

機関番号：11201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560410

研究課題名（和文）

ハイパー H_{∞} フィルタの最適化メカニズムの解明とその高速アルゴリズムの改良

研究課題名（英文）

Analysis of Optimization Mechanism of the Hyper H_{∞} Filter and Improvement of Its Fast Algorithm

研究代表者

西山 清 (NISHIYAMA KIYOSHI)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：10302051

研究成果の概要（和文）：収束性、追従性、および外乱に対するロバスト性に優れたハイパー H_{∞} フィルタの最適化メカニズムは十分に解明されて来なかった。本研究では、モデル集合と重み集合の中で従来の H_{∞} フィルタをさらに最適化する一般ハイパー H_{∞} フィルタリング問題を提案し、その解法からハイパー H_{∞} フィルタの最適化メカニズムを解明し、適応フィルタに対して新たな統一的な枠組みを提供した。また、その高速アルゴリズムの誤差解析をシステム論的に行い、数値的安定化法を提案した。

研究成果の概要（英文）：The hyper H_{∞} filter provided excellent convergence, tracking, and robust performances for system identification, but the mechanism of optimization in the hyper H_{∞} filter has not been analyzed sufficiently. This study has clarified its optimization mechanism by solving a generalized hyper H_{∞} filtering problem which further optimizes the H_{∞} filter over a set of models and norm weights, providing a unified framework to various adaptive algorithms. Also, the error propagation of the fast algorithm has been analyzed, which leads to a numerical stabilization method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学（細目番号5107）

キーワード：システム同定、 H_{∞} フィルタ、最適化、モデル集合、重み集合、高速アルゴリズム、誤差解析、数値的安定化

1. 研究開始当初の背景

ユビキタスコミュニケーション時代を迎え、遠隔会議システムなどにおける拡声通話のエコーキャンセラにおいて未知の時変システムの高速同定が益々重要となってい

るが、十分に満足の行く収束性、追従性およびロバスト性を持った技術は未だ確立されていない。通信系・音響系におけるシステム同定の場合、次のような点が特に問題となる。

1) 未知系がFIRシステムで近似され、かつ時変である。

2) 未知系への入力是有色性が非常に強い信号(音声)である。

3) 状態ベクトルの次元Nは大きい(数百から数千)、実時間処理が要求される。

一方、制御系では一般に未知系を時不変と仮定することが多く、また、未知系への入力も任意に選べ、状態ベクトルの次元も比較的小さい。

我々は、通信系・音響系のシステム同定において生じる上記諸問題に対処するため、時変システム同定のための新たなH_∞最適化手法(ハイパーH_∞フィルタ)を考案し、その高速アルゴリズム(高速H_∞フィルタ)を導出している。これはH_∞最適化に新たなパラダイムを与え、その高速アルゴリズムは次の特徴をもつ。1)アルゴリズムの計算量はO(N)である、2)非常に高い収束性能を実現できる、3)時変システムへの優れた追従性能が実現できる、4)最良の追従性能を与えるシステム雑音(あるいは忘却係数)をH_∞の意味で最適に決定できる、5)計算量O(N)でアルゴリズムの正当性(フィルタの存在性)を検証できる。

このH_∞最適化手法とその高速アルゴリズムは2004年5月にIEEE Trans. on Signal Processingに掲載され、その後、いくつかの進展が得られ、その成果は2005年にIEICE、2007年にIEEEにそれぞれ掲載されている。

一方、米国を中心にH_∞フィルタに関する研究は盛んに行われてきたが、追従性能を支配する忘却係数をH_∞の意味で(準)最適に決定できるH_∞フィルタは、我々が提案するハイパーH_∞フィルタを除けば私の知る限り他にない。ただ、その最適化のメカニズムは未だ解明されていなかった。

2. 研究の目的

我々が導出したハイパーH_∞フィルタは独特な状態方程式に基づいており、そのメカニズムは十分に解明されておらず、またその高速アルゴリズムである高速H_∞フィルタにも改善の余地が残されていた。本研究では、次の点を明らかにする。

(1)ハイパーH_∞フィルタは状態誤差依存性雑音をもつ状態方程式に基づいて導出されている。よって、まず第一に状態誤差依存性雑音をもつ状態方程式を伊藤確率微分方程式を用いて解析する。特に、状態誤差依存性雑音と忘却係数の関係を明らかにする。

(2)我々の最新の研究によりハイパーH_∞フィルタが、ある特殊なシステムのモデル集合の中での「モデル選択を伴う最適H_∞フィルタリング問題」の準最適解であることが分かり始めている。この点をより詳細に研究し、

ハイパーH_∞フィルタの最適化メカニズムを明らかにする。

(3)上記研究成果に基づいて高速H_∞フィルタのアルゴリズムを精査し、改良したアルゴリズムをエコーキャンセラに適用し、その効果を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、我々が先に導出したハイパーH_∞フィルタを、モデリングと最適化メカニズムの両面から理論的に解明し、その高速アルゴリズムの更なる改良を目指す。

(1)ハイパーH_∞フィルタの第一の特徴である状態誤差依存性雑音に基づく状態方程式について伊藤確率微分方程式を用いて解析する。これより、忘却係数と等価な働きをするシステム雑音の存在を明らかにすると共に、そのモデルの特性を明らかにする。

(2)従来のH_∞フィルタをシステムモデル集合と重み集合の中でさらに最適化する一般ハイパーH_∞フィルタリング問題を提案する。さらに、システムモデル集合と重み集合を特殊化し、問題を縮退化した後、その解を求める。これより、解領域を明らかにし、その領域内の解の性質を解析する。これによって、ハイパーH_∞フィルタの最適化のメカニズムを探る。

(3)高速H_∞フィルタの誤差伝搬モデルを導出し、その挙動を解析することによって数値的不安定要因を明らかにし、その解決策を探る。また、改良前後でのアルゴリズムの性能をDSP上で評価する。

4. 研究成果

本研究に関する研究成果を以下に示す。

(1)ハイパーH_∞フィルタは忘却係数ρと等価な状態誤差依存性雑音をもつ次の状態方程式に基づいて導出されている。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{w}_k$$

ただし、

$$\mathbf{G}_k \mathbf{G}_k^T = \chi(\gamma_f) \bar{\Sigma}_{k+1|k} = \frac{\chi(\gamma_f)}{\rho} \bar{\Sigma}_{k|k}$$

であり、χはχ(1)=1を満たす任意のγfの単調減少関数である。これに対応する連続時間状態方程式は、σw²=χ(γf)/ρのとき次の伊藤確率微分方程式によって表わされる。

$$d\mathbf{x}(t, \omega) = \mathbf{g}[t, \mathbf{x}(t, \omega)] d\mathbf{w}(t, \omega)$$

ただし、

$$\mathbf{g}[t, \mathbf{x}(t, \omega)] = \mathbf{x}(t, \omega) - \hat{\mathbf{x}}(t), \quad E\{(d\mathbf{w})^2\} = \sigma_w^2 dt$$

この確率微分方程式を満たす解は、伊藤の公式を用いて次のように得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \hat{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{x}(t_0) - \hat{\mathbf{x}}(t_0)) \\ &\quad \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\sigma_w^2(t-t_0) + [\mathbf{w}(t) - \mathbf{w}(t_0)]\right\} \\ &= \hat{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{x}(t_0) - \hat{\mathbf{x}}(t_0)) \\ &\quad \cdot \underbrace{\exp\left\{-\frac{1}{2}\sigma_w^2(t-t_0)\right\}}_{\text{減衰項}} \cdot \underbrace{\exp\{\mathbf{w}(t) - \mathbf{w}(t_0)\}}_{\text{増大項}} \end{aligned}$$

これより、状態 \mathbf{x} の平均値からのゆらぎは確定的に減衰する項と確率的に増大する項の積によって表わされることがわかる。これが忘却係数の状態空間における確率表現に対応する。

(2) 従来の H_∞ フィルタリング問題を現実の問題に適用しようとする次の二つの問題が生じる。

① 対象を状態空間モデルで表現する際、状態の動特性を支配する F_k, G_k を如何に(近似的にも)決定するかは大きな問題である。これは対象の不確定性、あるいは客観的な不確定性である。

② 最大エネルギーゲインの重み付きノルムにおける重み行列を決定する必要がある。これは、ユーザー(設計者)が決めるべきパラメータであり、主体的な不確定性である。

この二つの不確定性を解消する一つの方策として、状態の生成過程は未知であるが、その生成モデルの集合は既知と仮定した状態空間モデル

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{w}_k, \quad \{\mathbf{F}_i, \mathbf{G}_i\}_{i=0}^k \in \mathcal{C}_S \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad \mathbf{v}_k = \mathbf{L}_k \mathbf{x}_k \end{aligned}$$

に対して、次の一般ハイパー H_∞ フィルタリング問題を提案した。

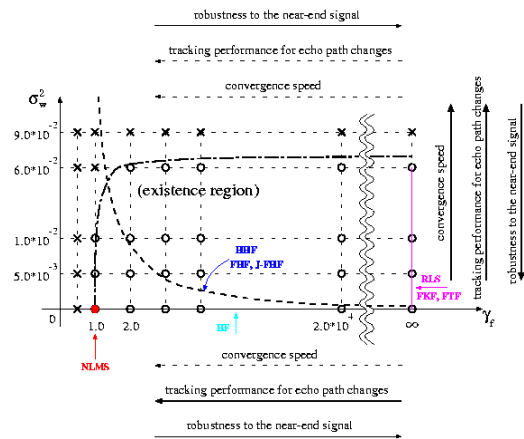
$$\min_{\{\Sigma_w, \Sigma_v, \Sigma_x\} \in \mathcal{C}_\Sigma} \left\{ \min_{\{\mathbf{F}_i, \mathbf{G}_i\} \in \mathcal{C}_S} \left(\min_{\mathcal{F}_f} \sup_{\mathbf{x}_0, \{\mathbf{w}_i\}, \{\mathbf{v}_i\}} \frac{\sum_{i=0}^k \|e_{f,i}\|_{\Sigma_i}^2}{\|\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0\|_{\Sigma_0}^2 + \sum_{i=0}^k \|\mathbf{w}_i\|_{\Sigma_w}^2 + \sum_{i=0}^k \|\mathbf{v}_i\|_{\Sigma_v}^2} \right) \right\}$$

この問題は従来の H_∞ フィルタをシステムモデル集合と重み集合の中でさらに最小化している。

この最適化問題は、ある特殊なモデル集合と重み集合 ($\sigma_w^2 = (1-\rho)/\rho$ でパラメータ化された集合) を考えることにより、次のように縮退する。

$$\min_{\sigma_w^2 \in \mathbb{R}_+} \left\{ \min_{\mathcal{F}_f} \sup_{\mathbf{x}_0, \{\mathbf{w}_i\}, \{\mathbf{v}_i\}} \frac{\sum_{i=0}^k \|e_{f,i}\|_{\Sigma_i}^2 / \rho}{\|\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0\|_{\Sigma_0}^2 + \sum_{i=0}^k \|\mathbf{w}_i\|_{\Sigma_w}^2 + \sum_{i=0}^k \|\mathbf{v}_i\|_{\Sigma_v}^2} \right\}$$

これは従来の H_∞ フィルタと同様に、準最適化問題を考えることにより、近似的に解ける。解領域(下図の一点鎖線の内側)のそれぞれの解(○印)は異なった収束性、追従性、近端話者信号に対するロバスト性をもっており、ハイパー H_∞ フィルタ(HHF)はこれら3つの性質のトレードオフをとった解を与えていることがわかった(下図の破線)。さらに、従来の NLMS アルゴリズムや RLS アルゴリズムもハイパー H_∞ フィルタリング問題の解であるがわかった。すなわち、NLMS アルゴリズムは $(\gamma f, \sigma_w^2) = (1, 0)$ の解であり、忘却係数付き RLS アルゴリズムは直線 $\gamma f = \infty$ 上の解である。



上図において、HFは従来の H_∞ フィルタを表し、FHFとJ-FHFはハイパー H_∞ フィルタの $O(N)$ の高速アルゴリズム、FKFとFTFはRLSアルゴリズムの $O(N)$ の高速アルゴリズムをそれぞれ表す。

これより、本研究が適応フィルタに対して新たな統一的な枠組みを提供できたと考えている。

今後、本研究結果が遠隔会議システム、高臨場感音場再生システム、アクティブ騒音制御などに貢献することが期待される。

(3) 高速 H_∞ フィルタの誤差伝搬モデルを解析した結果、入力信号の後方線形予測係数の誤差ダイナミックスの固有値が必ずしも1以下にならず、不安定になる可能性があることがわかった。この問題を解決するため、数値誤差をフィードバックする安定化法を提案し、その有効性をDSP上で検証した。

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1件)

① Tomonori Katsumata, Kiyoshi Nishiyama and Katsuaki Satoh : Error Analysis and Numerical Stabilization of the Fast H_{∞} Filter, IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E93-A, 6, pp.1153-1162, 2010, 査読有

[学会発表] (計9件)

① 西山 清, 勝俣友紀 : ハイパー H_{∞} フィルタリング問題の解の性質, 電子情報通信学会第25回信号処理シンポジウムA1-2, 2010.11.24~26 (奈良女子大学)

② Tomonori Katsumata, Kiyoshi Nishiyama, Haruo Matsuzuka, and Katsuaki Satoh : Implementation of the Fast H_{∞} Filter Based on Fixed-Point Arithmetics, Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP2010), Beijing, China, 2010.10.24~28

③ 西山 清, 勝俣友紀 : Numerical Stabilization of the Fast H_{∞} Filter, 計測自動制御学会 第39回制御理論シンポジウム, 2010.9.27~9.29 (ホテルコスモスクエア国際交流センター, 大阪)

④ Kiyoshi Nishiyama : Hyper H_{∞} Filtering Problem and its Solutions, Proceedings of 10th International Conference on Information Science, Signal Processing, and their Applications, (ISSPA 2010), 0-7, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010.5.10~13

⑤ 西山 清 : ハイパー H_{∞} フィルタの最適化のメカニズム - ハイパー H_{∞} フィルタリング問題とその解法, 計測自動制御学会 第38回制御理論シンポジウム, 2009.9.14~16 (ホテルコスモスクエア国際交流センター, 大阪)

⑥ 勝俣友紀, 西山 清, 佐藤克昌 : 高速 H_{∞} フィルタの数値的安定化とDSPへの実装, 計測自動制御学会東北支部45周年記念学術講演会, 2009.9.7 (岩手大学)

⑦ 西山 清, 箱石直士, 勝俣友紀, 佐藤克昌 : 高速 H_{∞} フィルタのロバスト性とエコーキャンセラへの効果, 電子情報通信学会 総合大会, A-4-27, 2009.3.18 (愛媛大学)

⑧ 西山 清 : ハイパー H_{∞} フィルタリング問題とその解法, Proceedings of the IEICE 23th SIP Symposium, A1-4, 2008.11.12~14 (金沢)

⑨ T. Katsumata, N. Hakoishi, K. Nishiyama, K. Satoh, and T. Suzuki : An H_{∞} Echo Cancellation with Noise Suppressor, Proceedings of International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology (SICE Annual Conference), 1C03-5, Tokyo, 2008.8.20~22, (電気通信大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西山 清 (NISHIYAMA KIYOSHI)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号 : 10302051