

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 5月 25日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22656094

研究課題名（和文） 外部環境に開いたオープン制御系の設計理論の創成

研究課題名（英文） Developments of Design Theory for Control Systems open to Environments

研究代表者

井村 順一 (IMURA JUN-ICHI)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：50252474

研究成果の概要（和文）：

本研究は、制御対象を取り巻く外部環境に応じて目標値や制御戦略を適応的に切り替えることができる、外部環境に開いた制御系「オープン制御系」の設計理論の基礎を構築することを目的とする。具体的には、人間の認識機能に相当する複雑な外部環境のモデリングを一部離散抽象化する問題として定式化し、一種のハイブリッド制御問題に帰着して解を求める基礎理論を構築する。これによりこれまでの外部環境に対して閉じた制御系を補完する新しい制御理論への展開を試みる。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this research is to develop a control design theory on the “open” control system, where the closed loop system is opened to the environment and the target and/or policy are adapted according to the environment. More specifically, the modeling problem on the environment is formulated as the problem of partially discretizing it, and is reduced into a kind of hybrid control problem. This allows us to complement various functions of the conventional control system, i.e., the control system closed to the environment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	0	1,500,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総計	3,100,000	480,000	3,580,000

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，ハイブリッドシステム，最適化，離散抽象化

1. 研究開始当初の背景

これまでの制御理論は、与えられた目標値に追従するための下位レベル制御系の設計理論であり、外乱への考慮はあるものの、制御対象を取り巻く外部環境に応じて目標値や制御戦略を切り換える、といった制御系設

計を論じるものではない。言わば「閉じた（クローズド）制御系」の設計理論である。対照的に、人間が車などの操作対象を制御するときは、外部環境からの情報を用いて実に柔軟に制御戦略や目標値を切り換えており、「開いた（オープン）制御系」となっている。こ

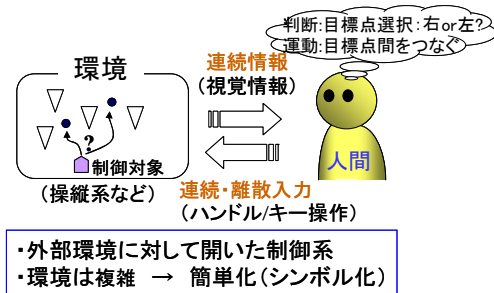


図1 外部環境と制御

のような制御系を実現するには、外部環境の状況を計測し、それをなんらかの意味で認識することが必要である。しかしながら、この「認識」に相当する機能はその多様性ゆえ、制御の枠組みの中でほとんど論じられていない。そこで申請者は、2006年頃より世界に先駆けて、認識部と制御部を統合したオープン制御系の設計理論の構築を目指した1つの概念的な枠組みを下図のように提案してきているが、特に環境のモデリングに関してはほとんど理論ができていないのが現状である。

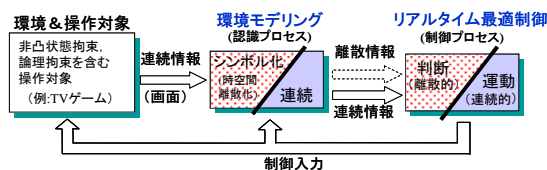


図2 オープン制御系の概念図

2. 研究の目的

本研究では、オープン制御系の設計理論構築のための第一歩として、認識部の設計問題を外部環境ダイナミクスのハイブリッド抽象化問題として捉え、それをもとにしたリアルタイム最適制御系の設計理論を構築することを目的とする。具体的には次の点を明らかにする。

(1) 外部環境モデリングの構築

非線形システムのハイブリッド抽象化手法、および環境状況推定の提案

(2) リアルタイム最適制御との統合

リアルタイム環境モデリングと最適制御の統合によるオープン制御系の設計理論の構築

3. 研究の方法

オープン制御系の設計方針として、非線形の制御対象と外部環境ダイナミクス（いずれも

ダイナミクスは既知とするが、外部環境ダイナミクスの将来の振舞いは未知とする）との複雑な相互干渉を、提案する「離散抽象化」を用いて単純化して近似表現することで、連続と離散のハイブリッド空間上の相互干渉問題に帰着し、グラフ化された外部環境ダイナミクスの将来の振舞いを予測することを考える。そして、予測された状態をもとに、制御対象の状態の経由点の候補をハイブリッド空間上で求め、それをもとにリアルタイム最適制御入力を生成する。研究の大まかな流れは、まず、環境モデリングとして離散抽象化法を開発し、つぎに最適制御との統合化を図る。

4. 研究成果

本研究の主な成果は下記のとおりである。

① 非線形システムの離散抽象化手法の開発

非線形システムに対する最適制御問題は数多くあるが、複雑な拘束条件を要する場合には最適に近い近似解を得ることすら難しい。そのため、環境である複雑な拘束条件を何らかの形で近似し、最適解に近い解が容易に求められるようにすることが重要である。モデリングにおいて環境と制御対象は不可分である。すなわち環境を、対象とする非線形ダイナミクスによる振る舞いに応じて、適切にモデリングすることが重要である。

ここでは、離散時間非線形ダイナミクスの振る舞いを量子化埋め込みという手法を用いて量子化し、状態空間上での解の振る舞いを有向グラフで表現する手法を提案した。有向グラフのノードは、量子化によって得られた状態空間上の代表点を表し、各ノード間のエッジは、入力を加えることでノードの近傍から、近傍に遷移可能なノードを結んでいる。得られた手法は、逐次、量子化の粒度を細かくすること、あらかじめ与えた近似精度を保証する近似モデルを導出するものである。量子化の粒度を細かくする手法は、ある種の線形計画問題に帰着され、比較的効率良く計算可能である。

この制御対象のダイナミクスを考慮して得られた環境に関する有向グラフを用いた、環境の振る舞い推定に関しての研究はまだ成功には至っておらず、今後の課題として残されるが、状態空間を離散抽象化することで、不確かさの影響が相対的に小さくなるものと考えられる。

下図に、2次元のファンデル・ポールを離散抽象化した例を示す。状態空間 $[-3, 3] \times [-3, 3]$ 上を3005の離散状態で表現している。ある種の線形計画問題を解くことで、中心から遠い場所は荒い量子化となり、一方、周期解が存在する中心の箇所は細かい量子化で有向グラフが得られている。

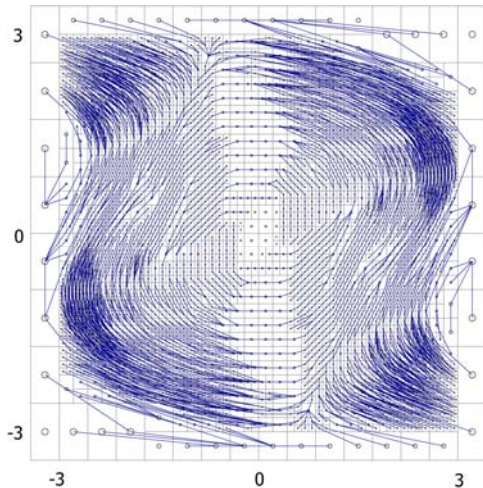


図3 離散抽象化

② リアルタイム最適制御との統合

ここでは、障害物回避の最適制御、鉄鋼の燃焼炉における燃焼制御の2つを例にとり、その特有の問題・構造を活かしつつ、オープン制御系設計の基礎理論構築に向けた基礎研究を行った。

1) 障害物回避の最適制御

離散時間非線形システムに対する障害物回避等の有限時間非線形最適制御問題を、非線形ダイナミクスを離散抽象化した有向グラフを用い、評価関数の上限値・下限値を求めることで、近似最適解を容易に求める手法を構築した。2次元上でのビークルの軌道生成問題に適用し、状態空間を約1000個の量子化セル、入力を256個の量子化セルに分割し、有向グラフを構築し、最適軌道が生成できることを確認した。一旦、有向グラフが出来上がれば、どのような初期状態に対しても解が簡単に得られる点が利点である。

また、連続時間線形システムに対して、障害物回避等の拘束条件を一般化した有向グラフ拘束付モデル予測制御問題を定式化し、ハイブリッド型有向グラフのモデリング、および、その解法を提案した。

2) スラブスケジューリングを含む燃焼制御のリアルタイム最適制御

鋼材加熱炉の燃焼制御は通常、閉じた制御系として構築されるが、ここでは、スラブの初期温度や目標温度に応じて、加熱炉にスラブが装入される順を変えていることに着目し、装入順と燃焼制御と同時にリアルタイム最適化する問題を考えた(図4)。

これは、スラブヤードにはスラブが逐次蓄えられるが、そのスラブの状況に応じて適宜、装入順と燃焼制御をリアルタイムで最適化

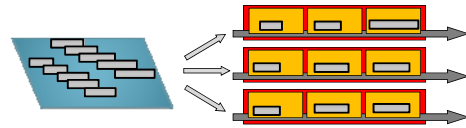


図4 鋼材加熱炉の燃焼制御

するハイブリッド制御手法となる。加熱炉は離散時間のハイブリッドフローショップモデルで記述し、リアル最適制御問題を解いた。得られた例の一つを下図に示す。

図5より目標温度1200度に達し、かつ図6より、最初の2ゾーンはフルに加熱し、最終ゾーンで微調整するのが最適であることがわかる。また、3機で各機3ゾーンのモデルにおいて、毎回の計算時間は約900秒であり、目標の30分より小さな時間で算出できることがわかった。これにより実用的な視点でも有効であることがわかった。

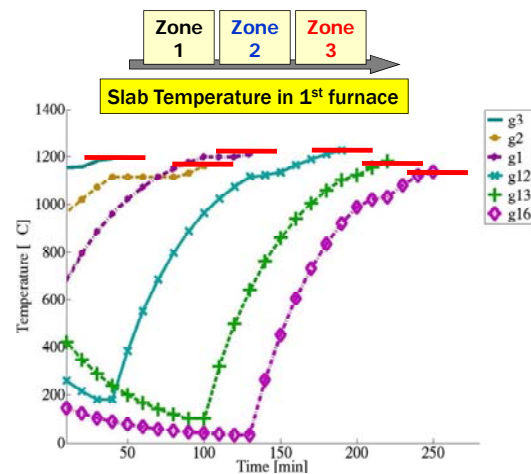


図5 鋼材スラブの温度

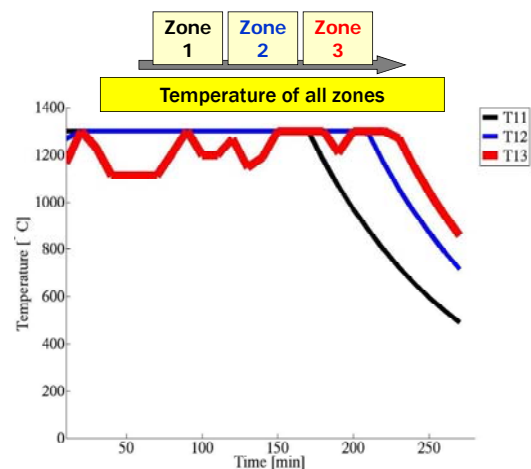


図6 加熱炉のラジエータ温度

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4件)

- ① Yuichi Tazaki, and Jun-ichi Imura, Discrete Abstractions of Nonlinear Systems Based on Error Propagation Analysis, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 57, 550/564, 2012 (査読有)
- ② Yuichi Tazaki and Jun-ichi Imura, Planar Bipedal Locomotion Control Based on State-Discretization, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 58, No. 5, 657/665, 2010 (査読有)
- ③ 藤井 進, 裏山 幸治, 加嶋 健司, 井村 順一, 黒川 哲也, 足立 修一, 鋼材加熱炉の装入スケジューリングと燃焼制御の同時最適化, 鉄と鋼, Vol. 96, No. 7, 434/442, 2010(査読有)

[学会発表] (計5件)

- ① Jun-ichi Imura, Kenji Kashima, and Takayuki Ishizaki, Clustering of large-scale dynamical networks for glocal control, Symposium on Developments in Control Theory towards Glocal Control, 2012年1月6日, 東京.
- ② Yuichi Tazaki, and Jun-ichi Imura, Multiresolution Discrete Abstraction for Optimal Control, 49th IEEE Conference on Decision and Control, 2010年12月15日, Georgia, USA.
- ③ Susumu Fujii, Koji Urayama, Kenji Kashima, Jun-ichi Imura, Tetsuya Kurokawa, and Shun-ichi Adachi, Machine-based modeling of conveyor-type flowshops with application to scheduling and temperature control in slab reheating furnace, 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 2010年9月8日, 横浜.
- ④ Tayayuki Ishizaki, Kenji Kashima, Jun-ichi Imura, Atsushi Katoh, and Hiroshi Morita, PI control system design for electromagnetic molding machine based on linear programming, 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 2010年9月8日, 横浜.

6. 研究組織

(1)研究代表者

井村 順一 (IMURA JUN-ICHI)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・

教授

研究者番号 : 50252474

(2)研究分担者

()

研究者番号 :

(3)連携研究者

加嶋 健司 (KASHIMA KENJI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 60401551