかる。

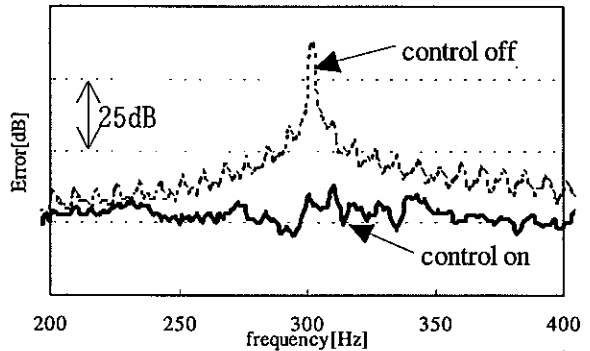


図8 提案したシステムによる消音効果

5 まとめ

本研究によって、大型車両の騒音制御のためのアルゴリズムの基礎的検討を行った。この結果に基づき、ダクト方式によるANCシステムの実用化に向け研究を進める所存である。

引用文献

- 1) Nozomu Saito *et. al*: "Conditions for optional on-line identification of secondary paths in active noise control systems", ACTIVE 95, July 1995.
- 2) 伊東和男ら: "適応ノッチフィルタを用いたアクティブコントロールシステムの実現," 日本音響学会講演論文集, 1-9-12, 1994.3.
- 3) 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1994.