

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	中村 健吾
論文題目	Studies on Network Graph Analysis with Decision Diagram Structures (決定グラフ構造によるネットワーク解析の研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>現代社会は、通信、電力、水道、ガス、道路、鉄道などの様々なネットワーク基盤により支えられている。このような社会基盤を設計する際には、利用者の集中に対する混雑耐性や、設備の故障に対する信頼性など、ネットワークの解析を効率よく行えることが実用上重要である。ネットワーク解析問題は、多くの問題設定において、NP 困難と呼ばれる理論的に難しい計算量クラスに属することが知られている。その難しさは、スイッチや配線などネットワークの構成要素の組合せによりサービスが提供されることに起因しており、ネットワークの規模に対して組合せの数が爆発的に増大するという性質がある。</p> <p>本論文は、膨大な組合せを列挙索引化し、効率よく圧縮して表現するデータ構造であるBDD (Binary Decision Diagram; 二分決定グラフ) およびその派生形であるZDD (Zero-suppressed BDD; ゼロサプレス型BDD)を用いて、ネットワークの混雑度や信頼性を効率よく解析するいくつかの技法を提案し、それらの有効性について論じたものであり、全10章から構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、技術的な背景と関連技術について概観したのちに、本論文での主たる研究成果の内容を簡潔にまとめ、その章構成について述べたものである。</p> <p>第2章では、本論文の背景的知識として、解析対象のネットワークをノードとリンクからなるグラフとしてモデル化すること、および、BDDやZDD (決定グラフと総称)を用いたデータ構造の構成方法やその演算処理に関する基本技法について説明している。</p> <p>第3章では、ゲーム理論における非協力ゲームの一種である「組合せ混雑ゲーム」について論じている。組合せ混雑ゲームは、利用者が自分勝手に行動したときに落ち着く均衡状態を求める問題として定式化される。組合せ混雑ゲームは、問題設定によっては、近似的な最適解を求めることも難しいクラスに属する。本論文では、扱う戦略集合をZDDで表現し、従来の反復的な最適化法の中にZDDによる演算処理を組み入れる新手法を提案しており、多様な問題設定に対応し、多くの場合、現実的な時間で解が得られることを実験的に示した。得られた解の近似精度保証ができることも示されている。</p> <p>第4章では、本論文の後半で扱う「ネットワーク信頼性」に関する背景的知識を説明している。ネットワーク信頼性は、リンクの確率的な故障に対して、注目するノード同士の連結性が保たれる確率として定義される。ネットワーク信頼性の厳密な計算は理論的に困難な問題であるが、既存手法としてBDDを用いた比較的高速な厳密計算手法が知られており、その基本アイデアについて解説している。</p>			

第5章では、「クライアントサーバ」モデルを想定したネットワーク信頼性について論じている。このモデルでは、クライアントごとに独立にネットワーク信頼性を評価する必要があり、既存のアプローチではノードごとに別々のBDDを構築する必要があったが、本研究では、BDDに似た決定グラフ構造を1つだけ構築し、動的計画法を用いてすべてのノードの信頼性をまとめて計算するアルゴリズムを提案し、ネットワークサイズに比例する高速化を実現している。

第6章では、ネットワークの頑健性を評価するためのより有用な尺度として、連結ノード数の期待値、および連結なノードペア数の期待値を計算する方法について論じている。既存のアプローチでは、ノードペアごとに別々のBDDを構築する必要があったが、この問題でもBDDに似た決定グラフ構造を構築してまとめて計算するアルゴリズムを提案している。第5章よりもさらに顕著な効果が得られ、ネットワークサイズの2乗に比例する高速化を達成している。

第7章では、ネットワークの各リンクの故障確率が正確に推定できない場合の信頼性評価について、各リンクの故障確率が統計的な分散を持つものとして、ネットワーク信頼性の計算結果の分散を計算する問題として論じている。BDDを用いた効率的な分散値計算アルゴリズムを開発することで、実用規模のネットワーク信頼性の不確実性の振る舞いを初めて明らかにしている。

第8章では、故障発生による影響規模（非接続ノード数、利用者数）を評価する手法について論じている。非接続ノード数ごとの確率、すなわち規模別不稼働率を定義し、BDDの派生形を用いてこれを厳密計算する高速なアルゴリズムを提案している。これにより実用規模のネットワークで規模別不稼働率を求め、実験的考察を加えている。

第9章では、ネットワーク構成要素の重要性指標となる「部分グラフ数え上げ」の問題を論じている。既存手法としてZDDを用いた高速な解法が知られているが、本論文では、グラフの各ノードが部分グラフに関係しているかどうかで分類した個数を全て同時に計算する新手法を提案している。各ノードに関する計算を1つのZDDでまとめて実行することで、グラフの規模に比例する高速化を実現している。

第10章は結論であり、本論文における研究成果を総括した上で、今後の課題および今後の研究の方向性について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ネットワーク上で提供されるサービスの品質評価や設計運用を行うための基盤技術に関するものである。利用者の集中に対する混雑耐性や設備の故障に対する信頼性を効率よく解析することを目的として、膨大な組合せを列挙索引化し圧縮して表現する「決定グラフ構造」を用いた解析アルゴリズムについて研究を行い、既存手法の課題を分析し、その性能を大幅に改善するいくつかの技法を提案するとともに、それらの理論的解析や実験的評価を行った結果をまとめたものである。本論文の主要な成果は以下の通りである。

(1) 組合せ混雑ゲームの均衡状態を高速に求める汎用的な手法の提案：

ゲーム理論における非協力ゲームの一種で、ネットワークの混雑耐性を評価す指標を与える「組合せ混雑ゲーム」において、扱う戦略集合を決定グラフで表現して演算処理する新手法を提案し、多様な問題設定に対して、多くの場合、現実的な時間で解が得られることを実験的に示した。得られた解の近似精度保証ができることも示した。

(2) ネットワーク信頼性に関する評価尺度を厳密計算する効率的な手法の提案：

確率的な故障に対するネットワークの連結性を評価する「ネットワーク信頼性」の解析において、いくつかの重要な拡張モデルと評価尺度を提案し、決定グラフを用いてそれらを高速かつ厳密に計算する手法を開発した。現代的なインターネットサービスを想定したクライアントサーバモデルでの信頼性解析、接続ノード数やノードペア数の期待値計算、不確かな故障確率モデルにおける分散値の計算、規模別不稼働率の計算、のそれぞれについて効率の良いアルゴリズムを実装し、実用規模の例題に対して実験を行いその有効性を示した。

(3) ネットワーク構成要素の重要性指標となる部分グラフ数え上げの高速化：

パスや木などの部分構造がネットワーク内にいくつ含まれているかを数え上げることはネットワークの性質を解析する上で有用である。本研究では、部分グラフの総数を数え上げるだけでなく、ネットワークの各ノードが部分グラフに含まれているかどうかで分類した個数を全て同時に計算する新しい手法を開発した。各ノードに関する計算を1つのZDDでまとめて実行することで、グラフの規模に比例する高速化を実現した。

以上、本論文は、ネットワーク解析と離散アルゴリズムの分野において、決定グラフ構造を用いたアルゴリズムの技法を応用して、ネットワークの混雑度や信頼性に関するいくつかの重要な評価尺度を高速かつ厳密に計算する新しい手法を提案し、理論的および実験的にその有効性を評価したものであって、学術上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、令和6年1月26日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。