FP 5-03 エンジン排気音の能動消音装置

Active Noise Control System for Exhaust Gas Noise from Engine

○正 松村昌彦 (大阪ガス)、山本幸範 (大阪ガス)、藤田裕介 (キャットシステム)、
小島高明 (大阪ガス)、一本松正道 (大阪ガス)

Masahiko Matsumura, Osaka Gas Co., Ltd., 5-11-61, Torishima, Konohana-ku, Osaka, 554-0051
Yukinori Yamamoto, Osaka Gas Co., Ltd., 5-11-61, Torishima, Konohana-ku, Osaka, 554-0051
Yusuke Fujita, Cat System Corp., 3-147-27, Higashi Shinmachi, Hirohata-ku, Himeji-shi Hyogo, 671-1121
Takaaki Ojima, Osaka Gas Co., Ltd., 2-37 Minami 3 Chome, Chiyozaiki, Nishi-ku, Osaka, 550-0023
Masamichi Ippommatsu, Osaka Gas Co., Ltd., 5-11-61, Torishima, Konohana-ku, Osaka, 554-0051

After COP3 on December 1997, the Co-Generation System(CGS)/Combined Heat and Power(CHP) system is focused on. The environmental influences should be considered on installation, together with the total energy efficiency. The objective of this R&D is to develop the advanced Active Noise Control (ANC) system for the exhaust gas noise from engine in CGS. The new concept is based on the system by using the engine rotation angle instead of the initial reference noise. In order to realize this concept, "Frequency Domain Simultaneous Equations Method" and the other expandable algorithm are adapted numerically. As a result, we can show a new direction to higher performance and lower cost ANC, which can be free from a microphone detecting the reference noise and require less labor in the initial turning.

Key Words:

Active Noise Control (ANC), Engine Rotation Angle, Frequency Domain Simultaneous Equations Method, Adaptive Algorithm
能動消音制御 (ANC)、エンジン回転角、周波数領域連立方程式法、適応アルゴリズム

1. 緒言

1.1 背景と目的

1997 年 12 月の京都議定書採択以来話題となっている省エネルギー策として、タービンやレシプロエンジンをを用いたコージェネレーションシステムが近年特に注目されているが、システム総合効率に注目するだけでなく、システムの環境適応性にも十分留意する必要がある。

本報告は、様々な環境分野の内、主にエンジンからの排気騒音の低周波領域低減技術開発に関するものである。表 1 に、3000kW 級ガスエンジンコージェネレーションシステムにおけるパッシブサイレンサー透過後の排気騒音の音圧レベル周波数特性を示す^[1]。高周波領域の騒音はパッシブサイレンサーによって効果的に減衰されているものの、低周波領域の騒音はほとんど減衰されることなく残留している。全領域の騒音低減を考慮したパッシブサイレンサーを設置しようとすると、エンジン本体と同等の大きさのものとなるため、都市部等低設置面積を要求される場合には高性能で低コスト・高信頼性の代替技術が切望されている。

Table 1 Exhaust Gas Noise from Gas Engine after a Passive Silencer

Frequencies[Hz]	63	125	250	500	1000	2000
SPL [dB]	80	85	75	72	69	66

Effective Method ← ANC → Passive Silencer

その低周波音低減代替技術の一つとして有望なのが、ANC (能動型消音制御装置) である。本技術の原理、すなわち発生騒音に対して逆位相の音を発生させ消音させるという概念 (図 1 参照) は古く約 100 年前にレイリーによって考案されたものであるが、実際には多くの困難な問題により実現化されなかった。しかしながら、今日の飛躍的なデジタル信号処理技術の進歩により高速演算が可能となったこともあり自動車を始めとする各種分野において実用化されつつある。

原理的には、全ての周波数領域で減音効果が得られるが、実際には高周波領域の減音を担うパッシブサイレンサーと低周波領域騒音抑制の役目を果たす ANC とのハイブリッドシステムが考えられる。

1.2 技術開発課題

現状の排気騒音を抑制対象とする ANC は十分実用レベルにあるが、よりその導入を促進するためには、更なるシステム進化が必要である。第一に低コスト化のためのシステム構成機器のシンプル化である。

現在、ANC の制御方式としてさまざまな方法が提唱されているが、実際は制御における演算が音速よりも非常に速いことを利用してフィードフォワード制御が一般的に実用化されている。そのうち最も有名な制御アルゴリズムは Filtered-X LMS^[2]という方法であるが、誤差修正のためのエラーマイクがスピーカの後段に必要である。また、フィードフォワード制御一般としてスピーカと騒音を検出する参照音マイクとの間にハウリングが発生し、この対策として専用のパッシブサイレンサー等対策も必要となる。図 1 にこのシステム概念図を示す。

これら実用化のための追加機器は、高温の排気下でも使用に耐えうる高価なものであり、これらがもし不要になるか、または全体機器個数が減るとコスト低減に確実に繋がる。

Figure 1 Conventional ANC System

2. 手段

2.1 新型 ANC のコンセプト

エンジンは回転機械のためその排気騒音周波数特性を見ると、回転による脈動に起因する騒音が支配的であり、また周期性もあることがわかる。

一方、以前、我々はエンジン起因振動への防振対策として、その固体振動が回転角に依存することに着目し、回転角を検出することで、振動を能動的に低減制御するシステムを開発し、この技術により、飲食店やシネマコンプレックスが直下階にあるという厳しい防振条件の下、3000kW 級ガスエンジンの効果的な振動抑制に成功した経験がある^{[1][3]}。

そこで、我々は同様の発想の下、新たに回転角検出 ANC を考えた。すなわち、消音対象を回転による脈動に起因する騒音に限定することで、参照音マイク信号をエンジン回転角検出信号に置き換えたシステムである。その結果、マイク個数を減らすことができ、またハウリング対策も不要となるため、大幅なコストダウンが実現できると考えたのである。

2.2 周波数領域連立方程式法の採用

上記システム（図2参照）を実現するため、周波数領域連立方程式法^[4]を回転角検出信号に起因する線スペクトル処理用適応アルゴリズムとして採用することにした。結果として、本方式では、スピーカーとエラーマイク間の2次経路伝達関数を自動的に求めることができるようになったため、従来方式で主に初期調整時に白色雑音等を用いて経路特性を同定していた作業が不要となり大幅な手間削減となった。

Figure 2. New-Conceptual ANC System-1

2.3 連続スペクトルの入力に対する適応性改善

実際のコージェネレーションシステムに適用する際には、支配的なエンジンによる騒音のみでなく、エンジンの回転に関連の薄いその他機器による騒音が無視できないケースもある。そこで、回転角検出式でより高性能が要求される時や満足いく性能がどうして得られない時を想定して統一的で拡張性のある制御システムを考えた。

回転角検出式では、入力される騒音伝達関数は特定周波数に対象を絞った線スペクトルであるが、相殺騒音を更新する際に、エラーマイクにエンジン排気騒音とは関連のない周波数で騒音が無視できないレベルで検出されると、対象ではない周波数であって抑制できないにも関わらず、無理に抑制しようとする。そのため、その周囲にある抑制対象の周波数においても過剰に相殺騒音が出力されることになり、結果的に発散してしまう現象が起きるのである。このため、我々は、発散を未然に防ぐために、その傾向が現れ次第、補正をかける適応アルゴリズムを独自に追加設置することで、本問題を解決できるようにした。

結果として、本システムは、参照音を検出して補足情報として付加するような回転角+参照音検出併用式にも容易に適用できることになり拡張性が増すこととなった。図3にその拡張型システム概念図を示す。

Figure 3 New-Conceptual ANC System-2

3. 結言

次の3点を達成することができ、新しいコンセプトに基づく低コスト型 ANC の開発に道筋をつけることができた。

- (1) 回転角検出を用いた ANC 採用により、耐熱/耐腐食性の参照音マイクが必要でなくなり、コストダウンが可能となった。同時に参照音マイクとスピーカー間で発生するハウリング問題をなくすることができ、対策機器の設置が不要となった。
- (2) 回転角検出適応アルゴリズムとして、周波数領域連立方程式法を適用することで、各経路について経時変化を自動的に追従できるようになり、安定した収束を得ることができるようになった。また、導入サイトごとに手間のかかる初期調整も簡略化できるようになった。
- (3) エンジン脈動に関連の薄い騒音源の影響が無視できないような場合、回転角検知式の対応領域を拡張させるか又は参照音検出情報も付加できるようにした統一的改造型アルゴリズムを導入することにより、システムの拡張性が高まった。

4. 今後の課題

- (1) ANC 設置の自由度を上げるためには、排気ダクト内の燃焼ガス温度は最高 400℃ 以上にもなることや、ガス中の水分を結露させてはいけないこと、燃焼ガス中に硫酸化合物が含まれる場合は腐食性にも注意する必要があること等を考慮する必要がある。よって、これらの過酷な条件に対してより耐久性のあるスピーカーとマイクの開発が必要である。
- (2) 参照音検出式を併用する場合は、従来同様にスピーカーと参照音マイクによるハウリングが発生すると考えられるため、その対策が必要となるが、ソフト的に解決できる方が望ましい。

参考文献

- [1] 高橋良典, 松本敏郎, 中平和人, 大堀太志, 一本松正道, 藤本洋, 小島高明, 松村昌彦, “大規模コージェネレーションシステムの防音, 防振対策技術”, 竹中工務店技術報告, No.58 (2002)
- [2] 栗栖清浩, 阿部真一, “排気ダクトのアクティブ消音”, 信学技法, EA2003-36 DSP2003-24(2003), pp.25-30
- [3] 一本松正道, 藤本洋, 小島高明, 高橋良典, 藤田裕介, 中本邦博, 安田正志, “回転機械防振用アクティブマスダンパの開発”, 日本音響学会誌, 59-4 (2003), pp.203-208
- [4] 橋本樹幸, 藤井健作, 棟安実治, “周波数領域連立方程式法による能動騒音消制御システム” 信学技法, EA2001-110 Vol.101 No.596 / Vol.101 No.598, pp.31-36