

学位被授与者氏名	アンパイリ プーデット (AMPRIRIT PHUDIT)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第71号
学位授与年月日	2024年9月20日
論文題目	Management and Selection of Radio Access Technologies in 5G Wireless 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)	5G 無線ネットワークにおける無線アクセス技術の管理と選出：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 バロリ レナルド 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>第五世代 (5G) 無線ネットワークの登場は、ユーザーの要求に合わせた多様なネットワーク構成と密なネットワークサービスを提供する方向への顕著なパラダイムシフトを示している。ソフトウェア定義ネットワークング (SDN: Software-Defined Networking) とネットワークスライシングの統合は、これらのダイナミックなネットワーク内での効率的なリソース割り当てとトラフィック管理のための有望な解決策として注目されている。しかし、5G無線ネットワークの展開は、無線データサービスへの急増する需要に対応するための周波数利用効率の向上、接続されるデバイスとデータトラフィックの指数関数的増加に対応するネットワーク容量とスループットの向上などが求められるなど、多くの課題に直面している。</p> <p>これらの課題に対処するため、本研究ではファジィ理論 (FL: Fuzzy Logic) とSDNアプローチを考慮した5G無線ネットワークにおける無線アクセス技術 (RATs: Radio Access Technologies) の管理と選択のための統合システムを提案する。このシステムをISR TM (Integrated System for Resource and Traffic Management) と呼ぶ。提案システムは、ファジィベースRAT選択モジュール (FRSM: Fuzzy-based RAT Selection Module)、ファジィベース接続制御モジュール (FACM: Fuzzy Admission Control Module)、およびファジィベースハンドオーバーモジュール (FHM: Fuzzy-Based Handover Module) の3つのモジュールで構成される。FRSMは、ユーザーが効率のかつ信頼性の高い通信のために適切なRATに接続できるようにRATを選択する。FACMは、新規ユーザーの接続要求を受け入れるか否かを決定するコールアドミッションコントロール (CAC: Call Admission Control) の機能を持つ。FHMは、異なる基地局やアクセス技術だけでなく、異なるスライスも考量したハンドオーバーを実現するための機能である。</p> <p>本研究では異なるモジュールを実装して、各モジュールに異なるパラメータを考慮することにより、その性能を評価する。この比較分析では、各パラメータが意思決定プロセスにどのように影響するかを理解し、最適な性能のための最も効果的なシステム構成を特定する。提案システムはシミュレーションによって評価され、シミュレーション結果は提案システムが良好な振る舞いを示している。さらに、提案システムの性能は、考慮されるパラメータの数とそれに関連する複雑さと相関している。これらの結果を検証するためにテストベッドを設計および実装した。検証の結果として、シミュレーション結果と実験結果の傾向がほぼ一致していることを明らかにした。</p> <p>本論文の貢献は次のとおりである。1) リソースとトラフィック管理のための統合システム (ISR TM) の提案。2) FRSM、FACM、FHMの3つのモジュールの実装。3) 異なるファジィベースシステムについてのシミュレーション結果の比較。4) FRSMのテストベッド実装。5) シミュレーション結果と実験結果の比較。</p>

	<p>論文の構成は次のとおりである。第1章では、論文の背景、目的、貢献及び構成について紹介する。第2章では無線ネットワークについて説明する。第3章で5G無線ネットワークについて述べる。第4章では、SDNについて提示し、SDNの構造と5G無線ネットワークにおけるSDNの利点と欠点について説明する。第5章では、接続制御、ハンドオーバー、および無線アクセス技術について議論する。第6章では、遺伝的アルゴリズム (GA : Genetic Algorithm)、ニューラルネットワーク (NNs: Neural Networks)、粒子群最適化 (PSO: Particle Swarm Optimization) などの知的アルゴリズムを紹介する。第7章では、FLについて述べる。第8章では、提案システムを提示し、入力パラメータと出力パラメータの詳細を説明する。第9章では、異なる入力パラメータに対するシミュレーション結果とテストベッドを使用した実験結果を比較検証する。最後に、第10章で結論と今後の展望を述べる</p>
<p>論文内容の要旨 (英文)</p>	<p>The emergence of Fifth Generation (5G) wireless networks brings a paradigm shift towards providing dense network services and a diverse array of network configurations tailored to meet user requirements. Leveraging the capabilities of Software-Defined Networking (SDN) coupled with Network Slicing (NS) presents a promising approach for efficient resource allocation and traffic management. However, the deployment of 5G wireless networks is accompanied by many challenges such as the enhancement of spectrum efficiency to accommodate increasing demands of wireless data services and the improvement of network capacity and throughput to accommodate the exponential growth of connected devices and data traffic.</p> <p>To deal with these challenges, this research work proposes an integrated system for management and selection of Radio Access Technologies (RATs) in 5G wireless networks considering Fuzzy Logic (FL) and SDN approaches. We call this system: Integrated System for Resource and Traffic Management (ISR TM) in 5G wireless networks. The proposed system is composed of three modules called Fuzzy-based RATs Selection Module (FRSM), Fuzzy-based Admission Control Module (FACM) and Fuzzy-based Handover Module (FHM). The FRSM selects RAT in 5G wireless networks in order that a user to connect with an appropriate RAT for efficient and reliable communication. The FACM deals with Call Admission Control (CAC), which decides whether to accept or reject a connection request from a new user. The FHM deal with handover procedure, which considers not only different base stations or access technologies but also different slices.</p> <p>We implement different modules and for each module we consider different parameters. We compare the performance of the implemented modules in order to understand how each parameter influences the decision-making process and identify the most effective system configuration for optimal performance. We evaluated the proposed system by simulations. The simulation results show that proposed system has a good behavior. Furthermore, the performance of the proposed system correlates with the number of parameters under consideration and the associated complexity. We also designed and implemented a testbed in order to compare the simulation results with experimental results. The performance evaluation shows that the trend of simulation results and experimental results is the same. Also, the simulation and experimental data are very close.</p> <p>The contributions of this thesis are as follows. 1) Proposal of Integrated System for Resource and Traffic Management (ISR TM). 2) Implementation of three modules: FRSM, FHM and FACM. 3) Comparison of simulation results for different fuzzy-based systems. 4) Testbed implementation for FRSM. 5) Comparison of simulation results with experimental results.</p>

	<p>The thesis structure is as follows. Chapter 1 introduces the background, motivation, contribution and the structure of this thesis. Chapter 2 presents wireless networks. The 5G Wireless Networks are described in Chapter 3. In Chapter 4, we present SDN, where we explain the structure of SDN and its advantages and disadvantages. In Chapter 5 are discussed admission control, handover and RATs. In Chapter 6 are introduced Intelligent Algorithms such as Genetic Algorithm (GA), Neural Networks (NNs) and Particle Swarm Optimization (PSO). In Chapter 7, we explain the FL. In Chapter 8 are presented the proposed systems, where we describe in detail the input and output parameters. In Chapter 9 are shown the simulation results for different input parameters and experiment results using the testbed. Finally, the concluding remarks and the future are given in Chapter 10.</p>
<p>論文審査結果</p>	<p>第五世代 (5G) 無線ネットワークの登場は、ユーザーの要求に合わせた多様なネットワーク構成と密なネットワークサービスを提供する方向への顕著なパラダイムシフトを示している。ソフトウェア定義ネットワーク (SDN: Software-Defined Networking) とネットワークスライシングの統合は、これらのダイナミックなネットワーク内での効率的なリソース割り当てとトラフィック管理のための有望な解決策として注目されている。しかし、5G 無線ネットワークの展開は、無線データサービスへの急増する需要に対応するための周波数利用効率の向上、接続されるデバイスとデータトラフィックの指数関数的増加に対応するネットワーク容量とスループットの向上が求められるなど、多くの課題に直面している。</p> <p>これらの課題に対処するため、本研究ではファジィ理論 (FL: Fuzzy Logic) と SDN アプローチを考慮した 5G 無線ネットワークにおける無線アクセス技術 (RATs : Radio Access Technologies) の管理と選択のための統合システムを提案する。このシステムを ISRTM (Integrated System for Resource and Traffic Management) と呼ぶ。提案システムは、ファジィベース RAT 選択モジュール (FRSM: Fuzzy-based RAT Selection Module)、ファジィベース接続制御モジュール (FACM: Fuzzy Admission Control Module) およびファジィベースハンドオーバーモジュール (FHM: Fuzzy-Based Handover Module) の 3つのモジュールで構成される。FRSM は、ユーザーが効率的かつ信頼性の高い通信のために適切な RAT に接続できるように RAT を選択する。FACM は、新規ユーザーの接続要求を受け入れるか否かを決定するコールアドミッションコントロール (CAC: Call Admission Control) の機能を持つ。FHM は、異なる基地局やアクセス技術だけでなく、異なるスライスも考量したハンドオーバーを実現するための機能である。</p> <p>本研究では異なるモジュールを実装して、各モジュールに異なるパラメータを考慮することにより、その性能を評価する。この比較分析では、各パラメータが意思決定プロセスにどのように影響するかを理解し、最適な性能のための最も効果的なシステム構成を特定する。提案システムはシミュレーションによって評価され、シミュレーション結果は提案システムが良好な振る舞いを示している。さらに、提案システムの性能は、考慮されるパラメータの数とそれに関連する複雑さと相関している。これらの結果を検証するためにテストベッドを設計および実装した。検証の結果として、シミュレーション結果と実験結果の傾向がほぼ一致していることを明らかにした。</p> <p>本論文の貢献は次のとおりである。1) リソースとトラフィック管理のための統合システム (ISRTM) の提案。2) FRSM、FACM、FHM の 3つのモジュールの実装。3) 異なるファジィベースシステムについてのシミュレーション結果の比較。4) FRSM のテストベッド実装。5) シミュレーション結果と実験結果の比較。</p> <p>論文の構成は次のとおりである。第 1 章では、論文の背景、目的、構成、および貢献について紹介している。第 2 章では無線ネットワークについて説明している。第 3 章で 5G 無線ネットワークについて述べている。第 4 章では、SDN について提示し、SDN</p>

	<p>の構造と 5G 無線ネットワークにおける SDN の利点と欠点について説明している。第 5 章では、接続制御、ハンドオーバーおよび無線アクセス技術について議論している。第 6 章では、遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm)、ニューラルネットワーク (NNs: Neural Networks)、粒子群最適化 (PSO: Particle Swarm Optimization) などの知的アルゴリズムを紹介している。第 7 章では、FL について述べている。第 8 章では、提案システムを提示し、入力パラメータと出力パラメータの詳細を説明している。第 9 章では、異なる入力パラメータに対するシミュレーション結果とテストベッドを使用した実験結果を比較検証している。最後に、第 10 章で結論と今後の展望を述べている。</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 4 編 (第 1 著者 4 編)、国際会議 15 編 (第 1 著者 15 編) となっている。また、EIDWT-2024 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 19 編 1 冊</p> <p>(学術論文) (査読付き学術論文: 第一著者 4 編)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Phudit Ampririt, Ermioni Qafzezi, Kevin Bylykbashi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “FSSLA: A Fuzzy-based scheme for slice service level agreement in 5G wireless networks and its performance evaluation”, Journal of High Speed Networks, IOS Press, Vol. 28, No. 1, pp. 47-64, DOI: https://doi.org/10.3233/JHS-220678, February 2022. IF: 0.9, CiteScore: 1.5. 2) Phudit Ampririt, Ermioni Qafzezi, Kevin Bylykbashi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “IFACS-Q3S: A New Admission Control System for 5G Wireless Networks Based on Fuzzy Logic and Its Performance Evaluation”, International Journal of Distributed Systems and Technologies (IJ DST), IGI Global, Vol. 13, No. 1, pp. 1-25, DOI: http://doi.org/10.4018/ijdst.300339, February 2022. IF: 0.667, CiteScore: 1.2. 3) Phudit Ampririt, Shunya Higashi, Ermioni Qafzezi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “An Intelligent Fuzzy-based System for Handover Decision in 5G-IoT Networks Considering Network Slicing and SDN Technologies”, Internet of Things, Elsevier, Vol. 23, 100870, ISSN 2542-6605, DOI: https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100870, October 2023. IF: 5.9, CiteScore: 14.2. 4) Phudit Ampririt, Shunya Higashi, Ermioni Qafzezi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-based System for Handover in 5G Wireless Networks Considering Different Network Slicing Constraints: A Comparison Study of Two Implemented Models”, Accepted, International Journal of Grid and Utility Computing, Inderscience, September 2023. IF: 0.5, CiteScore: 1.8. <p>(国際会議論文) (査読付き国際会議: 第一著者 15 編)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Phudit Ampririt, Shunya Higashi, Paboth Kraikritayakul, Ermioni Qafzezi, Keita

- Matsuo, and Leonard Barolli, “A Fuzzy-based System for Selection of Radio Access Technology in 5G Wireless Networks Considering RAT Load as a New Parameter”, Accepted, Proc. of CISIS-2024, Taichung, Taiwan, July 2024
- 2) **Phudit Ampririt**, Shunya Higashi, Paboth Kraikritayakul, Ermioni Qafzezi, Keita Matsuo, and Leonard Barolli, “A Comparison Study of a Fuzzy-Based Simulation System and Testbed for Selection of Radio Access Technologies in 5G Wireless Networks”, Proc. of AINA-2024, pp. 153–165, Kitakyushu, Japan, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-57840-3_14, April 2024.
 - 3) **Phudit Ampririt**, Shunya Higashi, Paboth Kraikritayakul, Ermioni Qafzezi, Keita Matsuo, and Leonard Barolli, “Implementation of a Fuzzy-Based Testbed for Selection of Radio Access Technologies in 5G Wireless Networks and Its Performance Evaluation”, Proc. of EIDWT-2024, pp. 318–331, Naples, Italy, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-53555-0_30, February 2024.
 - 4) **Phudit Ampririt**, Shunya Higashi, Ermioni Qafzezi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “Design and Implementation of a Fuzzy-Based System and a Testbed for Selection of Radio Access Technologies in 5G Wireless Networks”, Proc. of 3PGCIC-2023, pp. 48–57, Daegu, South Korea, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46970-1_5, November 2023.
 - 5) **Phudit Ampririt**, Shunya Higashi, Ermioni Qafzezi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-Based System for Selection of Radio Access Technologies in 5G Wireless Networks: Effect of Security Parameter on Quality of Experience Assessment”, Proc. of INCoS-2023, pp. 211–222, Chiang Mai, Thailand, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-40971-4_20, September 2023.
 - 6) **Phudit Ampririt**, Shunya Higashi, Ermioni Qafzezi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-Based System for Selection of Radio Access Technology in 5G Wireless Networks Considering QoE as a New Parameter”, Proc. of IMIS-2023, pp. 149–159, Toronto Metropolitan University, Canada, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35836-4_17, July 2023.
 - 7) **Phudit Ampririt**, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-Based Scheme for Selection of Radio Access Technologies in 5G Wireless Networks: QoE Assessment and Its Performance Evaluation”, Proc. of AINA-2023, pp. 44–53, Juiz de Fora, Brazil, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-29056-5_5, March 2023.
 - 8) **Phudit Ampririt**, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-Based Approach for Selection of Radio Access Technologies in 5G Wireless Networks”, Proc. of EIDWT-2023, pp. 297–307, Semarang, Indonesia, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-26281-4_31, February 2023.
 - 9) **Phudit Ampririt**, Ermioni Qafzezi, Kevin Bylykbashi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-Based System for Handover in 5G Wireless Networks Considering Different Network Slicing Constraints: Effects of Slice Reliability Parameter on Handover Decision”, Proc. of BWCCA-2022, pp. 27–37, Tirana, Albania, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20029-8_3, October 2022.
 - 1 0) **Phudit Ampririt**, Ermioni Qafzezi, Kevin Bylykbashi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-based System for Handover in 5G Wireless Networks Considering Different Network Slicing Constraints: Effects of Slice Load Parameter on Handover Decision”, Proc. of NBIS-2022, pp. 152-162, Sanda, Japan, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-14314-4_15, September 2022.
 - 1 1) **Phudit Ampririt**, Ermioni Qafzezi, Kevin Bylykbashi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-based System for Handover in 5G Wireless Networks Considering Network Slicing Constraints”, Proc. of CISIS-2022, pp. 180-189,

Kitakyishu, Japan, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20029-8_3, June 2022.

- 1 2) **Phudit Ampririt**, Ermioni Qafzezi, Kevin Bylykbashi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-based System for Slice Service Level Agreement in 5G Wireless Networks: Effect of Traffic Load Parameter”, Proc. of EIDWT-2022, pp. 272-282, Okayama, Japan, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-95903-6_29, March 2022.
- 1 3) **Phudit Ampririt**, Ermioni Qafzezi, Kevin Bylykbashi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-based Scheme for Slice Priority Assessment in 5G Wireless Networks”, Proc. of AINA-2022, pp. 651-661, Sydney, Australia, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-99584-3_56, April 2022.
- 1 4) **Phudit Ampririt**, Ermioni Qafzezi, Kevin Bylykbashi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-based Scheme for Admission Control in 5G Wireless Networks: Improvement of Slice QoS Considering Slice Reliability as a New Parameter”, Proc. of 3PGCIC-2021, pp. 185-196, Fukuoka, Japan, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-75078-7_3, October 2021
- 1 5) **Phudit Ampririt**, Ermioni Qafzezi, Kevin Bylykbashi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “A Fuzzy-based System for User Service Level Agreement in 5G Wireless Networks”, Proc. of INCoS-2021, pp. 272-282, Taichung, Taiwan, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-84910-8_10, September 2021.