様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ３０ 年　 ５ 月 ２７ 日現在

機関番号：１４４０１
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2015～2017
課題番号：１５Ｋ１４００７

研究課題名（和文）近似模倣と近似交替模倣に基づく組込み制御システムのロバストスーパバイザ理論の創成

研究課題名（英文）Robust Supervisory Control of Embedded Control Systems Based on Aprroximate Simulation and Approximated Alternating Simulation

研究代表者
潮　俊光（USHIO, TOSHIMITSU）

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：３０１８４９９８

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,000,000円

研究成果の概要（和文）：近似模倣及び近似交替模倣関係を用いて，組込みシステムのスーパバイザを形式的に設計する方法を開発した．まず，出力から状態を推定するシンボリック状態推定器を用いたスーパバイザ制御器の設計法を提案した．次に，ネットワーク化制御システムにおいて，ネットワークの遅延などの特性の形式的モデルを用いた形式的設計法を提案した．さらに，入力無駄時間のある制御対象に対してシンボリックスミス制御器設計法を開発した．また，人間機械システムにおいて，ユーザモデルに時間情報を組み込んだハイブリッドモデルと弱近似交替模倣関係とを用いて，モードコンフュージョンの検出アルゴリズムを開発した．．

研究成果の概要（英文）：We considered a controlled physical system modeled by a finite transition system　We developed a symbolic design of a supervisor using an approximate simulation and an alternating simulation relation. First, we proposed a formal design method of a supervisor with a symbolic observer that computes a set of all possible current states. Second, we proposed a forma design method of a networked control system where delays and packet dropouts exist. Third, we proposed a symbolic Smith method for a physical plant with an input delay.   Finally, we considered a human-machine system. We introduced a hybrid user model that includes temporal knowledge of a user and developed an algorithm for the detection of a mode confusion using a novel notion called a weal alternating simulation relation.

研究分野：システム理論

キーワード：システム制御　組込み制御　スーパバイザ制御　形式的手法　模倣関係　人間機械システム　遷移システム

１．研究開始当初の背景

組込み制御システムはあらゆる分野で利用されている基本技術である．プラニングや意思決定などのより高度な機能を実現するとき，離散抽象化モデル（状態の離散化）を用いたスーパバイザ制御が必要となる．この離散抽象化モデルは制御対象を近似しており，その近似誤差に対してロバストなスーパバイザ設計法の確立は，世界的にも注目されている意義ある研究課題である．近年，近似模倣と近似交替模倣を用いたロバスト性の解析法とロバスト制御法が提案された．

２．研究の目的

不確かさのある組込み制御システムにおいて，プラニングや意思決定などの論理的仕様に対して最適なコマンドを決定するロバストスーパバイザの設計法を開発する．不確かな状態遷移を不可制御事象によって表し，制御対象の離散抽象化モデルを基に，制御対象の出力から離散化状態を推定する観測器の構成法と制御仕様を満たすコマンドの決定法を提案する．近似模倣及び近似交替模倣とスーパバイザ制御理論とを融合させることで，ロバスト安定性を保証したコマンドを決定する．さらに，ネットワーク化組込み制御システムへ拡張する．また，人間－機械系において時間的な情報も利用したモードコンフュージョンの検出に応用する．

３．研究の方法

制御対象である物理モデルの遷移システムモデルを求めた．システムの望ましい振る舞いを表す遷移システムに対して，近似模倣及び近似交替模倣関係を用いて，スーパバイザ制御器を形式的に設計する方法を開発した．以下の４つのサブテーマに分けた．

（１）出力から離散モデルの状態を推定するシンボリック状態推定器の設計方法を提案し，その推定器を用いたスーパバイザ制御器の設計法を提案した．

（２）制御対象と制御器の間のデータ通信にネットワークを利用するネットワーク化制御システムにおいて，ネットワークの遅延などの特性の形式的モデルを提案し，制御器の形式的設計法を提案した．

（３）無駄時間の制御対象に対する制御法として有名なスミス法を，遷移システムモデルを用いた制御器設計法に拡張した．

（４）人間機械システムにおいて，ユーザモデルに時間情報を組み込んだハイブリッドモデルを用いて，時間的な知識も含む場合のモードコンフュージョンの検出に近似交替模倣関係を応用した．

４．研究成果

（１）一般に，物理プラントの状態集合はユークリッド空間，状態の時間発展は微分方程式でモデル化される．この微分方程式モデルの振る舞いを正確に表現する遷移システム（物理プラントモデル）を考えた．デジタル制御器で取りうる状態は有限集合なので，プラントの振る舞いを離散状態集合上の遷移システム（抽象化プラントモデル）で近似した．物理プラントモデルと抽象化プラントモデルには近似縮小模倣関係があると仮定した．この関係の概念図を図１に示す．

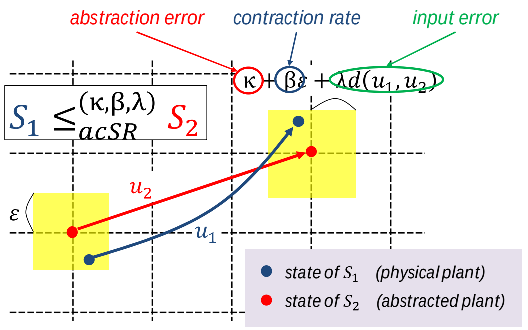


図１　近似縮小模倣関係の概念図

この抽象化プラントモデルと模倣関係を持つように目標遷移システムを与えた．物理プラントからの出力（状態の一部）を基にプラントの状態を推定するシンボリック観測器の構成方法を示した．物理プラントの状態において，出力が同じとなる状態の集合を詳細化して，その詳細化された状態集合上の遷移関係が物理プラントの状態と近似縮小交替模倣関係を満たすような遷移システムを構成した．この遷移システムの状態のベキ合を状態集合とするとシンボリック観測器が構成できることを示した．この観測器は物理プラントと近似縮小模倣関係となることを示し，出力列から推定した遷移可能なすべての状態を求められることを示した．この観測器を用いて，物理プラントの振る舞いが目標トランジションシステムの振る舞いと近似交替模倣関係となることを示し，この意味で制御されたプラントは目標トランジションの振る舞いに追従することを示した．

さらに，どのような状況でも必ず制御入力が決定できるデッドロックフリーなスーパバイザ制御器の設計法も提案した．

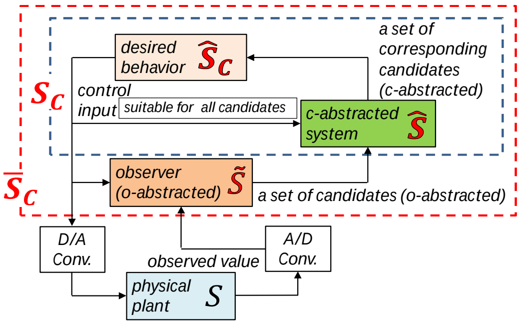


図２．シンボリック観測器を用いた出力スーパバイザ制御

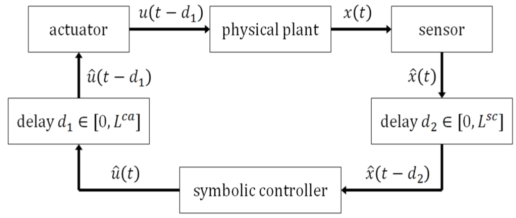


図３．シンボリック制御器を用いたネットワーク制御

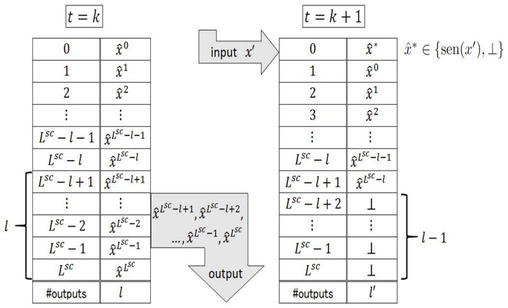


図４．アンリライアブルなデータ送信のモデリング

（２）図３に示すようなネットワーク化制御システムを考えた．センサーから制御器，制御器からアクチュエータの間のデータ転送に遅延があるとき，その遅延を待ち行列とみなして遷移システムでモデル化した．さらに，データ損失は非決定遷移システムで表現し，その合成によってアンリライアブルなネットワークの特性をモデル化した．図４にアンリライアブルなネットワークのモデリング図を示す．抽象化プラントモデルを用いて，データ損失の発生を考慮して，アクチュエータで制御入力を更新する時刻でのプラントの状態を予測する遷移システムを導入した．この遷移システムをもとに制御入力を決定するシンボリックな予測制御法を開発した．この予測機構を利用することで望ましい振る舞いを実現できることをシミュレーションで確認した．

（３）制御入力に遅れがある物理プラントを考えた．このようなシステムに対する制御法の一つとして，スミス法が古くから知られている．このスミス法をデジタル計算機で実装するための形式的手法として，シンボリックスミス法を提案した．図５にシンボリックスミス法のブロック線図を示す．制御入力に遅延のある物理プラントを，待ち行列付きの遷移システムで抽象化した．この抽象化モデル（図５のシンボリックシステム）を基に，プラントの抽象化状態の予測を行うシンボリックスミス予測器を構成した．シンボリックスミス予測器の状態集合として，抽象化された状態集合のベキ集合を考え，観測された出力列から遅れ時間後の状態が取りうる状態の集合を求めた．この予測器とシンボリック

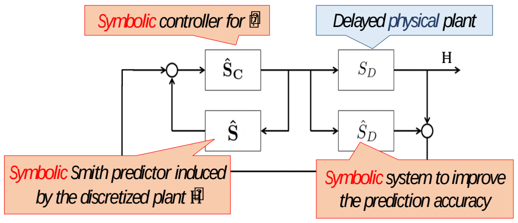
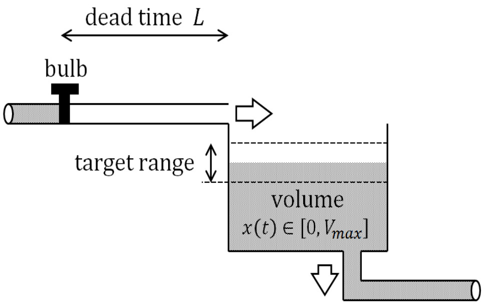
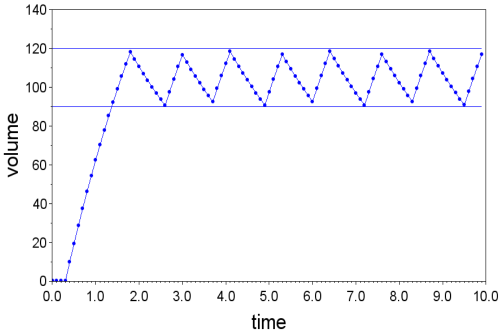


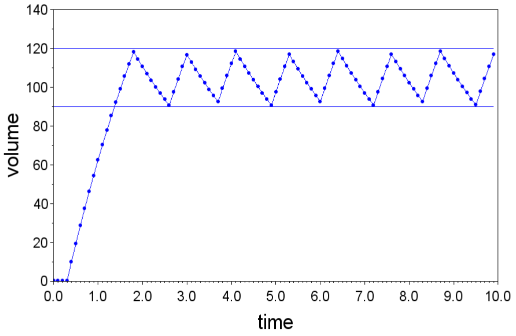
図５．シンボリックスミス法



(a) 制御対象



(b) 状態の時間応答



(c) 制御入力

図６．シンボリックスミス法の例題

制御器を用いたシンボリックスミス制御器の設計法を提案した．この制御器によって，物理プラントの振る舞いが目標トランジションシステムの振る舞いと近似交替模倣関係となることを示した．

図６に本手法を適用した例を示す．図６(a)のようなタンクシステムを考えた．タンクの水位が 60 から 120 の間に水位が常に収まるという制御仕様を考えた，このときの状態応答と制御入力を図６(b)，(c)に示す．制御仕様通りの振る舞いになっていることが分かる．

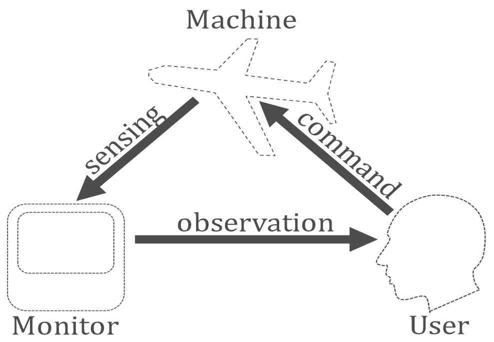


図７　人間機械システム

（４）人間が機械を操作する人間機械システムにおいて，ユーザがインタフェース表示を見て次の命令を決定するとき，その命令によって機械の状態がどのように変化するかをユーザは予想している．実際の機械の状態変化がユーザの予想した状態変化と異なる現象をモードコンフュージョンという．モードコンフュージョンが発生するとユーザは動転して，誤った操作をすることがあり，その結果重大な事故を引き起こすことがある．複雑な組込み制御システムを適切にユーザが監視するためには，モードコンフュージョンの発生を形式的に調べる方法の開発は重要である．

本研究では，機械の数理モデルとして，モードと物理変数の両方の変化を統一的に表現できるハイブリッドオートマトンを定義した．インタフェース表示と機械の状態との間の対応を２項関係で表した．命令によるインタフェース表示の変化に関するユーザの知識（ユーザモデル）を遷移システムで表した．従来研究では，ユーザモデルは論理的な情報しか表現できなかったが，命令を出してから次の命令を出すタイミングまでの経過時間に関する知識も表現できるユーザモデルを提案した．インタフェース表示と機械の状態との間の２項関係に対して，弱交替模倣関係という新しい概念を提案した．そして，モードコンフュージョンが発生しないための必要十分条件が，このインタフェース表示と機械の状態との間の２項関係が弱交替模倣関係であることを証明した．このことを利用して，モードコンフュージョンを検出するアルゴリズムを提案した．このアルゴリズムを HVAC システムに適用して，モードコンフュージョンが発生することを示した．

さらに，図 8 に示すような HVAC システムに応用した．図９は，HVAC システムの温度変化を示した例である．黒の領域が，取りうる温度を表している．一方．青の領域は操作者が予想している温度とその到達時刻を表している．この図では，青の領域が黒の領域からはみ出しており，モードコンフュージョンが発生する可能性があることがわかる．

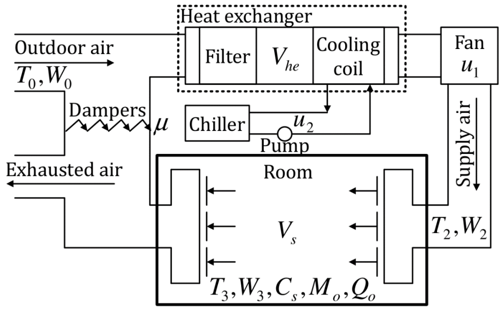


図８　HVAC システム

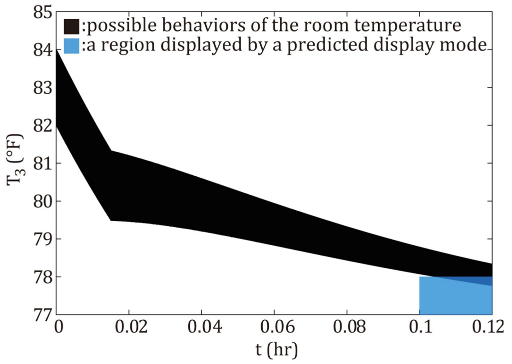


図９　HVAC システムの温度変化の例

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計２件）

① Masashi Mizoguchi and Toshimitsu Ushio, Deadlock-free output controller design based on approximately abstracted observers, Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 査読有, vol. 30, 2018, pp. 58-71.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.nahs.2018.04.001

② Masashi Mizoguchi and Toshimitsu Ushio,, Symbolic design of networked control systems with state prediction, IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, vol. E100-D, 2018, pp. 1158-1165.
DOI: 10.1587/transinf.2010FOP0001

〔学会発表〕（計５件）

① Yoshiki Maeda and Toshimitsu Ushio, Detection of mode confusion in human-machine system model with temporal information on operations," The 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control 2017, Toulouse(France).

③ Masashi Mizoguchi and Toshimitsu Ushio, Symbolic control of systems with dead times using symbolic Smith predictors, 55th IEEE Conference on Decision and Control, 2016, Las Vegas(U.S.A.)

④ Masashi Mizoguchi and Toshimitsu Ushio, Output feedback controller

design with symbolic observers for cyber- physical systems, The First Workshop on Verification and Validation of cyber-physical systems, 2016, Reykjavik(Iceland)

⑤ 溝口　将史, 潮　俊光, シンボリック観測器を用いた模倣出力フィードバック制御, 2016 年電子情報通信学会総合大会, 2016, 福岡市

⑥ Masashi Mizoguchi and Toshimitsu Ushio, Observer-based similarity output feedback control of cyber-physical systems, 5th IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems, 2015, Atlanta(U.S.A).

６．研究組織

(1)研究代表者

潮　俊光（USHIO Toshimitsu）
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号：30184998