

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K19865

研究課題名(和文) 情報幾何的階層モデリング

研究課題名(英文) Information geometrical hierarchical modeling

研究代表者

石橋 英朗 (Ishibashi, Hideaki)

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・助教

研究者番号：30838389

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は情報幾何学に基づいたベイズ事後分布集合の階層モデリングの学習理論を構築することである。この目的のため、本研究では以下の3点について取り組んだ。(1)モデルパラメータが無限次元の事後分布集合の幾何学構造を定義した。(2)確率分布集合のモデリング法を開発した、特にカーネル平滑化を用いた多様体モデリング法を開発した。(3)潜在変数が伴う場合の事後分布集合の階層モデリング法を開発した。これにより、教師なし学習の階層モデリングが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では情報幾何学に基づいて汎用的に利用できるメタ学習、マルチタスク学習、転移学習の方法論を構築した。特に本研究の枠組みでは一般的に扱われる教師あり学習のメタ学習やマルチタスク学習だけでなく教師なし学習のメタ学習やマルチタスク学習も統一的に扱うことが可能となる。これにより様々なデータの形式や学習タスクに適した学習アルゴリズムをシームレスに提供できるようになった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a theory of hierarchical modeling for Bayes posteriors based on information geometry. For this purpose, we addressed the following three themes. (1) To define the structure of the set of Bayes posteriors having infinite-dimensional model parameter. (2) Development of a manifold modeling method for a set of Bayes posteriors based on kernel smoother. (3) Development of a hierarchical modeling method for a set of Bayes posteriors with latent variables.

研究分野：機械学習

キーワード：情報幾何学 階層モデリング メタ学習 マルチタスク学習 ガウス過程

### 1. 研究開始当初の背景

マルチタスク学習や転移学習、メタ学習は複数のタスク間に共通する知識を発見することで汎用性の高い予測や知識発見を可能にする学習の枠組みであり、幅広い分野へ応用されてきた。しかしながら、これらの多くの研究は個々の学習パラダイムや学習モデルに特化したアプローチがほとんどである。すなわち、回帰分析やクラス分類、クラスタリングなどの学習パラダイムや線形回帰、ガウス過程、ニューラルネットなどのモデルごとにアルゴリズムが提案されてきた。そのため、解析したいデータや学習モデルが変わるとそのデータやモデルに合わせてマルチタスク学習法や転移学習法、メタ学習法を開発する必要があった。

一方で、ベイズ推論を用いることで多くの学習モデルは確率モデルとしてモデル化することができる。そのため、確率モデルの集合をさらにモデル化する手法があれば、様々な学習モデルに対してマルチタスク学習や転移学習、メタ学習を実現するための統一的な基盤を作ることができ、図1のようにデータの形式や学習モデルに合わせてシームレスにマルチタスク学習や転移学習、メタ学習のアルゴリズムを提供できるようになるのではないかと考えた。図1: 階層モデリングの概念図。

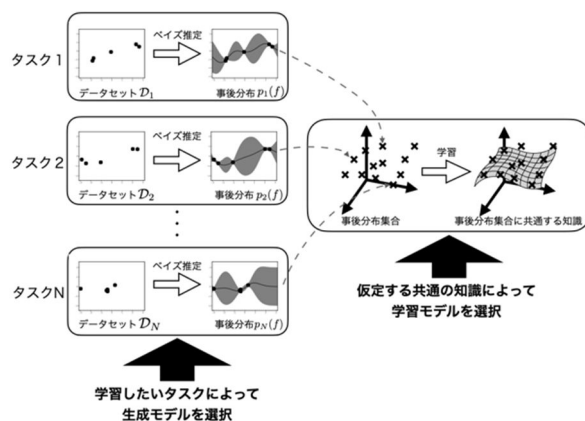


図1: 階層モデリングの概念図。

### 2. 研究の目的

本研究の目的はベイズ推定によって得られたタスクごとの事後分布の集合を階層的に学習する階層モデリングの学習理論を情報幾何学に基づいて構築することで任意の生成モデルや学習パラダイムに対して最適なアルゴリズムをシームレスに提供する枠組みを構築することである。

### 3. 研究の方法

本研究を達成する上での論点は (1)タスクの集合 (ベイズ事後分布の集合) の構造をどのように定義するか、(2)タスクの集合に共通する知識をどのように仮定し、モデル化するか の2つである。そこで本研究では以下の2つのテーマに取り組む。

#### (1) ベイズ事後分布集合の構造の定義。

様々な問題に合わせたマルチタスク学習を実現するためには、データの形式や仮定するモデルが変わってもタスク集合の構造を統一的に定義できることが重要となってくる。そのため、このテーマでは情報幾何学を用いて各タスクのモデルであるベイズ事後分布の集合の幾何学構造を定義することを考える。特にガウス過程に代表されるようなモデルパラメータが無限次元の指数型分布族集合の構造の定義を行う。

#### (2) 確率分布集合の学習アルゴリズムの開発。

既存の確率分布集合を次元削減あるいは多様体学習するアルゴリズムとして e-PCA, m-PCA とそれを拡張した方法がある。しかし、これらの方法は理論的には良いがどれも線形手法であり実用上は必ずしも良い方法とは言えない。一方で、確率分布集合の空間はベクトル空間ではないため、ガウス過程やニューラルネットなどの手法は推定したモデルが確率分布の空間をはみ出す可能性があり必ずしも適切ではない。そこで本研究では実用的なアルゴリズムを実現するために以下をおこなった。

(2-1) e型とm型の指数分布族集合の多様体モデリング法の開発

(2-2) e型とm型の指数分布族集合の多様体モデリング法を融合し、潜在変数が伴う場合へ拡張

#### 4. 研究成果

##### (1) ベイズ事後分布集合の構造の定義

情報幾何学では確率空間の構造を定義する際にダイバージェンスの不変性が成り立つように構造を定義する．本研究では事後分布間で事前分布が同じと仮定することでモデルパラメータが無限次元であったとしても有限次元の十分統計量が存在し，ダイバージェンスの不変性から無限次元の事後分布集合と同型な有限次元の確率分布集合を定義できることを示した．また，確率モデル集合の部分空間を推定するときに無限次元の事後分布集合に対する部分空間推定と有限次元の確率分布集合に対する部分空間推定の結果が一致することも示した．図2は実際にガウス過程集合の部分空間推定によってガウス過程のマルチタスク学習を実現した結果である．この手法はタスクごとにガウス過程の平均関数と共分散関数を推定でき，少数のデータでも正確なモデルを生成できるため既存のガウス過程のマルチタスク学習よりもより few-shot learning に適した手法になっている．

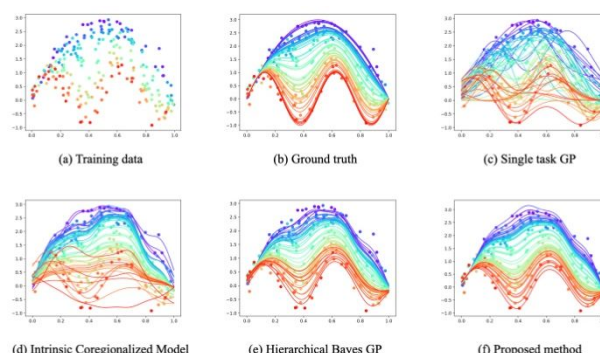


図 2: ガウス過程集合の階層モデリングの結果．

##### (2) 確率分布集合の学習アルゴリズムの開発．

###### e 型と m 型の指数分布族集合の多様体モデリング法の開発

カーネル平滑化を用いることで，推定した多様体上の任意の点が確率空間内に必ず含まれる指数分布族集合の多様体モデリング法を開発した．この時それぞれの確率モデルは e 座標系と m 座標系の 2 つの座標系によって表現できるため多様体モデリング法も e 型と m 型の 2 通りのモデリング法が考えられるが，e 型の多様体モデリングによってタスク間でデータを転移することができ，m 型の多様体モデリングによってタスク間でモデルを転移することができるマルチタスク学習として位置付けることができる．

e 型と m 型の指数分布族集合の多様体モデリング法を融合し，潜在変数が伴う場合へ拡張

で開発した 2 つの多様体モデリング法はそれぞれ別の目的関数になっており，e 型だとタスク間でデータを転移し m 型だとタスク間でモデルを転移するため，それぞれで役割が異なる．そこで 2 つの目的関数を組み合わせることで 1 つの目的関数にすることでデータとモデルの双方を知識転移する階層モデリング法を実現した．特に，潜在変数が伴う指数分布族集合の多様体モデリングにおいては e 型の多様体モデリングや m 型の多様体モデリングだけでは仮定する確率モデルによって期待通りの結果が得られないことがあったのに対し，2 つの多様体モデリングを融合することで潜在変数が伴う指数分布族集合の多様体モデリングにおいても期待通りの結果が安定して得られることがわかった．また，教師あり学習においても e 型の多様体モデリングや m 型の多様体モデリングを個別に行う場合と比べてより予測精度が向上することもわかった．図3は教師あり学習の階層モデリングだけでなく，クラスタリングや多様体モデリングといった教師なし学習の階層モデリングも本研究によって一つの枠組みで統一的に実現できたことを示す結果である．

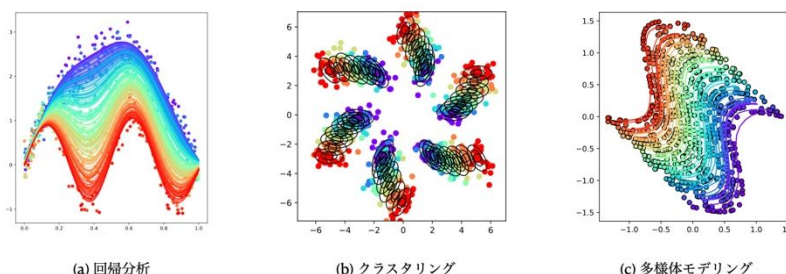


図 3: 提案した階層モデリングの枠組みによって導出したアルゴリズムの実行結果．

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ishibashi Hideaki, Akaho Shotaro	4. 巻 34
2. 論文標題 Principal Component Analysis for Gaussian Process Posteriors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neural Computation	6. 最初と最後の頁 1189 ~ 1219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1162/neco_a_01489	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishibashi Hideaki, Higa Kazushi, Furukawa Tetsuo	4. 巻 473
2. 論文標題 Multi-task manifold learning for small sample size datasets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neurocomputing	6. 最初と最後の頁 138 ~ 157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neucom.2021.11.043	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Ryuji, Ishibashi Hideaki, Furukawa Tetsuo	4. 巻 152
2. 論文標題 Visual analytics of set data for knowledge discovery and member selection support	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Decision Support Systems	6. 最初と最後の頁 113635 ~ 113635
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dss.2021.113635	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Miyazaki Kazuki, Takano Shuhei, Tsuno Ryo, Ishibashi Hideaki, Furukawa Tetsuo
2. 発表標題 Scalable manifold modeling by Nadaraya-Watson kernel regression
3. 学会等名 The 15th International Conference on Innovative Computing, Information and Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Miyazaki Kazuki and Ishibashi Hideaki and Furukawa Tetsuo
2. 発表標題 Sparse approximation of unsupervised kernel regression for large scale relational data
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Neuromorphic AI Hardware (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nakashima Seitaro, Ishibashi Hideaki, Furukawa Tetsuo
2. 発表標題 Meta-modeling of manifold models for dynamical systems through biased optimal transport distance minimization
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Neuromorphic AI Hardware (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tanka Daiki, Ishibashi Hideaki, Furukawa Tetsuo
2. 発表標題 Simultaneous Meta-modeling of Dynamics and Kinematics based on the Hierarchical Manifold Modeling
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Neuromorphic AI Hardware (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------