

様式VI

## 博士学位論文調査報告書

論文題目

Reliable Resource Allocation Models in Network Virtualization  
(ネットワーク仮想化における信頼性のある資源割り当てモデル)

申請者氏名 HE FUJUN

最終学歴

平成29年6月

電子科技大学大学院光電情報研究科 光工学専攻修士課程 修了  
令和2年9月

京都大学大学院情報学研究科 通信情報システム専攻博士後期課程  
研究指導認定見込

学識確認

令和 年 月 日 (論文博士のみ)

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科  
(調査委員長) 教授 大木 英司

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科  
教授 守倉 正博

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科  
教授 原田 博司

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (情報学)	氏名	HE FUJUN
論文題目	Reliable Resource Allocation Models in Network Virtualization (ネットワーク仮想化における信頼性のある資源割り当てモデル)		
<p>Network virtualization has been introduced as a key role in the next-generation networking paradigm to fend off the ossification of traditional networks. By leveraging the technologies of computer virtualization, network function virtualization, and software-defined networking, a platform with network virtualization provides virtualized resources of computing, functionality, and networking to users in a dynamic manner. While network virtualization leads to a more flexible and efficient network, it brings challenges for network management, one of which is how to efficiently allocate resources with satisfying different requirements. In addition, as the adaptation of network virtualization in different application archetypes is an increasing trend, the reliability of an environment with network virtualization has become a major concern. Resource allocation with protection strategies dealing with the reliability issue is an essential requirement for network virtualization.</p> <p>This thesis studies five specific problems about reliable resource allocation in network virtualization, each of which focuses on a typical application scenario, to achieve a flexible, cost-effective, and dependable network virtualization environment.</p> <p>Firstly, this thesis proposes a primary and backup resource allocation model that provides a probabilistic protection guarantee for virtual machines against multiple failures of physical machines in a cloud provider to minimize the required total capacity. The probability that the protection provided by a physical machine does not succeed is guaranteed within a given number. Providing the probabilistic protection can reduce the required backup capacity by allowing backup resource sharing, but it leads to a nonlinear programming problem in a general-capacity case against multiple failures. This work applies robust optimization with extensive mathematical operations to formulate the resource allocation problem as a mixed integer linear programming problem, where capacity fragmentation is suppressed. This work proves the NP-hardness of considered problem. A heuristic is introduced to solve the optimization problem. The results reveal that the proposed model saves about one-third of the total capacity in the examined cases; it outperforms the conventional models in terms of both blocking probability and resource utilization.</p> <p>Secondly, this thesis proposes a backup computing and transmission resource allocation model for virtual networks with the probabilistic protection against multiple facility node failures. Backup transmission resource allocation is incorporated, where the required backup transmission capacity can affect the required backup computing capacity. This work analyzes backup transmission resource sharing in the case of multiple facility node failures to compute the minimum required backup transmission capacity. A heuristic algorithm is introduced to solve the problem; especially, several techniques based on graph theory are developed to handle the problem with full backup transmission resource sharing. The results observe that the proposed model outperforms a baseline with dedicated protection for computing resource.</p> <p>Thirdly, this thesis proposes a backup resource allocation model for middleboxes with considering both failure probabilities of network functions and backup servers. This work takes the importance of functions into account by defining a weighted unavailability for each function. This work aims to find an assignment</p>			

of backup servers to functions where the worst weighted unavailability is minimized. This work formulates the proposed model as a mixed integer linear programming problem. This work proves that the considered problem is NP-complete. This work develops three heuristic algorithms with polynomial time complexity to solve the problem. This work analyzes the approximation performances of different heuristic algorithms with providing several lower and upper bounds. This work presents the competitive evaluation in terms of deviation and computation time among the results obtained by running the heuristic algorithms and by solving the mixed integer linear programming problem. The results show the pros and cons of different approaches. With the analyses, a network operator can choose an appropriate approach according to the requirements in specific applications.

Fourthly, this thesis proposes an unavailability-aware backup allocation model with the shared protection to minimize the maximum unavailability among functions. The shared protection allows multiple functions to share the backup resources, which leads to a complicated recovery mechanism and makes unavailability estimation difficult. This work develops an analytical approach based on the queueing theory to compute the middlebox unavailability for a given backup allocation. The heterogeneous failure, repair, recovery, and waiting procedures of functions and backup servers, which lead to several different states for each function and for the whole system, are considered in the queueing approach. This work introduces a simulated annealing heuristic to solve the problem based on the developed analytical approach. The results reveal that, compared to a baseline model, the proposed model reduces the maximum unavailability 16% in average in the examined scenarios.

Fifthly, this thesis proposes a master and slave controller assignment model against multiple controller failures in software-defined networks with considering propagation latency between switches and controllers. Given assigned controllers for a switch, the master controller in each failure case is automatically specified based on a low latency first policy. This work defines three objectives to be optimized, which lead to three different problems. This work proves that the adopted policy achieves the optimal objectives for considered problems. This work formulates the proposed model with different goals as three mixed integer linear programming problems. This work proves the NP-completeness for all the three problems. A greedy algorithm with polynomial time complexity is developed; this work shows that it provides a  $1/2$ -approximation for the case without the survivability guarantee constraint. The numerical results observe that the proposed model obtains the optimal objective value with the computation time about  $10^2$  times shorter than that of a baseline that introduces decision variables to determine the master controllers.

This thesis is organized as follows. Chapter 1 introduces the background of reliable resource allocation in network virtualization. Chapter 2 investigates the related works in literature. Chapter 3 presents the robust optimization model for virtual machine allocation. Chapter 4 introduces the probabilistic protection model for virtual networks. Chapter 5 develops the backup resource allocation model for network functions. Chapter 6 presents the unavailability-aware shared backup allocation model. Chapter 7 describes the controller assignment model for switches. Finally, Chapter 8 concludes this thesis.

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ネットワーク仮想化における信頼性の高い資源配分に関する問題を、典型的な適用シナリオ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、必要な総資源容量を最小化するために、クラウドの物理マシンの多重障害に対する仮想マシンの確率的な保護保証を提供する現用および予備資源割り当てモデルを提案している。ロバスト最適化を適用し、容量の断片化の抑制を考慮した資源割り当て問題を混合整数線形計画問題として定式化し、発見的手法を導入した。その結果、提案モデルは、従来モデルと比較して、総容量の約3分の1の容量を削減することを明らかにしている。

第二に、複数の設備ノードの障害に対する確率的な保護を有する仮想ネットワークのための予備計算資源と伝送資源の割り当てモデルを提案している。複数の設備ノードの障害が発生した場合の予備伝送資源割り当てを解析し、必要最小限の予備伝送容量を計算している。その結果、提案されたモデルは、計算資源を専用に保護する参照モデルよりも優れていることを示している。

第三に、ネットワーク機能と予備サーバの故障確率を考慮したミドルボックスの予備資源割り当てモデルを提案している。提案されたモデルを混合整数線形計画問題として定式化し、多項式時間で計算可能な3つの発見的アルゴリズムを開発した。それぞれの最適化手法の分析により、ネットワーク運用者がアプリケーションの要件に応じて適切な手法を選択することが可能であることを示している。

第四に、ネットワーク機能間の最大の不可用性を最小化するために、共有保護を用いた不可用性を考慮した予備資源割り当てモデルを提案している。ネットワーク機能の不可用性を算出するために待ち行列理論に基づいた解析手法を開発し、予備資源割り当てには焼き鈍し手法を導入した。その結果、参照モデルと比較して、提案モデルは、検討されたシナリオにおいて、平均して最大利用不能を16%削減できることを明らかにしている。

第五に、スイッチとコントローラ間の伝搬遅延を考慮したソフトウェア定義ネットワークにおける複数のコントローラ故障に対するマスターとスレーブのコントローラ割り当てモデルを提案している。異なる目標を持つ提案モデルを3つの混合整数線形計画問題として定式化し、貪欲なアルゴリズムを開発した。提案モデルは、計算時間を1/100に短縮し、最適な目的値が得られることを示している。

以上、本論文は、ネットワーク仮想化における信頼性の高い資源配分に関して、適用シナリオに対応した資源割り当てモデルを提案し、ネットワーク仮想化技術の発展に貢献するものである。本論文の内容は、学術上、実用上ともに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のあるものとして認める。また、令和2年8月18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。

要旨公開可能日： 年 月 日以降