

審査の結果の要旨

氏名 木戸 肩吾

本論文は、物理情報システム (cyber-physical system, CPS) に対する各種の形式手法の中でも、特に過大近似 (overapproximation) の手法に関する研究を取りまとめたものである。本論文では、センシングからアクチュエーションまでに遅延を含むハイブリッドシステムを CPS のモデルと考え、その到達可能領域の過大近似を、遅延による影響の過大近似と遅延を含まないシステムの到達可能領域の過大近似の二段階に分けて計算する手法を提案し、その有効性について論じている。解析を二段階に分けたことにより、本論文の手法は他の既存の手法と組み合わせて各種の物理情報システムに対して適用することができる。

本論文は 8 章から成る。第 1 章では本論文の四つの貢献のそれぞれについて、その背景と貢献の内容がまとめてられている。第 2 章では、本論文を理解するために必要な予備知識として、遅延を容認する近似双模倣と超準解析を用いた抽象解釈について解説されている。

第 3 章では、まず解析の一段階目として、遅延を含むシステムと遅延の含まれない理想的なシステムの間振る舞いの差を過大近似する手法について述べられている。メモリ状態、時刻、モードの三つ組からなる状態の間に前距離が定められ、近似双模倣関係を導出することで差の上限が計算される。例として、DC/DC 昇圧回路を water tank に適用されている。後者は非線形なシステムであり、本手法が非線形なシステムにも適用できることも示されている。

第 4 章では、前距離の定義を変更することにより、二つのシステムの振る舞いの Skorokhod 距離の上限をより精密に求めることのできる手法が提案されている。Skorokhod 距離では、時間軸をずらした状態を比較することが可能になるため、到達可能性解析等を行う際により正確な近似を求めることが可能となる。

第 5 章では、解析の二段階目として、遅延を含まないハイブリッドシステムの到達可能領域を過大近似する手法について述べられている。超準解析をハイブリッドシステムの検証に用いるアプローチは末永・蓮尾によって提案されているが、本論文では、超準解析の移転原理によって、凸多角形の抽象領域を用いた抽象解釈をハイブリッドシステムに適用することに成功している。具体例として、線形な water tank で一定の遅延を含むものと、非線形な water tank で遅延を含まないものが解析できることを示されている。

第 6 章では、二段階の手法を組み合わせることによって、特に非線形のダイナミクスに対する解析が可能であることが示されている。実際に例としてスイッチングに遅延を含む非線形な water tank の状態が危険な領域に到達しないことが数学的に保証されている。ま

た、線形な DC/DC 昇圧回路の例では、解析を二段階に分けたために、解析の二段階目として抽象解釈の拡張の代わりに既存手法を用いることで、到達可能性解析のみならず、より難しい制御器生成まで行うことが可能であることが示されている。

第 7 章では関連研究について述べられ、第 8 章では本論文と結論と将来の課題が述べられている。

以上要するに、本論文は遅延を含むハイブリッドシステムの到達可能領域の過大近似を二段階に分けて解析する手法を与え、非線形のシステムの解析も可能とした点において、コンピュータ科学、特に物理情報システムの形式手法に対する貢献が大きいものと判断される。よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。