

3 「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

本グループでは最適化と制御の研究者の緊密な連携のもとに、連続と離散の接点、物理世界と情報世界の接点に着目することによって、超ロバスト計算原理の中核となる理論と技術の創出を目指している。本年度はCOEプロジェクトの初年度として、今後の研究活動の方向性を探るべく様々な提案がなされた。

最適化の分野からは、離散・連続ハイブリッド最適化をキーワードとして、連続と離散の最適化に統一の視点を与える離散凸解析、スポーツスケジューリングにおけるロバストな解法、大規模な問題のための確率的手法、ロバストな計算のための組合せ緩和法などが提案された。また制御の分野からは、物理・情報デュアル制御の名のもとに、動的システムのモデル化の新手法である有限周波数特性の特徴づけ、連続と離散が混在した制御系を扱うための新しい制御理論の試み、制御における確率的手法などが提示された。いずれも今後の展開が期待できるテーマとして、超ロバスト計算原理の探求の出発点にふさわしいものと考えられる。

本グループでは、2003年1月に「応用離散数学シンポジウム — ロバスト最適化に向けて」と題した国際シンポジウムを行なった。ここでは計算のロバスト化における離散数学的手法の重要性に鑑みて、離散数学とその応用に焦点をあてた。後述するように多数の参加者を得、4日間にわたって質の高い発表と討論が行なわれた。

また本グループでは、グループの研究活動の中核をなすものとして「最適化 / 制御セミナー」を行なうこととした。本年度は6回開催し、うち4回は外国人を含むグループ外部の研究者に講演を依頼し、残り2回はグループ内部の研究者が講演を

担当した。いずれも活発かつ生産的な議論が行なわれ、本グループの活動の展開に期待を抱かせるものとなった。またセミナーには、超ロバスト計算原理プロジェクトの他のグループの研究者等も参加し、本プロジェクト全体の連携のためにも大きな役割を果たしていただけるのではないかとと思われる。

以下、研究内容、国際シンポジウム、最適化 / 制御セミナー、および本グループの研究者が執筆したテクニカルレポートについて、より具体的な内容を述べる。

2 研究内容

2.1 離散・連続ハイブリッド最適化

離散凸関数最小化アルゴリズム

M凸関数やL凸関数に対する近接定理は、その最小化元が、スケーリングの下でロバスト性を有することを数学的に定式化したものである。本研究は、この事実を利用して、離散凸関数の最小化アルゴリズムの計算量を理論的に解析したものである。

M凸劣モジュラ流問題の解法

M凸関数を含む形の劣モジュラ流問題は、効率的なアルゴリズムをもつ組合せ問題の中で最も一般的な枠組みの一つである。本研究では、この問題に対する効率的なアルゴリズムを構成した。とくに、M凸関数がスケーリングに閉じているという意味で構造的にロバストであれば、弱多項式時間の容量スケーリングアルゴリズムが構成できることを示した。

多項式時間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、良い解の候補を高速にサ

ンプリングする必要がある。この研究では、劣悪なデータに対しても解のサンプリングを高速に行う手法を提案した。特に、マルコフ連鎖を用いたサンプリング手法において、サンプルを得るまでの必要推移回数と、要求精度の関係について算定を行うことで、現実問題に適用できる十分な速度を持つ算法の設計を目指している。

行列束に関するロバスト線形計算

代数微分方程式等で記述される動的システムの解析において基本的な役割を果たす行列束の Kronecker 標準形の構造指数は、摂動に対して不安定な離散値をとる。そのため、構造指数を正確に計算するには、計算誤差に対してロバストな手法の開発が必要とされる。従来の研究において、構造指数のうちの巾零指数については、組合せ緩和法を用いた手法が開発されている。本研究では、この他の行指数、列指数に関する組合せ緩和法の開発を目標として、非零要素が代数的独立であると仮定した場合に、数値計算を全く行わずに、構造指数の推定値を得る組合せ的な手法を導入した。

時間割作成問題の解法の提案

スポーツや学校の時間割の作成問題には、実務上の様々な制約が存在する。制約の中で必ず守る必要のある「ハードな制約」を満しながら、他の様々な要求を満すために、他の制約が付加されても「ハードな制約」を破らない時間割を多数生成するロバストな解法が必要となる。この研究では、そのような解法の枠組を提案すると共に、実際のスポーツのスケジューリング問題に対し、整数計画法を駆使した解法の提案を行った。

2.2 物理・情報デュアル制御

有限周波数特性の特徴付け

周波数帯域を限定した有限周波数特性は、制御や信号処理などの分野で近年注目されている。本研究では、その特性が統一的に線形行列不等式条件で表現できることを示し（KYP 補題の一般化）、またその時間領域での解釈を与えており、工学の様々な分野への応用が期待できる。

H^∞ サンプル値サーボ系の設計法

連続時間制御対象を離散時間制御器で制御するサンプル値制御系の設計は実用上重要である。本研

究では、 H^∞ 制御の枠組みで、ステップ状の目標信号に追従する 1 型サーボ系の統一的な設計法を与えている。特に、一般化ホールドを用いた場合の制御器の構造（内部モデル）を明らかにしている。

量子化データを用いたシステム同定

本研究の目的は、量子化された入出力データを用いたシステムパラメタの推定問題において、最も粗い量子化器を求めることである。本研究の背景にある主問題は、制御システムの安定な運転に必要な、制御対象に関する情報量を、制御系を流れる信号の情報量を解析することにより厳密に求めることである。制御系の運転において特に制御対象が不明の場合、オンライン/オフラインに関わらず、何らかの方法により、それを推定する必要があるが、本研究ではこの過程を純粹にシステム同定として切り出し、上記問題を考えている。本研究では、ある特殊な条件下ではあるが、最も粗い最適量子化器を導出し、その性質を解析した。

Port-controlled Hamiltonian モデルに基づく跳躍ロボットの制御

跳躍ロボットに代表される機械系（可変拘束システム）は、衝突・摩擦等によって不連続に切り替わる力学的拘束を有する。本研究では跳躍ロボット特有の周期運動の一つである「ホッピング運動」を行わせることを目的とし、系の持つ力学的エネルギーを所望の値に保つことによって実現する制御方法を提案した。また、提案した手法を用いて実験を行い、実機によるホッピング運動を実現した。

ロバスト制御のための同定法

ロバスト制御は最悪ケースを扱うための確定的方法論であるため、同定法もそれに整合するように確定的方法が提案されていた。しかし確定的方法で最悪ケースを扱うと、わずかな危険性に引きずられて安全指向の解しか得られないという問題が生じる。本研究では最悪ケースを扱うための確率的方法について考え、それに基づくシステム同定法を提案した。

3 国際シンポジウム

大規模システムの解析や設計に関する計算においては、数値計算に伴う誤差の発生が、最終的な計算結果の信頼性に大きな悪影響を及ぼしかねない。あるいは、アルゴリズム自体の破綻をもたらすことすらある。このような事態を避けるためには、対象とするシステムの組合せ的な構造を積極的に利用し、できるだけ数値演算に頼らない数値計算法の開発が有効である。したがって、ロバスト計算原理の確立には、離散数学的手法の応用に関する深い洞察が不可欠である。

このような観点から、当グループでは、離散数学的手法に関する国際シンポジウムの開催を企画し、その結果として、2003年1月21日(火)から1月24日(金)まで、山上会館において「応用離散数学シンポジウム — ロバスト最適化に向けて」を開催した。海外からの参加者29名を含め、合計で113名が参加した。

シンポジウムでは、8件の招待講演(国内4件;海外4件)と38件の一般講演(国内19件;海外19件)が行われた。講演内容は、会議録(The 21st Century COE Program: Symposium on Applied Discrete Mathematics: Towards Robust Optimization, 388 pp.)に纏められているが、招待講演の講演者と題目は以下の通りである。

- T. Jordan: Uniquely Realizable Graphs and Connected Rigidity Matroids.
- T. Tokuyama: Global Roundings and Semi-Balanced Colorings of Shortest-Path Hypergraphs.
- H. Enomoto: Cycle-Packing and Cycle-Partition of a Graph.
- G. Simonyi: On Some Aspects of Ramsey Theory.
- T. Fleiner: Some Results on Stable Matchings and Fixed Points.
- S. Fujishige: New Maximum Flow Algorithms by MA Orderings and Scaling.
- K. Friedl: Periodic Functions and Quantum Computing.

- H. Nagamochi: Computing Extreme Sets in Graphs and Its Applications.

特に、T. Jordan による講演は、トラス構造の剛性に関して、長年の懸案となっていた未解決問題を見事に解決したという内容で、多くの聴衆に感銘を与えていた。

シンポジウム初日のプログラム中に、参加者が自分の抱えている未解決問題を提示するセッションを設けたところ、A. Frank, S. Zhang, G. O. H. Katona, A. Sali, A. Jüttner, G. Simonyi, K. Makino, A. Recski, K. Murota によって問題が提示された。そのうちの2題は、シンポジウム開催中に解答が得られた。さらに、シンポジウム終了後の25日(土)には、山上会館の一室を利用して、参加者同士の研究討論の場を設けた。実際に10名程度が参加して、将来に向けた問題意識の共有が図られた。

4 最適化/制御セミナー

2002年11月18日(月) 15:00~17:00

Dr. Ferenc Katai (アイログ株式会社, プロフェッショナル サービス マネジャー)

“Supply Chain Management に於ける ILOG の最適化ソリューション”

参加者 15 名

2002年12月26日(木) 15:00~17:00

石川 将人 氏 (システム情報学専攻)

“相補性システムの解析と制御”

松井 知己 氏 (数理情報学専攻)

“(混合)整数計画法の解法について”

参加者 32 名

2003年2月3日(月) 15:30~17:00

Professor Carsten Scherer (Delft University of Technology)

“Robust Controller Synthesis against Uncertain Noise”

参加者 19 名

2003年2月19日(水) 15:00~18:00

岩田 覚 氏 (数理情報学専攻)

“離散最適化手法によるロバスト線形計算”

原 辰次 氏 (システム情報学専攻)
“有限周波数特性の行列不等式条件：一般化 KYP
補題とその制御・信号処理への応用”
参加者 24 名

2003 年 2 月 24 日 (月) 14:00 ~ 15:30
Professor Karl J. Åström (Department of Auto-
matic Control, Lund Institute of Technology)
“Lebesgue Sampling and Pulsed Systems”
参加者 15 名

2003 年 2 月 28 日 (金) 14:00 ~ 17:00
石関 隆幸 氏 (理学系研究科 情報科学専攻)
“グレブナ基底と整数計画問題”
参加者 25 名

5 テクニカルレポート

METR 2002-12
K. Murota: On steepest descent algorithms for
discrete convex functions
M 凸関数や L 凸関数に対する近接定理は、その最
小化元が、スケーリングの下でロバスト性を有す
ることを数学的に定式化したものである。本論文
では、この事実を利用して、離散凸関数の最小化
アルゴリズムを見直し、計算量の理論的上界を改
良した。

METR 2002-14
R. Miyashiro, H. Iwasaki, and T. Matsui: Char-
acterizing feasible pattern sets with a minimum
number of breaks
スポーツの試合の時間割の作成問題は、実務上の
様々な制約が存在する。必ず守る必要のある「ハー
ドな制約」に、他の制約が付加されても「ハード
な制約」を破らない時間割を多数生成するロバス
トな解法の枠組を提案した。

METR 2002-15
S. Moriguchi and K. Murota: Capacity scal-
ing algorithm for scalable M-convex submodular
flow problems
M 凸関数を含む形の劣モジュラ流問題は、効率
的なアルゴリズムをもつ組合せ問題の中で最も一
般的な枠組みの一つである。本論文では、この問

題に対する最短経路返し法を提案し、さらに、M
凸関数がスケーリングに閉じているという意味で
構造的にロバストであれば、弱多項式時間の容量
スケーリングアルゴリズムが構成できることを示
した。

METR 2003-01
S. Kijima and T. Matsui: Approximate counting
scheme for $m \times n$ contingency tables
医療統計の分野で検定に用いられる分割表におい
て、その数を数え上げる事は重要かつ難しい問題
である。これに対し、どんな数値例に対しても必
ず要求精度を守る解を生成する高速な近似解法を
提案した。

METR 2003-02
T. Matsui and T. Watanabe: Multi-object auc-
tions with a single bundle bidding for perfect
complements
複数財のオークションは、近年インターネットを
介した B2B 取引が広まるとともに、実際に行わ
れつつある。このオークションが異常な安値で終
了しないためのロバストなメカニズムの研究が必
要とされている。本研究では、新たなメカニズムを
提案し、ナッシュ均衡点を用いた分析を行った。

METR 2003-03
T. Matsui, Y. Matsui, and Y. Ono: Random
generation of $2 \times 2 \times \dots \times J$ contingency tables
医療統計の分野でもちいられる分割表において、
正確検定を行う際、マルコフ連鎖モンテカルロ法
(MCMC 法) による積分計算が用いられることが
多い。本論文では、現実にはしばしば現れる形状の
多次元分割表に対し、MCMC 法に用いる高速な
マルコフ連鎖の提案を行った。

METR 2003-12
T. Fleiner, A. Frank, and S. Iwata: A con-
strained independent set problem for matroids
受動的素子で構成される電気回路網の構造可解性
判定に由来して、マトロイドの台集合が順序対に
分割されているときに、この順序対によって定め
られる制約条件を満たす独立集合のうちで最大の
ものを求める問題が 1980 年に提起された。本研
究では、この問題がマトロイド共通独立集合問題
に帰着できることを示し、その一般化を論じた。