

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：13401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K15968

研究課題名(和文)連続・離散ハイブリッド領域のための区間制約プログラミング技術

研究課題名(英文)Interval constraint programming technique for discrete-continuous hybrid systems

研究代表者

石井 大輔 (Ishii, Daisuke)

福井大学・学術研究院工学系部門・講師

研究者番号：00454025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：連続的または離散的な振る舞いをするハイブリッドシステムを区間制約プログラミングのアプローチで記述・求解するとともに、さまざまな解析を高信頼に実施する技術を設計・実装した。解析では、実数計算の精度保証、関数集合を記述した微分方程式、時間軸上の性質を記述した時相論理式等を扱うが、提案手法はこれらを制約プログラミングの枠組みでとらえる点を特徴とする。実装にあたっては、一部を検証済みコードとして信頼性を高めるとともに、求解処理を並列化してスパコンを利用した効率化をはかった。ハイブリッドシステムの例を基本的なものから産業界由来のものまで収集し、提案手法の有効性を実験により評価した。

研究成果の概要(英文)：We have developed techniques for analyzing hybrid systems that behave both continuously and discretely based on interval constraint programming approach. Such analysis combines various problems, e.g., verification of real computation errors, differential equations on function sets and logic formulas on temporal properties. The proposed techniques are characterized by an integration of the problems within a constraint programming framework. To implement the techniques, we have verified a part of the codebase its correctness. We have also parallelized the core solving process for high-performance computation. In the experiments, we corrected hybrid system examples from basic ones to industrial ones and evaluated the effectiveness of the proposed techniques.

研究分野：ハイブリッドシステムと制約プログラミング

キーワード：ハイブリッドシステム 制約プログラミング 区間解析 探索・論理・推論アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

(1) 制約プログラミングと区間解析

制約充足問題はある領域(ドメイン)の変数に関する制約について、その充足解を求める問題である。離散領域、実数領域等、さまざまな領域の制約により対象となる問題を記述し、充足問題さらには最適化問題を、人工知能分野で培われてきた局所制約伝播法、探索法等を用いて高速に求解する制約プログラミング技術が発展してきた。

数領域の制約(例:連立方程式)については、区間解析に基づく枠組みが1990年代中頃から仏・ナント大学を中心に発展してきた。区間制約プログラミングは、対象を直截に記述した(非線形系や制約過不足系を含む)多くの制約充足問題を、数値誤差エラーの心配なく精度保証付きで求解することを可能にする。区間解析の研究は日本を発祥とし、国内での基礎研究の流れがあるが、研究代表者は、仏グループとも連携しながら、区間制約プログラミングの研究を独自に進めてきた。常微分方程式制約を扱う手法、量子を扱う手法、ロボティクスへの応用、求解処理の並列化等に取り組んできた。

(2) ハイブリッドシステム

時間とともに状態が連続変化したり、離散変化したりする系を(連続・離散)ハイブリッドシステムという。物理現象と計算機を強く結合したシステムの根幹技術として注目されている。車載組み込みシステムや生物学モデル等さまざまな問題がハイブリッドシステムの特徴を持っているが、多くは高い安全性が問われるものであり、そのため、専用の検証技術が重要となる。

ハイブリッドシステムがある性質をみたくことを厳密に検証するモデル検査の1アプローチとして、検証問題を制約充足問題に変換して求解する有界モデル検査がある。完全な検証は計算量が大きいので、実用性を損なわない範囲で検証問題を簡略化して解く有界モデル検査法が開発されてきた。とくにハイブリッドシステム仕様中の関数値域を有界とし、かつ微小にずれることを許した有界モデル検査を考え、区間制約ソルバーを用いて求解する枠組みが提案され、適用可能事例の多さから注目を集めている。研究代表者も本枠組みの提案者の1人であり、検証問題を制約式に変換する方法、連続・離散の境界制約の求解手法等に取り組み、検証可能な系のクラスを拡大してきた。

(3) 問題点

研究代表者は研究協力者とともに以前より区間制約プログラミング技術を利用したハイブリッドシステムの解析技術の研究を行ってきたが、本研究課題では継続的に以下の問題点を解決することを目指す。

- 解析のために、数値計算法、探索法、プロ

グラミング言語等さまざまな要素技術を統合する必要があるが、区間制約概念を中心にした計算方法や実装プログラムの構築方法が明らかでない。

- ハイブリッドシステムが非線形制約で記述されたり、サイズが大きくなったりすると完全な解析が困難になるが、区間の導入や有界の解析により、部分的であるが有用な解析法を明らかにしたい。
- 提案手法では、システムへの入力信号の不定性と数値計算誤差による不定性をともに考慮するが、これにより計算結果の解釈が難しくなる。提案手法の簡潔な定式化により解決をはかりたい。
- 複数の要素技術を統合するため、実装の信頼性が落ちてしまう。
- 問題インスタンスの規模に応じて解析の実行時間が増大する。そのために大規模PCクラスタを用いた並列化を検討しているが、効率の高い並列化の方法や、並列化法の汎用性が十分に明らかではない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、広範なクラスのハイブリッドシステムの高信頼な解析を可能とすることである。本研究で扱うハイブリッドシステムとしては、常微分方程式とガード条件が非線形の式で記述されるものや、実用ツールであるMATLAB/Simulinkで作成され、数100~数1,000ブロックからなる中規模のものがある。また、ハイブリッドシステムに対し実施する解析として以下を検討した:

- 充足性: 与えられた性質について、全初期値またはある初期値についてシステムが性質を満たすかどうかを判定。
- 頑強性: システムが与えられた性質を満たす度合いを数値化して計算。
- 適合性: 2つのシステムモデルが与えられたとき、観測される振る舞いの距離が許容範囲内かどうかを判定。
- テストケース生成: 指定のテスト目的を達成するための入力信号を探索。

本研究では、ハイブリッドシステムとその性質を記述した、実数領域、連続関数領域、連続・離散ハイブリッド領域の制約を求解し、その結果を上記の解析に利用する技術に取り組む。実数関数の根の探索、区分連続軌道が離散変化で繋がったハイブリッド軌道の計算、時相論理式の時間区間に基づく評価といった計算を制約充足・最適化問題の求解処理とみなし、制約概念による見通しのよい枠組みの構築を目指す。提案する枠組みでは、ハイブリッドシステムの有限長のシミュレーション、ハイブリッド軌道に対する性質(時相論理式)の成否および頑強性の計算、ハイブリッド軌道集合に関する統計的な性質の検査等の解析を実現する。また、制約の充足問題・最適化問題の求解処理は大規模PC

クラスタ上で並列処理可能とすることを旨とする。

3. 研究の方法

本研究では、区間解析に基づく制約求解技術の開発を核とし、ハイブリッドシステムのシミュレーション・検証へと応用する研究と、求解処理の並列化、求解処理系の実装の検証等、求解技術を拡張・補強する研究にも取り組んだ。

本研究は、以前より行ってきた区間制約求解技術の研究から継続する形で実施した。とくに、連続・離散ハイブリッド領域の制約をより適切に扱ったり、数値シミュレーションに基づくより実用的な検証技術を検討したり、並列処理をより大規模に実施したりすることに取り組んだ。

2015年度は、(a) ハイブリッドシステムの区間計算に基づくシミュレーションを利用し、信号時相論理式の成否および頑強度を高信頼に計算する方法を検討した。(b) 連続値をとる状態変数をもつプラントと制御器からなるシステムを考え、その制御特性を信号時相論理式で記述し、頑強度に基づく最適化によりパラメタチューニングする方法を検討した。(c) TSUBAME2 スーパーコンピュータ上で並列制約ソルバーの実装・チューニング・実験を行った。

2016年度は、前年度の項目 (a) の成果のプログラム実装を行い、ツール HySIA として整備した。本ツールを用いて提案するシミュレーション手法と検証手法の性能を評価したり、例題を複数用意してツールの有用性を明らかにした。(b) ハイブリッドシステムの専用モデリング言語、モデルライブラリ、GUI を備える Acumen ツール上に、信号時相論理に基づくモニタリング機能と統計的モデル検査機能を実装した。追加機能について、実用的なシナリオ内での有用性を検討するための準備を行った。Acumen の開発者である W. Taha 教授らとの研究協力も行った。(c) 並列制約ソルバーを改変し、最適化問題用の並列ソルバーを構築した。並列化にあたっては、並列最適化用の負荷分散ライブラリを構築するアプローチをとっているため、本ライブラリを用いて一般の最適化問題の並列求解を実施することも期待できる。

2017年度は、(a) HySIA ツールの整備と、Acumen ツール上でのモニタリング機能と統計的モデル検査機能の開発に取り組んだ。スマートホーム等の具体的なシナリオでの提案技術の有用性を探った。(b) 並列処理に関しては、制約付き最適化問題を一般化したようなベンチマーク問題を考案し、その求解実験を行いながら並列処理の方法を検討し、最終的に並列化用ライブラリを提供することを目指した。(c) 産業界で用いられている

MATLAB/Simulink で記述された小・中規模のモデルを収集し、テストケース生成や2モデル間の適合性検査のための静的解析手法を検討した。

4. 研究成果

(1) 平行体と用いたハイブリッドシステムのシミュレーション

ハイブリッドシステムの精度保証付き数値シミュレーション（区間シミュレーション）におけるラッピング効果を削減するため、平行体（線形変換した区間ベクトル）を用いる手法を開発した。提案手法により、途中で離散ジャンプを含む実数値軌道を、高信頼かつ精度よくシミュレーションすることが可能になった。本研究課題では、手法の定式化と非線形ハイブリッドシステムの例の収集および実験を中心に取り組んだ。複数の非線形式で記述される例について実験を行い、提案手法によるラッピング効果削減により、(削減しない場合と比較し) 実施可能なシミュレーション長が 50 倍～数 100 倍に改善されることを確認した。

(2) 信号時相論理と区間解析に基づく実数値信号のモニタリング

ハイブリッドシステムの区間シミュレーションを利用し、信号時相論理式の成否および頑強度を高信頼に計算するモニタリング手法を開発した。提案手法では、式中の原子命題の成否が切り替わったり頑強度が極値となる時点を区間ニュートン法により検出し、検出された時間区間を式中の時相論理演算子に応じて伝播することにより信号時相制約を評価する。非線形ハイブリッドシステムの有限長の振る舞いと、その性質を記述した時相論理式について、信頼性高くかつ効率よく検証することを可能にした。

モニタリング手法を用いたハイブリッドシステムの統計的検査について研究した。まず、区間解析による保守的なモニタリングと統計的モデル検査を接続し、高信頼な検査が可能となることを示した。

つぎに、モデリング・シミュレーション環境である Acumen に統計的モデル検査機能を実装し、スマートホーム等のモデルベース開発事例における統計的モデル検査の有用性を示した。また Acumen のモデリング言語で確率的な振る舞いや性質のモニターを簡潔に記述する方法について検討した。

(3) 制約ソルバーの大規模並列化

並列区間制約ソルバーを X10 GLB (global load balancing) ライブラリを用いて実装した。TSUBAME2 スーパーコンピュータ上で実験を行い、900 コアまで線形に近い速度向上（最大 751 倍）を得た。

また、一般の制約付き最適化問題を並列探索に基づき求解するためのライブラリを構築した。効率的な求解のために、並列ワーカ

一が暫定最適値を効率よく共有する方法を提案した. 完全木に基づくベンチマーク問題を考案し, 本ライブラリの評価実験を行ったところ, 504 ワーカーによる求解において 250 倍程度の速度向上が得られた.

(4) ツールの検証

ハイブリッドシステム検証ツールの信頼性を高めるため, ツール実装で用いる基本的な区間演算コードや, 基本的な有界モデル検査アルゴリズムについて, 検証を実施した. 区間の四則演算コードについて, ホーア論理と SMT ソルバーを用いたプログラム検証を実施し, 結果の区間が真解を包含し, かつ tight な区間であること等を証明した. 複数の有界モデル検査アルゴリズムを定理証明支援系上に実装し, その健全性を証明した.

(5) ハイブリッドシステムや車載応用に関する事例収集

非線形ハイブリッドオートマトンの例を, 基本的なものから応用例まで多数作成した. これらを用いた実験により, 既存ツールでは扱えなかったり, 結果が誤ったり, 精度が悪かったりするのに対し, (1) の区間シミュレーション手法により結果が改善されることを確認した.

MATLAB/Simulink で記述された小・中・大規模のモデルを収集した. まず, 大規模なモデルや非線形形式を表現したモデルでは既存ツール (SLDV) が使用不能となる事例を確認した. つぎに, テストケース生成や 2 モデル間の適合性検査のための静的解析の方法を検討した. モデルを制約充足問題に変換し, SMT ソルバーと区間制約ソルバーで求解することにより, 既存ツールでは静的解析が難しい場合も扱えることがわかった. 非線形形式を記述したモデルや中規模のモデルにおいても提案手法が有効であることを確かめた.

(6) ツールの整備

研究成果 (1), (2), (5) の提案手法をツール HySIA として OCaml 言語, C/C++ 言語により実装した. ツールはハイブリッドオートマトンの定義と信号時相論理式 (性質) を入力とし, シミュレーション結果と性質の成否・頑強性を出力することができる. ウェブインターフェースも備え, 容易にツールを利用できるようにした. 研究成果 (3) の提案手法を X10 言語で実装し, ライブラリ ICPX10 として実装した. 両ツールのソースコードを公開している.

(7) 本研究の特色・意義・波及効果

本研究は, 区間制約プログラミングを軸として推進する点を特色とする. 制約は, 時相論理式, 微分方程式, 計算誤差範囲といった, ハイブリッドシステム解析において扱う諸々の対象に統一的な視点を与える. 制約プ

ログラミングの求解処理では, 変数への付値集合を「状態」とし, 制約伝播により状態を書き換えていく過程とみなせる. この求解処理に時相論理式の評価や統計的な検査を埋め込むことにより, さまざまな要素技術を見通しよく統合したハイブリッドシステム解析の枠組みを構築できたと考えている.

提案する枠組みを負荷分散ライブラリと接続し, 並列分散環境にて高速に求解を実施することができる. また, 一部の実装について検証済みの高信頼なコードを実現した (検証済みコードそのものを実装に利用するのは今後の課題である).

車載システム等の開発において作成される MATLAB/Simulink モデルに対し, 研究成果を利用する検討においては, 実際に有効性を示す実例を示すことができた. ツール開発を進めることにより, 産業界にも貢献することが期待できる.

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. D. Ishii, A. Goldsztejn. HySIA: Tool for Simulating and Monitoring Hybrid Automata Based on Interval Analysis. Proceedings of International Conference on Runtime Verification (RV), Lecture Notes in Computer Science 10548, pp. 370–379, 2017. (査読有)
DOI: 10.1007/978-3-319-67531-2_23
2. A. Goldsztejn, D. Ishii. A Parallelootope Method for Hybrid System Simulation. Reliable Computing, Vol.23, pp.163–185, 2016. (査読有)
<http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/volume-23/reliable-computing-23-pp-163-185.pdf>
3. D. Ishii, N. Yonezaki, A. Goldsztejn. Monitoring Temporal Properties using Interval Analysis. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E99-A, No.2, pp.442–453, 2016. (査読有)
DOI: 10.1587/transfun.E99.A.442
4. D. Ishii, N. Yonezaki, A. Goldsztejn. Monitoring Bounded LTL Properties Using Interval Analysis. The 7th and 8th International Workshop on Numerical Software Verification (NSV), Electronic Notes in Theoretical Computer Science 317, pp. 85–100, 2015. (査読有)
DOI: 10.1016/j.entcs.2015.10.009

[学会発表] (計 16 件)

1. S. Izumi, D. Ishii, K. Yoshizoe. An Extended GLB Library for Optimization Problems. HPC Asia, 2018 年 1 月 29 日. (東京都・千代田区)
2. 井上晃輔, 石井大輔. Acumen を用いたサイバーフィジカルシステムの統計的モデル検査. 第 15 回 ディペンダブルシステムワークショップ (DSW), 2017 年 12 月 21 日. (東京都・文京区)
3. 石井大輔. ハイブリッドシステムの可到達集合の精度保証. 第 1 回 精度保証付き数値計算の実問題への応用研究集会 (NVR), 2017 年 12 月 10 日. (福岡県・北九州市) (招待講演)
4. D. Ishii, A. Goldsztejn, N. Yonezaki. Reliable Simulation and Monitoring of Hybrid Systems Based on Interval Analysis. CyPhy Workshop, 2017 年 10 月 19 日. (韓国・ソウル) (招待講演)
5. T. Tomita, D. Ishii, T. Murakami, S. Takeuchi, T. Aoki. Template-Based Monte-Carlo Test Generation for Simulink Models. CyPhy Workshop, 2017 年 10 月 19 日. (韓国・ソウル)
6. 藪 智仁, 石井大輔. Why3 を用いた区間演算ライブラリの検証. 日本ソフトウェア科学会第 34 回大会, 2017 年 9 月 20 日. (神奈川県・横浜市)
7. 藤井采人, 石井大輔. 証明支援系 Coq を用いた有界モデル検査. 日本ソフトウェア科学会第 34 回大会, 2017 年 9 月 19 日. (神奈川県・横浜市)
8. 泉 翔太, 石井大輔, 美添一樹. X10 GLB ライブラリの最適化問題のための拡張. 電気関係学会北陸支部連合大会, 2017 年 9 月 11 日. (富山県・富山市)
9. 香椎蓮司, 石井大輔. 並列 RCSP ソルバーの求解過程の可視化. 電気関係学会北陸支部連合大会, 2017 年 9 月 11 日. (富山県・富山市)
10. 石井大輔. 区間解析に基づく非線形ハイブリッドオートマトンのシミュレーション・検証ツール. 第 14 回ディペンダブルシステムワークショップ (DSW16), 2016 年 12 月 15 日. (北海道・函館市)
11. 富田 堯, 石井大輔, 青木利晃. Simulink モデルに対するテストスイート自動生成. 第 14 回ディペンダブルシステムワークショップ (DSW16), 2016 年 12 月 15 日. (北海道・函館市)
12. 石井大輔, 富田 堯, 米崎直樹. ハイブリッドシステムの統計的モデル検査. 信学会総合大会 企画講演セッション「ビッグデータの解析と基盤に関わる科学技術の俯瞰と展開」, 2016 年 3 月 16 日. (福岡県・福岡市) (招待講演)
13. 峰尾太陽, 石井大輔, 渡部卓雄. 時相論理式の反証を用いた制御器のチューニング. 信学会 MSS 研究会 (MSS2015-79),

pp.61–66, 2016 年 3 月 4 日. (山口県・下関市)

14. 石井大輔. 区間解析による時相論理式の頑健性モニタリング. 信学会 MSS 研究会 (MSS2015-45), pp.59–62, 2016 年 1 月 26 日. (石川県・金沢市) (招待講演)
15. 石井大輔, 美添一樹, 鈴木豊太郎. 数値制約ソルバーのスケラブルな並列化. 日本ソフトウェア科学会第 32 回大会, 2015 年 9 月 9 日. (東京都・新宿区)
16. D. Ishii, K. Yoshizoe, T. Suzumura. Scalable Parallel Numerical Constraint Solver Using Global Load Balancing. ACM SIGPLAN Workshop on X10, pp. 33–38. 2015 年 6 月 14 日. (米国・ポートランド)
DOI: 10.1145/2771774.2771776

[その他]

ホームページ等

1. HySIA GitHub
<https://github.com/dsksh/hysia>
2. ICPX10 GitHub
<https://github.com/dsksh/icpx10>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 大輔 (ISHII, Daisuke)
福井大学・学術研究院工学系部門・講師
研究者番号: 00454025

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

上田 和紀 (UEDA, Kazunori)
GOLDSZTEJN, Alexandre
中島 震 (NAKAJIMA, Shin)
細部 博史 (HOSOBÉ, Hiroshi)
美添 一樹 (YOSHIZOE, Kazuki)
渡部 卓雄 (WATANABE, Takuo)