

令和 5 年 4 月 13 日現在

機関番号：14603

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K21288

研究課題名（和文）NFVネットワークのトポロジ構成の変化に追従可能なサービスチェイニング

研究課題名（英文）Network Topology-Aware Service Chaining in NFV Network

研究代表者

原 崇徳（Hara, Takanori）

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教

研究者番号：70907881

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：NFVネットワークのトポロジの変化に追従可能なサービスチェイニング(SC)を実現するために、(1)数理最適化と(2)機械学習による手法をそれぞれ確立した。(1)では、容量制約付き最短経路ツアー問題(CSPTP)に基づくSCと機能配置問題を効率的に解く近似解法を提案した。数値実験より近似解法は整数線形計画と比較して性能を維持しながら小さい実行時間を達成できることを確認した。(2)では、トポロジとサービス需要の変化に追従可能なCSPTPに基づくSCをGNNと深層強化学習を連携することで実現した。数値実験より提案法はトポロジとサービス需要の変化に対応しながら効率的に資源を割り当てることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のSC問題では、最短経路問題を背景とした解法であったが、本研究課題では、VNFの実行順序の保証、単一のパスが同一リンクやノードを複数回利用するといったSC特有の課題に対して、CSPTPを導入することで、資源効率性と計算時間の観点から、CSPTPによるオンライン型SCの実現可能性を示した。更に、GNNを適用した学習モデルを適用することで、未知のネットワークトポロジやサービス需要の変化に追従可能なサービスチェイニングの実現性を示した。これらの成果はネットワークトポロジと特徴の効率的な利用方法の理解を深めるとともに、ネットワーク分野における資源割当や故障検知に貢献できると期待される。

研究成果の概要（英文）：This research project established (1) mathematical optimization and (2) machine learning based service chaining (SC) to realize the topology-aware SC in NFV networks. As for mathematical optimization, the Lagrangian heuristics has been proposed to efficiently solve the capacitated shortest path tour problem (CSPTP) based SC and function placement. Representative results showed that the Lagrangian heuristics achieves much smaller execution time while holding almost the same performance as the integer linear program. As for machine learning, the CSPTP-based SC adaptive to changes of service demand and network topology has been proposed by collaborating graph neural networks and deep reinforcement learning. Representative results showed that the proposed scheme achieves the efficient resource allocation adaptive to the changes of both service demand and network topology.

研究分野：情報通信

キーワード：ネットワーク機能仮想化 サービスチェイニング 強化学習 グラフニューラルネットワーク 容量制約付き最短経路ツアー問題

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ネットワーク機能仮想化 (NFV: Network functions virtualization) はネットワーク機能を従来の専用機器から分離し、仮想ネットワーク機能 (VNF: Virtual network function) として汎用機器上で実行することで、拡張性と柔軟性を向上したネットワークサービスを提供できる。あるネットワークサービスは複数 VNF を連結したサービスチェーンとして構成できる。サービスチェーンニング (SC: Service chaining) は計算資源、ネットワーク帯域、必要な VNF の構成などのサービス要件が伴うサービス要求が与えられると、所望の順序で VNF を実行しながら始点から終点までの経路をサービスパスとして構築することを目的としている。SC の困難さは VNF の実行順序の保証と単一のパスによる同一リンクの複数回利用にあり、NP 困難であることが指摘されている。SC は NFV ネットワークの資源割当問題として活発に研究が進められている。迅速なサービス提供には近似解法が有効となるが、ネットワークの負荷状況やトポロジ構成に対して適切なパラメタ設定が必要となる。また NFV ネットワークの運用コストの削減と自動化の観点から、機械学習に基づく手法が期待できる。ネットワークのトポロジ構成の考慮はロバスタかつ効率的な資源割当を可能にする。一方で拡張性と柔軟性を持つ NFV ネットワークにおいて、ユーザのサービス要求に伴い NFV ネットワークの仮想トポロジ構成が変化することが想定される。仮想トポロジ構成の変化は対応する物理網上の資源割当状況に影響を与えるため、物理網と仮想網の両方の接続性と特性を考慮した SC の検討が重要となる。

### 2. 研究の目的

NFV ネットワークの効率的な運用は最適性 (例えば、新規要求の受理確率 (可用性) の向上) を目指す一方で、サービス要求は逐次到着するため、SC の実現に掛かる処理時間を抑える必要がある。物理・仮想トポロジ構成の検討はノードやリンクの負荷状態を捉えた SC が期待できる一方で、仮想トポロジ構成は逐次変化する可能性があるため、未知のトポロジ構成に対してロバスタな資源割当が求められる。つまり、最適性と処理時間の両立と未知のトポロジ構成に対する汎化能力を備えた SC の実現が鍵となる。以上を踏まえて、本研究課題では、CSPTP に基づく SC の知見を踏まえ、資源制約下でのサービス要求を満たすサービスパスを実現するための深層強化学習 (DRL: Deep reinforcement learning) フレームワークを創出し、最適性と処理時間の両立と仮想トポロジ構成の変化に適応可能な SC を創出することを目的とする。

### 3. 研究の方法

研究目的を達成するための課題として、1. CSPTP に基づく SC の最適性と処理時間のトレードオフの調査 (数理最適化による解法)、2. 資源制約下でのサービス要求を満たすサービスパス (CSPTP) を実現するための GNN を利用した DRL フレームワークの設計 (機械学習による解法)、に取り組む。

CSPTP に基づく SC の最適性と処理時間のトレードオフの調査では SC の最適性と処理時間が NFV ネットワークの運用に与える影響を明らかにするために、既存の CSPTP に基づく整数線形計画に対して、ラグランジュ緩和に基づく近似解法を検討し、シミュレーション実験より定量的に分析する。そして、SPTP 制約に関する全ユニモジュラ生を考慮した整数線形計画の線形緩和法についても同様に検討する。具体的には、サービス要求の到着間隔と整数計画法や近似法解法の処理時間がサービス要求の受理率に与える影響を比較分析し、最適性と処理時間のトレードオフの関係を明らかにする。さらに、頑健なネットワークサービスを実現するために、VNF の多様性・冗長性を考慮したサービスチェーンニングを整数線形計画として定式化する。

CSPTP に基づく SC のための GNN を利用した DRL フレームワークの設計では、NFV ネットワークの仮想トポロジ構成の動的変化が資源割当状況に与える影響を捉えるために、GNN を利用した DRL フレームワークについて検討する。具体的には、既存のネットワーク性能指標 (例えば、媒介中心性) やネットワークの輻輳状態、ノードの処理負荷に応じて、適切なサービスパスを実現する学習モデルを検討する。GNN を適用した学習モデルを利用して、シミュレーション実験より未知のトポロジ構成に対する SC の割当性能を (最適性と処理時間の観点から) 定量的に比較分析するとともに、CSPTP 特有の課題 (VNF の実行順序の保証、単一のパスによる同一リンクの複数回利用) に対して有効であるかどうかを解明する。

### 4. 研究成果

数理最適化による解法では、図 1 より、提案方式は整数線形計画と同程度のサービス遅延を実現していることが確認できる。そして、図 2 より、提案方式は、実行時間を無視した整数線形計画 (理想的なケース) と同程度の受理率を示している。以上のことから、提案方式は既存の CSPTP に基づく整数線形計画と比較して、サービス遅延とサービス可用性を維持しながら、実行時間を削減できることを確認し、CSPTP に基づく SC によるオンライン処理の実現性を示した。さらに、頑健なネットワークサービスを実現する VNF の多様性・冗長性を考慮したサービスチェーンニングを確立し、資源効率とサービス可用性を両立できる資源割当が可能であることを示した。

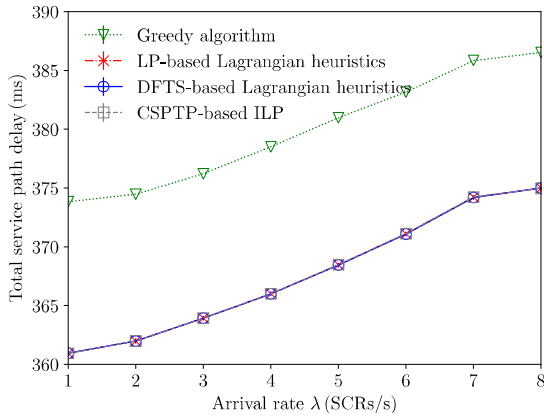


図 1 サービスチェーン要求の到着率とサービス遅延の関係

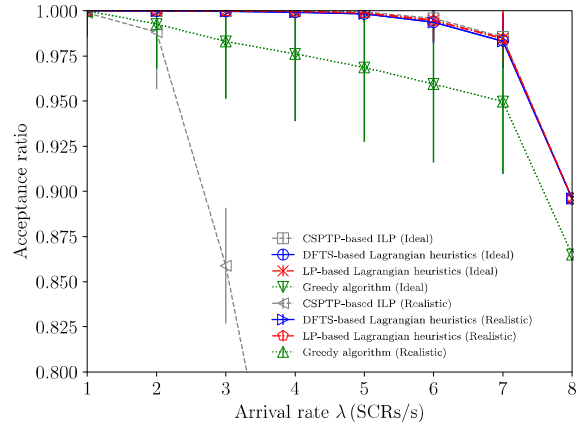


図 2 サービスチェーン要求の到着率と受率

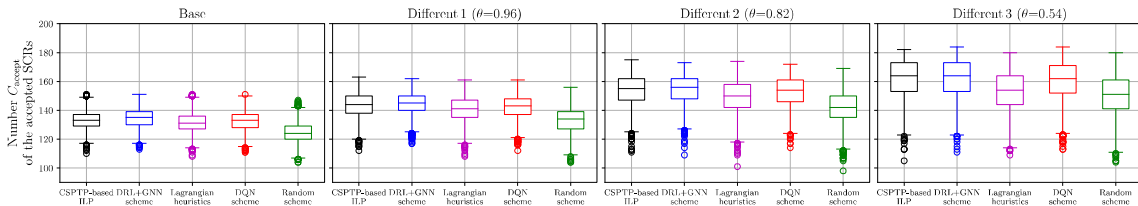


図 3 サービス需要の変化に対するサービス要求の受取数

機械学習による解法では，サービス需要が異なるシナリオに対して，提案方式，整数線形計画，ラグランジュ緩和，DQN による解法，ランダム方式を比較評価した．図 3 はサービス需要が異なるシナリオにおける各方式のサービス要求の受取数を示している．提案方式は，シナリオによらず整数線形計画と同程度の性能を示している．これは，ネットワークポロジとサービス需要の変化に対する GNN と深層強化学習の汎化性能による効果を表している．また，ラグランジュ緩和法による手法は特定のシナリオ下でのパラメータチューニングが必要であり，サービス需要が変化すると再度パラメータチューニングを必要とするため，サービス需要の変化に伴い性能が劣化していることがわかる．提案方式では，このようなパラメータチューニングなしに高い性能を示していることがわかる．さらに，ネットワーク上のリンク故障に対する影響をサービス要求の受取率の観点から評価した（図 4）．図 4 より，故障したリンク数の増加はサービスの受取性能を低下させることが確認できる．これは，NFV ネットワークのリンク容量の低下によるものである．しかしながら，提案方式は整数線形計画と同程度の性能を示していることが確認できる．以上のことから，提案方式はネットワークポロジやサービス需要の変化にアダプティブに対応しながら効率的に資源を割り当てることがいえる．

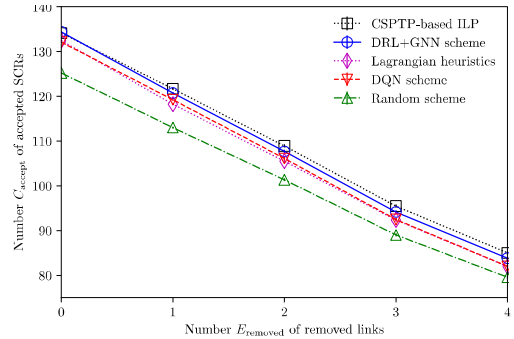


図 4 リンク故障に対するサービス要求の受取数

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Hara Takanori, Sasabe Masahiro  | 4. 巻<br>31         |
| 2. 論文標題<br>Speedy and Efficient Service Chaining and Function Placement Based on Lagrangian Heuristics for Capacitated Shortest Path Tour Problem | 5. 発行年<br>2022年    |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Network and Systems Management   | 6. 最初と最後の頁<br>1-34 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1007/s10922-022-09715-y   | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-          |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Hara Takanori, Sasabe Masahiro  | 4. 巻<br>-           |
| 2. 論文標題<br>Deep Reinforcement Learning with Graph Neural Networks for Capacitated Shortest Path Tour based Service Chaining | 5. 発行年<br>2022年     |
| 3. 雑誌名<br>in Proc. of the International Conference on Network and Service Management (CNSM 2022)                            | 6. 最初と最後の頁<br>19-27 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.23919/CNSM55787.2022.9965166  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-           |

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Hara Takanori, Sasabe Masahiro  | 4. 巻<br>-         |
| 2. 論文標題<br>Lagrangian Heuristics for Capacitated Shortest Path Tour Problem Based Online Service Chaining | 5. 発行年<br>2022年   |
| 3. 雑誌名<br>in Proc. of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS 2022)               | 6. 最初と最後の頁<br>1-9 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1109/NOMS54207.2022.9789758   | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-         |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takanori HARA, Masahiro Sasabe   |
| 2. 発表標題<br>Lagrangian Heuristics for Capacitated Shortest Path Tour Problem Based Online Service Chaining |
| 3. 学会等名<br>IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (国際学会)                                   |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>原 崇徳, 笹部 昌弘  |
| 2. 発表標題<br>容量制約付き最短経路ツアーとラグランジュ緩和を用いたNFVネットワークにおけるオンラインサービスチェイニング |
| 3. 学会等名<br>第50回インターネット技術第 163 委員会研究会                              |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>原 崇徳, 笹部 昌弘  |
| 2. 発表標題<br>容量制約付き最短経路ツアー問題に基づくサービスチェイニング ~ 整数線形計画とラグランジュ緩和による解法 ~ |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会RISING研究会                                      |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>原 崇徳, 笹部 昌弘   |
| 2. 発表標題<br>容量制約付き最短経路ツアー問題に基づくサービスチェイニング ~ ラグランジュ緩和法と最短経路ツアーアルゴリズムに基づく解法 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会NS研究会   |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hara Takanori, Sasabe Masahiro   |
| 2. 発表標題<br>Deep Reinforcement Learning with Graph Neural Networks for Capacitated Shortest Path Tour based Service Chaining |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Network and Service Management (CNSM 2022) (国際学会)                                    |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>杉原健斗, 原崇徳, 笹部昌弘, 笠原正治                          |
| 2. 発表標題<br>VNFの多様性・冗長性に基づく可用性と資源効率を考慮したサービスチェイニングとVNF配置方式 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会ネットワークシステム研究会                          |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>原崇徳, 笹部昌弘  |
| 2. 発表標題<br>容量制約付き最短経路ツア-問題に基づくサービスチェイニング - グラフニューラルネットワークを用いた深層強化学習に基づく解法 - |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会ネットワークシステム研究会  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|                           |                       |    |

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 |
|---------|---------|
|         |         |