

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「シミュレーション技術の革新と  
実用化基盤の構築」  
研究課題「数値/数式ハイブリッド計算に基づく  
ロバスト最適化プラットフォームの構築」

## 研究終了報告書

研究期間 平成15年10月～平成21年3月

研究代表者: 穴井 宏和  
(富士通(株))

テクニカルコンピューティングソリューション事業本部  
計算科学ソリューション統括部 統括部長付)

## § 1 研究実施の概要

さまざまな「ものづくり」において、シミュレーション技術は設計・製造の効率化、高品質化、高付加価値化実現に不可欠な技術です。本研究では、計算機パワーをフルに活用して効率的に高品質な処理を実現しうる技術の確立を目的として、数値数式ハイブリッド計算に基づくロバスト最適化プラットフォームの構築を目指します。ものづくりにおける設計問題など理工学・産業上の広範な問題は制約問題・最適化問題に帰着されますが、それら进行处理する技術は、現在のところ数値計算技術がベースとなっています。しかし、実用上重要な多くの問題が数値的計算法では取り扱いが困難な非線形や非凸な問題となることが明らかになってきています。本研究ではこれらの問題に対し有効な解を効率的に提供するために、非線形性や非凸性に囚われない記号・代数計算に基づく制約問題・最適化問題の処理技術を発展させ、これまでの数値計算ベースの技術と相補的に融合させていくことで、今後の設計とシミュレーションを支える新しい一般的方法論とツールの構築を進めていきます。ここで開発する技術は記号計算と数値計算を融合する新しい計算技術パラダイム創設にも繋がります。

これまでに(1)ベースとなる代数的技法(グレブナ基底や限定記号消去法等)の基礎検討・計算実験による検証、(2)数値/数式ハイブリッド解法の手法確立及びツール(SyNRAC)の開発・拡充、さらに(3)ロバスト制御系設計の新しい手法とツール(MATLABツールボックス)の開発を継続し機能の拡充を行いました。また、(4)有望な適用分野として、ものづくりにおける設計工程(制御系設計、自動車エンジン開発、電力プラント設計、HDD 設計、回路設計など)や、新たにバイオインフォマティクスへの適用を行い基盤技術の適用の拡大を図ってきました。ものづくりにおいては、産業界における実際の設計過程の工数削減・効率化と設計性能改善への貢献が可能となり、また、生体系のパラメータ推定に対する数値・数式ハイブリッド計算によるパラメータ最適化手法の適用や、多細胞生物の多様性条件を代数的手法を適用して解析し多様性条件の解析を行い有効性を実証し、これらの方向性の発展を期して国際会議 Algebraic Biology を立ち上げました。

現在開発中のコアとなるソルバ部分及び制御系設計ツールは製品化に向けての活動(契約等)を継続中で当プロジェクトの終了後になりますが、2009 年度の製品化を目指しています。また、他の分野向けのツールの開発(ファミリー化)も想定中で、それらの成果を実際のものづくりの現場への実適用・普及も行っていく予定です。

本プロジェクトの研究開発過程は、図1に示すような研究サイクルをいくつかの適用領域について同時に並行して推進する形で研究活動が進みました。以下にまとめるようにサイクルの各々のフェーズにおいて成果が現れています：

計算技法としては、パラメータを含む等式制約のより効率的な新解法の開発とその高速化、及び、効率の良い数値/数式ハイブリッド計算の検討を行いました。特に不等式制約問題の汎用的な代数的アルゴリズムの核となる柱形代数分解(Cylindrical Algebraic Decomposition)法について、数値計算を融合した高速計算手法を確立し、効果的な実装法を検討し SyNRAC の機能として完成しました。

区間演算を用いた制約問題を精度保証付きで近似的に解く手法を検討し、電力系の制御などの実際の応用分野への適用において有効であることを確認しました。今後、さらにこの区間演算に基づく方法とQEの計算手法の融合による効率的なパラメトリック設計手法の開発にも取り組む予定です。

制御系設計法では、これまで、ロバスト制御系設計手法として、有限周波数 KYP 補題に基づいた新しい動的システム設計法についての開ループ設計法、及び、SDC (Sign Definite Condition) に基づく代数計算に基づく設計法についてそのツール化を行いました。今後は、それらの成果を融合して、統合したロバスト制御系設計法・ツール構築を目指します。

数値数式ハイブリッド最適化に基づくパラメトリック設計手法を実際の産業界の設計に適用しました。特に、HDD 形状設計、回路設計において実際の企業(富士通)での開発過程に適用し、

設計効率化と設計性能の向上といった点で大きな効果を検証できました。また、電力プラントの電力安定供給のための制御器の設計には、現在開発中のロバスト制御系設計ツールを適用しその有効性が検証でき、専用のツール化を行うに至りました。

バイオインフォマティクスへの応用では、PET 装置を用いたパーキンソン病の診断法について、数式处理的なアプローチに基づいて患者負担の少ない新しい診断法の改良を行い、また、多細胞生物の多様性条件を代数的手法を適用して解析し多様性条件についての研究を継続しました。

ツールとしては、数値・数式ハイブリッド計算による実代数制約問題解決用ツールボックス SyNRAC に、不等式制約問題の汎用的な代数的アルゴリズムの核となる柱形代数分解 (Cylindrical Algebraic Decomposition) 法の基礎実装を完了し、数値数式融合計算による高速化の実装を進めました。また、既存機能の高速化を継続して行っています。また、SyNRAC を用いたロバスト制御系設計ツールボックスの開発を継続し GUI の拡充・高速化を行い、ツールとしての完成度を向上させました。今後、SyNRAC の計算効率の向上と新しい数値・数式ハイブリッド計算手法の実装、MATLAB ロバスト制御系設計ツールの機能拡充・高速化を目指します。Maple ツールとしての製品化を目指し、Maple 上でのプロトタイプを完成させました。

以上の成果にもとづいて、その上で制御系設計だけでなくさまざまなものづくりの新しい設計支援ツールを構築できる「ロバスト最適化プラットフォーム」の構築を達成しました。

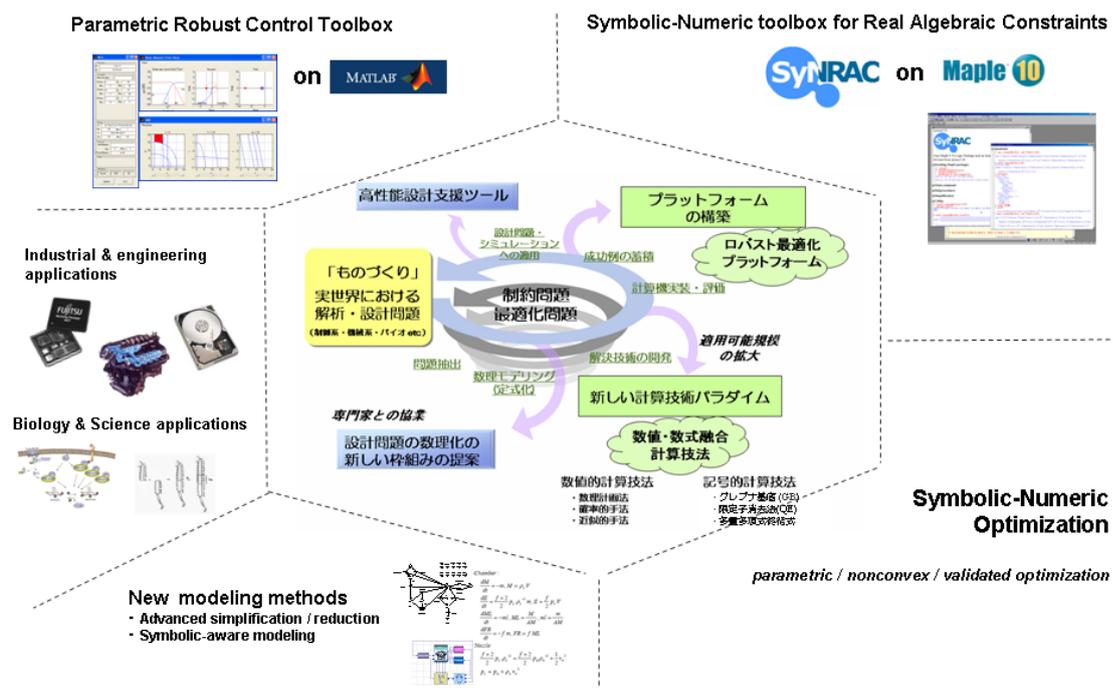
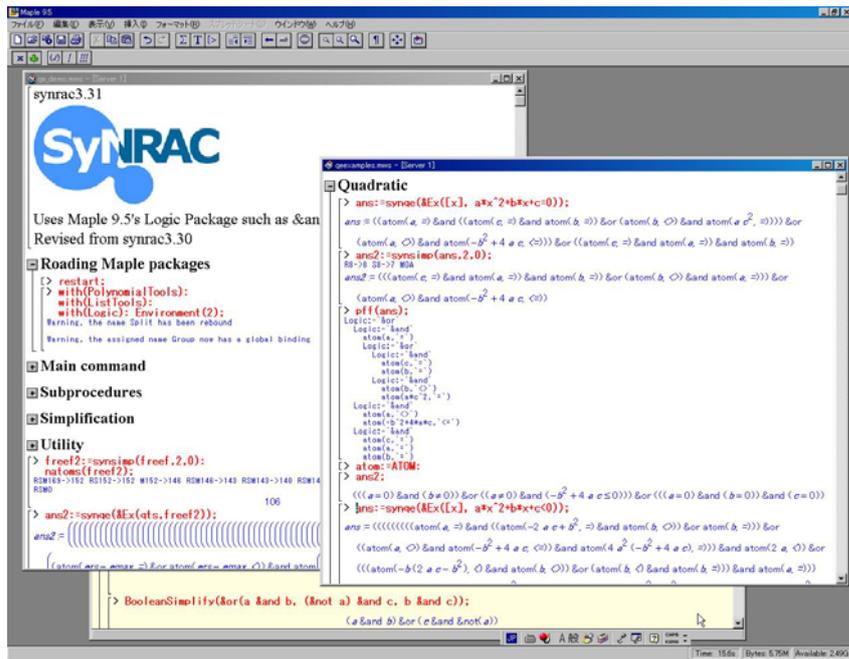
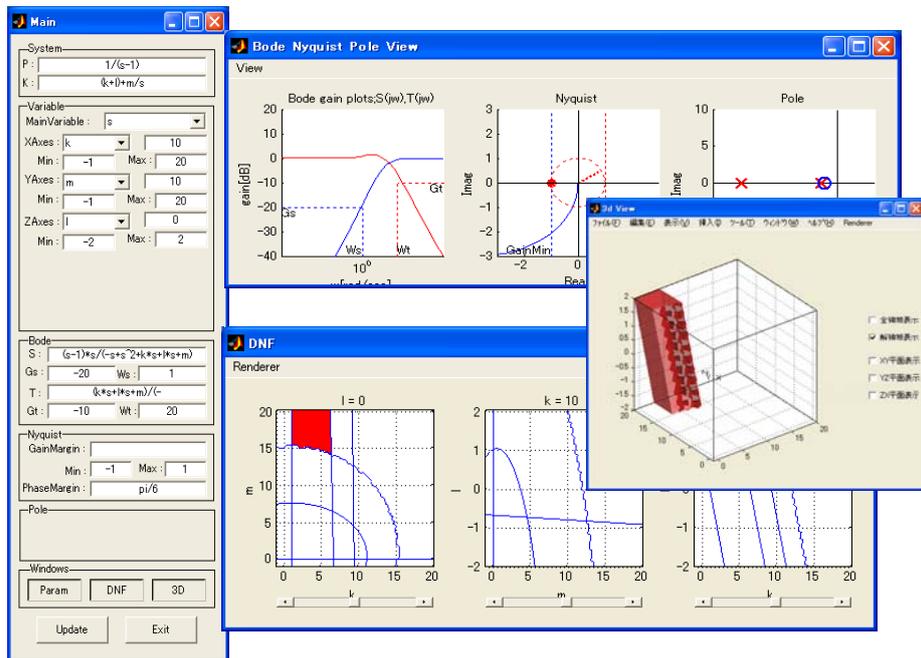


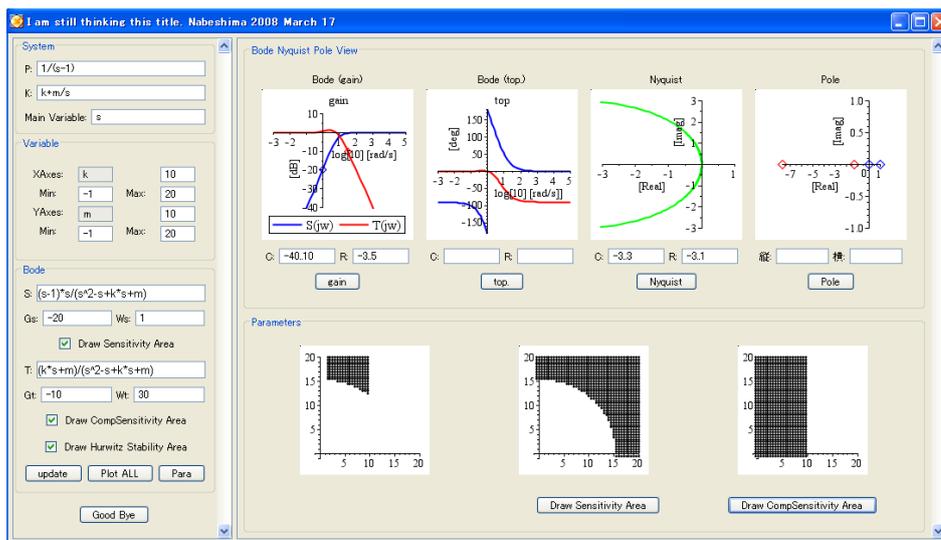
図1 研究目標、研究開発サイクル及び成果



SyNRAC:Maple package for real algebraic constraints



MATLAB toolbox for parametric robust control



Maple toolbox for parametric robust control

## § 2 研究構想及び実施体制

### (1) 研究構想

全体の研究スケジュールは以下の表に示すとおりです。

項目	平成 15 年度 (6 ヶ月)	平成 16 年度	平成 17 年度	平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度 (12 ヶ月)
設備の整備	←→					
記号・代数的 手法の進展	←→			→		
数値/数式ハイブリッド 技法確立		←→			→	
コアソルバの開発		←→				→
ロバスト最適化 プラットフォームの開発			←→			→
各種設計ツールの 開発・製品化					←→	→
まとめ						←→

以下では、各研究項目の研究の進め方のポイント等についてそれぞれ説明します。

#### ■ 記号・代数計算に基づくアルゴリズムの開発

記号・代数的計算に基づく制約問題・最適化問題解決手法の開発・改良については、以下の点に着目して研究を進めました。これにより、パラメータを含んだままで制約問題・最適化問題を解くことが可能でかつ非凸最適化問題も正確に解

くことができる効率的な代数的算法(parametric & nonconvex optimization methods)の確立を目指しました。

- ◇ パラメータを含んだ等式制約問題の手法の基礎となる枠組み parametric decomposition の確立を目指す。その例として、等式の指数部にパラメータを含むような等式制約問題の解法に着目しました。
- ◇ 開発したアルゴリズムは数値数式ハイブリッド計算に基づく制約問題・最適化問題解決ツール SyNRAC としてツール化を行いました。
- ◇ そのために、より実用的な特別なクラスの不等式制約の QE(quantifier elimination)から取り組み、QE の汎用的アルゴリズムである Cylindrical Algebraic Decomposition (CAD) の高速化と完成度を高める開発作業に重点を移しました。(これには数値・数式計算に基づく CAD の実装を核としました。)
- ◇ より汎用的な代数関数の記号的最適化の効率的な手法の確立その応用を行いました。

#### ■ 数値/数式ハイブリッド計算に基づくアルゴリズムの開発

数値/数式ハイブリッド計算に基づく制約問題・最適化問題のアルゴリズムの開発と実装実験を行い、工学上の問題への適用を通して、実用的ハイブリッド計算の枠組みの確立を目指します。具体的には、以下の視点から“有効な”数値数式ハイブリッド計算技法によるアルゴリズムの検証を継続し、有望な方向性を抽出しました。

- ◇ これまで汎用的なQEアルゴリズムであるCAD法に、アルゴリズムにおいて不可欠な実根のデータとして数値解を用いた効率化の手法(Numerical CAD)に、数値の解を導入したことで数値計算誤差による曖昧さ(不確定性)が発生した場合に記号計算による再構成(symbolic reconstruction)を導入するという枠組みを導入しました。再構築の記号・代数的計算部分にDynamic Evaluation という手法を取り入れた高速化手法を考案する。これらの成果を、SyNRAC への実装の上で、計算効率の評価を行いました。
- ◇ 最適化問題の数値的近似/緩和手法と代数的手法(QE)との組み合わせによる効率的かつ非凸問題も扱える正確な最適化手法の開発を目指しました。また、実用上意味のある特定の問題(制御系設計など)に特化したQEに基づく最適化手法の開発を行いました。
- ◇ 精度保証つき数値計算と代数・記号計算との融合により、精度保証つき計算法の新しい方法を開発し、その実用化に向けて制御理論をターゲットとして適用を行いました。これにより精度保証付き計算を用いた制御系解析・設計法の開発を目指しました。

#### ■ 数値・数式融合計算に基づく代数制約・最適化問題のツールSyNRAC の機能拡充

記号・代数的計算に基づく制約問題・最適化問題解決手法である各種QEアルゴリズム、及び、数値/数式計算に基づくアルゴリズムの SyNRAC への実装とその効率化を継続しました。これにより、SyNRACの数値・数式融合計算に基づく制約・最適化問題ソルバとしての汎用度・完成度を高め、製品化開発まで行い製品版リリースを目指しました。

#### ■ ロバスト制御系設計ツールの機能拡充

数値数式ハイブリッド計算技法に基づくMATLAB 上の「ロバスト制御系設計」用のツールボックス構築を目指す。特にMATLABの拡張機能として、SyNRAC に実装された制約問題・最適化問題解決手法(QE等) の機能呼び出して QEに基づくロバスト制御系設計手法が実施可能としました。SyNRACと同様、汎用度・完成度を高め製品化開発を行い製品版リリースを目指しました。

■ 数値・数式ハイブリッド最適化の応用展開

数値数式ハイブリッド最適化の手法及びツールを、実際の応用分野への適用展開を図りました。適用対象としては、制御系設計をはじめにものづくり一般を中心としました。また、自然科学分野への適用（バイオ）なども視野に入れました。

■ 情報共有及び発信

チーム間で1-2週間に一度の頻度でセミナー・打合せを行い情報交換・共有につとめて、円滑なプロジェクト推進に努める。また、研究活動・成果について広報活動に努めました。

(2)実施体制

研究実施機関名 <sup>1)</sup>	研究代表者又は研究実施機関別代表の氏名	部署・役職名	研究題目	グループ名
富士通	穴井宏和	テクニカルコンピューティングソリューション事業本部 計算科学ソリューション統括部・統括部長付	数値/数式ハイブリッド手法の開発とロバスト最適化プラットフォームの構築	富士通
東京大学	原辰次	情報理工学系研究科・教授	数値的最適化手法と記号・代数計算に基づく計算技法の一般的適用方法論の確立	東京大学
立教大学	横山和弘	理学部数学科・教授	記号・代数計算に基づく計算技法の一般的適用方法論の確立と適用規模の拡大	立教大学
神戸大学	野呂正行	理学部数学科・教授	記号・代数計算に基づく計算技法の一般的適用方法論の確立と実証評価	神戸大学
産業技術総合研究所	堀本勝久	生命情報科学研究センター・チーム長	記号・代数計算に基づく計算技法のシステムズ・バイオロジへの適用方法論の確立と実証評価	産業技術総合研究所

## § 3 研究実施内容及び成果

### 3.1 数値/数式ハイブリッド手法の開発とロバスト最適化プラットフォームの構築 (富士通 穴井グループ)

#### (1) 研究実施内容及び成果

産業上のさまざまな分野より抽出される制約・最適化問題に対し、有効な記号・代数計算に基づく技法と数値/数式ハイブリッド技法の開発・効率化を行いました。それらのアルゴリズムについて実装・検証をし、ロバスト最適化プラットフォームの構築を行いました。また、研究グループ(原教授(東大)・横山教授(九大)・野呂教授(神戸大)、堀本勝久(産業技術総合研究所))をはじめとした計算技法と応用分野の国内外の最先端研究機関との交流と、新規技術の情報発信を中心となって行いました。

ものづくりの現場から抽出してきた制約・最適化の問題に対し、抽出された制約問題・最適化問題の有効な定式化の検討を行い、東大、立教大、神戸大チームと定期的にセミナーを開催して情報共有し、基礎となる代数的アルゴリズムの開発成果を効果的に融合することを留意しながら、定式化された問題に適した数値/数式ハイブリッド解法の開発を共同で行いました。

また、開発した数値・数式ハイブリッドアルゴリズムを、東大チームと共同で制御系設計へ適用し、産総研チームとバイオインフォマティクスへ適用し、それぞれ有効性を確認し適用にあたっての一般的方法論の確立を行いました。

設計効率化技術の核となる数値・数式ハイブリッド計算による実代数制約問題解決用算法の開発とともに、そのツールボックス SyNRAC の実装を継続して行ってきました。特に、記号・代数的計算に基づく制約問題・最適化問題解決手法である限定記号消去法(Quantifier Elimination: QE、以下参照)の効率化に着目しました。

## 基盤技術: Quantifier Elimination

### ■ **Input**: first-order formula

- Polynomial equations, inequalities, inequations (over  $K$ )
- quantifiers  $[\exists, \forall]$ , Boolean operations  $[\wedge, \vee, \neg, \Rightarrow]$ , etc]

Example:  $\exists x (ax^2 + bx + c = 0)$

$\forall a \exists y (x^2 + xy + b > 0 \wedge x + ay^2 + b \leq 0)$

**QE**: Algorithm to compute an equivalent quantifier-free formula for a given first-order formula

### ■ **Output**:

- **Feasible regions** of unquantified variables as semi-algebraic sets
- **True** or **False** if all variables are quantified (Decision problem)

QE は、多項式等式・不等式・限定記号( $\forall, \exists$ )、そしてブール演算( $\wedge, \vee, \Rightarrow, \neg$  等)からなる一階述語論理式に対して、等価で限定記号を含まない式を導く算法で、その式は入力式が真であるための限定記号の無い変数の可能な領域を示します。例えば、式

$$\forall x (x^2+bx+c > 0)$$

に対し、QE により等価な式

$$b^2-4c < 0$$

を得ます。また、4 変数  $x,y,z,w$  の不等式からなる式  $\phi$

$$\phi := (4x - w^2 = 0 \wedge x - x y - z + 5 = 0 \wedge 1 \leq x \leq 4 \wedge 1 \leq y \leq 2)$$

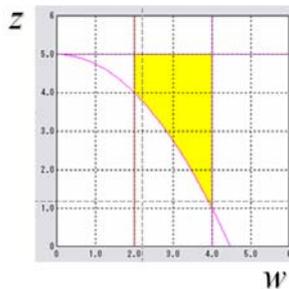
を考えると、式  $\phi$  を満たす変数  $z,w$  の実行可能領域を求める問題は、QE 問題

$$\exists x \exists y \phi \tag{1}$$

として記述できます。QE を用ると(1)に等価な式  $z,w$  の式

$$(w - 2 \geq 0 \vee w + 2 \leq 0) \wedge w + 4 \geq 0 \wedge w - 4 \leq 0 \wedge z - 5 \leq 0 \wedge 4z + w^2 - 20 \geq 0 \tag{2}$$

を得ます。(2)が式  $\phi$  を満たす変数  $z,w$  の実行可能領域を表しており、 $z-w$  空間において以下の黄色い領域となっていることがわかります。



QE の計算例と実行可能解

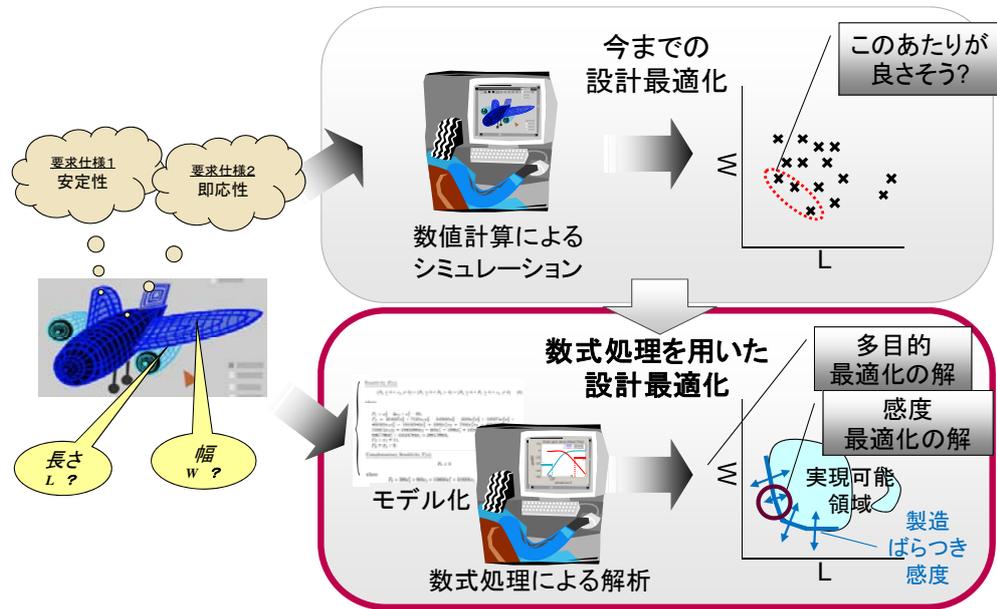
全変数に限定記号が付いているとき(決定問題)には、QE は入力式の真/偽を判定します。したがって、制約問題や最適化問題の代数的手法として QE は

- 全ての実行可能解をパラメータ空間内の領域(等式・不等式のブールの組合せである半代数的集合)として正確に求めることができる。
- 非凸な最適化問題も正確に解くことができる。
- 実行可能解が存在しない場合も正確に判定できる。

という特長を持っています。

この QE の特徴を巧く用いることにより、さまざまな解析・設計問題から得られる制約・最適化問題をパラメトリックに正確に解くことができるようになり、設計の効率化・高度化を図ることが可能となります。

# 数式処理による設計の効率化・高度化



設計問題をパラメトリックに解くアプローチの効果・利点として、設計パラメータの可能領域を正確にすべて求め、パラメータ空間での可視化を行うことができることが一つです。さらに、多目的最適化に対しては、複数の目的関数の取りうる可能領域を正確にすべて求めることを可能とします。これにより正確なトレードオフ関係を抽出することもできるようになります。すなわち、まとめると、「単目的設計から多目的設計へ」そしてその高度化が可能ということに大きな利点があるといえます。これらの新しい設計手法を実問題への適用を通して有効性を検証しました。

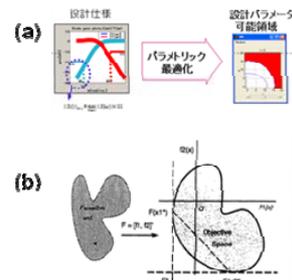
## 数式処理・数式モデル設計の利点

### パラメトリック設計

- 基盤技術：パラメトリック最適化
- 特長：

- 可能領域、関係の可視化

- (a)設計パラメータの可能領域、関係
    - (b)目的関数の可能領域、関係



### 単目的から多目的へ

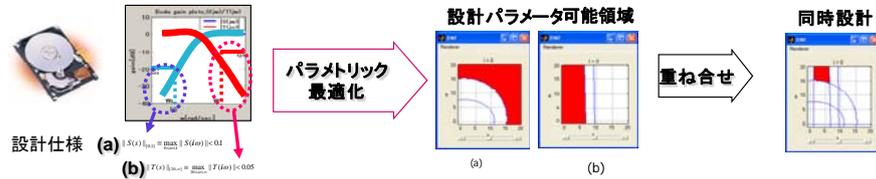
(A) 多目的設計 (Multi-objective design)

(B) 多目的最適化 (Multi-objective optimization)

$$\begin{cases} \min_{x \in \mathbb{R}^N} & f = \{f_1(x), \dots, f_M(x)\} \\ \text{subject to} & g(x) \leq 0 \\ & h(x) = 0 \end{cases}$$

# 単目的から多目的へ

## ■ 多目的設計 (multi-objective design)



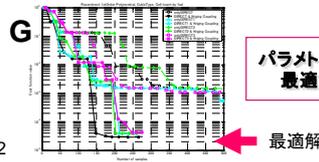
## ■ 多目的最適化 (multi-objective optimization)

$$\begin{cases} \min_{x \in \mathbb{R}^N} & f = \{f_1(x), \dots, f_M(x)\} \\ \text{subject to} & g(x) \leq 0 \\ & h(x) = 0 \end{cases}$$

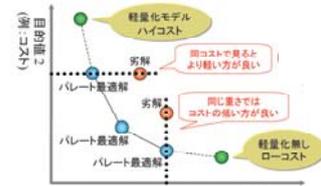
minimize  
(f1[製造コスト], f2[重量])  
Subject to 条件1, ...

単目的化  
(重み付け線形和)

minimize  $G = 0.4 \times f1 + 0.6 \times f2$   
Subject to 条件1, ...

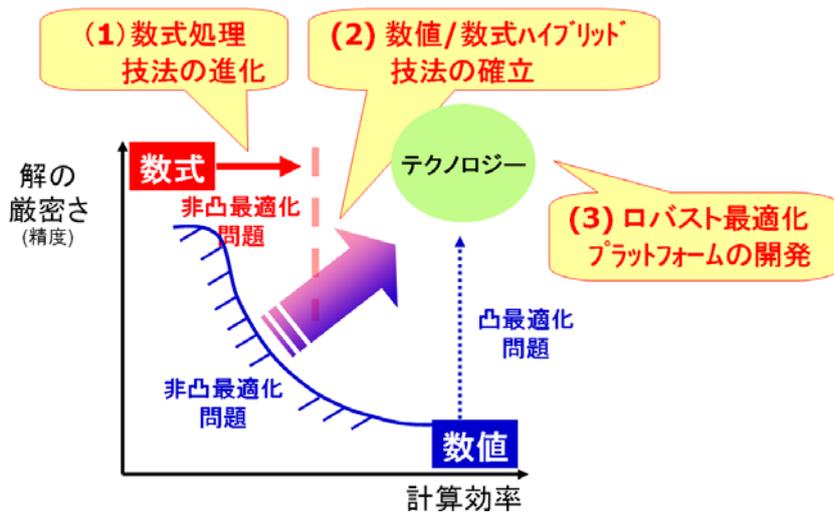


パラメトリック最適化



目的値 1 (例: 重量)

数式処理を導入する様々なメリットを産業界における実際のものづくりにおいて活用できるレベルへ実用化していくためには、計算効率と扱える問題のサイズの向上が至上命題となります。そのために本プロジェクトにおいては、以下の 2 つの方向を軸として数式処理に基づく手法の実用化を目指してきました。



(1) 数式処理技法の進展： 継続的な数式処理の代数的アルゴリズムの改良は重要です。中でも特に対象となる問題の構造を利用した効率的アルゴリズムの開発が有効です。ロバスト制御系設計手法はそのよい例で、実際に多くの設計問題が同じ形の制約問題に帰着されて効率的に解くことで実用的な手法となっています。こ

これらの特別な構造を利用したQEアルゴリズムとして一変数多項式の正定性条件、線形・2次制約条件用のアルゴリズムがあり、それらは SyNRAC に実装されています。

(2) 数値/数式ハイブリッド技法の確立：(1)だけでは効率向上に限界があるため、数式処理の利点と数値計算の利点を兼ね備えた計算手法(数値/数式ハイブリッド最適化)を確立することで高速化を図る。現在、数値/数式ハイブリッド計算の方法として、いくつかのアプローチで計算技法の確立を目指しました。

数式処理アルゴリズムにおいて記号・代数計算では非常に時間がかかる部分に、数値計算を導入し、その時、計算精度を保証しながら計算を進めうる仕組みをうまく導入することで数式処理アルゴリズムの利点は損なわないようにする。数値計算の結果が信頼できない場合にのみ正確な記号・代数計算を行う。この実現には、精度保証付き数値計算との組み合わせが有効となることが明らかとなりました。特にこの方向性を、QEの基本的なアルゴリズムである Cylindrical Algebraic Decomposition (CAD) に対して適用し代数拡大体上での計算、代数的数の取扱を数値・数式ハイブリッド計算にて行い効率化を達成しました。

また、数式処理の計算を用いて問題をより数値計算に適した制約問題へ帰着して、数値的手法を用いることで、計算結果の精度向上・保証が可能となることもいろいろな例において有効でした。

その他にも、実用化に向けたさまざまな方策が考えられました。非凸数値最適化問題を解く場合に、緩和した凸問題を数値的に解くこと、元々実行可能解の可能領域が(一部でも)既知である場合に、実行可能解の情報を用いることで数式処理に基づく最適化を効率化すること等です。

さらに、設計対象が多くの変数を持つ場合などには、統計的手法を用いたり、設計者の経験的知見を十分に活かすことで、全ての変数の中から主要な変数を絞込むことが出来ることも多く、それにより問題の規模を小さくすることが可能です。

これらさまざまな実適用を通してハイブリッドの方法論について検討し、最適化という観点から数値・数式ハイブリッド計算の枠組みとして大まかに以下のような融合が効果的であると考えられます。

## 数値/数式ハイブリッド計算(最適化)の枠組みと効果:

■ **数式処理** + **数値計算** (アルゴリズムレベルでの融合)  
(QE) + (区間演算)

- ・パラメトリック/非凸最適化手法の効率化
- ・精度保証付き最適化計算法の提示

■ **数式処理** → **数値計算**

- ・数式処理により対象問題の簡略化(数値的に良い形へ)  
⇒ 制約問題の精度保証付き計算法

■ **数値計算** → **数式処理**

- ・数値解を利用したパラメトリック/非凸最適化手法の効率化
- ・数値解の検証・再構成法の提示

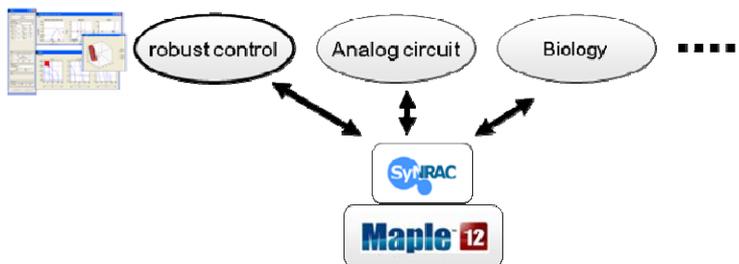
本プロジェクトではQEの効率化のための数値数式計算に基づく高速アルゴリズムを開発とともに、それらのQEの効率的な計算アルゴリズムのMapleへの実装を行ってきました。そのMaple上のツールSyNRAC(Symbolic-Numeric toolbox for solving real algebraic constraints)をコアとしいくつかの設計支援ツールの開発を行いました。SyNRACとその上に開発される設計支援ツールの構成は以下のとおりです。

## ■ SyNRAC

- Symbolic-Numeric toolbox for solving real algebraic constraints on maple



- Engine for engineering (*parametric*) design tools



SyNRACを用いた数値・数式ハイブリッド計算によるパラメトリック最適化を用いた設計手法の実適用としては、以下に示す分野へ実際に適用しました。

## ■ 理工学・産業への実適用

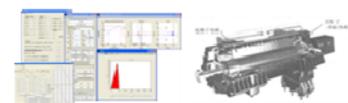
### ■ ものづくり

#### ツール

- ・ **Toolbox for Parametric Robust Control**

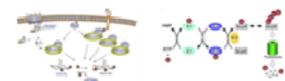
#### 適用事例

- ・ **電力安定供給システム制御系設計**
- ・ **HDD設計**
- ・ **SRAM設計**
- ・ **自動車エンジン設計**
- ・ etc



### ■ バイオロジー

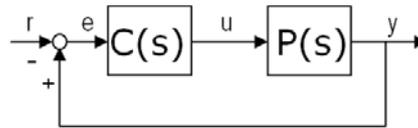
- ・ 生体系モデルの数値・数式ハイブリッドパラメータ推定
- ・ 数式処理による生体系解析法に基づく新診断法



## ロバスト制御系設計

最適化最も有望なものとして、まず本プロジェクトの開始当初からロバスト制御系設計ツールボックスの開発を継続してきました。産業界において最も頻繁に利用される低次数の固定構造をもつコントローラ的设计に対してパラメータ空間に基づく設計手法をパラメトリック最適化を用いることで提供することが可能となりました。

ここで、QEに基づくパラメータ空間法の一例として、産業界で制御系として頻繁に用いられるPI制御器(設計パラメータ2つの1次の制御器)によるフィードバック制御系の設計事例を紹介します。



フィードバック制御系

具体的にはフィードバックシステムを考える。ここで、 $P(s)$  は制御対象のプラント、 $C(s)$  はPI制御器であり、以下で与えられるとします。

$$C(s) = x_1 + \frac{x_2}{s}, \quad P(s) = \frac{1}{s+1}$$

制御器  $C(s)$  はパラメータ  $x_1, x_2$  をもちます。ここでの設計問題は、2つの重要な制御系設計仕様 (a) 低周波帯域の感度制約と (b) 高周波帯域の相補感度制約) を同時に満たす制御器  $C(s)$  のパラメータ  $x_1, x_2$  を求めることです。

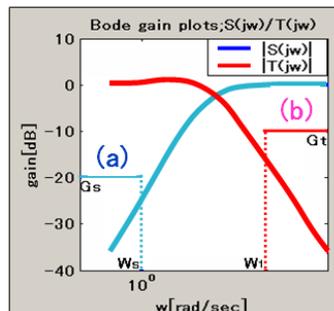
まず、制御系設計仕様の一つである感度関数

$$S(s) = \frac{1}{1 + P(s)C(s)}$$

に対する低周波帯域でのノルムの制約 (a)

$$\|S(s)\|_{[0,1]} \equiv \max_{0 \leq \omega \leq 1} \|S(i\omega)\| < 0.1 \quad (a)$$

を考えます。下図は、縦軸がゲイン(ノルムの大きさ)、横軸が周波数を表したものでボーデ線図と呼ばれます。仕様 (a) は、ボーデ線図における  $S(s)$  のノルムの曲線を低周波帯域で制限することを要求しており、下図の (a) に対応します。



ボーデ線図における感度・相補感度の制約

(a) は、等価な QE 問題

$$\forall z > 0 \quad (x_2^2 - 2x_2 + x_1^2 - 99)z^3 + (3x_2^2 - 4x_2 + 2x_1^2 + 2x_1 - 99)z^2 + (3x_2^2 - 2x_2 + x_1^2 + 2x_1 - 99)z + x_2^2 > 0,$$

に帰着されます。ここで、QE を適用するとこの条件は  $x_1, x_2$  に関する等価な条件

$$(P_3 \leq 0 \wedge x_2 \neq 0) \vee (P_1 \geq 0 \wedge P_2 > 0) \vee (P_5 \geq 0 \wedge P_1 \geq 0 \wedge x_2 \neq 0)$$

に変換できる。ここで、 $P_i$  ( $i=1, 2, 3, 5$ ) は、QE によって導かれるパラメータ  $x_1, x_2$  に関する適当な多項式で、下図(a)の赤い非凸領域部分が  $x_1, x_2$  の可能領域となります。つぎに、相補感度関数

$$T(s) = \frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)}$$

に対する高周波周波帯域でのノルムの制約(b)

$$\|T(s)\|_{[20, \infty]} \equiv \max_{20 \leq \omega \leq \infty} \|T(i\omega)\| < 0.05 \quad (b)$$

を考えます。この仕様は、以下の QE 問題に帰着されます。

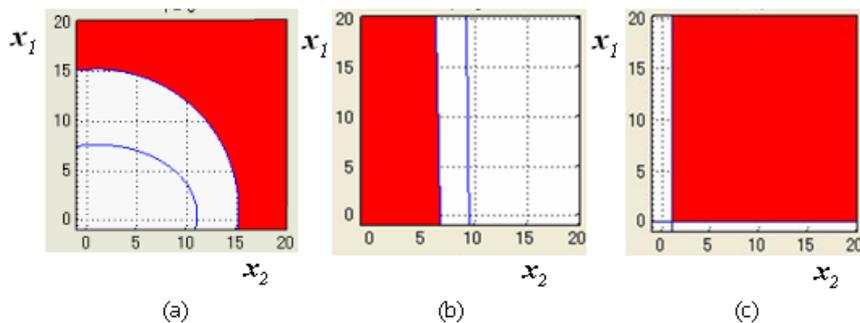
$$\forall z > 0 \quad z^3 + (-2x_1 + 1199)z^2 + (-2x_2 - 399x_1^2 - 1598x_1 + 479201)z - 399x_2^2 - 800x_2 - 159600x_1^2 - 319200x_1 + 63840400 > 0.$$

同様に QE により  $x_1, x_2$  に関する等価な条件  $P_6 < 0$  を得ます。ここで、

$$P_6 = 399x_2^2 + 800x_2 + 159600x_1^2 + 319200x_1 - 63840400$$

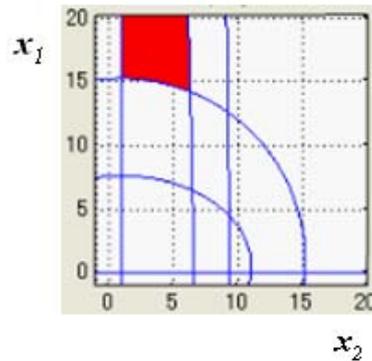
です。下図(b)の赤い部分が  $x_1, x_2$  の可能領域となります。

さらに、Hurwitz の判定条件より得られるシステムの安定性の条件を示したのが下図(c)です。パラメータ空間設計法の利点の一つは、複数の設計仕様に対する対応が容易にできることにあります。ただ単にそれぞれの仕様を満たす制御器のパラメータ  $x_1, x_2$  の可能領域の重ね合わせ(条件式の論理積)をとればよいのです。



各仕様に対する  $x_1, x_2$  の実行可能領域

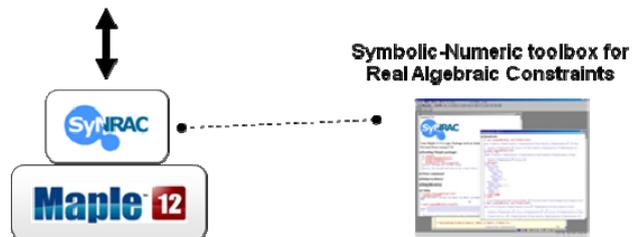
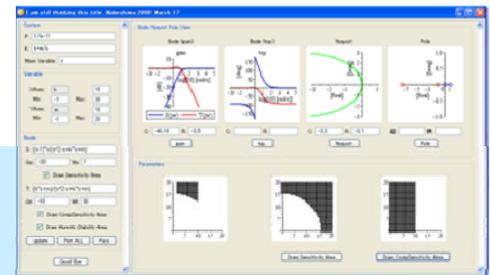
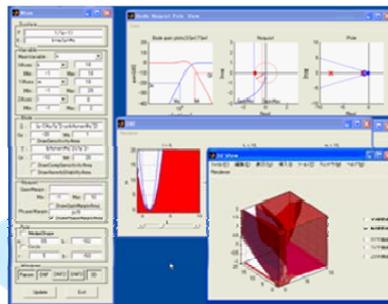
したがって、この例においては、各図の可能領域の重ね合わせにより、下図で赤く示されたる非凸領域を得ます。これが2つの設計仕様と安定性を満たす  $x_1$ ,  $x_2$  の可能領域です。



全ての仕様を満たす  $x_1$ ,  $x_2$  の実行可能領域

ここで例によって説明した数式処理を用いた設計手法に基づく汎用的なロバスト制御系設計ツールを、SyNRAC をコアエンジンとして開発しました。これまでの数値的なシミュレーションによる制御系の解析手法を融合した形で MATLAB のツールボックスとして実装されており、さらに Maple ツールボックスとして同様の実装もおこないました。このツールを利用することで設計者は設計対象のモデルと設計したい制御器を入力し、設計仕様を入力するだけで、設計仕様を満足する制御器のパラメータが取りうる可能領域をパラメータ空間中領域として明示的に可視化された形で得ることが可能となります。

### Parametric Robust Control Toolbox



これら開発中の SyNRAC と制御系設計ツールボックスについては、我々のツールを開発するためのプラットフォームとして利用しているソフト Maple の販売元

MapleSoft 社からツールボックスとして製品化の予定です。現在、その実現にむけてツールの改良も行いながら、ライセンス供与の契約についての打合せを継続中です。

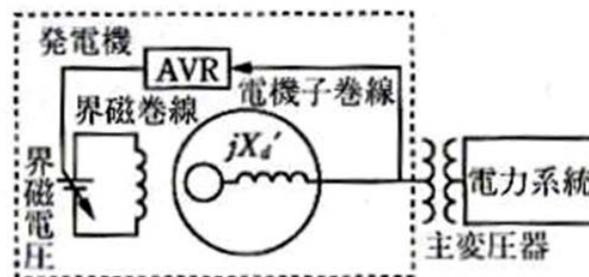
## 発電機励磁制御系設計

Parametric Robust Control Toolbox の実適用先として、発電所の発電機励磁制御系設計に応用しました。さらに、発電機励磁制御系設計のための専用設計支援ツールを開発しました。このツールは Parametric Robust Control Toolbox に発電機励磁制御系設計に合わせた GUI を追加することで効率よく開発が可能で、Parametric Robust Control Toolbox の汎用性も確認できました。

発電機の安定度解析を行うためには、励磁制御装置をブロック図で表現して行われおり、一般に、発電機制御のパラメータ調整は古典制御理論のボード線図を用いられることが多いです。近年、制御工学は古典から現代、さらにアナログからデジタルと時代ともに変貌し、様々な現代制御理論を用いた励磁制御が生まれてきましたが、「定数設計方法より複雑、設計方法の経験が足りない」、「導入実績がないことから故障時のトラブルに対応できない」等の理由により、現実にはほとんどの実系統で実用化されていません。そのため現在でも実機試験においてはボード線図の繰り返し計算による感度調整が現在でも活用されることが多く、この作業は現場の電気技術者の経験に依る部分も多く非常に手間がかかっています。

そこで、ボード線図の周波数領域だけでなく、パラメトリック最適化を用いて励磁制御方式のパラメータ調整を多目的設計として置き換え、設計パラメータ可能領域を重ね合わせ最適なパラメータ領域を導き出すことにより、励磁制御の感度調整領域を適切に表現する方法を提案しました。

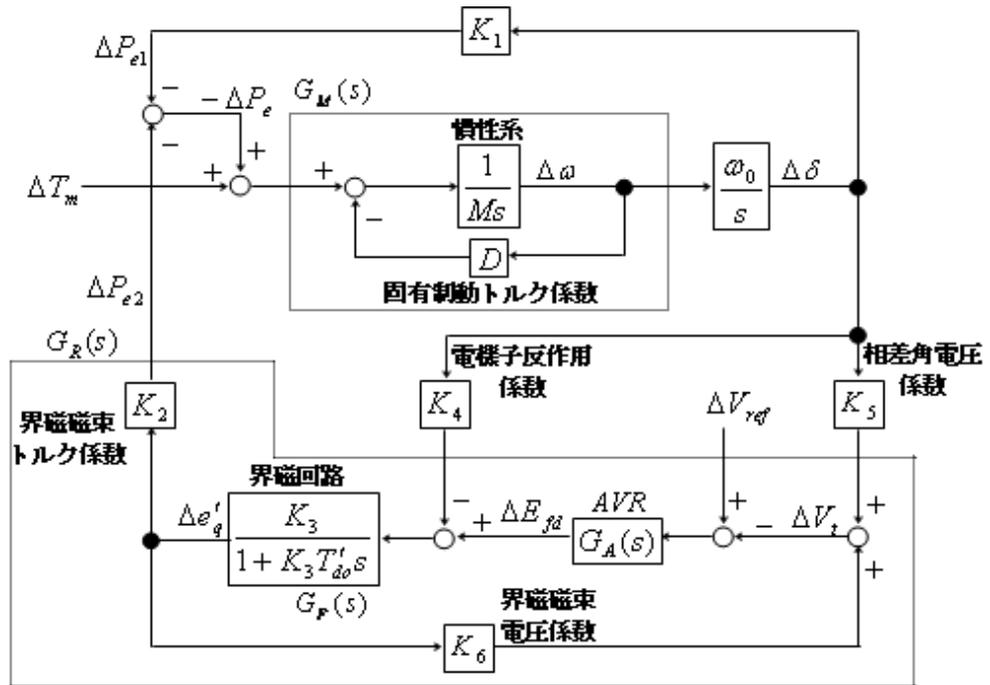
実際には、以下に示す一機対無限大母線系統の動態安定度領域を用いて、励磁制御の応答性をシミュレーションし検証しました。



Single Machine Infinite Bus (一機対無限大母線系統)

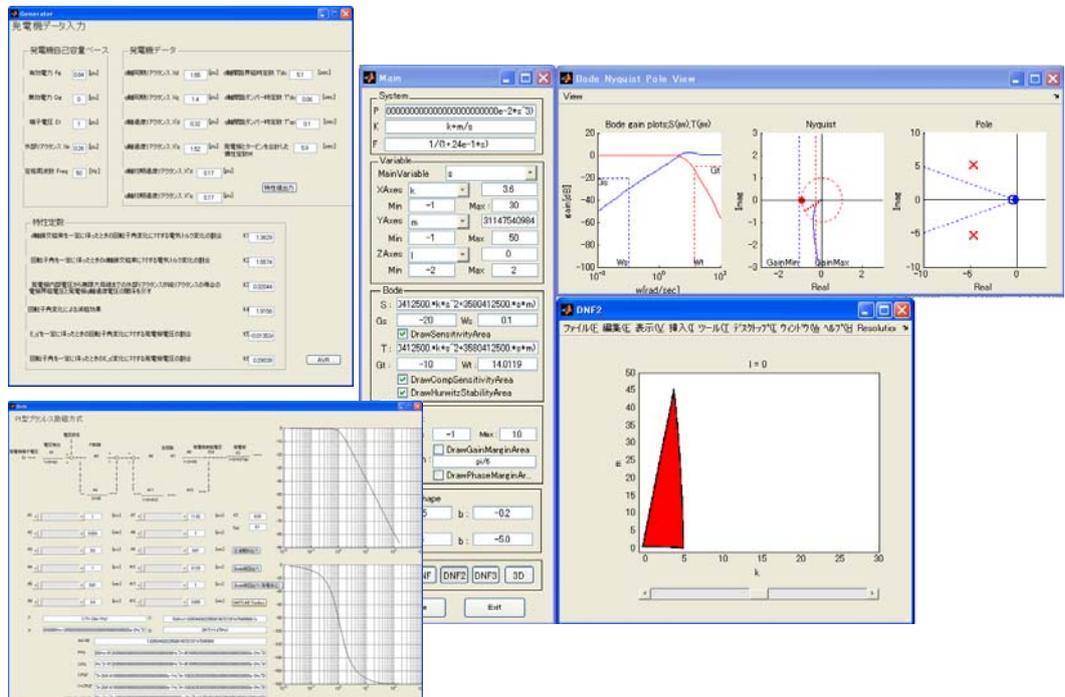
一機無限大母線系統のモデルとしては以下の図の Heffron-Philips のブロック線図を用いました。

これらのモデルを用いて、QE によるパラメータ空間設計法に基づいた手法を用いて発電機のブラシレス励磁制御方式とサイリスタ励磁制御方式の AVR 制御パラメータを調整する Matlab/SimuLink を使用した独自のツールを作成しました。



Block diagram of Single Machine Infinite Bus

開発したツールでは、設計対象の発電機の定数を入力すると各励磁制御方式の伝達関数や数値的計算によりボード線図が表示され、そして混合感度問題(周波数限定 $H_\infty$ 制約条件)を満たすPI制御器の比例ゲイン、積分ゲインの可能領域を表示させることができる励磁制御系設計支援ツールボックス (GUI) になっています。

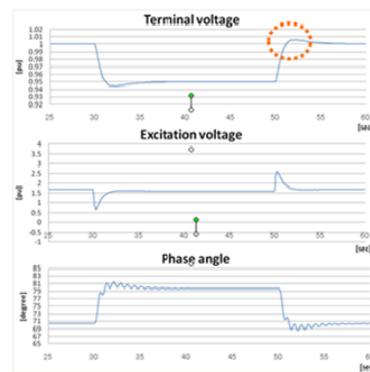
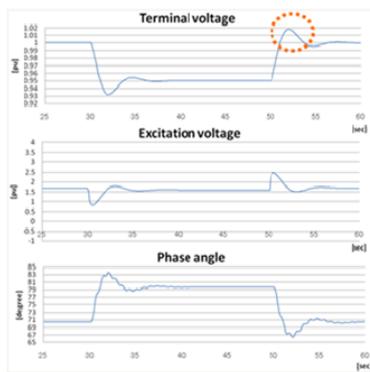
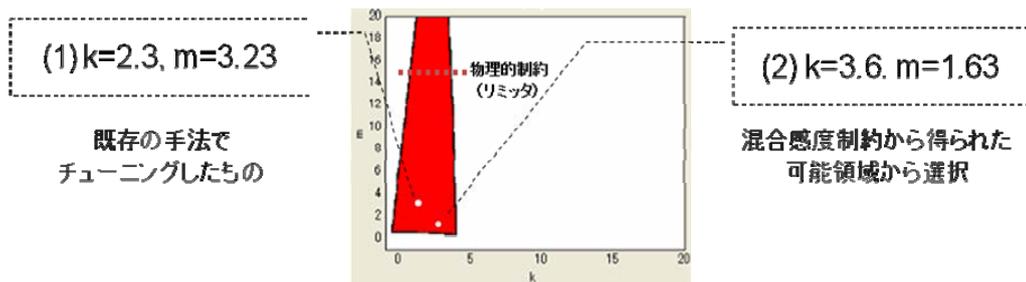


発電機励磁制御系設計支援ツールボックス

このツールボックスをもとに、ナイキスト線図と極配置の計算を行い、安定性の可能領域は、混合感度制約をQEによって解くことにより得られます。ブラシレス励磁制御方式にこのツールを適用した際の計算結果例を以下の図に示します。赤い領域が所望の混合感度問題(周波数限定  $H_{\infty}$  制約条件)を満たすPI 制御器の比例ゲイン、積分ゲインの可能領域になっています。この領域とナイキスト線図や極配置の結果から AVR の感度調整を行い比例ゲイン、積分ゲインの値を設計者は選択します。こうして設計仕様・制約を満たすパラメータ (比例ゲイン、積分ゲイン) の可能領域を正確に求め可視化できるため設計者は見通しよく効果的にパラメータ値の決定を行うことができます。

こうして決定した比例ゲイン、積分ゲインの値を用いてシミュレーションを行いこれまでの数値的手法でパラメータ設計をしていた結果との比較検証を行い、我々の手法の有効性を確認しました。

実際、我々のツールを用いて得られた比例ゲイン、積分ゲインの値を用いて  $\pm 5\%$  負荷インディシャル応答のシミュレーションを行いました。ブラシレス励磁制御方式で数値的な手法にて求めた値を用いた場合の結果とのシミュレーションで比較すると以下に示すように、ダンピングがかなり改善されていることがわかります。



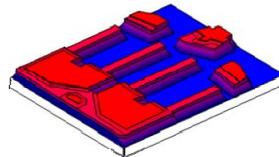
## HDD 形状設計

その他に、実設計応用として富士通社内のもづくりへの適用も行いました。具体的には、HDDの形状最適化やSRAMの最適設計への適用で、数値・数式ハイブリッド計算による設計支援手法の有効性を検証し、その有効性を確認しました。HDDのスライダ形状の設計では、ある設計工程において14日間かかっていたものを1日に短縮することができました。また、SRAMの形状設計においても、歩留り最適化を行うのに必要な解析が10倍速く実現することが可能となりました。

ここではHDDのスライダ形状の最適設計について簡単に説明します。HDDのスライダにあるABS(Air Bearing Surface)の形状の最適化がターゲットです。



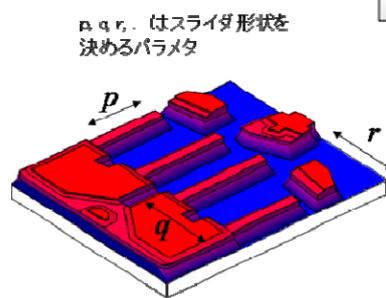
スライダ拡大図(上面がABS)



スライダは、先端の磁気ヘッドで情報の読み取り／書き込みを行う役割を担っており、ディスクに近いほど読み取り／書き込みエラー少なく、一方ディスクに接触するとクラッシュの原因になります。したがって、その位置制御においてはディスクに対する相対位置が重要となっています。スライダとディスクの相対位置ですが、スライダはディスクの回転で生じる空気の流れて10~20 nm 程度浮上しておりこの浮上量により決まります。高度(気圧)などの環境変化によっても浮上量は変化します。また、浮上時の角度も、アームの位置により空気の流れが変わったり、スライダに縦・横方向への回転が生じるなどして変化します。HDDの設計では、上記の点を考慮して、適度なスライダの浮上量を達成するように設計することが重要となります。実際には、先端にあるABSの部分に溝を掘ることでスライダの浮上を制御します。ABSの形状を工夫することで、浮上量が小さく、かつ、安定した位置を保てるABS形状を見つけることが求められます。

この浮上量や安定な位置・姿勢を達成できるようなABS形状を設計する問題は、様々な高度下での浮上量がちいさいことや姿勢の安定度など複数の設計仕様(目的関数)を同時に最適化する多目的最適化の問題として解決することができます。

### ■ ABS形状 $\mathbf{x} = (p, q, r, \dots)$



### ⇒ 浮上計算(レイノルズ方程式)

スライダ形状から、  
フライハイト、ロール、ピッチ...  
を計算

目的関数  
(コスト関数) フライハイト  
ロール  
ピッチ  
...

### ■ ABS形状最適化

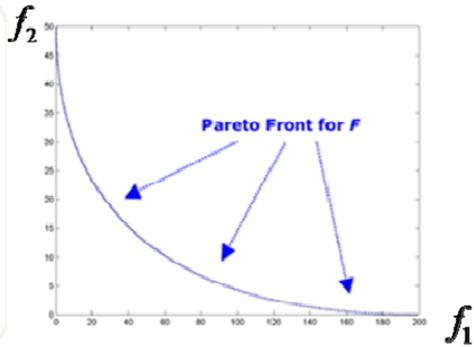
目的関数(たち)を小さくする  
ABS形状(パラメータ  $\mathbf{x}$ )を求める

### 多目的最適化

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N} & \mathbf{f} = \{f_1(\mathbf{x}), \dots, f_r(\mathbf{x})\} \\ \text{subject to} & g(\mathbf{x}) \leq 0 \\ & h(\mathbf{x}) = 0 \end{cases}$$

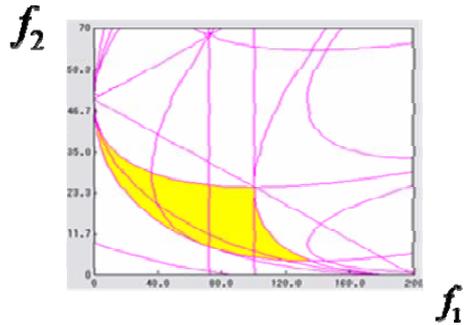
多目的最適化の手法としては、複数の目的関数を重み付きで足し合わせて単目的化して最適化を行う方法と、多目的のまま Pareto line を求めてから、最終的に複数のパレート解から最適解を選択・決定する方法の大きく2つあります。実際の設計においては、目的関数間のトレードオフ関係をみながらより柔軟に最適設計解を決定していただける多目的最適化は非常に強力なツールです。我々はQEに基づく新しい多目的最適化手法を提案しました。以下の例では、2つ目的関数 $f_1, f_2$ のトレードオフ関係を示すパレトラインを数値的に求めたものが上の図で、QEを用いた方法で得られたものが下の図です。QEによる方法では、正確な式を用いて可能領域も求められており、 $f_1, f_2$ の取り得る可能領域まで求まっています。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F &= (f_1(x, y), f_2(x, y)) \\ f_1(x, y) &= 4x^2 + 4y^2 \\ f_2(x, y) &= (x-5)^2 + (y-5)^2 \\ 0 &\geq (x-5)^2 + y^2 - 25 \\ 0 &\geq -(x-8)^2 - (y+3)^2 + 7.7 \\ 0 &\leq x \leq 5 \\ 0 &\leq y \leq 3 \end{aligned}$$

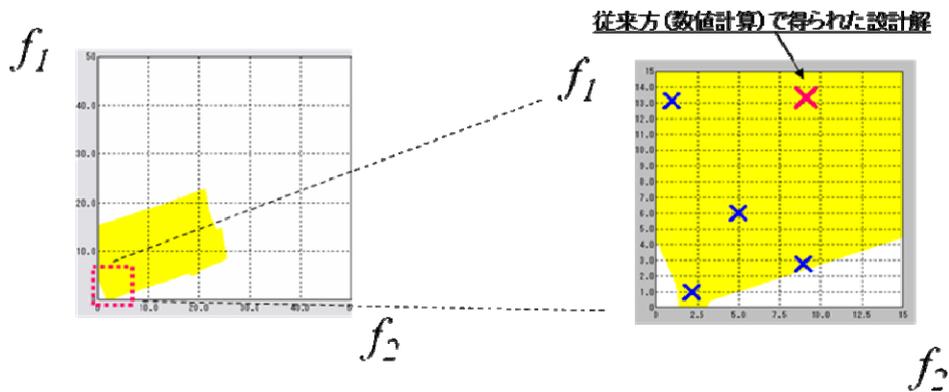


#### ■ QEによるPareto計算手法

$$\begin{aligned} \exists x \exists y \{ &4x^2 + 4y^2 - f_1 = 0 \wedge \\ &(x-5)^2 + (y-5)^2 - f_2 = 0 \wedge \\ &(x-5)^2 + y^2 - 25 \leq 0 \wedge \\ &-(x-8)^2 - (y+3)^2 + 7.7 \leq 0 \wedge \\ &x \geq 0 \wedge x \leq 5 \wedge \\ &y \geq 0 \wedge y \leq 3 \} \end{aligned}$$



このQEに基づく手法を、実際のABS設計に適用しその有効性を実証しました。以下の図ではあるABS形状に対するある2つの目的関数 $f_1, f_2$ の可能領域を示したものです。これまでの単目的化による数値最適化の手法で得られた設計解に比べ、効率的にかつ正確にパレート解を構成することが可能となりました。また、数値最適化の手法で得られた設計解よりもよりどのくらいどちらの目的関数に重点をおいて最適化可能かなど一目瞭然可に判断し設計することが可能となりました。その結果、実際の設計工程の工数の削減に大きく貢献できました。



## システムズ・バイオロジ

もうひとつ新しい応用として、数値数式ハイブリッド計算による生体系のモデルパラメータの最適化の手法について研究を開始し、その他の生体系解析手法の開発も行いました。

まず、数値・数式ハイブリッド計算による生体系のモデルパラメータの決定手法を開発し実際の生体系モデル HIV proteinase のモデルに適用しました。

# HIV proteinase

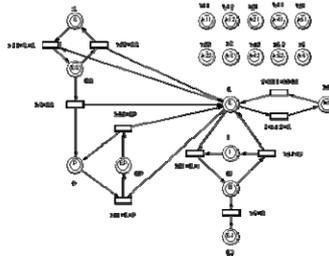
## ■ Mechanism

	rate const.	velocity
$M + M \rightleftharpoons E$	$k_{11}$ $k_{12}$	$v_1 = k_{11}[M][M] - k_{12}[E]$
$S + E \rightleftharpoons ES$	$k_{21}$ $k_{22}$	$v_2 = k_{21}[S][E] - k_{22}[ES]$
$ES \rightarrow E + P$	$k_3$	$v_3 = k_3[ES]$
$E + P \rightleftharpoons EP$	$k_{41}$ $k_{42}$	$v_4 = k_{41}[E][P] - k_{42}[EP]$
$E + I \rightleftharpoons EI$	$k_{51}$ $k_{52}$	$v_5 = k_{51}[E][I] - k_{52}[EI]$
$EI \rightarrow E + J$	$k_6$	$v_6 = k_6[EI]$

## ■ Kinetic

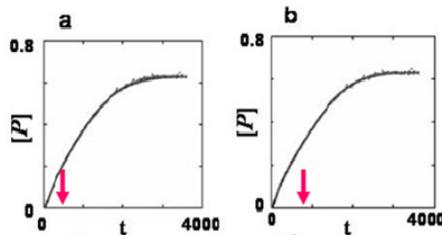
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d[M]}{dt} = -2 \cdot v_1 \\ \frac{d[E]}{dt} = v_1 - v_2 + v_3 - v_4 - v_5 \\ \frac{d[S]}{dt} = -v_2 \\ \frac{d[ES]}{dt} = v_2 - v_3 \\ \frac{d[P]}{dt} = v_3 - v_4 \\ \frac{d[EP]}{dt} = v_4 \\ \frac{d[I]}{dt} = -v_5 \\ \frac{d[EI]}{dt} = v_5 - v_6 \\ \frac{d[J]}{dt} = v_6 \end{array} \right.$$

## ■ Hybrid Petri net



これにより、少ない実験データからも効果的にモデルのパラメータを決定できることを確認し、さらにパラメータ最適化と同様に、パラメータ間の関係式や、パラメータと変数の関係についても代数的式として抽出することが可能となりました（下図参照）。これらは、これまでの数値的フィッティング手法では困難な問題でした。

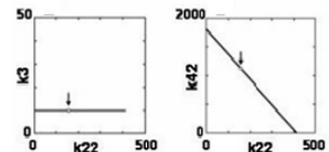
## ■ Achieve parameter estimation with a few observed data



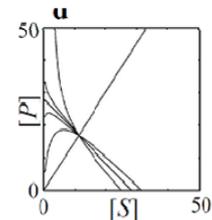
• : Observed data — : Simulated curve

## ■ Elucidate relationship between parameters & variables

### Parameters

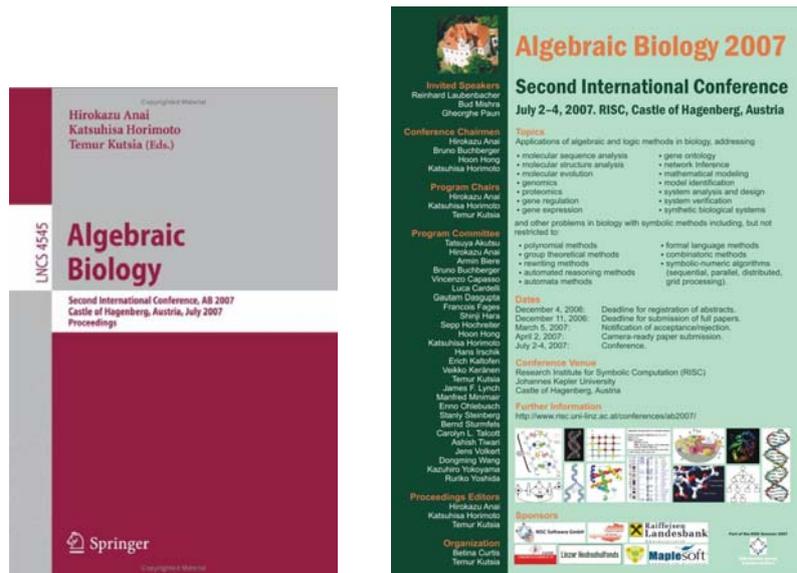


### Variables



PET 装置を用いたパーキンソン病の診断法について、数式处理的なアプローチに基づいて患者負担の少ない新しい診断法の改良を行い、また、多細胞生物の多様性条件を代数的手法を適用して解析し多様性条件についての研究を継続しました。

このような代数的なアプローチによる生体系の問題に取り組む研究を主題とする国際会議 Algebraic Biology を 2005 年に立ち上げ、当プロジェクトの研究成果を発信するのみならず、代数的生物学という新しい方向性を提唱しました。2007 年に第 2 回目、2008 年には第 3 回目をオーストリア・ヨハネスケプラー大学の RISC-Linz にて開催しました。第 4 回目はアメリカにて開催予定です。



(2)研究成果の今後期待される効果

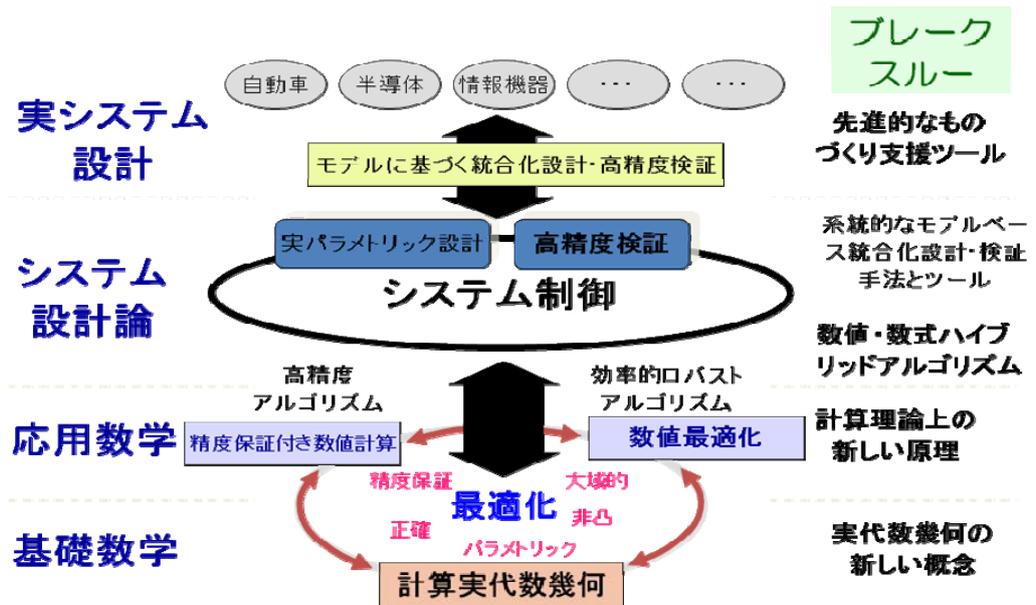
SyNRACのさまざまな分野の問題への適用を通して、数値・数式ハイブリッド最適化の適用の方法論が確立してきており、またSyNRACに基づく新しい先進的な設計支援ツールをいろいろな分野へと提供することが比較的容易に可能となってきました。そのような活動を通して、さまざまなものづくりの現場へより系統的な設計手法・ツールを提供することが可能となり、日本のものづくり力の強化に貢献できると考えています。

また、バイオロジーをはじめとする自然科学分野への適用により新しい知見の発見も期待できると考えています。当プロジェクトにて研究している技術は、数学モデルで記述される現象であれば適用可能であることから、さらに経済、社会科学などの分野への展開も想定可能であると考えています。



数値数式ハイブリッド最適化手法のツール SyNRAC の開発と、SyNRAC に基づくパラメータ空間アプローチによる新しい制御系設計ツールを開発中であるが、制御系設計ツールの有効性が実的用で確認できたことで、制御系設計だけでなく各種の分野においても同様のツールが有効であることが予想されるため、今後他分野での同様のツールの開発・製品化も期待できます。

今後さらに、本プロジェクトにて培った研究成果をベースとして、数学、応用数学、システム設計論、そして実システム設計の各分野の研究者と有機的な協働のもとに本プロジェクトを発展させていきたいと思っています。



### 3. 2 数値的最適化手法と記号・代数計算に基づく計算技法の一般的適用方法論の確立 (東京大学 原グループ)

#### (1) 研究実施内容及び成果

従来の数値計算に基づく技法では解決が困難である実際の工学・産業上の重要な問題(特に、システム・制御理論)の抽出と、抽出された制約問題・最適化問題に対する有効な数値/数式ハイブリッド解法の開発、適用に当たっての一般的方法論の確立を行いました。

システム・制御理論を中心とした実応用における設計問題において現れる設計問題を抽出し、物理的な拘束条件を考慮した最適化問題として定式化するとともに、それらの問題に対する数値/数式ハイブリッド解法に関する検討を、富士通グループ及び立教大学グループと共同で定期的にセミナーを開催し情報共有しながら行いました。

プロジェクト開始以来、以下の制御系設計を中心としたトピックについて検討を行ってきました。

- (1) 数値・数式ハイブリッド最適化のツールである SyNRAC に基づくパラメトリック設計支援

## ツールの構築

- (2) 一般化 KYP 補題に基づく開ループ整形法と出力フィードバック制御系の設計法
- (3) 制御系設計アルゴリズムの精度保証
- (4) 適応制御アルゴリズム
- (5) ネットワークを用いた制御系の制御性能限界と通信方式
- (6) 多項式の根の和に基づく新しい制御系設計理論

主な成果は、それぞれ以下です。

- (1) 数値・数式ハイブリッド最適化に基づくパラメトリック・ロバスト制御系設計ツールをまず、MATLABのツールボックスとして開発し、その後Maple上のツールボックスの開発をおこないました。これらのツールの有効性を、電力供給システムの電力安定システムの制御器の設計などへ適用してその有用性を確認しました。
- (2) 一般化 KYP 補題に基づく開ループ整形法と出力フィードバック制御系の設計法を提案し、前者に関してもMATLAB上の設計ツールを開発しました。
- (3) 制御系設計アルゴリズムの精度保証について検討し、数値処理と数式処理を併用したアルゴリズムを提案し、その有用性を確認しました。
- (4) 適応制御アルゴリズムを提案し、数値例題によりその有効性を確認しました。
- (5) ネットワークを用いた制御系の制御性能限界と通信方式について検討しその設計法を提案しました。
- (6) 多項式の根の和という量に着目することで、システム制御理論における基本的な数学の道具である多項式スペクトラル分解と数式処理の代数的算法であるグレブナ基底との関係が明白となり、この事実に基づくことで、さまざまな制御系設計問題に対して、高精度の数値計算が可能となり、また、パラメトリックに問題を取り扱うことが可能となりパラメータを陽に扱う設計手法を開発することができました。

## (2)研究成果の今後期待される効果

(1)(2)(3)の成果は新しい設計支援ツールとして多くの工学の設計への応用が期待されるため、実用的なシステムの構築に向けて有効なツールとなることが期待されます。(5)の成果は遠隔操作を含むシステムの設計への適用が期待できるので、さらに理論的な検討を行い、設計法の確立を目指します。(6)についてはこれまでの制御理論の、新しい側面からの理論体系をあらわにする可能性があるかと期待しています。

ここで得られた制御系設計手法についての新しい成果は、SyNRAC に基づいた設計支援ツールの多分野への展開への鍵となると考えております。

## 3.3 記号・代数計算に基づく計算技法の一般的適用方法論の確立と適用規模の拡大 (立教大学 横山グループ)

### (1)研究実施内容及び成果

本研究においてベースとなる代数的技法(グレブナ基底や限定記号消去法等)の適用可能規模の拡大を目指し、代数的計算に基づく手法の基礎理論の数値計算理論との融合を通じての精密化、および、アルゴリズムの開発・効率化を行いました。

記号・代数計算のポイントとなるパラメータを持ったままの最適化計算の基礎となる基本演算(グレブナー基底・終結式)の改良を行なうとともに、その効果的な適用事例を発掘し、その有効性を検証した。特に具体的な事例の発掘は、富士通グループ及び東大グループ

と定期的にセミナーを開催し情報共有しつつ効果的に行いました。

記号・代数計算に基づく計算技法の一般的適用方法論の確立と適用規模の拡大という目的で、主として、ベースとなる代数的技法(グレブナ基底や限定記号消去法等)の適用可能規模の拡大を目指し、代数的計算に基づく手法の基礎理論をより深く掘下げる精密化およびアルゴリズムの開発・効率化を行いました。また、実際の制御理論からの設計問題等への適用を行ない、従来の計算技術では不可能であった問題を検討し有効な成功事例を蓄積できました。

parameter を含んだまま扱う等式制約、不等式制約解法を確立し、計算量の壁を破るべく、限定子除去法において、数値・数式融合を推進し、その成果を富士通グループで構築中の高速な計算ツール SyNRAC へ反映させています。これらの計算理論、計算技術は、新たなシミュレーションの核となる技術と考えています。

最適化問題に対する新しいアプローチである記号・代数計算を用いたパラメータを含んだまま正確に解く方法の確立を目指し、

(1)ベースとなる記号・代数計算理論とその技術の展開

(2)成功事例の発掘とそのためのアルゴリズムの改良

を行いました。

(1)では、上位レベルである限定子除去法、パラメータ付きの多項式イデアル操作を中心に研究を行なった。数値数式融合による限定子除去法の効率化に向けて基本的な枠組みを構築しました。また、パラメータを指数部に含む連立代数方程式の解の構造の安定性に関して、基本的な結果を得ました。

(2)では、適用事例として制御理論を取り上げ、制御パラメータを含んだままの形での最適化計算により、制御パラメータの設計条件を正確に与えることに成功した。また、研究リーダーの富士通グループと東大グループと共同で、制御理論で重要な多項式の根の正実部の和を正確に評価する方法を計算機代数の手法と限定子除去法を効果的に組み合わせることにより、非常に有効な計算法を得ることができました。

(2)研究成果の今後期待される効果

パラメータにより記述される連立代数方程式の解の構造をより詳細に調べ、計算の効率化の基礎となる理論を構築することで、純粋数学へのフィードバックも期待できます。これまで埋もれていた数学概念が計算という観点から掘り出されたり、計算という点を重視することで新しく必要になる数学の概念などの創出も行われると期待しています。

### 3. 4 記号・代数計算に基づく計算技法の一般的適用方法論の確立と実証評価 (神戸大学 野呂グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本研究においてベースとなる等式制約に対する代数的技法(グレブナ基底、終結式等)の適用可能規模の拡大を目指し、代数的計算に基づく手法の基礎理論の精密化、およびアルゴリズムの開発・効率化を行い計算機による実証評価を行いました。

記号・代数計算のポイントとなるパラメータを持ったままの最適化計算の基礎となる基本演算、特に、有理数体の拡大体上での基本演算の高速化および Dynamic evaluation 技法の実用化を行なうとともに、その数値・数式ハイブリッド最適化アルゴリズムへの効果的な適

用を行い、その有効性を検証しました。特に具体的な数値・数式ハイブリッド最適化アルゴリズムへの適用には、富士通グループ及び立教大グループと定期的に交流し情報共有しつつ効果的に行いました。

記号・代数計算に基づく計算技法の一般的適用方法論の確立と適用規模の拡大という目的で、主として、ベースとなる代数的技法(有理数体の拡大体上での基本演算の高速化および Dynamic evaluation 技法の実用化)の適用可能規模の拡大を目指し、代数的計算に基づく手法の基礎理論をより深く掘下げる精密化およびアルゴリズムの開発・効率化を行いました。これまでの成果は、QE の実用化における基礎的な技術の一つとなると考えられます。これを組み込んだ実装をさらに進め、その効果を評価しさらに改良を行いました。

有理数体の逐次代数拡大体上での基本演算の高速化を目指し、代数的数の表現形式および、簡約化方法の検討を行った。さらに、逆元の計算方法の効率化について検討し、モジュラ計算の応用による方法の適用可能性を探りました。具体的には、分散表現多項式による逐次拡大の表現を考案し、その簡約を単項簡約により行うことにより、効率が向上できることを実証した。逆元については、未定係数法により線形方程式系の求解にもちこみ、それをモジュラ計算により解くことで効率向上できることを実証しました。さらに、これらの応用として、逐次代数体上のグレブナ基底計算を新たに実装し、効果を実証しました。

QE の数値数式ハイブリッド計算に必要となる Dynamic Evaluation 技法の実用化をめざし、そのイデアル論的定式化およびモジュラ計算の応用を考察しました。Dynamic Evaluation において基本となるイデアルの分解が簡明な式で記述できることを示し、さらに、その成分が、モジュラ計算により効率よく計算できることを示し実証も行いました。

## (2)研究成果の今後期待される効果

ここでの研究結果は、数式処理や代数計算においては非常に基礎的な部分の改良であるが、それゆえに今後の代数計算全般の効率化にも大きく貢献するものと期待できます。

## 3.5 記号・代数計算に基づく計算技法のシステムズ・バイオロジへの適用方法論の確立と実証評価

(産総研 堀本グループ)

### (1)研究実施内容及び成果

本研究においてベースとなる等式制約に対する代数的技法を生体系解析へ適用し、蓄積された実験データに基づいて新しい知見を抽出することを目指します。そのために、数値計算との融合を含めたロバスト最適化の手法の確立とその適用の方法論の確立を行いました。

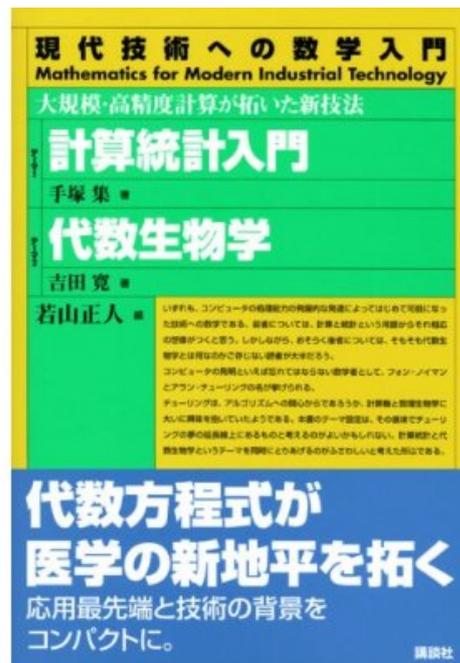
バイオインフォマティクスにおける最適化の具体的な問題を抽出し、代数計算に適した最適化問題として定式化するとともに、それらの問題に対する数値/数式ハイブリッド解法に関する検討を、富士通グループと定期的に打ち合わせを行いつつ共同で行いました。本プロジェクトの研究チームに参加したのが平成 18 年 10 月からではあるがそれまでも定期的に打ち合わせを行っており、そこで蓄積してきた共同研究成果を基に、現在、数値/数式ハイブリッド最適化に基づく新しい生体系解析技術の開発しました。

2005年に、産総研グループ堀本氏と富士通グループ穴井で、国際会議 Algebraic Biology 2005 を立ち上げ、自分達の研究成果を発信するのみならず、代数的手法を用いた生物学という新しい方向性を確立した。2007年に第2回目、2008年に3回目の Algebraic Biology をオーストリアで開催しました。

## (2)研究成果の今後期待される効果

バイオインフォマティクスへの適用検討を開始したところ、少数データでのパラメータ最適化、パラメータの可能領域の求解、そしてパラメータ間の関係の抽出など、これまで解くことが困難であった問題に対して数値・数式ハイブリッド算法が非常に有効であることが確認できた。このような要素技術は、ものづくりやさまざまな分野でも有効と考えられます。また、代数計算アルゴリズムの利用により、数値シミュレーションだけでは捕らえることが容易ではなかった新しい知見の発見にもつながると期待できます。

バイオ分野への展開は、国際会議 Algebraic Biology の発展とともに確実に広がりを見せてきています。代数生物学についての初の書籍も出版にいたり、今後とも期待できる分野となると思われます。



## § 4 研究参加者

### ①富士通(株)グループ(数値/数式ハイブリッド手法の開発とロバスト最適化プラットフォームの構築)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	穴井宏和	富士通(株)	統括部長付	ハイブリッド技法の開発	H15.10～H21.3
	金児純司	富士通(株)	担当部長	ハイブリッド技法の開発	H15.10～H21.3
	屋並仁史	富士通(株)	研究員	数値数式ソルバ構築	H15.10～H21.3
	折居茂夫	富士通(株)	担当課長	ハイブリッド技法のバイオ応用	H17.4～H21.3
	洪明勲	富士通(株) HST	研究員	ハイブリッド技法の実装	H17.4～H17.11
	Kord Eickmeyer	DAAG(ドイツ 学術交流会)	留学生	ハイブリッド技法の実装	H18.6～H19.3
	兵頭礼子	(株)アルファオメガ	研究員	ハイブリッド技法の実装	H18.8～H20.9
	具 承郁	富士通(株) FST	研究員	ハイブリッド技法の実装	H19.4～H21.3
	Silvia Gandy	東京工業大学	D1	ハイブリッド技法の実装	H19.4～H20.9
	瓜生 芳久	成蹊大学	教授	ハイブリッド技法の電力プ ラント応用	H19.4～H21.3
	壹岐 浩幸	成蹊大学	客員研究員	ハイブリッド技法の電力プ ラント応用	H19.4～H21.3
	吉村 秀太	成蹊大学	M1	ハイブリッド技法の電力プ ラント応用	H19.4～H21.3
	岩根 秀直	富士通(株)	研究員	数値数式ソルバ構築	H19.7～H21.3
	伊藤 隆浩	九州大学	D1	ハイブリッド最適化手法の 研究	H19.10～H20.3

### ②東京大学グループ(数値的最適化手法と記号・代数計算に基づく計算技法の一般的適用方法論の確立)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	原 辰次	東京大学	教授	ハイブリッド技法の開発	H15.10～H21.3
	津村幸治	東京大学	准教授	ハイブリッド技法の開発	H15.10～H21.3
	石井秀明	東京大学	助教	ハイブリッド技法の開発	H16.4～H21.3

*	森口聡子	東京大学	CREST 研究員	ハイブリッド技法の開発	H16.4～H17.3
*	早川朋久	東京大学	CREST 研究員	ハイブリッド技法の開発	H16.4～H17.12
	塩形大輔	東京大学	M2	ハイブリッド技法の適用	H16.4～H18.3
	大西政彦	東京大学	M2	ハイブリッド技法の適用	H16.4～H18.3
*	桜井千香子	東京大学	研究補助員	研究支援・補助業務	H16.2～H16.3
*	桜井千香子	東京大学	研究補助員	研究支援・補助業務	H19.4～H21.3
*	大森聡子	東京大学	研究補助員	研究支援・補助業務	H16.5～H18.3
	甲斐健也	東京大学	D3	ハイブリッド技法の適用	H17.5～H21.3
	中島宏	東京大学	M2	ハイブリッド技法の適用	H17.5～H21.3
*	菅野政明	東京大学	CREST 研究員	ハイブリッド技法の開発	H17.6～H21.3
	Toni Bakhtiar	東京大学	D3	ハイブリッド技法の適用	H18.4～H21.3
	大野敬太郎	東京大学	産学官連携研究員	ハイブリッド技法の適用	H18.2～H21.3
*	野口出帆	東京大学	研究補助員	研究支援・補助業務	H18.4～H19.3
	岡嶋 崇	東京大学	D2	ハイブリッド技法の適用	H18.9～H21.3
	山平 尚史	東京大学	M2	ハイブリッド技法の適用	H18.9～H21.3
*	金 泰亨	東京大学	CREST 研究員	ハイブリッド技法の適用	H19.3～H20.8
	金 泰亨	Chung-Ang University	助手	ハイブリッド技法の適用	H20.9～H21.3
*	沖和恵	東京大学	研究補助員	研究支援・補助業務	H19.5.～H20.3
*	鍋島克輔	東京大学	CREST 研究員	ハイブリッド技法の適用と実装	H19.10～H20.3
*	吉田光子	東京大学	研究補助員	研究支援・補助業務	H20.6～H21.3

③立教大学グループ(記号・代数計算に基づく計算技法の一般的適用方法論の確立と適用規模の拡大)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	横山和弘	立教大学	教授	数式処理技法の進展	H15.10～H21.3
*	木村欣司	立教大学	CREST 研究員	ハイブリッド技法の開発	H17.4～H18.9
	木村欣司	新潟大学	講師	ハイブリッド技法の開発	H18.10～H20.3
*	中川康二	立教大学	CREST 研究員	ハイブリッド技法の開発	H18.5～H18.7
*	篠原直行	立教大学	CREST 研究員	ハイブリッド技法の開発	H19.4～H21.3
	Silvia Gandy	東京工業大学	D1	ハイブリッド技法の実装	H20.10～H21.3
	兵頭礼子	(株)アルファオメガ	研究員	ハイブリッド技法の実装	H20.10～H21.3

④神戸大学グループ(記号・代数計算に基づく計算技法の一般的適用方法論の確立と実証評価)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	野呂正行	神戸大学	教授	数式処理技法の進展・実装	H16.10～H21.3

⑤産業技術総合研究所グループ(記号・代数計算に基づく計算技法のシステムズ・バイオロジーへの適用方法論の確立と実証評価)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	堀本勝久	産業技術総合研究所	チーム長	数式処理のバイオ適用	H18.4～H21.3
	吉田寛	九州大学	准教授	数式処理のバイオ適用	H18.4～H21.3

§5 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
A.Dolzmann (Passau University、助教授)	代数的最適化について共同研究	立教大学 奈良女子大学	2005/07/29～ 2005/08/06
A.Seidl (Passau University、助手)	代数的最適化について共同研究	立教大学 奈良女子大学	2005/07/29～ 2005/08/08
B.Laubenbacher (Virginia Bioinformatics Institute、教授)	代数的生物学について研究交流	富士通(株)	2005/11/28～ 2005/11/30

D.Wang (Université Pierre et Marie Curie、教授)	代数的生物学について研究交流	富士通(株) 立教大学	2005/11/27～ 2005/12/06
H.O.Geil (Aalborg University、助教授)	代数的符号理論について研究交流	京都大学	2006/7/31～ 2006/8/02
W.Niu (Beihang University、修士)	代数的生物学について研究交流	京都大学 立教大学	2006/7/30～ 2006/8/13
D.Wang (Université Pierre et Marie Curie、教授)	代数的生物学について研究交流	富士通(株) 立教大学	2006/7/30～ 2006/8/05
C.Brown (US Naval Academy、教授)	Quantifier Elimination について研究交流	立教大学	2006/12/12～ 2006/12/18
T.Sturm (Passau University、助教授)	Quantifier Elimination の実装と応用に研究交流	立教大学	2007/9/24～ 2007/10/01
T.Sturm (Passau University、助教授)	Quantifier Elimination の実装と応用に研究交流	東京大学	2008/9/24～ 2008/10/03

## § 6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌21件、国際(欧文)誌77件)

H. Anai, S. Hara, M. Kanno, and K. Yokoyama,  
Parametric polynomial spectral factorization using the sum of roots and its application to a control design problem, *Journal of Symbolic Computation*, to appear

Saito, S., Aburatani, S. and Horimoto, K.  
Network evaluation from the consistency of the graph structure with measured data. *BMC Sys. Biol.*, in press.

Hayashida, M., Fuyan, S., Aburatani, S., Horimoto, K. and Akutsu, T.  
Integer programming based approach to allocation of reporter genes for cell array analysis. *Int. J. Bioinformatics Research and Applications*, in press.

Morioka, R., Arita, M., Sakamoto, K., Kawaguchi, S., Tei, H. and Horimoto, K.  
Phase Shifts of Circadian Transcripts in Rat Suprachiasmatic Nucleus.  
*Lecture Notes in Operations Research*, in press.

Nakatsui, M., Yoshida, H. and Horimoto, K.  
An Algebraic-Numeric Algorithm for the Model Selection  
in Network Motifs in *Escherichia coli*. *Lecture Notes in Operations Research*, in press.

Tominaga, D., Tokumoto, Y., Nakatsui, M., Sun, F., Miyake, J. and Horimoto, K.  
Analysis of network dynamics including hidden variables by symbolic-numeric approach.  
*Lecture Notes in Operations Research*, in press.

Nishino, R., Honda, M., Yamashita, T., Takatori, H., Minato, H., Zen, Y., Sasaki, M., Takamura, H., Horimoto, K., Ohta, T., Nakamura, Y. and Kaneko, S.

Identification of novel candidate tumour marker genes for intrahepatic cholangiocarcinoma. *J. Hepatol.*, 37, 806–813 (2008).

M.Kida, G.Renault and K.Yokoyama,  
Quintic polynomials of Hashimoto–Tsunogai, Brumer, and Kummer  
to appear in *International Journal of Number Theory*.

G.Renault, K.Yokoyama,  
Multi-modular algorithm for computing the splitting field of a polynomial,  
*International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation (ISSAC) 2008*,  
Hagenberg, Austria, July, pp.247–254, 2008

M. Kanno, K. Yokoyama, H. Anai, and S. Hara,  
Symbolic Optimization of Algebraic Functions,  
*International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation (ISSAC) 2008*,  
Hagenberg, Austria, July, pp. 147–154, 2008

Aburatani, S., Sun, F., Saito, S., Honda, M., Kaneko, S. and Horimoto, K.,  
Gene systems network inferred from expression profiles in hepatocellular carcinogenesis by  
graphical Gaussian model.  
*EURASIP J. Bioinfo. Systems Biol.*, 47214, 2007.

Yoshida, H., Anai, H. and Horimoto, K.,  
Derivation of rigorous conditions for high cell-type diversity by algebraic approach. *BioSystems*,  
90, 486–495, 2007

Sato, T., Yamanishi, Y., Horimoto, K., Kanehisa, M. and Toh, H., Inference of Protein–Protein  
Interactions by Using Co-evolutionary Information.  
In Anai, H., Horimoto, K. and Kutsia, T. (eds), *Algebraic Biology 2007*, *Lecture Notes in  
Computer Science* 4545, p.322–333, Springer, Heidelberg, 2007.

Yoshida, H., Nakagawa, K., Anai, H. and Horimoto, K.  
Exact parameter determination for Parkinson’s disease diagnosis with PET using an algebraic  
approach. In H.Anai, H., Horimoto, K. and Kutsia, T. (eds), *Algebraic Biology 2007*, *Lecture  
Notes in Computer Science* 4545, p.110–124, Springer, Heidelberg, 2007.

Yoshida, H., Nakagawa, K., Anai, H. and Horimoto, K.,  
An Algebraic–Numeric Algorithm for the Model Selection in Kinetic Networks. *Proceedings of  
10th CASC*, LNCS 4770, p.433–447, Springer, Heidelberg, 2007

Hayashida, M., Sun, F., Aburatani, S., Horimoto, K. and Akutsu, T.,  
Integer Programming–based Approach to Allocation of Reporter Genes for Cell Array Analysis.  
*Proceedings of 10th OSB*, *Lecture Notes in Operation Research*, p.288–301, World Publishing  
Corporation, Beijing, 2007.

H.Yanami and H. Anai,  
Maple package SyNRAC and its application to robust control design problems,  
*Future Generation Computer Systems* Vol. 23 , pp.721–726. 2007.

N.Hyodo, M. Hong, H.Yanami,S.Hara, and H. Anai  
Solving and visualizing nonlinear parametric constraints in control based on quantifier elimination,  
Applicable Algebra in Engineering Communication and Computing, 18 (6): pp497–512 Dec,  
2007.

H.Yoshida, K.Horimoto, and H.Anai  
Inference of Probabilities over a Stochastic IL–System by Quantifier Elimination,  
Mathematics in Computer Science, Volume 1, Number 3, pp473–485, Birkhäuser Basel, 2008.03

M. Kanno, H. Anai, and K. Yokoyama,  
On the Relationship between the Sum of Roots with Positive Real Parts and Polynomial Spectral  
Factorization,  
In T. Boyanov et al., editors, Numerical Methods and Applications --- 6th International  
Conference, NMA 2006, Borovets, Bulgaria, August, 2006, Revised Papers, volume 4310  
of Lecture Notes in Computer Science (LNCS), 320–328,  
Springer, 2007.

S. Hara, T. Bakhtiar, and M. Kanno,  
The Best Achievable H2 Tracking Performances for SIMO Feedback Control Systems,  
Journal of Control Science and Engineering, 2007, Article ID 93904, 12 pages, 2007.

S. Hara and M. Kanno,  
Sum of Roots Characterization for H2 Control Performance Limitations,  
SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 1(1), 58–65, 2008

S. Hara and M. Kanno,  
When is a Linear Continuous–time System Easy or Hard to Control in Practice?,  
In V. D. Blondel et al., editors, Recent Advances in Learning and Control, volume 371 of  
Lecture Notes in Control and Information Sciences (LNCIS), 111–124, Springer, 2008

K.Yokoyama,  
On systems of algebraic equations with parametric exponents II,  
Applicable Algebra in Engineering Communication and Computing, Vol. 18, 603–630, 2007.

M. Kaneko, M. Noro, K. Tsurumaki,  
On a conjecture for the dimension of the space of the multiple zeta values, IMA Volume  
148 on “Software for algebraic geometry”, Springer (2008), 47–58.

Y. Kurata, M. Noro,  
Computation of Discrete Comprehensive Groebner Bases Using Modular Dynamic Evaluation,  
Proc. ISSAC2007, ACM Press (2007), 243–250.

管野政明, 大西政彦, 原辰次:  
「有限周波數位相・ゲイン特性に着目した連続時間制御対象の制御しやすさの特徴づけ」 計  
測自動制御学会論文集, 43(10), 855–862, 2007

管野政明, 内山裕貴, 原辰次:  
「離散時間 H2 最適制御問題に対する精度保証付き計算」  
システム制御情報学会論文誌, 20(11), 451–453, 2007

鍋島克輔

「パラメトリック・グレブナ基底計算のテクニック」

日本数式処理学会論文誌 To be published

鍋島克輔

「係数ドメインを多項式環とする多項式環上の簡約グレブナ基底について」

京都大学数理解析研究所講究録 “Computer Algebra – Design of Algorithms, Implementations and Applications” To be published

H.Anai, S.Orii, K.Horimoto

Symbolic-numeric estimation of parameters in biochemical models by quantifier elimination,

To appear in Journal of Bioinformatics and Computational Biology (JBCB) (Vol.4, No.5)

Vol.4, pp.1097-1117 (2006)

H. Anai & S. Hara,

A parameter space approach to fixed-order robust controller synthesis by quantifier elimination

International Journal of Control (Vol.79, No.11),pp1321-1330, November 2006.

Hirokazu Anai & Shinji Hara

A bridge between robust control and computational algebra

KNOW PROCEEDINGS CONSTRUCTIVE ALGEBRA AND SYSTEMS THEORY(CAST )

Proceedings of the KNOW Colloquium on Constructive Algebra and Systems Theory (CAST).

pp23-33,

M.Kanno, H.Anai, K.Yokoyama

On the Relationship between the Sum of Roots with Positive Real Parts

and Polynomial Spectral Factorization

Sixth International Conference on Numerical Methods and Applications – NM&A’06

August 20 – 24, 2006, Borovets, Bulgaria

M.Kanno & H.Anai

$H^\infty$  model reduction using quantifier elimination

17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS06)

Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, July 24-28, 2006, pp268-273.

H.Yoshida, K.Horimoto and H.Anai

On Rigorous Conditions for Cell-type Diversity by Algebraic Approach

International Conference on Mathematical Aspects of Computer and Information Sciences

(MACIS) 2006, pp3-14.

H. Yanami and H. Anai

“Development of SyNRAC---real quantifier elimination based on cylindrical algebraic decomposition and visualization---,” International Conference on Computational Science 2006 (ICCS2006). LNCS 3992, pp.462-469.

G.Renault and K.Yokoyama,

A modular method for computing the splitting field of a polynomial,

Algorithmic Number Theory, Proceedings of ANTS-VII,

Lecture Notes in Computer Science Vol. 4076, Springer, pp. 124-140, 2006.

K.Yokoyama,  
Stability of parametric decomposition,  
Mathematical Software, Proceedings of ICMS 2006,  
Lecture Notes in Computer Science Vol. 4151, Springer, pp. 391-402, 2006

M.Fujimoto, M.Suzuki and K.Yokoyama,  
On polynomial curves in the affine plane,  
Osaka Journal of Mathematics, Vol.43, 597-608.

Noro, M.:  
An Efficient Implementation for Computing Groebner Bases over Algebraic  
Number Fields, in Proceedings of ICMS 2006, LNCS 4151, Springer (2006), 99-109.

Noro, M.:  
Modular Dynamic Evaluation, in Proceedings of ISSAC 2006, ICM Press (2006), 262-268.

穴井宏和, 原辰次  
「数式処理を用いた多項式のロバスト根配置とその制御系設計への応用」  
シミュレーション学会誌論文. 論文誌 第25巻,第3号  
特集号「ロバスト計算と精度保証」pp28-35, 9月, 2006.

穴井宏和, 原辰次  
「限定記号消去法に基づくロバスト制御系設計ツール」  
シミュレーション学会論文誌 第25巻,第1号, pp53-61, 3月, 2006.

管野 政明:  
「精度保証付き計算を用いた制御系解析・設計」,  
計測と制御, 45(5), 455-462, 2006

管野 政明:  
「SISO  $H_\infty$  ループ整形問題の準最適制御器の精度保証付き計算」  
シミュレーション学会論文誌, 25(3), 185-193, 2006

Hirokazu Anai  
Algebraic Methods for Solving Real Polynomial Constraints and Their Applications in Biology  
Algebraic Biology 2005 (AB2005),Tokyo, Japan. 2006/11/28-31, pp 139-147

S.Orii, K.Horimoto, H.Anai  
A New Approach for Symbolic-Numeric Optimization in Biological Kinetic Models  
Algebraic Biology 2005 (AB2005),Tokyo, Japan. 2006/11/28-31, pp 85-95

H.Yoshida, H.Anai,S.Orii,K.Horimoto  
Inquiry into Conditions for Cell-type Diversity of Multicellular Organisms by Quantifier  
Elimination  
Algebraic Biology 2005 (AB2005),Tokyo, Japan. 2006/11/28-31, pp 105-113

S.Orii, H.Anai, K. Horimoto

Symbolic-Numeric Optimization by Quantifier Eliminator: An Application to Biological Kinetic Models

Proceedings of WMSCI2005, (Orlando, Florida, USA)

H.Anai, S.Hara, K.Yokoyama

Sum of roots with positive real parts

Proceedings of the International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation 2005, pp.21-28, 2005.

H.Anai, K.Yokoyama

Cylindrical algebraic decomposition via numerical computation with validated symbolic reconstruction

Algorithmic Algebra and Logic, Proceedings of the A3L 2005, pp.25-30, 2005.

Hitoshi Yanami, Hirokazu Anai,

SyNRAC: A Maple Toolbox for Solving Real Algebraic Constraints

Algorithmic Algebra and Logic 2005 -- Conference in Honor of the 60th Birthday of Volker Weispfenning-- (Passau, Germany), 2005/04/03-06, pp275-279

G.Renault, K.Yokoyama

A modular method for computing the splitting field of a polynomial

The 7th Algorithmic Number Theory Symposium,

to appear in the Proceedings of ANTS VII (springer)

M.Fujimoto, M.Suzuki, K.Yokoyama

On polynomial curves in the affine plane

to appear in Osaka Journal of Mathematics

Masayuki Noro:

Modular Dynamic Evaluation.

Accepted to International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation 2006.

Yasuhito Kawano, Kinji Kimura, Hiroshi Sekigawa, Kiyoshi Shirayanagi, Masahiro Noro, Masahiro Kitagawa and Masanao Ozawa:

“Existence of the exact CNOT on a quantum computer with the exchange interaction” Quantum Information Processing, Vol. 4, No. 2, June 2005.

木村欣司, 野呂正行, 辻本諭, 中村佳正,

「離散戸田方程式を用いた大規模疎行列の連立一次方程式, 行列式, 固有多項式の計算法」  
応用数学会論文誌, pp307-322, Vol.15, No.3, 2005

郷田雅美, 岩雅史, 木村欣司, 中村佳正:

「高精度特異値計算ルーチンの開発とその性能評価」

情報処理学会論文誌 コンピューティングシステム, Vol.46, No.SIG12(ACS11), pp299-311  
2005年8月

Masami Takata, Iwasaki Masashi, Kinji Kimura, Yoshimasa Nakamura:

An Evaluation of Singular Value Computation by the Discrete Lotka-Volterra System

In Proceedings of International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques

and Applications, June 2005, Vol. II, pp.410-416

郷田雅美, 岩雅史, 木村欣司, 中村佳正:  
「高速特異値分解のためのライブラリ開発」  
情報処理学会論文誌 コンピューティングシステム, 採録決定

Masami Takata, Iwasaki Masashi, Kinji Kimura, Yoshimasa Nakamura:  
Performance of A New Singular Value Decomposition Scheme for Large Scale Matrices  
The IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Networks,  
2005.

木村欣司, 宮島信也, 荻田武史:  
「計算機代数と精度保証付き数値計算による大域領域における非線形連立代数方程式の全実根の探索法」, 日本シミュレーション学会, 投稿中

Tsuyoshi Kiyama, Shinji Hara, Tetsuya Iwasaki  
Effectiveness and limitation of circle criterion for LTI robust control systems with control input nonlinearities of sector type  
International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol.15 2005

Shinji Hara, Tetsuya Iwasaki, Daisuke Shiokata  
Robust PID Using Generalized KYP Synthesis: Direct open-loop shaping in multiple frequency ranges  
Control System Magazine, vol.26, no.1 2005

Tetsuya Iwasaki, Shinji Hara  
Generalized KYP Lemma: Unified Frequency domain Inequalities with Design Applications  
IEEE Transactions on Automatic Control vol.50, no.1 2005

M. Kanno and M. C. Smith,  
Validated Numerical Computation of the  $L^\infty$ -norm for Linear Dynamical Systems  
Journal of Symbolic Computation

木山健, 坂元拓海, 原辰次  
「拡張された線形化法に基づく一般的ロバスト制御系設計」  
シミュレーション vol.24, no.2 2005

塩形大輔, 原辰次  
「一般化 KYP 補題に基づく制御系設計ツール」  
シミュレーション vol.25, no.1 2005

管野政明,  
「精度保証付き制御系解析・設計」  
京都大学数理解析研究所講究録

W. M. Haddad, T. Hayakawa, S. G. Nersesov, and V. Chellaboina,  
Hybrid adaptive control for nonlinear impulsive dynamical systems,”  
Int. J. Adapt. Control Signal Process., vol. 19, no. 6, pp. 445-469, 2005.

W. M. Haddad, T. Hayakawa, and J. M. Bailey,  
Adaptive control for nonlinear nonnegative dynamical systems with applications to clinical pharmacology.  
Contr. Lett., vol. 55, pp. 62-70, 2006.

W. M. Haddad, Q. Hui, V. Chellaboina, T. Hayakawa, "Adaptive control of mammillary drug delivery systems with actuator amplitude constraints and system time delays,"  
Eur. J. Contr., to appear.

W. M. Haddad, T. Hayakawa, and M. C. Stasko,  
Direct adaptive control for nonlinear matrix second-order systems with time-varying and sign-indefinite damping and stiffness operators,  
Asian J. Contr., to appear.

Hirokazu Anai, Kazuhiro Yokoyama  
Numerical Cylindrical Algebraic Decomposition with Certificated Reconstruction  
SCAN2004 (Fukuoka, Japan) 2004/10/4-8, p31

Hirokazu Anai, Hitoshi Yanami, Kei Sakabe, Shinji Hara  
Fixed-structure robust controller synthesis based on symbolic-numeric computation: design algorithms with a CACSD toolbox (Invited paper)  
CCA/ISIS/CACSD 2004 (Taipei, Taiwan), 2004/09/2-4, 1540-1545

Kei Sakabe, Hitoshi Yanami, Hirokazu Anai, Shinji Hara  
A MATLAB toolbox for robust control synthesis by symbolic computation  
SICE2004 (Sapporo, Japan) 2004/08/4-6, pp1968-1973

Hitoshi Yanami, Hirokazu Anai  
Development of SyNRAC --Formula description and new functions --  
CASA2004 (Krakow, Poland), 2004/06/7-9)  
LNCS 3039, pp286-294(Springer-Verlag)

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  
数理解析研究所講究録 1395 「Computer Algebra -- Algorithms, Implementations and Applications」 pp 231-237, 2003

屋並仁史, 穴井宏和  
SyNRAC: A Maple package for solving real algebraic constraints  
数理解析研究所講究録 1395 「Computer Algebra -- Algorithms, Implementations and Applications」 pp 238-244, 2003

野呂正行,  
Dynamic Evaluation の実装について,  
数式処理, Vol.11, No.3,4, p21-28(2005).

野呂正行,  
代数体上のイデアルのグレブナー基底計算について,

研究集会「CA-ALIAS'05」, 京都大学数理解析研究所(2005).

M. Noro and K. Yokoyama,  
Implementation of prime decomposition of polynomial ideals  
over small finite fields,  
Journal of Symbolic Computation, Vol. 38,1227-1246, 2004.

K.Yokoyama,  
On systems of algebraic equations with parametric  
exponents, ISSAC 2004, full paper in Proceedings of the 2004 International Symposium on  
Symbolic and Algebraic Computation, ACM Press, pp.312-319, 2004.

C. Dong, C. H. Lam, K. Tanabe, H. Yamada, and K. Yokoyama,  
\$Z\_3\$ symmetry and \$W\_3\$ algebra in lattice vertex operator algebras,  
Pacific Journal of Mathematics Vol. 215, 245-296,2004.

T. Iwasaki, S.Hara,  
"Generalized KYP Lemma: Unified Frequency Domain Inequalities With Design Applications,"  
IEEE Transactions on Automatic Control, 50[1] 41- 59 (2005)

高松吉郎, 原 辰次, 室田一雄, "連続/離散ハイブリッド凸最適化とその最適性規準,"  
システム制御情報学会論文誌, 17[9] (2004)

T. Iwasaki, S. Hara, F. Alexander L.,  
"Restricted Frequency Inequality is Equivalent to Restricted Dissipativity,"  
IEEE CDC2004, 426-431 (2004)

H. Fujioka, S. Hara, Y. Yamamoto,  
"Sampled-Date Control Toolbox: Object-Oriented Software for Sampled-Date Feedback  
Control Systems," CCA2004, 19-24 (2004)

S. Hara, D. Shiokata, T. Iwasaki,  
"Fixed Order Controller Design Via Generalized KYP Lemma(1)," CCA2004, 1527-1532 (2004)

D. Shiokata, S. Hara, T. Iwasaki,  
"From Nyquist/bode to GKYP design --- Design algorithms with CACSD tools,"  
SICE2004, 1780-1785 (2004)

T. Bakhtiar, S. Hara, "Tracking performance limits for SIMO discrete-time feedback control  
systems,"  
SICE2004, 1825-1830 (2004)

S. Hara, T. Iwasaki,  
"Dynamical system design via generalized KYP lemma," MTNS2004 (2004)

T. Iwasaki, S. Hara,  
"Robust Control Synthesis with General Frequency Domain Specifications:  
Static Gain Feedback Case," ACC2004, 4613-4618 (2004)

Satoru IWATA, Satoko MORIGUCHI, Kazuo MUROTA,  
“A Capacity Scaling Algorithm for M-Convex Submodular Flow,”  
IPCO (Integer Programming and Combinatorial Optimization) X,  
Columbia University, New York City, USA, 2004 年 6 月

岩田 覚, 森口 聡子, 室田 一雄,  
「M凸劣モジュラ流に対する容量スケールリング法」  
統計数理研究所共同研究レポート 178, 最適化: モデリングとアルゴリズム 18  
(2005), 52--68

S. Moriguchi and K. Murota,  
Discrete Hessian Matrix for L-convex Functions,  
Mathematical Engineering Technical Reports METR 2004-30,  
University of Tokyo (2004)

T. Hayakawa, W. M. Haddad, N. Hovakimyan, and J. M. Bailey,  
Neural network adaptive dynamic output feedback control for nonlinear  
nonnegative systems using tapped delay memory units,  
in Proc. Amer. Contr. Conf., (Boston, MA), pp. 4505-4510, July 2004.

(2)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

①招待講演 (国内会議16件、国際会議18件)

Shinji Hara,  
Plant/controller design integration,  
Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP) 2008, Alberta, Canada, May, 2008

原 辰次,  
パラメトリック・ロバスト制御系設計,  
第 4 回 九州大学産業技術数理研究センター ワークショップ  
モデルベース統合化システム設計を支える数理: 数値・数式ハイブリッド計算・最適化の新展開,  
九州大学 情報基盤研究開発センター, September, 2008

管野 政明,  
スペクトル分解の代数的解法とその制御系設計への応用,  
第 4 回 九州大学産業技術数理研究センター ワークショップ  
モデルベース統合化システム設計を支える数理: 数値・数式ハイブリッド計算・最適化の新展開,  
九州大学 情報基盤研究開発センター, September, 2008

穴井宏和  
数値・数式ハイブリッド最適化とその応用  
第 4 回 九州大学産業技術数理研究センター ワークショップ  
モデルベース統合化システム設計を支える数理: 数値・数式ハイブリッド計算・最適化の新展開,  
九州大学 情報基盤研究開発センター, September, 2008

横山和弘  
パラメーターで記述されたイデアルの構造—comprehensive Grobner systems と parametric 分解—  
第 4 回 九州大学産業技術数理研究センター ワークショップ  
モデルベース統合化システム設計を支える数理: 数値・数式ハイブリッド計算・最適化の新展開,  
九州大学 情報基盤研究開発センター, September, 2008

穴井宏和  
産業技術のための数式処理 - 実代数幾何に基づくパラメトリック設計 -  
Maple 12 バージョンアップセミナー, 2008.7

Horimoto, K.: Network Inference and Evaluation Based on Graphical Model. Seminar on Computational Systems Biology, Shanghai University, Aug. 13, 2008

M. Kanno and S. Hara,  
Sum of Roots Characterization for Parametric State Feedback  $H^\infty$  Control,  
The 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control,  
Seoul, Korea, July, 2008

Shinji Hara: Tutorial Seminar: "Multi-objective Robust Synthesis based on Generalized KYP Lemma," SICE Annual Conference 2007 (2007)

Y. Kazuhiro

Primary decomposition and related topics I, II,  
Summer School on SINGULAR and Application,  
University of Kaiserslautern, Kaiserslautern, June 4-6, 2007.

Y. Kazuhiro

The stability of parametric ideals and parametric decomposition,  
Conference on the Development of Dynamic Mathematics with High  
Functionality(DMHF 2007), Fukuoka, October 1-4, 2007.

Horimoto, K., Consistency of causal graph with measured data. International Conference on  
Multiple Decision Theory, Statistical Inference and Applications, Taiwan Science Academy  
(Taipei), Dec. 28.

Horimoto, K., Dynamical analysis of biological networks by using reporter gene expressions in  
transfected cell microarray. DMHF2007, Kyushu University (Fukuoka), Oct. 1.

Horimoto, K., Design of Analysis Tools for Network Inference and Evaluation. Systems Biology  
Workshop, 英国大使館(東京), 7月11日

堀本勝久,代数生物学—記号計算による生命現象解析, Innovative Mathematical Approaches  
for Systems Biology: System Identification, Analysis, Control and Design, 九州大学産業技術数  
理研究センター(福岡), 9月5日

堀本勝久, 創薬・副作用予測にむけた生命分子ネットワーク解析法の開発, 日本バイオインフ  
ォマティクス学会合同研究会, 東京大学医科学研究所(東京), 5月29日

穴井宏和, 管野政明:

代数的手法を用いた制御系解析・設計手法,  
産業技術数理コンソーシアム 第 0 回フォーラム マス・フォア・インダストリ,  
第一ホテル東京シーフォート, March, 2008

永田育真, 管野政明, 原辰次:

基底の構造を利用した連続時間スペクトル分解イデアルの基底変換,  
第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI'08), 京都, May, 2008

管野政明, 原辰次, 穴井宏和, 横山和弘:

SoR の特徴づけに基づくパラメータ最適化設計,  
第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI'08), 京都, May, 2008

Hirokazu Anai

Symbolic simulation and reachability study of Hybrid systems via first-order logic"  
SICE SSI2007オーガナイズドセッション「ハイブリッド/リアルタイムシステムの検証と制御の  
ための計算手法」, 2007-11-28

穴井宏和

計算機代数を活用したシミュレーション技術とその展開 ～ものづくり支援から生体系解析まで  
～

第 55 回 人工知能セミナー「数理工学の最前線に学ぶ」, 2007-07-20

穴井宏和  
ものづくりと計算技術-数式処理による最適設計-  
九大産業技術数理研究センターキックオフミーティング, 2007-05-15

Hirokazu Anai  
Symbolic Optimization --- Quantifier elimination and related techniques  
マサチューセッツ工科大学 (MIT) 大学院コース  
「Algebraic techniques and semidefinite optimization」特別講義 2006-05-16

Hirokazu Anai  
Computational Polynomial Algebra in System and Control Theory (Invited Talk)  
International Conference on Mathematical Aspects of Computer and Information Sciences  
(MACIS) 2006

K.Yokoyama  
Stability of Parametric Ideals and Parametric Decomposition  
KIAS-RIMS Joint Workshop on Computer Algebra  
July 27-29, KIAS, Seoul, Korea, 2006

Hirokazu Anai  
"Groebner bases in control theory"  
KIAS-RIMS joint workshop on Computer Algebra  
--Efficient Computation of Grobner Bases and Mathematical Algorithms Based on It--  
Co-organized by Hyungju Park (KIAS) and Kazuhiro Yokoyama (Rikkyo Univ.)  
July 31 -- August 4, 2006

K.Yokoyama  
Global KMS Day Commemoating the 60th Anniversary of the Korean  
Mathematical Society, Oct 27-29, Seoul National University, Seoul, Korea

Shinji Hara: When is a linear system easy or difficult to control in practice? (Semi-plenary  
Lecture); 17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (July,  
2006)

Shinji Hara: Dynamical System Design from Control Perspective  
(Invited Talk); SICE-ICASE International Joint Conference  
(October, 2006)

M. Kanno, H. Anai, K. Yokoyama  
On the Relationship between the Sum of Roots with Positive Real Part  
and Polynomial Spectral Factorization (key lecture) (invited),  
Sixth International Conference on Numerical Methods and Applications  
(NM&A'06), Borovets, Bulgaria, August, 2006

穴井宏和  
数式処理によりパラメトリック最適化とその実応用  
Maple Conference 2005, 2005.10.21 カナダ大使館

Hirokazu Anai

Algebraic Methods for Solving Real Polynomial Constraints and Their Applications in Biology  
Algebraic Biology 2005 (AB2005), Tokyo, Japan. 2006/11/28-31

穴井宏和

数値/数式ハイブリット計算によるロバスト最適化

Maple Conference 2004 (青山ダイヤモンドホール) 基調講演 2004/09/29

穴井宏和

値/数式ハイブリッド最適化に基づくロバスト制御系設計

ontrol Design Automation Seminar 2004 (大手町サンケイホール) 招待講演 2004/07/14

②口頭発表 (国内会議57件、国際会議56件)

M. Kanno and S. Hara,

Sum of roots characterization for parametric state feedback  $H^\infty$  Control,

The 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, 1342-1347,  
Seoul, Korea, July, 2008

M. Kanno, K. Yokoyama, H. Anai, and S. Hara,

Symbolic optimization of algebraic functions, International Symposium on Symbolic and Algebraic  
Computation 2008, 147-154, Hagenberg, Austria, July, 2008

M. Kanno,

Sum of roots: a review,

Applications of Computer Algebra 2008, Hagenberg, Austria, July, 2008

H. Yanami

SyNRAC: a Maple Toolbox for Solving Real Algebraic Constraints

Applications of Computer Algebra 2008, Hagenberg, Austria, July, 2008

H. Iwane

Symbolic-Numeric Cylindrical Algebraic Decomposition in SyNRAC

Applications of Computer Algebra 2008, Hagenberg, Austria, July, 2008

N. Shinohara

Parametric Polynomial Spectral Factorization by Comprehensive Groebner System

Applications of Computer Algebra 2008, Hagenberg, Austria, July, 2008

H. Tanaka, M. Kanno, and K. Tsumura,

Characterization of discrete-time  $H_2$  control performance limitation based on poles and zeros,  
47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico, December, 2008, accepted

屋並仁史

QEの多目的最適化へ応用

京都大学数理解析研究所 RIMS 研究集会「数式処理と教育」, 2008.8

兵頭礼子, 穴井宏和

MATLAB で作成した QE ツールの応用

京都大学数理解析研究所 RIMS 研究集会「数式処理と教育」, 2008.8

永田 育真, 管野 政明, 原 辰次,  
基底の構造を利用した連続時間スペクトル分解イデアルの基底変換,  
第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'08) 講演論文集, 457-458, 京都, May, 2008

管野 政明, 原 辰次, 穴井 宏和, 横山 和弘,  
SoR の特徴づけに基づくパラメータ最適化設計, 第 52 回システム制御情報学会研究発表  
講演会 (SCI'08) 講演論文集, 525-526, 京都, May, 2008

管野 政明, 横山 和弘, 原 辰次, 穴井 宏和,  
問題の構造的特徴を利用した離散時間多項式スペクトル分解の代数的解法,  
第 37 回制御理論シンポジウム資料, 17-20, 霧島, September, 2008

吉村秀太, 瓜生芳久, 壹岐浩幸), 穴井宏和, 兵頭礼子  
QEに基づく発電機の励磁制御系設計  
第17回 日本数式処理学会大会, 城西大学, 6-8, 6月, 2008  
屋並仁史, 穴井宏和, 岩根秀直  
多目的最適化への代数的アプローチ  
第17回 日本数式処理学会大会, 城西大学, 6-8, 6月, 2008

岩根秀直, 穴井宏和, 屋並仁史  
数値数式 CAD の実装  
第17回 日本数式処理学会大会, 城西大学, 6-8, 6月, 2008

Shinji Hara, Tae-Hyoung Kim, and Yutaka Hori,  
Distributed formation control for target-enclosing operations based on a cyclic pursuit strategy,  
The 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, 6602-6607,  
Seoul, Korea, July, 2008

Yoshida, H., An Algebraic-Numeric Algorithm for the Model Selection in Kinetic Networks.  
International Conference of Computer Application of Symbolic Computation, 10th CASC, Bonn,  
Sep. 16.

Yoshida, H, Exact parameter determination for Parkinson's disease diagnosis with PET using an  
algebraic approach. International Conference on Algebraic Biology, Algebraic Biology 2007, Linz,  
July 4.

M. Kanno, S. Hara, and M. Onishi,  
Characterization of Easily Controllable Plants Based on the Finite Frequency Phase/Gain  
Property: A Magic Number  $(4+2\sqrt{2})/2$  in  $H^\infty$  Loop Shaping Design,  
2007 American Control Conference, New York City, USA, July, 2007  
(Best Paper in the Session)

M. Kanno, K. Yokoyama, H. Anai, and S. Hara,  
Parametric Optimization in Control Using the Sum of Roots for Parametric Polynomial Spectral  
Factorization,  
International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation (ISSAC) 2007,

Waterloo, Ontario, Canada, July–August, 2007

Masaaki Kanno,

Using Computer Algebra for Control Design Problems,  
DMHF 2007: COE Conference on the Development of Dynamic Mathematics with High  
Functionality, Fukuoka, Japan, October, 2007

M. Kanno, S. Gandy, H. Anai, and K. Yokoyama,

Optimizing the Maximal Real Root of a Polynomial by a Special Cylindrical Algebraic  
Decomposition,

Mathematical Aspects of Computer and Information Sciences (MACIS) 2007,  
Paris, France, December, 2007

M. Kanno, S. Hara, H. Anai, and K. Yokoyama,

Sum of Roots, Polynomial Spectral Factorization, and Control Performance Limitations,  
46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, LA, USA, December, 2007

H. Yanami

An environment for manipulating first-order formulas over the reals

The Fifth Asian Workshop on Foundations of Software, Xiamen, China, June 3, 2007

Shinji Hara, Tae-Hyoung Kim and Yutaka Hori,

Cyclic pursuit based distributed cooperative control for target-enclosing operations,

第 36 回 制御理論シンポジウム, 札幌, 2007 年 9 月 5 日-7 日, pp. 13-18.

丸田一郎, 金泰亨, 杉江俊治,

新たな制約つき Particle Swarm Optimization の提案とその固定構造補償器設計への応用,

第 36 回 制御理論シンポジウム, 札幌, 2007 年 9 月 5 日-7 日, pp. 255-260.

Tae-Hyoung Kim and Shinji Hara,

Pursuit formation stabilization for multi-agent dynamical systems,

第8回 制御部門大会, 京都, 2008 年 3 月 5 日-7 日.

櫻井慶一, 津村幸治, 金泰亨,

マルチエージェントシステムにおける協調捕獲可能条件,

第8回 制御部門大会, 京都, 2008 年 3 月 5 日-7 日.

管野政明, 穴井宏和, 横山和弘, 原辰次

根の和を用いたパラメータ付きスペクトル分解とその H2 最適制御への応用,

第 7 回計測自動制御学会制御部門大会 (SICE-CCS07)

管野政明, 穴井宏和, 横山和弘:

最適化問題を効率的に解くための special CAD,

第 16 回 日本数式処理学会大会 (JSSAC2007), 倉敷, June, 2007

吉田寛, 穴井宏和, 堀本勝久

薬物動態解析における代数的手法の適用

第 16 回 日本数式処理学会大会 (JSSAC2007), 倉敷, June, 2007

管野政明, 原辰次:

Sum of Roots による H2 制御性能限界の表現

第 36 回制御理論シンポジウム, 335-338, 札幌, September, 2007

管野政明, 穴井宏和, 横山和弘:

離散時間系多項式スペクトル分解の解法

京都大学数理解析研究所研究集会, Computer Algebra -- Design of Algorithms, Implementations and Applications 2007, 京都, November, 2007

田中英明, 管野政明, 津村幸治:

離散時間 H2 制御性能限界の極・零点に基づく表現,

第 8 回 計測自動制御学会制御部門大会 (CCS2008), 京都, March, 2008

吉村秀太, 壹岐浩幸, 瓜生芳久, 穴井宏和, 兵頭礼子

発電機励磁制御方式を対象としたパラメータ空間法による設計

平成 20 年電気学会全国大会, 2008.03.21

Shortcuts in Groebner basis computation and their validations,

RIMS 共同研究 グレブナー基底の効率的計算とそれを基盤とする数学アルゴリズム,  
京大, 2006.7.31-8.4.

M.Noro

An Efficient Implementation for Computing Groebner Bases over Algebraic  
Number Fields, ICMS2006, Castro-Urdiales, Spain, 2006.9.1-9.3.

原辰次, 管野政明, Toni Bakhtiar:

H2 最適追従性能とその精度保証付き計算: SIMO ケース,

第 6 回 計測自動制御学会制御部門大会 (CCS2006),

名古屋, May-June, 2006

大西政彦, 管野政明, 原辰次

$H_\infty$  ループ整形設計法を用いた制御しやすさの特徴づけ,

第 6 回 計測自動制御学会制御部門大会 (CCS2006),

名古屋, May-June, 2006

管野政明, 穴井宏和, 横山和弘

正実部をもつ根の和と多項式スペクトラル分解,

第 6 回 計測自動制御学会制御部門大会 (CCS2006),

名古屋, May-June, 2006

管野政明, 原辰次, 高原詩朗:

位相特性に着目した制御しやすさの特徴づけ: 離散時間系の場合,

第 35 回制御理論シンポジウム,

大阪, September, 2006

木村欣司, 管野政明, 穴井宏和, 横山和弘,

多項式スペクトラル分解に付随するグレブナー基底の change of ordering について,

日本数式処理学会, 東京理科大学, 2006 年 6 月 6 日.

Yasuhito Kawano, Kinji Kimura, Hiroshi Sekigawa,  
Existence of the exact CNOT on a quantum computer with the exchange interaction,  
京都大学数理解析研究所, 2006 年 8 月 4 日.

H.Yoshida, K.Horimoto and H.Anai  
On Rigorous Conditions for Cell-type Diversity by Algebraic Approach  
International Conference on Mathematical Aspects of Computer and Information Sciences  
(MACIS) 2006

H. Anai  
Sum of roots with positive real part in system and control theory  
Workshop D3: Groebner Bases in Control Theory and Signal Processing  
RISC-Linz, Austria

H.Yanami and H.Anai  
SyNRAC: A Maple toolbox for solving real algebraic constraints  
The 2nd international congress of mathematical software (ICMS2006),  
Castro Urdiales, SPAIN, September 1-3 2006

K.Yokoyama  
Stability of Parametric Decomposition  
ICMS2006 Castro Urdiales  
September 1-3, Castro Urdiales, Spain

H. Yanami and H. Anai  
"Development of SyNRAC---real quantifier elimination based on cylindrical algebraic  
decomposition and  
visualization---,"  
International Conference on Computational Science 2006 (ICCS2006)

M. Kanno and H. Ana,  
 $H^\infty$  Model Reduction Using Quantifier Elimination,  
17th International Symposium on Mathematical Theory of  
Networks and Systems (MTNS) 2006,  
Kyoto, July, 2006

M. Kanno,  
On the Effect of Plant Uncertainty on the  $H_2$  Tracking Performance,  
17th International Symposium on Mathematical Theory of  
Networks and Systems (MTNS) 2006,  
Kyoto, July, 2006

Kinji Kimura and Masayuki Noro,  
Automatic weight generator for the Buchberger algorithm,  
International Conference on Mathematical Aspects of Computer and Information Sciences  
(MACIS2006),  
Beihang University, Beijing, China, 2006 年 7 月 24 日.

吉田 寛, 穴井 宏和, 折居 茂夫, 堀本 勝久  
限定子消去法 (QE) を用いた, 多細胞多様性条件式の導出  
Risa/Asir Conference 2006  
神戸大学 瀧川記念学術交流会館期間: 2006.3.

A MATLAB toolbox for parametric robust control based on symbolic-numeric  
computation  
Myonhoon Hong, H.Anai  
ASCM(Asian Symposium on Computer Mathematics)  
12/8-12/10, Soeul, KOREA, 2006

木村欣司, 宮島信也, 荻田武史:  
"精度保証付き数値計算をつかった super fast real root counting"  
日本数式処理学会第 14 回大会, 広島, 2006

高田雅美, 岩崎雅史, 木村欣司, 中村佳正:  
"2 重対角行列のための高速特異値分解の開発"  
情報処理学会 HPC シンポジウム, (2006.1)

N.Hyodo, M.Hoon, H.Yanami, H.Anai, S.Hara  
Solving and visualizing parametric quantified constraints in control system design  
Computer Algebra--Design of Algorithms, Implementations and Applications  
(CA-ALIAS 2005) 数理解析研究所, Kyoto, Japan, December 19-22, 2005

吉田 寛, 穴井 宏和, 折居 茂夫, 堀本 勝久  
多細胞生物における細胞タイプ多様性条件の限定子消去法による導出  
Computer Algebra--Design of Algorithms, Implementations and Applications  
(CA-ALIAS 2005) 数理解析研究所, Kyoto, Japan, December 19-22, 2005

S.Orii, K.Horimoto, H.Anai  
Symbolic-Numeric Optimization for estimation of parameters in biological kinetic model  
Computer Algebra--Design of Algorithms, Implementations and Applications  
(CA-ALIAS 2005) 数理解析研究所, Kyoto, Japan, December 19-22, 2005

吉田 寛, 穴井 宏和, 折居 茂夫, 堀本 勝久  
限定子消去法 (QE) を用いた, 多細胞多様性条件式の導出  
Risa/Asir Conference 2006  
神戸大学 瀧川記念学術交流会館期間: 2006.3.

Myonhoon Hong, H.Anai  
A MATLAB toolbox for parametric robust control based on symbolic-numeric computation  
ASCM(Asian Symposium on Computer Mathematics) 12/8-12/10, Soeul, KOREA, 2006

Hirokazu Anai  
Solving and validating optimization problems by symbolic-numeric cylindrical algebraic  
computation  
SCHLOSS DAGSTUHL, INTERNATIONAL CONFERENCE AND RESEARCH CENTER FOR  
COMPUTER SCIENCE, Dagstuhl Seminar 05391: "Algebraic and Numerical Algorithms and  
Computer-assisted , Proofs" 25.09. - 30.09.2005

S.Orii, K.Horimoto, H.Anai

A New Approach for Symbolic-Numeric Optimization in Biological Kinetic Models  
Algebraic Biology 2005 (AB2005), Tokyo, Japan. 2006/11/28-31

H.Yoshida, H.Anai.S.Orii,K.Horimoto

Inquiry into Conditions for Cell-type Diversity of Multicellular Organisms by Quantifier Elimination  
Algebraic Biology 2005 (AB2005), Tokyo, Japan. 2006/11/28-31

Hirokazu Anai

Verification and Design of Discrete Event Systems/Hybrid Systems by Algebraic Methods,  
SICE 2006, SessionTitle: Discrete Event Systems Approach for Safety and Security  
August 8-10, 2005, Okayama University, Okayama, JAPAN

H. Yanami and H. Anai

SyNRAC: A Maple Toolbox for Solving Real Algebraic Constraints  
Algorithmic Algebra and Logic 2005 (A3L 2005)  
The University of Passau, Passau, Germany, April 3-6, 2005

H. Yanami and H. Anai

Development of SyNRAC  
International Conference on Computational Science (ICCS 2005) Emory University, Atlanta,  
USA  
May 22-25, 2005

H. Yanami

Growth of Formulas During Quantifier Elimination by Virtual Substitution  
Conference on Applications of Computer Algebra (ACA 2005), 奈良女子大学, Nara, Japan  
August 1-3, 2005

S.Orii, H.Anai, K. Horimoto

Symbolic-Numeric Optimization for Biochemical Models by Quantifier Elimination  
Conference on Applications of Computer Algebra (ACA 2005) 奈良女子大学, Nara, Japan  
August 1-3, 2005

H. Yanami and H. Anai

Development of SyNRAC  
Computer Algebra--Design of Algorithms, Implementations and Applications (CA-ALIAS  
2005) 数理解析研究所, Kyoto, Japan, December 19-22, 2005

K.Yokoyama

Attempt for efficient combination of numerical computation and symbolic computation  
in Algebraic and Numerical Algorithms and Computer-associated Proofs.  
Dagstuhl Seminar 05391, Dagstuhl, Germany, 2005.9.25-9.30.

K.Yokoyama

On systems of algebraic equations with parametric exponents  
in Conference on Applications of Computer Algebra (ACA2005), Nara, Japan, 2005.7.31-8.3.

K.Yokoyama

Overview on computer algebra and parametric polynomial systems  
in Seventh Asian Symposium on Computer Mathematics (ASCM2005), Seoul, Korean,  
2005.12.8-10.

K.Yokoyama

Primary decomposition and related topics II  
Workshop A; Groebner bases Theory and Applications in Algebraic Geometry  
(Special Semester on Groebner Bases and Related Methods 2006),  
Linz, Austria, 2006.2.6-2.17.

高田雅美, 岩崎雅史, 木村欣司, 中村佳正:

“いくつかの CPU の推奨コンパイラにおける特異値計算ルーチンの実行時間の測定”  
情報処理学会 SACSIS シンポジウム, Vol.2005, No.5, pp212-213 (2005, 5)

木村欣司, 宮島信也, 荻田武史:

“精度保証付き数値計算をつかった super fast real root counting”  
日本数式処理学会第 14 回大会, 広島, 2006

木村欣司

“固有値, 特異値計算法の性能比較の方法”  
京都大学数理解析研究所短期共同研究  
「Computer Algebra 研究の新たな発展」,2004

木村欣司:

“数式処理における Krylov 部分空間法の利用について”,  
2005 年日本応用数理学会年会

木村欣司:

“固有値/特異値計算ライブラリの性能評価のための数式処理のアルゴリズム”  
RIMS 研究集会  
「計算科学の基盤技術とその発展」,2005

木村欣司:

“多項式行列の行列式の補間による計算 II”  
RIMS 研究集会  
「Computer Algebra-Design of Algorithms, Implementations and Applications」, 2005

高田雅美, 岩崎雅史, 木村欣司, 中村佳正:

“2 重対角行列のための高速特異値分解の開発”  
情報処理学会 HPC シンポジウム, (2006.1)

木村欣司:

“Challenge to solve simultaneous nonlinear algebraic equations ¥¥  
in the history of Japanese mathematics”,  
RIMS 研究集会,  
「数学史とアルゴリズム」, 2005

木村欣司,宮島信也,荻田武史:  
精度保証付き数値計算をつかった super fast real root counting(II),  
Risa/Asir Conference 2006, 神戸大学

Keitaro Ohno, Shinji Hara  
「Nonuniform Multi-Rate Sampled-Data  $H^\infty$  Following Control of HDDs」  
2005 American Control Conference  
Portland, Oregon, U.S.A 2005/6/8-2005/6/10

Tatsuya Kai, Hidenori Kimura, Shinji Hara  
「Nonlinear Control Analysis on Kinematically Asymmetrically Affine Control Systems with  
Nonholonomic Affine Constraints」  
IFAC 2005 16th WORLD CONGRESS  
Prague, Czech Republic 2005/7/4-2005/7/8

Tetsuya Iwasaki, Shinji Hara  
「Dynamic Output Feedback Synthesis with General Frequency Domain Specifications」  
IFAC 2005 16th WORLD CONGRESS  
Prague, Czech Republic 2005/7/4-2005/7/8

Tatsuya Kai, Hidenori Kimura, Shinji Hara  
「Nonlinear Control Analysis on Nonholonomic Dynamic Systems with Affine Constraints」  
44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC  
2005,Sevilla, Spain 2005/12/12-2005/12/15

Masaaki Kanno  
「 $H_2$  Model Reduction Using LMIs,」  
44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC 2005  
Sevilla, Spain 2005/12/12-2005/12/15

穴井宏和、横山和弘、原辰次  
「LQR フィードバック系の閉ループ極の和:代数的アプローチ」  
第五回計測自動制御学会制御部門大会  
仙台市 2005/5/25-2005/5/27

甲斐健也、木村英紀、原辰次  
「可積分なアファイン拘束の求積アルゴリズム」  
第五回計測自動制御学会制御部門大会  
仙台市 2005/5/25-2005/5/27

甲斐健也、木村英紀、原辰次  
「アファイン拘束を受ける非ホロノミック動力的システムの制御問題」  
第五回計測自動制御学会制御部門大会  
仙台市 2005/5/25-2005/5/27

石井秀明、倉橋裕一、原辰次  
「サブハンド符号化を用いたネットワーク化制御系の設計」  
第五回計測自動制御学会制御部門大会  
仙台市 2005/5/25-2005/5/27

管野 政明, 原 辰次  
「H2 追従制御問題の精度保証付き計算」  
第34回制御理論シンポジウム  
大阪市 2005/10/31-2005/11/2

管野 政明  
「精度保証付き制御系解析・設計」  
京都大学数理解析研究所研究集会,  
Computer Algebra -- Design of Algorithms, Implementations and Applications 2005  
京都市 December 2005

Q. Hui, W M. Haddad , V. Chellaboina and T. Hayakawa,  
Adaptive control of mammillary drug delivery systems,  
in Proc. Amer. Contr. Conf., (Portland, OR), pp. 967-972, June 2005.

T. Hayakawa, W. M. Haddad and N. Hovakimyan  
“Neural network adaptive control for nonlinear uncertain dynamical systems with asymptotic stability guarantees,”  
In Proc. Amer. Contr. Conf., (Portland, OR), pp. 1301-1306, June 2005.

T. Hayakawa, H. Ishii and K. Tsumura ,  
“Adaptive quantized control for linear uncertain discrete-time systems,” in  
Proc. Amer. Contr. Conf., (Portland, OR), pp. 4784-4789, June 2005.

T. Hayakawa, W. M. Haddad, and N. Hovakimyan  
“A new characterization of stable neural network control for discrete-time uncertain systems,”  
in Proc. IFAC World Cong., (Prague, Czech Republic), July 2005.

T. Hayakawa,  
“Direct adaptive control for nonlinear uncertain systems with time delay,”  
in Proc. IFAC World Cong., (Prague, Czech Republic), July 2005.

T. Hayakawa, H. Nakashima, and S. Hara,  
“Adaptive control for stochastic nonnegative and compartmental dynamical systems,”  
in Proc. SICE Ann. Conf., (Okayama, Japan), pp. 2031-2036, August 2005.

T. Hayakawa,  
“Direct adaptive control for nonlinear uncertain systems with time delay,”  
計測自動制御学会制御部門大会資料, 仙台, pp. 23-26, 2005.

中島(東大), 早川, 原(東大), “確率的結合コンパートメントシステムの安定性解析,” 計測自動制御学会制御部門大会資料, 仙台, pp. 103-106, 2005.

T. Hayakawa, H. Ishii , and K. Tsumura,  
“Adaptive quantized control for nonlinear uncertain systems,”  
計測自動制御学会制御理論シンポジウム資料, 大阪, pp. 399-402, 2005.

Hirokazu Anai, Kazuhiro Yokoyama  
Numerical Cylindrical Algebraic Decomposition with Certificated Reconstruction  
SCAN2004 (Fukuoka, Japan) 2004/10/4-8

Hirokazu Anai  
New Trends in Fixed/Reduced-order Robust Controller Synthesis:  
New design algorithms with advanced CACSD tools (CCA invited session proposal)  
CCA/ISIS/CACSD 2004 (Taipei, Taiwan), 2004/09/2-4

Hirokazu Anai, Hitoshi Yanami, Kei Sakabe, Shinji Hara  
Fixed-structure robust controller synthesis based on symbolic-numeric computation: design  
algorithms with a CACSD toolbox (Invited paper)  
CCA/ISIS/CACSD 2004 (Taipei, Taiwan), 2004/09/2-4

Kei Sakabe, Hitoshi Yanami, Hirokazu Anai, Shinji Hara  
A MATLAB toolbox for robust control synthesis by symbolic computation  
SICE2004 (Sapporo, Japan) 2004/08/4-6

Hitoshi Yanami, Hirokazu Anai  
Development of SyNRAC --Formula description and new functions --  
CASA2004 (Krakow, Poland), 2004/06/7-9

Hirokazu Anai  
Real quantifier elimination for solving algebraic constraints in practice  
-- Algorithms and their applications in control system design (Invited talk)  
MSRI Workshop on Algorithmic, Combinatorial and Applicable Real Algebraic Geometry  
(MSRI, USA), 2004/04/12-16

折居茂夫, 穴井宏和, 堀本勝久  
Symbolic-Numeric Optimization for Kinetic Models---An application to bioinformatics field---  
京都大学数理解析研究所短期共同研究 CA-ALIAS'04 (京都大学) 2004/12/13-15

穴井宏和, 横山和弘  
Numerical Cylindrical Algebraic Decomposition with Certificated Reconstruction  
京都大学数理解析研究所短期共同研究 CA-ALIAS'04 (京都大学) 2004/12/13-15

屋並仁史, 穴井宏和  
Development of SyNRAC---A Cylindrical Algebraic Decomposition Procedure  
京都大学数理解析研究所短期共同研究 CA-ALIAS'04 (京都大学) 2004/12/13-15

穴井宏和, 横山和弘, 原辰次  
Sum of Roots with Negative Real Parts  
京都大学数理解析研究所短期共同研究 CA-ALIAS'04 (京都大学) 2004/12/13-15

穴井宏和  
代数的算法とシステム制御理論  
SICE「新しい制御と数学の接点を探る調査研究会」講演会 (大阪大学) 2004/12/01

Hirokazu Anai, Kazuhiro Yokoyama, Shinji Hara

③ポスター発表 (国内会議 0件、国際会議9件)

M. Kanno, K. Yokoyama, and H. Anai,  
Solution of the algebraic Riccati equation using the sum of roots,  
International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation 2008, Hagenberg, Austria,  
July, 2008

Aburatani, S., Saito, S., Honda, M., Kaneko, S and Horimoto, K.: Orchestration of gene systems  
inferred from expression profiles by graphical chain model, 33th FESB Congress and 11th IUBMB  
Conference, Athens, Greece, June 28, 2008.

H. Yanami  
SyNRAC: A Maple Toolbox for Solving Real Algebraic Constraints  
Software exhibitions in ISSAC 2007, Waterloo, Canada, July 29, 2007

Noro, M. and Takayama, N.:  
Some useful functions in Risa/Asir, IMA workshop, Software for  
Algebraic Geometry, University of Minnesota, USA, 2006.10.23-10.27.

T. Hayakawa,  
“A new characterization on the approximation of nonlinear functions via neural networks: An  
adaptive control perspective,”  
in Proc. Joint IEEE Conf. Dec. Contr. and Eur. Contr. Conf., (Seville, Spain), pp. 4117-4122,  
December 2005.

T. Hayakawa and W. M. Haddad,  
“Stable neural hybrid adaptive control for nonlinear uncertain impulsive dynamical systems,”  
in Proc. Joint IEEE Conf. Dec. Contr. and Eur. Contr. Conf., (Seville, Spain), pp. 5510-5515,  
December 2005.

S. Oorii, H. Anai, K. Horimoto  
Symbolic-Numeric Estimation of Kinetic Parameters in Biochemical Pathways by Quantifier  
Elimination  
GIW2005 (International Conference on Genome Informatics), Yokohama, Japan, Dec  
19-21, 2005.

H. Yoshida, H. Anai, S. Oorii, K. Horimoto  
On Conditions for Morphogenetic Diversity of Multicellular Organisms  
GIW2005 (International Conference on Genome Informatics), Yokohama, Japan, Dec 19-21,  
2005.

Shigeo Oorii, Hirokazu Anai, Katsuhisa Horimoto  
Symbolic-Numeric Optimization for Biological Kinetics by Quantifier Elimination  
GIW2004(The 15th International conference on Genome informatics) (Yokohama, Japan)  
2004/12/13-15

(3)特許出願

①国内出願 (1 件)

1.発明の名称: パーキンソン病診断装置およびドーパミン計測データ解析方法

出願人 :産総研・富士通共願

出願番号・出願日:特願 2006-248533(H18.9.13 出願)

PCT/JP2007/067501 (H19.9.7 出願)

発明者 :産総研 堀本先生、富士通 穴井

②海外出願 (0件)

該当なし

(4)受賞等

①受賞12件

・管野 政明, 大西 政彦, 原 辰次

2008 年度 計測自動制御学会 学会賞 論文賞

「有限周波数位相・ゲイン特性に着目した連続時間制御対象の  
制御しやすさの特徴づけ」

計測自動制御学会論文集 第 43 巻 第 10 号 2007 年

・篠原直行(CREST 富士通穴井チーム)

第 17 回 日本数式処理学会大会において 2008 年度奨励賞を受賞

・管野政明

「モデル予測制御 -制約のもとでの最適制御-」(2005 年 東京電機大出版局)

計測自動制御学会(SICE) 2007 年 著述賞受賞

・穴井宏和, 原辰次

シミュレーション学会 2007 年度論文賞

「数式処理を用いた多項式のロバスト根配置とその制御系設計への応用」

『シミュレーション』Vol.25, No.3 (p.28~35)

・T. Iwasaki, S. Hara:

IEEE Control System Society, George S. Axelby Outstanding Paper Award を受賞(2006 年 12 月) "Generalized KYP Lemma: Unified Frequency Domain Inequalities With Design Applications," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 50, no. 1, pp. 41- 59 (2005)

・第 16 回 日本数式処理学会において、穴井チームの研究グループから 3 名の研究者  
(木村欣司研究者、兵頭礼子研究者、吉田寛研究者)が奨励賞を受賞

(<http://www.jssac.org/>)

・多項式スペクトラル分解に付随するグレブナ基底の change of ordering について

木村欣司(CREST JST),

管野政明(CREST JST),

穴井宏和(富士通研究所/CREST JST),

横山和弘(立教大学/CREST JST)

- 数式処理を用いた制御系設計支援ツールの開発  
兵頭礼子((株)アルファオメガ),  
洪明勲((株)富士通ソフトウェアテクノロジーズ),  
屋並仁史((株)富士通研究所),  
穴井宏和((株)富士通研究所),  
原 辰次(東京大学)
- 代数的算法を用いた多細胞における複数細胞タイプの共存条件式の導出  
吉田 寛(東京大学・医科学研究所),  
穴井宏和(富士通研究所/CREST JST),  
堀本勝久(産業技術総合研究所・生命情報科学研究センター)
- 国際会議 BIOINFO 2005 (International Joint Conference of InCoB, AASBi and KSBI)  
“Honorable Mention Paper Award” “Symbolic-numeric Estimation of Parameters  
in Biochemical Models by Quantifier Elimination” Orii, Anai, Horimoto
- 原辰次: 計測自動制御学会論文賞「量子制御ダイナミクスの平衡点解析」,  
計測自動制御学会, 2005 年8月
- 原辰次: 計測自動制御学会教育賞「制御理論とその応用に関する教育と啓蒙活動」,  
計測自動制御学会, 2005 年8月
- Shinji Hara: IEEE Fellow to robust, servo tracking, and sample-data control theories,

## ②新聞報道

該当なし

## ③その他

- 日経バイオテク掲載(12月)  
「富士通、医科研、バイオ情報処理に数式処理を利用した新手法開発、「ものづくり」の制御技術を生かす」

## (5)その他特記事項

- 現在当チームで開発中の数値・数式ハイブリッド最適化のツールである SyNRAC, 及び, SyNRAC に基づくロバスト制御系設計ツールボックスの両ソフトについて Maplesoft 社と共同で製品化することで合意し, 現在, 共同開発・ライセンス関連の契約についての交渉中である。2008 年度中の製品化を目指している。
- 当チーム穴井(富士通)・堀本(産総研)は、国際会議 Algebraic Biology を 2005 年に立ち上げ、その後これまでに 3 回目の AB を開催した。organizer として参加及び'Algebraic Biology'(Lecture Notes in Computer Science 5147, Springer)の編集を行った。

## §7 研究期間中の主な活動

ワークショップ・シンポジウム等  
なし

## §8 結び

数値・数式ハイブリッド最適化のアルゴリズムの開発を行い、その成果を制御系設計・各種システムの解析設計への適用を通じて有効性を示してきました。実際、現在のものづくりの現場では、システムティックでより精密な設計が柔軟にできる環境が強く望まれており、数値計算だけに基づくこれまでの計算技法だけでは実現が難しい点も多く、そのような問題点を解決するのに数式処理に基づく計算技法を導入することが非常に有効であることを富士通でのものづくり適用まで行い示してきました。特に、問題のネックとなる非凸性・非線形性を本質的に取り扱うことが可能で、設計パラメータの実行可能解を領域として全て正確に求めることができる数値・数式ハイブリッド最適化により、ものづくりの現場での設計者の作業支援、作業の軽減が可能となり、したがって、設計過程の工数削減が実現されます。同時に、設計解の精緻化も可能となりより精度の高いレベルでの設計が容易に実現できるようになります。

このように、数値・数式ハイブリッド最適化のものづくりのプロセスに与える効果はかなり大きいと考えます。また、数値・数式ハイブリッド最適化の実応用、特に、制御系設計やシステム解析設計についての成果は、アルゴリズムの研究内容とその実装によるツール化については、学会関係及び産業会ともに注目されてきていると思います。

実際、これまで我々のチームの研究について、数式処理や制御理論の国際会議だけでなく、数式処理ソフトや制御系設計ツールの開発元が主催するカンファレンス等で、我々の研究を基調講演や招待講演として度々話す機会をいただいております。そのカンファレンスには非常に多くのエンジニアが参加し好評を得ています。また、そのような状況の中、開発元より我々が開発中の SyNRAC や制御系設計ツールに対して、製品化のオファーを受けることとなり、現在の契約交渉につながっています。

数値・数式ハイブリッド最適化手法の開発自体の研究内容、及びその効率化のための研究自身も、科学技術計算のあらたな方向性として非常に興味深い成果だと思います。これにより、実際に適用可能な規模の拡大が図れることが重要で、これらの研究についても着実に進展させ計算効率の底上げを図っていきたいと考えています。

数値・数式ハイブリッド最適化のバイオインフォマティクスへの適用については、予想以上の好評を得て、論文賞や国際会議 Algebraic Biology の立ち上げにつながりました。この方向性は、今後ますます発展してくと期待しています。

\* \* \*

円滑な研究推進を行えるように、いつも大変迅速に対応をいただいております。シミュレーション事務所の方々には感謝しております。

今回のプロジェクトは、数学・応用数学・工学・産業という幅広いチーム、産学連携で構成されたチームで進めていきましたが、このような連携のもとで研究を円滑に進めることはなかなか難しいことですが、CRESTという枠組みがあることで、チーム間の契約関係などかなりスムーズに進みました。しかしながら、企業は大学とはいろいろと事情がことなることをもう少し考慮いただけたら（特に、研究費の執行の仕方について）と思う場面も幾度かありました。ご一考くださいますようお願いいたします。