



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Implicit Subset Enumeration by Top-Down Construction of Decision Diagrams and Its Applications to Combinatorial Problems [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	鈴木, 浩史
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第13510号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74084
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hirofumi_Suzuki_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 鈴木 浩史

審査担当者 主 査 教 授 有村 博紀

副 査 教 授 吉岡 真治

副 査 准教授 瀧川 一学

学位論文題名

Implicit Subset Enumeration by Top-Down Construction of Decision Diagrams and Its Applications
to Combinatorial Problems

(決定グラフのトップダウン構築による暗黙的部分集合列挙とその組合せ問題への応用)

複数のアイテムからなる集合が与えられたときに、その部分集合である任意の組合せの中から所与の制約を満たす組合せを探索する問題は、一般に組合せ問題と呼ばれ、実社会の様々な局面で現れる。古典的な組合せ問題としては、例えばナップサック問題や巡回セールスマン問題などが有名である。組合せ問題の多くは、ある目的関数に対して最適な解を求める最適化問題として定式化されているが、実応用の場面では、解の評価尺度が明確に定式化できない場合や、解の正確な分布を求めたい場合など、最適解を求めるだけでなく、制約を満たす多数の解を全て列挙したい事例もしばしばみられる。著者はこのような組合せ列挙の問題に興味を持ち、組合せを扱うデータ構造や、高速な列挙アルゴリズムの研究に取り組んできた。

組合せの列挙では、解の個数が入力データ量に対して指数関数的に増大するため、愚直に求めると膨大な計算時間がかかりうる。このような問題に対して、逐次出力する明示的列挙ではなく、データを圧縮し索引化したデータ構造を構築する暗黙的列挙の技法が近年研究されている。中でもBDD(二分決定グラフ) およびその派生形である ZDD と呼ばれるデータ構造は、組合せ集合を効率よく列挙できる有力な技法として注目されている。本研究において著者は、グラフに関する組合せ問題に対して、その解集合を表す BDD/ZDD を構築する手法である「フロンティア法」と呼ばれる技法に着目した。フロンティア法は、様々な組合せ列挙問題に適用可能な汎用的なライブラリとして公開されているが、これまではアルゴリズムの正当性を形式的に証明可能にするための定式化が不十分であった。著者はこれを「トップダウン型決定グラフ構築法」(TD-DD 法) として初めて形式的な定式化を行い、その上で理論的な計算量について論じている。これらの結果は 3 章に記述されている。

4 章では、TD-DD 法の具体的な応用例の 1 つとして、マインスイーパー (地雷除去) パズルの問題を取り上げ、その解集合の暗黙的列挙を行った例を示している。著者は固定盤面の可能な地雷配置を全て求める問題を「次数制約つき部分グラフ列挙問題」として定式化し、解集合を全列挙する ZDD を生成するアルゴリズムを開発し、その有効性を実験的に示している。

5 章では、全域強連結部分グラフと呼ばれる部分グラフ構造の暗黙的列挙を行う問題に取り組んでいる。「強連結性」とは、有向グラフで表現されたグラフの頂点が互いに行き来可能な状態であることを表し、通信や交通等のネットワークシステムで重要な概念である。著者は、入力として強連結なグラフが与えられたときに、一部の辺が削除されても強連結性が維持されるためには、どの

ような辺の組合せが許されるかを全列挙する BDD を構築する手法を開発した。さらにその手法を発展させて、従来不可能であった数百辺規模のネットワークにおいて、確率的に故障が発生する場合のネットワーク信頼度を厳密に計算することに初めて成功している。

さらに著者は、0-1 多目的ナップサック問題における解の列挙にも取り組んでいる。一般に、多目的最適化問題は解の目的関数が複数存在するために最適解が単一にはならず、多数の極大解 (パレート最適解) を列挙する問題となる。著者は膨大な個数になりうるパレート最適解を ZDD を用いて全列挙・索引化し、その ZDD を操作することで、効率よく 0-1 多目的ナップサック問題を処理する手法を開発し、その有効性を実験的に明らかにした。これらの結果は 6 章に記載されている。

本論文の成果は次のようにまとめられる。

(1) グラフに関する組合せ問題において、その解集合を BDD/ZDD で暗黙的に列挙する手法として最近注目されているアルゴリズムの枠組みに関して、これを「TD-DD 法」として初めて形式的な定式化を行い、その上で理論的な計算量についても論じた。

(2) TD-DD 法を用いて、次数制約つき部分グラフ列挙問題、全域強連結部分グラフ列挙問題、および 0-1 多目的ナップサック問題に対する効率的なアルゴリズムを開発し、これら実用性のある諸問題において、本手法の有効性を実験的に示した。

これを要するに、著者は、組合せ列挙の問題において、決定グラフにより暗黙的列挙を行う実用的なアルゴリズムの枠組みを定式化し、その正当性と有効性を理論的・実験的に示したものであり、離散構造処理アルゴリズムに関する情報科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。