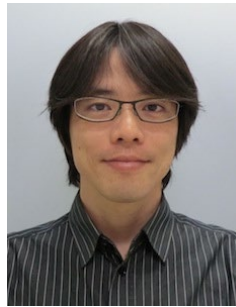


わたしたちの研究（18）統合動的システム論研究室



大塚敏之
(H2/1990 卒)



櫻間一徳
(H11/1999 卒)



星野健太
(H21/2009 卒)

1. 研究室の概要と教員紹介

統合動的システム論研究室は、情報学研究科システム科学専攻人間機械共生系講座に属し、工学部物理工学科機械システム学コースの学部教育に携わっています。研究室の前身は、1998年の情報学研究科発足時に工学研究科精密工学専攻知能機械システム講座知的制御工学研究室を母体として設置された共生システム論研究室です。当時の教授は片井修先生でした。2010年に片井先生が退職され、2013年に大塚敏之が教授として着任、2016年に研究室名称が統合動的システム論研究室と変更されて現在に至っています。吉田キャンパス総合研究12号館に居を構え、2022年9月1日現在、教授・大塚敏之、准教授・櫻間一徳、助教・星野健太の教員3名、事務補佐員1名、博士後期課程学生6名、修士課程学生8名、学部学生3名が所属しています。3名の教員は、機械システム学コースの計算機数学、工業数学F2、制御工学1や機械システム学セミナー、機械システム工学実験、特別研究を担当しています。

大塚は、1990年に東京都立科学技術大学工学部（現・東京都立大学システムデザイン学部）航空宇宙システム工学科を第1期生として卒業し、1995年に同大学大学院工学研究科博士課程を修了して博士を取得しました。その後、筑波大学講師、大阪大学大学院工学研究科講師および助教授、大阪大学大学院基礎工学研究科教授を経て、2013年より当研究室の教授を務めています。博士までの指導教員は本学工学部航空工学科出身の藤井裕矩先生で、研究者としての基礎すべてをご指導いただきました。また、当初は航空宇宙工学分野の力学と制御に関する研究をしていたこともあり、本学工学研究科航空宇宙工学専攻の名誉教授・土屋和雄先生と教授・泉田啓先生には学生時代から大変お世話になってきました。縁あっ

て本学に着任し、優秀な先生方と学生諸君から刺激を受けるとともに、本質的な研究に打ち込める環境のありがたさを日々感じています。私生活では京都の歴史を感じながら散策を楽しんでいます。ときおり通る鴨川の眺めも見飽きません。川の中を気持ちよさそうに泳ぐ鯉を見るたびに、物理学者の湯川秀樹先生が荘子の一節を紹介した随筆「知魚楽」を思い浮かべています。

櫻間は、1999年に京都大学工学部物理工学科機械システム学コースを卒業し、2004年に京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻を修了して博士を取得しました。学部では当時教授と助手であられた垣野義昭先生（本学名誉教授）と松原厚先生（本学教授）に機械系のサーボ制御に関する研究でご指導をいただきました。垣野先生が逝去されたことは誠に遺憾ではありますが、お二人にご指導いただいた実システムに向き合う精神は今でも研究の根底にあります。大学院では当時教授と助手であられた杉江俊治先生（本学名誉教授）と藤本健治先生（本学教授）に機械系の軌道追従制御に関する研究でご指導いただきました。制御理論の美しさ（と難しさ）を知り研究者を志したのはお二人のおかげです。その後は電気通信大学助教、鳥取大学准教授を経て、2018年に当研究室に准教授として着任しました。すばらしい研究室のメンバーとともに、理論と実践の両立を目指して研鑽の日々が続いています。

星野は、2009年に北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科を卒業し、2014年に北海道大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻を修了して博士を取得しました。その後、青山学院大学理工学部電気電子工学科の助教となり、2019年に当研究室の助教として着任しました。博士課程のときにご指導いただいた北海道大学情報学研究科の山下裕先生の指導教員は、本学工学部ご出身の島公脩先生でした。島先生が本学で始められた非線形制御理論のご研究の影響を受けて研究者になったことを思うと、本学で研究に従事させていただいていることにご縁を感じています。現在は、第一線で活躍されている先生方とご一緒させていただき、また、優秀な学生からも刺激を受けることができる環境に感謝しつつ、研究と教育に励む毎日です。

2. 研究紹介

当研究室では、人間・機械・社会・生物・環境などさまざまな対象のモデリング・解析・設計・制御に関する統合的かつ定量的な方法論の構築を目指していま

す。普遍的で本質的な問題を解決する理論を追究するとともに、社会的に重要な実問題の解決にも取り組んでいます。現代社会ではさまざまなシステムがますます高度化・複雑化しており、それらの望ましい設計・運用のために、わたしたちの目指す統合的な動的システム論が重要になっていくと考えられます。とくに当研究室で注目しているのは、動的システムの解析や制御を根本的に難しくする非線形性と不確かさを扱うための新しい方法論や動的最適化アルゴリズム、そして、局所的な相互作用をもとに大域的な機能を発現する分散制御です。具体的な研究テーマとして、(1) 実時間最適化による非線形システムの制御、(2) 代数的手法による非線形システムの制御、(3) 大規模ネットワークシステムの分散制御、(4) 非線形確率システムの制御、などに取り組んでおり、以下では、これらの研究テーマと応用事例についてご紹介します。

(1) 実時間最適化による非線形システムの制御

学部で学ぶ制御工学では基本的に線形システムしか扱いませんが、現実の多くのシステムは非線形性を持ちます。高度な制御を実現するには、平衡状態近傍の線形近似ではなく物理的限界や広い動作範囲での非線形特性まで陽に考慮した最適制御が必要です。しかし、非線形システムの最適制御問題は解析的にも数値的にも解くのが困難です。そこで、わたしたちは、モデル予測制御と呼ばれる問題設定に着目し、計算方法を工夫することで、ミリ秒単位の計算時間で実用的な数値解が得られる実時間最適化アルゴリズムを開発しています。一般的な数値計算手法を単に応用するのではなく、動的システムの特徴を利用した計算効率化が鍵になります。また、数式処理を用いたプログラム自動生成、評価関数の調整方法、並列計算など、研究課題は非常に多岐にわたっています。近年ブームとなっている機械学習との組み合わせなど、世界的にも注目されている研究テーマです。産業界のニーズも高く、たとえば自動運転において重要な要素技術になっています。わたしたちはアルゴリズムなどの基礎研究と並行して実応用にも積極的に取り組んでおり、たとえば以下のような事例があります。

- ホバークラフトの位置・姿勢制御
- 高度下水処理施設における水質制御
- 電力系統の実時間価格制度による負荷周波数制御
- 可変ピッチプロペラによる船舶の高効率推進制御
- 浮体式洋上風力発電施設のブレードピッチ角制御による発電量変動と浮体動

揺の抑制

- 経路が未知なターゲットのドローンによる追跡制御
- 一部のロータが停止したドローンの耐故障制御（図1）
- ヒューマノイドロボットのクライミング制御（図2）
- 四脚ロボットの全身モデルと環境との接触を考慮した歩行・走行制御（図3）

わたしたちの主な対象は機械システムですが、それに限らず非常に幅広い対象と問題をモデル予測制御によって扱えます。計算機とアルゴリズムの進歩によって、一昔前では想像できなかったほど複雑な非線形システムのモデル予測制御が可能になりつつあります。今後も基礎と応用の双方を発展させて新しい可能性を開拓していきたいと考えています。

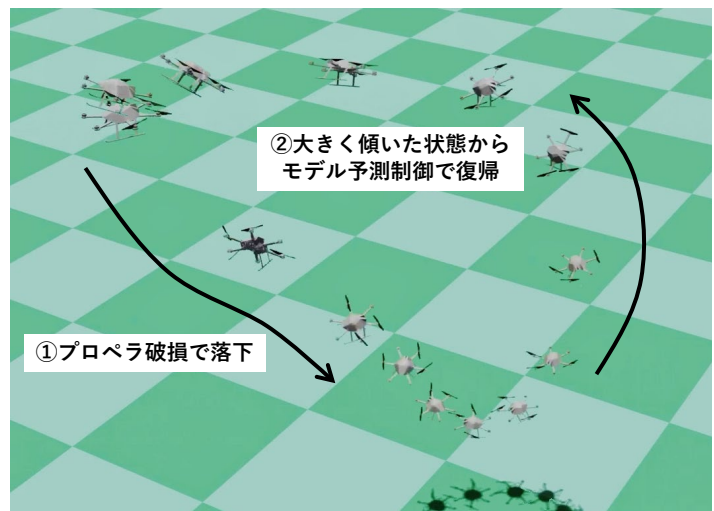


図1 ドローンの耐故障制御

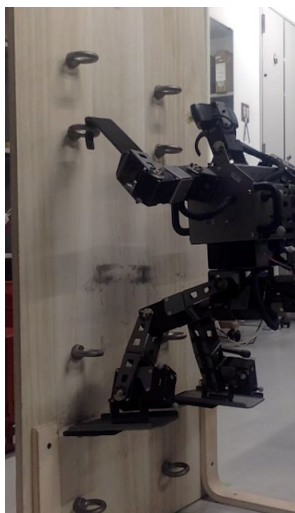


図2 ヒューマノイドロボット



図3 四脚ロボット

(2) 代数的手法による非線形システムの制御

上述のモデル予測制御は数値計算さえ高速にできれば応用範囲の広い強力な手法ですが、動的システムの本質を見通しよく理解して活用するのに適しているとは言いつらい面があります。一方、線形システムについては、可制御性や可観測性、安定性などの解析手法や制御系設計手法が体系的に構築されています。それ

らは線形性という強い性質を利用しているものの、何とか非線形システムにも理論を拡張できないか、と考えるのは自然な問いでしょう。実は、微分幾何学を応用し非線形システムに対して線形システムの解析手法や制御手法を拡張する理論が構築されています。しかし、残念ながら一般的すぎて実際の問題では解を構成することが困難です。そこで、わたしたちは、非線形システムの解析や制御に微分幾何学ではなく可換環論などの代数学や代数幾何学を利用する新しいアプローチを研究しています。このアプローチでは、システムの数学モデルに含まれる関数のクラスを多項式や有理式などにある程度限定する代わりに、その構造を利用して今まで解けなかった問題を解決し、新しい理論体系を構築することを目指しています。抽象的かつ数学的ではありますが、ご参考までにこれまでの成果をいくつか以下に挙げます。

- 離散時間有理式システムの有限評価区間最適制御問題に対して多項式環の消去理論を適用し、最適状態フィードバック制御則の陰関数表示が厳密に得られることを示しました。
- 多項式システムの制御系設計に加群のグレブナー基底を応用し、状態フィードバックや出力フィードバックによるモデルマッチング問題の解法を明らかにしました。
- 非線形システムの固有値を定義し、それに基づく安定性の判別方法を示しました。また、可観測性の判別方法や最適制御問題の解法など固有値に基づく線形制御理論の手法が、非線形システムへも拡張できることを示しました。
- 微分作用素が作る左歪多項式環の商体を用いて非線形時変システムに伝達関数の概念を拡張し、座標変換の下での不変性や入出力変数のみで表せることを明らかにしました。
- 最適制御問題の基礎方程式であるハミルトン・ヤコビ方程式について、代数的勾配解という概念を提案し、その存在を包含的0次元根基イデアルによって特徴付けました。それによって、代数的に解けるハミルトン・ヤコビ方程式の新しいクラスを見出しました。
- 制約付き多項式最適化問題のペナルティ関数法において、ペナルティ関数の重みを無限大に飛ばした極限で成り立つ最適性条件を、射影空間の理論を使って導く方法を見出しました。その結果、通常仮定される制約想定が成り立たない場合でも最適性条件が導出可能になりました。

これらの成果は、代数的な計算量の多さなどから適用範囲が限られる場合もあります。しかし、新しいアプローチで根本的な問題を追究すれば思いもよらないブレイクスルーにつながるかもしれないと考え、手探りの苦しみと楽しさを味わいながら研究を進めています。

(3) 大規模ネットワークシステムの分散制御

近年、センサネットワークや群ロボットなどの工学システムから、電力システムや交通システムなどの社会インフラまで、さまざまな分野においてシステムのネットワーク化・大規模化が進んでいます。このようなシステムでは全体の状況を把握することが難しいため、これまでとは異なる制御技術が必要とされています。当研究室では、とくに、分散制御の技術開発に注力しています。分散制御とは、大規模システムを構成する要素システムが互いに通信・センシングを行い、これによって得られる局所情報のみで各要素システムが自律制御する制御形式のことです。これによって、要素システムの処理負荷がシステム全体の規模にはよらないこと、一部が故障してもシステム全体が機能することがメリットになります。さまざまな大規模ネットワークシステムに対して、分散制御の設計理論を構築し、社会応用をすることを目指しています。応用例としては、次のようなものを考えています。

- 群ロボットのフォーメーション制御 (図4)
- センサネットワークによる広域計測
- 生物の群れの形成メカニズムの解明
- スマートグリッドの需給制御



図4 群ロボット



図5 交通シミュレータ

- 道路システムの交通流制御（図5）
- 災害時などにおける群衆の誘導制御

（4）非線形確率システムの制御

実世界の多くのシステムは何らかの不確実性を持ちます。システムが持つ不確実性を確率論に基づいてモデル化し、対象を確率的な動的システムとみなして制御を行う枠組みを制御理論では確率制御と呼びます。当研究室では、ドローンのような機械システムを対象とした確率制御と確率制御の深層学習への応用に取り組んでいます。ドローンは、外部から予期しない外乱を受けながら飛行しますが、確率制御によって外乱の影響を受けづらく制御を実現することができます。また、確率制御理論は確率的な挙動を自在に制御するための枠組みを提供します。この枠組みを用いると、近年の深層学習の分野で精力的に研究されている生成モデルと呼ばれるデータ生成手法に対して、制御理論を用いることで性能保証を行うことが可能になり、新たな制御理論の展開として注目を集めています。現在は以下のような研究を行っています。

- 確率システムの確率分布の制御と深層学習への応用（図6）
- ドローンの位置制御への確率制御の応用（図7）
- 確率的な人流を考慮した交通網の制御

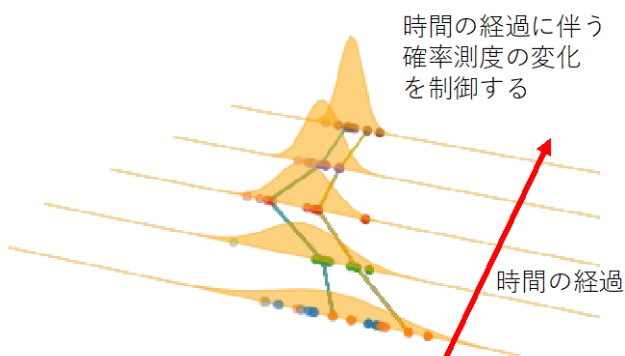


図6 確率分布の制御のイメージ

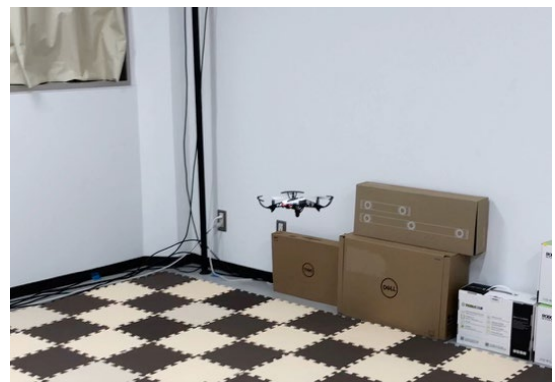


図7 ドローンの制御実験の様子

3. おわりに

今回ご紹介した研究テーマについて当研究室では多数の共同研究を行っています。また、学生が自身のアイディアで新しい方向を切り拓いて博士号を取得し、大学の教員や企業の研究職に就くケースも増えてきています。多様なアプローチ

で多様な対象と問題を扱う動的システム論の面白さは尽きることがありません。これからも理論と応用を両輪にしてオリジナルな研究を推し進めるとともに、研究成果の普及や研究を通じた教育に注力していきたいと思えます。

このたびは研究室紹介の機会をいただきありがとうございました。研究室の様子や研究内容・発表論文については下記HPもご参照ください。

統合動的システム論研究室HP <http://www.ids.sys.i.kyoto-u.ac.jp/>