

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）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：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21500138

研究課題名（和文） ベイジアンネットワークの構造学習の一致性に関する研究

研究課題名（英文） Consistency of Bayesian Network Structure Learning

研究代表者

鈴木 謙（Joe Suzuki）

大阪大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：50216397

研究成果の概要（和文）：訓練データから、ベイジアンネットワーク（BN）の構造を推定する問題を検討した。特に、情報量基準といて、尤度（データの構造への適合性を表現する）と、BNの構造の複雑さを表現する項の値の和を計算し、それを最小にする構造を推定結果とした。前者を重視しすぎると、過学習といて、複雑すぎる構造を選択することになる。本研究では、訓練データの個数の増加とともに確率1で、真の構造を正しく推定するための両者のバランスに関する条件を見出し、それを数学的に証明した。

研究成果の概要（英文）：This research address the problem of finding the true structure of a Bayesian network (BN) from a finite sample of examples. In particular, we apply information criteria which is expressed by the sum of likelihood and complexity of the BN structure. If the latter is too stressed, we cannot obtain the true structure even if the number of examples grows. We found the condition that the true one is obtained with probability one, and proved it.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：ベイジアンネットワーク、情報量基準、一致性、ガウシアン、統計科学

1. 研究開始当初の背景

近年、データマイニングやパターン認識など情報科学の多くの分野で、確率的知識の学習の研究がすすめられている。

2. 研究の目的

いわゆる知識情報処理の分野では、実際例から規則を発見する帰納推論（設

計段階）と、規則から事実を証明する演繹推論（運用段階）の2段階の処理が施される。本研究では、そのうちの前者に関する検討を行う。特に、確率的知識といて、例外を許容する規則を扱う。確率的知識の学習では、実際例から規則と例外の境界を見極めるために、統計科学的な考察が必要である。本研究では、確率的知識の知識表現

として、ベイジアンネットワーク (BN) を仮定する。BNは、確率変数に対応する属性を頂点で、その間の確率的因果関係を有向辺で表現した非巡回有向グラフとして、定義される。本研究では、実際例から、BNの構造を正しく推定する問題を検討する。BNは、ある確率モデルを表現している。正しいBNはふせておいて、そのBNにしたがって例(乱数)が発生したときに、その例だけからそのBNの構造が何であるかを推定する、という問題である。特に、例の数を十分に大きくしたときに、推定した構造が真の構造に一致するという条件(一致性)に着目する。

3. 研究の方法

まず、

1. 分類型 BN とガウス型 BN の類似性

2. ガウス型 BN の場合の過学習の誤り率の計算

に取り組む。理論的な検討が主になるが、学生とともに十分な数値実験を行い、予想を立てる。また、文献調査を精力的に行う(統計関係、計算機科学関係の書籍を新規に購入する必要がある)。そして、国内外の研究者と連絡を取り、関連するワークショップに参加して、必要な情報を収集する。また、初年度は、予備的な結果を国内の研究会などで発表することによって、国内の研究者と議論をする場を設ける。

3. 情報量基準によらない BN 学習の提案とその評価

4. 一般的な BN 学習の提案と一致性以外の評価

に関しても、上記 2 問題と平行して検討していく。1. と 2. の問題が解決すれば、3. と 4. の検討が中心になる。最悪、1. と 2. の問題が解決しない場合、3. と 4. の結果のみが成果となる。3. と 4. に関しては、テーマの制限がないので、比較的自由な展開ができるものと思われる。しかし、学習方法の提案と数値実験のみの評価では、BN の学習だけでも、非常に多くの結果がある。本研究課題(科学研究費)に関しては、数学的証明によって解決した結果が報告のメインとなるよう、最大限努力していく。

4. 研究成果

1. 構造推定に関する研究: 従来から、独立に発生した有限個の具体例から Bayesian ネットワークの構造(各 2 頂点を結ぶ有向辺が存在するか否か)を推定する方法が、検討されてきた。しかし、それらはすべての属性が離散であるという特殊な条件を仮定していた。2011 年に、ユニバーサルな測度の構成方法を用いて、離散や連続の確率変数が混在す

る一般の場合の方法を提案した。

2. 因果推移に関する研究: 異なる確率変数 X, Y について、ある仮定のもとで、有限個の具体例から、 $X \rightarrow Y, X \leftarrow Y$ のいずれの方向の依存関係なのか、もしくは識別が不可能かを判定する研究が盛んになされている。これまで、additive noise model を仮定した場合に因果の方向が識別可能であるための条件が、種々の場合で求められている。 X, Y が 2 値の値を取るとき(2011)、有限個の値をとるとき(2012)の識別可能であるための必要十分条件を導出した。

3. 代数幾何学的方法についての提案: Bayesian ネットワークの確率パラメータを不定文字として、それらの間の関係式を多項式で表現したとき、その多項式環のイデアルを計算機で求める方法を見出し、人工知能学会会誌の解説記事として掲載した(2010)。

4. 理論の体系化(書籍として発行): Bayesian ネットワークに関する従来の結果を体系化し、書籍(「ベイジアンネットワーク入門」培風館)として発行した。情報科学の入門書というよりは、数理科学のモノグラフという色彩が強い(2009)。

5. 遺伝的アルゴリズムの Markov 連鎖と大偏差原理を用いた収束速度の評価: 遺伝的アルゴリズムの集団を Markov 連鎖の状態としてとらえ、ある正則条件のもとで定常分布が、選択圧力を大きくし、突然変異確率を 0 に近づけると、同一の最良個体からなる集団の状態のいずれかに収束することを証明した。従来は、遺伝的操作として選択と突然変異のみを仮定していたが、交叉を含む一般的な場合について示した(2010)。

6. 重複対数の法則を用いた強一致性を満足するモデル選択問題の解決: 有限個の例から、線形回帰直線の独立変数の真の個数を推定するために、情報量基準を用いることがよく行われている。情報量基準の第 2 項が例の数 n に対して、 $\log \log n$ 以上のオーダーであれば、強一致性($\$n\$$ を大きくすると、確率 1 で真の個数を正しく推定)が保証されることが従来から知られていた。2009 年に $(1 + \epsilon) \log \log n$ ($\epsilon > 0$ は任意)で、強一致性が保証されることを証明した。ARMA など他の問題ではその命題は証明されていたが、線形回帰では未解決とされていた。

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 3 件)

[1] 鈴木讓, (書評) “ベイジアンネットワークの統計的推論の数理, 田中和之”, 数理科学(サイエンス社), No. 567, 査読なし, 2010

年9月

- [2] 鈴木讓, “ベイジアンネットワークと代数幾何”, 人工知能学会誌, vol. 25, no. 6, 826-833, 査読なし, 2010年11月
- [3] Joe Suzuki, “A Markov Chain Analysis on Genetic Algorithms - Large Deviation Principle Approach -”, 査読有, Journal of Applied Probability, Volume 47, Number 4 (2010), 967-975, 2010年12月.
- [学会発表] (計23件)
- [1] Joe Suzuki, “A Conjecture on Strong Consistent Learning”, LLLL 2009, Kyoto, Japan, 2009年7月18日
- [2] 鈴木讓, “ガウス型ベイジアンネットワークの構造学習の一致性について”, 人工知能学会第86回KBS研究会2009年8月26日, 和歌山大学南紀白浜サテライト
- [3] 鈴木讓, “大偏差原理を用いた遺伝的アルゴリズムのMarkov連鎖的解析”, 人工知能学会第2回ECF研究会2009年10月2日, 東京大学
- [4] 鈴木讓, “Hannan-Quinnの命題は、線形回帰でも、ガウス型Bayesianネットワークの構造推定でも正しい”, 電子情報通信学会IBIS. 2009年10月20日, 九州大学
- [5] 鈴木讓(招待講演), “ベイジアンネットワークの構造学習の理論的性質”, 人工知能学会第75回FPAI研究会, 2009年11月13日, 電気通信大学
- [6] 鈴木讓, “一般的な確率変数に対するChow-Liuアルゴリズム”, 情報理論とその応用学会(SITA 2009), 2009年12月6日, 山口
- [7] 鈴木讓, “離散や連続を仮定しない情報源のノンパラメトリック推定とオンライン予測の評価”, 人工知能学会第12回DMSM研究会, 2010年3月30日, 統計数理研究所
- [8] Joe Suzuki, “Chow-Liu Algorithm for

- Generalized Random Values”, Proc of Learning Conference, Snowbird, UT, 2010年4月15日
- [9] 鈴木讓, “離散や連続を仮定しないユニバーサル符号化と一般的なShannon-MacMillan-Breiman定理”, 電子情報通信学会情報理論研究会, 2010年5月21日, 徳島大学
- [10] 鈴木讓, “一致性を満足する相互情報量の推定と機械学習への応用”, 人工知能学会第78回基本問題研究会, 2010年7月31日, 兵庫県立大学
- [11] Joe Suzuki, “A Generalization of the Chow-Liu Algorithm and its Applications to Artificial Intelligence”, International Conference on Artificial Intelligence 2010, Las Vegas, NV, 2010年7月23日
- [12] Joe Suzuki, “A Generalization of Nonparametric Estimation and On-Line Prediction for Stationary Ergodic Sources”, Asia-Europe Information Theory Workshop, Ishigaki Island, Oct 22-24, 2010年10月22日
- [13] Joe Suzuki, “Information Criteria and their Strong Consistency for Learning Bayesian Networks” AMBN 2010, 2010年11月19日, キャンパスイノベーションセンター(東京都)
- [14] 鈴木讓, “離散や連続を仮定しないMDL基準の一般化”, SITA 2010, 2010年12月2日, 松代ロイヤルホテル(長野県)
- [15] 鈴木讓, “一般的なMDL基準のBayesianネットワークの構造推定への応用: 離散と連続な確率変数が混在する場合”, 電子情報通信学会情報理論研究会, 2011年3月4日, 大阪大学
- [16] Joe Suzuki, “The Universal Measure for General Sources and its Application to

MDL/Bayesian Criteria ”, Proc of Data Compression Conference, 2011 年3 月29日

[17] 鈴木讓, “The Bayesian Chow-Liu Algorithm - 最も一般的な場合- ”, 電子情報通信学会情報論的学習理論研究会2011 年6 月20日, 東京大学

[18] T. Inazumi, T. Washio, S. Shimizu, J. Suzuki, A. Yamamoto and Y. Kawahara, Proc. UAI2011: The 27th Conf. on Uncertainty in Artificial Intelligence, 2011 年7月21日, ID:133 (CD-ROM)

[19] 鈴木讓, 清水昌平, 鷲尾隆, ” 離散データの因果の同定～ 2 値から、多値への一般化について ”, 電子情報通信学会情報論的学習理論研究会2011 年11 月10日, 奈良女子大学

[20] 鈴木讓 (招待講演), “ベイジアンネットワークの構造推定で、離散と連続の属性が混在する場合”, 人工知能学会基本問題研究会、2011 年11 月26日、電気通信大学

[21] Joe Suzuki, “ MDL/Bayesian Criteria based on Universal Coding/Measure ” Solomonoff 85th Memorial Conference, Lecture Note on Artificial Intelligence, Springer. 2011年11 月28日

[22] 鈴木讓, “離散と連続の属性値が混在した場合のベイジアンネットワークの構造学習”, 電子情報通信学会情報論的学習理論研究会, 2012 年3月12 日, 統計数理研究所

[22] Joe Suzuki, “Bayesian Network Structure Estimation Based on the Bayesian/MDL Criteria when Both Discrete and Continuous Variables are Present ”, Proc of Data Compression Conference, Snowbird, UT. Pages 233-245. 2012 年4 月11日

[図書] (計1件)

鈴木讓, “ベイジアンネットワーク入門 “, 培風館 2009 年7 月 (211 ページ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 讓 (Joe Suzuki)
大阪大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 50216397

(2) 連携研究者

藤原彰夫 (Akio Fujiwara)
大阪大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 30251359