

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 17 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560467

研究課題名（和文）次世代高品質数値計算に基づく制御系開発支援システムの構築

研究課題名（英文）Development of CAD for Control Systems
Based on High Quality Numerical Computation in Next Generation

研究代表者

古賀 雅伸 (KOGA MASANOBU)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号：90251644

研究成果の概要（和文）：本研究では、既存のプログラムをほとんど修正することなく、演算精度を変更できる多倍長演算ライブラリおよび区間演算を実行できる精度保証付き数値計算ライブラリを開発した。また、多倍長演算における仮数部のビット長を適応的に調節することで任意の結果精度を保証できる手法を提案し、高品質数値計算ライブラリとして実現した。そして、高品質数値計算ライブラリに対応した、使いやすいユーザインターフェースを備えたモデリング・シミュレーションツールを開発した。

研究成果の概要（英文）：This research developed a library for multiple-precision arithmetic which enables us to change the precision of computation without modifying the existing codes and a library for verified numerical computation which makes it possible to use interval arithmetic very easily in the user programs. And a method for numerical computation with guaranteed arbitrary accuracy was proposed which controls adaptively the bit-length of the mantissa in multiple-precision arithmetic. A library for high quality numerical computation was developed based on the libraries above and the proposed method. We have developed a tool for modeling and simulation of control systems which provides the easy-to-use user interface and enables us to utilize high quality numerical computation.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2010年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2011年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | 0 | 0 | 0 |
| 年度 | 0 | 0 | 0 |
| 総計 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

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：制御系CAD

1. 研究開始当初の背景

(1) 申請者は、制御系の解析、設計、シミュレーション、およびリアルタイム制御を効率的に行なえる科学技術計算ソフトウェア (MaTX) を開発し、6軸ロボットアームや非

ホロノミック拘束を受ける複雑なシステムの制御に適用し、その有効性を実証してきた。本ソフトウェアはフリーソフトウェアであり、国内外の多くの教育機関、公的機関、企業で教育・研究に利用されている。近年、産

学官が連携して開発した学習・教育用途ソフトウェア KNOPPIX Edu に収録される、学会主催のセミナーで使用される等、使用範囲は拡大している。

(2) 近年、制御対象の大規模・複雑化が進み、スケールの異なるシステムを練成させたマルチスケール・システムに注目が集まり、高精度な数値計算が求められているが、標準的な倍精度実数計算では計算精度に対する要求に答えられなくなりつつある。数値解析の分野では、多倍長演算や精度保証付き数値計算に関する研究が進み、素粒子物理等の分野で、その利用が始まっている。しかし、計算ライブラリの整備が不十分であり、新しいライブラリを使用するには既存プログラムの修正が必要なため、制御系開発に高品質数値計算を利用した例は少ない。申請者は、多倍長演算や精度保証付き数値計算に基づく高品質数値計算ライブラリのプロトタイプを開発中であり、例題によりその有効性を確認済みであった。

(3) 制御系開発に計算機を利用するには、制御対象のモデルを計算機上に作成する必要があり、システムが複雑な場合は、ブロック線図を用いる方法が一般的である。特に、実用的な規模のシステムについては、モデル作成の効率性や再利用性が重要であり、使いやすいユーザインターフェースを備えた Simulink のようなツールが必須である。しかしながら、商用製品を使い続けるには毎年数百万円規模の予算が必要であり、ツールを必要とする全ての教育機関が導入できるわけではない。申請者は、使いやすいユーザインターフェースを備えたモデリングツールを開発中であり、このツールと高品質数値計算ライブラリとを組み合わせることで大規模複雑なシステムの制御系開発を支援できるシステムを構築することを目指した。そして、これらのソフトウェアをフリーソフトウェアとして配布したいと考えた。

2. 研究の目的

(1) 多倍長演算と精度保証付き数値計算に基づく高品質数値計算ライブラリを開発する。

(2) 高品質数値計算ライブラリに対応した使いやすいユーザインターフェースを備えたモデリング・シミュレーションツールを開発する。

3. 研究の方法

(1) 多倍長演算と精度保証付き数値計算に基づく高品質数値計算ライブラリを以下のように開発する。

① 計算機環境に柔軟に対応できるように複数のライブラリを切り替えて使用できる汎用的な多倍長精度 Java クラスを作成する。ユーザプログラムを変更することなく、演算精度を変更できるようにするため、汎用的な数値を表す NumericalScalar クラスを定義し、多倍長精度クラスにそれを継承させる。また、NumericalScalar を用いて制御系開発における数値計算で必要となる複素数や行列などのクラスを定義する。これらのクラスを用いて多倍長演算ライブラリを作成する。

② 区間を表す汎用的なクラスを作成し、これを用いて区間演算行列を定義する。線形方程式については山本の定理、固有値問題については Rump の方法、多項式の評価については山本の定理の応用、数値微分については自動微分法、非線形方程式についてはクラフチック法、を用いて精度保証ソルバークラスを作成する。これらのクラスを用いて精度保証付き数値計算ライブラリを作成する。

③ 多倍長演算と精度保証付き数値計算を組み合わせることで、あらかじめ指定された結果精度で計算結果が得られる計算手法を提案する。そして、高品質数値計算ライブラリにその機能を追加する。

④ 高品質数値計算ライブラリを高精度な計算を必要とする複雑なシステムへ適用し、その有効性を検証する。

⑤ 開発したライブラリのプロトタイプを公開・配布し、得られる評価や提案等のフィードバックに基づいてライブラリの問題解決や機能拡張等の改善を行う。

(2) 高品質数値計算ライブラリに対応した使いやすいユーザインターフェースを備えたモデリング・シミュレーションツールを以下のように開発する。

① 制御系開発における数値計算で必要となる複素数、行列、多項式などのクラスを定義し、MaTX で用いられているアルゴリズムを参考に、計算メソッドを実装する。また、これらのクラスを用いて常微分方程式のソルバ一等を実装する。そして、これらのクラスを用いてオブジェクト指向数計算ライブラリを作成する。

② システムの分類に対応する Java インターフェースを定義し、それらを組み合わせることで、複数の性質を持つシステムを定義する。そして、具体的で基本的なシステムを表すクラスやユーザが独自システムを定義するための雛形を抽象クラスとして定義し、オブジ

ェクト指向制御システムライブラリを作成する。

③ 多くの分野で標準データ形式の定義に利用される XML 技術を用いて、大規模複雑なシステムのモデルデータを柔軟に表現できるモデリング言語を定義する。

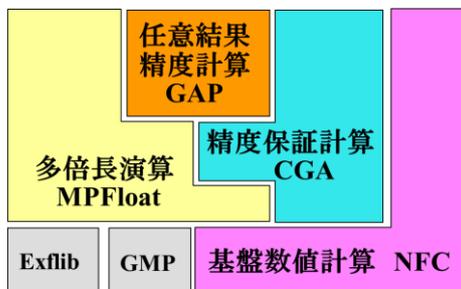
④ 表現力の高さと高速性で評価が高くオープンソースソフトウェアである SWT および JFace を用いてモデリング・シミュレーションツールのユーザインターフェースを開発する。

⑤ プラットフォーム (CPU や OS) に依存しないオープンな技術を用いてモデリング・シミュレーションツールを開発する。国際化と地域化 (ある特定の言語に対応させること) を行うことで、利用者が自分の使用する言語にあわせて言語を切り替えて使用できるようにする。

⑥ 開発したツールのプロトタイプを公開・配布し、得られる評価や提案等のフィードバックに基づいてツールの問題解決や機能拡張等の改善を行う。

4. 研究成果

(1) 多倍長演算と精度保証付き数値計算に基づく高品質数値計算ライブラリを開発した。ライブラリのアーキテクチャを以下の図に示す。



① 複数の多倍長演算ライブラリを切り替えて使用できる汎用的な多倍長精度 Java クラスを作成した。これにより、計算機環境に柔軟に対応できるようになった。また、汎用的な数値を表す NumericalScalar クラスを定義し、多倍長精度クラスにそれを継承させることで、ユーザプログラムを変更することなく、演算精度を変更できるようになった。そして、NumericalScalar を用いて制御系開発における数値計算で必要となる複素数や行列などのクラスを定義した。これらのクラスをまとめることで多倍長演算ライブラリを開発した。

GMP 等の多倍長演算ライブラリを用いて既

存プログラムを多倍長演算に対応させるには、プログラムに大幅な修正が必要である。本研究ではオブジェクト指向技術を用いて多倍長演算ライブラリを開発したので、ユーザが作成するプログラムをほとんど修正することなく、演算精度を変更することができるため、既存プログラムの再利用性が向上する。そのため、多倍長演算を気軽に試すことができるようになった。

② 区間を表す汎用的なクラスを作成し、これを用いて区間演算行列を表すクラスを定義した。山本の定理を用いる線形方程式ソルバー、Rump の方法を用いる固有値問題ソルバー、山本の定理の応用を用いて多項式を評価するクラス、自動微分法を用いて数値微分を求めるクラス、クラフチック法を用いる非線形方程式の精度保証ソルバーを作成した。そして、これらのクラスをまとめることで精度保証付き数値計算ライブラリを開発した。さらに、無誤算変換に基づく精度保証付き数値計算の手法を提案し、精度保証付き数値計算ライブラリにその機能を追加した。

従来の精度保証付き数値計算ライブラリを用いて既存プログラムを精度保証付き数値計算に対応させるには、プログラムに大幅な修正が必要である。本研究ではオブジェクト指向技術を用いて精度保証付き数値計算ライブラリを開発したので、ユーザが作成するプログラムをほとんど修正することなく、区間演算等の精度保証付き数値計算に対応させることができるため、既存プログラムの再利用性が向上する。そのため、精度保証付き数値計算を気軽に試すことができるようになった。また、無誤算変換に基づく精度保証付き数値計算の機能をライブラリに追加したので、プラットフォームに依存しない精度保証付き数値計算が可能となった。

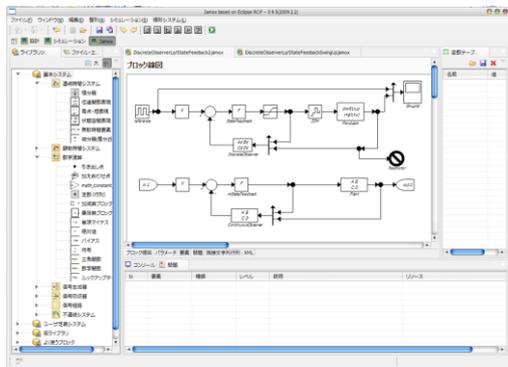
③ 精度保証付き数値計算と多倍長演算を組み合わせた精度保証付き多倍長計算を使うと、演算精度を高くすることができ、その結果精度を知ることができる。しかし、与えられた (指定された) 結果精度を達成するには、演算精度がどのくらい必要なかを事前に知ることができないため、多倍長演算での演算精度をトライ・アンド・エラーにより設定することになる。本研究では、多倍長演算における仮数部のビット長を適応的に調節することで任意の結果精度を保証できる手法を提案した。そして、高品質数値計算ライブラリにその機能を追加した。

Matlab のように実数計算に関して倍精度浮動小数点数、単精度浮動小数点数、固定小数点を切り替ことが可能な数値計算ソフトウ

ウェアは存在するが、多倍長演算、精度保証付き数値計算、多倍長精度保証付き数値計算、および任意精度保証計算に対応したソフトウェアは、初めて開発されたことになる。

④ 本研究で開発した高品質数値計算ライブラリは、既にインターネットを介して公開・配布されているが、ドキュメントを整備し、ホームページ等で情報提供を進めていく。このライブラリは高品質であるがゆえに処理に時間を要するという課題があるので、アルゴリズムの改良や並列処理等の技術を取り入れることで処理の高速化に取り組む予定である。

(2) 高品質数値計算ライブラリに対応した使いやすいユーザインターフェースを備えたモデリング・シミュレーションツールを開発した。ツールを実行している様子を以下の図に示す。



① 制御系の開発における数値計算で必要となる複素数、行列、多項式などのクラスおよび常微分方程式のソルバー等のクラスをJava言語で実装し、これらのクラスを用いてオブジェクト指向数値計算ライブラリを作成した。このライブラリはJava言語で作成されているのでOS等の実行環境に依存することなく利用できる。

② システムの基本的な性質を表すJavaのインターフェースを定義し、それらを組み合わせることで、複数の性質を持つシステムを定義できるようにした。また、基本的なシステムを表すクラスや独自システムを定義するための雛形を抽象クラスとして定義した。そして、これらを用いてオブジェクト指向制御システムライブラリを作成した。システムの分類体系をJavaのインターフェースとして表現したライブラリは他になく、新しいシステムの分類等に柔軟に対応できる。

③ 多くの分野で標準データ形式として利用されるXML技術を用いて、大規模複雑なシステムのモデルデータを柔軟に表現できるモ

デリング言語CSMLを定義し、開発したモデリング・シミュレーションツールのデータをCSMLとして保存できるようにした。CSMLはXML形式であるので、プラットフォームに依存することなく、データを規定するスキーマによってデータが壊れてないことや形式が正しいことを容易に検証できる。そのため、インターネットを介して安全にモデルデータを交換することができる。

④ モデリング・シミュレーションツールのユーザインターフェースをオープンソースソフトウェアであるSWTおよびJFaceを用いて開発した。SWTとJFaceは、Windows, Linux, MacOS等に対応しているので、モデリング・シミュレーションツールは、非常に多くの環境で利用可能である。

⑤ プラットフォームに依存せずオープンな技術を用いてシステムを開発したので、非常に多くのコンピュータで使用可能である。また、開発されたシステムはフリーソフトウェアとして配されており、誰でも自由に利用できる。そして、研究者間でのモデルの共有が促進されると期待される。

⑥ 国際化と地域化を行い、多国語への対応を組み込むことで、利用者が自分の使用する言語にあわせて設定を切り替えて使用できるようにした。現在は、日本語、英語、中国語の3カ国語に対応しているが、今後、開発したシステムに発展途上国や後進国の言語への対応を組み込むことで、それらの国や地域の技術支援に貢献できる。

⑦ 本研究で開発した制御系開発を支援できるシステムについては、既にインターネットを介して公開・配布されているが、ドキュメントを整備し、ホームページ等で情報提供を進めていく。今後、モデリング・シミュレーションツールを、デスクトップPCやノートPCだけでなく携帯情報端末に対応させる予定である。

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9件)

- ① 古賀雅伸、矢野健太郎、オブジェクト指向数値計算VI—オブジェクト指向数値計算の可能性—、システム制御情報学会誌、査読無、56巻、2012、42—49
- ② 古賀雅伸、矢野健太郎、オブジェクト指向数値計算V—制御系のモデリングとシミュレーションツール—、システム制

御情報学会誌、査読無、55 巻、2011、486
-493

- ③ 古賀雅伸、矢野健太郎、多倍長演算を用いた高精度な精度保証付き数値計算に基づく制御系設計、計測と制御、査読有、49 巻、2010、303-308
- ④ 中島大雅、古賀雅伸、矢野健太郎、任意精度保証計算のための多倍長演算における仮数部のビット長の適応制御の提案と評価、情報処理学会論文誌コンピューティングシステム、3 巻、2010、22-30
- ⑤ 矢野健太郎、古賀雅伸、LQ 制御問題の精度保証付き数値計算、計測自動制御学会論文集、45 巻、2009、261-267

〔学会発表〕(計 30 件)

- ① Kentaro Yano, Masanobu Koga, Automatic Method of Finding Tolerance for Verified LQ Control Method Based on Verified Numerical Computation, SICE 2011 Annual Conference, 2011 年 9 月 16 日、早稲田大学 (東京)
- ② Masanobu Koga, Satoru Anan, Symbolic Descriptor and State Space Model of Interconnected Linear Systems with Algebraic Loops, 2010 IEEE CACSD, 2010 年 9 月 10 日、Pacifico Yokohama (横浜)
- ③ 中島大雅、古賀雅伸、矢野健太郎、任意精度保証計算のための多倍長演算における仮数部のビット長の適応制御の提案と評価、SACSIS2010、2010 年 5 月 28 日、奈良県新公会堂 (奈良)
- ④ 石倉雄飛、古賀雅伸、Eclipse RCP を用いた制御系開発支援統合環境 Jamox の開発、第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会、2010 年 5 月 21 日、京都リサーチパーク (京都)
- ⑤ 杉永良太、古賀雅伸、中島大雅、矢野健太郎、多倍長演算に対応した数値計算言語の開発と制御系設計への応用、第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会、2010 年 5 月 21 日、京都リサーチパーク (京都)

〔その他〕

ホームページ等

<http://jamox.mklab.org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古賀 雅伸 (KOGA MASANOBU)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号：90251644