

Maple を使った制御系設計支援ツールの開発

(株) アルファオメガ

兵頭 礼子 (Noriko Hyodo)

AlphaOmega Inc.

(株) 富士通研究所／九州大学

穴井 宏和 (Hirokazu Anai)

FUJITSU LABORATORIES LTD. / Kyushu University

1 始めに

これまで、数値計算ツールである MATLAB を利用して、パラメータ空間アプローチと数式処理のアルゴリズムを用いたロバスト制御系の設計支援ツールを開発してきた ([4], [5])。このツールでは、制御系設計の諸問題を Sign Definite Condition (以下、SDC) とよばれる比較的簡単な制約式に変換できることを利用し、これに特化した Quantifier Elimination (限定子消去法、以下、QE) を用いることで制御系設計問題を解決する。QE を用いることにより、パラメトリックな取り扱いが可能となるだけでなく、非凸な制約問題に帰着される制御系設計問題も正確に解くことができる。今回、QE ソルバである SyNRAC との連携を考慮し、また数式モデルを生成する物理モデリングツールである MapleSim との連携を考え、数式処理システムである Maple をベースにした、ロバスト制御系設計支援ツールを開発した。本ツールは、制御系設計問題のパラメータ領域を可視化する機能をもつ。また簡単な操作で制御系の挙動を確認することも可能であり、制御系設計を学ぶ上で学習効果が期待できる。本報告では、開発したツールの概要と機能を紹介する。

2 Maple toolbox for robust control system design

Maple ツールボックスは、制御系設計の現場において頻繁に用いられる構造の固定された制御器 (fixed-structure controller) を用いた設計作業を支援するツールである。本ツールボックスは Maple ワークシートで作成されており、QE をベースとした数式処理の手法を用いて問題を正確に解くことができる。また、QE ソルバとして、Maple 上の実代数制約問題用のツール SyNRAC [3] を用いている。本ツールボックスでは、ボード線図、ナイキスト線図、極配置などを描画して系の挙動を表示している。Maple ツールボックスは数式処理計算をベースにしており、正確に問題を解くことができる。

2.1 制約条件

最新版の Maple ツールボックスでは、以下の制約条件のソルバを実装している。

- H_∞ ノルム制約 (周波数制約)

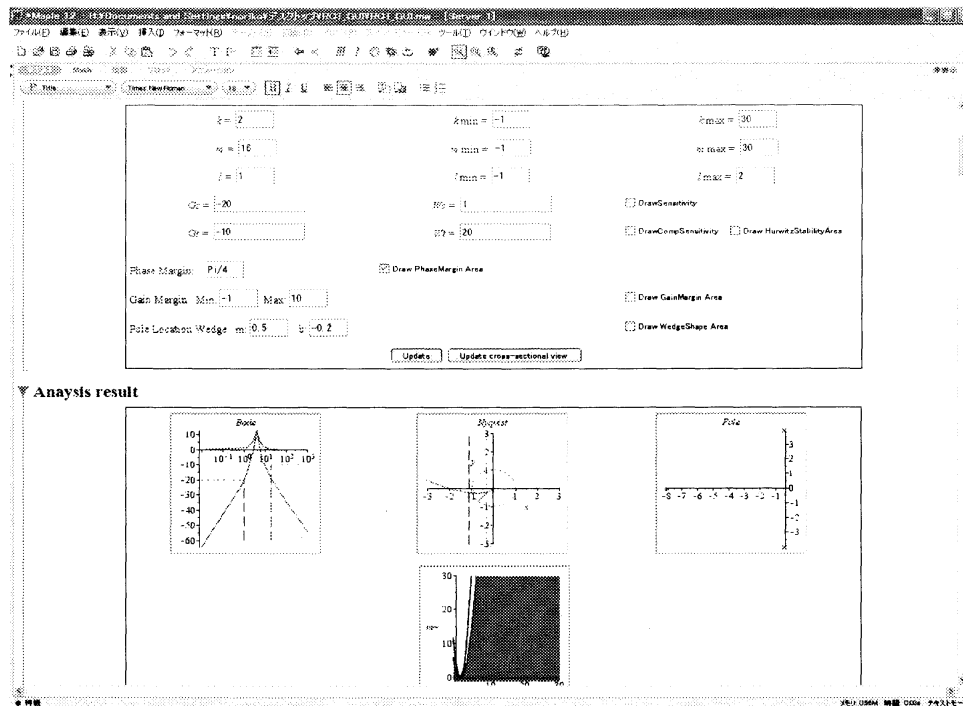


図 1: Maple ツールボックス

- ゲイン/位相余裕
- Hurwitz 安定性

また、本ツールでは、パラメータ空間アプローチと QE により、単目的設計問題だけでなく、多目的設計問題も解くことができる。

2.2 Maple ツールボックス

Maple ツールボックスは、以下の 4 つの機能で構成されている。

- **Main input area (Fig.2)**
コントローラ、プラント、制約条件、パラメタの値をエディットボックスにて編集する。
- **Parameter plot area (Fig.3)**
感度関数、相補感度関数のボーデ線図、系のナイキスト線図、極座標を表示する。
- **Parameter region area (Fig.4)**
制約条件を満たすパラメタ領域を表示する。

2.3 基本機能

Maple ツールボックスは GUI を使って構成されており、簡単に使うことができる。以下に基本的な使用方法を示す。

▼ Setup for Plant and Controller

Plant: $P = \frac{1}{s+1}$ Controller: $K = \frac{k}{s}$ [Set P and K]

Sensitivity Function: $S = \frac{1}{1+P \cdot K} = \frac{s+1}{s^2+s+k}$

Comp Sensitivity Function: $T = \frac{P \cdot K}{1+P \cdot K} = \frac{k}{s^2+s+k}$

▼ Setup for Specifications

$k = 2$ $\omega_{min} = -1$ $\omega_{max} = 30$
 $n = 16$ $\omega_{min} = -1$ $\omega_{max} = 30$
 $l = 1$ $\omega_{min} = -1$ $\omega_{max} = 2$
 $Q_s = -20$ $\beta_1 = 1$ ☐ Draw Sensitivity
 $Q_z = -10$ $\beta_2 = 20$ ☐ Draw Comp Sensitivity ☐ Draw Hurwitz Stability Area
 Phase Margin: $P_1/4$ ☐ Draw Phase Margin Area
 Gain Margin: Min: -1 Max: 10 ☐ Draw Gain Margin Area
 Pole Location: Wedge: $a = 0.5$ $b = 0.2$ ☐ Draw Wedge Shape Area
 [Update] [Update cross-sectional view]

図 2: Main input area

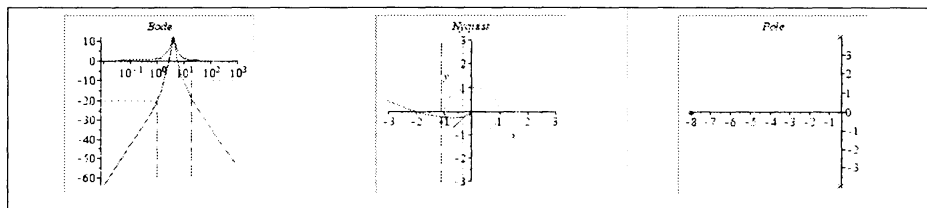


図 3: Parameter plot area

1. コントローラとプラントの伝達関数を決定し、それぞれエディットボックスに入力する。
2. 系に適用する制約条件を選択し、制約条件の値を入力する。
3. “Update” ボタンを押下する。制約条件の計算が実行され、条件を満たすパラメタの領域が表示される。

手順1では、プラントとコントローラの伝達関数を指定する。系に含まれるパラメタとして、 k, m, l の3つを使用することができる。

手順2では、系に適用する制約条件を選択し、制約条件の数値を入力する。ここでは、複数の制約条件を指定することができる。これらの制約条件の指定は、チェックボックスで選択可能である。

“Update” ボタンを押下すると、選択した制約条件を満たす領域が計算され、図4のように赤色に着色して表示される。この表示された領域の上でマウスをクリックまたはドラッグすると、パラメタの値を系に適用することができ、ボード線図、ナイキスト線図などで系の挙動を確認することができる。

PID コントローラのように、コントローラにパラメタが3つ含まれる場合、Maple ツールボックスでは各パラメタの制約条件を満たす領域を、各軸での2次元スライスで表示

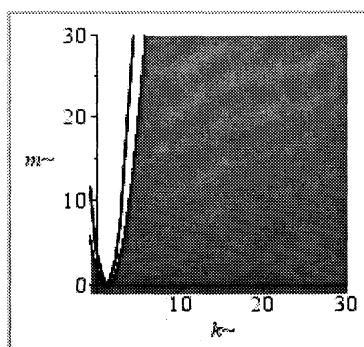


図 4: Parameter region area

する。2パラメタの場合と同様に、画面上でクリックまたはドラッグすることによって、系に値を適用することができ、挙動を確認できる。図5は H_∞ ノルム制約条件を感度関数に対して適用した場合の、3パラメタの場合の描画の例である。

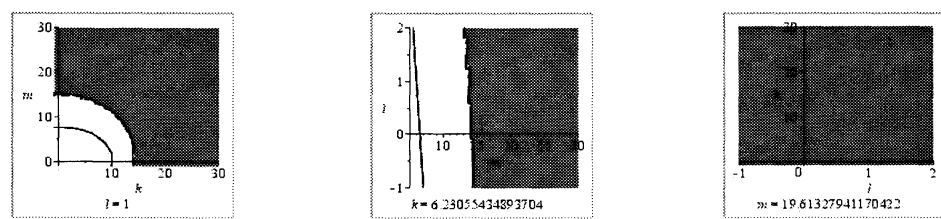


図 5: 3パラメタの場合の各軸での断面表示

2.4 MapleSim との連携

MapleSim とは、さまざまな物理システムの統合的なモデリングやシミュレーション環境を提供するアプリケーションである。また、数式処理エンジンである Maple と連携し、制御対象の数式モデルの自動生成や数式モデルの簡単化が可能であり、設計対象を効率的にシミュレーションできる。

MapleSim と Maple ツールボックスを連携させることにより、MapleSim で作成された物理モデルのパラメタを使用して、系にさまざまな制約条件を適用したり、また Maple ツールボックスで調整したパラメタの値を MapleSim の物理モデルに適用することが可能である。以下に MapleSim と連携した場合の操作方法の例を示す。

1. MapleSim で物理モデルを作成する (図 6)。
2. MapleSim 上で「ドキュメントフォルダを表示」ボタンを押下し、リストから Maple ツールボックステンプレートを選択し、Maple ツールボックスを起動する。図 7 は MapleSim から呼び出された Maple ツールボックスワークシートである。

3. Maple ツールボックスワークシートに、MapleSim で作成したモデルの運動方程式を入力する。ここでは、MapleSim で作成したモデル中のパラメタを使うことができる (図 8)。「Make Transfer function」 ボタンを押下すると、モデルの伝達関数が作成され、Maple ツールボックスにセットされる。
4. 適用する制約条件を選択し、「Update」 ボタンを押下すると、制約条件を満たす領域が着色して描画される。
5. パラメタ領域エリア (図 9) 上でマウスをクリックまたはドラッグすると、パラメタの値を指定することができ、その値での系の振る舞いをボーデ線図、ナイキスト線図、極配置で確認することができる。
6. 「Set values to MapleSim Model」 ボタンを押下すると、Maple ツールボックス上で選択したパラメタの値を、MapleSim のパラメタに割り当てることができる。

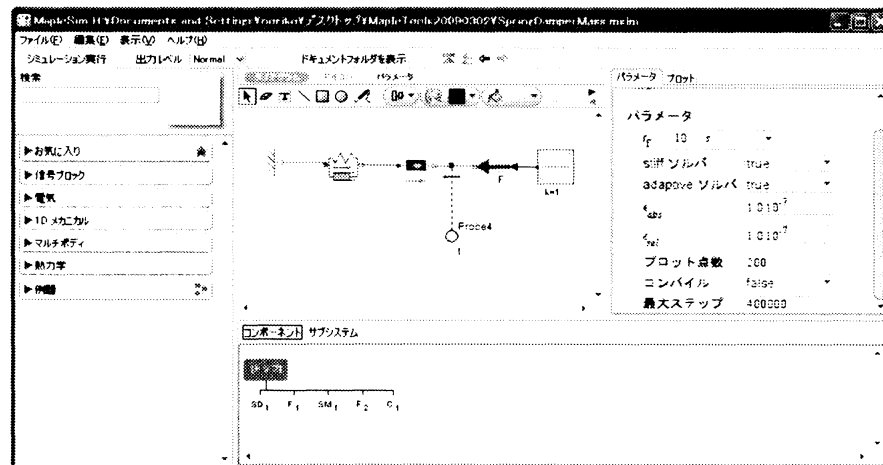


図 6: MapleSim

MapleSim と Maple ツールボックスをリンクすることによって、さまざまな物理モデルに制約条件を適用した際の系の振る舞いを確認することができ、またその値を使ってシミュレーションを行うことができる。

3 まとめ

今回、数式処理を用いた制御系設計支援ツールを開発した。本ツールボックスは、制御系設計作業を支援するツールであり、また Maple ワークシートで作成されており、QE をベースとした数式処理の手法を用いて問題を正確に解くことができる。本ツールボックスを使うことによって、利用者は制御系設計問題のパラメタ領域を視覚的に確認することができ、得られた領域から、簡単な操作で制御系に値を反映し、制御系の挙動を確認することができる。これらの機能や、またツールボックスのボタンやプルダウン等の各メニューは、制御系設計問題の着目点とリンクしており、学習者にとって問題の見通

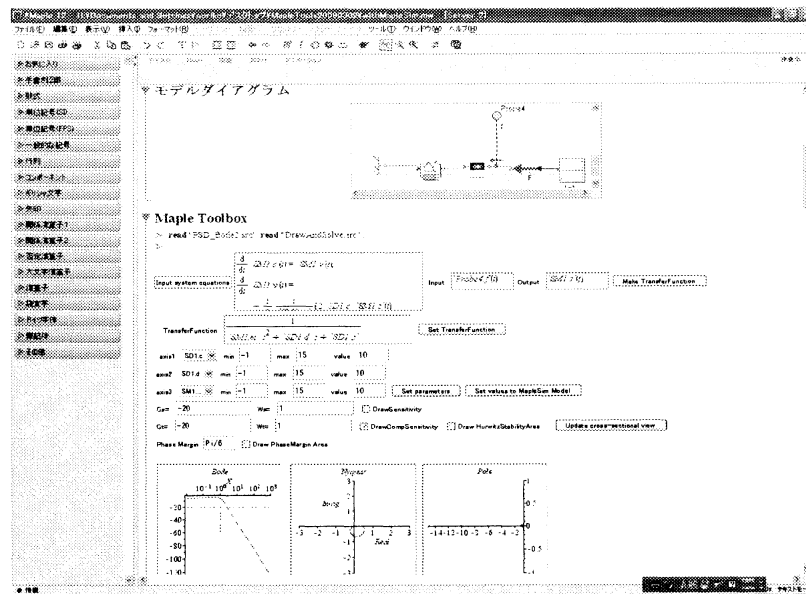


図 7: MapleSim 連携対応 Maple ツールボックス

しがよくなり、また問題の本質を理解することの助けとなる。また、MapleSim と連携することにより、実際の物理モデルに対して制約条件を適用し、計算することができ、その値を物理モデルでのシミュレーションに使用することもできる。今後は実際の設計現場で使用されるさまざまな関数や機能を実装する予定である。

参考文献

- [1] 近藤 良, 原 辰次, 金子 卓司. パラメータ空間設計による H_{∞} 制御計測自動制御学会論文集, 27(6):714–716, 1991.
- [2] T.Kimura and S.Hara. A Robust Control System Design by a Parameter Space Approach Based on Sign Definite Condition. *In Proceedings of Korean Automatic Control Conference(KACC)*, pp. 1533–1538, 1991.
- [3] H.Anai and H.Yanami. “SyNRAC: A Maple-package for solving real algebraic constraints” *In Proceedings of International Workshop on Computer Algebra Systems and their Applications(CASA) 2003 (Saint Petersburg, Russian Federation)*, P.M.A. Sloat et al. (Eds.):ICCS 2003, LNCS2657.Springer, pp. 828–837, 2003.
- [4] 坂部 啓, 屋並 仁史, 穴井 宏和, 原 辰次. A MATLAB Toolbox for Parametric Robust Control System Design based on symbolic computation. 講究録 1395 「Computer Algebra – Design of Algorithms, Implementations and Applications, 2003」, pp. 231–237. 京都大学数理解析研究所, 2004.

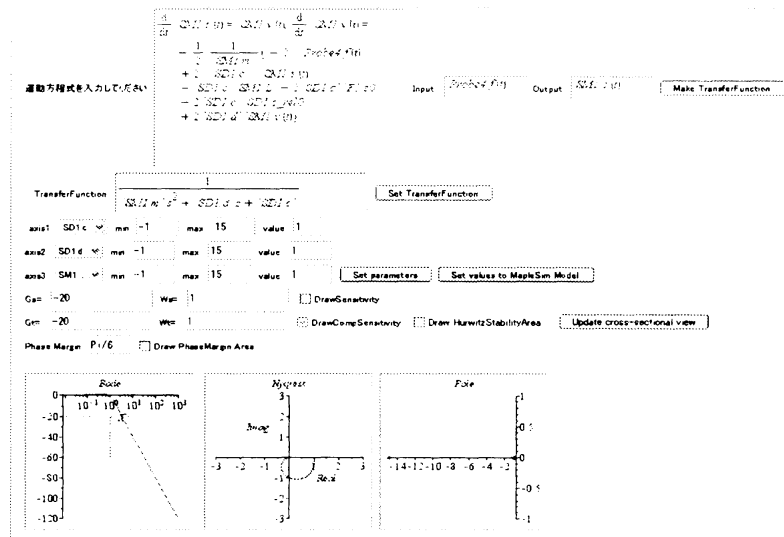


図 8: 入力部と制約条件選択部

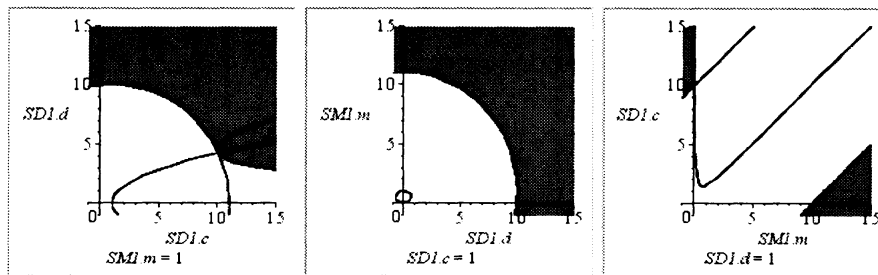


図 9: MapleSim モデルでの可能領域

- [5] Noriko Hyodo, Myunghoon Hong, Hitoshi Yanami, Shinji Hara and Hirokazu Anai. Solving and visualizing nonlinear parametric constraints in control based on quantifier elimination — A MATLAB toolbox for parametric control system design. *Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing, Volume 18, Number 6*, pp. 497–512, 2007 (Springer Berlin / Heidelberg).
- [6] Noriko Hyodo, Hirokazu Anai, Shinji Hara. A Maple toolbox for parametric robust control system design using symbolic computation. *In Proceedings of ICROS-SICE International Joint Conference 2009*, pp. 3520–3524, 2009.