OSAKA UNIVERSITY

ENGINEERING SCIENCE

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高機能な組込み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
ファイナンス数理モデル 研究グループ
確率解析 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

複雑システム 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、組込みシステムやネットワーク化された複雑なシステムの解析・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。

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

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/

内田 雅之 教授
uchida@sigmath.es.osaka-u.ac.jp

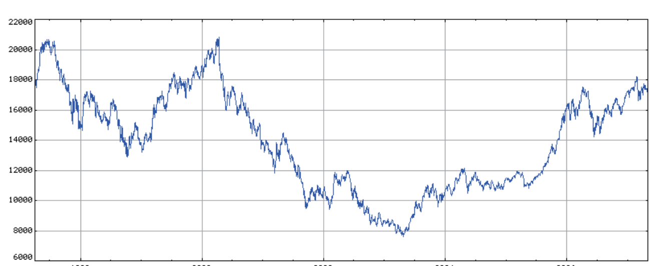
森川 耕輔 講師
morikawa@sigmath.es.osaka-u.ac.jp

千葉 航平 助教
chiba@sigmath.es.osaka-u.ac.jp

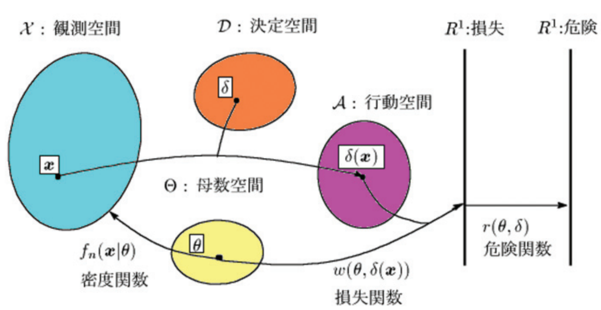
金融データの統計解析及びそれに必要な統計的推測決定理論の研究をしています。特に確率微分方程式モデルなどの確率過程モデルに対してフィッシャーの最尤法やガウスの最小自乗法を適用して、その理論的考察に取り組んでいます。また、保険数理の問題にも取り組み、リスク理論、破産理論、再保険戦略などに対する現代確率論的アプローチや、それらに付随する統計的問題を研究しています。

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。そのことにより、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。



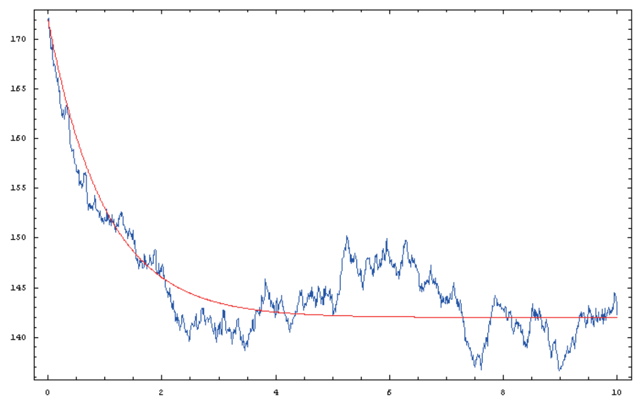
日経平均株価



統計的推測決定図式

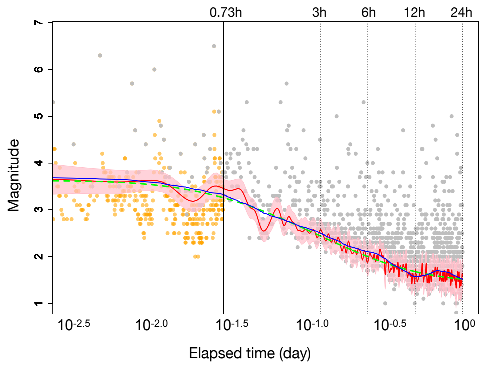
研究の経過と展望

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っております。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定関数を構成し、M－推定量の１次漸近有効性を証明しました。



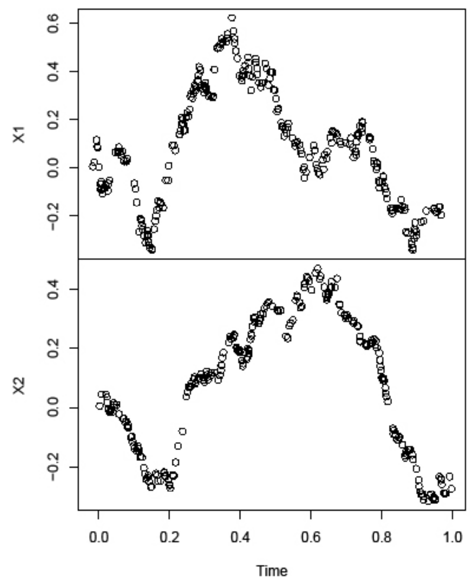
微小拡散過程とダイナミカルシステム

森川講師は確率過程モデルの中でも特に、生存時間解析や統計地震学の解析を行っています。生存時間解析では、新しく開発された薬剤の有効性の評価を臨床試験のデータから行います。また統計地震学では、ある規則に従ってランダムに発生する本震や余震のデータから、その余震の統計的性質を解明し、余震発生の確率予測を行います。これらのデータのメカニズムは非常に複雑で、例えば生存時間解析であれば患者の死亡などによる脱落、統計地震学であれば本震直後の SN 比の悪さから余震の未検出が生じます。これらの複雑なデータに対する統計的推測法の理論構築をしています。



中越地震 (2004) に対する余震の検出確率の推定

千葉助教は、非整数ブラウン運動に関連する確率過程に対する統計推測理論に興味を持っております。非整数ブラウン運動はブラウン運動を一般化した確率過程の一つで、自然科学やファイナンスなど様々な分野でモデルとして用いられており、その統計推測理論の構築は重要です。しかし、非整数ブラウン運動（および関連した確率過程）はセミマルチンゲールやマルコフ過程ではないため従来の確率論的な道具が適用できないことも多く、その統計推測理論にはまだ多くの問題が残っています。現在は特に、非整数ブラウン運動で駆動される確率微分方程式の解のドリフトパラメータ推定の問題に取り組んでいます。また、リード・ラグ構造をもつ２つの非整数ブラウン運動間のリード・ラグ推定にも興味を持っています。



リード・ラグ構造を持つ
２つの非整数ブラウン運動の観測データ

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。

数理計量ファイナンス講座 | ファイナンス数理モデル研究グループ

確率モデルを用いた解析

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

関根 順 教授
sekine@sigmath.es.osaka-u.ac.jp

現実世界において起こり得る様々な現象をモデル化する際、不確実性を如何に記述するかが重要なポイントとなります。最近では特に、様々な不確定要素を孕んだ複雑な金融市場に対する適切なモデル化、及びその数理モデルの解析が非常に大きな研究テーマとして持ち上がっております。確率論的な手法を用いて金融モデルの解析を行う分野は「数理ファイナンス」と呼ばれ、金融商品の理論価格の算出やリスク管理、最適投資スケジュールの策定等、様々な場面で用いられています。本研究室では数理ファイナンスの各テーマに対する研究や、その背後にある数学理論・特に確率制御と呼ばれる動的最適化理論に関する研究を行っています。

数理ファイナンスの諸問題

数理ファイナンス (mathematical finance, or stochastic finance) 分野のいくつかのトピックスを興味の中心に持って研究しております。大雑把に言うと、金融市場の（確定的ではない）確率的なふるまいをする数理モデルを構成して、このモデルを用いて金融市場上の問題を解析します。例えば、

- さまざまな金融商品の理論的価格を決定したり、
- 投資家や金融機関の保有している資産の「リスク量」を計測したり、
- 「最適」な投資手法や消費ルールを考察したり、

などといった問題が典型的です。

これらを例にとっても、現実にはどれも色々な要素が複合的に組み合わさった複雑な問題です。魑魅魍魎とした複雑な現実の問題から、如何にしてシンプルな数学的な本質を抽出してくるかが、数理ファイナンス分野で重要なことの一つだと思われます。（一方で、現実に応用する際は、単純化された数学的モデルの限界も十分認識しておく必要があるわけですが。）

また、数理ファイナンスの多くのテーマを研究するためには、背後にある数学、特に確率論に関しても研究を深めていく事が欠かせません。その中でも特に「確率制御」と呼ばれる動的最適化理論は大きな位置付けを占めており、本研究室でも強い関心を持って研究を進めています。

数学の応用分野としては、複数の関連分野との接点を持って今なお発展し続けているような分野です。ですから、学生の方々には興味を閉じることなく拡大させていってほしいと思っております。以下に、本研究室の教員が関心を持っているトピックスをいくつか紹介します。

長期間最適運用に関する研究

金融実務界でも広く知られ用いられている、長期間に渡るファンドの成長率を最適化する手法 (GOP: Growth Optimal Portfolio, あるいは最初にこの手法を情報理論の中で提示した Kelly にちなみ、Kelly Portfolio とも呼ぶ) の発展に関心を持っています。「雰囲気」を出すため、少しだけ数式を用いて表現します。ファンドの成長率が

$$G_T^{\pi} = \frac{1}{T}\left[\int_0^T \pi_t \sigma dw_t + \int_0^T \left\{ r + \pi_t(\mu - r) - \frac{1}{2}|\pi_t \sigma|^2 \right\} dt\right]$$

(r : 安全運用金利 , μ : 危険資産の期待収益率 , σ: ボラティリティ， $(w_t)_{t\geq 0}$: Brown 運動 , $(\pi_t)_{t\geq 0}$: 運用戦略) と表される場合ならば（これは最も基本的な Black-Scholes モデルで危険資産価格過程をモデル化した場合です）、一定投資比率

$$\hat{\pi}_t := \frac{\mu - r}{\sigma^2}$$

が GOP を実現します。

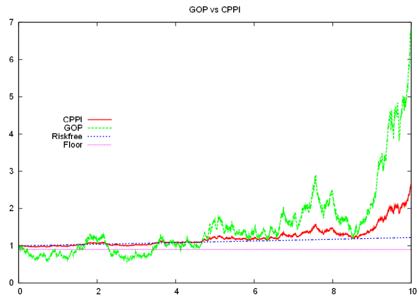
以下の GOP の発展形が現在の関心事です。

(i) リスク回避の要素を陽に盛り込んだ、リスク鋭感的ポートフォリオ最適化。これはリスク鋭感的確率制御の手法のファイナンスの問題への応用です。

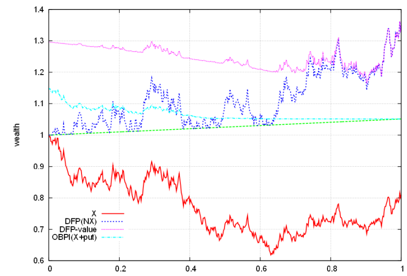
(ii) (i) と密接に関連する長時間大偏差確率制御の研究。平たくいうと、起こる確率が微小な事象（例えばファンドがあるターゲットを下回る確率など）をどうコントロールするかという問題です。

(iii) 制約条件（低下制約、床制約など）を設けて問題を扱うこと。ダウンサイドリスクの低減化の観点からも重要です。確率制御や最適停止問題に関する研究が必要になります。

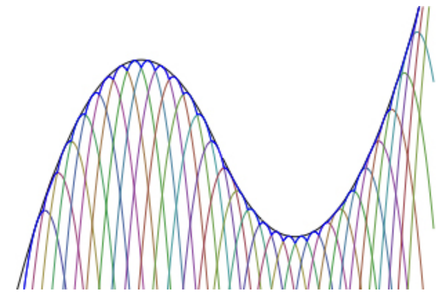
(iv) 実際の金融データに適用した実証分析。その際は、パラメータ推定やフィルタリングに関する研究が重要になります。



GOP とこれに床制約を設けたもののシミュレーション



Dynamic Fund Protection と Option-Based Portfolio Insurance の比較



半凸関数に対する 2 次関数を基底とした max-plus 展開

確率制御における動的計画法に関連する研究

モデルの不確かさを確率論を用いて表現して、時間経過をともなう情報に基づいてある意味での最適な目的値を計算したり、またそれを実現する戦略を求める理論は確率制御と呼ばれています。そもそも制御理論は工学分野を中心に発展してきましたが、金融市場の不確かさはしばしば確率論を使って定式化されるため、数理ファイナンスにおいて有効な手段を与えます。また逆に数理ファイナンスを通じて制御理論に新たな問題が提起されています。

最適な目的値（値関数）やそれを達成する戦略（最適制御）を計算する際に、動的計画法が重要な役割を果たします。例えば、数理ファイナンスにおいては、投資家の資産の期待効用最適化や最適戦略の計算に使われます。このような数理ファイナンスにおける確率制御の現状を念頭におき、制御理論における動的計画法に関連する基礎的・応用的研究をしています。具体的には、古典的確率制御やリスク鋭感的確率制御に現れる動的計画偏微分方程式の確率論的・解析的側面からの研究、それらに対する動的計画的手法の開発などが主なテーマです。これらの研究には確率解析、粘性解などの非線形偏微分方程式の理論が必要とされます。確率制御からある種の極限操作によって現れる決定論的制御や動的ゲームの研究も行っていて、数理ファイナンスの観点からはリスク回避的極限やロバスト性と関連します。また最近は、制御問題に現れる非線形性と親和性の高い max-plus 代数の制御理論における可能性にも関心を寄せています。

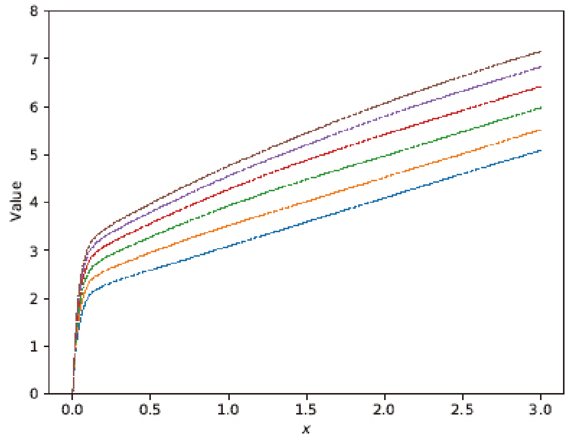
Lévy 過程を用いた保険数学の研究

確率論の重要な研究対象の一つに Lévy 過程と呼ばれる確率過程があります . Lévy 過程は独立増分性や定常増分性という , 非常に扱いやすい特性を持っており , Paul Pierre Lévy 氏や伊藤清氏をはじめとする , 数多くの研究者によって研究されてきました . Lévy 過程の中でも特に , 正の跳びを持たない Lévy 過程は , しばしば保険会社のサープラスを表すモデルとして用いられます . 正の跳びを持たない Lévy 過程の理論を用いて , 保険会社の破産確率の評価や破産時損害額の評価 , 最適配当問題の研究が盛んにおこなわれてきました . ここでは最適配当問題について解説させていただきます .

保険会社は資産を市場で運用し , そこから保険契約者に対して配当金を支払うことがあります . 当然保険契約者は , より多くの配当金を受け取りたいと考えます . そのため , 破産するまでにより多くの配当金を支払える配当方法 (ここでは配当戦略と呼ぶことにします) が何であるかを皆知りたいわけです . 最も多くの配当金を支払える配当戦略 (最適戦略と呼びます) を求める問題を , 最適配当問題といいます . 少し数学的に説明してみます . まず , 保険会社の資産が正の跳びを持たない Lévy 過程 $(X_t)_{t\geq 0}$ の挙動をするとします . 次に , 配当戦略 π をとったときは , 時刻 $t\geq 0$ までに合計 L_t^π の配当金を保険契約者に支払うものとします . また破産時刻を $\sigma(\pi)$, 割引率を $q>0$, 最初のサープラスの値を x とすると , 戦略 π をとったときの期待正味現在価値は ,

$$\mathbf{E}_x\left[\int_0^{\sigma(\pi)} e^{-qt}\,dL_t^\pi\right]$$

と表されます . この値を最大化する戦略 π を知りたいわけです . 現在まで , 最適配当問題は様々な条件下で解かれてきました . 最近では抽象化された状況下での研究も多いため , 様々な Lévy 過程の変動理論の知識や確率解析の知識が必要とされていますが , 純粋数学の観点からも興味深い問題になってきているのではないかと思います .



各配当戦略ごとの期待現在正味価値

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

数理計量ファイナンス講座
ファイナンス数理モデル研究グループ

数理計量ファイナンス講座
確率解析研究グループ

システム数理講座
複雑システム研究グループ

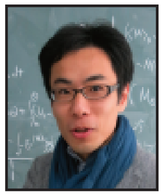
システム数理講座
システム計画数理研究グループ

数理計量ファイナンス講座｜確率解析研究グループ

確率解析とその応用

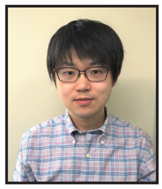
http://www.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/prob/

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。ファイナンス数理モデル研究グループ (関根研究室) 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@sigmath.es.osaka-u.ac.jp

星野 壮登 准教授
hoshino@sigmath.es.osaka-u.ac.jp



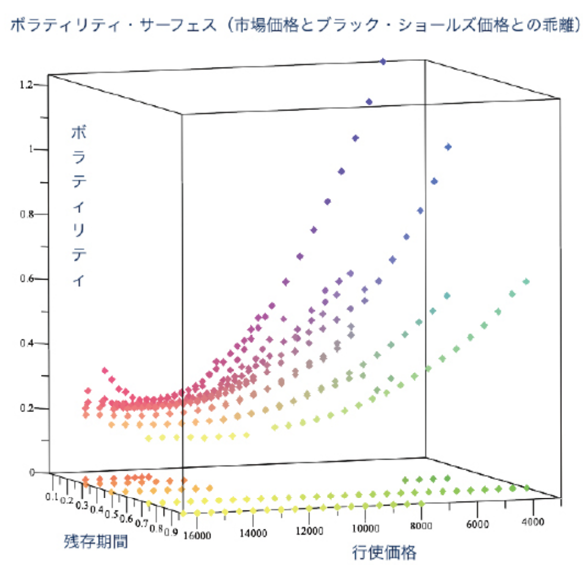
平井 祐紀 助教
hirai@sigmath.es.osaka-u.ac.jp

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バシェリエ (1900 年) で、彼は株価のモデルとしてブラウン運動を扱いました。次いでアインシュタイン (1905 年) 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。



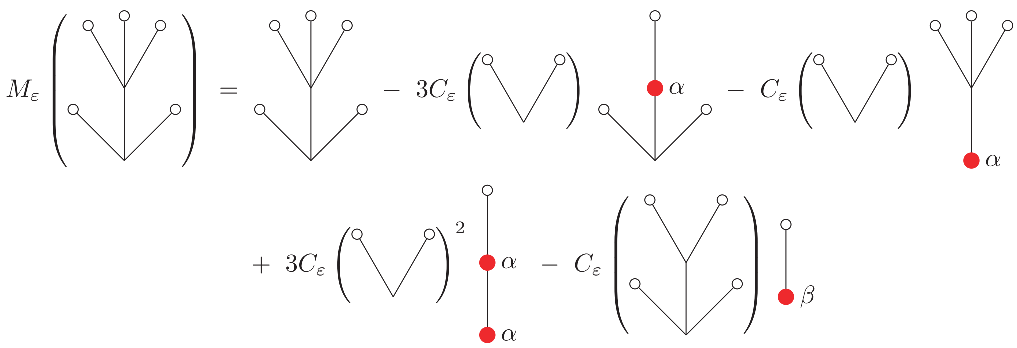
確率偏微分方程式の繰り込み

自然科学では様々な現象を微分方程式で記述しますが、その解はあくまで理論値です。実際には様々なノイズの影響を受け、現象は理論値から揺らぎます。そのような揺らぎを含めた解析を行なうのが、確率微分方程式（stochastic differential equation, SDE）や確率偏微分方程式（stochastic partial differential equation, SPDE）という分野です。SDE では時刻のみに依存する現象を扱いますが、SPDE では複数の変数（例えば時刻と空間の両方）に依存する現象を扱います。

SPDE の数学的な難しさは、ノイズの影響によって解の正則性が低くなるところにあります。例えば SDE でよく扱われる Brown 運動は、連続ですが至るところ微分できない関数を与えます。SPDE の場合はさらに厄介で、正則性が負の関数が現れたりします。微分方程式には未知関数の積がよく現れますが、正則性が負の関数同士の積を考えるのは一般には不可能です。しかし性質の良い特殊な SPDE では､「繰り込み」という無限大を含む演算を施すことで積が定義できる場合があることが知られていました。

より一般の SPDE の繰り込みは、最近新しい理論が登場してようやく可能になりました。Hairer（2014 年 Fields 賞）の正則性構造理論や、Gubinelli、Imkeller、Perkowski のパラ制御解析です。これらのブレイクスルーにより、SPDE の研究はここ数年急速に発展しています。また最近ではこれらの理論の数学的な構造も活発に研究されています。

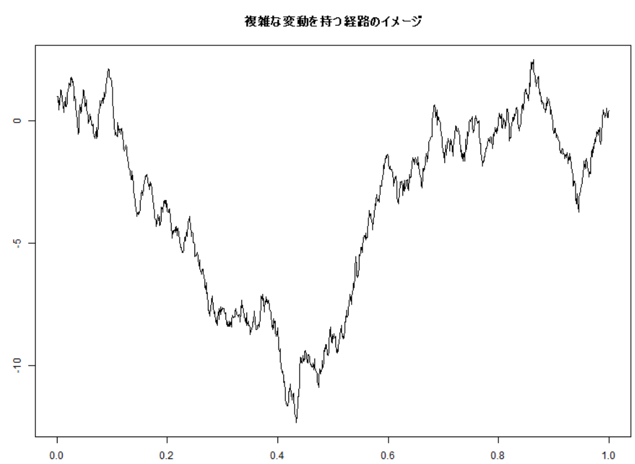
繰り込みの例



経路ごとの確率解析

株価などの危険資産価格をグラフに表すと、非常にギザギザとした振る舞いをすることが知られています。そういった資産を運用した場合、資産全体の価値は保有量を資産価格の動く経路に沿って線積分（特に伊藤積分と呼ばれるもの）した値で得られることになります。株価のような複雑な変動を持つ経路による線積分は古典的な微積分学の範疇では扱えないため、従来は確率積分という方法で取り扱われてきました。

実際に確率積分を構成するには、株価の動きが確率的な意味ではわかっている必要があります。数学的に言えば、確率空間や確率測度という対象が事前に与えられているということを意味します。このように確率積分は現象の背景にある確率に依存するわけですが、その確率を実際に知ることは容易ではありません。ですから、確率モデルの選択にできるだけ依存しない形で確率解析の理論を展開することは、応用上有用であると考えられます。特に近年、ファイナンスにおける以上のような問題意識から、確率モデルになるべく依存しないような形で複雑な経路による線積分を取り扱う試みが盛んになっています。そのような理論のうちには、純粋に解析的な方法によって経路に沿った伊藤積分を調べるものがあります。この理論は経路ごとの確率解析などと呼ばれています。経路ごとの確率解析の研究を進めることで、先に述べた応用面での利点がある他、理論的にも従来の確率解析の適用範囲を広げられることになります。当該分野が盛んに調べられるようになったのは比較的最近のことであり、今後も大いに発展が期待されるものとなっています。



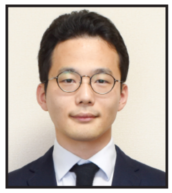
システム数理講座｜複雑システム研究グループ

ネットワーク化社会を支えるシステム理論

http://ushiolab.sys.es.osaka-u.ac.jp/

携帯電話、炊飯器、自動車、ロボット、発電所、ロケットなど、コンピュータ（マイクロプロセッサ）を構成要素としてもつシステムが今やいたる所に存在しています。さらに、最近では、ネットワーク家電のように通信ネットワークを介してシステム間で情報交換を行うネットワーク化システムへと発展しています。このように益々大規模化・複雑化するシステムの解析・設計に必要な基礎理論とその応用、並びに計算機制御のためのソフトウェア開発に関する研究と教育を行っています。

潮 俊光 教授
ushio@sys.es.osaka-u.ac.jp



松原 崇 准教授
matsubara@sys.es.osaka-u.ac.jp

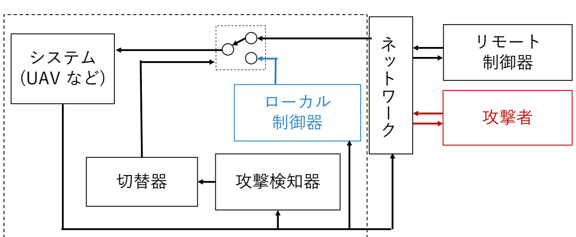
久世 尚美 助教
kuze@sys.es.osaka-u.ac.jp

サイバーフィジカルシステムにおけるセキュリティ

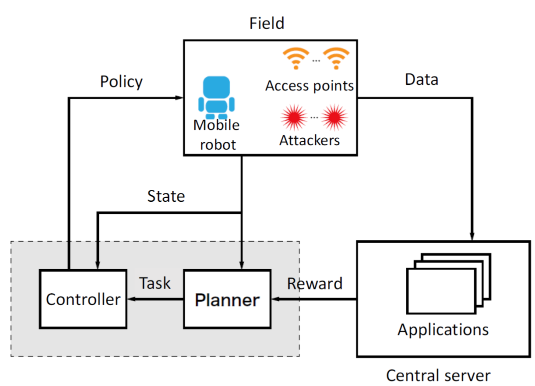
現在では、システム制御のために計算機（マイクロプロセッサ）を用いることが一般的です。このような計算機を用いて制御されるシステムは組込みシステムとよばれています。また、最近の情報通信技術の発展により制御対象と制御器とをネットワークで接続するネットワーク化制御システムが多く存在するようになりました。ネットワーク化によりシステムのスマート化が可能となります。今後益々のシステムのネットワーク化、大規模化が進み、様々な物理システムがネットワークを介して計算機システムとデータ通信を行う複雑システムが多く出現するでしょう。このようなシステムをサイバーフィジカルシステム（CPS）と呼んでいます。

このような CPS の発展を背景とし、2010 年に発見されたイランの原子力発電施設を対象としたマルウェア Stuxnet を皮切りに、物理システムを対象とした攻撃が増加傾向にあります。一方で、従来のセキュリティに関する研究はネットワークシステムを対象としたものが中心となっており、物理システムも考慮したセキュリティの重要性が高まっています。物理システムにおいては、安全性、可用性が重要であり、単に攻撃を検知するだけではなく、攻撃の影響をシステムの機能を維持することが求められます。特に、ネットワーク化システムを対象とし、通信を介して送受信されるデータに対する改ざん攻撃が深刻となっており、対策が重要となっています。そこで、異常検知時に制御系を切り替えることにより安全性、可用性の両立を行うフォールバック制御の導入を行っています。フォールバック制御では、通常時はネットワークを介したリモート制御を行いますが、異常検知時にはローカルに設置されたフォールバック制御器に切り替えることにより、攻撃者によるデータ改ざんの影響を抑え、安全性と可用性の両立を行います。

また、通信データを対象とした攻撃として、妨害電波を発することで通信そのものを阻害するジャミング攻撃も深刻なものとなっています。そこで、強化学習に基づいた、移動ロボットを用いたアンチジャミングシステムについても研究を行っています。スマートホームなどのサービスでは、ネットワークシステムがセンサなどによって得られた情報を、移動ロボットなどを用いて収集、管理、制御を行う必要があります。従来のジャミング攻撃を考慮しない移動ロボットは、タスクを達成するために最短となるような経路を学習、選択しますが、ジャミング攻撃下では、通信そのものが阻害される可能性があるため、最



フォールバック制御の導入による安全性の向上



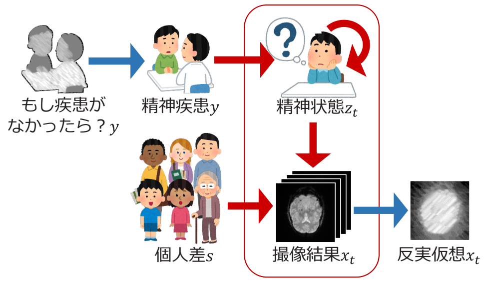
移動ロボットを用いたアンチジャミングシステム

短経路を選択するだけでは必ずしも目的を達成することができません。そこで、通信の成功率を考慮して強化学習を行うことで、ジャミング攻撃を避けつつ、短い経路を選択するようなシステムの構築に取り組んでいます。

ヒトの知識を活かし信頼できる人工知能

近年の人工知能 (AI) システムの飛躍的な進歩は、主に深層学習の進化に支えられています。深層学習は万能近似性と呼ばれる性質をもち、十分な量のデータと計算機があれば、データから任意の入出力関係を学習できます。しかし、このように自動的に学習された関数は人間の理解の範疇を越えており、人がその判断根拠を理解したり、問題が起こったときに修正したりすることができません。いかにして、深層学習から意味のある情報を得るのか、またヒトの持つ知識を与えることができるのかが、大きなテーマです。

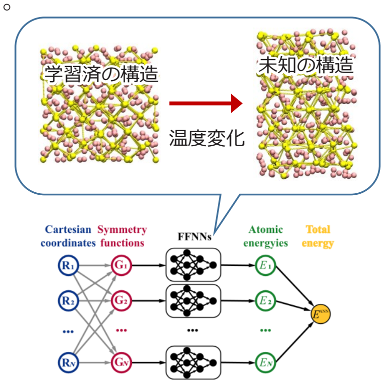
１つのアプローチがベイズ的深層学習であり、ベイズ的モデル化の枠組みに深層学習を組み込んだものです。医療診断 AI を考えてみると、単なる深層学習は被験者が疾患を持っているかどうかしか教えてくれません。しかし、ベイズ的深層学習は疾患の背後にあるプロセスをグラフ構造でモデル化し、「もし被験者が疾患を持っていなかったら?」という反実仮想のデータを生成することで、どの部分が変化したことで疾患があると判断したのかを可視化することができます。根拠を可視化することは、誤った判定が起こったときにその原因を突き止めたり、差別的な意思決定を防いだりすることも可能にします。その他にも、不確実性を定量化して結果の信頼性を評価することも可能です。



背後にあるプロセスをモデル化することで疾患部位を特定できる

もう１つのアプローチが幾何学的深層学習です。機械学習で扱いたい対象の背後には、多くの場合その性質を決める幾何学的構造が存在します。有名なものが画像の平行移動不変性・拡大縮小不変性です。画像を動かしたり大きさを変えたりしても、そこに写った物体の意味が変わりません。この知識を上手く深層学習に組み込むことができれば、学習に必要なデータも計算時間も大幅に減らし、性能を大きく向上させることができます。用途によっては単なる学習の効率化に留まりません。物理学におけるエネルギー保存則はシンプレクティック幾何と深い関係があります。この構造を持った深層学習を設計できれば、学習したモデルで物理シミュレーションを行った場合に、エネルギーが保存されることを保証することができます。結果の信頼性という点で、質的に大きな違いがあります。ある結晶構造で学習するだけで、温度変化によって現れる未知の結晶構造の存在すら予測することが可能です。

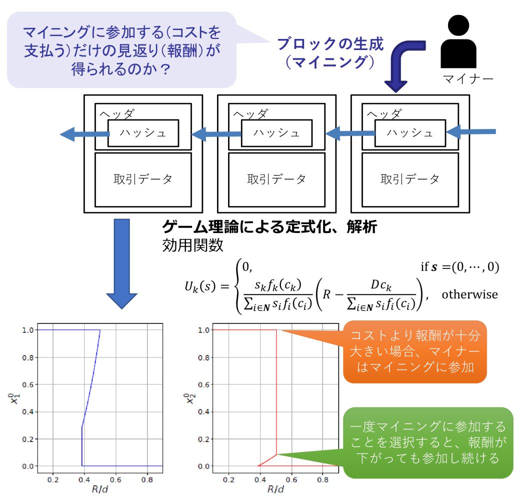
このように、深層学習の柔軟なモデル化を活かしつつ、解析対象が持つプロセスや性質を上手く制約として与える研究を行っています。



適切な幾何学的構造を与えると未知の結晶構造も予測できる

ブロックチェーンにおける意思決定問題

ブロックチェーンは、分散型台帳管理技術であり、ビットコインをはじめとした仮想通貨など、様々なサービスで利用されています。ブロックチェーン技術においては、マイナーが取引データからブロックを生成（マイニング）することにより報酬を得ます。このとき、暗号的ハッシュ関数を用いることによってブロック同士をチェーン状につなげていきます。ブロックチェーンネットワークでは、合意形成アルゴリズムとして一般的に Proof of Work（PoW）が用いられます。PoW においては、ハッシュ計算時に難易度を設定し、ブロック生成に大きな計算コストを課すことによってブロックチェーン全体の改ざん耐性の向上を行っています。一方で、マイナーにとっては、ブロックの生成に要するコストと、ブロック生成成功による報酬とのバランスが重要であり、マイニングに参加するか、しないかの意思決定が発生します。そこで、ゲーム理論に基づいてマイニングの意思決定問題の定式化、解析に取り組んでいます。



ゲーム理論に基づいたブロックチェーン意思決定問題の解析

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
数理計量ファイナンス講座 ファイナンス数理モデル研究グループ
数理計量ファイナンス講座 確率解析研究グループ
システム数理講座 複雑システム研究グループ
システム数理講座 システム計画数理研究グループ

システム数理講座｜システム計画数理研究グループ

知的で柔軟なシステム計画技法の開発

ENGINEERING SCIENCE

http://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

関 宏理 助教
seki@sys.es.osaka-u.ac.jp

柔軟な知的決定支援をめざして

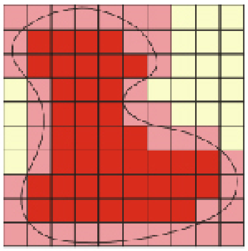
当研究室では、種々の状況下での意思決定を支援するための理論と方法を研究し、現実問題への応用をめざしています。問題設定とともに人の望みや好みを数理モデルで表現し、合理的な評価基準や判断基準を定め、最適化を行うことの他、熟練者や専門家の知識や推論をモデル化し、決定支援に役立てることを考えています。

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ことが多く、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付加的情報を活用した良い意思決定支援法を探究しています。

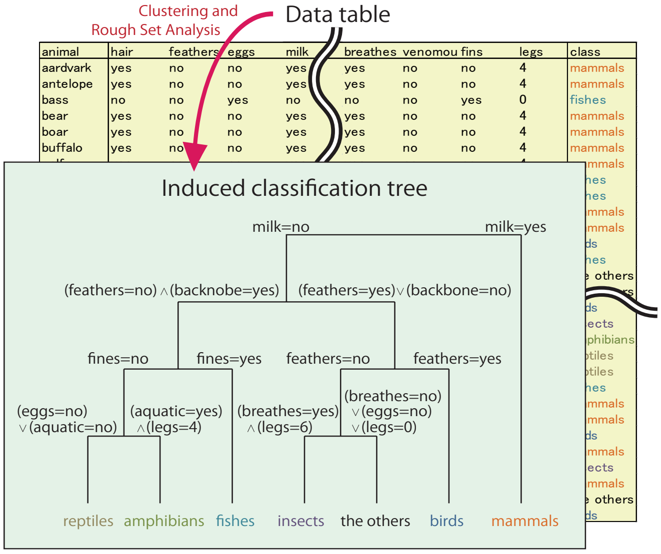
ファジィ集合

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



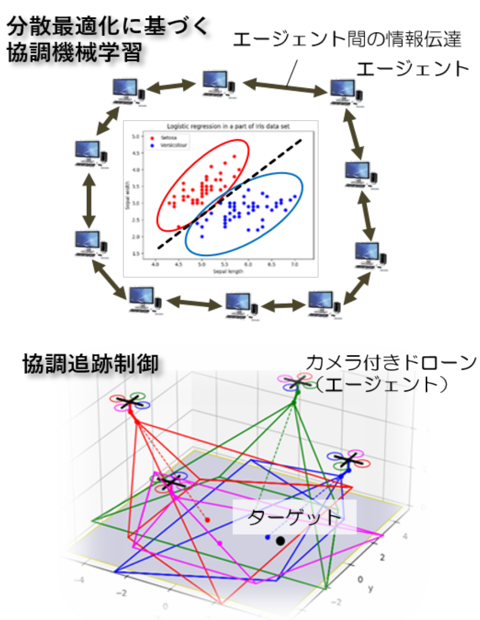
生物データの解析結果

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。

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と協調制御

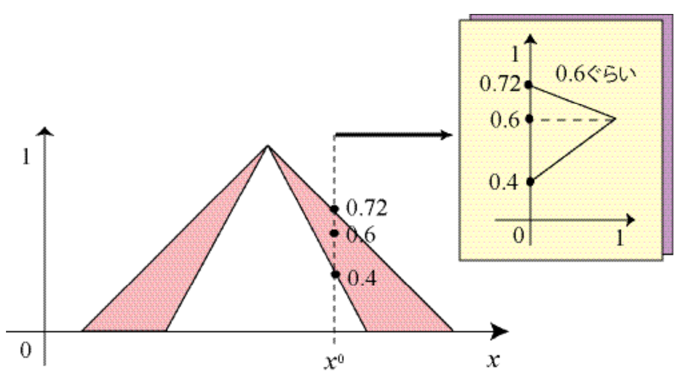
自律的に意思決定を行う行動主体をエージェントといい、多数のエージェントから構成されるシステムをマルチエージェントシステムといいます。マルチエージェントシステムでは、エージェントが相互に影響を及ぼし合うことでシステム全体の振る舞いが決まります。IoT やビッグデータ処理に代表されるように、近年、多数のサブシステムが有機的に結合した大規模システムにおける最適化や制御の重要性が増しています。このような大規模システムは、個々のサブシステムをエージェントとし、サブシステム間のつながりをネットワークで表現することで、マルチエージェントシステムとしてモデル化できます。本研究課題では、このような大規模ネットワ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。

データを柔軟に処理するソフトコンピューティングと計算知能

日常、我々が用いている言葉や思考、判断は極めて曖昧です。たとえば、「彼は非常に背が高い」、「もう少し右」、あるいは「おそらく速い」のようなものです。このように人間は極めて漠然とした言葉を使ったとしても、それで意味が通じ、理解することができます。一方、コンピュータは高速な計算が得意なものの、「見る」、「聞く」、「直感的に理解する」というような人間が簡単に行えるようなことは苦手としています。このように人間は緻密な計算は苦手であるものの大まかな思考や判断を得意としていることから、コンピュータのような過度な精密さを求めるよりも、扱いやすさ、頑健性、低コストを重視する情報処理を目指そうとする研究としてソフトコンピューティングが存在します。このようなソフトコンピューティングの概念により、これまでコンピュータで行いにくかった曖昧さを含んだデータを処理できるようになりました。膨大で複雑であり、曖昧性を含むデータを取り扱うことが要求される昨今で、柔軟な処理が可能であるソフトコンピューティングはデータ処理において多大な成果を挙げることが期待されています。ソフトコンピューティングを構成するものとして様々な方法論が存在しますが、代表的なものには「ファジィシステム」、「ニューラルネットワーク」、「進化計算」と呼ばれる計算知能手法が注目を浴びています。このような計算知能手法による意思決定支援ができるようなモデルの提案を行い、医療診断、バイオインフォマティクス、経済データ分析、人狼ゲームの役職推定など、様々な分野へ応用するための研究を行っています。また、計算知能手法を安全・信頼して使用するための理論的性質の解明も行っており、理・工・医・生命・情報科学を横断するような研究を目指しています。



タイプ 2 ファジィ集合：各要素の帰属度が「0.6 ぐらい」というように曖昧にしか与えられないファジィ集合。

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
確率解析
確率微分方程式
金融確率解析
金融数理概論
金融数理特論
保険数理概論
年金数理
統計的推測
時系列解析
数理概論 Ⅰ・Ⅱ
数理特論Ⅰ - Ⅲ
統計数理概論Ⅰ・Ⅱ
データ科学特論Ⅰ・Ⅱ
Data Science and Case Studies Ⅰ
非線形システム論
サイバーフィジカルシステム
システム計画論
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 - Ⅳ

数理解析
数理モデル論
非線形現象解析
非線形構造解析
関数解析Ⅰ・Ⅱ
統計解析Ⅰ・Ⅱ
統計モデリング
多変量解析
統計的学習理論
力学系理論
量子情報科学
適応ロボット学特論
ソフトロボット論
信号解析論
複合現実感システム論
応用ロボット学特論
知能ロボット学特論
画像システム論
データベースシステム論
など

医療生体データ科学
非線形力学特論
システム安定解析
最適設計論
ｺﾝﾋﾟｭﾃｰｼｮﾅﾙﾊﾞｲｵﾒｶﾆｸｽ
科学技術移転論
科学技術論 A・B
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（名称は当時のもの）。

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
情報・通信関係：日本 IBM、富士通、NTT(研究所、西日本、ドコモ関西、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、ヤフー株式会社、DeNA、三菱 UFJ インフォメーションテクノロジー、LINE
システム関係：帝人システム、新日鐵住金ソリューションズ、UFJ 日立システムズ、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、藤沢薬品、小林製薬、P&G
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、富国生命保険、三井生命保険、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)、損保ジャパン日本興亜、大和証券、明治安田生命、三井住友海上火災保険
機械・精密：トヨタ自動車、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、富士ゼロックス、オムロン
ゲーム関係：任天堂、藤商事、GREE、ドワンゴ
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)、みずほ情報総研
鉄鋼・重工業：新日鐵住金、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、株式会社高等進学塾、ベネッセ、博報堂

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、大阪府立大学、神戸商科大学、静岡大学、滋賀大学、神戸大学

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