

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月25日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23650145

研究課題名（和文） 統計的正則化理論と神経生理学：脳科学との接点

研究課題名（英文） Statistical regularization theory and neurophysiology

研究代表者

狩野 裕 (KANO YUTAKA)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：20201436

研究成果の概要（和文）：

研究期間の初年度に国際シンポジウム「生命科学と統計学」を組織・開催し、統計学、生命科学、認知心理学、そして脳情報科学の間の研究交流を開始した。このシンポジウムの直接的な成果として国際共同研究が開始され、因子分析モデルの新しい推定方法と因子回転の新たな方法が開発された。加えて、統計学と脳情報科学の共同研究グループが構成され、共同研究の基盤が整った。

研究成果の概要（英文）：

We organized and hosted an international symposium “Life Science and Statistics” in Osaka University in 2011, the first year of the research. The symposium was held to aim at constructing an interface among researchers in statistics, life science, cognitive psychology and brain sciences. At least two joint international works have been accomplished, as fruits of having the symposium; one is on a new estimation of factor analysis model and the other on a new factor rotation method. After the symposium, a new research group of statisticians and brain scientists was created to conduct an interdisciplinary study.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・統計科学

キーワード：多変量解析，識別性，誤差の制御，因子回転，不良設定問題，スパースコーディング

1. 研究開始当初の背景

人間の特性や行動を研究するために多くの統計モデルが開発されてきた。知能や性格研究のための因子分析や項目反応モデルがその代表例である。今世紀に入り、ひとつのレボリューションが起こる可能性がある。それは、脳科学、特に生理学レベルでの研究と共に発展する統計学である。

統計モデルにおいて識別性(identification)は基本的な条件である。識別性のないモデル

を用いることは伝統的統計学の枠組みの外にある。しかし、実はこのようなセットアップは思いのほか多い。例えば、視覚情報処理では網膜に映った二次元情報から三次元空間を再現することが行われている。数学的には与えられた二次元平面情報を生み出す三次元空間情報は無数にある。このような問題は逆問題または不良設定問題(ill-posed problem)と呼ばれている(Poggio, 1985)。視覚計算における不良設定問題へのアプローチは、

Olshausen and Field(1996, Nature) のスパースコーディングに代表される標準正則化理論(乾, 2004) である。標準正則化理論は多くの分野で有効な手法として用いられていながら、それぞれの知的財産を互いに共有できていないところに問題がある。

研究代表者の狩野は 1980 年代から、多変量解析、特に因子分析や共分散構造分析を研究対象とし、理論研究や応用研究を積み重ねてきた。因子回転法のひとつとも目される独立成分分析(ICA) に研究対象を広げ、ICA のもつ理論的な性質を中心に研究してきた。ICA における基礎的事実である独立性最大化と非正規性最大化の同等性は、実は、スパースコーディングを達成することと極めて近いことが分かってきた。一方で、視覚のメカニズムにも興味をもち、脳の第一次視覚野(V1 野) に存在する視覚をつかさどる単純細胞の受容野には選択性があること、そして、スパースコーディングというシンプルな原理によって単純細胞の役割を果たす基底を自動生成できることを知り、それが、「モデル適合+正則化」という統計学・機械学習での重要な研究テーマと密接に関わる。

2. 研究の目的

視覚情報処理・脳内強化学習における有力な研究方法に「モデル適合+正則化」があり、それは統計学・機械学習にも登場する。正則化項の導入目的は様々で、たとえば、モデル選択・Bayes 法、過学習そして不良設定問題・識別不能問題の解決である。本研究課題はまずこれらの方法論を整理・統合し、それらの本質を理解することを目的とする。しかし、それは本研究の第一ステップであり、本来の目的は、統計学と機械学習の最新の方法論が視覚情報処理・脳内強化学習に如何に貢献できるかを研究すること、また、逆に神経生理学(脳科学) から統計学と機械学習における新しい方法論を構築すること、そして、そのために、統計学と機械学習、神経生理学の研究者間コミュニティを構築し、それらの間の議論を活性化させることである。

3. 研究の方法

- (1) 統計学、生命科学、認知心理学、そして脳情報科学を専門とする研究者が一同に会した国際研究集会を開催する。互いの問題意識を確認し、専門用語や概念の相互理解を図る。
- (2) 共同研究のためのグループを作成する。キーワードは、視覚情報処理、脳ネットワークの機能と構造、モデル適合+正則化、脳内強化学習である。
- (3) 基礎的な勉強会を含めて定期的な研究会をもち、相互理解、共同研究を進める。

4. 研究成果

- (1) 研究集会の開催：独立成分分析(ICA) とスパースコーディング、因子分析における因子回転、統計的正則化法に関する研究集会「生命科学と統計学」を H23 年 11 月に大阪大学において開催した。R.I. Jennrich 教授(UCLA)と Nickolay T. Trendafilov 教授(The Open University, UK) を海外共同研究者・特別招待講演者として招聘し基調講演をして頂いた。主要研究テーマとして次の4つを設定した。①Factor Rotation and Sparseness (English session), ② シンボリックデータ解析, ③統計的正則化理論と神経生理学, ④生物統計・生物情報。多数の参加者を得、有意義な意見交換がなされた。具体的な実施プログラムは付録に示す。
- (2) 学際融合研究グループの構築と融合研究推進：脳科学と統計学、情報科学という異分野間の共同研究を促進するため、脳情報統計学研究会を発足させた。構成員は、代表者の狩野、研究分担者(乾教授、小林准教授)に加えて、脳情報通信研究機構の春野雅彦准教授、渡邊言也特任研究員、社会科学研究所と玉川大学、ATR のスタッフと、基礎工学研究科の博士課程を中心とする大学院生である。脳内の情報ネットワーク研究の最新成果について情報交換しつつ、融合研究を進めた。
- (3) 因子回転法の開発：研究成果(1)で述べた国際会議により Jennrich 教授との国際共同研究が成就し、クラスタリングを援用した新たな因子回転法を2種類提案した。そこでは Jennrich 教授の Gradient Projection algorithm と k-means algorithm が重要な役割を果たす。研究成果は国際学術雑誌 British Journal of Mathematical and Statistical Psychology に掲載が決定している。
- (4) 因子分析モデルの推定方法：研究成果(1)で述べた国際会議により Trendafilov 教授との国際共同研究が成就し、因子得点と因子負荷量を同時に推定する枠組みで、因子負荷量を直接、sparse に推定する方法を開発した。研究成果は国際会議 ERCIM 2012 において報告された。
- (5) 正則化法に基づく高次元因子分析モデルの推定：生命科学においては(超)高次元データの解析が求められることが多い。本研究では、まず、標本共分散行列をある正則化法により安定的に推定し、次に、因子負荷量などの興味ある構造パラメータを推定する方法の漸近的性質を理論的に研究し、一致性が成立するための数学的条件を導いた。研究成果

- は、統計関連学会連合大会において口頭発表した。
- (6) 生命科学データの欠測値問題：生命体を経時的に調査観察する研究では中途脱落の問題は避けて通れない。本研究では無視不可能な欠測をモデリングし、その識別性問題を検討し、適切な新規モデルを提案、そして、実データの解析を行った。研究成果は、シンポジウム「統計学の基礎的理論とその応用」並びに第7回日本統計学会春季集会にて発表された。
- (7) 変分ベイズ法による有限混合分布の推定問題：生物の分布は一様でなく、いくつかの異なる集団から構成されることが多い。有限混合分布はいくつかの異なる特徴をもつ集団が混在する母集団における統計的推測を可能にする。本研究では計算量に課題のある通常のベイズ法の *alternative* としての変分ベイズ法を理論的・数値的に検討した。研究成果は、シンポジウム「統計学の基礎的理論とその応用」において口頭発表された。
- (8) 高原現象を記述する項目反応モデルの開発：人の能力はトレーニングとともに向上することが期待されるが、時にはスランプもあり、多くの人間にとってスランプの時期は共通することもある。本研究では、能力の停滞現象を有限混合モデルによって記述した新しいモデルを提案しその推定方法を開発した。研究成果は、学術雑誌 *Journal of the Japanese Society of Computational Statistics* に掲載されることが決まった。
- (9) 動的スパースコーディングによる脳内強化学習の研究：哺乳類の脳において大脳基底核はドーパミンを介した強化学習を行う神経回路と考えられている。中脳ドーパミン細胞が、動物の内的状態の情報の時間的エッジと報酬信号の差(報酬予測誤差)を教師信号として大脳皮質・基底核の予測の更新を行っており、これは一種の機械学習と考えられる。報酬予測誤差をコードするとされるドーパミン細胞には、脚橋被蓋核(PPTN)と背側縫線核(DRN)の入力がある。PPTNとDRNが動的情報としてどのような情報を計算しているかを眼球運動課題および古典的条件付け課題を訓練したサル データを用いて検討した。アセチルコリン系、セロトニン系とドーパミン系の生理学的知見から得られた相互関係をもとに、時間に依存する正則化項を導入し、ナイーブなスパースコーディングの拡張を行った。
- (10) 脳内情報処理におけるモニタリング機能の数理的・実証的研究：標準正則化理論は、ベイズ推定というより大きな枠

- 組みの中で捉えることができる。時系列の情報を扱う場合にはカルマンフィルタの形になる。これらの理論に対応して、脳の情報処理メカニズムには、外界から得られるフィードバック信号の予測と、実際に得られた信号との誤差を評価するモニタリング機能が存在する。本年度は、ある種の精神疾患、すなわち統合失調症や自閉症などにおいて、これらの機能がどのように障害を受けているかについて検討を行い、モデル化を行った。
- (11) 嫌悪と選好の脳内相互関係の統計モデル化：中脳で主に報酬、覚醒、持続的注意に関係する、アセチルコリン作動性核「脚橋被蓋核」と嫌悪、衝動性、時間割引に関係するセロトニン作動性ニューロン核「背側縫線核」のサル眼球運動課題中に得られたニューロン活動について、報酬、嫌悪と強化学習に対する役割を明らかにする統計モデルを提唱した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Mori, J. and Kano, Y. (in press). Item response theory using a finite mixture of logistic models with item-specific mixing weights. *Journal of the Japanese Society of Computational Statistics* (査読有 accepted on Jan 17, 2013)
- ② Yamamoto, M. and Jennrich, R.I. (in press). A cluster-based factor rotation. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*. (査読有 accepted on January 7, 2013)
- ③ Okada, K. and Kobayashi, Y. (2013). Reward prediction-related increases and decreases in tonic neuronal activity of the pedunclopontine tegmental nucleus. *Frontiers in Integrative Neuroscience*. vol.14, 1-17. 査読有
- ④ Okada, K. Nakamura, K. and Kobayashi, Y. (2011). A neural correlate of predicted and actual reward-value information in monkey pedunclopontine tegmental and dorsal raphe nucleus during saccade tasks. *Neural Plasticity*. vol. 2011. Article ID 579840, 21 pages. 査読有

〔学会発表〕(計9件)

- ① 森川耕輔・狩野裕 (2013/3/3).
Identification problem for the analysis of binary repeated measure data with non-ignorable missing. 第7回日本統計学会春季集会. 学習院大学, 東京
- ② Adachi, K. and Trendafilov, N.T. (2012/12/1). Orthogonal factor analysis subject to direct sparseness constraint on loadings. ERCIM 2012. Oviedo, Spain
- ③ 森川耕輔・山本倫生・狩野裕 (2012/11/21). Analysis of binary repeated measure data with non-ignorable missing. シンポジウム「統計科学の基礎的理論とその応用」. 国際奈良学セミナーハウス, 奈良
- ④ 磯崎郷平・寺田吉壺・狩野裕 (2012/11/21). 変分ベイズ法と混合正規分布の推定問題. シンポジウム「統計科学の基礎的理論とその応用」. 国際奈良学セミナーハウス, 奈良
- ⑤ 鎌田亜美・狩野裕 (2012/9/10). 正則化法に基づく高次元因子分析モデルの推定. 2012年度統計関連学会連合大会. 北海道大学, 札幌
- ⑥ Kobayashi, Y. (2012/4/29). Neuronal recording from cholinergic nucleus in the brainstem of awake monkeys in relation to arousal, motivation, motor control, visual information processing and reinforcement learning. Bio-X 2012 International Symposium on Molecular Cognition and Translational Research of Neuropsychiatric Disorders. Shanghai Jiao Tong University, China
- ⑦ 狩野裕 (2011/11/4). 統計的正則化理論と神経生理学. シンポジウム「生命科学と統計学」. 大阪大学, 大阪
- ⑧ Kano, Y. (2011/11/3). Factor Rotation and Sparseness. International Symposium "Life Science and Statistics". 大阪大学, 大阪
- ⑨ Kobayashi, Y. and Okada, K. (2011/9/16). The pedunculopontine tegmental nucleus neurons encode predicted reward signal by tonic regular firing and given reward signal phasically. Neuro 2011. パシフィコ横浜, 横浜

〔図書〕(計1件)

- ① 小林 康 (2012). 強化学習の神経機構「ブレインサイエンス・レビュー <2012>」伊藤正男・川合述史(編集). クバプロ. pp.127-150

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/~kano/research/seminar/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

狩野 裕 (KANO YUTAKA)
大阪大学・基礎工学研究科・教授
研究者番号: 20201436

(2)研究分担者

小林 康 (KOBAYASHI YASUSHI)
大阪大学・生命機能研究科・准教授
研究者番号: 60311198

乾 敏郎 (INUI TOSHIRO)
京都大学・情報学研究科・教授
研究者番号: 30107015

(3)連携研究者

志村 剛 (SHIMURA TSUYOSHI)
大阪大学・人間科学研究科・教授
研究者番号: 80150332

足立 浩平 (ADACHI KOHEI)
大阪大学・人間科学研究科・教授
研究者番号: 60299055

村田 昇 (MURATA NOBORU)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 60242038

(4)研究協力者

山本 倫生 (YAMAMOTO MICHIO)
日本学術振興会特別研究員 DC2

(5)海外共同研究者

Nickolay T. Trendafilov
The Open University, UK
Professor

Robert I. Jennrich
University of California, LA, USA
Professor

Aapo. Hyvarinen
University of Helsinki, Finland
Professor

付録 シンポジウムの詳細

科研費シンポジウム 2011
--- 生命科学と統計学 ---

日 程 : 2011年11月3日(木)~5日(土)
会 場 : 大阪大学 基礎工学国際棟
所在地 : 豊中市待兼山町1-3
世話人 : 狩野裕 (大阪大学 基礎工学研究科)

11月3日(木)

テーマ1 : Factor Rotation and Sparseness
(English session)

- Y. Kano (Osaka University)
Brief introduction to this session
- K. Adachi (Osaka University)
- N. T. Trendafilov (Open University, UK)
Sparse Component and Factor Analysis
Procedures via Directly Constraining
the Sparseness of Loadings
- M. Yamamoto (Osaka University)
A cluster-based factor rotation and its
properties
- R. I. Jennrich (UCLA, USA)
Rotation algorithms from the beginning
and exploratory bi-factor analysis
- S. Hashimoto (Osaka University)
A bayesian exploratory factor analysis
solution with the simplimax target
- N. T. Trendafilov (Open University, UK)
Exploratory factor analysis: modern
aspects
- H. Satomura (Osaka University)
Exploratory data-fitting factor
analysis with clustering of individuals

11月4日(金)

テーマ2 : シンボリックデータ解析

水田正弘 (北海道大学 情報基盤センター)
シンボリックデータ解析の考え方と手法

寺田吉壺 (大阪大学 基礎工学研究科)
シンボリックデータ解析における MDS に
ついて

テーマ3 : 統計的正則化理論と神経生理学

狩野 裕 (大阪大学 基礎工学研究科)
本テーマの序

赤穂昭太郎 (産業技術総合研究所)
カーネル法と正則化

廣瀬 慧 (大阪大学 基礎工学研究科)
正則化法に基づくスパース推定と調整
パラメータの選択

小林 康 (大阪大学 生命機能研究科)
学習神経回路における活動同期現象に
ついて

乾 敏郎 (京都大学 情報科学研究科)
予測的処理の神経生理学

11月5日(土)

テーマ4 : 生物統計・生物情報

大西俊郎 (九州大学 経済学研究院)
柳本武美 (中央大学 理工学部)
Dual saddlepoint equalities in model
averaging

柳本武美 (中央大学 理工学部)
大西俊郎 (九州大学 経済学研究院)
Bayesian モデル e-統合 : 複数の証拠と
意見

小林千鶴 (中央大学 理工学研究科)
鎌倉稔成 (中央大学 理工学部)
柳本武美 (中央大学 理工学部)
有意でない試験を継続するベイズ的視点

廣瀬英雄 (九州工業大学 情報工学研究院)
Estimation of the number of failures
using ordinary differential equations
to reliability models, with
applications to SARS, A(H1N1), and FMD
cases

内藤貫太 (島根大学 総合理工学部)
野津昭文 (総合研究大学院大学)
宇田川 潤 (滋賀医科大学 医学部)
大谷 浩 (島根大学 医学部)
Statistical analysis with dilatation
for development process of human fetuses

熊澤 蕃 (元内閣府原子力安全委員会事務局
技術参与)
確率的比例効果則とフィードバック効果
を組み合わせた生体リスク管理モデル

以上