

CT-20-001~040

電気学会研究会資料

The Papers of Technical Meeting on
"Control", IEE Japan

制御研究会

CT-20-001~040

2020年1月4・5日

一般社団法人電気学会
The Institute of Electrical Engineers of Japan
東京都千代田区五番町 6-2

電気学会研究会資料目次

制御研究会

テーマ「制御理論・制御技術一般（スマートシステムと制御技術シンポジウム 2020）」

CT-20-001	FRIT における効率的な制御パラメータ発見のための粒子群最適化手法の改良 ◎佐伯雄飛,林田智弘,西崎一郎,関崎真也,西木直哉（広島大学）	..... 1
CT-20-002	「一次遅れ+むだ時間」系を用いた学習者モデルとニューラルネットワークを用いた学習者分類手法の構築 ◎谷本祐輔,林田智弘,山本 透,脇谷 伸,木下拓矢,西崎一郎,関崎真也（広島大学）	..... 7
CT-20-003	制御器性能を評価可能なデータ駆動型制御系の一設計 ○木下拓矢,山本 透（広島大学）	..... 13
CT-20-004	IoTプラットフォーム上でのPIDパラメータ適応再調整 ○田中雅人（アズビル）	..... 17
CT-20-005	サブデータベースのオンライン生成機構を有するデータベース駆動型制御系の一設計 ◎中西宏樹,脇谷 伸,山本 透（広島大学）	..... 23
CT-20-006	自動制御理論の教育における課題と展望 ○石橋政三（チノー）	..... 27
CT-20-007	非線形系に対するモデル規範型適応制御系へのカーネルトリックの応用 クオギルドヴィコ,○大森浩充（慶應義塾大学）	..... 31
CT-20-008	連続時間多入出力システムに対する適応予測フィードフォワード入力を有する出力フィードバック制御 ◎牧本雄介,水本郁朗（熊本大学）	..... 37
CT-20-009	逐次最適化アルゴリズムを用いた超局所モデルに基づく適応PID制御系の設計 ◎芦田洋一郎,片山 優（松江工業高等専門学校）	..... 43
CT-20-010	データ駆動型制御器設計法と機械学習に基づいたゲインスケジュールド力制御器の設計法の提案 ◎辻井祥太郎,弓場井一裕,矢代大祐,駒田 諭（三重大学）	..... 47
CT-20-011	周波数領域における勾配推定を用いた定値制御系に対するIFT ○増田士朗（首都大学東京）	..... 53
CT-20-012	周波数応答を用いたゲイン変動にロバストな非整数次制御器設計法 ◎堀田 敦,弓場井一裕,矢代大祐,駒田 諭（三重大学）	..... 55

CT-20-013	近似モデルマッチング誤差を用いたデータ駆動型状態フィードバックゲイン更新 ○松井義弘（福岡工業大学） 綾野秀樹（東京工業高等専門学校） 増田土朗（首都大学東京） 中野和司（電気通信大学）	..... 61
CT-20-014	アリコロニー最適化を用いた多出力サポートベクトル回帰による3-DOFマイクロハンドのモデリング ◎川村修平, 鄧明聡, 野下裕市（東京農工大学） 脇元修一（岡山大学）	..... 67
CT-20-015	ネットワーク通信を介した粒子フィルタに基づく推定の計算時間短縮 ○中村幸紀, 東山和司, 平田健太郎, 岡野訓尚（岡山大学）	..... 73
CT-20-016	回転型柔軟アームの極と零点にもとづくモデルの低次元化 ○今井純, 西岡由恭, 出射治, 高橋明子, 船曳繁之（岡山大学）	..... 77
CT-20-017	円筒形状の自動外観検査システムの検討 ◎安達和音, 名取隆廣, 相川直幸（東京理科大学）	..... 81
CT-20-018	交差項を考慮した一般化スプライン非線形適応フィルタの検討 ◎齋藤柊二, 杉田泰則（長岡技術科学大学）	..... 85
CT-20-019	ウェーブレット変換に基づくMFCC動的特徴量を用いた楽器同定 ◎杉本絵美, 杉田泰則（長岡技術科学大学）	..... 91
CT-20-020	IoTセンシングと深層学習を用いたスマート酪農システムの試み ○相川直幸, 餌取直輝, 名取隆廣（東京理科大学） 鍋西久（北里大学）	..... 97
CT-20-021	IoTエコシステムの観点からの制御技術教育 ○田中雅人（アズビル）	..... 101
CT-20-022	工学部学生のための制御実験に関する一考察 都倉佑悟, 保井良太, ○佐藤孝雄, 川口夏樹, 荒木望, 小西康夫（兵庫県立大学）	..... 105
CT-20-023	中学校技術科におけるQRコードを利用した学習支援型授業の提案 ◎椎葉柚介（東京学芸大学） 斉藤与志朗（小金井市立小金井第一中学校） 今井慎一（東京学芸大学）	..... 109
CT-20-024	掃き掃除の評価に関する基礎研究 ◎玉井輝之（愛媛大学） 藤原成隆（呉工業高等学校） 川田和男（広島大学）	..... 111
CT-20-025	Database-driven control of a two-joint robot ◎劉樞, 洪水雅俊, 山本透（広島大学）	..... 113
CT-20-026	課題解決的な活動を目指す計測制御学習と教員研修への展開 ○大西義浩（愛媛大学） 安西大地（松山市立高浜中学校） 玉井輝之, 中村惇哉, 森慎之助（愛媛大学）	..... 117

CT-20-027	入出力データを用いた閉ループ応答の推定と制御器の再調整 ◎酒徳大雅,弓場井一裕,矢代大祐,駒田 諭 (三重大学)	..... 119
CT-20-028	自動二輪車乗員の視線と頭部位置計測 ◎落合俊輝,藤江遼河,本多将和,片山 優 (松江工業高等専門学校)	..... 123
CT-20-029	3Dプリンタにおける造形方向に関する実験的検討 ○今井慎一,岸本 航 (東京学芸大学)	..... 127
CT-20-030	小学生対象の工作教室用ラインレースロボットの開発 ○鈴木裕之,村井啓太 (広島大学) 藤原成隆 (呉工業高等学校) 川田和男 (広島大学)	..... 129
CT-20-031	広島大学におけるジュニアドクター育成塾の取り組み ○川田和男,鈴木裕之,長松正康 (広島大学)	..... 131
CT-20-032	データを用いた H_{∞} 多変数制御器の設計 ◎森田晃史,弓場井一裕,矢代大祐,駒田 諭 (三重大学)	..... 133
CT-20-033	状態空間法を用いた一般化最小分散制御系の一考察 ○矢納 陽 (川崎医療福祉大学)	..... 139
CT-20-034	2位相型ロックインアンプによるDPOAEレベル推定 ◎岸駿太郎,杉田泰則 (長岡技術科学大学)	..... 141
CT-20-035	文楽ロボット左腕における予備動作を用いた同期制御に関する一考察 ○滝 康嘉,松本彩那,山崎容次郎 (香川高等専門学校) 逸見知弘 (川崎医療福祉大学)	..... 147
CT-20-036	高齢者と若年者の立ち動作に着目した立ち座り支援機構の評価 ◎上松理子,玉井太一,十河宏行 (香川高等専門学校) 逸見知弘 (川崎医療福祉大学) 正箱信一郎 (香川高等専門学校)	..... 151
CT-20-037	自動二輪車ライダーの操縦計測 ◎藤江遼河,本多将和,片山 優 (松江工業高等専門学校)	..... 157
CT-20-038	外乱オブザーバを用いた制御対象の0型化による空気圧サーボの設計 ○高岩昌弘,實生雅之,松井保子 (徳島大学)	..... 161
CT-20-039	クレーン振れ角検出を目的とした音の到来時間差推定に関する考察 ◎浜本裕貴,中本昌由,山本 透 (広島大学)	..... 165
CT-20-040	機械学習を用いたスパースフィルタの設計 ◎井谷太郎,中本昌由 (広島大学) 相川直幸 (東京理科大学)	..... 171

協 賛 データ駆動制御とその産業応用調査専門委員会
制御・信号処理の技術融合と新応用分野調査専門委員会
AIに基づく安全制御・故障診断と耐性設計調査専門委員会
制御工学および機械学習の相互強化とその応用展開調査専門委員会
人間支援システムのための情報・制御調査専門委員会
PID制御のIoTエコシステムに関する調査専門委員会
技能データの計測・評価・活用に関する調査専門委員会
実践から学ぶ制御技術教育に関する調査専門委員会

非線形系に対するモデル規範形適応制御系への カーネルトリックの応用

クオギ ルドヴィコ 大森 浩充* (慶應義塾大学)

Application of Kernel Trick to Model Reference Adaptive Control System
for Non-Linear Systems
Cuoghi Ludovico and Hiromitsu Ohmori* (Keio University)

Abstract: Different control systems have been developed during the years and among them the Adaptive Control ones focus on systems affected by uncertainties or changes during their functioning. A well-known adaptive control system in literature is the Model Reference Adaptive Control (MRAC). The MRAC aims to nullify the error between the real plant, affected by uncertainties and changes, and a Model Reference, which represents the ideal model of the plant. However, MRAC design is based on the hypothesis of a Linear system and so when applied to Nonlinear systems, no performance is guaranteed. The aim of this research is to design a new Adaptive Control System based on the MRAC that can guarantee the Plant output to follow the Reference Model output even if the Plant is a nonlinear system. To achieve this goal, the Kernel Trick is implemented in the novel Adaptive System's control law to generate the control input for the nonlinear system.

キーワード: モデル規範形適応制御系, カーネルトリック, 非線形系
(Model reference adaptive control systems (MRACS), kernel trick, non-linear systems)

1. はじめに

望まれる閉ループ系の特性を規範モデルとして表現し、未知パラメータを有する線形時不変システムの出力をこの規範モデルの出力に一致させる制御方策をモデル規範形適応制御 (model reference adaptive control system; MRACS) といい、図 1 のような構造をもつ。

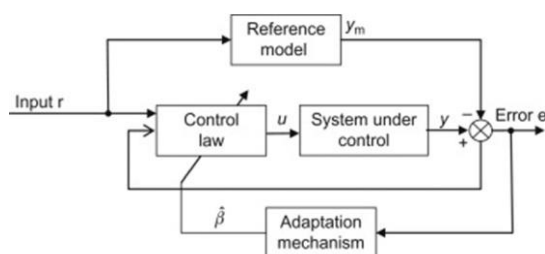


図 1 モデル規範形適応制御系 (MRACS)

一般の MRACS が対象とする制御対象は線形である必要があるが、非線形制御対象への拡張も研究されている。[1] は、1 次の非線形制御対象に対する MRACS で、未知非線形項を可調節パラメータとして推定している。[2] は、任意次数の 1 次か 2 次の相対次数の出力非線形項 (上限既知)

を有する系に対する MRACS であり、公称制御対象の最小位相性を仮定することでハイゲインフィードバックとロバスト適応則により制御目的を達成している。[3] は、MRACS をベースにした Fuzzy ロジックにより非線形項を補償している。[4] は、ニューロ制御により非線形項を補償している。[5] は、変構造制御と MRACS を融合させた手法である。これらはどれも非線形項を加法的にモデル化誤差として扱っている点に特徴がある。

一方、確率統計分野では、非線形情報や高次モーメントの取り扱いを容易にするため、データを高次元の特徴空間に非線形写像するデータ解析の方法論が提案されており、クラスタリング、主成分分析、相関分析、線形回帰分析、線形判別 (識別) 問題などに応用が進んでいる [6]-[12]。また、このカーネル法を信号処理や制御に取り入れた研究も進んでいる [13]-[19]。

本研究では、データベクトルを特徴空間へ写像し、線形手法によってデータの非線形情報や高次モーメントを少ない計算量で抽出するこのできるカーネルトリックを利用することによって、線形 MRACS の対象システムを非線形系に拡張することを考える。ここで得られた制御則では、いわゆる可調整パラメータは存在せず、従来のパラメトリック適応制御に対してノンパラメトリック適応制御系とも呼べ

るものとなっている。

2. カーネル法とカーネルトリック

カーネル法とは非線形情報や高次モーメントの扱いを容易にするため、データを高次元の特徴空間に非線形写像(変換)する方法論である。データ空間に属する非線形性を持つデータベクトルを ϕ という関数を用いて高次元の特徴空間(feature space)に写像することで、高次の空間上で線形近似を行うことができるようになる。この空間で非線形関数を推定し、高次元空間から元の空間に戻すと非線形性を持つデータを線形手法で近似することができる。ただし、このときデータの次元が非常に大きくなることから計算量は膨大になってしまう。この問題を解決するのが写像を再生核ヒルベルト空間への写像とすることによるカーネルトリックである。アプリケーション内の計算に含まれる内積計算を以下のようなカーネル関数によって行うことにより計算量を抑えることができる。

$$k(u, u') = \langle k(u, \cdot), k(u', \cdot) \rangle = \langle \phi(u), \phi(u') \rangle$$

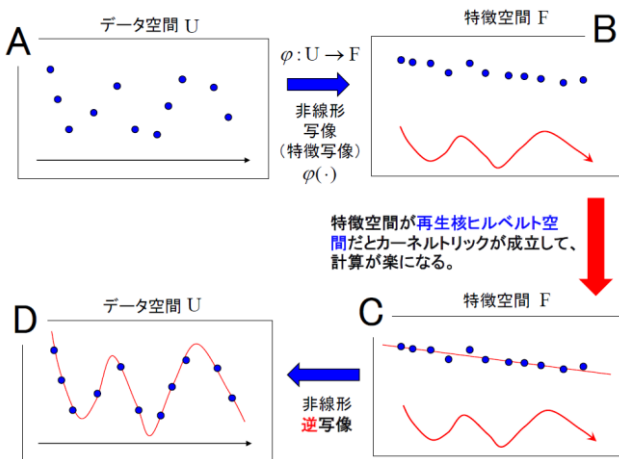


図2 特徴空間への写像

図2のようにデータ空間に属するデータベクトルを特徴空間と呼ばれる再生核ヒルベルト空間に写像し、解析しやすい(線形)手法を適用して、データの非線形情報や高次モーメントを抽出する方法をカーネル法という。このとき、高次元の特徴空間における複雑な計算をせずに、カーネルトリック(内積という簡単な関数の計算に変形すること)を用いて、高次元特徴空間の内積を直接計算することができる。カーネル関数としては、下記が良く用いられている。

多項式カーネル: $k(x, y) = (c + x^T y)^d, c > 0, d \in \mathbb{N}$
 ガウシアンカーネル: $k(x, y) = \alpha \exp(-\beta \|x - y\|^2), \alpha > 0, \beta > 0$
 シグモイドカーネル: $k(x, y) = \tanh(a + bx^T y), a, b > 0$
 ユークリッド内積(線形カーネル): $k(x, y) = x^T y$

3. 問題設定

ここでは、カーネル MRACS を説明するために、まず線形 MRACS を説明する。つぎの1入出力連続時間線形時不変の制御対象を考える。

$$(\text{制御対象}) \quad A(s)y(t) = kB(s)u(t) \quad (1)$$

ただし、

$$A(s) := s^n + \sum_{i=0}^{n-1} a_i s^i, \quad B(s) := s^m + \sum_{i=0}^{m-1} b_i s^i \quad (2)$$

ここで、 $y \in \mathbb{R}$ は観測可能な制御量、 $u \in \mathbb{R}$ は操作量、 $\{k, a_i, b_i\}$ は未知一定のパラメータである。(1)式は線形系だが、後の説明で非線形写像を用いて考える制御対象を非線形に拡大する。ここで考える問題は、制御対象の出力 $y \in \mathbb{R}$ をつぎの規範モデルの出力 $y_M \in \mathbb{R}$ に一致させる制御入力を適応的に合成することである。

$$(\text{規範モデル}) \quad A_M(s)y(t) = k_M B_M(s)r(t) \quad (3)$$

ただし、

$$A_M(s) := s^{n_M} + \sum_{i=0}^{n_M-1} a_{M,i} s^i, \quad B_M(s) := s^{m_M} + \sum_{i=0}^{m_M-1} b_{M,i} s^i \quad (4)$$

ここで、 $y_M \in \mathbb{R}$ は規範出力、 $r \in \mathbb{R}$ は規範入力である。

ここで、つぎの構造に関する仮定を設ける。仮定(A1)~(A3)は制御対象、仮定(A4)~(A6)は規範モデルに関する仮定である。

- (A1) 制御対象の相対次数 $\rho := n - m \geq 1$ とシステム次数 n は既知で、 $\{A(s), B(s)\}$ は既約である。
- (A2) $B(s) = 0$ の解はすべて複素左半平面のみに存在する(最小位相推移系)。
- (A3) 高周波ゲイン k の符号は既知である。一般性を失うことなくここでは、 $k > 0$ である。
- (A4) 規範モデルの伝達関数の分母多項式 $A_M(s)$ は安定多項式である。
- (A5) 規範入力 r は一様有界かつ区分的連続信号である。
- (A6) 規範モデルの相対次数 $\rho := n_M - m_M$ と規範モデルの相対次数 $\rho_M := n_M - m_M$ との間に $\rho_M \geq \rho$ が成立する。

4. 線形 MRACS の設計

次数の定まったつぎの2つの安定な多項式を設計する。

$$C(s) := s^\rho + \sum_{i=0}^{\rho-1} c_i s^i, \quad H(s) := s^{n-1} + \sum_{i=0}^{n-2} h_i s^i \quad (5)$$

ここで、 $H(s)$ は $n-1$ 次元の最小次元観測器の多項式に対応することがわかる。これらの設定された多項式を用いて、

つぎの Egardt 恒等式の解 $\{R(s), S(s)\}$ が一意に存在することに着目する。

$$(\text{Egardt 恒等式}) \quad C(s)H(s) = A(s)R(s) + kS(s) \quad (6)$$

ただし、

$$R(s) := s^{\rho-1} + \sum_{i=0}^{\rho-2} r_i s^i, \quad S(s) := \sum_{i=0}^{n-2} s_i s^i \quad (7)$$

(6)式の Egardt 恒等式と(1)式の制御対象を連立させると、つぎのような制御対象の別表現を得る。

$$C(s)y(t) = k \left[u(t) + \frac{R_B(s)}{H(s)} u(t) + \frac{S(s)}{H(s)} y(t) \right] \quad (8)$$

ここで、 $R_B(s) := R(s)B(s) - H(s) := \sum_{i=0}^{n-2} r_{Bi} s^i$ である。さらに、

追従誤差を $e(t) := y(t) - y_M(t)$ と定義すると、

$$\begin{aligned} e(t) &:= y(t) - y_M(t) \\ &= \frac{k}{C(s)} \left[u(t) + \frac{R_B(s)}{H(s)} u(t) + \frac{S(s)}{H(s)} y(t) \right] - y_M(t) \\ &= \frac{k}{C(s)} \left[u(t) + \frac{R_B(s)}{H(s)} u(t) + \frac{S(s)}{H(s)} y(t) - \frac{1}{k} C(s) G_M(s) r(t) \right] \end{aligned}$$

となる。このとき、

$$\theta \triangleq \left[\frac{1}{k}, r_{B0}, \dots, r_{B(n-2)}, s_0, \dots, s_{n-1} \right]^T \in \mathfrak{R}^{2n} \quad (9)$$

$$\zeta(t) \triangleq \left[G_M C r, \frac{-1}{H} u, \dots, \frac{-s^{n-2}}{H} u, \frac{-1}{H} y, \dots, \frac{-s^{n-1}}{H} y \right]^T \quad (10)$$

と定義すると、

$$e(t) = \frac{k}{C(s)} \left[u(t) - \theta^T \zeta(t) \right] \quad (11)$$

を得る。さらに、確定性等価原理 (certainty equivalence principle) に基づいて制御入力をつぎのように発生させる。

$$(\text{制御則}) \quad u(t) = \hat{\theta}^T(t) \zeta(t); \quad \hat{\theta}(t) \text{ は } \theta \text{ の推定値} \quad (12)$$

とすれば、つぎの誤差方程式を得る。

$$e(t) = \frac{k}{C(s)} \left[\tilde{\theta}^T(t) \zeta(t) \right] \quad (13)$$

ここで、 $\tilde{\theta}(t) := \hat{\theta}(t) - \theta$ はパラメータ誤差である。(13)式に基づいてパラメータ適応則を導出するためには、パラメータ誤差 $\tilde{\theta}(t)$ から追従誤差 $e(t)$ までの伝達関数 (誤差伝達関数という) が強正実であることが必要であり、強正実でない場合には何らかの手法により強正実化する必要がある。ここでは、拡張誤差信号による強正実化法により適応則を導出することを考える。

未知パラメータ θ が一定値であることに着目すると、(13)式は次のように書くことができる。

$$e(t) = \frac{k}{s + \lambda} \left[\frac{1}{C_1(s)} \left[\hat{\theta}^T(t) \zeta(t) \right] - \theta^T \frac{1}{C_1(s)} [\zeta(t)] \right] \quad (14)$$

ただし、 $\lambda > 0$ であり、 $C_1(s)$ は $C(s) = (s + \lambda)C_1(s)$ なる安定な $\rho-1$ 次の多項式である。(14)式の左辺の追従誤差は入手

可能だが右辺は合成できない。 θ を $\hat{\theta}(t)$ に置き換えたつぎの補助信号は発生させることができる。

$$\hat{e}(t) = \frac{k}{s + \lambda} \left[\frac{1}{C_1(s)} \left[\hat{\theta}^T(t) \zeta(t) \right] - \hat{\theta}^T(t) \frac{1}{C_1(s)} [\zeta(t)] \right] \quad (15)$$

これを用いて拡張誤差信号を $\varepsilon(t) = e(t) - \hat{e}(t)$ と定義すると、 $\varepsilon(t)$ は次式を満足することがわかる。

$$\varepsilon(t) = \frac{k}{s + \lambda} \left[\tilde{\theta}^T(t) \xi(t) \right] = W(s) \left[\tilde{\theta}^T(t) \xi(t) \right] \quad (16)$$

ここで、 $\xi(t) = C_1^{-1}(s) \zeta(t)$ 、 $W(s) = k(s + \lambda)^{-1}$ である。

(16)式における誤差伝達関数は $W(s) = k(s + \lambda)^{-1}$ となり、強正実化されている。強正実化のメカニズムは、(14)-(16)式から、非強正実関数の部分 $C_1^{-1}(s) \hat{\theta}^T(t) \zeta(t)$ をフィードフォワードで打ち消すことにより実現されていることがわかる。

次に、(16)式に基づいて、適応則を導出するため、つぎのリアプノフ関数の候補を考える。

$$V(\varepsilon, \tilde{\theta}) = z^T(t) P z(t) + \tilde{\theta}^T(t) \Gamma^{-1} \tilde{\theta}(t) \quad (17)$$

ただし、 $\Gamma = \Gamma^T > 0$ は適応ゲイン、 z は $W(s) = c^T(sI - A)^{-1}b$ なる最小実現の状態変数であり、 $W(s)$ が強正実関数であるので、 $PA + A^T P = -Q$ 、 $Pb = c$ を満足する $P = P^T > 0$ 、 $Q = Q^T > 0$ が存在する。(17)式の解軌道に沿った時間微分は

$$\begin{aligned} \dot{V}(\varepsilon, \tilde{\theta}) &= 2z^T P \dot{z} + 2\tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} = 2z^T P \left(Az + b \tilde{\theta}^T \xi \right) + 2\tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \\ &= -z^T Q z + 2\tilde{\theta}^T \left[\xi z^T P b + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \right] = -z^T Q z + 2\tilde{\theta}^T \left[\xi \varepsilon + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

となり、

$$(\text{適応則}) \quad \frac{d}{dt} \hat{\theta}(t) = \frac{d}{dt} \tilde{\theta}(t) = -\Gamma \xi(t) \varepsilon(t) \quad (19)$$

とすれば、 $\dot{V} = -z^T Q z < 0$ が得られ、最終的に $e(t) \rightarrow 0$ が達成される。誤差伝達関数を強正実化した後に、適応則によるループを閉じると図3が得られる。図3から適応則の仕組みが1型の内部原理にあることと、双線形性の補償のために出口で ξ の乗算が行われていると解釈ができる。

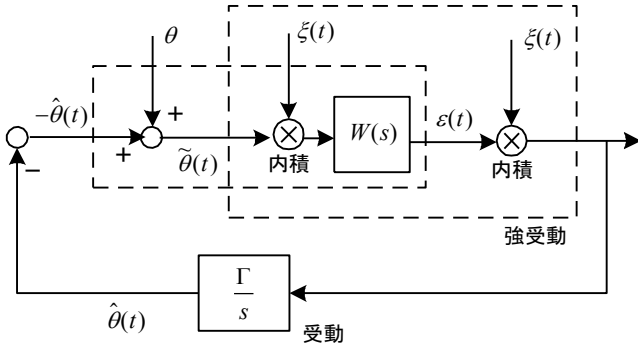


図3 適応則の仕組み

拡張誤差信号を用いた強正実化手法では、適応則を駆動する誤差信号が追従誤差そのものではなく、拡張誤差という間接的な信号であることから、過渡特性の改善のための適応ゲイン Γ の設定が難しい追従誤差を直接駆動信号として利用できる手法が提案されている(高階調整法[20]とバックステッピング手法[21])。これらをカーネル法の利用についても考察することができる。

5. モデル規範形適応制御系のカーネル法による非線形系への拡張

適応則(19)式で、可調整パラメータの初期値を零、つまり、 $\hat{\theta}(0) = 0$ とすると、

$$\hat{\theta}(t) = -\int_0^t \Gamma \xi(\tau) \varepsilon(\tau) d\tau = -\int_0^t \xi_r(\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \quad (20)$$

のように積分型 (I 調整則) で表現できる。ここで、 $\xi_r(t) := \Gamma \xi(t)$ と定義した。(12)式の制御則から、

$$u(t) = \hat{\theta}^T(t) \zeta(t) = \zeta^T(t) \hat{\theta}(t) = -\int_0^t \zeta^T(t) \xi_r(\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \quad (21)$$

を得る。この段階で可調整パラメータが消去され、(21)式はノンパラメトリック適応制御則となっていることがわかる。さらに、ここで非線形系の拡張として、回帰ベクトル $\zeta(t)$ とその回帰ベクトルをフィルタに通した(ゲイン付)信号ベクトル $\xi(t)$ を特徴写像 $\phi[\cdot]$ に通して非線形化する、つまり、

$$\zeta(t) \rightarrow \phi[\zeta(t)], \quad \xi_r(t) \rightarrow \phi[\xi_r(t)] \quad \xi(t) \quad (22)$$

とすると、(21)式のノンパラメトリック適応制御則は、

$$u(t) = -\int_0^t \phi[\zeta^T(t)] \phi[\xi_r(\tau)] \varepsilon(\tau) d\tau \quad (23)$$

のようになる。これが非線形系に対するカーネル適応制御則である。ここで、第2章で述べたカーネルトリック

$$\phi[\zeta^T(t)] \phi[\xi_r(\tau)] = \kappa(\zeta(t), \xi_r(\tau)) \quad (24)$$

を用いると、(23)式は、最終的につぎのように表現できる。

$$u(t) = -\int_0^t \kappa(\zeta(t), \xi_r(\tau)) \varepsilon(\tau) d\tau \quad (25)$$

例えば、多項式カーネルを用いた場合には、

$$u(t) = -\int_0^t (c + \zeta^T(t) \xi_r(\tau))^d \varepsilon(\tau) d\tau \quad (26)$$

となり、ガウシアンカーネルを用いた場合には、

$$u(t) = -\int_0^t \alpha \exp(-\beta \|\zeta(t) - \xi_r(\tau)\|^2) \varepsilon(\tau) d\tau \quad (27)$$

となる。

(19)式の適応則では、拡張誤差信号を小さくする方向に可調整パラメータが調節されている。拡張誤差信号に含まれる成分が、(拡張誤差信号)=(パラメータ誤差の項)+(外乱の項)+(モデル化誤差の項)+(初期値誤差項)のように表現できるとき、適応則は可調整パラメータを変化させて(パラメータ誤差の項)を小さくするのであるから、拡張誤差信号の成分の中では(パラメータ誤差の項)が支配的であればあるほど調整効果が顕著になる。しかし、外乱やモデル化誤差が存在し、(パラメータ誤差の項)が相対的に小さくなると、可調整パラメータはモデル化誤差や外乱などで真値から外れる方向へドリフトされ、閉ループ系の不安定性を招くことになる。特に、時不変線形の制御系では生じない不安定性が生じることが報告されている(たとえば、漸近的にゼロに収束する外乱に対しても、可調整パラメータが発散することがある)。

対策としては、(1)拡張誤差信号の(パラメータ誤差の項)以外の影響が含まれているので、敏感に調整することをあきらめ、余裕をもたせる(ロバスト適応則)^{9),18)}こと、(2)外乱やモデル化誤差の項)をできるだけ抑えるように制御則においてロバスト性を高める(ロバスト制御則)こと、が上げられる。また、PE性条件の確保が指数安定性を保証しシステムのロバスト性を向上させることが知られている。

そこでここでは、つぎのロバスト適応則から、カーネル適応制御則を導いてみよう。ロバスト適応則として、正規化+ σ 修正法を用いた場合、(19)式のパラメータ調整則は、

$$\frac{d}{dt} \hat{\theta}(t) = -\Gamma \frac{\xi(t)}{1 + \xi^T(t) \xi(t)} \varepsilon(t) - \sigma \hat{\theta}(t) \quad (28)$$

となる。ただし、 $\sigma > 0$ は設定パラメータであり、これにより infinite-gain operator の存在を回避できる。(28)式を積分型で表すと、

$$\hat{\theta}(t) = -\int_0^t \exp(-\sigma(t-\tau)) \left(\frac{\xi_r(\tau)}{1 + \xi_r^T(\tau) \xi_r(\tau)} \varepsilon(\tau) \right) d\tau \quad (30)$$

ただし、 $\hat{\theta}(0)=0$ とした。したがって、(12)式の制御則から、

$$\hat{\theta}(t) = -\int_0^t \exp(-\sigma(t-\tau)) \left(\frac{\xi^T(\tau) \xi_r(\tau)}{1 + \xi^T(\tau) \xi(\tau)} \varepsilon(\tau) \right) d\tau \quad (31)$$

なるノンパラメトリックなロバスト適応制御則が得られる。これを非線形系に拡張して、(24)式のカーネルトリックを利用すると、つぎのカーネルロバスト適応則を得る。

$$\hat{\theta}(t) = -\int_0^t \exp(-\sigma(t-\tau)) \left(\frac{\kappa(\xi(t), \xi_r(\tau))}{1 + \kappa(\xi(\tau), \xi(\tau))} \varepsilon(\tau) \right) d\tau \quad (32)$$

6. 数値シミュレーション

<6.1> 線形 MRACS の場合

つぎの制御対象と規範モデルに対して、線形 MRACS を施した数値シミュレーションの結果を図に示す。初期には誤差が残っているが、適応過程が進めば、規範出力に漸近していることがわかる。

$$\text{線形制御対象: } \frac{dx}{dt} = -10x(t) + u(t)$$

$$\text{規範モデル: } \frac{dx_M}{dt} = -3x_M(t) + 10r(t)$$

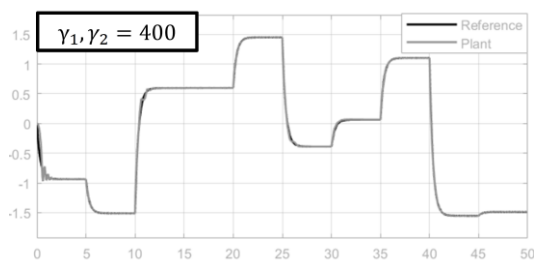


図 線形対象に対する線形 MRACS

つぎの非線形制御対象に同じ線形 MRACS を施した場合の結果を図に示す。

非線形制御対象:

$$\frac{dx}{dt} = -10x(t) + f(x(t)) + u(t); f(x) = \frac{\exp(2x)}{1 + \sin x}$$

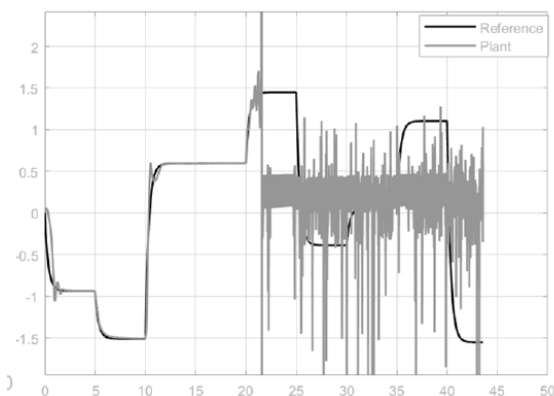


図 非線形対象に対する線形 MRACS

制御対象が非線形系に変わった場合には、線形 MRACS

では、制御目的が達成できていないことがわかる。

<6.2> カーネル MRCS の場合

ここでは、先に示した非線形制御対象に対して、カーネル MRCS を施した場合の結果を図に示す。ただし、適応ゲインを $\gamma_1 = \gamma_2 = 250$ とし、カーネル関数として多項式カー

ネル $k(z(t), z(\tau)) = (z^T(t)z(\tau) + 1)^2$ を選んだ。制御目的が達成されていることがわかる。

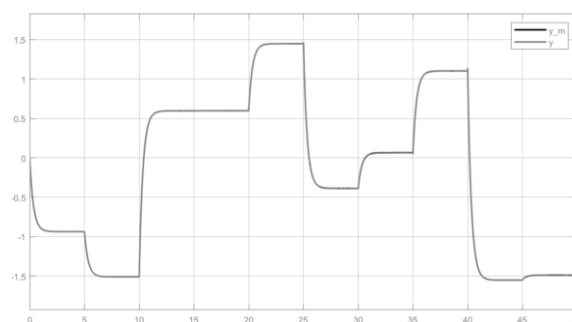


図 非線形対象に対するカーネル MRACS

7. おわりに

制御対象が非線形の場合に有効なカーネルトリックを利用したカーネル MRCS を提案し、数値シミュレーションでその有効性を確認した。モデル化誤差や外乱が混入する場合には、カーネル法による制御則の導出の元になるパラメータ調整則に、ロバスト適応則を用いたものを利用する方法が考えられる。本手法は拡張誤差に基づく方法であるため、適応ゲインの決め方が難しい。このことから、高階調整法や適応バックステッピングのように直接、誤差信号を適応誤差信号に用いる方法が有効であると思われる。

文 献

- [1] Adhish Kr. Chakrabarty, Samar Bhattacharya, "Robust model reference adaptive controller for single variable non-linear plants, 2010 International Conference on Power, Control and Embedded Systems, 29 Nov.-1st Dec. 2010.
- [2] Y.Miyasato, "Model reference adaptive control for nonlinear systems with unknown degrees", Proc. of 33rd IEEE Conference on Decision & Control, 14-16 December, Lake Buena Vista, USA, vol.3, pp. 3056-3061, 1994
- [3] N. Gloea, A. Golea, M. Kadjoudj, "Nonlinear model reference adaptive control using Takagi-Sugeno fuzzy systems", Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering & Technology, vol. 17, pp. 47-57, 2006.
- [4] Y. Muhammad, T. Agus, L. Jianming, Y. Takashi, "A method of simple adaptivev control for nonlinear systems using neural networks", IEICE Transactions on Fundamental of Electronics Communications and Computer Science, vol. E84-A, no. 8, pp. 2009-2018, 2006.
- [5] Liu Hsu, "Variable Structure Model Reference Adaptive

- Controller (VS-MRAC) using only input and output measurement: the general case", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 35, no. 11, pp. 1238-1243, 1990.
- [6] N. Cristianini & J. Shawe-Taylor: An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods, Cambridge Univ. Press, 2000.
 - [7] B. Sholkopf and A.Smola, Leaning with Kernels. MIT Press, 2002.
 - [8] Kernel Methods in Computational Biology, MIT Press, 2004
 - [9] 赤穂: カーネル多変量解析, 岩波書店 (2008)
 - [10] I. Steinwart and Chistmann, Support Vector Machines, Information Science and Statistics, Springer (2008)
 - [11] 福永健次: カーネル法入門-正定値カーネルによるデータ解析-,朝倉書店(2010)
 - [12] C.M. ビショップ: パターン認識と機械学習 下, 丸善出版(2012)
 - [13] Weifeng Lin, Puskal P. Pokhard, Jose C. Principe, "The Kernel Least Mean Square Algorithm," IEEE Transaction on Signal Processing, VOL.56, NO.2 pp.543-554, 2008.
 - [14] 西川翔太、新城早紀、大森浩充、インパルス応答同定におけるミドル閾値関数の導入、電気学会 制御研究会 スマートシステムと制御技術シンポジウム、広島市まちづくり市民交流プラザ、広島、2019/1/5
 - [15] 大森浩充、カーネル法を用いた信号処理と制御、電気学会 制御研究会、スマートシステムと制御技術シンポジウム、特別講演、広島市まちづくり市民交流プラザ、広島、2019/1/5
 - [16] クルツロックヨースト、大森浩充: 再生核ヒルベルト空間の逆モデルを有する FEL を用いたディーゼルエンジンの燃焼制御, 2016 年度年次大会, 一般社団法人日本機械学会(2016)
 - [17] Yongyut Uppatthangkul and Hiromitsu Ohmori, "L1 Adaptive Control for Single-Input Multiple-Output(SIMO) Non-Homogeneous System with MR damper Semi-Active Suspension," SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration (SICE JCMSI), Vol.10, No.3, pp.243-252, May 2017.
 - [18] 越智祐介、大森浩充、カーネル法による L1 適応制御系の提案、電気学会、平成 31 年電気学会全国大会、北海道 北海道科学大学、2019/3/12
 - [19] 楠瀬弘城、越智祐介、張新宇、大森浩充 (慶應義塾大学)、カーネル法を用いた適応観測器と L1 適応制御器の設計、2019 年 6 月 29 日 (土)、13:30-16:00、電気学会研究会、制御研究会、テーマ「データ駆動制御および制御技術一般」、福岡工業大学、
 - [20] R. Ortega: Morse's new adaptive controller: parameter convergence and transient performance, IEEE Trans. Automa. Contr. Vol.38, pp.1191-1202, 1993.
 - [21] M. Krstic, I. Kanellakopoulos and P.V. Kokotovic, Nonlinear and adaptive control design, John Wiley & Sons, 1995.
 - [22] 金子修、データ駆動型制御器チューニング —FRIT アプローチ—、計測自動制御学会会誌、計測と制御、第 52 巻、第 10 号、pp.853-859, 2013.