



Title	Studies on New Tractable Indexing Structures and Rapid Compilation Methods for Graph-Substructures [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	菅谷, 輝治
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第14282号
Issue Date	2020-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/79537
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Teruji_Sugaya_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 菅谷 輝治

審査担当者 主 査 教 授 吉岡 真治

副 査 教 授 有村 博紀

副 査 教 授 堀山 貴史

学位論文題名

Studies on New Tractable Indexing Structures and Rapid Compilation Methods for
Graph-Substructures

(グラフ部分構造を扱う新規索引構造と高速コンパイル法に関する研究)

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。これまでに、論理式や数式などを用いた記号的な表現、場合分けのルールによる列挙、グラフ構造による知識表現など、様々な表現方法が提案されている。近年、これらの大量の知識やデータ群を効率よく演算処理するために、事前に知識やデータ群を計算機上に読み込んで索引構造を構築し、必要なときに高速に演算できるようにする「知識コンパイル」(knowledge compilation) に関する研究が行われている。知識コンパイルでは、索引構造を得るためのコンパイル時間や記憶量と、その索引構造が対応可能な演算処理能力についてのトレードオフが存在するため、これらのバランスを考慮した複数の方法が存在する。

これまでの知識コンパイルの研究では、主に命題論理を対象とした BDD(二分決定グラフ) を索引構造とする技法に加え、疎な組合せの集合やグラフ構造を効率よく扱える ZDD(ゼロサプレス型二分決定グラフ) を用いる研究が行われている。ZDD では、電力網や道路網などにおいて、制約を満たす全ての実行可能解をコンパイルして高速に解析処理を行うといった応用が提案されているが、計算時間や記憶量の問題から計算が困難な問題も存在する。著者は BDD や ZDD を含む様々な索引構造モデルの計算複雑さとその演算処理能力について興味を持ち、コンパイル時間と演算処理能力のバランスを考慮した効率的な索引構造の提案と、その索引構造を構築するアルゴリズムに関する研究に取り組んできた。

知識コンパイル分野において、BDD を中心とした種々の索引構造モデル間の関係を整理した関係図である Knowledge Compilation Map(KCM) が提案されている。著者は、従来知られている KCM において、中心にある BDD をその派生形の ZDD に置き換えると、ZDD を中心とした関係図を作ることができることに着目し、これを「ゼロサプレス型の知識コンパイル関係図」(Z-KCM) として新たに提案している。具体的には、従来の KCM に登場する種々の索引構造モデル (表現能力が弱い順に、否定標準系 (NNF) とその派生である DNNE, Structured DNNE, d-DNNE, Structured d-DNNE, および SDD(Sentential Decision Diagram)) に対して、それぞれに対応するゼロサプレス型の索引構造モデル (Z-NNF, Z-DNNE, Structured Z-DNNE, Z-d-DNNE, Structured Z-d-DNNE, および ZSDD) が存在することを示した。これらの結果は 3 章で論じている。

4 章および 5 章では、著者が提案したゼロサプレス型の索引構造の 1 つである Structured Z-d-DNNE を用いて、索引構造を構築する具体的なアルゴリズムを示し、その正当性を示した上で、コ

ンパイル時間と記憶量、およびコンパイル後の演算処理能力について理論と実験の両面から評価を行っている。4 章では、グラフに関する基礎的な問題の 1 つである独立集合に対するアルゴリズムを提案すると共に、既存技法の ZDD と比較し、高速に動作する条件について議論を行っている。コンパイル後の演算処理能力は ZDD の方が提案手法よりも一般的に優れているが、ランダムサンプリング演算に関して、両者は同等の演算処理能力があることが示されている。5 章では、始点と終点を結ぶ全ての経路を列挙する s-t パス列挙問題に対するアルゴリズムを提案すると共に、理論的解析だけでなく実験的な性能評価を行っている。さらに提案手法と性質に近い ZSDD を用いた先行研究とも実験的な比較を行い、コンパイル時間と演算処理能力のトレードオフについて論じている。

本論文の成果は、次のようにまとめられる。

- (1) 命題論理を対象に BDD を用いて行われてきた知識コンパイルの研究を発展させ、集合やグラフ構造を扱うことが得意な BDD の派生系である ZDD を基盤とする効率的な索引構造を提案すると共に、ゼロサプレス型の知識コンパイル関係図 (Z-KCM) として体系的に整理を行った。
- (2) 実際に、実用的である具体的なグラフ解析の問題を対象として、これらの索引構造を効率的に作成するアルゴリズムを提案すると共に、実験的にその有効性を示した。

これを要するに、著者は、大規模集合やグラフを扱うための索引構造である ZDD を基盤として、その表現能力と計算時間のトレードオフを考慮した種々の索引構造モデルとその構築法を提案し、知識コンパイル技法として体系的に整理を行ったものであり、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。