

学位被授与者氏名	カフゼジ エルミオニ (Qafzezi Ermioni)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第69号
学位授与年月日	2023年3月20日
論文題目	Management and Coordination of Resources in Software-Defined Vehicular Networks: Implementation and Performance Evaluation of an Integrated Fuzzy-based System and a Testbed
論文題目 (英訳または和訳)	ソフトウェア定義車両ネットワークにおけるリソースの管理と調整：統合ファジィベースシステムとテストベッドの実装と性能評価
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査：福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 バロレオトルド 同審査委員：福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 松尾 慶太 同審査委員：福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻准教授 池田 誠 同審査委員：福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 江口 啓
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (和文)	<p>モノのインターネット (Internet of Things: IoT) の新しい時代では、高度道路交通システム (Intelligent Transportation System: ITS) の様々なコンポーネントがリンクされ、道路利用者の安全性と有効性が向上される。さらに、従来の車両アドホックネットワーク (Vehicle Ad-hoc Networks: VANETs) から車両のインターネット (Internet of Vehicles: IoV) 及びソフトウェア定義車両ネットワーク (Software-Defined Vehicular Networks: SDVNs)への進化により、車両、インフラストラクチャ、歩行者、クラウドデータセンター、都市などの多くのエンティティ間でのリアルタイムデータのやり取りが可能になる。これらのネットワークの特徴 (プログラマビリティや柔軟性など) により、VANET のパフォーマンスと管理が向上する。しかし、ネットワークのスケラビリティ、ネットワーク接続、情報の配布と管理、セキュリティなどいくつかの問題がある。また、多くのエンティティを持つことで、利用可能なリソースが豊富になり、アプリケーションの要件を損なうことなくすべてのリソースを活用する必要がある。</p> <p>本論文では、これらの課題を考慮し、Fuzzy Logic (FL) と Software Defined Networking (SDN) に基づくインテリジェントなアプローチを提案する。多くのパラメータを考慮し、様々なシナリオで使用できるインテリジェントシステムを実装する。しかし、多くのパラメータを含む問題は、NP 困難な問題となる。そのため、VANET で非常に重要であるリアルタイムで意思決定を行うための適切な方法としてFLを考慮する。提案アプローチは、様々な機能で構成されるクラウド・フォグ・エッジの階層化されたアーキテクチャを考慮し、統合されたファジィベースのシステムはSDNコントローラーに実装する。提案システムは、アプリケーションの要件と周囲の車両との利用可能な接続を考慮し、車両が特定のアプリケーションを処理するのに最適なレイヤーを決定する。多くのシミュレーションによって提案システムを評価し、実際のシナリオでの実現可能性を評価するためのテストベッドを設計および実装した。</p> <p>シミュレーション結果は、ネットワークの過負荷が減少し、ネットワークの利用可能なリソースを活用できることを示した。さらに、提案システムのパフォーマンスは、考慮されるパラメータの数と複雑さに関連していることが分かった。一方、実験結果は、提案されたアプローチが実行可能であることを示しているが、正確な精度を決定するには、より大きなサイズのテストベッドが必要である。また、シミュレーション結果と実験結果を比較し、誤差は少ないことが分かった。</p> <p>本論文は、次のような特色と独創的な点を有しており、本研究分野の科学技術を発展させ、世界への貢献が期待できる。1) VANETsとIoV をサポートする新しいテクノロジーについての洞察、2) VANETのためのFL に基づくリソース管理システムの実装と性能評価、3) クラウド・フォグ エッジ・レイヤーのリソース機能を個別に評価するために、多くのサブシステムの提案と実装、4) テストベッドでの提案されたリソース管理システムの実装、5) シミュレーション結果と実験結果の比較。</p>

	<p>本論文は全10章で構成する。第1章では、研究背景、目的及び論文構成を述べる。第2章では、無線ネットワークについて紹介する。第3章では、VANET、無線アクセス技術、ネットワークアーキテクチャ、データ配布、セキュリティ、プライバシーについて説明する。第4章では、ネットワーク機能仮想化 (NFV)、ネットワークスライシング、クラウドコンピューティングおよび SDN の実装を可能にするいくつかの新しいテクノロジーとアプローチについて説明する。第5章では、SDN、クラウド・フォッド・エッジコンピューティングおよびそれらのVANETでの使用について詳しく説明する。第6章では、知的アルゴリズムについて説明する。第7章では、ファジィ理論、ファジィ集合およびファジィシステムの基本情報について述べる。第8章では、実装されたインテリジェントなファジィベースシステム及びテストベッドを紹介する。第9章では、提案されたシステムと実装されたテストベッドの評価結果について議論する。第10章では、結論とこの分野における今後の課題の見識を与えて、論文をまとめる。</p>
<p>論文内容の要旨 (英文)</p>	<p>In the new era of Internet of Things (IoT), different components of Intelligent Transportation System (ITS) will be linked, thus enhancing safety and effectiveness for road users. In addition, the evolution of conventional Vehicular Ad hoc Networks (VANETs) into Internet of Vehicles (IoV) and Software-Defined Vehicular Networks (SDVNs) will enable real-time data interaction among many entities such as vehicles, infrastructure, pedestrians, cloud data centers and cities. The features of these networks such as programmability and flexibility improve the performance and management of VANETs. However, there are some problems with network scalability, network connectivity, information dissemination and management, security and so on. Also, by having many entities, there are abundant available resources and the exploitation of all resources should be done without compromising the applications requirements.</p> <p>In this thesis, considering these challenges, we propose an intelligent approach based on Fuzzy Logic (FL) and Software Defined Networking (SDN). We consider many parameters and implement intelligent systems that can be used in different scenarios. However, problems containing many parameters are known as NP-Hard problems. Therefore, FL is used as an adequate method for making decision in real-time, which is very important in VANETs. The proposed approach considers a cloud-fog-edge layered architecture consisting of different capabilities and makes use of an integrated fuzzy-based system implemented in the SDN controllers. The proposed system decides the best layer for a vehicle to handle a certain application, taking into consideration the application requirements and the available connections with the surrounding vehicles. We evaluate the system by extensive simulations. We design and implement a testbed to evaluate its feasibility in a real-life scenario.</p> <p>The simulation results show that the network overload is decreased and the available resources of the network can be exploited. In addition, the performance of the proposed system is related to the number of considered parameters and complexity. On the other hand, the experimental results demonstrate that the proposed approach is feasible, but a larger-sized testbed is necessary to determine the exact accuracy. We also compared the simulation results with experimental results. The comparison results show that the simulation results and experimental results are close to each other.</p> <p>The contributions of this thesis are as follows. 1) We give insights about VANETS and the emerging technologies supporting IoV. 2) We implement and show the performance evaluation of a resource management system based on FL for VANETs. 3) We propose and implement many subsystems to evaluate the resource capabilities of cloud-fog-edge layers separately. 4) Implementation of</p>

	<p>the proposed resource management system in a testbed. 5) Comparison of simulation results with experimental results.</p> <p>The thesis structure is as follows. In Chapter 1 is presented the background, motivation and structure of the thesis. In Chapter 2 are introduced different types of wireless networks. Chapter 3 presents VANETs, the radio access technologies, network architectures, data dissemination, security and privacy. In Chapter 4 are described some of the emerging technologies and approaches that enable implementation of Network Function Virtualization (NFV), network slicing, cloud computing and SDN. In Chapter 5 is given a detailed explanation of SDN, cloud-fod-edge computing, and their use in VANETs. Chapter 6 introduces intelligent algorithms. Chapter 7 provides basic information of FL theory, fuzzy sets and fuzzy systems. Chapter 8 presents the implemented intelligent fuzzy-based systems and testbed. In Chapter 9, we discuss the evaluation results of the proposed systems and the implemented testbed. In Chapter 10, we conclude this thesis and give directions about future work.</p>
論文審査結果	<p>モノのインターネット (Internet of Things: IoT) の新しい時代では、高度道路交通システム (Intelligent Transportation System: ITS) の様々なコンポーネントがリンクされ、道路利用者の安全性と有効性が向上される。さらに、従来の車両アドホックネットワーク (Vehicular Ad-hoc Networks: VANETs) から車両のインターネット (Internet of Vehicles: IoV) およびソフトウェア定義車両ネットワーク (Software-Defined Vehicular Networks: SDVNs) への進化により、車両、インフラストラクチャ、歩行者、クラウドデータセンター、都市などの多くのエンティティ間でのリアルタイムデータのやり取りが可能になる。これらのネットワークの特徴 (プログラマビリティや柔軟性など) により、VANET のパフォーマンスと管理が向上する。しかし、ネットワークのスケラビリティ、ネットワーク接続、情報の配布と管理、セキュリティなどいくつかの問題がある。また、多くのエンティティを持つことで、利用可能なリソースが豊富になり、アプリケーションの要件を損なうことなくすべてのリソースを活用する必要がある。</p> <p>本論文では、これらの課題を考慮し、Fuzzy Logic (FL) と Software Defined Networking (SDN) に基づくインテリジェントなアプローチを提案する。多くのパラメータを考慮し、様々なシナリオで使用できるインテリジェントシステムを実装する。しかし、多くのパラメータを含む問題は、NP 困難な問題となる。そのため、VANET で非常に重要であるリアルタイムで意思決定を行うための適切な方法として FL を考慮する。提案アプローチは、様々な機能で構成されるクラウド・フォグ・エッジの階層化されたアーキテクチャを考慮し、統合されたファジィベースのシステムは SDN コントローラーに実装する。提案システムは、アプリケーションの要件と周囲の車両との利用可能な接続を考慮し、車両が特定のアプリケーションを処理するのに最適なレイヤーを決定する。多くのシミュレーションによって提案システムを評価し、実際のシナリオでの実現可能性を評価するためのテストベッドを設計および実装した。</p> <p>シミュレーション結果より、ネットワークの過負荷が減少し、ネットワークの利用可能なリソースを活用できることを示した。さらに、提案システムのパフォーマンスは、考慮されるパラメータの数と複雑さに関連していることが分かった。一方、実験結果は、提案されたアプローチが実行可能であることを示しているが、正確な精度を決定するには、より大きなサイズのテストベッドが必要である。また、シミュレーション結果と実験結果を比較し、誤差は少ないことが分かった。</p> <p>本論文は次のような特色と独創的な点を有しており、本研究分野の科学技術を発展させ、世界への貢献が期待できる。1) VANETs と IoV をサポートする新しいテクノロジーについての洞察、2) VANET のための FL に基づくリソース管理システムの実装と性能評価、3) クラウド・フォグ・エッジ・レイヤーのリソース機能を個別に評価するために、多くのサブシステムの提案と実装、4) テストベッドでの提案されたリソース管理システムの実装、5) シミュレーション結果と実験結果の比較。</p>

	<p>本論文は全 10 章で構成する。第 1 章では、研究背景、目的及び論文構成を述べている。第 2 章では、無線ネットワークについて紹介している。第 3 章では、VANET、無線アクセス技術、ネットワークアーキテクチャ、データ配布、セキュリティ、プライバシーについて説明している。第 4 章では、ネットワーク機能仮想化 (NFV)、ネットワークスライシング、クラウドコンピューティングおよび SDN の実装を可能にするいくつかの新しいテクノロジーとアプローチについて説明している。第 5 章では、SDN、クラウド・フォグ・エッジコンピューティングおよびそれらの VANET での使用について詳しく説明している。第 6 章では、知的アルゴリズムについて説明している。第 7 章では、ファジィ理論、ファジィ集合およびファジィシステムについて述べている。第 8 章では、実装されたインテリジェントなファジィベースシステムおよびテストベッドを紹介している。第 9 章では、提案されたシステムと実装されたテストベッドの評価結果について議論している。第 10 章では、結論とこの分野における今後の課題の見識を与えて、論文をまとめている。</p> <p>本研究の成果は、氏の博士後期課程在学期間において学術論文 5 編（第 1 著者 5 編）、国際会議 12 編（第 1 著者 12 編）となっている。また、EIDWT-2020 および IMIS-2022 国際会議では“Best Paper”賞を受賞しており、本研究の新規性と有用性が認められるとともに、国際的にも高く評価できる研究であることが分かる。</p> <p>以上の理由により、審査委員会は本論文が学位論文の内容として適合すると判定した。</p> <p>学位論文公聴会においては、論文内容に関連する種々の工学的及び技術的な質問があったが、いずれも適切な回答を行うことができた。また、公聴会後の最終試験においては、学位論文に関連する分野の学識を有し、今後研究を進めていくための研究能力を備えていることが判明した。</p> <p>以上の結果から、学位審査委員会は本論文が博士（工学）の学位に適格であると判定した</p>
<p>主な研究業績</p>	<p>参考論文 17 編 1 冊  （学術論文）  （査読付き学術論文：第一著者5編）</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Ermioni Qafzezi</b>, Kevin Bylykbashi, Phudit Ampririt, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “An Intelligent Approach for Cloud-Fog-Edge Computing SDN-VANETs Based on Fuzzy Logic: Effect of Different Parameters on Coordination and Management of Resources”, <i>Sensors</i>, MDPI, Vol. 22, No. 3, 878; DOI: <a href="https://doi.org/10.3390/s22030878">10.3390/s22030878</a>, February 2022. <b>IF: 3.847, CiteScore: 6.4.</b></li> <li>2. <b>Ermioni Qafzezi</b>, Kevin Bylykbashi, Phudit Ampririt, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “FSAQoS: A Fuzzy-Based System for Assessment of QoS of V2V Communication Links in SDN-VANETs and Its Performance Evaluation”, <i>International Journal of Distributed Systems and Technologies (IJDST)</i>, IGI Global, Vol. 13, No. 1, p. 7, DOI: <a href="https://doi.org/10.4018/IJDST.300338">10.4018/IJDST.300338</a>, 2022. <b>Indexed in: [Web of Science], CiteScore: 1.2.</b></li> <li>3. <b>Ermioni Qafzezi</b>, Kevin Bylykbashi, Phudit Ampririt, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A QoS-Aware Fuzzy-Based System for Assessment of Edge Computing Resources in SDN-VANETs: System Implementation and Performance Evaluation”, <i>International Journal of Mobile Computing and Multimedia Communications (IJMCMC)</i>, IGI Global, Vol. 12, No. 4, pp. 1-16, DOI: <a href="https://doi.org/10.4018/IJMCMC.289161">10.4018/IJMCMC.289161</a>, October 2021. <b>Indexed in: [Web of Science], CiteScore: 1.8.</b></li> <li>4. <b>Ermioni Qafzezi</b>, Kevin Bylykbashi, Phudit Ampririt, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-based Approach for Resource Management in SDN-VANETs: Effect of Trustworthiness on Assessment of Available Edge Computing Resources”, <i>Journal of High Speed Networks (JHSN)</i>, IOS Press, Vol. 27, No. 1, pp. 33-44, DOI: <a href="https://doi.org/10.3233/JHS-210650">10.3233/JHS-210650</a>, 2021. <b>Indexed in: [Web of Science], CiteScore: 1.3.</b></li> <li>5. <b>Ermioni Qafzezi</b>, Kevin Bylykbashi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “Coordination and Management of Cloud, Fog and Edge Resources in SDN-VANETs</li> </ol>

Using Fuzzy Logic: A Comparison Study for Two Fuzzy-based Systems”, Internet of Things (IoT), Elsevier, Vol. 11, Article 100169, 12 pages, DOI: [10.1016/j.iot.2020.100169](https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100169), September 2020. **IF: 5.711, CiteScore: 10.2.**

(国際会議論文)

(査読付き国際会議：第一著者12編)

1. **Ermioni Qafzezi**, Kevin Bylykbashi, Elis Kulla, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “Implementation of a Fuzzy-based Testbed for Coordination and Management of Cloud-Fog-Edge Resources in SDN-VANETs”, Proc. of EIDWT-2023 [Accepted], Semarang, Indonesia, February 2023.
2. **Ermioni Qafzezi**, Kevin Bylykbashi, Admir Barolli, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Comparison Study of Two Fuzzy-based Systems for Assessment of Fog Computing Resources in SDN-VANETs”, Proc. of 3PGCIC-2022, pp. 96-108, Tirana, Albania, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-19945-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-19945-5_9), October 27–29, 2022.
3. **Ermioni Qafzezi**, Kevin Bylykbashi, Admir Barolli, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-Based System for Assessment of Fog Computing Resources in SDN-VANETs Considering Service Migration Speed as a New Parameter”, Proc. of INCoS-2022, pp. 140-149, Hyogo, Japan, DOI: [10.1007/978-3-031-14627-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14627-5_14), September 7–9, 2022.
4. **Ermioni Qafzezi**, Kevin Bylykbashi, Phudit Ampririt, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-Based System for Assessment of Fog Computing Resources in SDN-VANETs”, Proc. of IMIS-2022, pp. 1–9, Kitakyushu, Japan, DOI: [10.1007/978-3-031-08819-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-08819-3_1), June 29–July 1, 2022.
5. **Ermioni Qafzezi**, Kevin Bylykbashi, Phudit Ampririt, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Survey on Advances in Vehicular Networks: Problems and Challenges of Architectures, Radio Technologies, Use Cases, Data Dissemination and Security”, Proc. of AINA-2022, Vol. 3, pp. 602-613, Sydney, Australia, DOI: [10.1007/978-3-030-99619-2\\_56](https://doi.org/10.1007/978-3-030-99619-2_56), April 13–15, 2022.
6. **Ermioni Qafzezi**, Kevin Bylykbashi, Phudit Ampririt, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-Based System for Assessment of QoS of V2V Communication Links in SDN-VANETs”, Proc. of EIDWT-2022, pp. 153–162, Okayama, Japan, DOI: [10.1007/978-3-030-95903-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-95903-6_17), March 2–4, 2022.
7. **Ermioni Qafzezi**, Kevin Bylykbashi, Phudit Ampririt, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-Based System for Assessment of Quality of Service Communication Links in SDN-VANETs”, Proc. of BWCCA-2021, pp. 120–128, Fukuoka, Japan, DOI: [10.1007/978-3-030-90072-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-90072-4_12), October 28–30, 2021.
8. **Ermioni Qafzezi**, Kevin Bylykbashi, Phudit Ampririt, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A QoS-aware Fuzzy-based System for Assessment of Edge Computing Resources in SDN-VANETs”, Proc. of AINA-2021, Vol. 1, pp. 63-72, Toronto, Canada, DOI: [10.1007/978-3-030-75100-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75100-5_6), May 12–14, 2021.
9. **Ermioni Qafzezi**, Kevin Bylykbashi, Phudit Ampririt, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, Makoto Takizawa, “Resource Management in SDN-VANETs Using Fuzzy Logic: Effect of Average Processing Capability per Neighbor Vehicle on Management of Cloud-Fog-Edge Resources,” Proc. of EIDWT-2021, pp. 155-167, Chiang Mai, Thailand, DOI: [10.1007/978-3-030-70639-5\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70639-5_15), February 25–27, 2021.
10. **Ermioni Qafzezi**, Kevin Bylykbashi, Phudit Ampririt, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, Makoto Takizawa, “Assessment of Available Edge Computing Resources in SDN-VANETs by a Fuzzy-Based System Considering Trustworthiness as a New Parameter”, Proc. of 3PGCIC-2020, pp. 102-112, Yonago, Japan, DOI: [10.1007/978-3-030-61105-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61105-7_11), October 28–30, 2020.
11. **Ermioni Qafzezi**, Kevin Bylykbashi, Phudit Ampririt, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, Makoto Takizawa, “A Fuzzy-Based System for Assessment of Available Edge Computing Resources in a Cloud-Fog-Edge SDN-VANETs Architecture,” Proc. of

NBiS-2020, pp. 10–19, Victoria, Canada, DOI: [10.1007/978-3-030-57811-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57811-4_2), August 31 – September 2, 2020.

12. **Ermioni Qafzezi**, Kevin Bylykbashi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, Makoto Takizawa, “Resource Management in SDN-VANETs Using Fuzzy Logic: Effect of Data Complexity on Coordination of Cloud-Fog-Edge Resources,” Proc. of CISIS-2020, pp. 498–509, Lodz, Poland, DOI: [10.1007/978-3-030-50454-0\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50454-0_52), July 1–3, 2020.