

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656274

研究課題名(和文)ハイブリッドシステムの制御問題に対する制約プログラミングを用いた方法論の開発

研究課題名(英文)Development of control system design methods for hybrid systems using constraint programming

研究代表者

延山 英沢 (NOBUYAMA, Eitaku)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：50205291

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、論理式や条件文等の制約などを含む動的システムを系統的に表現できるハイブリッドシステムを対象とし、制約プログラミングによる新しい方法論につなげるための萌芽的研究を行った。新しい方法論を開発するまでには至らなかったが、その過程において切り替え型制御系の最適切り替え点の設計法や入力飽和システムに対するフィードフォワード型アンチwindアップ制御系の設計法を与えるという研究成果をあげることができた。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this research project is to develop new control design methods using constraint programming. Although we did not reach the final goal, we had several new results on control design methods. They include a design method of switching parameters of a switched controller by mixed integer programming and PID controller design by convex optimization with robust stability conditions of selected frequency points. The first one is proposed to obtain a swift time-response without over-shoots by using switching feedback gains. The second one is proposed to obtain a robust PID controller which achieves model matching with robust stability of the closed-loop system.

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：ハイブリッドシステム 制御問題 最適化 切り替え型制御 入力飽和システム

1. 研究開始当初の背景

連続ダイナミクスと離散事象との混成からなるハイブリッドシステムは、現実にはいくらかでも存在し、数学的なモデル化までは比較的容易にできるにも関わらず、その性質の解析や制御系設計の問題を数学的に解くことは一般的には極めて難しい。それは、論理式や条件式を論理変数を含む不等式条件に変形し、論理変数と連続変数が混ざった不等式条件を持つシステム表現を行うためである。そのため数学的に解くのではなく、数値的に解くための標準形とツールがあれば、より多くの研究者や技術者がハイブリッドシステムの研究に入ることができ、分野としての発展につながると期待された。

2. 研究の目的

上記の背景に基づき、ツールとして拘束プログラミングを利用することに新しい可能性があると考え、そのツール開発者を連携研究者として、ハイブリッドシステムの制御問題へ拘束プログラミングを適用することによる、新たな制御系設計法を探ることが本研究の目的である。同時に、様々な制御問題をハイブリッドシステムとして表現し、その制御問題を最適化問題として定式化することにより、ハイブリッドシステムの適用範囲の拡大を図ることも本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究の主たる目的は、様々な制御問題をハイブリッドシステム表現による制御問題として定式化し、それについての数値解法を検討し、数値シミュレーションによりその有効性を確認することである。そのため、研究の方法としては、研究代表者と連携研究者の各人が対象となる制御系設計問題や最適化法、ツール開発などに対して検討を行い、それらを改善して行くという方法を取る。そして、各人の成果を持ち寄って議論することにより、結果をさらに発展させていくという方法である。

4. 研究成果

本研究は、ハイブリッドシステムの制御問題に対して拘束プログラミングを数値解法のツールとして適用することを目指すものであったが、その最終目標までは到達することはできなかった。しかし、その最終目標に向けた研究の過程において、挑戦的萌芽研究としての新しい成果をいくつか得ることができた。それらの代表的なものについて以下に説明する。

(1) 切り替え型コントローラの最適切り替え点の設計法

ハイブリッドシステムに関する研究は1990年代から盛んに行われており、ハイブリッドシステムとして取り扱うことが出来る対象の一つとしてスイッチドシステムがある。スイッチドシステムとは、外的要因や

状態の変化などにより、特性が切り替わるシステムのことである。従来スイッチドシステムに関する研究では、切り替えられる各領域におけるコントローラの最適化、切り替えが生じることによる安定性の解析が大部分であった。それに対して、本研究ではこれまであまり取り扱われていなかった切り替え条件の最適化に着目する。ハイブリッドシステムに対する系統的な制御手法の一つとして、モデル予測制御が知られている。従来では、区分的アファインシステムを論理混合型ハイブリッドシステム表現として記述し、モデル予測制御を適用して、混合整数計画問題に帰着して解く手法について述べられている。一般にモデル予測制御では、モデルよりシステムの挙動を予測し、入力を決定する。しかし、予測はモデルに基づいて行われるため、モデル化誤差や外乱が存在した場合、決定する入力に大きな影響を与える。そこで、本研究では直接入力を決定するのではなく、入力を状態フィードバックとし、そのフィードバックコントローラの設計を行うことを考える。入力を状態フィードバックとしたシステムの挙動は初期状態によって決定されるため、予測制御による設計法を適用すると、設計時に考慮した初期状態に依存した設計結果が得られる。従って、初期状態に範囲がある場合、その領域全体を考慮した設計を行う必要がある。本研究では、初期状態が取りえる領域が凸多面体領域であるとし、システムにオフラインでモデル予測制御を適用して、複数の状態フィードバックコントローラを切り替えるパラメータを決定することを考える。本研究は、システムを論理混合型ハイブリッドシステムとして記述し、混合整数計画法を解いてコントローラ切り替えの最適なパラメータを得る手法について提案し、数値シミュレーションにより有効性を確認している。

たとえば、状態フィードバックで二つのゲインを与えており、一つは応答は速いがオーバーシュートが生じてしまうゲインで、もう一方は応答は遅いがオーバーシュートなく収束するゲインである場合を考える。この場合において、出力の値によりこれらのゲインを切り替えることにより、速くてオーバーシュートの無い応答を得ることを目的とし、最適な切り替え点を求める、ということが考える問題である。本設計法を適用することにより、応答の目標値に対する二乗誤差を最少にするという目的関数に対して、この問題が混合整数計画問題に帰着でき、数値的にその解が得られることを示した。その数値例の結果を以下に示す。

図1と図2は異なる初期値から始まる応答を示したものである。図中の青(一点鎖線)の応答は応答は速いがオーバーシュートが生じてしまうゲインを用いた場合を示しており、緑(破線)は応答は遅いがオーバーシュートがないゲインを用いた場合である。そ

して、赤（実線）の応答は本設計法を用いて得られた最適切り替え点でゲインを切り替えた場合を示している。図1と図2で示すように、異なる初期値で出発しても本設計法を用いた場合が速くてオーバーシュートのない応答が得られていることがわかる。

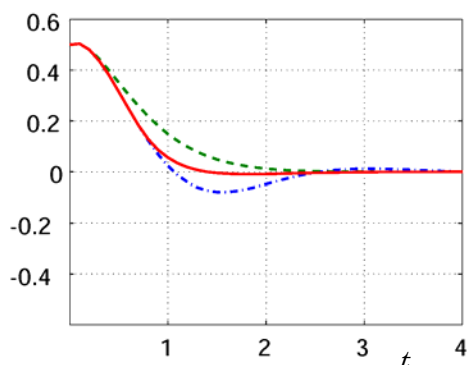


図1 初期値応答1

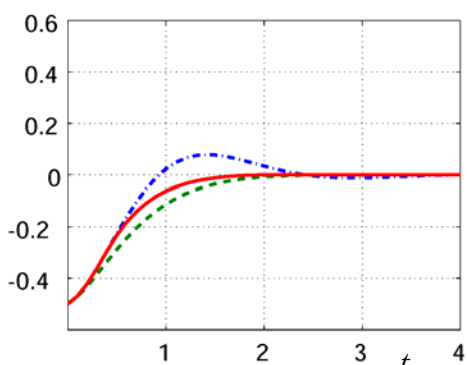


図2 初期値応答2

(2) 周波数点上でのロバスト安定条件に基づく凸最適化を用いたPID制御器の設計

制御対象のスペクトルモデルは有限個の周波数上の点でゲインと位相の集合で表されるノンパラメトリックモデルであり、同定実験で得られる入出力関係をスペクトル解析することに容易に求めることができる。このスペクトルモデルを制御対象のモデルとして用いた H_∞ 制御系設計法がこれまで扱われている。特に、PID 制御器を用いたロバスト制御問題などが凸最適化問題に帰着できることが示されており、実用的観点から興味深い方法である。しかし、これまで用いられているロバスト安定条件は、通常の時連続時間系に対するロバスト性能条件から近似的に導かれたものであり、ロバスト安定性だけを考える場合、性能条件も同時に制約条件に入れてしまうため、保守性が高くなる可能性がある。また、別の論文では、さらに周波数帯域の考え方を加え、制御性能を上げるための設計法を提案し、実際の実験によりその有効性を示している。これらの方法は、最適解が求まったときには実用的に大変有効な方法であるといえる。しかし、用いられているロ

バスト安定条件には保守性を改善する余地があると考えられる。

そこで、本研究では、その保守性の改善を目的とし、新しいロバスト安定条件を提案することを目的とした。そのため、ロバスト性能条件に基づくものではなく、通常の時連続時間系に対するロバスト安定性の条件から新たな条件を導出することを考え、複素平面上での簡単な幾何学的考察を基に新しい条件を提案した。通常の時連続時間系に対するロバスト安定性の条件は複素平面上でモデルの不確かさを表す円盤が安定性の臨界点 $(-1, 0)$ と交わらないことと表されるが、その条件をそのまま使った場合、凸制約条件とはならない。そこで、本研究では、臨界点の代わりに臨界点を通る直線を考え、不確かさを表す円盤がその直線の下側にあるという条件を考えることにより、それが凸制約条件となることを示すことができた。そしてさらに、性能条件として従来と同様のモデルマッチング問題を考え、ロバスト安定条件と合わせ、ロバスト安定性を保証したうえで理想モデルとのモデルマッチングをするという制御問題を考え、その制御問題が凸最適化問題となることを示した。そして、数値例によりその有効性を示すことができた。

つぎの図は、本研究で提案するロバスト安定性の条件を示す図である。不確かさを表す円盤（水色）が直線（緑）の右側を通ればよい。

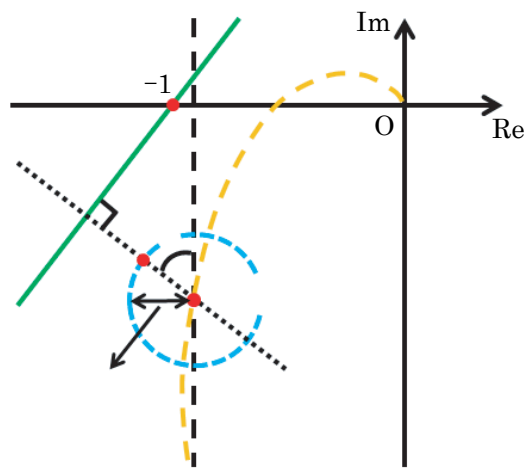


図3 提案するロバスト安定条件

数値例としては、同じ制御対象に対して違う条件で実験を行い、システム同定により複数の伝達関数が得られたとし、そこからそれぞれのスペクトルモデルを求めて本設計法を適用した。図4は、本提案法により得られた結果であり、参照入力から出力までの閉ループ系のゲイン特性を示している。図5はステップ応答の結果を示している。赤線が望ましい応答を示す理想モデルのゲイン線図とステップ応答であり、複数の青線は制御対象のゲイン線図とステップ応答である。本制御対象に対しては従来法では制御器が求めら

れなかったのに対して、本設計法では制御器が求められた。図4では、低周波でのバラつきがほとんどなく理想モデルに合っていることがわかり、図5では、立ち上がりにはバラつきがあるが、すべて目標値に収束していることがわかる。

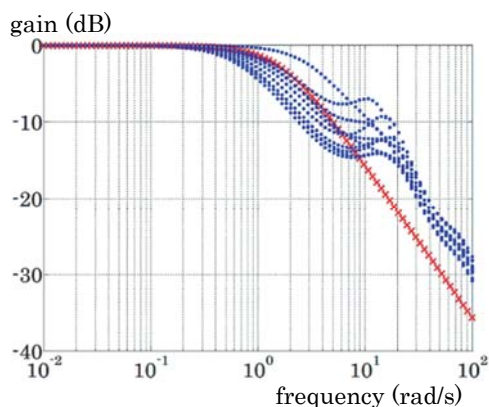


図4 閉ループ系のゲイン線図

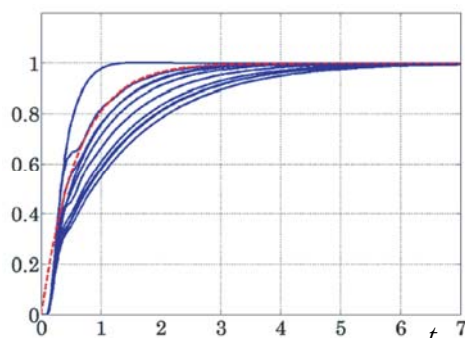


図5 閉ループ系のステップ応答

(3) 入力飽和システムに対するフィードフォワード型アンチwindアップ補償の設計

制御系において、制御対象に過大な信号が入力として印加されると、制御対象の故障や破壊の原因となることがある。そのため、現実の制御系では、物理的な制約や制御対象の保護などの理由から、操作部に飽和特性を持つものが多い。しかし、この飽和特性が存在することで、制御入力大きい場合、制御入力と実際に制御対象に印加する入力との間に差が生じる。この差を無視して制御系を設計、解析を行うと、過渡的に制御器からの制御出力が増大し、過渡応答性の劣化、最悪の場合、制御系の出力が不安定化する Windup 現象が生じることが知られている。この問題を防ぐ手段の一つに、既に与えられている制御器に対して Anti-Windup 補償器を追加し、Anti-Windup コントローラを構成する方法がある。本研究では、制御対象を安定化する制御器が与えられたとき、そこに飽和要素を含ませたシステムをスイッチドシステムとして考える。そのシステムをハイブリッドシス

テムとして表現し、Anti-Windup 補償器の考え方を取り入れ、立ち上げ時における飽和特性によって引き起こされる影響を緩和するフィードフォワード入力 (Anti-Windup 補償入力) の設計を行い、数値例によりその有効性を確認した。

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)

[学会発表] (計4件)

- ① 多久島裕憲、延山英沢、上泰、混合整数計画法を用いた切り替え型コントローラの最適切り替え点の設計、2013年11月30日、長崎大学工学部
- ② 岩崎省吾、延山英沢、上泰、周波数点上でのロバスト安定条件に基づく凸最適化を用いたPID制御器の設計、第56回自動制御連合講演会、2013年11月16日、新潟大学工学部
- ③ Neng-Fa ZHOU, Masato TSURU, Eitaku NOBUYAMA, A comparison of CP, IP, and SAT solvers through a common interface, 24th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, 2012年11月7日、アテネ
- ④ 岩田崇司、延山英沢、上泰、混合整数計画法を用いた切り替え型コントローラの一設計法、第30回計測自動制御学会九州支部学術講演会、2011年12月4日、大分県労働福祉会館ソレイユ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

延山 英沢 (NOBUYAMA, Eitaku)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：50205291

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

宮野 英次 (MIYANO, Eiji)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：10284548

ZHOU, Neng-Fa

The City University of New York・

Department of Computer and Information Science・教授