

大阪大学
大学院基礎工学研究科システム創成専攻
社会システム数理領域

金融資産の管理運用の合理化、国際化に対応する科学技術の開発は、金融工学・数理ファイナンスの研究を通じて行われます。時間の推移に伴う不規則で複雑な変動を解析し、そのような現象下での最適化を図るためには、確率微分方程式や統計的推測等の高度な数学の最新の成果を必要とし、それらにより得られる理論的な結果を実際の資産管理運用技術に適用するには、大規模で高速な数値解析技術が欠かせません。一方、最近のコンピュータ技術の発展に伴い、大規模なネットワーク化システムやサイバーフィジカルシステムが出現しています。このようなシステムの解析・設計・制御のためには、従来のシステム理論・最適化理論を拡張する必要があります。さらに、知的で柔軟なシステムを構築するためには、計算知能化技術が重要となります。社会システム数理領域では、高度に数理的手法を駆使してこれらの技術開発に貢献する人材の育成を行い、またその研究・開発を行います。

数理計量ファイナンス講座

統計的推測決定 研究グループ
ファイナンス確率モデル 研究グループ
確率解析 研究グループ
確率過程論 研究グループ

IT 技術と結びついて、金融実務界で組織的に採用されるようになった、デリバティブの価格づけやリスク管理等の金融資産の合理的な運用手法の開発は急務であります。またその他、保険・年金制度等の金融システムの変革に合理的な対応をするためにも数理的手法の開発が欠かせません。これら社会システムにおける数理的手法の開発と人材育成に寄与するため、金融工学・数理計量ファイナンスをはじめとする社会システムに関する数理科学の体系だった研究・教育を、その基礎となる確率解析・確率微分方程式、確率制御、数値解析や、統計数理科学、確率微分方程式の統計推測、フィナンシャルデータ解析等の研究を踏まえて行います。

システム数理講座

制御情報システム 研究グループ
システム計画数理 研究グループ

コンピュータの高機能化に伴い、仮想空間（サイバー）と現実世界（フィジカル）が融合したサイバーフィジカルシステムの解析・設計・制御技術が重要となってきています。さらに、人間にとって扱いやすい知的で柔軟なシステムを構築するための計算知能化技術の開発も近年急速に進歩しています。システム数理講座では、これらの技術を支えるシステム理論とオペレーションズ・リサーチの教育と研究を行っています。システム科学、情報科学、人間科学などの融合による新しい学問の創成と社会貢献を目指し、安心・安全なシステムを設計するための数理的手法を開発しています。

統計数理科学の理論的研究とフィナンシャルデータ解析

<http://www.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/Stat1/>

金

融データの統計解析及びそれに必要な統計的推測決定理論の研究をしています。特に確率微分方程式モデルなどの確率過程モデルに対してフィッシャーの最尤法やガウスの最小自乗法を適用して、その理論的考察に取り組んでいます。また、保険数理の問題にも取り組み、リスク理論、破産理論、再保険戦略などに対する現代確率論的アプローチや、それらに付随する統計的問題を研究しています。



内田 雅之 教授

uchida@sigmath.es.osaka-u.ac.jp



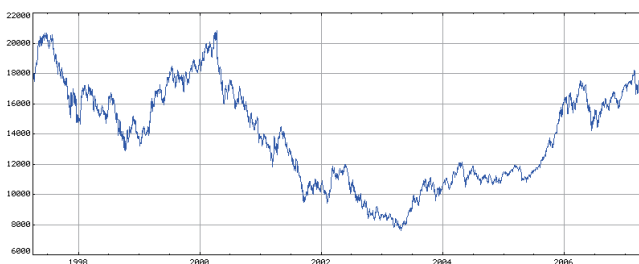
高島 哲也 講師

t.takabatake.es@osaka-u.ac.jp

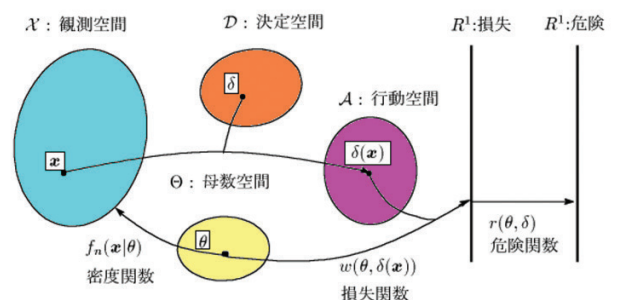
研究の背景と課題

統計解析では、統計モデルのパラメータの値や次元をデータから推測し、現象を予測することが非常に重要です。一般に、統計モデルに基づいてデータ解析するときフィッシャーの最尤法やガウスの最小自乗法などの統計的手法を用います。特に、最尤法による尤度解析は、モデル選択のための赤池情報量規準や甘利情報幾何学により、その有効性が解明されました。未知パラメータをもつ確率密度関数にデータを代入したものをパラメータに関する「尤度関数」と見なし、この尤度関数を最大にするパラメータを最尤推定量として定義しパラメータの真値を推定する方法を最尤法といいます。当研究室では最尤法を中心に統計数理科学の理論的研究を進めています。コンピュータの発達と経済・社会のグローバル化により、各種データベースが整備され、多種多様な統計モデルの開発及び適用が実現し、さらに統計的手法のシミュレーションが可能になってきました。

それにより、フィナンシャル（金融）データなどの膨大な時系列データを統計解析するために様々な統計モデルが考案されています。例えば、伊藤清博士による確率微分方程式モデルは連続時間確率過程の代表的な確率過程モデルです。時系列データ、特にフィナンシャルデータにおいても最尤法のアイデアが有効であり、当研究室では確率微分方程式などの確率過程モデルに対して最尤法に基づいた統計的方法論について研究しています。また、確率過程モデルは金融データ解析以外にも応用されています。例えば、医学の分野では生存時間解析、地球物理学の分野では統計地震学という研究分野があります。当研究室ではこれらの分野で生じる固有の問題に対しても適用可能な統計手法の開発、及びその統計的性質の解明を行っています。



日経平均株価



統計的推測決定図式

確率微分方程式の統計的推測

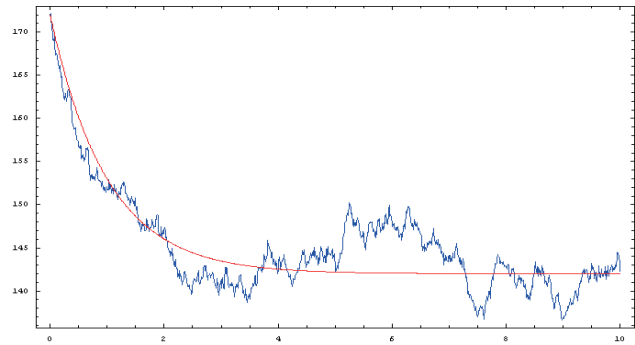
内田教授は連続時間確率過程モデル、特に確率微分方程式モデルの統計推測及びフィナンシャルデータ解析に興味をもちております。確率微分方程式によって定義される拡散過程は一般には確率推移密度関数（尤度関数）を明示的に求めることができないため、統計推測において強力な道具である尤度解析を直接的に用いることができないという難点があります。そこで尤度関数の近似（擬似尤度関数）を考え、擬似尤度解析を用いて、擬似最尤推定量の漸近的性質を示しました。特に微小拡散過程モデルに対して、スコア関数の近似として近似マルチンゲール推 推定量の1次漸近有効性を証明しました。

また、エルゴード的拡散過程に従う高頻度データを用いて、予測の意味で最適な拡散過程モデルを選択するための情報量規準を構成しました。具体的には、厳密な対数尤度関数および最尤推定量の代わりに、コントラスト関数（擬似対数尤度関数）と最小コントラスト推定量を用いた情報量規準 (Contrast based Information Criterion, CIC) を導出し、マリアバン解析を用いて CIC の数学的正当化を行いました。

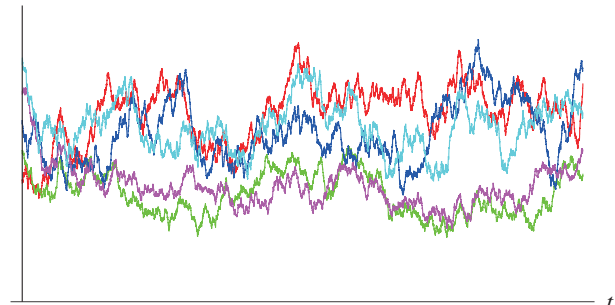
誤差を含む確率過程モデルの統計的推測

高島講師は、確率過程に基づく統計解析を専門とし、金融市場の高頻度株価データや、GNSS（全球測位衛星システム）に基づく地震・測地データなど、複雑な時系列データのモデリングと推定に関する研究に取り組んでいます。これらの実データには、金融市場の構造に起因する観測誤差や、天体の運動、計測機器の特性に由来する周期的な外乱など、解析に影響を及ぼす「誤差」が多く含まれており、それらを適切に取り扱うことが、正確な統計解析を行ううえで不可欠です。

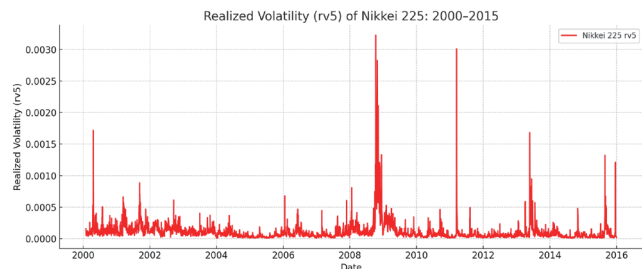
このような課題に対して、確率解析やスペクトル解析などの数理的手法を駆使し、誤差の影響に頑健な統計モデルと推定法の開発を進めています。たとえば、非整数ブラウン運動を用いた確率ボラティリティモデルにおいて、観測誤差を考慮した新たな解析手法を提案し、近年注目されるボラティリティの「ラフ性」を示唆する推定結果を得ることに成功しました。



微小拡散過程とダイナミカルシステム



多次元エルゴード的拡散過程の高頻度データ



さらに、GNSS 測地データに含まれる周期成分に対しても頑健な周波数解析手法を構築し、日本国内の複数の観測点におけるデータへ適用することで、地震波の高・低周波成分の特性を詳細に解析する研究も進めています。

研究方法と環境

統計数理科学やフィナンシャルデータ解析を研究するために、独力で図書や論文を読み、自分の手で計算するという従来の研究スタイルが要求されますが、それだけでは十分ではありません。机上の理論で終わらせないために

- (1) 数値実験による理論検証
 - (2) 実データを用いた統計分析
- などを行い、コンピュータ関連のスキルアップをはかります。

具体的には

- (1) 数式処理ソフト：Mathematica や Maple
- (2) 統計ソフト：R 言語、Python、Julia

を使います。必要に応じて図書やノートパソコンは貸出可能ですので研究環境は整備されているといえます。この様に、当研究室の学生は統計理論とデータ解析のいずれかに偏ることなく総合的な能力の向上を目指しています。

確率モデルを用いた解析

<http://www.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/prob/>

ランダムネスを含む時間と共に発展する自然 / 社会現象や、現象の観測・計測に際してノイズや不確実性が生じる場合の数理モデルとして、確率過程モデルは広く用いられています。例えば、金融市場の解析には資産 / 証券価格過程の確率微分方程式モデルが、気象予測モデルにおいてはランダムネスを含んだ確率偏微分方程式モデルが、それぞれ重要な役割を果たしています。本研究室では、隣接する深澤研究室と協働しつつ、(i) 確率過程モデルやその最適制御手法に関する理論研究、(ii) コンピュータを使った確率過程モデルの数値解析手法の研究、(iii) 数理ファイナンス、保険数理をはじめとした様々な分野への応用研究、に関心を持って研究を行っています。



関根 順 教授

sekine@sigmath.es.osaka-u.ac.jp



山戸 康祐 助教

yamato.kosuke.es@osaka-u.ac.jp

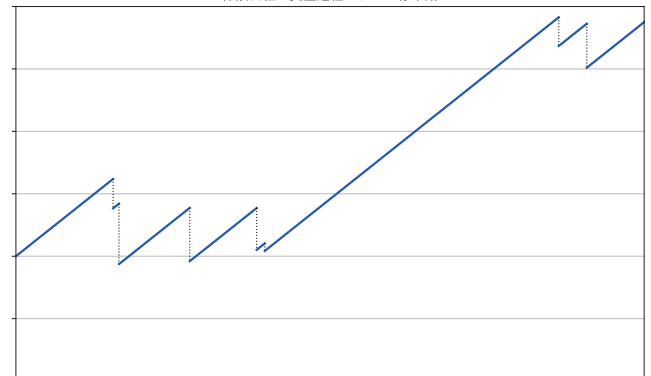
研究の背景

確率過程を用いた数理モデルは様々な分野で応用されています。数理ファイナンス・金融工学分野では資産や証券価格の変動を確率微分方程式を用いて表すモデルが広く用いられており、保険数理分野では損害保険の累積請求額が複合ポアソン過程などのジャンプ型確率過程でモデル化されます。これらのモデルを通じた考察から、投資のリスクヘッジや保険料の設定について知見を得ることができます。確率モデルを用いる分野は他にも物理学（特に統計力学）、数理生物学、経済学など多岐に渡り、多種多様なモデルが存在しています。当研究室では特に確率過程を用いた数理モデルを中心に研究を行っています。

確率モデルは、現実世界のランダムネスを含む現象を確率論を用いて数学的に表現します。出発点は現実の問題ですが、必ずしも個別的な問題のみを扱うわけではなく、現象を数学的に抽象化して扱うため、一見大きく異なる現象が共通の構造をもつ確率モデルとして定式化されることもしばしばあり、普遍的な側面もあります。例えば、保険会社の資産過程は典型的には正のジャンプをもたないレヴィ過程として定式化され、その消滅確率や消滅時刻の確率分布（破産の確率や破産時刻に相当）を知ることは重要な課題となります。このような正（または負）のジャンプをもたないマルコフ過程は待ち行列理論や分枝過程にも表れ、消滅確率・消滅時刻はこれらの過程の解析において重要な対象です。また一層高い立場から破産の問題を見れば、確率過程がある状態に到達する時刻の分布を考察することに他ならず、これはある種の（偏）微分方程式の境界値問題を考えることに相当し、理論的にも自然で重要な問題設定となります。

このような普遍性の一方で、対象とする問題に由来する確率過程の特徴的な構造や特定の問題意識が重要な場面もあります。例えば、上で挙げた保険会社の資産を表す確率モデルを考察する場合、正のジャンプをもたないという性質と、関連する確率過程の定常性・独立増分性を用いることで、多様な量を明示的に計算することができ、一般の場合には手をつけられないような複雑な問題にアプローチできます。また現実への応用に駆動された問題は、従来の理論構成では目を向けられていなかった新たな問題を提示することがあります。例えば、マルコフ連鎖の定常分布への収束に関する理論は非常に古典的ですが、その収束の速さが盛んに研究され出したのは比較的最近のことです。このような問題はマルコフ連鎖モンテカルロ法のような確率分布のサンプリングアルゴリズムへの応用から、近年一層関心がもたれています。

保険会社の資産過程モデルの標本路



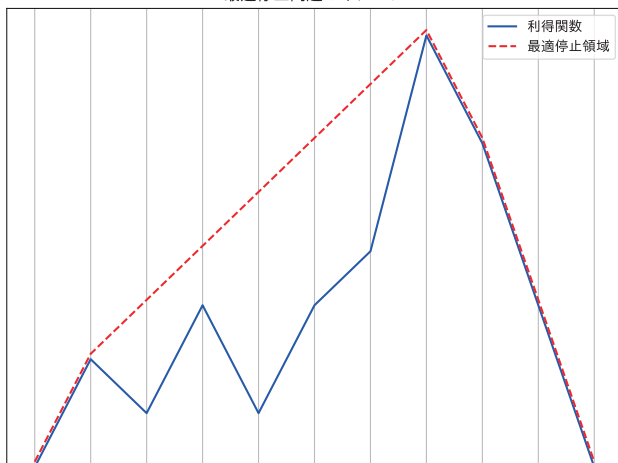
確率制御理論

確率制御理論は不確実性を伴う動的な現象に対する最適な意思決定法を数学的に考察する分野です。現実の多数の意思決定過程は不確実性を内包しているため確率制御理論は経済学、工学、生物学などを含め、極めて広範な応用をもちます。

数理ファイナンスでは金融市場の不確実性を確率過程を通じて表現するため、時間の経過に伴って得られる情報を用いて、一定の意味で最適な戦略を導くことが問題となります。例えば、金融市場での取引によって得られる富の「満足度」を最大化するという、効用最大化問題を考えます。この問題では、金融商品を確率過程として定式化し、時間に沿って適切にポートフォリオを組み替え、与えられた利得関数（満足度に相当）を最大化することが目標になります。

最適な戦略を導くために、変分法に基づいた確率的最大原理や、動的な観点に基づく動的計画法が重要な役割を果たします。これらの手法により、確率制御問題は後退確率微分方程式と呼ばれる方程式やハミルトン-ヤコビーベルマン方程式と呼ばれる非線形偏微分方程式の解析と関連付けられます。このように、確率制御理論は、関連諸分野への応用だけでなく、確率解析・偏微分方程式論の理論的な発展にも密接に関連した、興味深い研究分野です。

最適停止問題のイメージ

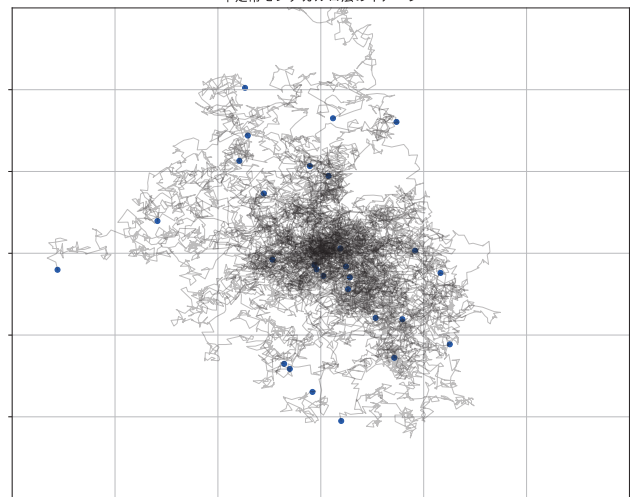


消滅を伴う確率過程の解析

数理ファイナンスや保険数理の問題では破産現象が存在し、それは確率過程では消滅として定式化できます。このため消滅を伴う確率過程の解析が必要となります。

消滅を伴う確率過程は有限の時間で消滅が起こる可能性があるため、保存的な確率過程における平衡状態への収束（エルゴード性）のように、安定した状態に達することはありません。しかし、このような非平衡系においても、適切な時間スケールで見ると短期的には平衡しているとみなせる状態（準定常分布）をもつことがあります。準定常分布の有無は消滅をもつ確率過程の巨視的な挙動や消滅の発生レートを大きく特徴づける要素で、数理ファイナンスや保険数理に留まらず、数理生物学、個体群動態論、統計力学など様々な分野から関心をもたれ、近年積極的に研究されています。例えば、非平衡統計力学や確率的探索アルゴリズムにおいては、局所的な安定状態（準安定状態）の解析が問題となります。このような状態は時間を無限大に飛ばすような理想化された状態においては例外的で些末な状態として無視できますが、現実的な時間スケールでは無視できない可能性があります。このような中間的な状態を扱うのは困難な問題ですが、準安定状態を準定常性を用いてモデル化することでアプローチできます。他にも準定常モンテカルロ法というマルコフ連鎖モンテカルロ法の準定常性バージョンといえるものが考案されるなど、研究は広がりを見せています。

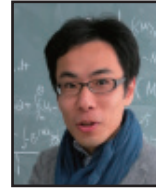
準定常モンテカルロ法のイメージ



確率解析とその応用

<http://www.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/prob/>

確率解析は、ブラウン運動を代表とするランダムな粒子の軌跡に関する微分積分学です。軌跡で微分したり積分したりするので、無限次元の解析学ということになります。当研究室では確率解析及び関連する理論の研究を通して、自然現象・社会現象を解析するための枠組みを構築しています。ファイナンス確率モデル研究グループ（関根研究室）、確率過程論研究グループ（矢野研究室）と密接に連携を取りながら、講座を運営しています。



深澤 正彰 教授

fukasawa.m.es@osaka-u.ac.jp



世良 透 講師

sera.toru.es@osaka-u.ac.jp

研究の背景

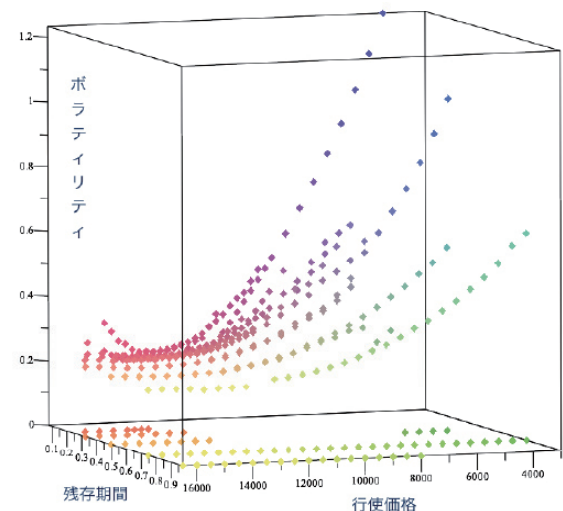
株を売買して資産運用するとしましょう。そのとき最終的な運用収益は、株の保有量を株価の軌跡に沿って積分した値となります。株価の軌跡はとてもギザギザしていますが、このとてもギザギザな軌跡に対する微積分の理論が確率解析です。ブラウン運動を最初に数学的に考察したのは Bachelier (1900) で、彼は株価のモデルとしてブラウン運動を扱いました。次いで Einstein (1905) が、当時

まだ仮説でしかなかった原子論（目に見えない分子の存在）の検証のために、溶媒分子による衝突の結果としてブラウン運動の性質を予言しました。今となっては分子の存在は常識ですが、その最初の証拠はブラウン運動の解析を通してもたらされたのです。それ以降の確率解析の自然現象・社会現象への応用例は語り尽くせません。

数理ファイナンス

上述の投資運用収益は確率積分（伊藤積分）として表現できます。するとファイナンスの問題がすべて確率解析の問題に対応することになります。ファイナンスの問題意識に基づいて、対応する確率解析の問題を考察するのが数理ファイナンスです。経済活動にはリスクが伴います。このリスクを取引して最適に配分し、社会の厚生を上げるために金融派生商品とオプション市場があります。数理ファイナンスの基本問題は、金融取引を通じてどのようにリスクを減らす（ヘッジする）かです。金融システムが国際化、高速化、複雑化した現在、この分野の研究は世界の経済を左右し得る重要なものです。最近ではブロックチェーン技術に依拠した新しい金融システムとして分散型金融（DeFi）が注目されています。当研究室では価格・金利過程モデリング、金融派生商品価格近似計算法の開発、オプション市場データ解析、DeFi の基礎理論研究などを行っています。

ボラティリティ・サーフェス（市場価格とブラック・ショールズ価格との乖離）



間欠力学系の確率論的な極限定理

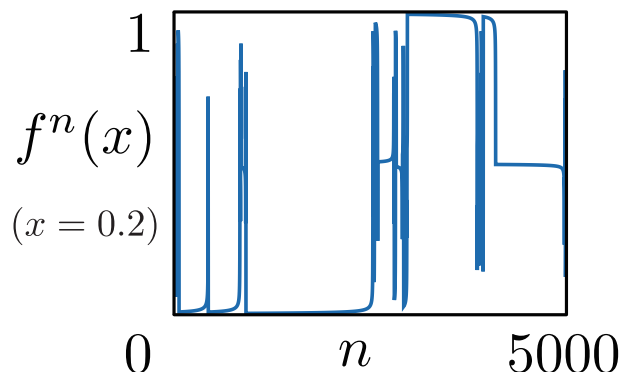
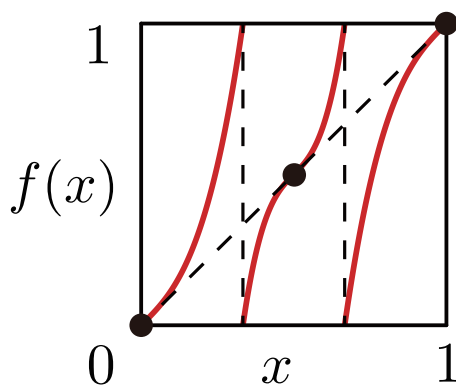
自 然現象や社会現象の中で、しばしば間欠現象というものが観察されます。間欠現象とは、何らかの系が長期的には安定挙動を示すけれども、時折不安定挙動に変化し、その後すぐにまた安定挙動に戻る、という一連の流れを繰り返すという現象を指します。そして多くの場合、安定挙動の持続時間はべき乗則に従うと考えられています。間欠現象の具体例としては、熱対流における安定的な層流から不安定的な乱流への間欠的遷移、量子ドットや生体分子の間欠的発光、金融市場における間欠的な価格変動などが挙げられます。

Pomeau や Manneville はこのような間欠現象を記述する数学的モデルとして間欠力学系を考察しました。現在ではこのモデルは数学・統計物理学の観点から広く研究されています。間欠力学系とは主に、中立不動点（微分係数 1 の不動点）を持つような非一様拡大的な区間写像 f の反復合成 $x, f(x), f(f(x)), \dots$ による離散力学系を指します。間欠力学系の軌道は長時間中立不動点に密着しますが、時折中立不動点を離れ短期的にカオス的な振る舞いを見せた後、再び中立不動点に密着する、という意味で間欠性を有しています。

一般に力学系を研究する上で、定常状態への収束などを論ずるエルゴード理論は非常に有用です。しかし間欠力学系の中には、通常のエルゴード理論の枠組みには収まらない

い、絶対連続不変測度が確率測度に正規化できず無限測度になってしまうようなものもあります。これは物理的には非平衡系を考えているということに相当します。この場合、Birkhoff のエルゴード定理（大数の法則に相当する定理）では間欠力学系の長時間挙動を上手く捉えることはできません。それでもなお確率論における更新理論の類推によって、間欠力学系に初期分布を与えた下での様々な確率論的な極限定理が研究されてきました。例えば、複数の中立不動点への滞在時間割合に関する逆正弦法則や、中立不動点遠方への滞在時間に関するダーリング・カッツ型の極限定理、十分大きい時刻において中立不動点遠方に滞在している確率の精密評価などが挙げられます。

また最近では古典的な更新理論のみならず、一次元拡散過程の周遊理論の類推から、間欠力学系に対する逆正弦法則の多次元化やその関数型拡張が得られています。間欠力学系と一次元拡散過程は出自などは全く異なりますが、両者とも更新が起こるまでの時間間隔が典型的にはべき乗則に従うなど類似する点が多く、後者の研究手法を前者に転用することがしばしば可能です。逆に、間欠力学系で既知となっている確率評価の類推から、一次元拡散過程の確率評価を考察するという考えられます。このような間欠力学系と一次元拡散過程の学際的な研究が近年進んでいます。



中立不動点を持つ非一様拡大写像とその反復合成による間欠力学系の軌道

マルコフ過程に関連する極限定理とその応用

<http://www.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/prob/>

時 間と共に変化する偶然現象の数学モデルである確率過程、特にマルコフ過程と呼ばれるクラスの確率過程に対し、極限定理の確立とその応用についての研究を行っています。極限定理とは、何らかの極限をとることによって浮かび上がる普遍的な性質について記述するものです。本研究室は関根・深澤両研究室と協働で研究・教育活動を行い、数理ファイナンスや保険数学等への様々な応用も探ります。



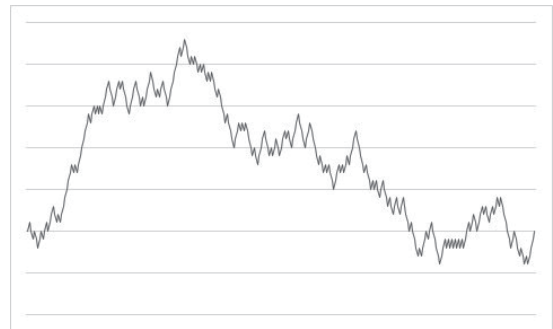
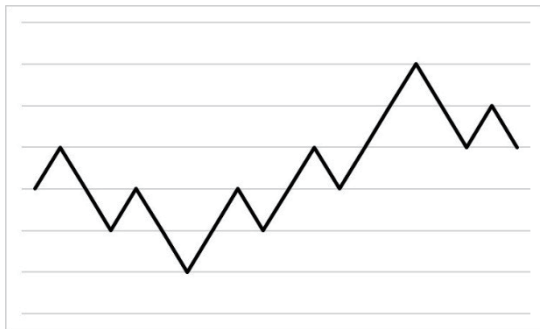
矢野 裕子 教授

y.yano.es@osaka-u.ac.jp

研究の背景

確 率過程は、自然界や社会において観察される、時間と共に変化する偶然現象の数学モデルです。未来の法則が現在状態のみで決定し過去の経過の影響を受けない性質を持つ確率過程をマルコフ過程といいます。最も基本的なマルコフ過程はブラウン運動で、コイン投げによって作られるギザギザの

不規則運動（ランダムウォーク）の標本路のスケール極限として現れます（ドンスカーの不変原理と呼ばれる極限定理です）。極限定理を考える目的は、ランダムウォークからブラウン運動が現れるというような、例えば長い時間経過したものを遠くから眺めることによって、何らかの普遍性を見出すことにあります。



ランダムウォークの標本路

伊藤の周遊理論

マ ルコフ過程の標本路が原点に滞在する時間は測度ゼロですが、原点付近に滞在する時間の密度として局所時間が定義されます。局所時間を用いると、標本路を、原点を出発して原点へ戻る小さい標本路に分解することが出来ます。この小さい標本路は周遊（excursion）と呼ばれます。伊藤清は

1960年代に、周遊の全体が周遊空間と呼ばれるある関数空間に値をとるポアソン点過程を定め、その法則が周遊空間上のシグマ有限測度によって特徴付けられることを示しました。伊藤の周遊理論によって、マルコフ過程の標本路の詳しい性質を調べることが出来ます。

逆正弦法則

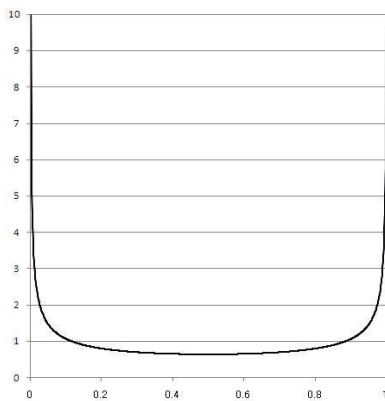
逆正弦法則は、1939年にフランスの数学者 Paul Lévy によって得られた、一次元ブラウン運動の正側滞在時間分布に関する結果です。正側滞在時間分布は滑らかな関数 $f(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{x(1-x)}}$ ($0 < x < 1$) を密度関数として持ちます。この関数は下のグラフを見て分かる通り、区間の両端点で発散するU字型曲線です。尚、密度関数を積分した分布関数が $F(x) = \frac{2}{\pi} \arcsin \sqrt{x}$ ($0 \leq x \leq 1$) とな

ることから、この分布は逆正弦法則と呼ばれます。この定理が意味するところは、ある時刻までに一次元ブラウン運動が正側に滞在する時間の割合は、丁度半分の $1/2$ に近いことは尤もらしくなく、0 か 1 に近いことが尤もらしい、ということです。この興味深い定理は、これまでに様々な確率過程に対して一般化が考察されてきました。例えば、歪ベッセル拡散過程の正側滞在時間分布の確率密度関数は以下であることが知られています（但し、 $0 < \alpha < 1$, $0 < p < 1$ ）：

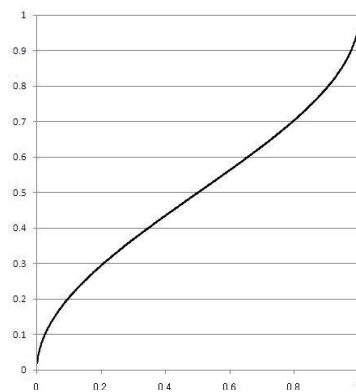
$$f_{\alpha,p}(x) = \frac{\sin \alpha \pi}{\pi} \frac{p(1-p)x^{\alpha-1}(1-x)^{\alpha-1}}{p^2(1-x)^{2\alpha} + (1-p)^2x^{2\alpha} + 2p(1-p)x^{\alpha}(1-x)^{\alpha} \cos \alpha \pi}, \quad 0 < x < 1$$

この分布は Lamperti の法則と呼ばれます。（ $\alpha = p = 1/2$ の場合が一次元ブラウン運動の逆正弦法則です。）一次元拡散過程への一般化の研究として、分布関数の端点における漸近挙動に関する研究（笠原 - 矢野（2005））や密度

関数の存在と連続性及び端点における漸近挙動に関する研究（渡辺 - 矢野 - 矢野（2005））、マルチレイ上の拡散過程の滞在時間同時分布に関する研究（矢野（2017））等の結果が得られています。



密度関数 $f(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{x(1-x)}}$ のグラフ



分布関数 $F(x) = \frac{2}{\pi} \arcsin \sqrt{x}$ のグラフ

処罰問題

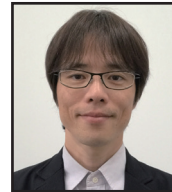
2000年代にフランスの Marc Yor たちによって、ブラウン運動にある重みをかけて正規化したものの長時間極限が調べられました。処罰問題（penalisation）と呼ばれる問題です。例えば最大値過程の関数で重み付けたときに得られる極限測度の下では、もともと再帰的であった過程が過渡的になり、更にある時点から最大を更新出来なくなります。このような様子が「処罰」と名付けられた所以です。また、極限測度は Azéma-Yor マルチンゲールと呼ばれる確率過程によって特徴付けられますが、Azéma-Yor マルチンゲールは処罰問題以

外の問題でもしばしば注目されるものであり、様々な問題との関係性が示唆され、そのため処罰問題は広く関心が持たれています。処罰問題は、安定過程への一般化が考察され、その構造の一端が明らかになりました（矢野 - 矢野 - Yor（2009、2010）、矢野（2013）等）。これらの研究には伊藤の周遊理論が用いられ、消滅過程の調和変換を通して処罰問題が論じられています。処罰問題には解決されるべき問題がまだ多く残っており、その解決と応用の考察が本研究室の研究テーマの一つです。

情報化社会を支えるシステム制御理論

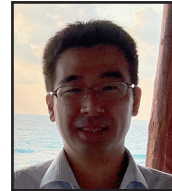
<https://www.cis.sys.es.osaka-u.ac.jp/>

サイバーフィジカルシステムは、スマートフォン・PC・タブレットに加え、自動車・家電・住宅・ドローン・ロボット・人工衛星など様々な機器が通信やセンシングによってつながることで、大規模なネットワークシステムになります。このような大規模システムにはスケーラビリティやロバスト性が備わった管理技術が求められます。本研究室では、サイバーフィジカルシステムに関する技術革新を起こすため、制御理論・最適化・グラフ理論・群論・多様体論・ニューラルネットワークなどを用いて課題の本質を捉えた理論体系を構築し、それを群ロボット・ドローンやスマートモビリティなどへ応用する研究を行っています。



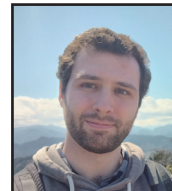
櫻間 一徳 教授

sakurama.kazunori.es@osaka-u.ac.jp



藤本 悠介准教授

fujimoto.yusuke.es@osaka-u.ac.jp



カルネレロ ダニエル助教

carnerero.daniel.es@osaka-u.ac.jp

研究背景とアプローチ

サイバーとフィジカルの融合によって、経済発展と社会的課題の解決を両立する社会「Society 5.0」の実現は、科学技術発展の重要な方向性として位置づけられています。このような社会では、モノ同士が通信・センシングを介してサイバー的につながったネットワークシステムが大規模化していきます。モノとして、スマートフォン・PC・タブレットに加え、自動車・家電・住宅・ドローン・ロボット・人工衛星など様々な機器があり、これらが社会インフラの基盤となることが見込まれています。このような大規模システムの管理には、負荷がシステムの規模によらない「スケーラビリティ」、システムの部分的な故障への耐性「ロバスト性」が求められています。その実現のために、現在、様々な技術の研究開発が進められています。例えば、制御工学の分野では、モノが通信・センシングによって得られる局所情報のみを用いて「分散制御」するための技術や様々なモノから得られる「データ」を活用するための技術が研究されています。これらは、将来、社会インフラを高機能・高効率化するための技術基盤になることが期待されています。

本研究室では、数理的アプローチによってサイバーフィジカルシステムにおける技術革新を起こすというミッションに向けて、理論・応用の両面から研究を行っています。理論面では、制御理論を軸に、最適化・グラフ理論・群論・多様体論・ニューラルネットワークなどの数学的ツールによって課題の本質を捉えた理論体系を構築しています。応用面では、群ロボットの実機検証や電力・交通システムへの応用を企業との共同研究で進め、構築した理論の実用可能性を拡大しています。今後は、他分野の技術との融合で、SDGsの実現に向けて様々な社会課題を解決する研究を目指します。

自律移動エージェント群の分散制御

自律移動するエージェントが通信やセンシングによってつながりタスクを実行する「自律移動エージェント群」は、様々な応用が期待されるサイバーフィジカルシステムの一つです。例えば、ロボット群によるマッピング・倉庫管理、ドローン群によるビル点検・荷物搬送、人群の誘導、自動運転車の隊列走行などの応用が考えられます。エージェント同士は相対位置を互いに観測するため、得られる情報は自身の位置・姿勢およびセンサの種類・性能に依存します。本研究では、このような状況によって異なる情報をもとに共通のタスクを実行するための分散制御法を開発します。具体的な課題として、異種ロボット群・人・環境による協調制御、ドローン群やロボット群によるフォーメーション・荷物搬送、移動体群のタスクアサインメントなどがあります。



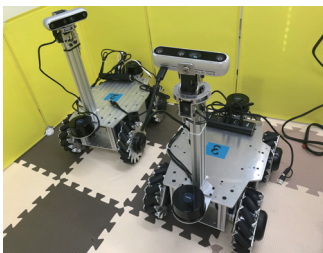
フォーメーション
ロボット群



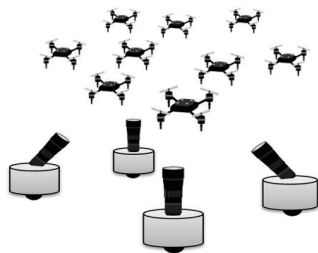
ロボット・ドローン・
作業員による協調

移動体群による リアルタイム測位・認識

リアルタイム測位や認識はスマートフォン・カーナビで日常的に使われており、移動体の自律化のための重要な要素技術です。現在の測位は、主に屋外でGPSを用いるか、実験室でモーションキャプチャなどの外部装置を用いて行われており、これらを利用できない屋内・トンネル・橋脚下などの非GPS環境での測位は難しい課題です。本研究では、複数の移動体による分散協調センシングによって、外部センサを使えない環境においても高精度なリアルタイム測位・認識を実現する技術を開発します。具体的な研究課題として、マルチエージェントによる分散協調自己・物体位置推定、複数カメラのマルチビュー学習による認識などがあります。



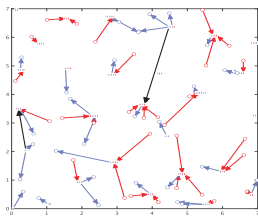
リアルタイム測位・
マッピング用ロボット



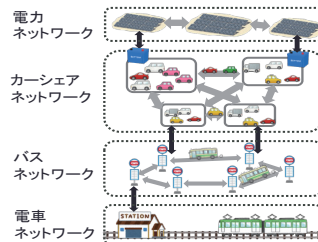
ロボット群による
ドローンの測位

スマートモビリティにおける 基礎技術開発

スマートフォンやコネクテッドカーを用いた次世代交通システム「スマートモビリティ」では、渋滞・事故など交通問題の解決や新しいサービス形態（MaaS: Mobility as a Service）の創発が期待されています。本研究では、様々なモビリティやエネルギーの形態を組み合わせ、個人の移動と社会の持続可能性を両立するための基礎技術の開発を目指します。具体的には、カーシェアリングサービスにおける再配置・動的料金による車両偏在問題の解決、信号機・車両の分散制御による渋滞緩和、カーシェアリング・電車・バスなどの様々な交通手段やエネルギーマネジメントを組み合わせた効率的な社会サービスの設計などの研究課題があります。



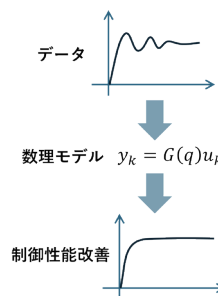
カーシェアリングシステムに
おける車両配送（黒線）と
顧客割当（赤青線）



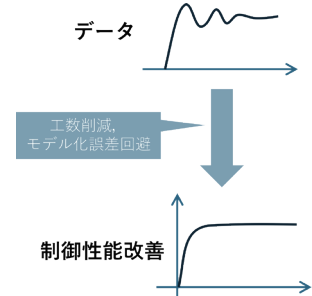
様々な交通手段や
エネルギーマネジメントを
組み合わせた社会サービス設計

観測データに基づく 制御器パラメータ調整

大量生産された機械は、経年劣化や製造工程の差によりそれぞれが微妙に異なる挙動を示します。このため工場で調整された制御器は必ずしも個別の機械にとって適切なものではなく、振動の発生や消費エネルギーの増大が生じる場合があります。こうした問題を踏まえ、個別の機械（システム）に対して適切な制御器を調整するために稼働データに基づいて制御器を調整する方法を研究しています。より具体的には、線形システムを対象とした一度だけの予備実験から制御器を改善する One-shot 手法や、一般の非線形システムにも適用可能な反復的な改善手法の提案を行っています。



モデルベース制御器設計
の概念図

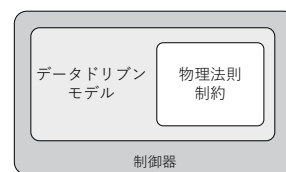


データ駆動制御器設計
の概念図

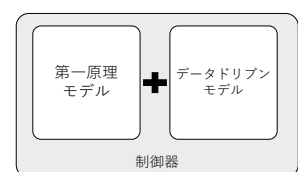
第一原理とクリギングの結合 モデルによる非線形システムの モデリングと制御の効率化

非線形システムは、単純な線形演算によって表せない複雑な現象の分析と理解のために不可欠です。また、線形システムと違って、カオスや分岐をはじめとする多様な挙動を表すことができます。非線形システムを適切に理解することは、複雑な挙動を制御し、プロセスや設計を最適化するために必須です。つまり、非線形性を扱う能力は、科学や技術を前進させる上で必要不可欠であり、伝統的な線形アプローチで対処できない問題を解決するためのツールとなれます。

このため、対象システムの非線形ダイナミクスを適切に表現するモデルの作成が不可欠です。本課題では、第一原理モデルと機械学習に基づいたブラックボックスモデルを結合することによって、効率的でロバストな制御器を設計するためのデジタルツインを構築することを目指しています。



提案した制御器構成 1
(Physics-informed Kriging)

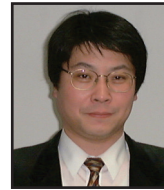


提案した制御器構成 2
(Hybrid modeling)

知的で柔軟なシステム計画技法の開発

<https://www-inulab.sys.es.osaka-u.ac.jp/>

本研究室では、従来の決定科学やシステム技法に加え、情報科学や知能工学を導入した知的意思決定支援技術、システム計画技法の開発を目指しています。意思決定論や数理計画法、ファジィ理論、ラフ集合、アルゴリズム論、ゲーム理論などの基礎理論を研究するとともに、これらに基づいた新しい意思決定法、システム評価手法、モデリング、最適化手法、データ解析手法、社会システム技法、分散最適化法、自律分散アルゴリズム、ソフトコンピューティングなどの開発と応用を行っています。



乾口 雅弘 教授

inuiguti@sys.es.osaka-u.ac.jp



林 直樹 准教授

n.hayashi@sys.es.osaka-u.ac.jp



印南 成章 助教

innan@sys.es.osaka-u.ac.jp

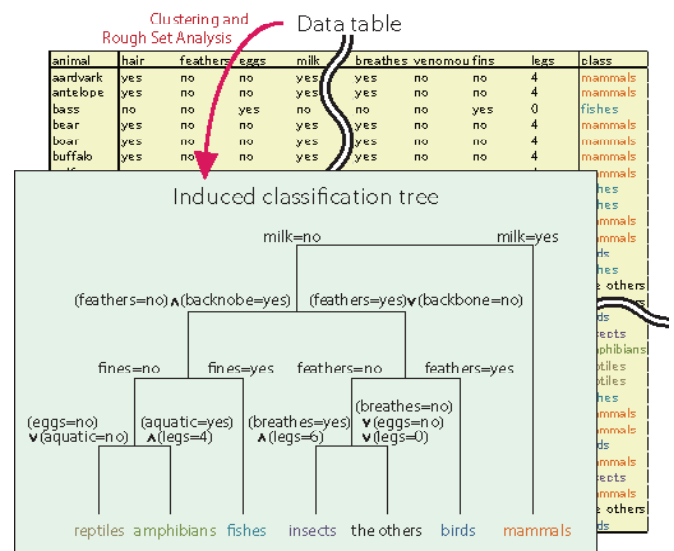
柔軟な知的決定支援をめざして

当研究室では、種々の状況下での意思決定を支援するための理論と方法を研究し、現実問題への応用をめざしています。問題設定とともに人の望みや好みを数理モデルで表現し、合理的な評価基準や判断基準を定め、最適化を行うことの他、熟練者や専門家の知識や推論をモデル化し、決定支援に役立てることを考えています。

結果が明確にわからない場合や現況がはっきりと把握できていない場合には、不確実性のもとで決定を下さなければなりません。ファジィ理論を用いて不確実性を取り扱い、可能性と必然性といった概念に基づいた新しい決定方法を提案し、種々の問題設定での効率的な解法を研究しています。不確実性を可能性と必然性で扱えば、問題が扱いやすくなる事が多く、この性質を活かした一般化をめざしています。

また、人による評価は一つの実数値で表せるほど厳密ではなく、ある程度幅を持っていると考えられます。一対比較などによる人の好みに関するデータから評価値を一つの値で与える

数理モデルで選好を表すのではなく、幅をもった区間で評価値を与える区間モデルで柔らかく選好を表す方法を研究しています。評価値が幅をもつことにより、代替案比較における確信度や評価者がどこまで譲歩できるかを示す許容度などが評価できるようになります。多基準意思決定やグループ意思決定などの複雑な問題へ、これらのロバストネスやトレランスに関する



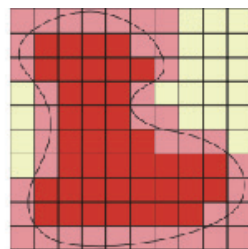
生物データの解析結果

階層的クラスタリングとラフ集合によるルール抽出法を用いた解析結果。分類ツリーにおける分岐点の左右に示した記号は条件を示している。



ファジィ集合

ファジィ集合は境界がはっきりしない集合



ラフ集合

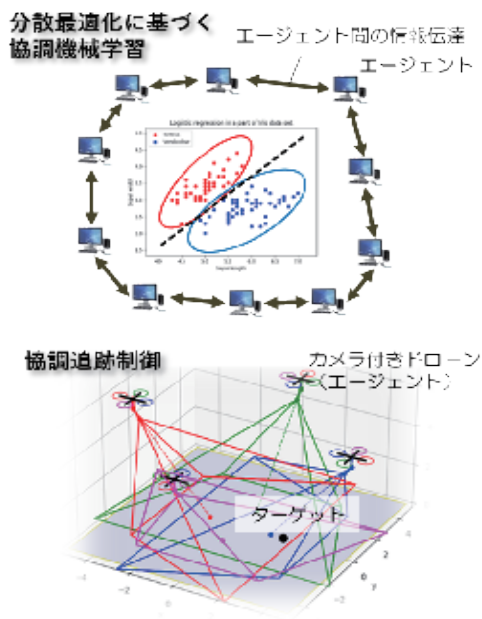
ラフ集合は境界がブロックで集合を内と外から近似したもの

過去の種々の評価データを活用して評価・決定した方が決断しやすく、その正しさに確信をもてるかと思います。本研究室では、意思決定支援に向けたデータ解析に関しても研究を行っています。特に、人による評価は矛盾していたり、曖昧であることが多いことから、データ間の矛盾を合理的に処理して扱うラフ集

合理論や、曖昧さをうまく扱うファジィ推論モデルを研究しています。評価に関連する重要な要因を見い出したり、データを if-then ルールを用いて人に分かりやすい形で要約する方法を研究するとともに、現実のデータへの適用を試みています。

マルチエージェントシステム による分散最適化・機械学習

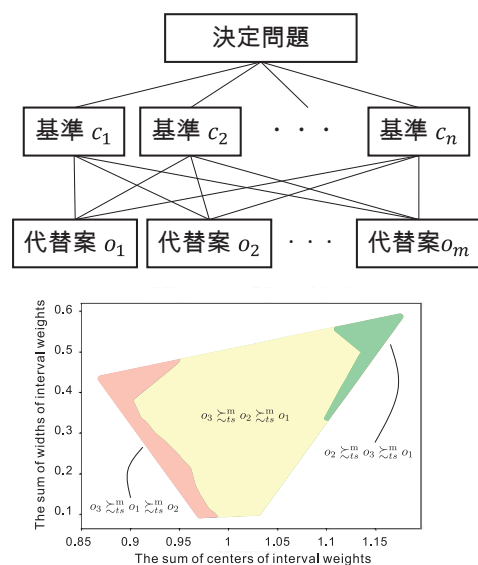
自律的に意思決定を行う行動主体をエージェントといい、多数のエージェントから構成されるシステムをマルチエージェントシステムといいます。マルチエージェントシステムでは、エージェントが相互に影響を及ぼし合うことでシステム全体の振る舞いが決まります。IoT やビッグデータ処理に代表されるように、近年、多数のサブシステムが有機的に結合した大規模システムにおける最適化や制御の重要性が増しています。このような大規模システムは、個々のサブシステムをエージェントとし、サブシステム間のつながりをネットワークで表現することで、マルチエージェントシステムとしてモデル化できます。本研究課題では、このような大規模ネットワーク化システムに対し、ネットワークを介した相互作用によりサブシステム同士を巧みに連携させ、自律分散的にシステム全体としての目的を達成するための分散最適化や協調制御について、数理的アプローチによる基礎理論の構築を行っています。また、複数のエージェントで自律分散的に学習を行う協調機械学習への分散最適化の応用やセンサネットワークへの協調制御の応用などにも取り組んでいます。



分散最適化と協調制御：複数のエージェントがネットワーク上の情報伝達を介して自律分散的に最適化や制御を行う。

評価の曖昧さを加味した 意思決定解析と支援

日常生活において、複数の代替案の中から良い代替案の選択が求められる意思決定の場面は多く存在します。このような場面では、考える評価基準によって良い代替案が異なる状況が多々あります。そのような複数の評価基準の下で、代替案の選択を行う問題を多基準意思決定問題といいます。多基準意思決定において、広く用いられている決定支援法の一つとして、階層分析法(AHP)が挙げられます。AHPでは、決定問題を「評価基準」、「代替案」によって構成される階層構造に分解し、主観的な判断を定量化して意思決定を行います。各階層において、項目間の対比較によって、意思決定者の選好情報を得て対比較行列を作成して、これらの行列から各項目の重要度を求め、各層の重要度により最終的な代替案の重要度を求め、代替案の順序を得ることにより、決定支援が可能となります。しかし、意思決定者から得られる情報には曖昧さが含まれていることが多くあります。そこで、本研究では、意思決定者の評価に含まれる曖昧さを「区間」、「ファジィ数」、「二重区間」などを用いて表現して、その下で曖昧さを考慮した意思決定支援を実現するシステムの開発を目指しております。本システムを実現するにあたり、曖昧さを表現した重要度の推定法の数理モデルの提案を行っております。また、曖昧さ含む重要度の下での代替案の順序付け法の研究も行っており、これまで考慮されていなかった、意思決定者の判断に含まれる可能性のある代替案順序の発見にも取り組んでいます。



カリキュラム

学際選択科目

境界専門科目

基盤専門科目

社会システム数理ゼミナールⅠ-Ⅳ			社会システム数理研究Ⅰ-Ⅳ	
数学解析	金融数理概論	統計的推測	統計数理概論Ⅰ・Ⅱ	応用インテリジェント制御
確率解析	金融数理特論	時系列解析	データ科学特論Ⅰ・Ⅱ	サイバーフィジカルシステム
確率微分方程式	保険数理概論	数理概論Ⅰ・Ⅱ	システム計画論	
確率過程論	年金数理	数理特論Ⅰ・Ⅱ	知的計画論	
数理計量ファイナンス特別講義Ⅰ-Ⅳ			システム数理特別講義Ⅰ・Ⅱ	
数理解析	機械学習の数理Ⅰ・Ⅱ	量子情報科学	応用ロボット学特論	
数理モデル論	統計モデリング	適応ロボット学特論	知能ロボット学特論	
非線形現象解析	多変量解析	ソフトロボット論	画像システム論	
非線形構造解析	統計的学習理論	信号解析論	データベースシステム論	
関数解析Ⅰ・Ⅱ	力学系理論	複合現実感システム論	など	
医療生体データ科学	システム安定解析	計算生体力学	科学技術論 A・B	
非線形力学特論	医療生体データ科学	ニューロメカニクス	など	

就職状況

社会システム数理領域の就職窓口として基礎工学部数理科学コースと知能システム学コースがあり、毎年 120 社を超える求人があります。業種も電気、通信、情報、製薬、金融、機械、重工、製鉄など多岐に渡っています。また、官公庁や大学へ就職する学生もいます。主な就職先は以下のとおりです。

1. 企業会社

- 電気関係： パナソニック、東芝、日立製作所、三菱電機、シャープ、日本電気、ソニー、AESC グループ
- 情報・通信関係： 日本 IBM、富士通、NTT (R&D、西日本、ドコモ CS 関西、コミュニケーションズなど)、NHK、毎日放送、日本マイクロソフト、KDDI、サミットシステムサービス、NSD、日本 HP、ヤフー、DeNA、野村総合研究所、三菱 UFJ インフォメーションテクノロジー、LINE ヤフー、PwC コンサルティング、セリオ、シーエーシー、アシスト、かまちっかい、エリジオン
- システム関係： インフォコム、日鉄ソリューションズ、三菱 UFJ インフォメーションテクノロジー、富士通フロンテック、三菱コントロールソフトウェア
- 製薬関係： 武田薬品工業、サノフィ・アベンティス、アステラス製薬、小林製薬、P&G、日本イーライリリー
- 金融・保険関係： 三井住友銀行、三菱 UFJ 信託銀行、三井住友信託銀行、SMBC 日興証券、大同生命保険、三菱 UFJ 銀行、ゴールドマンサックス証券、野村証券、日本生命、JA 共済、フコク生命、大樹生命、住友生命保険、全国労働者共済生活協同組合連合会 (全労済)、りそなホールディングス、損保ジャパン、大和証券、明治安田生命、三井住友海上火災保険、みずほフィナンシャルグループ、第一生命保険
- 機械・精密： トヨタ自動車、日産自動車、ダイハツ、デンソー、村田製作所、キヤノン、リコー、コニカミノルタ、富士フイルム ビジネスイノベーション、オムロン、ソニー、日立製作所、ファナック、
- ゲーム関係： 任天堂、藤商事、GREE、ドワンゴ、クリーチャーズ
- シンクタンク： 野村総合研究所、三菱 UFJ トラスト投資工学研究所 (MTEC)、みずほリサーチ & テクノロジーズ
- 鉄鋼・重工業： 日本製鉄、神戸製鋼、JFE スチール、川崎重工業、三菱重工業、IHI
- その他： 帝人、凸版印刷、関西電力、北陸電力、中国電力、JR 西日本、JR 東海、阪神電鉄、鹿島建設、高等進学塾、ベネッセ、博報堂、三井物産、住友商事、アクセンチュア、協和キリン、ENEOS、デロイトトーマツリスクアドバイザリー、ニトリ

2. 官公庁・国立研究所

厚生労働省、農林水産省、総務省、統計数理研究所、特許庁

3. 国公立大学

大阪大学、東京大学、九州大学、鹿児島大学、大阪公立大学、兵庫県立大学、静岡大学、滋賀大学、神戸大学、熊本大学

4. 私立大学

駒澤大学、早稲田大学、関西学院大学、関西大学、同志社大学、大阪電通大学、明星大学、大東文化大学、法政大学、立命館大学、摂南大学

5. 高等学校

大阪府立高校、高槻高校、清風南海高校

大阪大学 大学院基礎工学研究科 システム創成専攻 社会システム数理領域

<http://www.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/ssm/>

〒560-8531 豊中市待兼山町1-3

社会システム数理領域 事務室

TEL : 06-6850-6096 FAX : 06-6850-6097