

氏名	木村 貴幸
博士の専攻分野の名称	博士 (工学)
学位記号番号	博理工甲第 684 号
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Chaotic Neurodynamics Approach for Packet Routing Problems (カオスニューロダイナミクスを用いたパケットルーティング問題の解法)
論文審査委員	委員長 教授 池口 徹 委員 教授 三島 健稔 委員 教授 重原 孝臣 委員 教授 大澤 裕 委員 准教授 堀山 貴史

論文の内容の要旨

組み合わせ最適化問題は、探索空間が固定されているか変化するかという観点により二種類に分類される。探索空間が固定された問題を静的な組み合わせ最適化問題と呼び、変化する問題を動的な組み合わせ最適化問題と呼ぶ。通常扱われている巡回セールスマン問題、二次割当問題、配送計画問題などは、問題の探索空間が固定されている。従って、これらの問題は静的な組み合わせ最適化問題として考えることができる。一方、パケットルーティング問題は、探索空間が時々刻々と変化するため、動的な組み合わせ最適化問題として考えることができる。本論文では、パケットルーティング問題に対して、カオスニューロダイナミクスを用いた新たな解法を提案する。

パケットルーティング問題とは、コンピュータネットワーク内の各パケットを素早く目的地へ到着させることが目的となる組み合わせ最適化問題である。即ち、パケットルーティング問題は、コンピュータネットワーク内の各パケットに対する最短経路探索問題として捉えることができる。各リンクの重みが固定された静的なネットワークに対しては、ダイクストラ法などのアルゴリズムを用いれば、最短経路の探索は多項式オーダーで実現可能である。しかし、実際のコンピュータネットワークでは、ネットワーク内を流れる無数のパケットにより、ネットワークの状態が時々刻々と変化するため、各パケットの最短経路は動的に変化する。経路の動的な変化により、最短経路探索は非常に困難な問題となる。

2001 年、相互結合型ニューラルネットワークを用いた解法が堀口と石岡によって提案された。この解法では、相互結合型ニューラルネットワークのエネルギー最小化原理を用いて各パケットの最短経路を探索する。しかしながら、エネルギーの最小化原理を用いているため、必要となるニューロン数が増加した場合、動的な最短経路探索に多くの計算時間が必要となる。また、相互結合型ニューラルネットワークを用いた解法は、同様の理由から静的な組み合わせ最適化問題に対しても小規模のサイズの問題にのみ適用可能であるということも広く知られている。このような観点から、静的な組み合わせ最適化問題を対象として、近年、カオスダイナミクスを用いた解法が長谷川らによって提案されている。この解法では、相互結合型ニューラルネットワークのエネルギー最小化原理を用いず解の探索を行うため、大規模サイズの問題に対しても解

探索が可能となる。さらに、巡回セールスマン問題のみならず、二次割当問題、モチーフ抽出問題、配送計画問題などの種々の組み合わせ最適化問題に対して、非常に高い性能を示すことが報告されている。しかし、パケットルーティング問題などの動的な組み合わせ最適化問題に対して、カオスダイナミクスを用いた解法がどのような性能を示すかについての検証はなされていない。以上の観点から、動的な組み合わせ最適化問題の一つであるパケットルーティング問題に対して、カオスダイナミクスを用いたルーティング方式を提案する。

本論文ではまず、ネットワークの最短距離情報を導入したカオスダイナミクスを用いたルーティング方式を提案する。提案手法の評価方法として、単純なコンピュータネットワークモデルを用いる。カオスニューロンの有する不応性効果により、パケット混雑を効率的に解消することが可能であるために、提案法は高い性能を有することを計算機実験によって示した。さらに解法について、より現実的なコンピュータネットワークを対象とした場合の評価を行った。数値実験の結果から、より現実的な状況を設定した場合においても、種々の解法と比較して、提案手法が非常に高い性能を有することを計算機実験により明らかにした。さらに、提案したカオスダイナミクスを用いたルーティング方式に対して隣接ノードの送信待ち時間情報を追加することによりルーティング方式の改良を行う。近年、パケットルーティング問題に対して、Echenique らによって新しいルーティング方式が提案された。この解法では、パケットの最短距離情報だけでなく隣接ノードでの送信待ち時間を用いることによって、パケットの最短経路を探索している。そこでカオスダイナミクスを用いたルーティング方式に対して、送信待ち時間が導入された解法を提案する。送信待ち時間が導入されたことにより性能が向上されたこと、さらにカオスダイナミクスによる送信履歴情報により、従来の解法及び Echenique らによって提案された解法と比較して、この解法が非常に高い性能を有することを計算機実験により明らかにした。

さらに、カオスダイナミクスを用いたルーティング方式について、パケット混雑の解消に対するカオスダイナミクスの有意性を検証するために、サロゲートデータ法を導入した性能比較を行っている。サロゲートデータ法は、非線形時系列解析分野における統計的仮説検定法として広く用いられる手法である。本論文では、パケット混雑を解消するための統計的な制御手法としてサロゲートデータ法を用いる。サロゲートデータを用いた解法と比較して、提案法が高い性能を有すること、即ち、パケット混雑を解消する方法としてカオスダイナミクスが非常に効率的であることを計算機実験により示した。

以上要するに本論文は、巡回セールスマン問題などの静的な組み合わせ最適化問題に対して有効性が実証されていたカオスダイナミクスを用いた解法を、パケットルーティング問題を対象とする動的な組み合わせ最適化問題へ応用し、その有効性を実証したものである。さらに本研究の成果は、動的な組み合わせ最適化問題に対するカオスダイナミクスの有効性を示すものであり、静的な組み合わせ最適化問題とは異なるより現実的な状況が想定された最適化問題へのカオスダイナミクスの応用という新たな分野を開拓したものである。

論文の審査結果の要旨

学位論文審査委員会は、平成 20 年 2 月 1 日に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて、詳細な質疑と論文内容の審査を行った。以下は、審査結果の要約である。

工学において頻繁に出現する組み合わせ最適化問題は、探索空間が常に固定されている静的な組み合わせ最適化問題と、探索空間そのものが時々刻々変化する動的な組み合わせ最適化問題に分類される。本論文は、後者を対象としており、具体的な問題として、コンピュータネットワークにおけるパケットルーティング問題を用いて、カオスニューロダイナミクスを用いた新たな発見的解法を提案し、さらには、統計的解析を用いた詳細な検討により、その性能と適用可能範囲を明らかにしたものである。

まず、第一章では、組み合わせ最適化問題とその周辺に関する現在までの研究背景を述べ、発見的解法の現状について概観し、本研究の位置づけおよび目的について述べている。

第二章では、本論文が具体的に対象としているパケットルーティング問題の定義を述べている。まず始めに、この問題が、コンピュータネットワーク内の各パケットを素早く目的地へ到着させることが目的となる組み合わせ最適化問題であることを説明し、目的関数を定式化している。次に、パケットルーティング問題では、ネットワークの状態が時々刻々と変化するため、各パケットの最短経路は動的に変化すること、従って、パケットルーティング問題は、動的な組み合わせ最適化問題であり、静的なルーティング問題とは異なる困難な問題であることを述べている。

第三章では、ネットワークの最短距離情報を導入したカオスダイナミクスを用いたルーティング方式を提案している。まず始めに、単純なコンピュータネットワークモデルを対象とすることで、提案手法の基本性能を評価した。提案手法では、カオスニューロンの有する不応性効果をパケットの送信履歴の記憶へ応用しており、この記憶効果により、パケット混雑が効率的に解消されることを示している。これらの結果は、カオスニューロダイナミクスを用いた提案法が、動的な組み合わせ最適化問題に対しても高い性能を有することを世界で初めて明らかにしたものである。

また、第三章では、提案手法について、より現実的なコンピュータネットワークを対象とした場合の評価も行っている。数値実験の結果から、より現実的な状況を設定した場合においても、種々の従来解法と比較して、提案手法が非常に高い性能を有することを明らかにした。

さらに、提案したカオスダイナミクスを用いたルーティング方式に対して、隣接ノードの送信待ち時間情報を新たに追加する手法を提案している。具体的には、近年、パケットルーティング問題に対して、Echenique らによって提案された新しいルーティング方式を用いている。この解法では、パケットの最短距離情報だけでなく隣接ノードでの送信待ち時間を用いることによって、パケットの最短経路を探索している。そこで、カオスダイナミクスを用いたルーティング方式に対して、送信待ち時間の導入するための方式を具体的なアルゴリズムと共に提案している。その結果、送信待ち時間が導入されたことにより性能が向上されることを、大量の数値実験により示している。

第三章で提案している二つのルーティング手法は、規則的なネットワーク構造、ランダムなネットワーク構造だけでなく、近年、種々の分野で注目されており、実世界のネットワーク構造をモデル化していると考えられている複雑ネットワーク（スモールワールドネットワークとスケールフリーネットワーク）に対しても適用されている。その際、パケット発生確率の時空間ダイナミクス、発生パケット総数、発生分布等についても、現実のネットワークに即した様々な種類について、詳細な検討を行っている。その結果、提案手法であるカオスニューロダイナミクスを用いた最短経路探索技法が非常に高い性能を有することを計算機実験により明らかにした。

第四章では、本論文で提案しているカオスニューロダイナミクスを用いたルーティング方式について、その有効性を統計的解析法を用いて行っている。導入した解析法は、非線形時系列解析分野における統計的仮説検定法として広く用いられるサロゲートデータ法と呼ばれる手法である。サロゲートデータ法を用いて、カオスニューロダイナミクスが実現するパケット送信履歴情報の時系列データに対してサロゲートデータを作成し、これを用いてパケット混雑を試みた場合の性能と提案手法の性能を比較している。その結果、カオスによる送信履歴情報の一次統計量、二次統計量のみを保存したサロゲートデータを用いた場合に比べ、カオスニューロダイナミクスを用いた場合の性能が高いこと、また、その差には統計的な有意差が存在することを明らかにした。

第五章では、本論文で得られて成果をまとめている。また、得られた成果と今後の研究課題の関係についても述べている。

なお、本論文の主な内容は、既に三編の原著論文、二編の原著論文相当国際会議論文、七編の査読付き国際会議論文として公表されている。

以上要するに本論文は、従来まで明らかにされていなかった、動的な組み合わせ最適化問題に対するカオスニューロダイナミクスを用いた解法の有効性を、具体的なアルゴリズムの提案と共に明示的に示したものである。また、提案手法の有効性を、パケットルーティング問題を対象とした大量の数値実験により実証したものである。本研究の成果は、動的な組み合わせ最適化問題に対するカオスダイナミクスの有効性を示すものであり、静的な組み合わせ最適化問題とは異なる、より現実的な状況が想定された最適化問題へのカオスダイナミクスの応用という新たな分野を開拓した。これらの研究成果は、数理工学、数理情報学分野への貢献が大である。

従って、当学位論文審査委員会は、本論文が、博士（工学）の学位を授与するに十分に値するものと認め、「合格」と判定した。