（ 続紙 １ ）

京都大学	博士（情報学）	氏名	康 瑞
論文題目	Fault-Resilient Resource Allocation in Network Function Virtualization （ネットワーク機能仮想化における故障耐性のある資源割り当て）		

（論文内容の要旨）

従来のネットワーク機能は専用ハードウェアと結合しており、オンデマンドで拡張するには柔軟性に欠け、更新にはコストを要する。従来のネットワークでは、各専用ハードウェア上の未使用の計算資源を共有できないため、ネットワーク機能の配備や保守のコストが増大する。ネットワーク機能仮想化（NFV: network function virtualization）は、ネットワーク機能を専用ハードウェアから切り離す。ネットワーク機能は仮想ネットワーク機能（VNF: virtual network function）に仮想化され、特定の順序でサービス機能チェーン（SFC: service function chain）を形成することができる。また、汎用ハードウェアが提供する計算資源を異なるVNF間で柔軟に共有できる。VNFの配備と管理を自動化することにより、ユーザのサービス要求に迅速に応えることができる。VNFのNFVオーケストレーション（NFVO: network function virtualization orchestration）エンジンと連携した資源割り当てモデルを適切に設計することにより、様々な目的の観点からネットワーク性能を向上させることが求められている。

本論文は、NFVにおける故障耐性の確保、及び、ハードウェアやソフトウェアの故障や利用不能がサービス品質に与える影響の緩和の課題について検討し、NFVプラットフォーム上で実装される異なるレベルの故障情報に対する5つの異なる資源割り当て問題に取り組む。本論文は、以下の全9章から構成されている。

第1章では、NFVにおける故障耐性のある資源割り当ての背景と、本論文で取り組む問題について述べている。第2章では、本論文の関連研究について述べている。

第3章では、ネットワークにおけるSFCの連続利用可能時間を最大化することを目的とした、時間スロットへのVNF割り当てを導出するモデルを提案している。提案モデルでは、各タイムスロットにおける各ノードの可用性に関する情報を提供する可用性スケジュールに基づいて、一連のタイムスロットにおけるVNFの割り当てを計算する。性能評価の結果、提案モデルは、ノードの利用不能やVNFの再配置を部分的に考慮した従来モデルと比較して、SFCの連続利用可能時間を改善することを示している。

第4章では、予備VNFを使用することで、ノードが利用できないことによるサービス中断を回避するための現用VNFおよび予備VNF配置モデルを提案している。提案モデルは、決定論的な可用性スケジュールに対して、全てのSFCにおいて継続的に利用可能な最小タイムスロット数を最大化する。予備VNFを考慮した提案モデルの性能は、比較モデルを上回ることを示している。

第5章では、可用性スケジュールに不確定要素が含まれるネットワークにおいて、可用性スケジュールに記載されたノードの使用不能による中断と機能の再配置を抑制することで、SFCの連続使用可能時間を最大化することを目的とし、VNFをSFCのタイムスロットに順番に割り当てるロバスト最適化モデルを提案している。性能評価の結果、提案モデルは、異なるロバストネスレベルの下で、比較モデルより、継続的に利用可能な最小タイムスロット数を向上させることが示されている。

第6章では、現用VNFから予備VNFへの移行時のエンド・ツー・エンド遅延を短縮することを目的とした、SFCにおける弾力的なVNF割り当てモデルを提案している。提案モデルは、レプリカプールから適切なレプリカを選択し、現用VNFと予備VNFの両方について、これらのレプリカの位置を決定する。性能評価の結果、提案モデルは、従来

モデルと比較して、VNFの回復力を確保しつつ、現用VNFと予備VNFのペア間のエンド・ツー・エンド遅延を削減することが示されている。
第7章では、VNFの多様性を考慮し、要求、到着、解放時間がランダムな動的シナリオにおいて、ノードの耐故障性の要求を保証しながら、受け入れられる要求の数を最大化することを目的とした、VNF割り当てモデルを提案している。また、提案モデルを解くための強化学習アプローチを開発している。性能評価の結果、提案モデルは、数十ミリ秒で要求の割り当てが決定されるような検討ケースにおいて、従来モデルと比較して、機能の回復力を確保しつつ、受け入れられる要求数を増加させることが示されている。
第8章では、NVFOを実現するオープンソースシステムであるKubernetesを用いて資源割り当てモデルを実装している。さらに、SFC割り当てモデルと協調したSFCを実装している。実証実験により、これらの実装の有効性を示している。
第9章では、本論文の結論と今後の研究の方向性について述べている。

（続紙　２　）

（論文審査の結果の要旨）

本論文は、ネットワーク機能仮想化（NFV: network function virtualization)における故障耐性の確保、及び、ハードウェアやソフトウェアの故障や利用不能がサービス品質に与える影響の緩和の課題を検討し、NFVオーケストレーションプラットフォーム上で実装される異なるレベルの故障情報に対する資源割り当て問題に焦点を当てて研究を行っている。本研究で得られた成果は以下の通りである。

第一に、ネットワークにおけるサービス機能チェーン（SFC: service function chain）の連続利用可能時間を最大化することを目的とした、時間スロットへの仮想ネットワーク機能（VNF: virtual network function）の割り当てモデルを提案している。性能評価の結果、提案モデルは、ノードの利用不能やVNFの再配置を部分的に考慮した従来モデルと比較して、SFCの連続利用可能時間を改善することを示している。

第二に、予備VNFを使用することで、ノードが利用できないことによるサービス中断を回避するための現用VNFおよび予備VNFの配置モデルを提案している。提案モデルは、決定論的な可用性スケジュールに対して、全てのSFCにおいて継続的に利用可能なタイムスロット数の最小値を最大化する。予備VNFを考慮した提案モデルの性能は、比較モデルを上回ることを示している。

第三に、可用性スケジュールに不確定要素が含まれるネットワークにおいて、可用性スケジュールに記載されたノードの使用不能による中断と機能の再配置を抑制することで、SFCの連続使用可能時間を最大化することを目的とし、VNFをSFCのタイムスロットに順番に割り当てるロバスト最適化モデルを提案している。性能評価の結果、提案モデルの性能は比較モデルを上回ることが示されている。

第四に、現用VNFから予備VNFへの移行時のエンド・ツー・エンド遅延を短縮することを目的とした、SFCにおける弾力的なVNFを割り当てのための最適化モデルを提案している。性能評価の結果、提案モデルは、従来モデルと比較して、VNFの回復力を確保しつつ、現用VNFと予備VNFのペア間のエンド・ツー・エンド遅延を削減することが示されている。

第五に、VNFの多様性を考慮し、要求、到着、解放時間がランダムな動的シナリオにおいて、ノードの耐故障性の要求を保証しながら、受け入れられる要求の数を最大化することを目的とした、VNF割り当てモデルを提案している。また、強化学習を用いて提案モデルを解く手法を新たに開発している。性能評価の結果、提案モデルは、数十ミリ秒で要求の割り当てが決定されるような検討ケースにおいて、従来モデルと比較して、機能の回復力を確保しつつ、受け入れられる要求数を増加させることが示されている。

第六に、NVFOを実現するオープンソースシステムであるKubernetesを用いて資源割り当てモデルを実装している。さらに、SFC割り当てモデルと協調したSFCを実装している。実証実験により、これらの実装の有効性を示している。

以上、本論文は、ネットワーク機能仮想化における故障耐性のある資源割り当てを提案しており、ネットワーク機能仮想化の発展に貢献するものである。本論文の内容は、学術上、実用上とも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5年8月24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。また、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。