

# 最適化 / 制御活動グループ

室田一雄

情報理工学系研究科数理情報学専攻

## 1 はじめに

本グループの活動目的は、最適化と制御の分野において「連続と離散の接点」及び「物理世界と情報世界の接点」に現れる様々な局面を取り扱うための手法の創生である。更に、最適化と制御の研究者の緊密な連携によって、超ロバスト計算原理の中核となる理論及び技術を提供することを目指している。3年目にあたる本年度は、最適化と制御という2分野双方に関連するモデル及び問題について、グループ内での議論を元に新たな理論及び解法の構築を行った。特に、数学的な取り扱いが困難なハイブリッド型の問題について、最適化と制御の両面からアプローチを行い、より広い視野に基づいた着想、解析、評価の成果を得ている。

最適化の分野では、「離散・連続ハイブリッド最適化」をテーマに、ハイブリッド制御系設計等でしばしば現れる非線形整数計画に対し、組合せ理論や多面体理論に基づいた手法の構築を行っている。また、求解が困難な制御問題の解法として近年研究されている確率的算法に対し、算法の鍵となる高速サンプリング法の提案を行っている。一方制御の分野では、本年度も「物理・情報デュアル制御」をテーマに、幾つかの研究課題について結果を得た。具体的には、周波数帯域を自在に選択できる一般化 KYP 補題の、さらなる発展としてのロバスト化/時間領域特性との対応/設計支援パッケージの作成、量子情報機器実現のための量子制御ダイナミクス解析および安定化、有限の情報量を用いたシステム同定の誤差規範に関する考察、ロバスト制御問題で重要なパラメータ依存線形行列不等式の確率的解法の拡張、などが行われた。量子制御を除く課題は前年度までの結果の

発展的拡張である。量子制御は新たに取り組み始めた研究で、他分野に及ぼす影響の大きさから興味深く、今後の発展が期待される。

各テーマとも、最適化と制御の両分野のメンバーの活発な議論の下に新たな成果が得られており、本研究グループの研究活動3年目にふさわしい内容のものと考えられる。関連する成果における受賞を以下に記す。

- 井上学位賞: 室田一雄『離散凸解析』の理論。
- 2004年度統計関連学会連合大会優秀報告賞: 来嶋修治 (指導教員: 松井知己)。
- NZIMA Conference and ACCMC Student Award: 来嶋修治 (指導教員: 松井知己)。
- 日本オペレーションズリサーチ学会学生論文賞: 平井広志 (指導教員: 室田一雄), 針谷尚幸 (指導教員: 岩田覚), 松岡祐治 (指導教員: 岩田覚)。

本研究グループでは、2004年11月と2005年1月に国際ワークショップを行なった。どちらも、海外からの研究者1名と、国内の研究者数名による発表があった。11月のワークショップは、ロバスト制御における確率的アプローチをテーマとしており、制御問題の確率的取り扱い、確率的な解法の構築、非線形性を含む問題を解く最適化手法について発表がなされた。1月のワークショップは、非線形ハイブリッド制御をテーマに、様々なモデルの構築、非線形性及び離散性の取り扱い、高速な最適化算法の提案について発表がなされた。

本グループでは、研究活動の中核をなすものとして、「最適化 / 制御セミナー」を行なっている。本年度は10回開催し、どのセミナーにおいても出席者間で活発な議論が行なわれた。

## 2 研究内容

### 2.1 離散・連続ハイブリッド最適化

#### 離散ヘッセ行列と局所2次展開

L凸関数とM凸関数は、整数格子点上で定義された関数のクラスであり、離散凸解析において中心的な役割を担っている。本研究では、離散ヘッセ行列と局所2次展開を定義して、これらを用いたL凸関数の特徴付けを与えた。

#### パーフェクトサンプリング法の提案

バイオインフォマティクス等の分野において、大規模な問題を解く際に、良い解候補を高速にサンプリングする必要がある。この研究では、マルコフ連鎖を用いたサンプリング手法において、定常分布に厳密に従うサンプルを生成する、パーフェクトサンプリング法の提案を行った。

#### 符号対称行列のSylvester指数

社会現象を線形方程式系で定式化する際には、係数の数値化が困難である場合が多い。このような状況で解析を行うためには、係数行列が要素の絶対値によらず正則(符号正則)かどうかを知る必要が生じる。本研究では、符号正則な $n$ 次対称行列の符号指数を、行列要素の符号情報のみから計算するアルゴリズムを設計した。その計算量は、非零要素数を $m$ とすると、 $O(nm)$ である。

#### 高精度な保存・散逸数値解法

保存系、あるいは散逸系をなす常微分方程式系を数値的に解く際には、その保存・散逸性を離散系でも保つことが望ましい。本年度の研究では、理論的には任意の次数まで安定な解法を構成できることを示した。この方法は、常微分方程式に対する境界値法を援用するもので、プログラム実装と計算コストの面で欠点を負う代わりに高い安定性を得る。

### 2.2 物理・情報デュアル制御

#### 有限周波数特性に基づく動的システムの設計

KYP (Kalman-Yakubovič-Popov) 補題は、最適制御、ロバスト制御、適応制御などシステム制御理論の展開において非常に大きな役割を果たして

きた。本研究では、実用的な設計への適用を目指してロバストGKYP補題を導出するとともに、非線形系への拡張や適応制御への応用を意識して、時間領域での等価な条件を導出した。

#### 量子ダイナミクスの制御

量子情報機器の実現には、スピン系などに代表される量子力学系の操作/制御の理論・技術が不可欠である。本研究では連続測定下にある量子ダイナミクスを念頭に、それに対する系統だった制御系設計の開発を目指している。これまでにマスター方程式のベクトル表現を導出、それを用いて、局所可到達性、局所可観測性、平衡点の安定性についての解析およびフィードバック安定化について諸結果を得た。

#### 量子化データを用いたシステム同定

有限の情報量しかもたない量子化された入出力データを用いたシステム同定問題において、同定誤差の規範と推定器の妥当性について考察した。量子化を考慮しない推定器に、量子化されたデータを代入して得られた推定値が、合理的であるという結論を得た。またその推定規範の意味で最適となる量子化器を導出した。

#### パラメータ依存線形行列不等式の解法

パラメータ依存線形行列不等式はロバストな制御系の解析や設計においてしばしば現われる重要な不等式である。本研究では、パラメータに依存したLyapunov関数を使う場合に現われる不等式に関して確率的解法を構成した。この解法は、問題のサイズの多項式で表される数の繰り返しの後に終了する。この他、確定的解法の研究を行なった。

## 3 国際ワークショップ

2004年11月22日(月)

### Workshop on Robust Optimization and Control

対象や環境の不確かさに対してロバストな設計を行なうことは工学において重要な課題であり、最適化・制御の両分野において感心の高いテーマである。本グループでは今年度トリノ工科大学のRoberto Tempo教授を2004年11月15日か

ら 26 日まで招聘したが、これを機会にロバスト最適化とロバスト制御に関するワークショップを行なった。最適化と制御の両分野から多くの参加者を得、両分野の間に多くの共同研究の可能性があることが認識された。(参加者 34 名)

- Roberto Tempo (Politecnico di Torino)  
“Randomization of Uncertain Systems.”
- Tomomi Matsui (The University of Tokyo)  
“Polynomial Time Perfect Sampler for Discretized Dirichlet Distribution.”
- Takashi Tsuchiya (The Institute of Statistical Mathematics and The University of Tokyo)  
“Robust Magnetic Shielding Design with Second-Order Cone Programming.”

2005 年 1 月 5 日 (水)

#### **Workshop on Nonlinear and Hybrid Control**

大規模系やネットワークシステムなどの複雑なシステムを制御対象とするとき、非線形システム、ハイブリッドシステムなどに関する制御理論が不可欠となる。近年、制御理論の分野で活発に議論されている、これら研究分野の一線で活躍されている内外の研究者を招き、互いの情報交換、議論の深化を目指して本ワークショップが企画された。海外から 1 名、国内他大学から 2 名を招き、学内 2 名を合わせ、計 5 名が発表した。(参加者 16 名)

- Daniel Liberzon (University of Illinois)  
“Control of nonlinear systems with limited information.”
- Kenji Fujimoto (Nagoya University)  
“Singular value analysis and model reduction of nonlinear control systems.”
- Koji Tsumura (University of Tokyo)  
“Entropy and inner-outer factorization of nonlinear systems.”
- Daniel Liberzon (University of Illinois)  
“Stability of switched systems.”
- Yasushi Iwatani (University of Tokyo)  
“Stability Analysis Based on Poles and Zeros for Piecewise Linear Systems.”
- Jun-ichi Imura (Tokyo Institute of Technology)

“Simultaneous optimization on motion and decision of piecewise affine systems under non-convex state constraints.”

## **4 最適化 / 制御セミナー**

**2004 年 4 月 12 日 (月) 16:30 ~ 18:00**

Prof. Minyue Fu (The University of Newcastle)  
“On Control of Linear Systems using Quantized Feedback”

**2004 年 5 月 12 日 (水) 16:30 ~ 18:00**

Prof. Tetsuya Iwasaki (University of Virginia)  
“Generalized S-procedure and Control Applications”

**2004 年 7 月 27 日 (火) 13:00 ~ 15:30**

岩田覚 (数理情報学専攻)  
“行列束の Kronecker 標準形の組合せ論的解析”  
松井知己 (数理情報学専攻)  
“スポーツスケジュールリング問題の近年の展開”

**2004 年 8 月 27 日 (金) 15:00 ~ 16:30**

Prof. Brian Anderson (National ICT Australia)  
“Agent Formations and Reformations”

**2004 年 8 月 31 日 (火) 16:00 ~ 17:00**

Prof. David Wagner (Dartmouth College)  
“The Minimum Bends Path Problem in Three Dimensions”

**2004 年 10 月 22 日 (金) 13:00 ~ 14:30**

Prof. András Sebő (CNRS, Leibniz-IMAG)  
“Minmax Relations for Cyclically Ordered Graphs”

**2004 年 10 月 26 日 (火) 15:00 ~ 16:00**

Prof. David Banjerdpongchai (Chulalongkorn University)  
“An Optimal Control Approach to Compute the Worst-Case Performance of Linear Systems under Disturbances with Bounded Magnitudes and Bounded Derivatives”

**2004 年 11 月 29 日 (月) 15:30 ~ 17:00**

Prof. Tongwen Chen (University of Alberta)  
“Mutlirate Control Systems and Applications”

2005年2月3日(木) 13:30~15:00

Prof. Kemin Zhou (ルイジアナ州立大学)

“Probabilistic Robustness Analysis — Risks, Complexity and Algorithms”

2005年2月10日(木) 16:00~17:30

福田 公明氏 (スイス連邦工科大学)

“Generating All Vertices in Implicitly Defined Polytopes”

## 5 テクニカルレポート

### METR 2004-05

A. Nakajima and K. Tsumura: Congestion Controller Design for TCP/AQM Network Systems

### METR 2004-10

K. Tsumura: Asymptotic Property of Optimal Quantization for System Identification

### METR 2004-14

N. Yamamoto, K. Tsumura and S. Hara: Vector Representation of Stochastic Quantum Dynamics and its Local Reachability and Observability

### METR 2004-21

S. Matuura, K. Murota and H. Saito: An Integral Basis Method for Preseparable Convex Integer Programs

### METR 2004-23

Y. Oishi: Polynomial-Time Algorithms for Probabilistic Solutions of Parameter-Dependent Linear Matrix Inequalities

### METR 2004-28

T. Suzuki, S. Aoki and K. Murota: Use of Primal-Dual Technique in the Network Algorithm for Two-Way Contingency Tables

### METR 2004-29

Y. Miyamoto and T. Matsui: Multicoloring Unit Disk Graphs on Triangular Lattice Points

### METR 2004-30

S. Moriguchi and K. Murota: Discrete Hessian Matrix for L-convex Functions

### METR 2004-31

K. Murota: Note on Multimodularity and L-convexity

### METR 2004-32

H. Saito, T. Fujie, T. Matsui and S. Matuura: The Quadratic Semi-Assignment Polytope

### METR 2004-34

Y. Iwatani and S. Hara: Stability Analysis and Stabilization for Bimodal Piecewise Linear Systems Based on Eigenvalue Loci

### METR 2004-35

Y. Oishi: Probabilistic Design of a Robust Controller Using a Parameter-Dependent Lyapunov Function

### METR 2004-38

Y. Iwatani and S. Hara: Exact Stability Tests for Planar and Multi-modal Piecewise Linear Systems

### METR 2004-41

H. Hirai, K. Murota and M. Rikitoku: SVM Kernel by Electric Network

### METR 2004-42

N. Kakimura and S. Iwata: Computing the Inertia from Sign Patterns

### METR 2004-43

K. Murota: M-convex Functions on Jump Systems: A General Framework for Minsquare Graph Factor Problem

### METR 2005-03

K. Tsumura: Criteria for System Identification with Quantized Data and the Optimal Quantization Schemes