

平成22年 5月31日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760276
 研究課題名 (和文) 単方向音源とロバスト制御に基づく換気システムダクトの能動騒音制御装置の開発
 研究課題名 (英文) Development of an active noise control system for ventilation ducts based on directional control sources and robust control
 研究代表者
 小林 泰秀 (KOBAYASHI YASUhide)
 長岡技術科学大学・工学部・准教授
 研究者番号：50272860

研究成果の概要 (和文) : 換気システムダクトの能動騒音制御系における制御用音源として、単音源からなる単方向音源 (提案法)、単音源のみを用いた双方向音源 (従来法1)、二音源からなる単方向音源 (従来法2) の性能比較を行い(i)従来法2の方が従来法1よりもフィードバックパスの位相遅れが大きく、ゲインの低い補償器が得られることを理論的に示した。また(ii)提案法により従来法2と同様の利点を単音源で得ることができることを理論モデルおよび制御実験により示した。

研究成果の概要 (英文) : Three control source structures for ventilation ducts are compared: directional source with single loudspeaker (proposed method); bidirectional source with single loudspeaker (existing method 1); directional source with a pair of loudspeakers (existing method 2). It has been shown based on a theoretical model that (i)larger phase lag in feedback path transfer function is achieved by using the existing method 2 compared with the existing method 1. Moreover, it has been shown based on a theoretical model and experimental results that (ii) the proposed method has the similar advantage to the existing method 2 with single loudspeaker.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御システム

1. 研究開始当初の背景

本研究の目標は、音響ダクト系に対する低コストな能動騒音制御装置を開発することである。能動騒音制御は、大規模建築物等の

空調システムや、航空機のキャビネット等に実用化されているが、従来の多くの能動騒音制御系では適応制御則が採用されており、安価な実装は困難である。近年、一般住宅の換

気システム義務化に伴い、能動騒音制御のより安価な実装が重要となっている。本研究では、ロバスト制御により学習が不要な（適応しない）補償器設計を行うこと、および、制御音源を工夫することで、従来よりも安価に装置を構成することを目標とする。オンライン更新を行わないため非常に広い範囲の動作点での制御性能は期待できないが、最近のいわゆる高気密・高断熱住宅では年間を通じて温度変化が小さく動特性変動も小さいと考えられるため、時不変の補償器でも十分な騒音制御性能を達成できることが期待できる。

研究開始当初までに、実際の住宅に設置された換気システムを用いた実験により、時不変制御を行う場合には、適応制御（オンライン適応後の補償器を時不変補償器として使用）よりもロバスト制御を用いる方が騒音レベルを低減できることを確認した。また、実装誤差を考慮した補償器設計技術を開発し、簡単なダクト系を用いて実験を行い、実装用ハードウェアの低コスト化が図れることを確認した。簡単なダクト系を実際の換気システムに置き換えることが課題として残っていた。また、制御音源として単音源を用いて換気システムに対する能動騒音制御系を構成した結果、騒音抑制性能は小さく、実用上十分と言えない状況にあった。そこで、二音源から成る単方向音源を構成し、この音源が性能向上に有効であることを実験により確認した。しかし、単音源（スピーカー一つ）を用いて単方向音源を構成する方法はまだアイデアの段階であり、その検証が課題として残っていた。

2. 研究の目的

(1)実装用ハードウェアの低コスト化：従来用いられている適応制御に対して、ロバスト制御(時不変制御)を採用することでオンライン適応制御則にかかる計算量を低減させ、実装用ハードウェアの低コスト化を図る。

具体的には、換気システムダクトの制御系に実装誤差を考慮した補償器設計技術を適用し、達成可能な制御性能とハードウェアのコストの関係を調べる。

(2)制御用アクチュエータの低コスト化：従来の二音源から成る単方向制御音源に対して、エンクロージャに特殊な構造を持たせた単音源から成る単方向制御音源を開発し、制御用アクチュエータの低コスト化を図る。

具体的には、単音源からなる単方向音源を構成し、従来の二つの方式（単音源を双方向制御音源として用いる場合、二音源からなる単方向音源の場合）と性能を比較検証する。

3. 研究の方法

以下の3つの制御音源

Case(a)単音源のみを用いた双方向音源（従来法1）

Case(b)二音源からなる単方向音源（従来法2）

Case(c)単音源からなる単方向音源（提案法）について、(1)制御音源の違いが制御対象の動特性に与える効果を調べる。具体的には、周波数応答実験結果と理論モデルに基づく周波数応答関数の計算結果を比較する。次に、(2)制御音源の違いが制御性能に与える効果を調べる。具体的には、サンプル値 H_∞ 制御系設計を用いて補償器設計を行い、エラーマイクおよび制御入力信号を比較する。

図1に実験装置のブロック線図を示す。

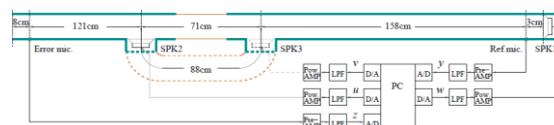


図1 実験装置

ダクトには直径約10cm、厚み約7mmのPVC管（図中、太い水色線）および厚み約1mmの換気システム用フレキシブルダクトを用いている。ダクト上流（図中右端）に騒音源を模擬するスピーカ SPK1 を設置し、これに近接してリファレンスマイクを設置する。ダクト下流の SPK2 および SPK3 は制御音源であり、破線に示したサブダクトと組み合わせることにより、上記 case (a) ~ (c) の三つの制御音源を構成することができる。本制御系の目的は、ダクト左端に設置されたエラーマイクにおいて観測される騒音を抑制するように、制御音源を適切に駆動することである。そのために、リファレンスマイクの出力信号から制御音源の駆動信号を適切に生成するコントローラを設計する。

図2に、図1のモデルを示す。簡単のため、マイク、スピーカ、ローパスフィルタ等の動特性は無視し、ダクトの音響特性のみ考慮する。サブダクトの長さ L_s と、制御入力信号 u から SPK3 までの特製 H を適宜設定することにより、上記 case (a) ~ (c) の三つの制御音源を表現する。

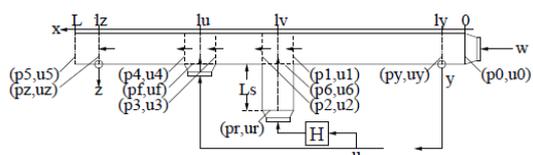


図2 ダクトモデル

4. 研究成果

(1)制御音源の違いが制御対象の動特性に与える効果

波動方程式に基づき、図2のモデルに対する周波数応答関数を求めた結果を以下に示す。

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{yu} &= \frac{P_y}{u_f} = \cos kl_y \cdot \tilde{G}_{0u}, & \tilde{G}_{0u} &:= \frac{p_0}{u_f} = j\rho_0 c_0 \frac{\sin k(L-l_v)H + \sin k(L-l_u) \cos kL_S}{\cos kL \cos kL_S - \sin k(L-l_v) \sin kL_S \cos kl_v} \\ \tilde{G}_{zu} &= \left(\cos kl_z - \frac{\sin k(l_z-l_v) \sin kL_S \cos kl_v}{\cos kL_S} \right) \tilde{G}_{0u} - j\rho_0 c_0 \left(\sin k(l_z-l_u) + \frac{\sin k(l_z-l_v) \cdot H}{\cos kL_S} \right) \\ \tilde{G}_{yv} &= \cos kl_y \cdot \tilde{G}_{0v} - j\rho_0 c_0 \sin kl_y, & \tilde{G}_{0v} &:= j\rho_0 c_0 \frac{\sin kL \cos kL_S - \sin k(L-l_v) \sin kL_S \sin kl_v}{\cos kL \cos kL_S - \sin k(L-l_v) \sin kL_S \cos kl_v} \\ \tilde{G}_{zv} &= \left(\cos kl_z - \frac{\sin k(l_z-l_v) \sin kL_S \cos kl_v}{\cos kL_S} \right) \tilde{G}_{0v} - j\rho_0 c_0 \left(\sin kl_z + \frac{\sin k(l_z-l_v) \sin kL_S \sin kl_v}{\cos kL_S} \right) \end{aligned}$$

この結果は、Ls と H を適宜設定することにより、従来知られている周波数応答関数を特殊名場合として含んでいる。

制御入力信号 u から、リファレンスマイクの出力信号 y までの、フィードバックパス特性を図3、4に示す。図3は周波数応答実験を行った結果、図4は上記モデルを用いて計算した結果である。

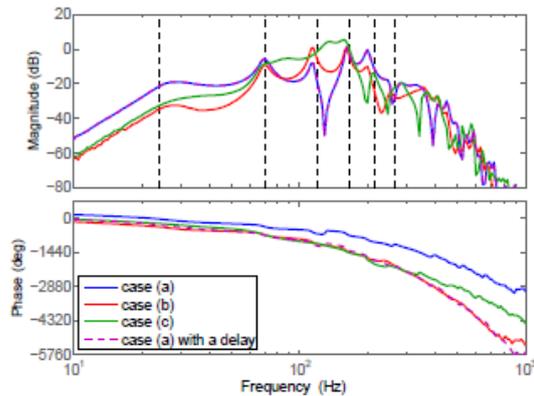


図3 周波数応答実験結果

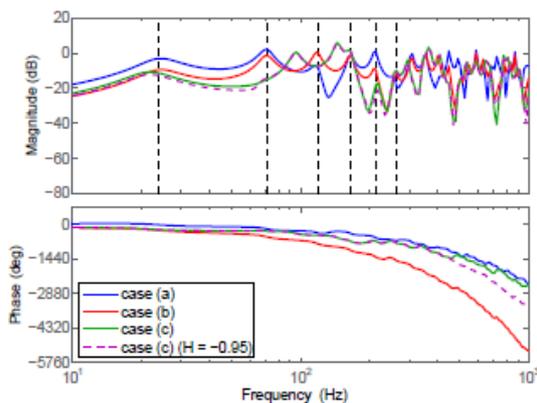


図4 物理モデルによる計算結果

図3、4より、周波数応答実験結果と物理モデルによる計算結果には類似点がみられる。Case(a), (b)では、共振・反共振が生じる周波数がほぼ同一である。また、case(c)でも、200~300Hz 付近において二つの反共振および一つの共振が表れており、導出した物

理モデルは実験結果をよく表現していると考えられる。(ただし物理モデルにはスピーカやローパスフィルタの特性を考慮していないため、低周波数域および高周波数域においてゲインが下がっていない。) 最も重要な点は、フィードバックパスにおける位相特性である。Case (b)では case(a)に比べ、大きな位相特性が得られている。Case (c)でも、case(b)と同様の位相遅れが見られる(図3)。一方、図4の物理モデルによる計算結果には、実験結果のような大きな位相遅れは見られない。この原因として、スピーカの表裏の音の強さが実験では異なっている(裏側の方が小さい)ことが挙げられる。図4の破線は、H を1より小さく設定し、裏側の音が弱い状況を計算したものである。この結果、位相遅れが大きくなっており、実験ではスピーカの背面音が表面音より小さいことが考えられる。

(2)制御音源の違いが制御性能に与える効果

図3の周波数応答実験結果に基づいて、制御系設計・実験を行う。

図5に制御系のブロック線図を示す。

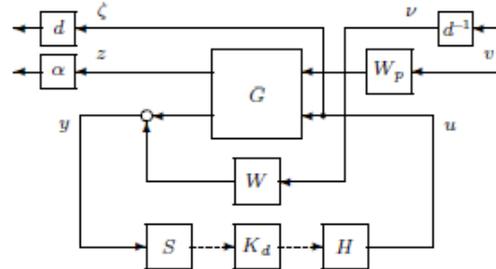


図5 制御系のブロック線図

図中、G は周波数応答実験結果を有限次元近似して得たノミナルプラントで、W は加法的摂動に対する重み関数、Wp は性能重み、S はサンプリング、H はホールドで、Kd は設計すべき離散時間補償器である。次のサンプル値 $H \infty$ 制御問題を解き、Kd を求めた。以下の条件を満足し、かつ、正数 α を最大化する補償器 Kd を求めよ：(i) 閉ループ系を内部安定化し、かつ (ii) 適当な正数 d が存在して、閉ループ系の L2 誘導ノルムが 1 未満となる。

図6に制御実験結果(エラーマイクの出力信号)を示す。図の横軸前半は制御なし、後半は制御ありである。制御時の振幅は、小さい順に case(b) < case(c) < case(a) となっており、case(c)は従来の二つの制御音源の中間の性能を示している。また、このときの制御入力の時間応答を図7に示す。振幅の小さな順に case(b) < case(c) < case(a) となっている。

以上より、提案する背面音を利用した音源により、従来の2音源からなる単方向音源と同様の利点が得られることを実験的に示した。

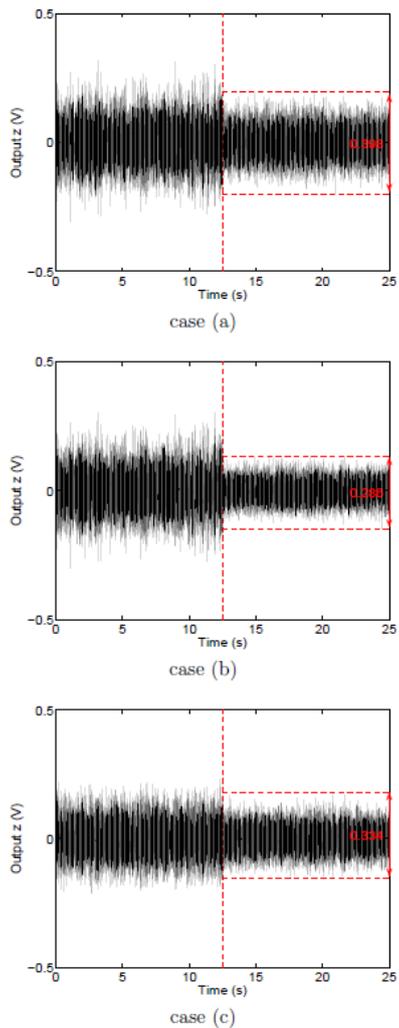


図6 エラーマイクの時間応答

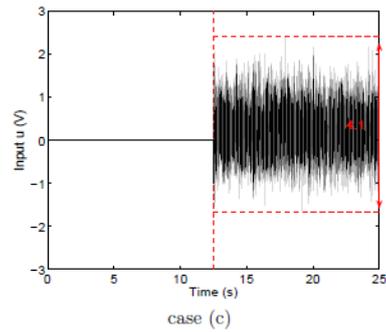
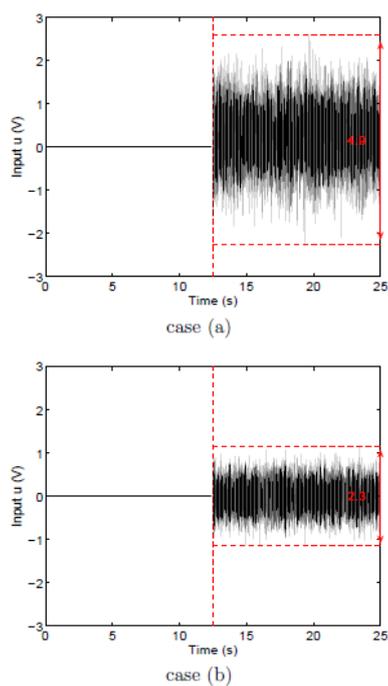


図7 制御入力の時問応答

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

① Yasuhide Kobayashi and Hisaya Fujioka, Analysis for robust active noise control systems of ducts with a pair of loudspeakers, 15th International Congress on Sound and Vibration (ICSV15), 平成20年7月8日, 大田 (韓国)

② 小林泰秀・藤岡久也, 二音源を用いたダクト能動騒音制御系のロバスト安定性解析, 計測自動制御学会第37回制御理論シンポジウム, 平成20年9月17日, 鹿児島

③ Yasuhide Kobayashi, Hisaya Fujioka, Naoki Jinbo and Yuichiro Hara, Performance Limitations by Structures of Control Sources in Active Noise Control Systems of Ducts, 16th International Congress on Sound and Vibration (ICSV16), 平成21年7月8日, クラクフ (ポーランド)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 泰秀 (KOBAYASHI YASUHIDE)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号: 50272860

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: