



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Fast Exact Inference Algorithms for Bayesian Networks Based on ZDD Operations [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	高, 姍
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第13380号
Issue Date	2018-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/72363
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Shan_Gao_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (情報科学) 氏名 高 俣

審査担当者 主 査 教 授 有村 博紀
 副 査 教 授 Zeugmann Thomas
 副 査 准教授 瀧川 一学

学位論文題名

Fast Exact Inference Algorithms for Bayesian Networks Based on ZDD Operations
(ZDD 演算に基づくベイジアンネットワークの高速かつ厳密な確率推論アルゴリズム)

人間の知識を計算機上で表現することは、情報科学の中心的課題の一つであり、古くから研究が行われてきた。論理式や数式などを用いた記号的な表現方法や、場合分けのルールを列挙する方法などとともに、グラフ構造により知識を表現する方法も有力な手段であり、近年の機械学習技術や人工知能応用の進展とも深いつながりがある。知識として確率的な事象を扱うことは重要な課題であり、確率事象をグラフ構造により表現する「確率的グラフィカルモデル」の技法が近年注目を集めている。著者は、因果関係をグラフ構造で表現する基本的なモデルである「ベイジアンネットワーク」に興味を持ち、複雑な因果関係を表すベイジアンネットワークを計算機上に表現し、確率的な推論を行うためのアルゴリズムとデータ構造の研究に取り組んできた。

ベイジアンネットワークは、非巡回有向グラフによる確率的な因果関係の表現方法であり、確率事象を表す変数をグラフの頂点とし、変数同士の個々の関係をグラフの辺で表現し、各辺に対応する条件付確率値のテーブルを持つ。与えられたベイジアンネットワークに対して、一部の変数の観測値が得られたときに未観測の変数の値を確率的に求める計算は、ベイジアンネットワークの確率推論と呼ばれ、一般には NP 困難な問題であることが知られているが、多くの実用的な例題に対してできるだけ高速に実行するための計算手法が以前より研究されている。その中で 2007 年に湊らが提案した ZDD コンパイル法は、ベイジアンネットワークを ZDD(ゼロサプレス型二分決定グラフ)にコンパイルすることで、推論計算を高速化する方法として知られている。この方法は、コンパイルした ZDD のサイズに比例する時間で高速に確率推論が行えるが、大規模なベイジアンネットワークを一気に ZDD にコンパイルしようとする、ZDD のサイズが大きくなり過ぎて計算時間や記憶量の面で ZDD 生成ができなくなるという課題があった。

3 章では、著者はまず、ベイジアンネットワークをコンパイルして得られる ZDD の構造と、元のベイジアンネットワークの構造との関係を明らかにする研究を行った。ZDD 処理系には除算演算が定義されており、ZDD をいくつかの ZDD に分解する因数分解と呼ばれる手法が以前より知られている。一般に因数分解では何を因数として分解するかが重要であるが、著者はベイジアンネットワークの結節点を表す d 分離と呼ばれる分離ポイントに対応する変数に着目し、これを用いて因数分解すると分解の品質がよくなることを実験的に示した。

4 章では、ベイジアンネットワークの確率推論の伝統的な手法であるジョイントツリー法と、湊らの ZDD コンパイル方法との関係について議論している。著者はジョイントツリー法において細分化された部分グラフ同士で局所的に計算されるメッセージパッシングと呼ばれる計算処理を、ZDD

コンパイル法に類似する方法で高速化できることを示し、ジョイントツリー法と ZDD コンパイル法に深い関係があることを明らかにした。

さらに 5 章では、著者は、一気に ZDD にコンパイルすることが困難な大規模なベイジアンネットワークを分割コンパイルする手法について研究を行い、その結果を述べている。分割コンパイルする場合には、いくつかの部分に分割するのが適当か、またどの箇所で分割するのが適当かを判断する必要があるが、正確な評価はコンパイルしてみないとわからないという問題があった。著者は、 d 分離の概念に基づき、コンパイル前に簡易な方法で分割品質を予測するヒューリスティックな手法を提案し、その有効性を実験的に示した。

本論文の成果は次のようにまとめられる。

(1) ベイジアンネットワーク全体をコンパイルして得られた ZDD をいくつかの ZDD に因数分解する演算において、ベイジアンネットワークの d 分離に対応する変数を用いると分解の品質が良いことを見出し、これを実験的に示した。

(2) ベイジアンネットワーク全体を ZDD にコンパイルするのではなく、伝統的なジョイントツリー法による推論計算における局所的な処理を、ZDD により高速化する方法を考案した。

(3) ベイジアンネットワークをいくつかのサブブロックに分割して ZDD コンパイルを行う場合に、良い分割個数と分割箇所を予測するヒューリスティックな手法を提案し、その有効性を実験的に示した。

これを要するに、著者は、確率的グラフィカルモデルの分野において、複雑な因果関係を表現するベイジアンネットワークの確率推論計算を高速化することを目標として、ベイジアンネットワークを ZDD 構造にコンパイルして計算を行うための実用的な手法を提案し、その有効性を実験的に示すことで、確率推論計算の高速化が可能であるという新知見を得たものであり、情報科学における知識表現と知識処理の分野において貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。