

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：25406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06117

研究課題名(和文)最適可変ステップサイズを有するLMSアルゴリズムと機械振動解析への応用

研究課題名(英文)Optimal variable step-size LMS algorithm and application to vibration analysis

研究代表者

肖業貴(Xiao, Yegui)

県立広島大学・経営情報学部・教授

研究者番号：50252325

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：雑音に汚された正弦波信号に対する適応フーリエ解析が従来のFFTの問題点(周波数分解能, 追従特性)を克服するために有効とされている。LMSアルゴリズムが最も好まれているが, 収束速度と定常特性の両立が困難なため, 近年可変ステップサイズLMSアルゴリズムが注目されている。本研究では, 様々な実用的な可変ステップサイズの更新式を再検討した上, 一般型更新式を導入し, 変分法を用いてその最適化を行った。また, 機械振動や狭帯域能動騒音制御などへの応用によりその有効性を検証した。その結果, 可変ステップサイズを有するLMSアルゴリズムの有効性や最適性が明らかにされ, 振動解析などへの実用化が大きく前進した。

研究成果の概要(英文)： Adaptive Fourier analyzer has been considered to be a useful and practical tool which can overcome the two well-known major difficulties (frequency resolution and tracking capability) with the traditional FFT. The LMS algorithm is much preferred in real-life applications, but the tradeoff between its convergence and steady-state performance has been a big issue. In recent years, the variable step-size LMS (VSS-LMS) algorithm has attracted a lot of attention. In this project, after carefully investigating the existing VSS-LMS algorithms, we introduced a general VSS update equation and used calculus of variations to optimize it. As a result, several VSS-LMS algorithms have been proposed and confirmed to present promising performance and might be applied to real vibration analysis, active noise control, etc. with a very moderate increase in computational cost as compared to the conventional VSS-LMS algorithm.

研究分野：知能信号処理

キーワード：適応フーリエ解析 LMSアルゴリズム 可変ステップサイズLMS 変分法 適応IIRノッチフィルタ 振動解析 狭帯域能動騒音制御 統計解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 適応 FIR フィルタリングでは、従来の LMS アルゴリズムの収束特性と定常特性の両立を図るべく、可変ステップサイズ (Variable step-size (VSS)) を用いた VSS-LMS アルゴリズムを 80 年代のおわりころから数多く提案されてきた。VSS の更新式の改良は主な研究対象である。過去に提案された VSS-LMS と比較し、多くのシミュレーションにより特性のよいアルゴリズムを提案するのが主な研究手法であった。提案された VSS-LMS アルゴリズムに対する統計解析も一部行われてきたが、アルゴリズムの最適化に対する示唆を示すものがほとんどなかったのが実状である。性能解析による比較検討や VSS 更新式の最適化が課題として残されている。

(2) 一方、適応周波数分析においても LMS アルゴリズムが有効で実用的とされている。所謂適応 DFT は適応周波数分析の元祖である。機械振動解析、自動採譜、能動騒音制御 (Active Noise Control: ANC)、DTMF など、多くの応用分野がある。VSS-LMS アルゴリズムの導入が有望であるが、適応 FIR フィルタのために開発した VSS-LMS アルゴリズムと同様、どのような VSS 更新式が実用的か、また誤差の関数を更新項として採用した場合はその最適化は可能なのか、などが課題である。

2. 研究の目的

本研究では、機械振動 (雑音に汚された正弦波) に対する解析能力を向上させるための VSS-LMS 型適応フーリエ解析アルゴリズムの提案や最適化を目的とする。具体的には、既存の VSS-LMS アルゴリズムを比較検討したうえで、一般化した VSS 更新式を提案し、変分法の下でその最適化を行って、優れた追従特性と定常特性を持ち合わせた新たな VSS-LMS アルゴリズムを提案・確立する。

3. 研究の方法

適応フーリエ解析器のブロック図は図 1 に示す。解析の対象信号  $d(n)$  は雑音に乱された正弦波であり、様々な機械・機器の振動をモデリングできる。 $d(n)$  の各周波数成分のコサイン係数、サイン係数を適応的に推定・追従するのが適応フーリエ解析器の仕事である。今まで LMS、RLS、 $p$ -power、カルマン・フィルタなど、多くの適応アルゴリズムが開発されてきたが、収束特性と定常特性・追従特性の両立は課題であった。本研究では、VSS を導入し、その両立を図るとともに、VSS 更新式の最適化を検討し

てきた。具体的な方法は以下の通りである。

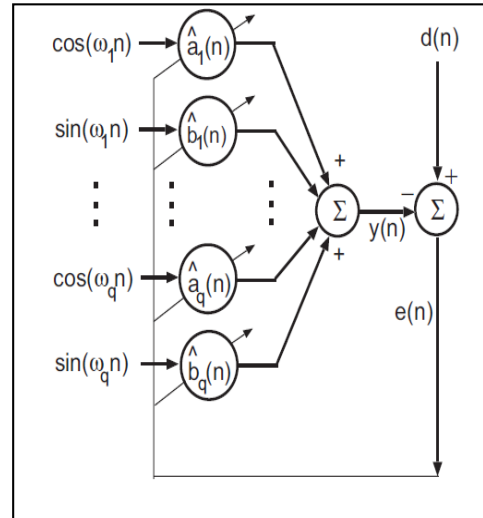


図 1. 適応フーリエ解析器の構成

- (1) 適応 FIR フィルタリング用に開発された主な VSS-LMS アルゴリズムを適応フーリエ解析の仕様に合わせて変形し、シミュレーションによりそれらの性能を詳細に比較検討する。
- (2) (1)で調べた各種 VSS-LMS アルゴリズムの特徴を分析し、実用的で統計性能が解析可能な VSS-LMS アルゴリズムを提案する。VSS 型アルゴリズムへの理解と VSS 最適化の準備を行う。
- (3) それまでの研究により得られた知見のもと、一般化した VSS 更新式を提案し、変分法を用いて、その最適化を行う。
- (4) VSS-LMS アルゴリズムの応用として、実振動信号や狭帯域能動騒音制御システムへの応用を行う。

4. 研究成果

- (1) まず、既存で知られている 7 種類の VSS-LMS アルゴリズムを適応フーリエ解析用に改変し、大量のシミュレーションにより、それらの性能を比較検討した。それによって得られた知見をもとに Simplified VSS-LMS (SVSS-LMS) アルゴリズムを提案し、その性能解析を行った。図 2 には SVSS-LMS と典型的な従来アルゴリズム VSS-LMS-A (詳細は次頁の雑誌論文(1)をご参照)との推定平均自乗誤差 (Mean squared error: MSE) 比較を示す。また、図 3 には提案アルゴリズムの定常 MSE の理論値とシミュレーションによる値との比較を示してい

る。提案法の有効性・優越性と統計解析の正当性が伺える。

- (2) 狭帯域 ANC システムへの応用として、提案した SVSS-LMS アルゴリズムを適用した。実騒音および 2 次経路を用いたシミュレーションを通して、その有効性を検証した。図 4 には下記の VSS 更新式

$$\mu(n+1) = \xi\mu(n) + \eta|e(n)|^r, r = 1, 2, \dots$$

を用いた ANC システムを大型工作機械の実騒音信号へ適用した場合の残音信号を示す。e(n)は適応解析器の誤算信号である。ξ は 1 以下で 1 に非常に近い定数であり、leaky LMS アルゴリズムの leakage factor に似ている。η は VSS の更新ペースを規定するもので、正数で小さい値をとる。明らかに r が大きくなれば、残音信号はより低く低減する。但し、その改善は r が 2 か 3 までとなる。

- (3) 提案した SVSS-LMS アルゴリズムを 2 次適応 IIR ノッチフィルタへ応用し、その統計解析を行うとともに、新たな狭帯域 ANC システムを提案した。
- (4) 既存の VSS 型アルゴリズムの VSS 更新式をもとに、一般化した更新式を導入し、定常状態の近傍において導出されたアルゴリズムの差分方程式や平均自乗誤差に対する最適化を、変分法を用いて展開し、最適な更新式を導出した。現在、それを用いた VSS-LMS アルゴリズムの性能検証や各種理論式の導出を継続している。
- (5) 本研究と関連する基礎研究として、2 次経路のオンライン推定を有する新たな狭帯域 ANC システムを提案した。このシステムでは、コントローラと 2 次経路推定用サブシステムの高速度において VSS-LMS アルゴリズムの応用が有望であり、その検討を行う予定である。

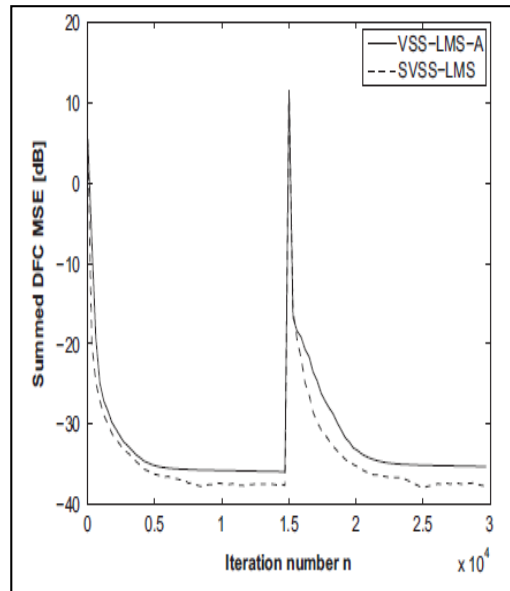


図 2： MSE の収束速度の比較（従来法：VSS-LMS-A (実線), 提案法:SVSS-LMS( 破線)）。

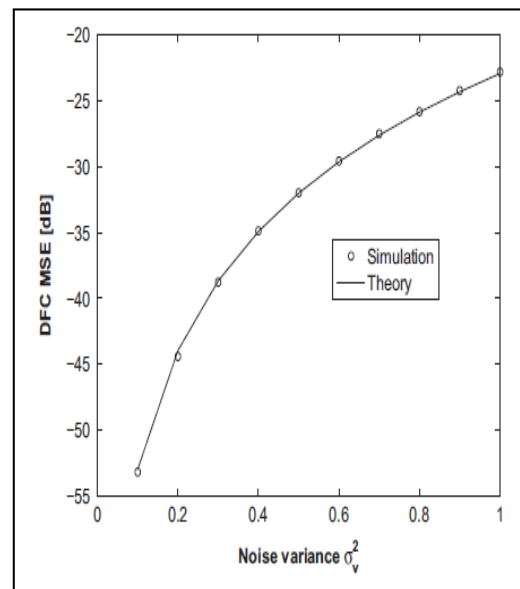


図 3： 定常 MSE の理論値とシミュレーション結果との比較（横軸：d(n)に含まれる加法的雑音の分散）。

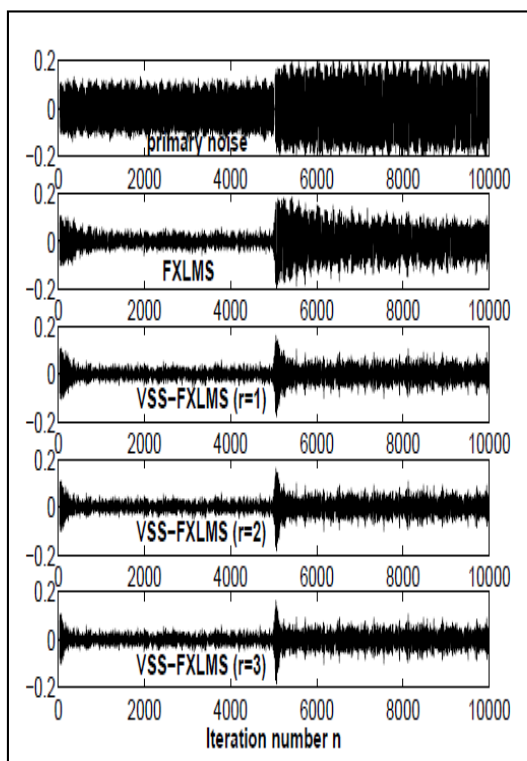


図4: 提案したVSS更新式を用いたVSS-FXLMSアルゴリズムを実騒音の抑制や低減のための狭帯域ANCシステムに応用した結果 (top: primary noise to be reduced by the ANC, 2nd: conventional fixed step-size FXLMS, 3rd: VSS-FXLMS with  $r=1$ , 4th: VSS-FXLMS with  $r=2$ , bottom: VSS-FXLMS with  $r=3$  )

#### 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)

[雑誌論文](計2件)

- (1) B. Huang, Y. Xiao, et al., "A simplified variable step-size LMS algorithm for Fourier analysis and its statistical properties," *Signal Process.*, 117, pp.69-81, 2015.
- (2) Y. Ma, Y. Xiao, "A new strategy for online secondary-path modeling of narrowband active noise control," *IEEE Trans Audio, Speech, Lang. Process.*, vol.25, no.2, pp.220-234, 2017.

[学会発表](計2件)

- (1) Y. Xiao, H. Zhang, and J. Liu, "A series of variable step-size FXLMS algorithms for narrowband active noise control," *ICSV24*, 7 pages, London, Jul. 2017.

- (2) Y. Xiao, Y. Ma, and B. Huang, "A simplified variable step-size gradient algorithm for IIR notch filtering: properties and application," *ICAMechS2017*, 5 pages, Dec. 2017. (Best paper award 受賞)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:  
 出願年月日:  
 国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:  
 取得年月日:  
 国内外の別:

[その他]  
 ホームページ等

#### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
肖業貴 (XIAO YEGUI)  
 県立広島大学経営情報学部教授  
 研究者番号: 50252325

研究者番号:

- (2) 研究分担者 ( )

研究者番号:

- (3) 連携研究者 ( )

研究者番号:

- (4) 研究協力者 ( )