

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25870503

研究課題名(和文)半教師付き学習による小標本高次元変数選択法の開発と超解像への応用

研究課題名(英文)Variable Selection for Small Sample and High Dimension Case by Semi-supervised Learning and Its Application to Super-Resolution

研究代表者

川喜田 雅則 (Kawakita, Masanori)

九州大学・システム情報科学研究所・助教

研究者番号：90435496

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の最大の成果はこれまで困難であったBarron and Cover理論の教師付き学習への適用を可能にしたことである。これによって確率変数の有界性や漸近的な仮定を一切必要としないリスク評価を行える可能性が開けた。我々は実際に圧縮センシングの代表的アルゴリズムlassoのこれまでにないリスク評価を得た。さらにこれらの成果について密度比を用いた半教師付き学習及びスパースコーディングの設定に拡張することに成功した。さらにシングルフレーム超解像は実は半教師付き学習とみなせることを指摘し、上記の半教師付きスパースコーディングによって精度が改善されることを示した。

研究成果の概要(英文)：The main important result of this study is that we provided a way to extend Barron and Cover's theory to supervised learning without any significant lack of its virtues, which had been considered to be difficult. Our extension leads to a risk estimator of supervised learning without conventional assumptions like boundedness of random variables and/or asymptotic assumption. By our method, we succeeded in deriving a new risk bound of the most famous compressed sensing algorithm (lasso). We also extended these results to semi-supervised learning and sparse coding. Furthermore, by implementing semi-supervised sparse coding, we construct a new semi-supervised super-resolution algorithm. We show that the accuracy of super-resolution can be improved by semi-supervised super-resolution by numerical experiments though its extent strongly depends on input images.

研究分野：統計科学，機械学習，情報理論

キーワード：半教師付き学習 MDL原理 超解像 Barron and Cover理論 スパースコーディング

1. 研究開始当初の背景

- (1) ほとんどの既存の半教師付き学習は共変量 x とラベル y の同時分布に対して何らかの事前知識を必要としていた。それらの方法は仮に事前知識が正しければ教師付き学習を改良するが、一方で事前知識が誤っていれば教師付き学習より悪化する危険性がある。それに対して同時分布に対する事前知識を一切仮定せず、常に漸近的に教師付き学習を改良することが保証されている半教師付き学習がいくらか知られている。それらの方法の共通の特徴は訓練データの x の密度関数と、ラベルなしデータの密度関数の比(密度比)を重みとする重み付き尤度法をベースにしていることである。ただしこれらの方法についての理論的な解析は十分に整っているとは言えない状況であった。
- (2) 一方で一枚の低解像度画像から正しい高解像度画像を復元する問題であるシングルフレーム超解像については圧縮センシング(lasso)を用いた教師付き学習が主流であった。具体的には低解像度画像 x と高解像度画像 y の組を多数用意したものを訓練データとし、同時スパースコーディングにより x と y を共に同じスパース係数で精度良く表現できる同時辞書(低解像度画像のための辞書と高解像度画像のための辞書)を学習する。ここでいう辞書とは過完備基底のことを指す。そして新たな低解像度画像 x が与えられたとき、 x と低解像度辞書から圧縮センシングによってスパース係数を推定して、高解像度辞書を用いて高解像度画像を推定する。実はこれらの処理は画像に対して直接行われるのではなく、画像を重複する小領域(パッチ)に細かく分割し、各パッチに対して上記の処理を行い、それらの結果を貼り合わせて最終的な画像が構成される。従って例えば超解像を行う低解像度画像が一枚しか与えられないとしても、実は多数のパッチ(すなわち多数の x) が得られることになる。これらのデータは、上記の訓練データとは別に追加で得られる、いわゆるラベルなしデータとみなせることから、超解像の問題設定は実は機械学習でいう(広い意味での)半教師付き学習の問題だといえる。ただし、訓練データとラベルなしデータの分布が同じ場合は狭義の半教師付き学習に相当し、異なる場合は共変量シフト(転移学習の一種)と呼ばれることもある。ここではそれらを合わせて広義の意味で半教師付き学習と呼ぶことにする。

2. 研究の目的

- (1) 本研究では同時分布に対する事前知識を一切仮定しない半教師付き学習の研究を行う。最初の目標は小標本高次元データに関する半教師付き学習法のモデル選択

法及び性能の理論的保証を整備することである。

- (2) さらに、超解像は半教師付き学習とみなせることを利用して、上記の半教師付き学習を超解像に応用して、新たな超解像アルゴリズムの提案及びその理論保証を行うことを目指す。

3. 研究の方法

- (1) 当初は理論的性能保証を漸近論により行ない、モデル選択についてはChapelleらのアイデアを用いる予定であったが、予想外の理論的進展があったため、双方共にBarron and Cover理論(BC理論)を用いた解析を行うこととした。BC理論とは機械学習における指導的原理の一つである最小記述長原理(MDL原理)に数学的正当化を与えたことで有名な理論である。BC理論を統計的に見ると、罰則付き尤度法のリスク評価を行う理論とみなすことができる。超解像に用いるlassoは罰則付き尤度法であるため、BC理論によるリスク評価を考える。しかしBC理論を教師付き学習に適用するにはパラメータ空間の量子化近似及びある厳しい条件(モデル記述長が共変量に依存しない)が必要であった。特にlassoは教師付き学習であり、上記の条件を満たしていないため、BC理論による評価は難しいと考えられていた。そこで本研究ではまず教師付き学習一般に対してBC理論を適用する際に、上記の近似及び制約を外すことを目指し、その結果を用いてlassoのリスク推定量を構成する。精度の良いリスク推定量が得られれば、それは同時にlassoのモデル選択(正則化パラメータの選択)も可能にする。次にそれらの成果を小標本高次元半教師付き学習に拡張することを考える。すなわち、共変量の数が標本数よりも著しく多く、かつラベル付きデータと、ラベルなしデータの両方が利用可能な状況である。この状況に対応可能な方法として、本研究では1の(1)で記した密度比重みを用いた重み付きlasso(半教師付きlasso)を提案し、BC理論の結果をその場合に拡張する。
- (2) (1)で開発した半教師付き辞書学習(スパースコーディング)に拡張し、半教師付き超解像アルゴリズムを構成する。さらに数値実験によって提案超解像アルゴリズムの精度を評価する。

4. 研究成果

- (1) 本研究の最も大きな理論的成果は3の(1)に記載した、BC理論を教師付き学習に適用する際の近似や制約を、かなりの程度解消することのできる一般的な方法を一つ提案できたことである。BC理論には他の理論にはない様々な特長がある。例えば数学的な仮定がほとんど必要なく、

適用範囲が広いこと，また漸近論を使っ
ておらず有限標本数で成立すること，リ
スク上界について明確な情報理論的解釈
ができること等が挙げられる．我々の教
師付き学習への拡張において，これらの
特長は全て保持されている．また，この
方法を実際に lasso に適用して，これま
でにないリスクの推定量（上界）を導出
することに成功した．ただし，この際
には共変量の正規性を仮定している．さら
に我々は密度比を重みに用いた重み付き
lasso（半教師付き lasso）について BC
理論によるリスク評価に成功した．

- (2) 次に超解像に適用するため半教師付き
lasso を半教師付きスパースコーディン
グに拡張し，同じく BC 理論によりリス
クの上界の導出に成功した．さらに半教
師付きスパースコーディングを実装し，半
教師付き超解像アルゴリズムの性能を数
値実験により評価を行った．その結果，
入力画像の質によりかなりばらつきがあ
るものの，半教師付き超解像により超解
像の精度が向上することを示した．

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 1 件）

Masanori Kawakita and Jun'ichi

Takeuchi "Barron and Cover's Theory in
Supervised Learning and its Application
to Lasso", *Proceedings of The 33rd
International Conference on Machine
Learning, PMLR 48*, 査読有 pp.
1958-1966, 2016

〔学会発表〕（計 10 件）

川喜田雅則 “スパースコーディングの転
移学習と超解像への応用”，JST CREST
AIP チャレンジシンポジウム「ビッグデ
ータ利活用のための基盤構築とその応
用」，2月 16-17 日，名古屋工業大学（愛
知県・名古屋市），2017（招待講演）

Kawakita, M. and Takeuchi, J. “ Barron and
Cover ' s Theory in Supervised Learning
and Its Application to Lasso, ” *International
Conference on Machine Learning 2016*,
New York (U.S.A.), Jun. 20-22, 2016.

川喜田 雅則 "Barron and Cover 理論
による lasso のリスクの上界評価," 2016
年 IEICE 総合大会チュートリアルセッシ
ョン「記述長最小原理の新展開」, 九州
大学伊都キャンパス(福岡県・福岡市), 3
月 17 日, 2016（招待講演）

川喜田雅則, 竹内純一 “教師付き学習
における MDL 原理と lasso のリスク評
価,” *科研費シンポジウム「統計学と機械
学習における数理とモデリング」*, 東京
工業大学（東京都・目黒区）, 2 月 21
日, 2016

川喜田雅則, 竹内純一 “教師付き学習
における MDL 推定のリスクバウンドに
ついて,” *第 37 回情報理論とその応用シ
ンポジウム*, 下電ホテル（岡山県・倉敷
市）, 11 月 24-27 日, 2015

竹内純一, 川喜田雅則 “教師付き学
習における MDL 推定,” *第 9 回シャノン
理論ワークショップ*, 渡瀬温泉心の宿
わたらせ温泉（和歌山県・田辺市）, 9 月
25 日, 2015

竹内純一, 川喜田雅則 “教師付き学
習における MDL 推定量の設計とその収
束速度,” *電子情報通信学会技術報告
IT2015-26*, 東京工業大学（東京都・目黒
区）, 7 月 13 日, 2015

川喜田雅則, 豊暉原侑心, 竹内純一
“ MDL 理論による lasso のリスク上
界,” *第 21 回 IBISML 研究会*, 沖縄科学
技術大学院大学（沖縄県・国頭郡）, 6 月
23 日, 2015

豊暉原侑心, 川喜田雅則, 竹内純一
“ L1 罰則付き線形回帰の MDL による推
定誤差上界について,” *電子情報通信学
会技術報告 IT2014-93*, 北九州市立大学
ひびきのキャンパス(福岡県・北九州市),
3 月 3 日, 2015

川喜田雅則 “半教師付き学習の推定
理論 - 影響関数の幾何から推定方程式の

構築-,” 京都大学数理解析研究所短期共同研究 統計多様体の幾何学の新展開 共催：文部科学省 数学・数理科学と諸科学・産業 との連携研究ワークショップ, 京都大学数理解析研究所（京都府・京都市）, 2月20日, 2014

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川喜田 雅則 (KAWAKITA Masanori)
九州大学・大学院システム情報科学研究
院・助教
研究者番号：90435496

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()