



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Studies on Permutation Set Manipulation Based on Decision Diagrams [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	井上, 祐馬
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第12622号
Issue Date	2017-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65364
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuma_Inoue_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 井上 祐馬

審査担当者 主 査 教 授 湊 真一

副 査 教 授 有村 博紀

副 査 教 授 Zeugmann Thomas

学位論文題名

Studies on Permutation Set Manipulation Based on Decision Diagrams

(決定グラフに基づく順列集合処理に関する研究)

順列は, 組合せと並んで最も基本的な離散構造の 1 つであり, 情報科学・計算機工学における様々な問題にしばしば出現する. 例えばスケジューリング問題, 1 対 1 のマッチング問題, 可逆符号化や暗号の問題, 置換群の問題など, 順列と関連する問題は非常に多く, 順列を効率よく扱うためのアルゴリズムとデータ構造は極めて重要な課題と言える.

著者は, 与えられたアイテムに関する順列を複数通り集めた「順列集合」を処理するためのデータ構造とアルゴリズムの研究に取り組んできた. 順列集合の表現法としては, 二分決定グラフ (BDD: Binary Decision Diagram) の派生形である順列二分決定グラフ (π DD: Permutation Decision Diagram) が, 2011 年に湊により考案されている. π DD は多くの類似する順列からなる集合を圧縮して表現し, 圧縮したままで高速に演算処理できるという特長を持つことから近年注目されているが, 具体的な問題における π DD の効果については, まだ明らかになっていないことが多かった.

著者は博士課程において, まず π DD をいくつかの具体的な問題に適用し, 有効な事例を見出してその効果を分析する研究に取り組んできた. 本論文の 3 章では, 可逆論理回路のデバッグ問題と, 順列のサイクルタイプ同値類分割問題という 2 つの具体的な問題に対して, それらを解くための π DD を用いたアルゴリズムを提案している. π DD は多くの順列をまとめて圧縮して高速に処理する技法であるが, 愚直に解を 1 つずつ羅列して π DD を構築する方法では, 常に最悪の計算時間を要するため圧縮による高速化効果が得られない. 著者は個々の問題の性質を分析し, その性質を利用した π DD の構築アルゴリズムを提案している. これらのアルゴリズムは π DD の基本演算を巧みに利用し, 演算の回数を減らすよう工夫したものである.

π DD は非等長の圧縮データ構造の一種であり, 扱う問題によっては π DD が不得意な例題も存在する. 著者は, π DD の基本操作が順列の互換 (2 つのアイテム同士の交換) に基づくという性質に着目し, 互換操作の代わりに巡回操作に基づく Rotation π DD (Rot- π DD) と呼ぶデータ構造とその演算処理アルゴリズムを考案した. 4 章では Rot- π DD の基本演算アルゴリズムを示し, 通常の π DD と Rot- π DD の使い分けについて論じている. Rot- π DD がより有効な応用として, 有向グラフのトポロジカル順序の列挙問題, 無向グラフのオイラー路の列挙問題, パターン回避順列の列挙問題の 3 つの問題を挙げ, これらの問題に通常の π DD ではなく Rot- π DD を用いることで, 計算コストが削減できるだけでなく, 計算コストの理論的上限を見積もれるという利点があることを示した.

さらに著者は, 多くの決定グラフに共通する順列問題である, 変数順序付けについて取り組んでいる. 変数順序の選び方は, 決定グラフの圧縮効率に劇的に影響することが知られている. 5 章では, 与

えられた無向グラフにおける特定の制約を満たす部分グラフを列挙する問題に対して、列挙した解集合を効率よく表現する決定グラフを構築するための、ヒューリスティックな変数順序付けアルゴリズムを提案している。この変数順序付け方法は、グラフのパス幅という理論的な知見に基づいたものであり、実用的にも非常に効果的であることが実験結果により確かめられている。

本論文の成果は次のようにまとめられる。

1. 順列集合を扱う決定グラフである π DD の具体的な応用例として、可逆論理回路のデバッグ問題と、順列のサイクルタイプ同値類分割問題に適用し、それぞれについて問題の性質を利用した有効な解法を示した。
2. 従来の π DD とは異なる基本操作からなる新しい決定グラフ「Rot- π DD」とその演算処理アルゴリズムを考案した。その活用例として、有向グラフのトポロジカル順序の列挙問題、無向グラフのオイラー路の列挙問題、パターン回避順列の列挙問題の解法を示し、 π DD との使い分けについて論じた。
3. 決定グラフを効率よく構築するための必要な変数順序付け問題に対して、グラフ理論の知見に基づいたヒューリスティックな変数順序付けアルゴリズムを提案し、その有効性を示した。

これを要するに、著者は、順列集合を扱う決定グラフに関して、いくつかの具体的な応用例において問題の性質を利用した有効な解法を示したこと、および問題の性質に応じて使い分けが可能な新しい決定グラフのデータ構造とアルゴリズムを考案し、多くの問題に対して処理性能向上が可能であるという新知見を得たものであり、離散構造処理とグラフアルゴリズムの理工学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。