

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2006～2009
課題番号：18560445
研究課題名 (和文) 非線形 H 無限大制御を用いた複雑環境下におけるハイブリッド型適応学習システムの構築

研究課題名 (英文) Design of Hybrid Adaptive and Learning Control Systems under Complex Environment via Nonlinear H-Infinity Control Scheme

研究代表者 宮里 義彦 (MIYASATO YOSHIHIKO)
統計数理研究所・数理・推論研究系・教授
研究者番号：30174155

研究成果の概要 (和文)：適応制御，非線形制御，ロバスト制御などの制御理論の方法論を発展させ，ニューラルネット，ファジィ制御，遺伝的アルゴリズム，強化学習などの知的制御の分野の諸手法との融合をはかりつつ，複雑な環境変動のもとで高い適応性を有するハイブリッド型適応学習制御システムの構築を行った．これにより適応制御，制御科学，知的制御の従来の枠を広げるだけでなく，それらを含む新たな研究分野の創成とその理論体系の整備につながる成果を得ることができた．

研究成果の概要 (英文)： This research project constructed design schemes of hybrid adaptive and learning control systems which contain high adaptation abilities under complicated environments, by extending several methodologies in control theory such as adaptive control, nonlinear control and robust control, and by applying several tools in intelligent control such as neural networks, fuzzy control, genetic algorithms and enhance learning. By doing so, the research created new fields in information science and engineering, and developed consistent and theoretical methodologies in system and control science.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,300,000	720,000	4,020,000

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：制御理論

1. 研究開始当初の背景

人間と機械の調和を目的とする自動制御の最終目標は、制御系の自動設計と自動調整機能を有する適応制御とされている。そのような適応制御の基礎理論に関する研究が始められて多くの年月が経過したが、実際の制御の現場で適応制御方式は大きな成果をあげているとは言えない。これは現状の適応制御方式が、制御対象の次数や非線形特性に対して定まる特定の制御の構造の範囲内だけでパラメータを調整しているために、環境条件が変化して対象の特性が大きく変動すると、パラメータの調整だけではもはや対応できないからである。一方、ニューラルネットワーク、ファジイ制御や強化学習、遺伝的アルゴリズムなどを用いた制御方式が知的制御の重要な成果として、情報科学や実際の産業応用の分野で注目され活発に研究が行われている。それらの中には制御動作を様々な条件下（環境変動に対応）における手続きとして記述することで、複雑な環境の変動にある程度まで対応可能なものもあるが、制御対象の動特性（ダイナミクス）に対する精緻な考察を欠いているため、限定された問題にしか適用できないケーススタディ的な結果の羅列にとどまっている。これらに対して制御科学の分野では、理論的な解析を基礎とした適応制御、非線形制御、ロバスト制御、H無限大制御等の研究が整備されつつあり、安定性や種々の制御性能を厳密に規定した制御理論の体系化が進んでいる。しかるにそこにおける制御の目的は、フィードバック制御を基調とした動的システムの動特性の改善にのみ主眼が置かれて、様々な環境下で効果的に動作する制御手法の開発には至っていない。近年、このような制御科学の一面を考慮して、ハイブリッドシステムの制御問題にも関心が寄せられているが、複雑な環境の変動のもとで高い適応性を有する制御系の構成にはほど遠いのが現状の姿である。

2. 研究の目的

適応制御、制御科学、情報科学、および関連する数理学の現状を考慮して、非線形H無限大制御（適応制御、非線形制御、ロバスト

制御、H無限大制御など）の方法論を発展させ、必要に応じて知的制御の分野の諸手法（ニューラルネット、ファジイ制御、遺伝的アルゴリズムを含む確率的算法、強化学習など）との融合をはかりつつ、複雑な環境の変動のもとで高い適応性を有する、ハイブリッド型適応学習制御システムの構築を行うことを目的とする。ここでの“ハイブリッド”とは、制御の要素として、連続時間の制御動作と離散時間の制御動作の混在、連続事象（時系列的に記述される事象）の制御動作と離散事象（特定の条件により駆動・生成される離散的な事象）の制御動作の混在、制御対象の有限次元の動特性と無限次元の動特性の混在、自由運動（拘束条件がない）と拘束条件下の運動の混在、軌道の制御と拘束力の制御の混在、拘束条件の切り替わりによるシステムの動特性の切り替わりなどを総合的に含むことを意味し、従来の制御構造を規定したロバスト制御や適応制御では対処できない範疇に属する。このような研究により適応制御、制御科学、知的制御の従来の枠を広げるだけでなく、それらを含む新たな研究分野の創成とその理論体系の整備も視野に含めるものとする。

3. 研究の方法

(1) 適応制御、非線形制御、非線形H無限大制御の研究を発展させ、ニューラルネットワークやファジイコントロール（ファジイ推論）を含む制御機構に拡張し、ニューラルネットワークやファジイ推論の特性（関数近似機構としての特性、論理判断を持つ機構の特性、学習機構の特性など）に含まれる様々な不確定要因を非線形制御や非線形H無限大制御の問題設定を用いて表現して、適応制御の理論解析により安定性を達成しつつ、制御システム全体としての性能を厳密に規定できる設計論の構築を目的とする。これまでにシステムパラメータの推定誤差を非線形H無限大制御の枠組みで取り扱うことで、ロバスト特性の優れた非線形適応H無限大制御方式を提案し、さらにその手法をニューラルネットを含む非線形パラメトリックモデルへ拡張

しているが、これらの手法をより一般的なニューラルネットワークやファジイ推論が取り扱う非線形パラメトリックモデルに拡張して、非線形H無限大制御と適応制御の枠組みで新たな知的制御機構を構築することが、この研究の最初のステップとなる。

(2) ハイブリッド型適応機構を用いた反復学習制御方式を発展させ、摩擦力やヒステリシスなどの非線形特性や時変要素が加わった場合の非線形パラメトリックモデル（ニューラルネットワークやウェーブレットなど）を用いた構成法の研究を行う。研究はそれらのモデルに対するハイブリッド型適応機構（連続時間上で規定される制御動作と離散時間上で規定される制御パラメータの調整の混在としてのハイブリッド）と、パラメータの変動（関連する非線形成分や非線形パラメトリックモデルも含む）を外乱と見なした非線形H無限大制御方式の開発の2つの側面からなる。さらにより実際的な問題を考慮して、拘束条件下のロボットマニピュレータや機械システムの反復学習制御問題へと拡張する。これは機械の曲面習い制御などを想定したもので、軌道の制御だけでなく拘束力（習い制御の場合は面に対する圧力に対応）をも制御する要素を含むものである（軌道と力のハイブリッド制御）。これに加えて2つの適応過程を並列的に配置する手法（2次元適応制御としてすでに提案）についても考察を進める。

(3) 無限次元系である分布定数系に対して非線形H無限大制御を適用し、有限次元補償器で安定な制御系を構成する手法を開発する。分布定数系としては化学プロセスなどのモデルとなる放物型分布定数系と振動系や波動のモデルとなる双曲型分布定数系などが考えられるが、有限次元補償器を構成した際のスピルオーバーをH無限大制御問題の外乱と見なすことで、問題の解決を目指す。また特に双曲型分布定数系が柔軟振動体のモデルになることも考慮して、拘束条件下における軌道と力のハイブリッド制御問題にも拡張して、有限次元補償器の導出を行う。これは柔軟アームの拘束条件下における運動制御の基礎となる研究である。さらに1)の研究成果も取り入れて、無限次元系の分布定数系と有限次元の線形あるいは非線形系が結合した混合系に対しても、有効な制御手法の開発を行う。

(4) 環境が複雑に変動する条件の下で、様々

なハイブリッド特性（連続時間の制御動作と離散時間の制御動作の混在、連続事象の制御動作と離散事象の制御動作の混在、制御対象の有限次元の動特性と無限次元の動特性の混在、自由運動と拘束条件下の運動の混在、軌道の制御と拘束力の制御の混在、拘束条件の切り替わりによるシステムの動特性の切り替わり）を有する高度の適応機能を持った制御系の構築に関する研究を行う。この中で連続時間の制御動作と離散時間の制御動作の混在は(2)のハイブリッド型適応機構がその第1ステップとなり、制御対象の有限次元の動特性と無限次元の動特性の混在は(3)の研究、自由運動と拘束条件下の運動の混在および軌道の制御と拘束力の制御の混在は(2)の研究がその第1ステップとなる。なお(1)の研究は(2)と(3)の研究の基礎としても位置づけられる。また連続事象と離散事象の混在は、ペトリネットや離散事象システム論やmax plus代数による離散システムの記述などが研究の出発点となる。最後に拘束条件の切り替わりによるシステムの動特性の切り替わりは、機械システムが外界と接触と離反を繰り返しながら特定の制御行動を継続する場合（たとえば多リンク機構による移動、歩行、複数のマニピュレータの強調による物体の保持や移動など）を想定していて、一連の研究の諸成果を総合的に適用する意味合いも持つ。

4. 研究成果

(1) ニューラルネットワークなどの非線形パラメトリックモデルを含む系の非線形適応H無限大制御系の構成について研究を行った。非線形パラメトリックモデルの近似誤差と算法上の誤差を外乱と見なしたH無限大制御問題の形式で制御系を構成することにより、安定性と性能の保証される非線形制御系が実現されることを示した。関連する研究が1編の論文として発表された。

(2) 逆最適化に基づく適応H無限大制御の手法を、無限次元系である分布定数系の有限次元制御問題に適用した。放物型分布定数系と双曲型分布定数系、さらに混合定数系である弾性アームに対して、スピルオーバー項を外乱と見なすことで、有限次元補償器で安定な適応制御系が実現されることを示した。関連する論文が5編の論文として発表された。

(3) ポリトープ型LPVシステムに対するモデ

ル追従型の適応H無限大制御系の構成について研究を行った。端点システムに対応するオブザーバ表現を用いて、部分的情報を持つシステムのモデル追従制御方式を考案し、さらに未知パラメータが時間変化する時も、H無限大制御問題の解として導出される安定化信号を用いて、良好な制御性能が実現されることを示した。関連する研究が1編の論文として発表された。

(4) 拘束条件下で軌道と力を同時に制御する方式(軌道と力のハイブリッド制御)の研究を行った。簡単な線形機械系とロボットマニピュレータに対してH無限大の制御指標に基づく設計法の提案を行い、従来法よりも優れた過渡特性を有しながら軌道制御と力制御が達成されていることを確認した。関連する研究が2編の論文として発表された。

(5) 非ホロノミック車両型ロボットの適応型軌道追従H無限大制御方式について研究を行った。速度追従誤差とパラメータ推定誤差を等価的な外乱と見なしたH無限大制御問題に対して最適な軌道追従制御系が達成されることを確認した。関連する研究が2編の論文として発表された。

(6) ポリトープ型LPVシステムに対する適応的なH無限大ゲインスケジューリング制御の構成について研究を行った。制御出力のデータをもとにオンラインでスケジューリングパラメータを調整する方法を考案した。関連する研究が1編の論文として発表された。

(7) ロボットマニピュレータに対してハイブリッド型適応機構を用いて反復学習制御系を構成する手法を研究した。パラメータの推定誤差を外乱と見なすH無限大制御手法を用いてシステムを安定化し、反復動作の入出力データに基づいて制御パラメータを離散時間的に更新するハイブリッド型適応則を考案して、未知のシステムに適用できる学習制御方式を提案した。さらにオンライン適応則を併用する2次元適応制御方式を適用して、高度の学習性能を実現する方法を提案した。関連する研究が2編の論文として発表された。

(8) ハイゲインオブザーバを用いた非線形適応制御系の簡易設計法に関する研究を行った。ニューラルネットなどの非線形パラメトリックモデルを含む非線形系や双曲型分布定数系に適用し、その有効性を検証した。関連する研究が4編の論文として発表された。

(9) 拘束条件下で軌道と力を同時に制御する方式(軌道と力のハイブリッド制御)の研究を入力非線形特性がある場合に拡張した。不感帯やバックラッシュなどの入力非線形特性のあるロボットマニピュレータに対してH無限大の制御指標に基づく設計法の提案を行い、従来法よりも優れた過渡特性を有しながら軌道制御と力制御が達成されていることを確認した。関連する成果が1編の論文として発表された。

(10) 非線形制御の新しい手法としてI&I法とRISE法について論じ、両者の特徴や適用にあたっての制約などについて指摘した。関連する成果が1編の論文として発表された。

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20件)

① 宮里義彦, 非線形適応制御の新潮流 (I&I法とRISE法), 計測と制御, 査読有, 48, 2009, 621-627.

② 宮里義彦, 双曲型分布定数系の有限次元モデル規範形適応H ∞ 制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 45, 2009, 430-437.

③ Yoshihiko Miyasato, Nonlinear adaptive H ∞ control of constrained robotic manipulators with input nonlinearity, Proceedings of 2009 American Control Conference, 査読有, 2009, 2000-2005.

④ Yoshihiko Miyasato, Model reference adaptive H ∞ control for flexible arms by finite dimensional controllers, Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, 2008, 3257-3262.

⑤ 宮里義彦, ハイブリッド型適応機構を用いたロボットマニピュレータの反復学習制御-2次元適応制御の応用-, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 44, 2008, 735-742.

⑥ Yoshihiko Miyasato, Nonlinear adaptive H ∞ control of robotic manipulators under constraint, Proceedings of the 17th IFAC World Congress, 査読有, 2008, 4090-4095.

⑦ 宮里義彦, ハイブリッド型適応機構を用いたロボットマニピュレータの反復学習制

御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 43, 2007, 1111-1119.

⑧ Yoshihiko Miyasato, Model reference adaptive H^∞ control for distributed parameter systems of hyperbolic type by finite dimensional controllers -construction with unbounded observation operator-, Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, 2007, 1338-1343.

⑨ 宮里義彦, LPV システムの適応型ゲインスケジューリング H^∞ 制御, システム制御情報学会論文誌, 査読有, 20, 2007, 195-204.

⑩ Yoshihiko Miyasato, Model reference adaptive H^∞ control for distributed parameter systems of hyperbolic type by finite dimensional controllers, Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, 2006, 459-464.

⑪ Yoshihiko Miyasato, Adaptive nonlinear H^∞ control systems via neural network approximators, Proceedings of the 2006 IEEE CCA/CACSD/ISIC, 査読有, 2006, 2349-2354.

⑫ Yoshihiko Miyasato, Model reference adaptive H^∞ control for distributed parameter systems of parabolic type by finite dimensional controllers, Proceedings of 17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, 査読有, 2006, 1140-1148.

[学会発表] (計 28 件)

① 宮里義彦, Euler-Lagrange システムの適応 H^∞ フォーマーション制御, 計測自動制御学会・第 10 回制御部門大会, 2010.

② Yoshihiko Miyasato, A simple redesign of adaptive control for flexible arms by finite dimensional controllers, ICCAS-SICE Annual Conference 2009, 2009.

③ 宮里義彦, 非線形入力特性を有する双曲型分布定数系の有限次元モデル規範形適応 H^∞ 制御, 計測自動制御学会・第 9 回制御部門大会, 2009.

④ 宮里義彦, 拘束条件下におけるロボットマニピュレータの非線形適応 H^∞ 制御 -非線

形入力特性を有する場合-, 計測自動制御学会・第 37 回制御理論シンポジウム, 2008.

⑤ Yoshihiko Miyasato, A simple redesign of adaptive control for distributed parameter systems of hyperbolic type by finite dimensional controllers, SICE Annual Conference 2008, 2008.

⑥ 宮里義彦, フレキシブルアームの有限次元モデル規範形適応 H^∞ 制御, 計測自動制御学会・第 8 回制御部門大会, 2008.

⑦ Yoshihiko Miyasato, A simple redesign of adaptive control for nonlinear parametric models with state variable filters, SICE Annual Conference 2007, 2007.

⑧ 宮里義彦, 非ホロノミック移動ロボットの適応型軌道追従 H^∞ 制御 (一般化形式), 計測自動制御学会・第 7 回制御部門大会, 2007.

⑨ 宮里義彦, 拘束条件下の非線形適応 H^∞ 制御, 計測自動制御学会・第 35 回制御理論シンポジウム, 2006.

⑩ Yoshihiko Miyasato, A simple redesign of adaptive control for nonlinear parametric models, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 2006.

[図書] (計 2 件)

① 宮里義彦, 機械工学便覧・デザイン編・制御システム, 担当部分: 第 4 章 4.4.1. バックステッピング, 日本機械学会・丸善, 2006, 125-126

② 宮里義彦, 現代数理科学事典, 担当部分: VII 制御理論 8. 適応制御, 丸善, 2009, 814-821.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮里 義彦 (MIYASATO YOSHIHIKO)

統計数理研究所・数理・推論研究系・教授
研究者番号: 30174155