

学位被授与者氏名	チュカ ミラルダ (CUKA MIRALDA)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第59号
学位授与年月日	2020年3月20日
論文題目	IoT Device Selection in Opportunistic Networks: Implementation and Performance Evaluation of Fuzzy-based Intelligent Systems and a Testbed
論文題目 (英訳または和訳)	オポチュニスティック・ネットワークのための IoT デバイス選出: ファジィ理論に基づいた知的システム及びテストベッドの実装と評価
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 バロリカルト 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 大山 和宏
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>オポチュニスティック・ネットワーク (OppNet) では, IoT デバイス (ノード) のコンタクト (Contact) が間欠であり, リンクは変化する. IoT デバイスはメッセージを受信するとメッセージを保存し, 他の IoT 端末が送信範囲内に来るとメッセージを転送する. IoT ネットワークは, 高いモビリティを備えた接続された物理オブジェクトとデバイスで構成されている. IoT デバイスのモビリティを考慮することにより, OppNet は通信機会として自己組織化ネットワークを提供する. IoT デバイスは, 異種ネットワークを介して大量のデータを生成および交換する. しかし, OppNet は分散インフラストラクチャに依存しないため, 異種性の概念は簡単になる. IoT ネットワークは, 様々なリソース機能を持つ異なるデバイスで構成されている. 複数の IoT デバイスの密度が高い時に, ノードが複数のデバイスのカバレッジエリアに存在する可能性がある. そのため, 特定のタスクが完了するために最適なデバイスを見つけることが非常に重要である. IoT デバイスは, ネットワーク接続性, 安定性, ユーザーカバレッジを向上させるために, 様々なパラメータに基づいた選出が重要である.</p> <p>OppNet では, 送信元と宛先の間エンドツーエンドパスが存在しない分断された場合がある. エネルギー消費, ストレージの制約, 接触機会及びイベントへの接続サービスを支援するためのネットワークデバイスの最適かつ堅牢なトポロジーの発見は OppNet の最も一般的な問題である. このような問題を解決するために多くのパラメータを考慮する必要があり, NP 困難の問題となる. そのため, ヒューリスティックで知的なアルゴリズムが良い解決策となる.</p> <p>本研究では, OppNet での IoT デバイスの選出のために新しいパラメータを提案し, ファジィ理論に基づく様々な知的システムを実装する. 提案システムは異なる環境に適用し, 様々な応用ができる. 多くのシミュレーションを実行し, 実装されたシステムのパフォーマンスが良好であり, パラメータ数が増えると, システムの複雑さが増加することが分かった. シミュレーション結果と実験結果を比較するために, テストベッドを実装して実験を行った. 実験を行った結果, 実装されたテストベッドが適切な IoT デバイスの選出を行うことを示した.</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) OppNet における IoT デバイス選出のために新しいパラメータの提案, 2) OppNet における IoT デバイス選出のために知的システムの提案と実装, 3) 異なるパラメータ及びシナリオにおける提案システムの評価, 4) 実装した知的シミュレーションシステムの評価, 5) テストベッドの実装と実シナリオへの応用, 6) 本研究の成果は, 今後の無線通信のための重要な技術となる OppNet 及び IoT 技術の開発と応用に見識を与える.</p> <p>本論文は9つの章で構成する. 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, 時世代無線ネットワークについて紹介し, ソフトウェア・定義ド・ワイド・エリア・ネットワーク (SDWAN), 5Gセルラー・ネットワーク技術及びクラウドMANETについて詳細する. 第3章では, IoT及びOppNetsのアーキテクチャ, チャレンジ及び応用について説明する. 第4章では, 知的アルゴリズムに</p>

	<p>ついて紹介する。第5章では、ファジィ理論について説明する。第6章では、OppNetsにおけるIoTデバイス選出のための提案したファジィ理論に基づいた知的システムについて述べる。第7章では、提案知的システムの評価について議論する。第8章では、テストベッドの実装と評価について述べる。第9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 Opportunistic Networks (OppNets) the contacts of Internet of Things (IoT) devices (nodes) are intermittent and links are highly variable. Upon receiving a message a device will store in the buffer until another node comes in the transmission range and a forwarding opportunity exists. The IoT network consists of connected physical objects and devices with high mobility. By using the mobility of IoT devices, the OppNets provide a self-organizing network as a communication opportunity. The IoT devices generate and exchange a huge amount of data through heterogeneous networks and OppNets ease the concept of heterogeneity with their independence on decentralized infrastructure. The IoT network consists of different devices with different resource capabilities. When multiple IoT devices are deployed densely, there is a possibility that a node may reside in the coverage area of multiple devices. Thus, when a task requires an IoT device to complete it, it is very important to find the best device for that specific request. The IoT devices should be selected based on different parameters in order to achieve better network connectivity, stability and user coverage.</p> <p>In OppNets an end-to-end path between source and destination may not exist and network partitions occur. Some of the most common issues for OppNets are energy consumption, storage constraint, contact opportunity and finding an optimal and robust topology of the network devices to support connectivity services to events. To deal with these issues many parameters should be considered which make the problem NP-Hard. Thus, the heuristic and intelligent algorithms are good solutions.</p> <p>In this research work, we consider IoT device selection in OppNets and propose new parameters and implement different intelligent systems based on Fuzzy Logic (FL). The proposed systems can be used in different environments and applications. We carried out many simulations and found that the performance of implemented systems is good. We observed that the complexity of the systems increases with the increase of the number of parameters. We also implemented a testbed and performed experiments in order to compare the simulation and experimental results. The experimental results show that the implemented testbed makes a good selection of IoT devices.</p> <p>This thesis contributes in the research field as following: 1) Proposal of new parameters for IoT device selection in OppNets. 2) Proposal and implementation of intelligent systems based on FL for appropriate selection of IoT devices in OppNet. 3) Performance evaluation of implemented systems for different parameters and scenarios. 4) Comparison of implemented intelligent simulated systems. 5) Implementation of a testbed for OppNet and its application in a real scenario. 6) Give insights about future developments and application of OppNets and IoT as important technologies for wireless communications.</p> <p>This thesis is constructed by 9 chapters. In Chapter 1 is presented the background, motivation and thesis structure. Chapter 2 introduces the next generation wireless networks and describes in more details Software-Defined Wide Area Network (SDWAN), 5G cellular network technologies and cloud Mobile Ad-hoc Networks (MANETs). In Chapter 3, we introduce the architecture, challenges and applications of IoT and OppNets. In Chapter 4, we introduce Intelligent Algorithms. In Chapter, 5, we present Fuzzy Logic. In Chapter 6, we introduce our proposed Fuzzy-based intelligent systems for IoT device selection in OppNets. In Chapter 7 are shown the performance evaluation results of proposed simulation systems. In Chapter 8, we present the testbed implementation and evaluation. In Chapter 9, we conclude this thesis and give the future work.</p>
<p>論文審査結果</p>	<p>博士後期課程知能情報システム工学専攻3年の「チュカ ミラルダ」氏が提出した学位論文を審査し、また最終試験を行ったのでその結果について報告する。 (学位論文審査の結果)： オポチュニスティック・ネットワーク (OppNet) では、</p>

IoT デバイス (ノード) のコンタクト (Contact) が間欠であり、リンクは変化する。IoT デバイスはメッセージを受信するとメッセージを保存し、他の IoT 端末が送信範囲内に来るとメッセージを転送する。IoT ネットワークは、高いモビリティを備えた接続された物理オブジェクトとデバイスで構成されている。IoT デバイスのモビリティを考慮することにより、OppNet は自己組織化ネットワークを形成する。IoT デバイスは、異種ネットワークを介して大量のデータを生成および交換する。しかし、OppNet は分散インフラストラクチャに依存しないため、異種性の概念は簡単となる。IoT ネットワークは、様々なリソース機能を持つ異なるデバイスで構成されている。IoT デバイスの密度が高い場合、カバレッジエリアに複数のノードが存在する可能性が高い。OppNet では特定のタスクを完了するための最適なデバイスを見つけることが非常に重要である。IoT デバイスは、ネットワーク接続性、安定性、ユーザーカバレッジを向上させるために、様々なパラメータに基づいた選出が重要である。

OppNet では、送信元と宛先間のエンドツーエンドの経路が存在しない、分断されたネットワークである。エネルギー消費、ストレージの制約、接触機会及びイベントへの接続サービスを支援するためのネットワークデバイスの最適かつ堅牢なトポロジの発見は OppNet の最も一般的な問題である。このような問題を解決するために多くのパラメータを考慮する必要がある、NP 困難の問題となる。そのため、ヒューリスティックで知的なアルゴリズムが良い解決策となる。

本研究では、OppNet での IoT デバイスの選出のために新しいパラメータを提案し、ファジィ理論に基づく様々な知的システムを実装する。提案システムは異なる環境に適用し、様々な応用ができる。多くのシミュレーションを実行し、実装されたシステムの性能は良好で、パラメータ数が増えるとともにシステムの複雑さが増加することが分かった。シミュレーション結果と実験結果を比較するために、テストベッドを実装して実験を行った。実験を行った結果、実装されたテストベッドが適切な IoT デバイスの選出を行うことを示した。

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) OppNet における IoT デバイス選出のために新しいパラメータの提案、2) OppNet における IoT デバイス選出のために知的システムの提案と実装、3) 異なるパラメータ及びシナリオにおける提案システムの評価、4) 実装した知的シミュレーションシステムの評価、5) テストベッドの実装と実シナリオへの応用、6) 本研究の成果は、今後の無線通信のための重要な技術となる OppNet 及び IoT 技術の開発と応用に見識を与える。

本論文は 9 つの章で構成されている。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、次世代無線ネットワークについて紹介し、ソフトウェア・デファインド・ワイド・エリア・ネットワーク (SD-WAN)、5G セルラー・ネットワーク技術及びクラウド MANET と本研究の関連性について説明している。第 3 章では、IoT 及び OppNets のアーキテクチャに関する課題及び応用について説明している。第 4 章では、知的アルゴリズムについて紹介している。第 5 章では、ファジィ理論について説明している。第 6 章では、OppNets における IoT デバイス選出のための提案したファジィ理論を基盤とする知的システムについて述べている。第 7 章では、提案した知的システムの性能について議論している。第 8 章では、実装したテストベッドの評価をしている。第 9 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。

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 13 編 (第 1 著者 13 編) となっている。また、CISIS-2017 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。

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。

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

	<p>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 18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"> 1. Miralda Cuka, Donald Elmazi, Takaaki Inaba, Tetsuya Oda, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, “An Integrated Fuzzy-Based System for Cluster-Head Selection and Sensor Speed Control in Wireless Sensor Networks”, International Journal of Distributed Systems and Technologies (IJ DST), IGI Global Publishers, Vol. 8, No. 2, pp. 1-14, DOI: 10.4018/IJ DST.2017040101, Indexed in: Web of Science Emerging Sources Citation Index (ESCI), SCOPUS, Compendex (Elsevier Engineering Index), INSPEC, April-June 2017. 2. Miralda Cuka, Donald Elmazi, Elis Kulla, Tetsuya Oda, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, “Implementation of Two Fuzzy-based Systems for IoT Device Selection in Opportunistic Networks: Effect of Storage Parameter on IoT Device Selection”, International Journal Communication Networks and Distributed Systems (IJCNDS), Inderscience, Vol. 21, No. 1, pp. 95-114, DOI: 10.1504/IJCNDS.2018.093400, Indexed in: Scopus (Elsevier), Compendex [formerly Ei] (Elsevier), Emerging Sources Citation Index (Clarivate Analytics), Academic OneFile (Gale), ACM Digital Library, June 2018. 3. Miralda Cuka, Donald Elmazi, Kevin Bylykbashi, Evjola Spaho, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, “Effect of Node Centrality for IoT Device Selection in Opportunistic Networks: A Comparison Study”, Concurrency and Computation Practice and Experience, John Wiley & Sons Ltd, Vol. 30, No. 21, 13 Pages: e4790, DOI: 10.1002/cpe.4790, Impact Factor: 1.167, First Published: August 2018. 4. Miralda Cuka, Donald Elmazi, Kevin Bylykbashi, Evjola Spaho, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, “Implementation and Performance Evaluation of Two Fuzzy-based Systems for Selection of IoT Devices in Opportunistic Networks”, Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, Springer, Vol. 10, No. 2, pp. 519-529, DOI: 10.1007/s12652-017-0676-0, Impact Factor: 1.910, February 2019. 5. Miralda Cuka, Donald Elmazi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli, “IoT Node Selection in Opportunistic Networks: Implementation of Fuzzy-based Simulation Systems and Testbed”, Internet of Things: Engineering Cyber Physical Human Systems, Elsevier, Volume 8, DOI: 10.1016/j.iot.2019.100105, Indexed in: Scopus (Elsevier), Compendex [formerly Ei] (Elsevier), December 2019. <p>(国際会議論文) (査読付き国際会議：第一著者13編)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Miralda Cuka, Kouke Ozera, Ryoichiro Obukata, Donald Elmazi, Tetsuya Oda, Leonard Barolli, “Implementation of a GA-based Simulation System for Placement of IoT Devices: Evaluation for a WSN Scenario”, Proc. of the 5-th International Conference on Emerging Internetworking, Data & Web Technologies (EIDWT-2017), Wuhan, China, pp. 34-42, June 2017. 2. Miralda Cuka, Donald Elmazi, Tetsuya Oda, Elis Kulla, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, "A Delay-aware Fuzzy-based System for Selection of IoT Devices in Opportunistic Networks", Proc. of the 11-th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS-2017), Torino, Italy, pp. 3-13, July 2017. 3. Miralda Cuka, Donald Elmazi, Tetsuya Oda, Elis Kulla, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, "A Fuzzy-Based System for Selection of IoT Devices in Opportunistic Networks Considering IoT Device Speed, Storage and Remaining Energy Parameters", Proc. of Proc. of the 9-th International Conference on Intelligent

Networking and Collaborative Systems (INCoS-2017), Toronto, Canada, pp. 16-27, August 2017.

4. **Miralda Cuka**, Donald Elmazi, Tetsuya Oda, Elis Kulla, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, "Effect of Storage Size on IoT Device Selection in Opportunistic Networks: A Comparison Study of Two Fuzzy-Based Systems", Proc. of the 12-th International Conference on Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA-2017), Barcelona, Spain, pp. 100-113, November 2017.
5. **Miralda Cuka**, Donald Elmazi, Kevin Bylykbashi, Evjola Spaho, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, "A Fuzzy-Based System for Selection of IoT Devices in Opportunistic Networks Considering IoT Device Storage, Waiting Time and Security Parameters", Proc. of the 6-th International Conference on Emerging Internetworking, Data & Web Technologies (EIDWT-2018), Tirana, Albania, pp. 94-105, March 2018.
6. **Miralda Cuka**, Donald Elmazi, Kevin Bylykbashi, Evjola Spaho, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, "A Fuzzy-based System for Selection of IoT Devices in Opportunistic Networks Considering IoT Device Storage, Waiting Time and Node Centrality Parameters", Proc. of the 32-nd IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (IEEE AINA-2018), Krakow, Poland, pp. 710-716, May 2018.
7. **Miralda Cuka**, Donald Elmazi, Keita Matsuo, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, "A Fuzzy-Based System for Selection of IoT Devices in Opportunistic Networks Considering IoT Device Contact Duration, Storage and Remaining Energy" Proc. of the 12-th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS-2018), Matsue, Japan, pp. 74-85, July 2018.
8. **Miralda Cuka**, Donald Elmazi, Keita Matsuo, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, "A Delay-Aware Fuzzy-based System for Selection of IoT Devices in Opportunistic Networks", Proc. of the 21-st International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS-2018), Bratislava, Slovakia, pp. 16-29, September 2018.
9. **Miralda Cuka**, Donald Elmazi, Kevin Bylykbashi, Keita Matsuo, Makoto Ikeda, Leonard Barolli "A Fuzzy-Based System for Selection of IoT Devices in Opportunistic Networks Considering Number of Past Encounters", Proc. of the 13-th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC-2018), Taichung, Taiwan, pp. 223-237, October 2018.
10. **Miralda Cuka**, Donald Elmazi, Keita Matsuo, Makoto Ikeda, Leonard Barolli and Makoto Takizawa, "IoT Device Selection in Opportunistic Networks: A Fuzzy Approach Considering IoT Device Failure Rate", Proc. of the 7-th International Conference on Emerging Internetworking, Data & Web Technologies (EIDWT-2019), Fujairah, UAE, pp. 39-52, February 2019.
11. **Miralda Cuka**, Donald Elmazi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo, Leonard Barolli and Makoto Takizawa, "Selection of IoT Devices in Opportunistic Networks: A Fuzzy-Based Approach Considering IoT Device's Selfish Behaviour", Proc. of the 33-rd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2019), Matsue, Japan, pp. 251-264, March 2019.
12. **Miralda Cuka**, Donald Elmazi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo and Leonard Barolli, "IoT Node Selection and Placement: A New Approach Based on Fuzzy Logic and Genetic Algorithm", Proc. of the 13-th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS-2019), Sydney, Australia, pp. 22-35, July 2019.
13. **Miralda Cuka**, Donald Elmazi, Makoto Ikeda, Keita Matsuo and Leonard Barolli, "A Fuzzy-based Simulation System for IoT Node Selection in Opportunistic Networks and Testbed Implementation", Proc. of the 14-th International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and

