

研究報告書

「大規模グラフのための二部決定図に関する研究」

研究期間：2018年4月～2020年3月

研究者番号：50173

研究者：佐々木 勇和

1. 研究のねらい

離散構造は記号により表現される構造で、集合や、グラフ、論理関数など計算機にとって必要不可欠な要素である。本研究は、基礎的な離散構造の一つであるグラフに対する列挙問題の効率化を目指す。しかし、グラフの列挙問題は、#P 完全問題となることが多く、大規模なグラフにおいて厳密解を求めることが難しい。そのため、厳密解を計算することは現実的ではなく、高精度な近似解を計算することが求められている。

離散構造に関する問題の解の列挙技術である二分決定図(Binary Decision Diagram)はグラフデータにも適用可能であり、様々な制約付きグラフの列挙に用いられている。しかし、既存の二分決定図は、構築のためのメモリ使用量が大きく、小規模なグラフにしか適応できない。そのため、大規模グラフのための高精度な近似解集合の列挙を可能にする二分決定図を開発する。さらに、厳密解を計算するためにグラフの列挙が必要であるネットワーク信頼性問題に適用し、高精度な近似と効率的な処理を実現する。

2. 研究成果

(1) 概要

省メモリな二分決定図の開発を実施する。まず、既存の二分決定図の問題点を簡単に説明する。二分決定図(BDD)は有向非循環グラフで表現され、一番上のルートから一番下のシンクまでの経路をたどることにより、制約を満たす/満たさないグラフを探索することができる。各ノードは中間状態を表し、同じ中間状態となるノードは統合される。ここで、重要な点は、二分決定図のサイズはノードの数に依存し、ノードの最大数は2の枝数乗のオーダーとなる点である。また、実際のメモリ使用量は事前に推定することが難しく、小規模なグラフに対してもメモリが枯渇する可能性がある。

そこで、まず大規模グラフのための近似解集合列挙のための二分決定図を開発した。いかにメモリ使用量を抑えつつ、計算量の削減と高精度化を実現するかが重要となる。手法は非常にシンプルで二分決定図のメモリ使用量の主要因であるノード数の最大数を決めることによりメモリ使用量を抑制し、さらに削除する際はノードの価値を求め、低価値のノードを削除することにより精度の低下を防ぐ。

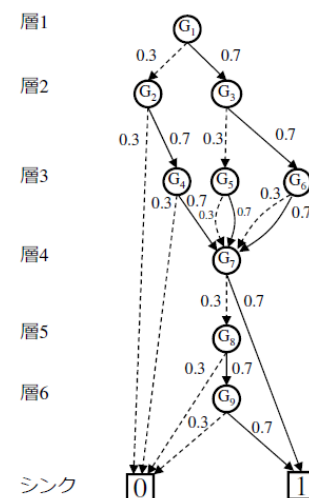


図 1: 二分決定図の例

開発した二分決定図をネットワーク信頼性の効率的な近似計算用に拡張することにより、ネットワーク信頼性計算に特化したアルゴリズムを開発した。まず、ネットワーク信頼性は、枝に存在確率があるグラフにおいて、与えられたいくつかの節点が接続する確率である。厳密解にはグラフ列挙が必要であり、 $\#P$ 完全問題として知られている。本提案技術は、サンプリングによる近似解を求めるが、その際に二分決定図を用いてネットワーク信頼性の上限値と下限値を効率的に求めることにより、精度を低下させずにサンプル数を削減することを可能にした。これにより、効率的かつ高精度なネットワーク信頼性計算を可能とした。

(2) 詳細

それぞれの研究課題において、ACT-I 研究期間における研究成果と達成状況を述べる。

A. 大規模グラフのための近似解集合列挙のための二分決定図の開発

本課題の目的は、大規模グラフの列挙問題に対して、メモリ使用量を抑えつつ、効率的な列挙を高精度に可能とすることである。本提案技術では、まず各層の最大ノード数を事前に決定することでメモリ使用量の最大値を決定する。最大ノードを超える層がある場合、ノードを削除する必要がある。そこで、それぞれのノードにおける価値をヒューリスティックに決定することで削除するノードを決める。例えば、与えられたいくつかの節点間が接続するサブグラフを列挙する場合では接続率を価値とし、最も接続する確率が低いノードを削除する。価値の決定方法やノードの統合方法を各々が解く問題に合わせて設計することにより、効果的な近似列挙が可能となる。ACT-I 研究期間においては、接続グラフの列挙及び重みが閾値以下のシュタイナー木の列挙を行い、本提案技術が効果的であることを示した。

B. 二分決定図を用いたネットワーク信頼性の近似計算技術の開発

本研究課題の目的は、ネットワーク信頼性の近似計算の効率化である。本提案技術の大きな成果はネットワーク信頼性の上限値と下限値を利用することにより、精度の低下無しにサンプル数を削減可能なことを理論的および実験的に証明した点、および上限値と下限値の計算を二分決定図を用いて効率化した点である。特に、二分決定図においては、S2BDD という新たな二分決定図を提案した。S2BDD では、二分決定図の各ノードが確率値を保持することにより、既下層を計算済みの上層を削除することによりメモリ使用量のさらなる削減を実現した。また、確率値に基づく層化サンプリング技術を S2BDD 構築中に実施することにより、計算量の削減を可能とした。さらに与えられたグラフを事前にグラフが小さくなるように枝の削減やグラフの分割をする拡張技術を用いてさらなる計算の効率化も実現した。実グラフを用いた実験により通常のサンプリング技術と比較して最大で 50 倍の高速化を可能とした。

3. 今後の展開

本研究で開発した二分決定図は、大規模なグラフに対しての列挙を可能とし、グラフ分析に大きく貢献するものである。最適化とはまた異なる視点からの大規模グラフの分析を実現できるため、新たな発見を期待できる。また、ネットワーク信頼性の計算は、通信ネットワークや、タンパク質解析、都市計画など多くの分野にて利用されていることから、より直接的に応用分野に寄与することができる。特に、研究者がグラフの応用技術として展開している材料開発および都市計画において、ACT-I で開発した技術を今後適用する予定である。

4. 自己評価

本研究期間における自己評価として、それぞれの項目についてまとめる。

- **研究目的の達成状況**: 概ね研究目的を達成することができた。国際会議および論文誌にまとめることができたことはよかったと思う。一方で、不十分な点として近似解列挙の精度として、ネットワーク信頼性における精度の理論保証は求めたが、他の問題における理論保証が達成できていない。
- **研究の進め方**: ネットワーク信頼性計算においては比較的早い段階で結果を出すことができた一方で、ネットワーク信頼性以外のどのような問題に適応すべきかを決めるのに時間がかかってしまった。シュタイナー木の列挙に関する結果の論文は今後行う。
- **研究成果の科学技術および学術・産業・社会・文化への波及効果**: グラフの列挙は様々な応用分野にて有用な技術である。多方面の分野にて本技術が適用可能である。
- **研究課題の独創性・挑戦性**: 比較的小規模なグラフのみを対象としていた技術に対して、大規模なグラフへの適応を考えた点が実践的かつ重要な課題であったと考えている。また、メモリ使用量・計算効率性・精度の三つの指標をいかに達成することができるのかが大きな挑戦であった。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Yuya Sasaki, Yasuhiro Fujiwara, and Makoto Onizuka, Efficient Network Reliability Computation in Uncertain Graphs, 22nd International Conference on Extending Database Technology, 2019, 337–348
2. 佐々木 勇和, 藤原 靖宏, 鬼塚 真. 曖昧グラフにおける効率的なネットワーク信頼性の近似計算. 第11回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM 2019), 2019年3月.
3. 佐々木 勇和, 藤原 靖宏, 鬼塚 真. 曖昧グラフにおける効率的なネットワーク信頼性の近似計算. データベース学会論文誌, 2020年3月.

(2) 特許出願

無し

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

招待講演: Yuya Sasaki,

Efficient Network Reliability Computation in Uncertain Graphs, WebDB Forum, 2019.

優秀論文賞および優秀インタラクティブ賞: 佐々木 勇和, 藤原 靖宏, 鬼塚 真

曖昧グラフにおける効率的なネットワーク信頼性の近似計算.

第11回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM 2019), 2019年3月.