

明治大学数理科学 2024 年度研究集会
Data-driven Mathematical Sciences
経済物理学とその周辺
アブストラクト集

日時・場所

- 日時：2024 年 9 月 2 日
- 場所：明治大学中野キャンパス 8 階 MIMS 談話室 (825 室)

主催

明治大学「現象数学」共同利用・共同研究拠点

はじめに

本研究会はデータ解析に基づいた数理および定量科学の視点から経済学を見直すとの目標のもとに研究活動を行っている、数理・情報・物理科学分野の研究者に発表の機会を提供するため形を変えつつ4半世紀の期間、4期にわたって継続してきた。

研究会の歴史

経済物理学は物理学と社会科学の境界領域の探求を目指して20世紀の終わり頃から21世紀の初め頃より欧米と日本の両方で精力的に研究が進められてきた。その原型はまず、総合研究大学院大学（SOKENDAI）の新分野開拓プロジェクト（1998-2003）として始まり、統数研研究集会「経済物理学とその周辺」（2003-2017）に引き継がれた後、2017以降は明治大学先端数理科学インスティテュート「現象数理学研究拠点」共同研究集会の「Data-driven mathematical science: 経済物理学とその周辺」として、データサイエンスの視点を軸に開催されてきている。テーマとしては1) 価格変動の科学的解明 2) データサイエンスとしての視点の確立 3) コンピュータシミュレーションの手法による経済学 4) 機械学習等の人工知能の手法と統計物理学との融合 5) 経済学としての経済物理学の位置づけの検討 6) 景気変動の研究 7) 予測力のある手法の開発等、多岐にわたる。年一度の研究集会は常連メンバの成果発表と共に、新しい視点を提供して頂けるゲスト講演者も交えて、研究者間の意見交流と知識共有を目標とする。

- 第1期（1998-2003）：総合研究大学院大学・教育研究交流センター「新分野の開拓」
- 第2期（2003-2017）：統計数理研究所「経済物理学とその周辺」研究会
- 現在：明治大学「現象数理学」共同利用・共同研究拠点主催 年次研究集会「Data-driven Mathematical Sciences：経済物理学とその周辺」

開催概要

2024年度の研究会は対面とオンラインのハイブリッド形式で開催され、9月2日に9件の発表講演が行われました。

午前11時30分に開始された最初の講演では、藤本氏（金沢学院大学・情報工学）が生成AIを用いたサッカーシミュレーションの手法について紹介しました。著者らは、2次元座標の位置情報を階層的にグリッド分割し、それを自然言語の単語として扱う手法を用いて、自然言語生成AIを活用したサッカーシミュレーションを実現。ディフェンダー3名の位置予測を行う成果を発表しました。

2番目の講演では、増川氏（成城大学・経済学）が、金融時系列のStochastic Volatilityモデルに関する実証研究を発表しました。特に、Multifractal random modelの検証を目的とし、東証一部に上場されている個別銘柄の分足データを用いて、ザラバ中の株価対数VWAPリターンを分析しました。

続いて、家富氏（立正大学・データサイエンス）は、「米国株式市場における高次相関構造」というタイトルで講演し、株価グループ相関におけるフラストレーション構造を解明する手法を紹介しました。

4番目の講演では、石崎氏（福岡県立大学）が、ボラティリティ・クラスタリングなど金融市場の非正常性を記述するために、時系列データの大変動を点過程の視点で捉え、Hawkes過程による分析を行った成果を発表しました。

次に、高森氏（弘前大学・理工学部）は、株価の収益率時系列データの相関構造を探る研究を発表しました。特に、共分散行列の固有値および固有ベクトルの時間変化に注目し、各固有ベクトルの自己コサイン類似度は急激に減少する一方で、固有値上位10個の固有ベクトルで生成される空間への射影ベクトルのノルムはほとんど時間変化しないことを報告しました。

田中氏（金沢学院大学・情報工学 / 明治大学・研究知財戦略機構）は、「RMTテストによる乱数度測定の効果」をテーマに講演を行い、中規模な下落予測を行う指標として、価格揺らぎの乱数度急落の利用可能性を議論しました。

第7の講演では、有賀氏（京都先端科学大学・経済経営）が、動的計画法と強化学習の観点から最適な選択に関する進化的推論について議論しました。特に、「部分的にしか観測できない」状況における最適選択を明らかにし、機械学習が経済モデリングに与える影響について考察しました。

8番目の講演では、荻林氏（千葉工業大学）が、アブダクションにおけるエージェントベースモデル（ABM）の意義について議論しました。従来の学問体系では、社会経済現象の因果メカニズム解明の方法論が欠如している現状に対し、仮定されたメカニズムに基づきモデルを構築し、その計算結果による妥当性検証を行うアプローチを提案しました。

最後の講演では、守氏（弘前大学・理工学部）が「アリコロニー最適化とアニーリング」という題目で講演しました。アリの集団意思決定は経済物理の文脈で Kirman らにより研究されてきましたが、組み合わせ最適化問題に対するアリコロニー最適化手法を統計物理の視点で理解する試みについて紹介しました。

以上の9件の発表と活発な質疑応答により、研究者間で意見交換が活発に行われ、研究の活性化に繋がる成果を上げました。

プログラム

9月2日(月)

- 1. AI を利用したサッカーシミュレーション 11:30 ~ 12:00
藤本祥二 (金沢学院大・情報工)、石川温、水野貴之、家富洋
- 2. 金融時系列のスケーリング則と MRW モデル 12:00 ~ 12:30
増川純一 (成城大・経済)
- 3. 米国株式市場における高次相関構造 12:30 ~ 13:00
家富洋 (立正大・データサイエンス)、新井優太 (麗澤大・経営)
- 4. 金融時系列データの短期情報量に基づく変動性と異常検知 13:00 ~ 13:30
石崎龍二 (福岡県立大)、井上政義 (鹿児島大名誉教授)
- 5. 株価相関のロバストな構造とファクターモデル 14:00 ~ 14:30
高森大聡、守真太郎 (弘前大理)
- 6. RMT テストによる乱数度測定の効果 14:30 ~ 15:00
田中美栄子 (金沢学院大・情報工)
- 7. An evolutionary inference of optimal selection in view of dynamic programming and reinforcement 15:00 ~ 15:30
有賀裕二 (京都先端科学大学・経済経営)
- 8. アブダクションにおける ABM の意義 15:30 ~ 16:00
荻林成章 (千葉工大)
- 9. アリコロニー最適化とアニーリング 16:00 ~ 16:30
守真太郎 (弘前大・理)、清水太陽、久門正人、中山一昭

1 生成 AI を利用したサッカーシミュレーション

藤本祥二（金沢学院大・情報工）、石川温、水野貴之、家富洋

要旨

2次元座標で表される位置情報を階層的にグリッド分割し、自然言語の単語として扱うことで、自然言語生成 AI による個人の移動軌跡を生成することが可能である。本研究では、この手法を複数人とボールが連動して移動するサッカーのデータに応用し、サッカーシミュレーションを実現した。これにより、各プレイヤーの動線を学習・生成し、相互作用を含むシミュレーションが可能である。

2 金融時系列のスケーリング則とMRWモデル

増川純一（成城大・経済）

要旨

本研究は、金融時系列の Stochastic Volatility モデルの実証研究である。Bacry, Delour, Muzy らによって提案された時系列の Multifractal random walk モデル (Physical Review E, 64, 026103, 2001) を対象として、モデルの妥当性の検証を行なった。Stochastic Volatility モデルにおいては、時事刻々変化する spot volatility は非観測量であるが、その時間積分 (Integrated volatility) は realized volatility などの empirical volatility によって観測が可能であると考えられる。ここでは、東証一部に上場された個別銘柄について、ザラバ中の株価の対数 vwap リターンの分足データを用いて検証を行なった。自己共分散、パワースペクトル、揺らぎ解析の結果は、Multifractal random walk モデルが定性的には実際の株価変動をよく説明した。今後は、さらに定量的な比較を行いたい。

3 米国株式市場における高次相関構造

家富洋（立正大・データサイエンス）、新井優太（麗澤大・経営）

要旨

株価グループ相関におけるフラストレーション構造を解明するため、米国株式市場に着目した。複素ヒルベルト主成分分析法を用いて株価の同期ネットワークを構築することにより、互いに反相関関係にある3つの同期コミュニティを同定した。さらに、株価間の位相差関係を相関・無相関・反相関に簡略化し、株価3体相関を抽出した。加えて、得られた株価間3体相関は反強磁性XYモデルを用いて簡便に記述可能であることを示した。

4 金融時系列データの短期情報量に基づく変動性と異常検知

石崎龍二（福岡県立大）、井上政義（鹿児島大名誉教授）

要旨

金融時系列データには、トレンドが観察されるだけでなく、市場の混乱や不安定な局面において「ボラティリティ・クラスタリング」と呼ばれる現象がしばしば見られる。この現象は、価格が短期間に大きく変動する状況が連続して現れることを意味し、市場が安定している場合とは大きく異なる特徴を持つ。金融時系列は一般に統計的な性質が時間の経過とともに変化するため非定常であり、基本的な定常モデルではその説明や予測が困難である。このため、金融市場におけるデータ解析や異常検知の手法の開発においては、非定常性に考慮したアプローチが求められる。

私たちは、これまで、このような特性をもつ金融時系列に対して、短期情報量や短期 Kullback-Leibler 情報量を用いて、市場の混乱期や異常な動きが現れる局面を特定する試みを行ってきた。短期情報量は、対象期間を一定の時間幅（ウィンドウ）に区切り、各ウィンドウ内で発生する大きな変動の出方のランダムさを数値化する手法である [1]。一方、短期 Kullback-Leibler 情報量は、各ウィンドウ内で発生する大きな変動の出現パターンが独立な二項分布からどれだけ乖離しているかを数値化する手法である [2]。

本研究では、大きな変動を点過程という数学的枠組みに基づいて分析することを試みた。特に、自己励起型の点過程モデルである Hawkes 過程を用い、過去の大きな変動がその後の大きな変動の発生率に与える影響を明らかにすることを試みた。分析対象として、円ドル為替レートおよび日経平均株価の日次データを使用し、Hawkes 過程を用いて推定した強度関数の推移を短期情報量や短期 Kullback-Leibler 情報量の推移と比較し、それぞれが示す市場変動性や市場状態の変化との関連性について考察を行った。

本研究により、Hawkes 過程を用いた分析と短期情報量や短期 Kullback-Leibler 情報量との比較を通じて、金融時系列を用いた異常検知や市場監視のための新たな手法の可能性について知見が得られた。

References

- [1] R. Ishizaki and M. Inoue, Analysis of local and global instability in foreign exchange rates using short-term information entropy, *Physica A* **555**, 1 (2020).
- [2] R. Ishizaki and M. Inoue, Short-term Kullback–Leibler divergence analysis to extract unstable periods in financial time series, *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 1 (2024).

5 株価相関のロバストな構造とファクターモデル

高森大聡、守真太郎（弘前大理）

要旨

株価の収益率の時系列データを用いた相関構造の推定にランダム行列が用いられることがある。サンプル共分散行列を固有値分解し、固有値がランダム行列理論の固有値分布の最大固有値よりも大きな成分をノイズとは異なると判断し、それらを用いて相関構造を近似する。本公演では、約700銘柄の収益率3年分のデータのサンプル共分散行列の固有値分解を5日ずつずらして、最大固有値よりも大きな10個の固有ベクトル・固有値を6年間追跡し、統計を調べた。第2固有値から第10固有値の順位には入れ替わりが起こり、また、各固有ベクトルの初期状態とのコサイン類似度はすぐに減衰した。一方、追跡した固有ベクトルの平均固有ベクトル10個で張る空間に固有ベクトルを射影したベクトルのノルムはほぼ一定となった。これは、固有ベクトルがノイズによってゆらぎ、回転が起こっていることを示唆する結果である。

標本相関行列の固有値、固有ベクトルの時間変化

本研究では、ランダム行列理論（RMT）を用いて、株価時系列データの相関構造の変化を解析した。使用したデータは、TOPIXから選定した上位694銘柄の10年分（2442日）の株価日次データである。このデータに基づき、対数収益率の相関行列を作成し、固有値が大きい上位10個の固有ベクトルを追跡した。具体的には、694銘柄の3年分（745日間）のデータを用いて相関行列を計算し、その固有ベクトルを抽出した。次に、株価時系列データを5日ずつシフトさせ、相関行列と固有ベクトルを計算した。そして、前回の固有ベクトルとの内積が最大となる固有ベクトルを選択し、これを繰り返すことで、第1から第10固有ベクトルの追跡を行った。

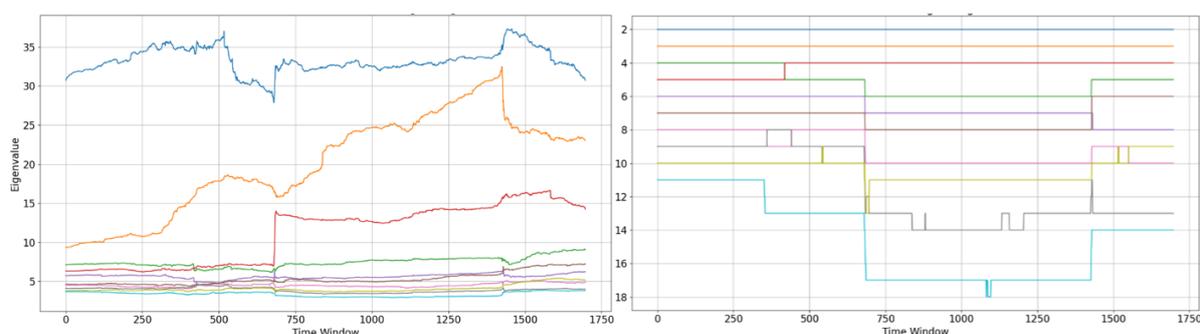


Figure 1: 第2～10固有値の時間変化と順位変動

平均固有ベクトルと固有ベクトルのコサイン類似度

10年の株価日次データのうち、最初の6年分を用いて追跡した固有ベクトルから平均固有ベクトルを算出した。次に、残りの4年分のデータを用いて追跡した固有ベクトルと平均固有ベクトルとのコサイン類似度の時間変化をプロットした結果が以下の図である。第1固有ベクトルを除く固有ベクトルのコサイン類似度は時間とともに急速に減少した。一方、第1固有ベクトルは市場全体を表すベクトルであり、対応する固有値も他より大きいため、ノイズの影響を受けにくく、コサイン類似度が一定に保たれたと考えられる。

第2固有ベクトル以降は固有値が互いに近くなるため、ノイズの影響が増大し、それがコサイン類似度の減少を引き起こす要因と推測される。

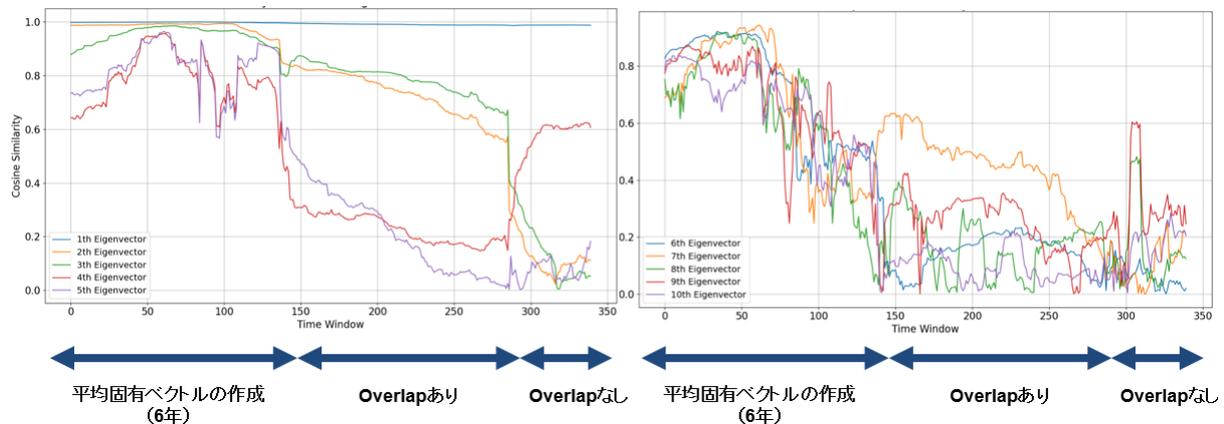


Figure 2: コサイン類似度の時間変化

平均固有ベクトル線形射影への固有ベクトルの射影

平均化した10個の固有ベクトルが張る部分空間への射影行列を算出し、残りの4年間のデータから追跡した固有ベクトルをその部分空間に射影したノルムを調べた結果、ノルムはほぼ一定であることが確認された。一方で、コサイン類似度は急速に減少している。この矛盾するような現象は、固有ベクトルがノイズによって揺らぎ、10次元空間内で回転しているためと考えられる。今後の展望として、この回転をモデル化することで相関構造のさらなる解析が可能となる。また、平均固有ベクトルを基にしたポートフォリオの構築・分析も重要な課題として挙げられる。

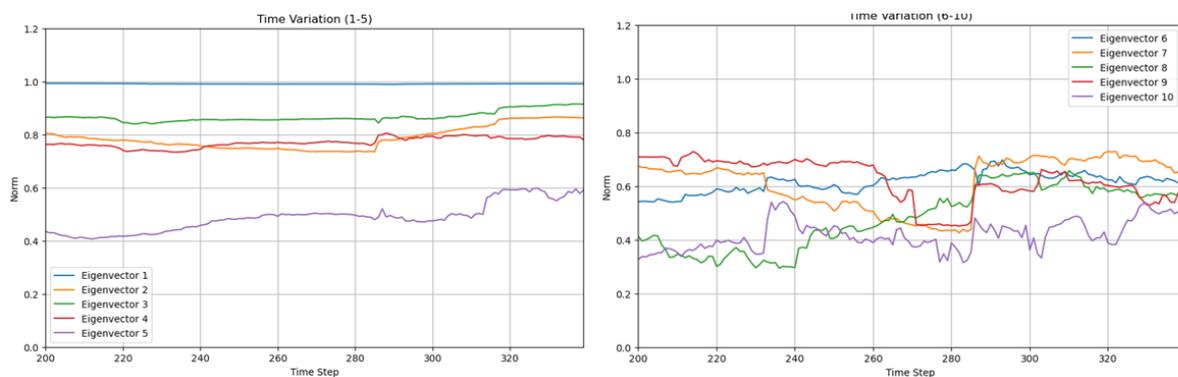


Figure 3: 固有ベクトルを射影したノルムの時間変化

6 RMTテストによる乱数度測定の効果

田中美栄子（金沢学院大・情報工 / 明治大学・研究知財戦略機構）

要旨

株価の市場価格に代表される競争価格は天変地異やテロ、あるいは2011年3月の大地震に続く大津波によって引き起こされた原発の故障や大統領候補を狙った銃撃のような明確な原因による大暴落もある一方で、投資不安の累積など、内部的な要因による中規模下落もかなり頻繁に起きている。このような中規模下落の予測を行う相場天気予報ができないものかと考え、価格揺らぎの乱数度の急落がそれではないかという仮説を立てた。その背景には、いわゆる安定株は乱数度が高いのに対し、価格下落し易い不安定株は乱数度が低いと言う観察結果があった。乱数度の算出にはRMTテストという手法を使った。同手法で相場全体の動きを反映する指標であるTOPIX指数やTOPIXcore30価格指数の一秒毎の価格変動データを2010年以來のTOPIX指数に対し乱数度乖離（ ）の時系列をRMTテストを用いて求めたところ、2011年3月の大地震による大暴落は予知できないが、その後続く中規模暴落はその直前に乱数度の下落が観察された。今後は検証範囲を広げて多くの指数時系列に対してその有効性を確認したい。

7 An evolutionary inference of optimal selection in view of dynamic programming and reinforcement

有賀裕二（京都先端科学大学・経済経営）

要旨

フォン・ノイマン＝モルゲンシュテルン期待効用関数のグローバル功利主義が広く受け入れられている。しかし、プレイヤーは、自分の将来の範囲を完全に平坦に捉えることに慣れておらず、むしろ、地雷が隠された風景のような環境に対処している。現代では、このゲーム設定はエンターテインメント産業で盛んである。娯楽産業が提供するゲームは、常にプレイヤーに学習とシミュレーションを課し、リスクを回避させる。機械学習の興隆のなかで、進化経済学がこのような状況にどのような示唆を与えることができるかは重要である。より一般的なケースを考えてみると、例えば観察者とターゲットの両方が動いている場合、直面する事象は「部分的にしか観察できない」ことになる。このような状況は、マルコフ連鎖が有効である限りにおいてはああるが、動的計画法の「ベルマン方程式」と「強化学習（機械学習）」の観点から分析できることがわかる。また、問題の事象が「部分的にしか観測できない」場合に注目し、最適な選択を明らかにする。機械学習は、特にモデリングや近接関数を仮定せず、人間の論理・推論とは独立に、一般的な手法でタスクを実行する。ここで、いくつかの最適な結果は、経済学で好まれる主観的な意図的／道徳的なモデリングとは必ずしも結びつかないことに留意されたい。したがって、ある特別な経済モデリングによってのみ最適が得られるという含意はほとんどない。また、最適性の意味も、特別なモデル化なしでも得られることから変わってくる。この洞察は、私たちの経済学的推論を再考するきっかけとなるだろう。

8 アブダクションにおける ABM の意義

荻林成章（千葉工大）

要旨

社会経済現象の因果メカニズムを科学的に解明する方法論は事実上これまでの学問体系には存在しないため、問題解決はアブダクション等による推論に基づき行われているのが実情である。一方、完全ボトムアップな ABM では、メカニズムを仮定した推論に基づきモデルを構築し、計算結果が実現象の定性的特徴を再現するか否かによって、推論の妥当性を検証することが可能である。本報ではこの原理に基づく ABM による因果メカニズム解明の方法論とその数学的検証及びこれまでの研究事例について述べた。

9 アリコロニー最適化とアニーリング

守真太郎（弘前大・理）、清水太陽、久門正人、中山一昭

要旨

アリ・蝶などの社会性昆虫は独自のコミュニケーション方法により集団的な選択をすることが知られている。アリは移動する軌跡にフェロモンを分泌し、巣への帰り道の目印とするが、このフェロモンを媒介とするコミュニケーションで餌の探索を効率的に行うことが知られている。このアリの餌の探索方法を最適化手法に用いたものがアリコロニー最適化であり、さまざまな組合せ論的最適化問題に適用されてきた。本発表では、無限レンジイジングモデルの基底状態にアリコロニー最適化手法を用いた場合の、フェロモンの分布を理論的に解析した結果を発表する。アリの選択での決定関数は選択肢の持つフェロモンの比率の線形関数とし、確率微分方程式を解くことで、フェロモン率の定常分布を求めた。特に、平均場イジングモデルの場合、決定関数のパラメータをゆっくり動かすことで、基底状態の探索確率がほぼ 100 % になることを発表する。

研究の背景と目的

ACO は、アリの行動にインスパイアされたアルゴリズムであり、フェロモンによる間接的な情報共有を通じて、最適解を探索します。 α はフェロモン量の影響度を制御するパラメータであり、その動的調整が探索と収束のバランスを左右します。本研究の目的は、ACO の α -アニーリングをイジングモデルに適用し、探索性能を向上させることです。

研究の方法

以下の手法で解析を行いました。

- 無限レンジイジングモデルのエネルギーを次式で定義:

$$E[\{X(i)\}] = - \sum_i h(i)(2X(i) - 1) - \frac{1}{N-1} \sum_{i,j,i \neq j} J(i,j)(2X(i) - 1)(2X(j) - 1).$$

- フェロモン比率の動的変化を記述する確率微分方程式 (SDE) を導出:

$$dZ(k,t) = \frac{1}{\tau} \left[-(1-\alpha)Z(k,t) + 2\alpha\tilde{h}(k,t)(1-Z(k,t)^2) \right] dt + \sqrt{\frac{\alpha^2}{\tau^2}(1-Z(k,t)^2)} dW(k,t),$$

ここで $\tilde{h}(k,t)$ は有効場、 $dW(k,t)$ は独立なウィーナープロセスを表します。

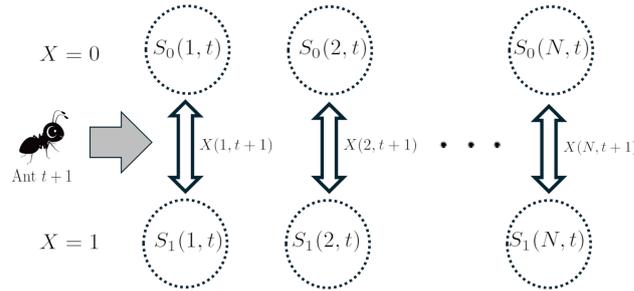
- SDE に対応するフォッカープランク方程式を導出:

$$\partial_t p(\vec{m}, t) = - \sum_k \partial_{m_k} \left[A(m_k | \tilde{h}_k) p(\vec{m}, t) \right] + \frac{1}{2} \sum_k \partial_{m_k}^2 \left[B^2(m_k) p(\vec{m}, t) \right],$$

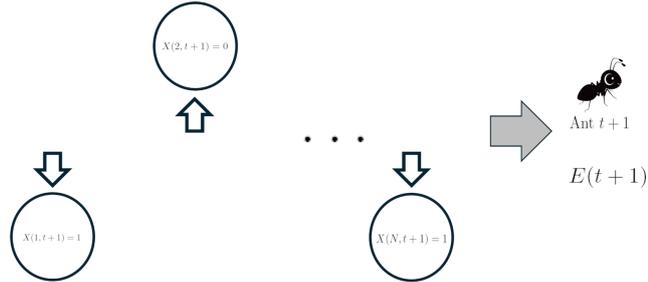
ここで $A(m_k | \tilde{h}_k)$ はドリフト項、 $B^2(m_k)$ は拡散項を表します。

以下の図は、本研究で扱った ACO アルゴリズムの模式図です。

Selection Process



Evaluation



Secretion of pheromones

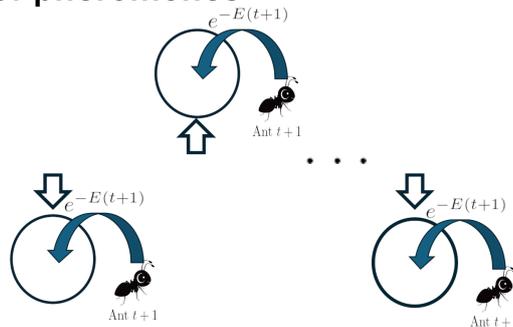


Figure 4: アリコロニー最適化 (ACO) アルゴリズムの模式図。各アリがフェロモンをもとに解を探索し、解の品質に応じたフェロモンを追加する様子を示す。[2] より。

主要な結果

- α が臨界値 α_c を超えると、PDF は単一モードから多モードへ遷移することを理論的に解明。
- α -アニーリングによって、探索初期における解の多様性を維持しつつ、最終的にグローバル最適解へ効率的に収束可能であることを実証。
- シミュレーション結果から、 α -アニーリングは従来のシミュレーテッドアニーリングよりも高い成功率を示すことが確認された。

結論と展望

α -アニーリングは、ACO の性能を向上させる強力な手法であり、特に探索空間の広さと収束効率のバランスを調整する点で有効です。今後は、他の最適化問題への応用可能性や効率的なアニーリングスケジュールの設計について検討する予定です。

References

- [1] Phase Transition in Ant Colony Optimization, S.Mori, S.Nakamura, K. Nakayama and M.Hisakado, *Physics* 2024, 6(1), 123-137.
- [2] α Annealing of Ant Colony Optimization in the infinite-range Ising model S Mori, T Shimizu, M Hisakado, K Nakayama, accepted in *Phys.Rev.E*.(arXiv:2407.19245)