Title	確率ハイブリッドシステムの確率拘束付き最適制御に関する研究
Author(s)	間藤, 光一朗
Citation	
Issue Date	2011-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/9612
Rights	
Description	Supervisor:平石 邦彦, 情報科学研究科, 修士

確率ハイブリッドシステムの確率拘束付き 最適制御に関する研究

間藤 光一朗 (0910061)

北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

2011 年 2 月 8 日

キーワード: 確率ハイブリッドシステム, 最適制御問題, 線形不等式, MIQP 問題, 危険状態到達可能性グラフ.

ハイブリッドシステムとは，離散ダイナミクスによって，連続ダイナミクスが切り替わるシステムである．分散システムや組込みシステムの解析や設計に有効であり，多くの実システムに対する数学的モデルとして使われている．例としては，自動車や航空交通管理システム，生産システム，化学課程，ロボット工学，リアルタイム通信ネットワークなどがあり，制御理論や計算機科学の分野において研究されている．近年, ロボットが通信ネットワークを介して，衝突を回避する連携行動や，飛行機の追従飛行などの協調制御が盛んに研究されている．協調制御では，複数のロボットが互いの位置を確認し，同時に違う動作をしたり，または，先頭の一台の飛行機に対して全く同じ動きを必要とする．このように，様々な場面において，目的物の動作が異なるため，システムの動作が複雑になる．通信の ON ／ OFF や飛行機のダイナミクスをモデリングする必要があることから，協調制御に代表される複雑なシステムを制御するためには，ハイブリッドシステムとして複雑なシステムを表現することが有用である．

ハイブリッドシステムの拡張として，確率的なモード遷移を含む確率ハイブリッドシステムがある．一般に確率ハイブリッドシステムは離散ダイナミクス，連続ダイナミクスのいずれも確率的に決まるハイブリッドシステムである．本研究では，離散ダイナミクスのみ確率的に決まるハイブリッドシステムを考える．例として，機械の正常動作／異常動作，ネットワークの接続／切断などがある．機械の正常動作／異常動作は，正常な場合における機械の動作を表現する運動方程式と，異常が発生した場合における運動方程式の間の遷移を，確率的にモデル化することが適切である． さらに，ネットワークの接続／切断も確率的に表現可能である．従って，離散ダイナミクスのみが確率的であっても，様々な応用が考えられる．

確率ハイブリッドシステムに関する既存研究として，制御に関する研究では，MLDS 表現を用い，確率と状態に関する関係式を線形関数に変換することで，混合整数 2 次計画

(MIQP) 問題に帰着させ，最適制御問題を解く研究がある．検証に関する研究では制御入力を持たない確率ハイブリッドシステムの確率的な到着可能性に関する研究などがある．他には，確率ハイブリッドシステムの形式検証を提案し，自動検証ツールを実装するとともに，抽象化を用いることにより検証の効率化を図った研究などもある．さらに，通信ネットワークにおいて，ネットワークの混雑の回避を実現することを目的に，離散モード間の遷移が，連続時間マルコフ連鎖の状態間の遷移のように，確率的にモード遷移が起きるハイブリッドシステムとして，通信ネットワークをモデリングする研究がある．

しかしながら，これらの研究は確率的な拘束，評価関数を最小化する制御入力の計算を満足する最適制御問題を考えていない．

そこで本研究では，離散ダイナミクスのみ確率的に決まるハイブリッドシステムに対して，1) 与えられる危険状態に確率 ε 以下で遷移する．2) 実現確率が ρ 以上となる離散状態 (制御ロケーション) の系列のなかで，評価関数を最小化する．ことを満たす制御入力列を求めることを考える．

解法は，オフライン計算とオンライン計算の二つから構成される．オフライン計算では危険状態到達可能性グラフと呼ばれるグラフを作成する．危険状態到達可能性グラフは危険状態に到達する状態，危険状態に到達する確率を表現する．また危険状態到達可能性グラフの有向辺には，時刻 k の状態から時刻 k+1 の状態に遷移するための，状態と制御入力に関する線形不等式が割り当てられる．そして，危険状態到達可能性グラフを基に，危険状態に確率 ε 以下で遷移できる状態を列挙する．

オンライン計算では MLDS 表現を使う．実現確率が ρ 以上となる離散状態の系列のなかで，評価関数を最小化するために，MLDS 表現を用いてモデル化する際に，危険状態到達可能性グラフの有向辺に割り当てた 0-1 変数と確率の関係を拘束条件として追加しなければならない．しかしこの拘束条件は非線形のため，MIQP 問題に変換できない．そこで対数変換を用いることによって，制約条件を線形関数に変換する．制約条件の対数変換によって MLDS 表現を MIQP 問題に帰着させることができる．得られた MLDS 表現を用いて，危険状態到達可能性グラフから列挙された状態に関する線形不等式制約を持つ有限時間最適制御問題を解く．有限時間最適制御問題を解くことによって，確率的な拘束を満足し，評価関数を最小化する制御入力を得ることができる．MLDS 表現は線形拘束システムと同じ形式なので，線形拘束システムに対する有効な制御系設計法の一つであるモデル予測制御手法を利用する事ができる．

この論文において簡単な例として，ポンプシステムを考える．ポンプシステムは，水の入った容器，センサ，ポンプ，制御装置から成るシステムである．水位が一定値を上回った場合，ポンプを off にすることによって，蒸気を排出し，水位を減少させる．ポンプを on または，off にする際に水位を読み取れなくなるエラーが発生する場合がある．エラー動作が続き，水位が上限値を上回るまたは水位が下限値を下回る場合は動作がストップする．この論文において，水位が上限値を超える状態を危険状態とし，危険状態到達可能性グラフを作成し，最適制御問題の数値例を示す．