

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03414

研究課題名（和文）シミュレーション環境との共進化による新しい輻輳制御アルゴリズムの自動生成

研究課題名（英文）Automatic Generation of Novel Congestion Control Algorithms through Co-evolution with Simulation Environments

研究代表者

阿部 洋丈（Abe, Hirotake）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：00456716

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、強化学習を用いたインターネットの輻輳制御アルゴリズムの自動生成を目指した。POETを活用し、ネットワークシミュレーション環境とアルゴリズムの共進化を行った。初年度にはプロトタイプを構築し、Quality Diversity (QD) の考え方を導入。次年度にはLLM (Large Language Model) を使用して、GE (Grammatical Evolution) の限界を克服するアルゴリズム生成を試みた。評価関数の見直しを行い、公平性を考慮した新たな評価指標を導入した結果、他の通信とバランスを保ちながら高いスループットを維持するエージェントの生成に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、機械学習アルゴリズム、特に強化学習を用いて、新たな輻輳制御アルゴリズムを自動生成する点にある。従来の手法では対応が難しい多様なネットワーク環境においても、高性能なアルゴリズムの生成が可能となる。また、環境とアルゴリズムの共進化により、人間の介在なしで効率的なアルゴリズムの開発が進む。社会的意義としては、インターネットサービスの品質向上が挙げられる。動画ストリーミング、オンラインゲーム、IoT、エッジコンピューティングなど多岐にわたる分野で、通信の効率性と公平性を向上させることで、ユーザー体験の大幅な向上が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to automatically generate internet congestion control algorithms using reinforcement learning. Utilizing POET, we co-evolved network simulation environments and algorithms. In the first year, we built a prototype and introduced the concept of Quality Diversity (QD). In the following year, we attempted to overcome the limitations of Grammatical Evolution (GE) by using a Large Language Model (LLM). We also revised the evaluation function to include a new fairness metric, resulting in the successful generation of agents that maintain high throughput while balancing with other communications.

研究分野：システムソフトウェア

キーワード：インターネット 輻輳制御 機械学習 共進化

1. 研究開始当初の背景

インターネットの輻輳制御アルゴリズムの研究は、TCP/IP の誕生以来、専門家の知識と経験に基づいて行われてきた。インターネットは、世界中の多くのユーザーが共有する通信インフラであり、限られた通信帯域を効率的かつ公平に分配することが求められる。これを実現するためには、データ送信者が状況に応じて適切に送信レートを調整する輻輳制御が不可欠である。しかし、従来の輻輳制御アルゴリズムは、単純なルールと固定されたパラメータに依存しており、異なるネットワーク環境において一貫した性能を発揮することが困難であった。さらに、インターネットの利用方法や接続形態は時代と共に変化しており、例えば、初期の電子メール中心の利用からウェブ中心、さらに現在では動画中心の利用へとシフトしてきた。このような変化により、従来のアルゴリズムの有効性が限られることがしばしば生じている。

輻輳制御は、パケットロスが発生した場合に送信レートを低下させるロスベースの手法が一般的である。しかし、これらのアルゴリズムは、ネットワークの状態変化に対して柔軟に対応できないことが多い。例えば、異なる帯域幅や遅延、パケットロス率などの変動があるネットワーク環境においては、固定パラメータでは最適な性能を維持することが難しい。このような背景から、新たなアプローチとして機械学習アルゴリズム、特に強化学習の技術を応用する研究が注目されている。強化学習は、チェスや囲碁、ビデオゲームなどの分野で既に人間の能力を超える成果を上げており、これらの成功を基にインターネットの輻輳制御にも応用可能であると期待されている。

強化学習アルゴリズムは、環境との相互作用を通じてエージェントが最適な行動を学習する手法である。これにより、従来のアルゴリズムが持つ固定的なルールと異なり、動的に変化するネットワーク環境に対して柔軟に適応できるアルゴリズムの開発が可能となる。本研究では、こうした背景を踏まえ、機械学習アルゴリズム、特に強化学習を用いた新たな輻輳制御アルゴリズムの自動生成を目指す。

2. 研究の目的

本研究の目的は、機械学習アルゴリズム、特に強化学習を用いて新たな輻輳制御アルゴリズムを自動生成することである。従来の輻輳制御アルゴリズムは、専門家の知識と経験に基づいて設計されており、固定されたパラメータと単純なルールによって構成されていた。しかし、ネットワーク環境の多様性に適応することが難しく、異なる条件下で一貫した高性能を発揮することができないという課題があった。特に、ネットワーク帯域幅や遅延、パケットロスなどの変動が激しい環境においては、固定的なアルゴリズムでは最適なパフォーマンスを維持することが困難であった。

本研究では、環境とアルゴリズムを共進化させる強化学習アルゴリズム **POET (Paired Open-Ended Trailblazer)** を使用する。POET は、環境とエージェントをペアとして共進化させる手法であり、複雑かつ多様な環境に適応するためのアルゴリズムの進化を促進する。これにより、ネットワークシミュレーション環境と輻輳制御アルゴリズムを同時に進化させることが可能となる。POET は、環境側を変化させることで学習を行う手法であり、環境とエージェントをペアにして学習することで、局所解に陥ることなく最適解を得ることができる。

さらに、本研究では進化アルゴリズムの一種である **Grammatical Evolution** を用いる。**Grammatical Evolution** は、遺伝的アルゴリズムを基盤とし、生成規則に基づいてプログラムを自動生成する手法である。これにより、文法的に正しいプログラムを生成し、輻輳制御アルゴリズムの自動生成を実現する。

本研究の独自性は、人間の介入なしに自律的に新しいアルゴリズムを生成し、既存のアルゴリズムを超える性能を持つものを見出す点にある。また、環境の自動生成により、多様なネットワークシナリオに対応した評価が可能となり、実用性の高いアルゴリズムの開発が期待される。

3. 研究の方法

本研究は、ネットワークシミュレーション環境と輻輳制御アルゴリズムの自動生成を行うことで、新たなアルゴリズムを創出することを目的としている。まず、強化学習アルゴリズム POET を用いて、ネットワークシミュレーション環境を自動生成する。POET は、環境とエージェントをペアとして共進化させる手法であり、生成された環境の多様性と複雑性を進化させることで、

効率的なアルゴリズムの生成を目指す。具体的には、初期化されたエージェントとペアになった環境からスタートし、環境とエージェントのペアを進化させていく過程で、最適な解を見つけ出す。

次に、進化アルゴリズムの一種である Grammatical Evolution を使用して、生成された環境に適した輻輳制御アルゴリズムを自動生成する。Grammatical Evolution は、遺伝的アルゴリズムを基盤とし、生成規則に基づいてプログラムを自動生成する手法である。この手法では、まず生成規則を定義し、ランダムに生成された個体（プログラム）を遺伝的アルゴリズムによって進化させていく。遺伝子型から表現型への置換は、遺伝子の値に基づいて非終端記号の遷移先を選択することで行われる。これにより、文法的に正しいプログラムを生成し、輻輳制御アルゴリズムの自動生成を実現する。

最終的に、生成されたアルゴリズムの性能を評価し、既存のアルゴリズムと比較する。具体的には、生成されたネットワークシミュレーション環境において、生成された輻輳制御アルゴリズムの性能を評価する。この評価には、ネットワーク帯域幅、遅延、パケットロスなどの変動に対する適応性や、通信のスループット、遅延、パケットロス率などのパフォーマンス指標が含まれる。評価結果を基に、POET と Grammatical Evolution の組み合わせが、新たな輻輳制御アルゴリズムの生成にどれほど効果的であるかを検証する。

また、本研究では実験を通じて、環境とアルゴリズムの共進化がどのように輻輳制御アルゴリズムの性能向上に寄与するかを明らかにする。特に、複雑かつ多様なネットワーク環境において、自律的に進化するアルゴリズムがどの程度の性能を発揮するかを詳細に解析する。これにより、既存のアルゴリズムを超える性能を持つ新たな輻輳制御アルゴリズムの生成が実現可能であるかを明らかにする。

当初は、次のステップを踏んで研究を進めることを予定していた。（しかし、実際には、状況の変化に応じて計画の一部を変更した。）

A) ネットワークシミュレーション環境の自動生成

POET アルゴリズムを用いて、様々な難易度のネットワークシミュレーション環境を自動生成する。ネットワークトポロジー、帯域幅、遅延、パケットロス率などのパラメータを変化させ、異なるシナリオを作成する。これにより、生成された環境が輻輳制御アルゴリズムの検証に適しているかを確認する。

B) 輻輳制御アルゴリズムの自動生成

Grammatical Evolution を使用して、生成された環境に適した輻輳制御アルゴリズムを自動生成する。具体的には、BNF（バックナウア記法）を用いて生成規則を定義し、遺伝子型から表現型への置換を行う。生成されたアルゴリズムは、ネットワークシミュレーション環境において性能を評価される。

C) アルゴリズムと環境の共進化

POET の枠組みを用いて、生成されたネットワーク環境と輻輳制御アルゴリズムの共進化を行う。環境とエージェントをペアにして進化させ、局所解に陥ることなく最適解を探索する。特に、ある環境で最適化されたアルゴリズムが他の環境でも高い性能を発揮するかを検証するために、エージェントを定期的に他の環境に転送して実行させる。

D) アルゴリズムの性能評価

生成された輻輳制御アルゴリズムの性能を評価する。評価には、ネットワーク帯域幅、遅延、パケットロス率、スループット、応答時間などのパフォーマンス指標を用いる。これらの評価結果を基に、生成されたアルゴリズムの実用性と効果を検証する。

E) 比較と分析

生成されたアルゴリズムの性能を既存の輻輳制御アルゴリズムと比較する。具体的には、NewReno や CUBIC などのデファクトスタンダードのアルゴリズムと比較し、生成されたアルゴリズムがこれらを凌駕する性能を持つかどうかを検証する。また、アルゴリズムの強みと弱点を詳細に分析し、改良の方向性を探る。

4. 研究成果

A) プロトタイプ実装と評価の実施

当年度は、提案方式のプロトタイプ実装とそれをを用いた評価に主に取り組んだ。我々の提案方式の基盤となるアイデアは、エージェントとしての輻輳制御アルゴリズムと、その実行環境としてのシミュレーションシナリオの共進化である。この方式により、動的に変化するネットワーク環境に適応可能なアルゴリズムの生成を目指した。初年度においては、まずこの基本アイデアを具体化し、実際に動作するプロトタイプの構築を行った。

プロトタイプ実装の中核となる技術は、Quality Diversity (QD) の考え方を導入することであった。QD は、多様な解決策を生成することに重点を置くアプローチであり、我々のシステムでは多様性の高い初期エージェント群を用いることで効率的な共進化を促進するよう設計した。具体的には、初期エージェント群を生成する際に、異なる特性を持つ多様なアルゴリズムを含むように工夫し、それらが様々なシミュレーション環境での試行錯誤を通じて進化していく仕組みを構築した。

このプロトタイプ実装を用いた実験では、既存の（人間の手による）アルゴリズムに匹敵するような優れたアルゴリズムを生成することはできなかった。しかし、生成されたエージェントの中には、既存のアルゴリズムに見られるような周期的な挙動を示すものが確認された。例えば、データ送信レートの調整において一定の周期性を持つ動作パターンが観察され、これは従来の輻輳制御アルゴリズムにおける典型的な特徴の一つである。このような成果は、我々の提案方式が正しい方向に進んでいることを示唆している。

これらの成果をまとめた論文は、人工生命分野における国際会議 ALIFE 2022、および、その前年の ALIFE 2021 に併設ワークショップ OEE4 で採択・発表された。発表においては、プロトタイプ実装の詳細な説明と共に、実験結果およびその意義について議論を行った。特に、QD を導入することで得られた多様なエージェントの挙動について注目が集まり、将来的な改良と応用可能性について多くのフィードバックを得ることができた。

B) エージェントの表現方法の改良検討

前述の取り組みに加えて、当年度はエージェントの表現方法についての改良の検討も行った。現在、我々は Grammatical Evolution (GE) を用いてエージェントを生成しているが、GE をそのまま使用すると異なるビット表現が同一のプログラムコードに対応してしまうという課題がある。この問題は、エージェントの多様性を制約し、進化の効率を低下させる可能性がある。

そこで、我々は Structured Grammatical Evolution (SGE) を導入し、この問題の解決を図った。SGE は、GE の改良版であり、ビット表現とプログラムコードの対応関係をより厳密に管理する手法である。SGE を用いることで、より一貫性のあるプログラム生成が可能となり、アルゴリズムの多様性と品質の向上が期待される。

SGE を実装し、エージェントの生成と評価を行った結果、従来の GE に比べて、より既存アルゴリズムに近い挙動を示す個体が確認された。具体的には、ネットワーク環境において安定したデータ送信レートを維持しつつ、輻輳発生時には迅速に対応するアルゴリズムが生成された。このような成果は、SGE がエージェントの生成において有効であることを示しており、今後の研究における重要な基盤となる。

これらの成果は、2022 年の情報処理学会オペレーティングシステム研究会で報告された。報告では、SGE の導入により得られた改善点や具体的な実験結果について詳細に説明し、参加者からの多くの質問やフィードバックを受けた。これにより、我々の研究がコミュニティにおいて注目されると共に、さらなる改良と発展に向けた貴重な洞察を得ることができた。

C) 評価関数の見直しによるエージェント進化プロセスの改良

評価関数の見直しに焦点を当てたエージェント進化プロセスの改良を行った。これまでの方式 (Endo et al. ALIFE 2022) では、エージェントの通信スループット性能のみを指標として評価を行っていた。このアプローチは、エージェント自身のパフォーマンス向上に重点を置く一方で、他の通信との競合を考慮していなかった。その結果、他の通信に対して不公平なエージェントが多数生き残るといった現象が発生した。

この問題を解決するために、当年度はエージェントのスループット性能に加え、他の通信との

公平性を考慮に入れた評価関数の設計と評価を行った。具体的には、以下のような新しい評価関数を導入した。まず、エージェント自身のスループット性能を引き続き評価指標の一つとして使用する。そして、新たに導入した指標として、他の通信のスループットへの影響度を測定し、その影響が最小限であることを評価する公平性指標を追加した。この公平性指標は、他の通信のパフォーマンスを極端に悪化させないようにするためのものである。

新しい評価関数を用いた実験では、従来の方法に比べて他の通信に対してより公平なエージェントが生成されることが確認された。具体的には、エージェントが高いスループットを維持しながらも、他の通信との競合においても適切なバランスを保つようになった。この結果は、ネットワーク全体のパフォーマンスとユーザー体験の向上に寄与するものであり、実用的な応用が期待される。

D) LLM の活用によるエージェント生成方法の改良

研究開始時点では、Grammatical Evolution (GE) を用いてアルゴリズムの生成と進化を行っていた。GE の利点は、常に文法的に正しいコードを生成できる点にあるが、その反面、事前に規定された文法の範囲内ではコードが生成されないため、進化の幅が制限されるという課題があった。そこで、LLM の活用によりこの制限を緩和し、より多様なアルゴリズムの生成を目指すこととした。

LLM を用いる場合、どのような指示を与えるかが重要なポイントとなる。我々は、近年急速に発展しているプロンプトエンジニアリングに関する研究成果を調査し、効率的な進化を行うための最適な手法を模索した。プロンプトエンジニアリングとは、LLM に対する入力指示（プロンプト）を最適化し、望ましい出力を得るための技術である。この技術を駆使することで、GE では生成不可能な、かつ輻輳制御として機能するアルゴリズムの生成が可能であることを確認した。

実際の実験では、LLM を用いて生成されたアルゴリズムが多様なネットワーク環境において適応力を発揮することが確認された。しかし、性能の面では、まだ GE による結果を大きく上回るには至っていない。特に、スループットや遅延の最適化に関しては、GE による従来の方法が依然として優位であることが分かった。今後の課題としては、LLM を用いたアルゴリズムの性能向上に向けた具体的な改善策の検討が挙げられる。これには、プロンプトエンジニアリングの更なる最適化や、生成アルゴリズムの評価指標の再検討が含まれる予定である。これらの研究成果は、次年度の国際会議で発表し、さらなるフィードバックと改良の機会を得る計画である。

E) シミュレーション環境の進化方式の再検討

これまでの研究では、通信経路上の通信機器の多さに基づく難易度の調整を行ってきたが、この方法では調整の粒度が大雑把であり、より精密な制御が求められていた。そこで、理論的な裏付けに基づく難易度の定量的評価を目指し、新たな手法の検討を進めた。

具体的には、複雑ネットワーク上のデータ転送に関する Tadic ら[Intl. J. of Bifurcation and Chaos, Vol. 17, No. 7 (2007) 2363-2385]の理論的成果を参照した。この研究では、ネットワークのトポロジーや通信の特性がデータ転送の難易度にどのように影響するかを理論的に解析している。これを基に、我々はシミュレーション環境の難易度を定量的に評価し、自動生成する手法を開発した。

まず、Tadic らの理論を応用し、ネットワークの複雑度を計算するアルゴリズムを実装した。これにより、各シミュレーション環境の複雑度に基づいて、難易度を定量的に評価できるようになった。この評価指標を用いることで、通信経路上のノード数や接続形態だけでなく、データ転送における遅延やスループットの変動も考慮した難易度の調整が可能となった。

新たなシミュレーション環境生成手法を用いた実験では、従来の経験則に基づく方法に比べて、より細かい粒度で難易度を調整できることが確認された。これにより、エージェントの評価がより正確に行えるようになり、実際のネットワーク環境における適応力を高めることが期待される。この成果についても、今後、学会等での発表を計画している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Teruto Endo, Hirotake Abe, Mizuki Oka
2. 発表標題 Toward automatic generation of diverse congestion control algorithms through co-evolution with simulation environments
3. 学会等名 ALIFE 2022: The 2022 Conference on Artificial Life (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 広瀬 智之, 阿部 洋丈, 岡 瑞起
2. 発表標題 輻輳制御アルゴリズムの自動生成におけるStructured Grammatical Evolution適用の検討
3. 学会等名 情報処理学会 第155回システムソフトウェアとオペレーティング・システム研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruto Endo, Hirotake Abe and Mizuki Oka
2. 発表標題 Towards automatic generation of congestion control algorithms by coevolving the environment
3. 学会等名 OEE4: The Fourth Workshop on Open-Ended Evolution (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡 瑞起 (Oka Mizuki) (10512105)	筑波大学・システム情報系・准教授 (12102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------