



京機短信

KEIKI short letter

No.405 2025.6.5

京機会(京都大学機械系同窓会)

tel. & fax. 075-383-3713

E-Mail: jimukyoku@keikikai.jp

URL: <http://www.keikikai.jp>

編集責任者 京機短信編集委員会

目次

- ・ 2025年度中部支部総会・講演会報告……近藤功一、竹内賢一 (pp. 2-3)
- ・ series 研究最前線 (25) 確率動的システムの確率分布を制御する……星野健太 (pp. 4-7)
- ・ 北山ハイキング……藤川卓爾 (pp. 8-10)

中部支部で2025年度総会・講演会が開催されました。

下はその懇親会・新人歓迎会での琵琶湖周航の歌の合唱の様子です。

詳しくは記事をご覧ください。



Reconnect Fest@同窓会 2025年度中部支部総会・講演会報告

中部支部長 近藤功一（S61/1986卒）

中部支部事務局長 竹内賢一（H7/1995卒）

【総会】

4月19日（土）、刈谷のデンソーDスクエアで現地参加を中心に一部リモート配信を交えて開催しました。永続的な支部活動を目指し、「Reconnect Fest@同窓会」と銘打ち、スーツ禁止で若手の参加を促したところ、74名以上の方にご参加いただきました。「人とつながり、未来への壁を破る 中部支部」のキャッチフレーズのもと、25年度も魅力的な企画を考え、多くの会員が参加したくなる同窓会にすべく盛り上げてまいります。どうぞご期待ください。

【特別講演会】

中部支部は今年も2つのテーマで講演会を開催しました。京大医学研究科の木下彩栄教授と、JAXAの藤井 剛氏（H18/2006卒）の2名にご講演いただきました。

愛知県出身の木下教授からは『認知症新時代』というテーマで、認知症診断や新薬の最先端についてお話しいただきました。参加者全員が真剣に耳を傾け、質疑応答も盛況でした。適度な運動、地中海食、十分な睡眠を心がけ、日常から頭を使って認知症予防に努めようと多くの参加者が意識を新たにしました。



木下教授の講演



藤井氏の講演

藤井氏には『ロケットと宇宙機の研究開発現場から見た宇宙開発のおもしろさ』というテーマで、H3ロケット発射までの物語や、コウノトリ後継の宇宙ステーション補給機HTV-Xの開発状況についてお話しいただきました。若い技術者の臨場感あふれる体験談は、情熱と巧みなストーリー構成により、参加者の心に響き、翌週からの仕事に身が引き締まる思いを抱かせたことと思います。

【懇親会・新人歓迎会】

新入会員7名を迎え、アットホームな雰囲気です立食形式の食事を楽しみました。終盤には恒例の石橋基弘氏（H4/1992卒）のリードで、ややいびつな琵琶湖の形の輪を全員で作し、琵琶湖周航の歌を合唱しました。今年も盛況のうちに終えることができました。参加最年長の中川 哲氏（S38/1963卒）からは、「若い人の頑張りが見られて大変良かった」という嬉しいお言葉もいただきました。年度初めのご多忙の中、ご参加いただいた皆さん、ありがとうございました。最後に、準備と当日の運営に尽力いただいた総会担当幹事の勝野友介氏、山内崇史氏、門林映美氏、廣野陽子氏、松岡和幸氏、木下雄介氏に感謝いたします。



集合写真

series 研究最前線 (25)

確率動的システムの確率分布を制御する

星野健太 (H21/2009 卒)



「確率的に振る舞うシステムのランダムネスを制御する方法とは？」

1. はじめに

制御理論の分野では近年、確率的な動的システムにおける確率分布の時間発展を制御する問題が注目されている。たとえば、群衆行動のように多数の個体を粒子とみなすシステムでは、粒子のばらつきを確率分布として捉え、群衆が一箇所に集中するのを避けながら、所望のフォーメーションに誘導するような問題が考えられる。このような問題は、最適輸送理論や平均場型制御といった数学的枠組みに基づいている。

さらに、機械学習の生成モデルとして広く知られる拡散モデルも、確率過程をニューラルネットワークによって構成し、所望の確率分布を得ることでデータ生成を行っており、確率分布の制御の観点から拡散モデルを研究する動きも出てきている。こうした背景のもと、確率分布の制御問題は従来の制御理論の枠を超えて広い分野へと展開しつつある。

本稿では、筆者がこれまで取り組んできた確率分布の制御に関する研究を紹介する。なお、厳密な議論は本稿では行わないため、詳細は参考文献 [1],[2] を参照されたい。

2. 動的システムの確率分布の遷移を記述する方法

本稿では、離散時間の動的システムにおける確率分布の制御問題を紹介する [1]。なお、連続時間システムとして確率微分方程式で記述される制御系を扱うことも可能である [2]。

離散時間の動的システムとして、以下の形を考える：

$$x_{t+1} = f(x_t, u_t), \quad x_0 \sim \mu_0, \quad t = 0, \dots, T-1 \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 x_t は時刻 t におけるシステムの状態、 u_t はその時刻に与える制

御入力を表す。関数 $f(x_t, u_t)$ は、状態と制御入力から次の時刻の状態 x_{t+1} を決定するシステムのダイナミクスを記述する関数である。

一般的な制御問題では、関数 f が既知であり、初期状態 x_0 が与えられたときに、所定の目的を達成するような状態の軌道 $\{x_t\}_{t=0,\dots,T}$ を生成する制御入力列 $\{u_t\}_{t=0,\dots,T-1}$ を求めることが課題となる。

確率分布の制御問題では、このような設定とは異なり、初期状態 x_0 を確率分布 μ_0 に従う確率変数とみなす。このとき、動的システムの遷移関数 f は、状態 x_1 の値だけでなく、その確率分布 μ_1 を決定する。時刻 t における状態変数の分布を μ_t とし、制御入力 u_t を決めると、時刻 $t = 0$ から $t = T$ までの分布 μ_t の時間変化が決まる。数学的には、確率分布の押し出しという概念により、時刻 t から $t + 1$ への分布の遷移が定式化される。直感的には、分布 μ_t に従って多数のサンプル x_t が存在すると考え、それぞれを式(1)に従って更新すると、新たなサンプル群 x_{t+1} が得られ、それらが成す確率分布が次の時刻の分布 μ_{t+1} に対応する。このようにして、初期状態が確率的な場合に式(1)によって状態の確率分布の時間発展が定まる。

3. 確率分布の最適制御問題

制御問題では、あらかじめ定められた制御目的を達成するように制御入力を設計することが課題となる。本節では、確率分布の制御問題の中でも基礎的な問題設定を紹介する。

ここでは、初期の確率分布を μ_0 とし、式(1)のシステムに対して終端時刻 $t = T$ まで制御を行ったとき、終端の確率分布 μ_T を目標の確率分布 μ_d にできるだけ近づけることを目指す。このためには、確率分布間の類似度を測る指標が必要となる。本稿では、確率分布の類似度を測る手法として、Wasserstein距離を用いる。これは最適輸送問題に由来する指標であり、2つの確率分布 μ と ν に対して、以下のように定義される：

$$W_2(\mu, \nu) = \left(\inf_{\pi \in \Pi(\mu, \nu)} \int_{R^n \times R^n} |x - y|^2 d\pi(x, y) \right)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 $\Pi(\mu, \nu)$ は μ および ν を周辺分布に持つカップリングの集合であり、 π はその中の要素である。Wasserstein距離は次のように解釈できる。分布 μ と ν をそれぞれ砂山とみなし、一方の砂山をもう一方の形に成形する際、粒子を運ぶのにかかる運搬コストのうち最小のコストの値がWasserstein距離となる。この距離は、ユー

クリッド距離のように距離の公理を満たすことが知られている。

このWasserstein距離を制御問題のコスト関数として用いることで、以下のような最適制御問題が定式化される：

$$\min_{u_0, \dots, u_{T-1}} W_2(\mu_T, \mu_d)^2 \quad (3)$$

$$\text{subject to } x_{t+1} = f(x_t, u_t), \quad x_0 \sim \mu_0$$

一般に、コスト関数を最小にする制御入力を求める問題は最適制御問題と呼ばれる。本稿で扱うのは、確率分布を対象とした最適制御問題である。

最適制御問題の代表的な解法には、大きく分けて2つのアプローチがある。1つは R.E. ベルマンによる動的計画法に基づく方法、もう1つは L.S. ポントリャーギンによる最小原理に基づく方法である。後者は、システムのダイナミクスを制約条件とした最適化問題に対する Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件に対応する。

文献 [1] では、上記の確率分布の最適制御問題に対して最小原理に基づく解法を提示している。Fig. 1では、この手法を用いて、1次元システムの確率分布の最適制御問題に対する数値計算の結果を示している。Fig. 1は時刻 $t = 0$ から時刻 $t = 7$ まで1次元システムの確率分布の時間発展を示している。青い点線が x_0 の確率分布 μ_0 を表している、赤い点線がターゲットとなる確率分布 μ_d を表している。灰色のヒストグラムは、多数の x_0 のサンプルを μ_0 からサンプリングし、その後、設計した制御と式(1)に従って x_t を遷移させたときの x_t の分布をヒストグラムとして示したものである。これより、時間の経過とともに x_t の確率分布が μ_d に類似していく様子が見て取れる。

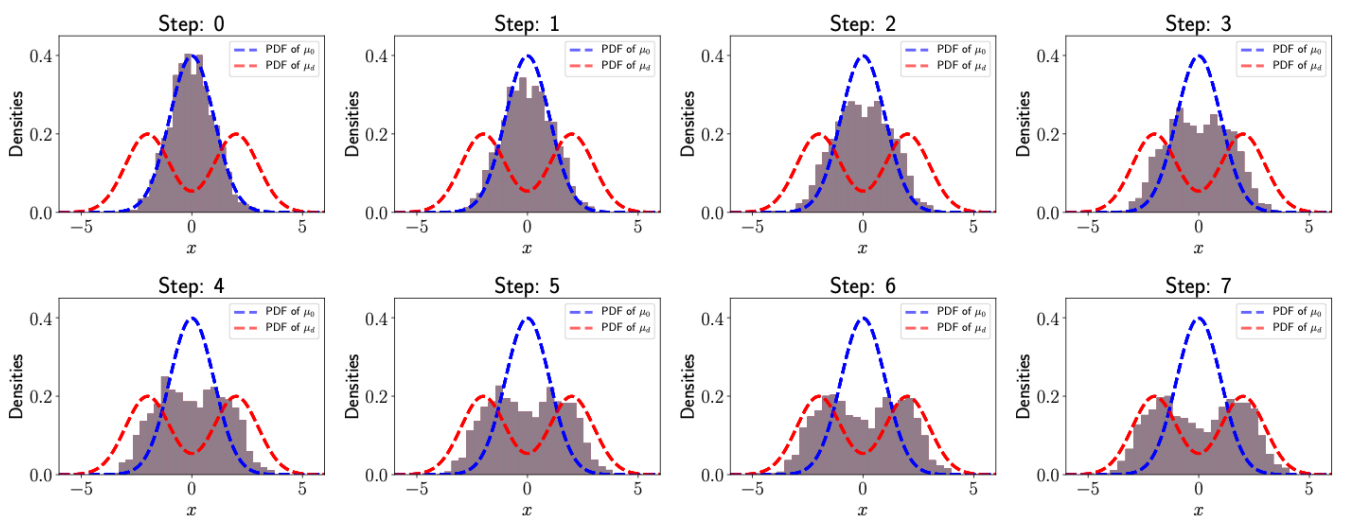


Fig. 1 確率分布の最適制御の数値例

4. おわりに

本稿では、これまでに私が行ってきた研究の中から、確率分布の最適制御問題に関する内容を紹介した。確率分布の制御問題は、生成 AI の分野で用いられる拡散モデルや Normalizing Flow と類似した問題設定に基づいている。制御理論はこれまで、さまざまな制御システムや制御課題に対して、性能保証付きの制御法を構築するための理論的枠組みを提供してきた。そうした背景のもと、確率分布の制御問題が生成 AI のような比較的新しい技術と関わりを持つのであれば、近年その重要性が強調されている生成 AI の安全性の保証に対しても、制御理論的なアプローチが有効な手段となり得ると考えられる。

参考文献

- [1] Kenta Hoshino, “Finite-horizon control of nonlinear discrete-time systems with terminal cost of Wasserstein distance,” Proceedings of the 59th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 4268-4274, 2020年
- [2] Kenta Hoshino, “Finite-horizon optimal control of continuous-time stochastic systems with terminal cost of Wasserstein distance,” Proceedings of the 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp.5819-5824, 2023年

Profile

京都大学大学院情報学研究科情報学専攻大塚研究室 助教

（現所属：東京科学大学情報理工学院 特任准教授 / 株式会社デンソーアイティ
ーラボラトリ）

2009年、北海道大学工学部を卒業。2011年に北海道大学大学院情報科学研究科修士課程修了。2014年、北海道大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。2014年から2019年まで青山学院大学理工学部助教、2019年から2025年まで京都大学大学院情報学研究科助教。その間、2023年2月から2023年9月までGeorgia Institute of Technology, Visiting Scholar, 2023年9月から2024年2月までUniversity College London, Visiting Researcher。2025年4月から現所属。

研究室HP（京大在籍時）：<https://www.ids.sys.i.kyoto-u.ac.jp/>

研究室HP（現所属）：<https://d-itlab.comp.isct.ac.jp/>

北山ハイキング

藤川卓爾 (S42/1967卒)

学生時代に京都北山と比良山にハイキングに行った。きっかけは年末の南座の顔見世で見た歌舞伎の「鳴神」である。この芝居の舞台になった雲ヶ畑に行ってみようと思い立って一人で下鴨の下宿から岩屋橋まで約12 kmの道を2時間かけて歩いて行った。帰りは疲れたのでバスに乗った。

その次は友人2人と一緒に棧敷ヶ岳に登った。この時は岩屋橋までバスで行った。棧敷ヶ岳は北区の最高峰で標高は895.9 m、鴨川の源流である。平安時代に皇位継承から遠ざけられた惟喬親王が出家して雲ヶ畑に隠棲し、山頂に棧敷を作って都をしのんで眺めたと伝えられている。



棧敷ヶ岳頂上にて

Google Map 京都北山と比良山系

棧敷ヶ岳の頂上から東側を見るとさらに高い山が見えた。これが京都府最高峰の皆子山（標高971 m）である。京都府は千葉県、大阪府、沖縄県と同様に標高1,000 m以上の山がない。皆子山は京都府と滋賀県の府県境にある。

そこで次は皆子山に登った。安曇川の源流で飯盒炊さんをした。皆子山の頂上から眺めると今度は東に蓬萊山、北東に武奈ヶ岳が見えた。



皆子山から見た蓬萊山

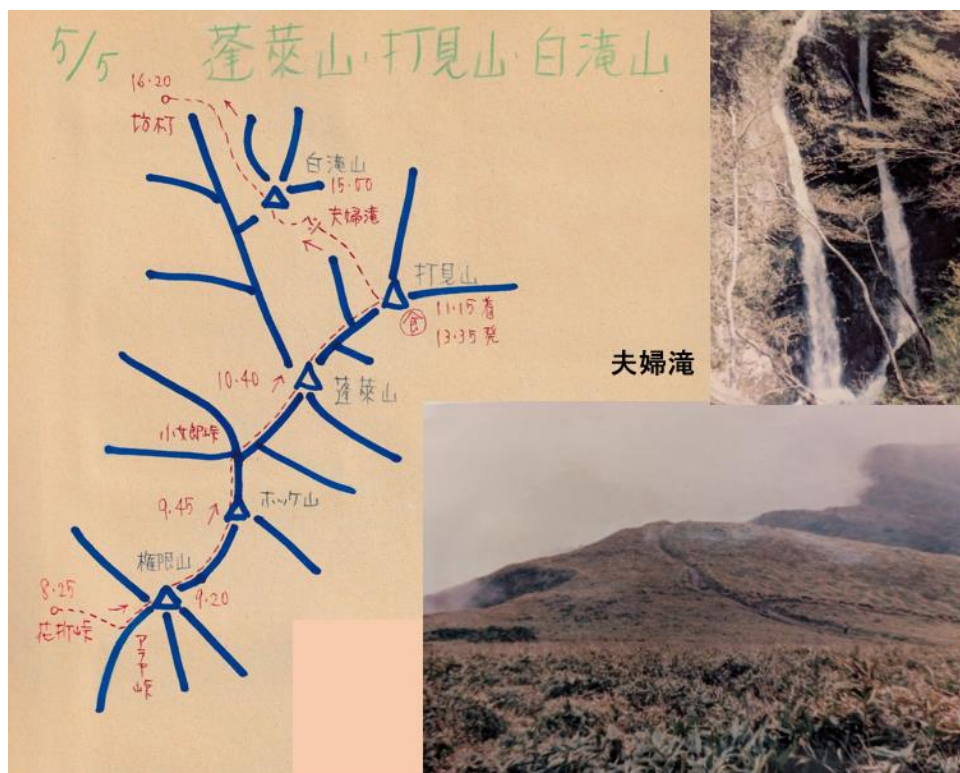


皆子山から見た武奈ヶ岳



皆子山頂上にて

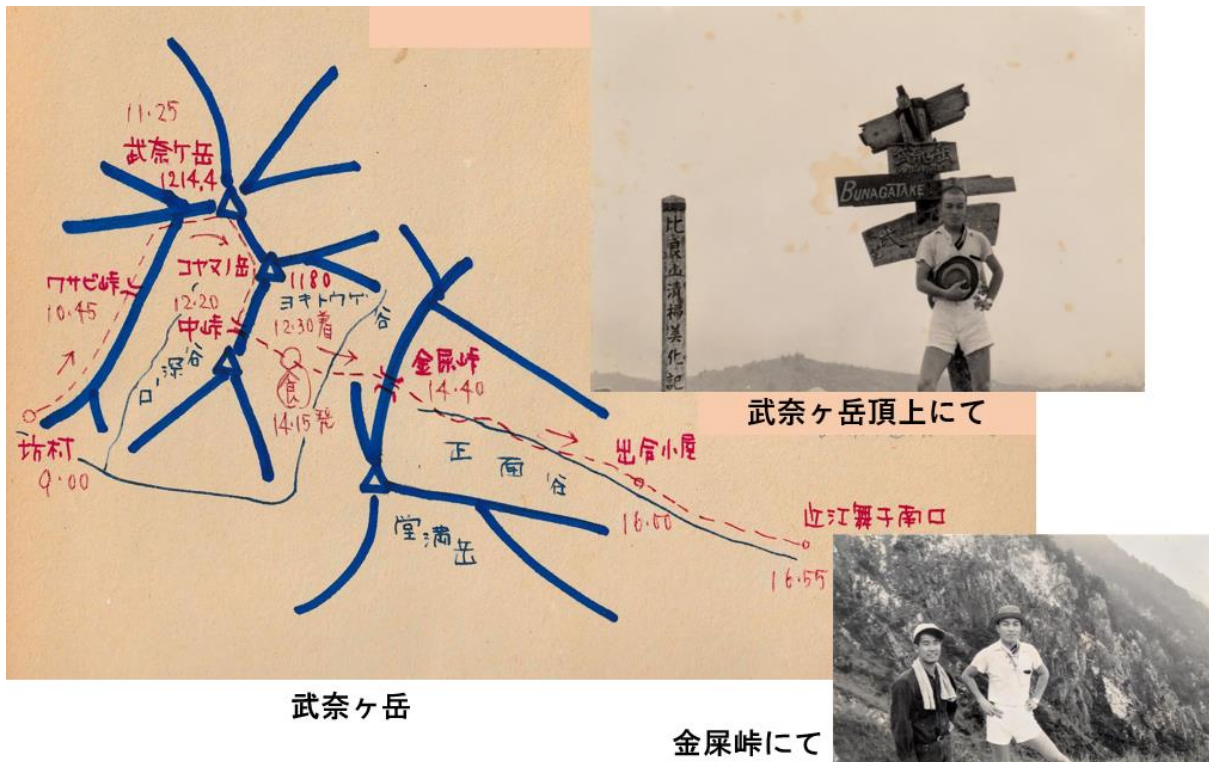
次は蓬萊山に登った。蓬萊山は滋賀県であり、もはや北山ではない。花折峠から登って権現山、ホッケ山、蓬萊山（標高1,174.2 m）、打見山（1,108 m）と縦走し、夫婦滝を見て白滝山（1,022 m）を越えて坊村に下りた。



南比良山系

蓬萊山から南方を見る

その次は坊村から武奈ヶ岳に登った。武奈ヶ岳は比良山系の最高峰で標高は1,214.4 mである。ブナが多く自生することからその名がついたとされている。帰りはコヤマノ岳、中峠、金屎峠を通して近江舞子に下りた。



その他にも、大見尾根を越えるハイキングや、武奈ヶ岳の東側で日本の滝百選に選ばれているハツ淵の滝などに行った。



ハツ淵の滝 大摺鉢にて



東海道新幹線で琵琶湖の東側から遠くに比良山が見えると学生時代を思い出す。