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

ENGINEERING SCIENCE

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

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

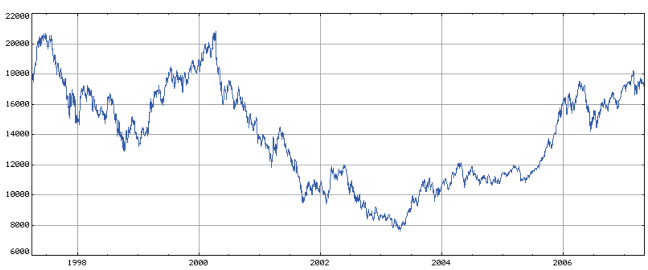
鎌谷 研吾 講師
kamatani@sigmath.es.osaka-u.ac.jp

寺田 吉壱 助教
terada@sigmath.es.osaka-u.ac.jp

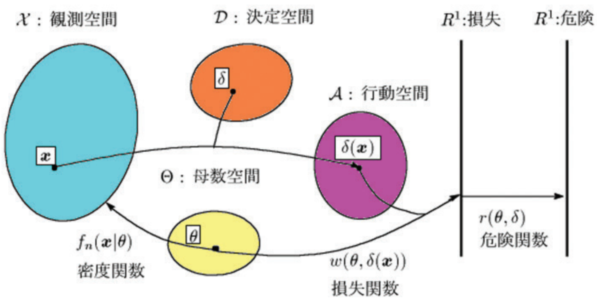
金融データの統計解析及びそれに必要な統計的推測決定理論の研究をしています。特に確率微分方程式モデルなどの確率過程モデルに対してフィッシャーの最尤法やガウスの最小自乗法を適用して、その理論的考察に取り組んでいます。また、保険数理の問題にも取り組み、リスク理論、破産理論、再保険戦略などに対する現代確率論的アプローチや、それらに付随する統計的問題を研究しています。

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。一方、高次元のパラメータ推定や複雑なモデルの解析の際には、しばしばベイズ推定量が有効です。尤度の最適化を行う最尤法に対し、ベイズ法では事後分布と呼ばれる分布や、それを用いた積分を用いて推定等の統計推測を行います。当研究室では積分の効率的な数値計算として、乱数を用いたモンテカルロ法を駆使した方法を解析しています。



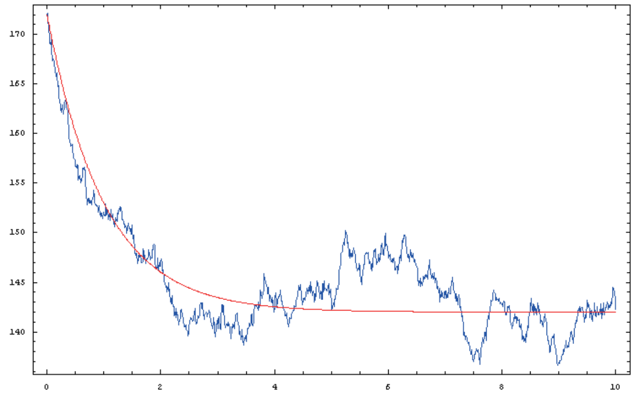
日経平均株価



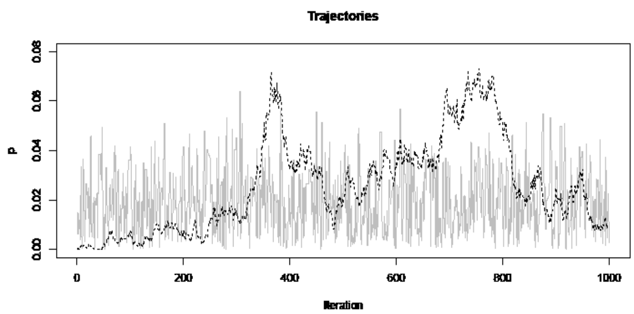
統計的推測決定図式

研究の経過と展望

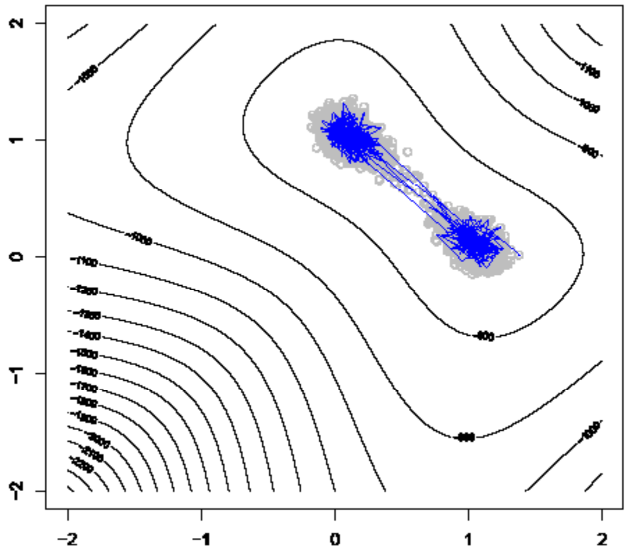
内田教授は連続時間確率過程モデル、特に確率微分方程式モデルの統計推測及びフィナンシャルデータ解析に興味をもっております。確率微分方程式によって定義される拡散過程は一般には確率推移密度関数（尤度関数）を明示的に求めることができないため、統計推測において強力な道具である尤度解析を直接的に用いることができないという難点があります。そこで尤度関数の近似（擬似尤度関数）を考え、擬似尤度解析を用いて、擬似最尤推定量の漸近的性質を示しました。特に微小拡散過程モデルに対して、スコア関数の近似として近似マルチンゲール推定関数を構成し、M－推定量の１次漸近有効性を証明しました。



微小拡散過程とダイナミカルシステム



マルコフ連鎖モンテカルロ法の経路



ラベルスイッチング現象

鎌谷講師は確率微分方程式の統計推測にも用いられる、様々なモンテカルロ法の解析を行っています。モンテカルロ法は乱数を用いた積分計算手法の一つで、ベイズ統計学では最も基本的なツールの一つです。計算機の発展とともに、より複雑なモデルや大量のデータを扱えるようになり、新しい手法が次々生み出されています。これらの解析にはエルゴード性を始めとする極限理論が用いられます。応用分野はフィナンシャルデータ解析や遺伝子情報解析など様々です。データとモデルに合った有効な手法の開発を目標に研究を進めています。

寺田助教は、教師なし学習の統計理論や脳情報データをはじめとする複雑なデータの解析法の理論と応用に興味をもっております。近年、計算機・計測技術の発展により、多様なデータが得られており、それぞれのデータに適したデータ解析が求められてます。そこで、関数データやネットワークデータ解析を中心に、データの特徴を上手く利用した解析法の開発やそれらの漸近的な性質の解明を行っています。また、大規模な時系列データである fMRI データに対して、シンプルで強い仮定を必要としない脳活動領域の特定法を提案し、実データに適用することで、その有用性を示しています。

我々のグループは、統計数理科学の理論的研究に取り組んできましたが、現在は、確率微分方程式モデルを含むセミマルチンゲールモデルに対して統計推測理論の一般化を行い、その有効性をコンピュータによるシミュレーションで検証し、その応用としてフィナンシャルデータ解析を行うことを目標にしています。

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。

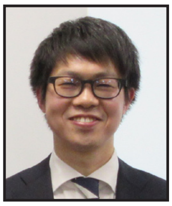
数理計量ファイナンス講座 | ファイナンス数理モデル研究グループ

確率モデルを用いた解析

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。

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

貝瀬 秀裕 准教授
kaise@sigmath.es.osaka-u.ac.jp



田口 大 助教
taguchi@sigmath.es.osaka-u.ac.jp

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。

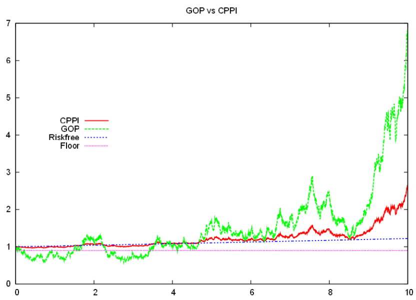
以下の GOP の発展形が現在の関心事です。

(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。

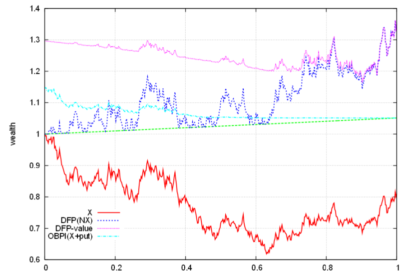
(ii) (i) と密接に関連する長時間大偏差確率制御の研究。平たくいうと、起こる確率が微小な事象（例えばファンドがあるターゲットを下回る確率など）をどうコントロールするかという問題です。

(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。

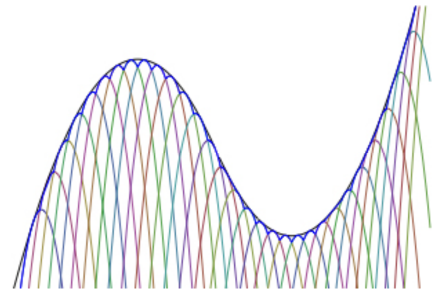
(iv) 実際の金融データに適用した実証分析。その際は、パラメータ推定やフィルタリングに関する研究が重要になります。



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。

確率微分方程式の数値解析に関する研究

数理ファイナンスにおいて、取引されている金融派生商品 (オプション) の価格付けには、確率微分方程式の解の期待値を用いて行われており、特にその価格 (期待値) を正確に数値計算することが求められています。株価のモデルとして、Black-Scholes モデルが代表的であり、期待収益率：μ とボラティリティ：σ (収益率の標準偏差) が一定である確率微分方程式として表されます。そのため、伊藤の公式を用いることにより解を具体的に解くことができ、その期待値を正確に計算することができます。

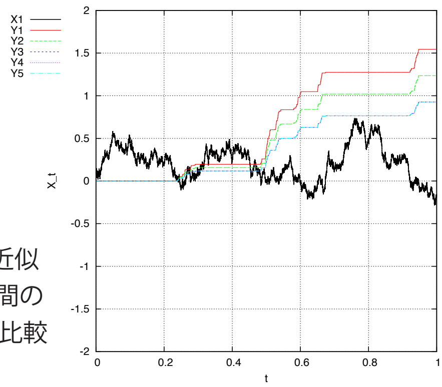
しかし、実際の市場のデータから推定されたボラティリティは時間とともに変化することが知られており、その欠点を改良するために、様々なモデルの開発が行われており、μ, σ が一定でない確率微分方程式の解としてモデル化されています。また、確率微分方程式の理論は、偏微分方程式との関連が深く、熱拡散方程式：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial s}(s,x) + \mu(s,x)\dfrac{\partial u}{\partial x}(s,x) + \sigma(s,x)^2\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2}(s,x) = 0 \\ u(T,x) = f(x), \qquad (s,x) \in [0,T) \times \mathbb{R} \end{cases}$$

の解 $u(s,x)$ は Feynman-Kac の公式によって、確率微分方程式の解 $(X_t)_{t\geq 0}$ の期待値を用いて、$u(s,x) = \mathbb{E}_x[f(X_{T-s})]$ と表されることがよく知られています。

以上のように、確率微分方程式には数理ファイナンス、熱拡散方程式など様々な分野に応用があり、その期待値$\mathbb{E}_x[f(X_t)]$ の値を数値計算することが求められています。しかし、関数 $\mu(s,x), \sigma(s,x)$ が一般の関数である場合、Black-Scholes モデルのように確率微分方程式を具体的に解くことができません。そこで、確率微分方程式の解を " 離散近似 " することで代用し、数値計算によって近似解を求める手法がよく取られています。従来、その数値計算方法は、丸山儀四郎氏が導入した折れ線近似の理論であるオイラー・丸山近似が代表的な方法の一つで，広大な適用範囲を持つ方法として認識されています。また、オイラー・丸山近似に代わる様々な近似方法・数値計算方法が、理論・実務の両側面から盛んに研究されています。

応用の側面から見ると、正確な価格･値を計算するためにも、"近似解が真の解にどれくらい近いのか"という近似の精度が重要な問題であり、関数 $\mu(s,x), \sigma(s,x)$ が " 滑らかな関数 "(微分可能など) の場合については、様々な研究結果が知られています。しかし、実務で扱われているモデルでは、微分できないような場合も多く扱われています。そこで、滑らかな関数の場合ではなく、" 滑らかではない "(微分できない) などの、より一般的なの場合についての誤差評価に関して興味を持って研究を行っています。

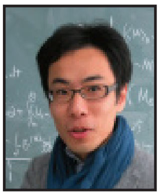


オイラー・丸山近似を用いた局所時間のシミュレーション比較

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

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

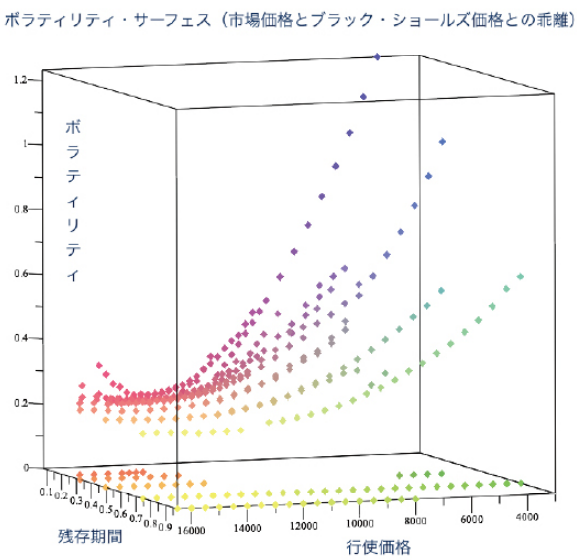
永沼 伸顕 助教
naganuma@sigmath.es.osaka-u.ac.jp

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。

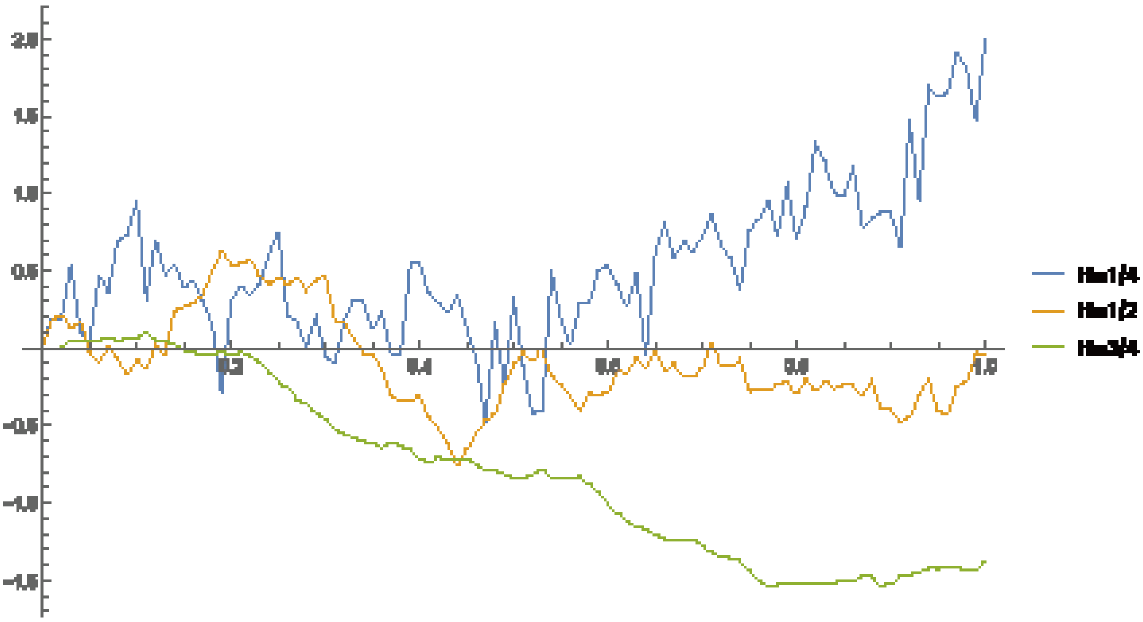
数理ファイナンス

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。



確率微分方程式の解の近似理論とその周辺

株の値動きなど、偶然性を含んだ現象を記述するための数学的手法のひとつとして確率微分方程式があります。これに関する研究のひとつとして解の近似理論があり、確率微分方程式の定式化に関わる理論的な側面と計算機による数値実験 (シミュレーション) などの応用的な側面をもち、いずれの側面からも活発な研究がなされています。確率微分方程式や解の近似理論についての歴史的な経緯を述べた後に、この問題に対する私たちの研究に関わるラフパス解析、4 次モーメント定理について説明したいと思います。確率微分方程式は 20 世紀の半ばに伊藤清により提唱された Brown 運動を駆動過程とするものが最初であり、のちに Brown 運動の独立増分性に注目して、駆動過程がマルチンゲールへと一般化され、最終的にはマルチンゲール理論を基礎とした確率微分方程式論が整備されました。確率微分方程式の解の近似理論は、丸山儀四郎による Euler- 丸山近似の考察が最初です。この近似は、Mémin、Slomiński、Kurtz、Protter、Jacod らにより深く研究がなされ、近似解の収束の速さや近似誤差の漸近挙動などが調べられています。これらはマルチンゲール理論を基礎する証明が行われており、理論的にはある程度完成されているといえるでしょう。最近では、マルチンゲール理論を適用できない確率微分方程式の研究が盛んです。ことのはじめは Lyons のラフパス解析です。彼は連続性の悪い関数により駆動される (決定論的) 微分方程式の定式化を行い、駆動過程から解への写像の連続性を示しました。駆動過程として通常の Brown 運動を考えると伊藤の意味での確率微分方程式を与えます。さらに、Brown 運動の Gauss 性に注目した拡張である非整数 Brown 運動を駆動過程とすることもできます。非整数 Brown 運動は Hurst 定数とよばれる定数 H で完全に決定され、H=1/2 のときは通常の Brown 運動となりますが、それ以外のときはマルチンゲール性を持たず伊藤の意味での確率微分方程式の適用範囲を逸し、既存の結果を適用することができません。そのため解の近似理論も発展途上にあります。しかし、2005 年頃に Nualart、Peccati、Tudor、Ortiz-Latorre らによって 4 次モーメント定理が証明され、非整数 Brown 運動の汎関数の極限分布の解析が可能となるという技術的な発展がありました。これにより、近似誤差の漸近挙動の解析が可能になりつつあります。この 4 次モーメント定理は汎関数列の分布の意味での収束を 2 次と 4 次のモーメントで特徴付ける定理で、古典的な結果と比較して驚くべき簡潔さをもち、それ自体にも興味が持たれています。



Hurst 定数 H によって道の滑らかさが変化する。

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


金澤 尚史 講師
kanazawa@sys.es.osaka-u.ac.jp


久世 尚美 助教
kuze@sys.es.osaka-u.ac.jp

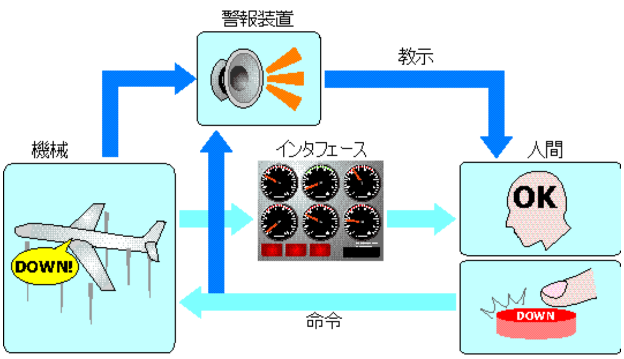
複雑システムを解析・設計・制御するための基礎理論とその応用

システムの状態を記述する変数は連続値変数と離散値変数に大別できます。電気回路や機械システムなどの状態は連続値変数で記述され、そのモデルには微分方程式や差分方程式が用いられます。本研究室では、主に非線形システムを対象にしています。カオスや分岐現象などの非線形現象が制御システムにおいて発生する条件を調べています。ディジタル計算機での丸めによって制御システムにカオスが発生する条件を明らかにしました。さらに、カオスの発生を抑えて、望ましい定常状態にするためのカオス制御法の開発にも取り組んでいます。また、実際にクアッドロータヘリを自作し、指定された複数の目標位置を順番に通る最適な軌道を生成して、その軌道に沿って自動飛行するための制御機構の開発とその飛行実験も行っています。

計算機システムやシーケンス制御など、状態が離散値変数で記述されるシステムは離散事象システムと呼ばれます。そのモデルにはオートマトンやペトリネットなどが用いられます。本研究室では、離散事象システムに対する制御法であるスーパバイザ制御について研究しています。特に、論理的設計仕様に対するリライアブルな分散スーパバイザ制御法、オンラインで故障を診断するモニタリング法などを提案してきました。これらの成果を基に、人間機械系において、ユーザが誤った操作をしないようなユーザインタフェースと警報装置の設計法を提案しています。この研究成果は電子情報通信学会の論文賞を受賞しています。さらに、ゲーム理論的アプローチによるスーパバイザの設計法にも取り組んでいます。

最近では、性質の異なる複数の部分システムが密接に相互干渉する複雑システムが注目されています。このようなシステムの状態には連続値と離散値の両方が混在しており、ハイブリッドシステムと呼ばれています。本研究室では、ハイブリッドシステムにおける非線形現象の解析、並びにスーパバイザ制御のハイブリッドシステムへの拡張などに取り組んでいます。さらに、ハイブリッドシステムの表現方法の一つである混合論理ダイナミカルシステムに対するモデル予測制御の研究も行っています。

また、複雑システムの一つとして、マルチエージェントシステムがあります。マルチエージェントシステムでは、集中的な制御機構が存在せず、エージェント間の局所的情報交換のみでエージェントは自らの行動を決定します。本研究室では、各エージェントの評価関数が公平になるような協調制御法に取り組んでいます。



ユーザに誤操作をさせない人間機械系の設計

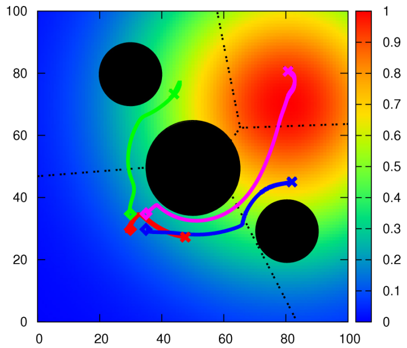

本研究室で設計したチルトするクアッドロータヘリ

マルチエージェントシステムのためのゲーム理論とその工学的応用

互いに異なる目的を持ち、相互作用しながら意思決定する複数のエージェントからなる複雑システムをマルチエージェントシステムと呼びます。複数の人々や企業、国々が相互作用する社会システムや、複数の制御器によって自律分散的に制御される分散制御系と呼ばれる工学システム等もその一種とみなすことができます。マルチエージェントシステムにおいて、エージェント間の相互作用を分析するためにゲーム理論が用いられます。本研究室では、多数のエージェントからなる集団内での相互作用を扱う進化ゲームを中心に研究を行っています。

マルチエージェントシステムにおいては、各エージェントが自分自身の利益のみを追求して行動することによってシステム全体としては望ましくない状態に陥ってしまうことがあります。このような場合には、各エージェントが利己的に行動したとしてもシステム全体にとって望ましい状態が実現されるような制度設計が非常に重要となります。本研究室では、各エージェントに対して税と補助金を課すことでシステム全体にとって望ましい状態を達成する手法について研究を行っています。また、自身の個人情報について嘘をつくことで利益を得ようとするエージェントに対してペナルティを科すことでシステム全体の公平性を保証するルール設計についても研究を行っています。

一方で、サブシステム間で局所的に情報交換しながらシステムを分散的に管理・制御する分散制御系と呼ばれる工学システムにおいては、各エージェントの行動指針をシステム全体の目的と一致するように適切に設計する必要があります。このような分散システムの解析・設計へのゲーム理論の応用について研究を行っています。特に、ある領域の状態を正確に把握するための移動センサの最適配置や、通信ネットワークの伝送経路制御、複数のプロセッサが 1 チップ上に実装された MP-SoC のクロック周波数の分散決定法について研究しています。



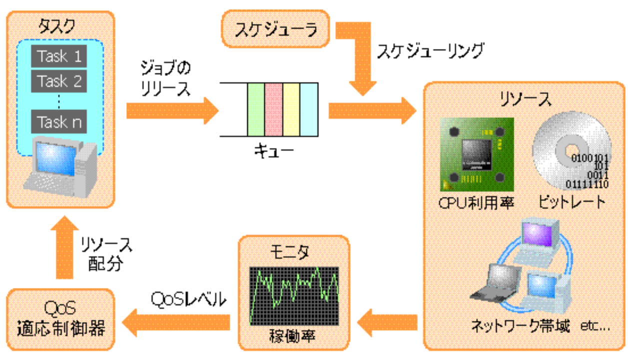
障害物回避を考慮した移動センサの最適配置

サイバーフィジカルシステムの制御

現在では、システムの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呼ばれています。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。CPS に対する制御機構の設計法の提案、並びにその実用化を目指したソフトウェア開発の研究を行っています。

CPS の制御にとって重要な基礎問題は制御とスケジューリングの協調設計です。複数の制御タスクを実行する計算機においては、指定された時間までに制御入力の計算を終了するというリアルタイム性が要求されます。リアルタイム性を持つ計算機システムのことをリアルタイムシステムと呼びます。リアルタイムシステムにとって重要な問題はリソースを有効に利用できるスケジューリングです。一方、制御タスクの制御性能は制御対象の状態に依存することもあり、制御対象の状態に適応して制御性能の最適化が重要です。タスクの実行結果の評価を QoS(Quality of Service) と呼びます。一般に制御性能を向上させようとすると計算機の使用率が向上するために計算機への負荷が増大し、うまくスケジューリングできなくなります。スケジューリングがうまくできるという条件のもとですべての制御タスクの QoS を最適化する適応型リアルタイムシステムの設計法の開発とその実用化を目指したソフトウェア実装を行っています。

従来の組込み制御では周期的に制御タスクをリリースする方法が一般的です。しかし、制御対象が目標状態に到達している場合などでは、制御タスクのリリース間隔を長くしても制御性能に劣化があまり見られません。このようなときにはリリース間隔を延ばすことで計算機への負荷を軽減できます。このような考え方で設計される事象駆動型や自己駆動型制御について研究しています。また、複雑なシステムではその特性を完全に同定することが難しいので、最適な制御入力を学習的に獲得する強化学習に基づく制御法の開発にも取り組んでいます。さらに、ネットワーク化システムではデータの転送も考慮する必要があり、マルチホップネットワークを用いたネットワーク化制御システムにおける制御タスクとデータ転送の同時スケジューリング法の研究も行っています。



リアルタイムシステムの QoS 適応制御

システム数理講座｜システム計画数理研究グループ

ENGINEERING SCIENCE

知的で柔軟なシステム計画技法の開発

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、生産システム技法、高速アルゴリズム、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

西 竜志 准教授
nishi@sys.es.osaka-u.ac.jp

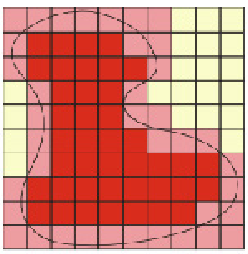
関 宏理 助教
seki@sys.es.osaka-u.ac.jp

不確実情報の柔軟な取り扱いとシステム計画への応用

意思決定が困難になる原因の一つとして、不確実性や曖昧さがあげられます。すなわち、決定の結果得られる利得や決定（行動）に要する費用が正確かつ確実に推定できない場合や、複数の評価基準の存在のため判断基準が明確化できていない場合などです。また、人間による評価が言葉を介してなされるため、言葉に起因する曖昧さにも対処する必要があります。これらの不確実性や曖昧さ、特に非確率的な不確実性に対処するため、ファジィ理論やラフ集合、Dempster-Shafer 理論などの不確実性科学について研究するとともに、不確実性の下での意思決定法や数理計画法などを取り扱っています。例えば、生産計画問題では、目的関数や制約条件の係数となる製品１個当たりの利益が１００円と明確に与えられてきましたが、不良品の発生や売れ残りなどを考慮すれば現実には「だいたい１００円」と不明確になる場合があります。 また、制約条件となる機械の実働可能時間などは７時間までと明確に与えられる場合が多いのですが、残業などを考慮すれば、実際には、「だいたい７時間まで」と柔軟に与えられる場合があります。このような係数の不明確さや制約の柔軟性をファジィ集合を用いて表現したファジィ数理計画問題の取り扱いと解法を研究しています。一方、多基準意思決定問題と呼ばれる複数の評価基準のもとでの決定問題では、各評価基準と総合評価との関係を求めることは重要な課題となっています。この課題に対して、意思決定者の好みや評価を数理モデルで表現する研究も行っています。決定者が評価した多くの事例から、単純な if-then ルールで評価モデルを表す方法

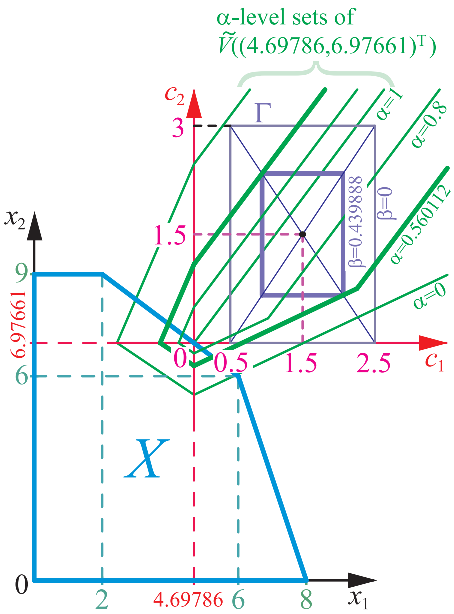
ファジィ集合

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



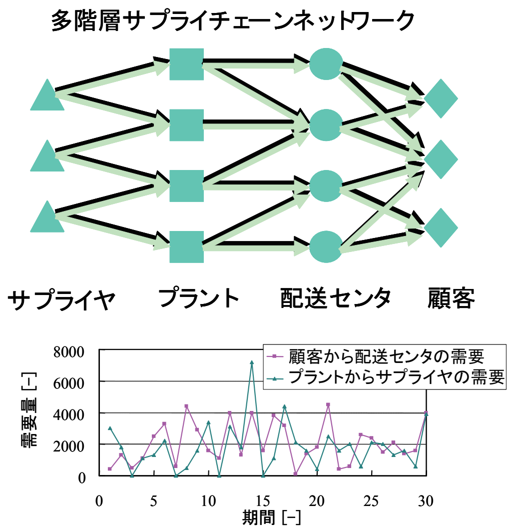
ロバストでソフトな最適化：最適性を多少犠牲にしても、不確実性による変動に対して安定して良い評価値を示す解

を検討し応用する研究がその一つです。データの矛盾をどのように扱っていくか、どのようなポリシーで単純化するかが重要なポイントとなります。もう一つは、いくつかの代替案ペアに対して、二つの案のいずれを好むかを示した選好情報から評価モデルを作成する研究です。情報の不足や非整合性を適当に処理し明確化したモデルを求めるのではなく、曖昧さを許容するモデルを求めています。あやふやな部分をモデルに取り込むことで、いい加減に評価しないモデルを作成し、これを決定支援に役立てる方法を検討しています。

組合せ最適化と離散アルゴリズム

社会システムや産業活動などに関係して現れる生産計画、環境計画、最適配送計画、スケジューリング、最適投資などを始めとする重要な問題の多くは、大規模なシステムの最適化問題として捉えることができます。本研究課題では、これらのシステム最適化問題を解くための対象横断的な方法論を研究しています。研究対象は、工学諸問題だけでなく広く人間の諸活動全般に関わり、それらの最適化（効率化、高収益化、快適化、満足化、安定化、安全化など）を通して人類の福祉の向上に寄与したいと考えています。具体的には、連続量に限らず離散変数や離散構造を有するシステム最適化問題の研究に従事しています。これら諸問題を解決するため、まず第一に、問題の本質を示す有効な離散構造の抽出、解析、および、それらに基づく高速なアルゴリズム開発という基礎理論の構築を行っています。次いで、得られた基礎理論を現実に現れる問題に応用する、問題解決のための実用的な高速ソフトウェアの開発を行っています。ここで扱う最適化問題は、上記からも分かるように、オペレーションズ・リサーチ、数理計画の分野に限らず、生産システム、搬送システム、サプライチェーンなどの多岐にわたっています。具体的には、下記に示すような研究を行っています。

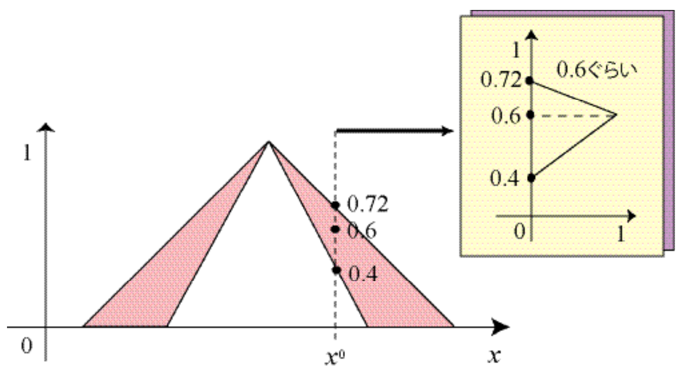
1. グラフ・ネットワークに関連する最適化問題
2. 離散最適化理論とアルゴリズム理論
3. 生産計画、スケジューリング問題などの現実問題への応用



需要の変化に対応したサプライチェーン計画手法の開発

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、RoboCup サッカーシミュレーションなど、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
複雑システム論
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
統計モデリング
多変量解析
データ解析
数理医学概論

量子情報科学
システム制御論
適応システム論
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

生体システム工学
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
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、
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

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

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