

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11765

研究課題名（和文）Heterogenous IoT/M2M通信における統合通信制御

研究課題名（英文）Integrated Communication Control for Heterogeneous IoT/M2M Networks

研究代表者

山本 嶺（Yamamoto, Ryo）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：90581538

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、急速な発展を遂げているIoT/M2Mネットワークを対象としている。その中で、同一空間かつ同一時間に多様な通信規格が混在するHeterogenous環境において、通信資源を有効に活用するための検討を実施した。一般に、IoT/M2Mネットワークでは、通信規格ごとに独立したネットワークを構築するが、本研究課題では各規格が提供するネットワーク資源を統合的に管理、運用する方式について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、IoT/M2Mネットワークを提供する多様な通信規格が提供可能な通信資源を有効に活用するため、統合的な管理運用を実現する基盤技術について検討を行った。検討した主な課題として、ネットワーク内での柔軟な通信経路制御を実現可能なOpportunistic Routingを核としたルーティング手法や特定箇所へ集中する負荷を効果的に分散する手法、資源の統合管理を可能とするネットワーク仮想化および資源割当がある。課題から得られた成果は、本研究課題が対象とする領域のみならず、制御法の軽微な修正などによってより広範囲の分野に応用することができ、ますます重要度の高まる通信全体の発展に寄与する。

研究成果の概要（英文）：This research study targets the rapidly evolving IoT/M2M networks. In this study, we investigated the effective use of communication resources in a Heterogenous environment where various communication standards coexist in the same space and at the same time. In general, IoT/M2M networks are built independently for each communication standard, but in this research project, we studied a method to manage and operate network resources provided by each standard in an integrated manner.

研究分野：通信

キーワード：IoT M2M Heterogeneous ネットワーク仮想化 Opportunistic Routing

## 1. 研究開始当初の背景

近年、情報処理・通信技術やユーザ端末などの急速な発展、普及により、我々の至るところにネットワークが介在し、様々な付加価値をもったサービスが提供される環境が広まってきている。このような背景の下、環境情報や計測情報などの様々な情報を自律分散的にセンシングし、端末からの情報を特定の箇所へ集約するセンサネットワークや、管理者やユーザなどが通信の間に介在することなく、通信機能を備えた機械が相互に通信を行う M2M (Machine to Machine) ネットワーク技術に関する検討が活発に行われてきている。これらは、一般的にモノのインターネット、所謂 IoT (Internet of Things) と呼ばれ、特定の閉じた環境における通信に加えて、インターネットを介した様々な用途が検討されている。そのため、IoT が普及するにつれ、身の回りに存在する様々な機器が有機的にネットワークを構築し、ユビキタス社会と呼ばれるネットワークが遍在する環境を構築するために必要不可欠な要素となってくるのが想定される。

一方、現在検討が行われている様々な IoT ネットワーク構築に利用されている通信規格としては、その用途や設置場所等の条件によって多種多様なものが用いられている。例として、高速通信が必要な箇所には無線 LAN、省電力が優先される箇所には Bluetooth LE や ZigBee、より広範囲の通信には LPWA に属する LoRa などの規格が用いられている。そのため、これらのネットワークを想定した場合、規格ごとに独立したネットワーク構築が行われており、時間的および空間的に効率的なネットワーク構築が必ずしも行われているとは言えない。つまり、時間的および空間的にまだ収容可能なトラヒックがあるにもかかわらず、通信規格の制限により、それらを活用できていない場面が存在する。そのため、IoT ネットワークの普及が進むにしたがって、独立したネットワークのみでは収容できないトラヒックが増加することが想定され、輻輳の一因となることや非効率な運用に陥る可能性がある。

## 2. 研究の目的

前述のように、本研究課題では、多様な通信規格が同一空間、同一時間に混在する IoT/M2M 環境において、規格ごとに独立した通信ネットワーク内のみならず、相互接続可能なネットワーク間において効率的かつシームレスに通信を実現するための基盤として、ヘテロジニアスな通信環境構築を行う。これによって、既存のネットワークに存在する非効率なネットワーク資源利用の改善を行うとともに、各ネットワークを効果的に接続することにより、ネットワークを介した情報処理基盤の有用性を向上させるための検討とする。

現在までに提案されている同様の検討課題としては、既に広く用いられている IoT ゲートウェイ (IoT GW) に加え、SSGW (Solution Specific Gateway) と呼ばれる複数の通信規格を集約可能であるが、一部の相互変換に制約を付加した安価なゲートウェイを利用し、規格ごとに独立したネットワークを接続する方式が提案されている。しかし、SSGW を利用した方式では、空間的なネットワーク統合にその適用範囲が限られているため、ネットワーク内の残存利用可能資源量や負荷集中については十分に検討が行われていない。また、規格ごとの異なる通信特性についても十分考慮されておらず、単なる相互接続点としての役割を果たすのみに留まっている。

そこで、本研究課題において、SSGW を利用した相互接続について検討することに加え、ネットワークに参加する各端末がもつ通信特性を考慮した柔軟な経路制御を実現する手法や、時間的に効率的な運用を行うための通信資源配分についても併せて検討をおこなう。また、本研究課題が主に適用対象としているのは、非セルラ系の比較的小規模なネットワークであるが、このような環境では多様な通信規格が混在していることが多く、その効率的な運用は必要不可欠である。

## 3. 研究の方法

本研究課題では、前述した各目的を達成するため、主に次の課題について検討を行う。

- (1) IoT GW や SSGW 周辺端末の負荷増加に伴う信頼性、通信性能低下
- (2) 非対称リンクの存在を考慮した経路選択、
- (3) Opportunistic Routing を利用した通信における通信メディアの変調方式固定化による通信速度低下

まず、(1)については、本研究課題で主に検討を行うルーチング手法である Opportunistic Routing に付随する問題として、発生する負荷集中についての対応を行う。一般に、どのようなルーチング手法を採ったとしても IoT GW や SSGW 付近はネットワーク内の各端末からの通信が集中することとなり、絶対的な通信量の削減や分散が困難である。そこで、本研究課題では、時間的に集中する負荷を分散することによって、輻輳などの負荷集中に起因する問題について対処する。このための方法として、送信速度の調整や空間的負荷分散と時間的負荷分散の適応的な組合せを行い、問題の解決を行う。

(2)については、通信規格の異なる端末が同一空間に存在し、相互通信を行う際に避けることが困難な経路、リンクの非対称性についての検討を行う。一般に無線通信を行う IoT/M2M ネットワークでは、利用される規格によって通信可能距離や通信速度が大きく異なる。このような場

合、一方の端末からの通信は届くが他方からの通信が届かないことや届いたとしても符号化の冗長性を高めたことによる実効通信速度低下などによって非対称な通信形態となることが考えられる。そのため、この非対称性をどのように扱うかが本研究課題の目的を達成するうえで重要な論点となる。非対称性に対する検討としては、主に非対称経路やリンクを検出し、その箇所を通信経路として用いないようにフラグ処理などを行うことが考えられるが、これはネットワーク資源の利用効率の点からすると効率を低下させる要因となり、必ずしも適切な方策ではない。そこで、本研究課題では、このようなリンクに対しても片方向の通信トラフィックを送出し、逆方向について対称性をある程度担保可能な別経路にて実現することや、同等の送信速度での通信が不要な場合にはトラフィック需要に応じて適切な経路を別途割り当てることで、有効な通信資源利用が可能な方式について検討を行う。

(3)については、**Opportunistic Routing** を利用した際に回避が困難な問題の一つである、ブロードキャスト利用時の変調方式固定化による速度低下に関する検討を行う。一般に、ブロードキャストを利用する場合には、広範囲の端末へ同時送信を行うため、耐エラー性の高い変調方式が選択され、実効通信速度が十分に上がらない問題が存在する。そこで、本研究課題においては、余剰帯域があるにもかかわらず利用できない帯域がある環境において通信効率を実現するため、ネットワーク管理方法について改善を行う。具体的な方策としては、複数の通信規格が混在したネットワークを基盤ネットワークとして考え、その上にオーバレイネットワークとして複数の仮想ネットワークを配置することを考える。これにより、仮想ネットワークは基盤ネットワークが有する資源の一部を優先的に利用することが可能となり、複数の仮想ネットワークが同時に同様の制御を行うことで、基盤ネットワークの資源をスライスしながら共有することを実現する。つまり、余剰通信資源がある場合には、その資源を別の仮想ネットワークに割り当て、可能な限り無駄な資源を残さないように運用する。本研究課題では、この考えに対し、無線ネットワークを基盤ネットワークとした無線資源割当問題について主に検討を行う琴とする。

#### 4. 研究成果

本研究課題によって得られた成果は主に、IoTGW と SSGW が混在したネットワークにおいて効率的な通信を実現するための負荷分散方式、柔軟なネットワーク運用を可能にする基盤技術である **Opportunistic Routing**、ヘテロジニアス環境を考慮した収容トラフィック最大化、仮想ネットワークの導入によるネットワーク資源の有効利用手法である。以下では、それぞれの詳細について述べる。

##### (1) 効率的な通信を実現するための負荷分散方式

前述のように、IoT/M2M ネットワークに **Opportunistic Routing** を適用する場合や情報収集を行う場合、特定の箇所に負荷が集中することを避けることは困難である。この問題に対し、負荷の集中を効果的に検知し、時空間的に負荷分散を実現する手法の提案を行った。提案手法では、負荷集中を効果的に検出するため、蟻の採餌行動を模したエージェントを利用する蟻コロニー最適化 (ACO : Ant Colony Optimization) を用い、まず各端末における通信負荷を残留フェロモン量の大小によって評価する。ここでは、残留フェロモン量が多い端末ほど多くの通信を担っており、負荷が集中しているものとし、その端末が担う通信の一部を近傍端末に空間的に分散することで、特定箇所における時間的負荷も同時に実現する方式を提案した。この制御によって、図1に示すように、特定の経路付近に集中していた負荷を近傍に分散することに加え、時間的にも集中していた負荷を分散することを可能にし、輻輳発生など負荷集中に起因する問題を低減することが可能となった。

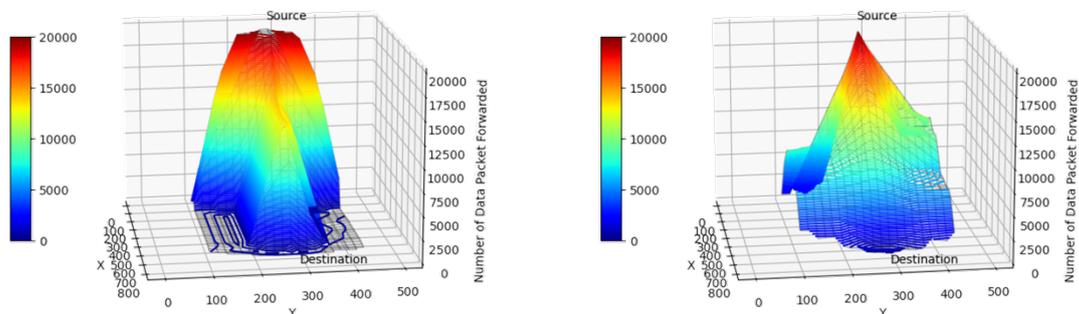


図1 負荷状況 (手法適用なし, 手法適用あり)

##### (2) 柔軟なネットワーク運用を可能にする基盤技術である **Opportunistic Routing**

**Opportunistic Routing** における検討は、以前より検討を行っていた適応的な通信を実現するため実施をした。ここでは、主に効果的なルーティングメトリックの収集方法やそれを利用した転送判断に関する検討を行い、ネットワーク内で自律的な階層を構築することで、経路探索なしに転送を実現する手法の提案を行った。提案手法では、ネットワーク内に階層を設定するため、各端

末のノード次数を用い、次数の高い端末がより高い階層となるように設計を行った。これにより、階層の高い端末同士が通信を行うことでより広範囲の端末に高い到達性でデータを配送することが可能となる。図2にフラットなネットワークにおいて、提案手法を適用し、ネットワークを階層化した結果を示す。この例では、Tier2に位置する端末を介して通信を行うことで、物理的距離の離れた端末とも比較的容易に適応的な経路選択に基づく通信を行うことができ、柔軟な運用をネットワーク制御を行う基盤技術として用いることを可能にした。

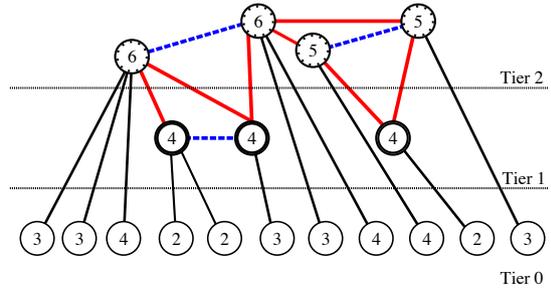


図2 手法適用による階層化

### (3) ヘテロジニアス環境を考慮した収容トラフィック最大化

ヘテロジニアス環境を考慮した検討では、ネットワーク内に収容可能なトラフィックを最大化するため、各端末の送信速度を基準に転送制御を行う **Opportunistic Routing** を適用することで、余剰帯域がある端末の通信資源を効率的に利用する手法について検討を行った。図3では、ネットワーク内に各通信規格が同割合で混在している場合と、通信速度が速い端末が多く混在している場合の二通りで評価を行った結果を示している。ここでは、“rate”の記載のある結果が提案手法を適した場合を示しており、結果から、全体的に収容トラフィックの総量が増加していることが分かる。これにより、ネットワーク内の各端末の属性、特にこの場合はでは送信速度を考慮したことで通信資源の利用効率を向上できるという結果を得ることができた。また、図4に示すように、実際に構築された経路について観察したところ、通信速度の高い通信規格3が経路中央付近に組み込まれた経路が優先的に構築されていることから、経路途中でボトルネックとなるような構築を回避し、不要に送信速度が低下することを回避可能であることも示している。

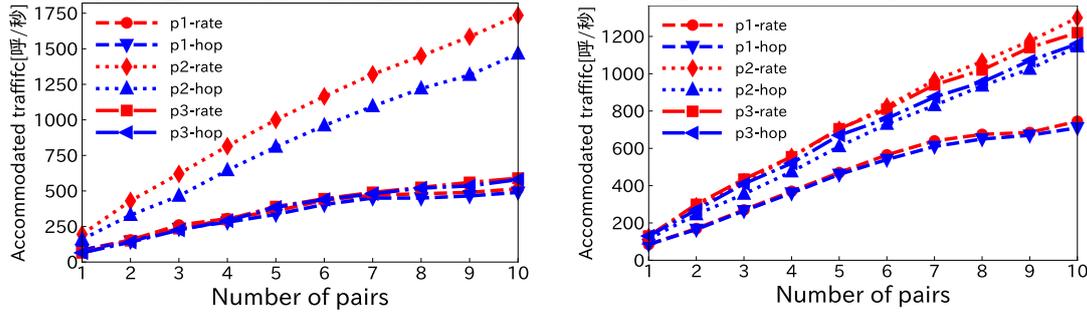


図3 収容トラフィック量 (各規格が同割合, 速度が速い規格が多い)

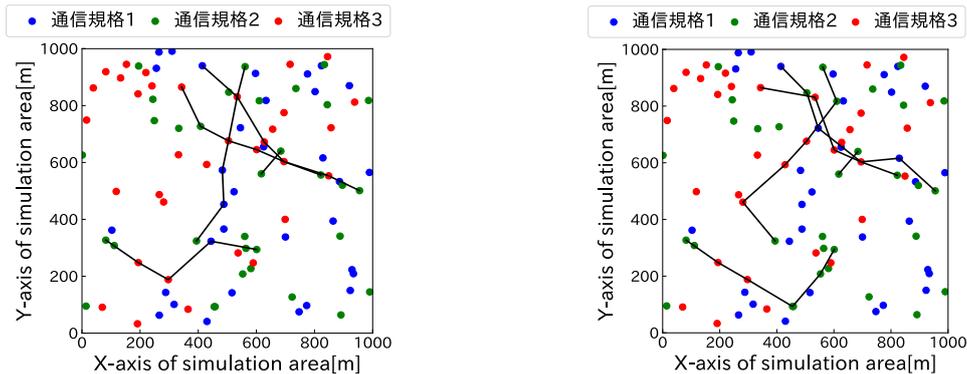


図4 構築経路例 (手法未適用, 手法適用)

### (4) 仮想ネットワークの導入によるネットワーク資源の有効利用手法

仮想ネットワーク導入によるネットワーク資源の有効利用手法に関する検討では、様々な通信規格を利用する端末が同一空間かつ同一時間に存在した場合を想定し、それらの端末が提供する端末資源、通信資源を基盤ネットワーク資源として管理し、アプリケーション側から必要となる通信に応じて仮想ネットワークをオーバーレイネットワークとして一つの基盤ネットワーク上に複数構築し、存在するネットワーク資源を有効に活用する手法について提案を行った。図5にここでの検討における想定として、構築される仮想ネットワークと基盤ネットワークを示す。本検討では、三種類のサービスタイプを想定し、それぞれの仮想ネットワークが要求する仮想ネットワーク資源 (VNR : Virtual Network Resource) を適切に基盤ネットワークに割り当てる仮想ネットワーク埋込 (VNE : Virtual Network Embedding) として解くことを考える。VNEについて

は、既に数多くの検討が実施されているが、基盤ネットワークが安定稼働している優先ネットワークでの検討が主であり、無線ネットワークでの適用例はあまりない。これは、無線ネットワークの通信品質や利用可能資源量が変動しやすいことや外乱要因に影響を受けやすいことが一因である。そこで、提案手法では、図6に示すような手順にて、通信品質を確実に確保することが必要なQoS (Quality of Service) 保証型サービスと、余剰資源を可能な限り利用するベストエフォート型サービスに分類し、それらを同時に実現するハイブリッドアプローチを採用した。これにより、保証型サービスでは確実に基盤ネットワークの資源を利用できることに対し、ベストエフォート型は利用可能資源の保証はないものの、可能な限り多くの資源を利用可能である資源割当を実現することができた。また、図7に示す性能評価の結果から、提案手法であるVNE-HAGBEが最も高い資源割当率を達成できていることから、基盤ネットワークが提供する通信、計算資源を活用できていることが分かる。

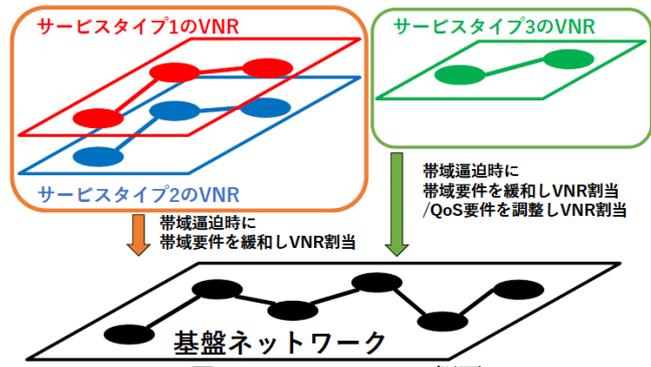


図5 ネットワーク埋込

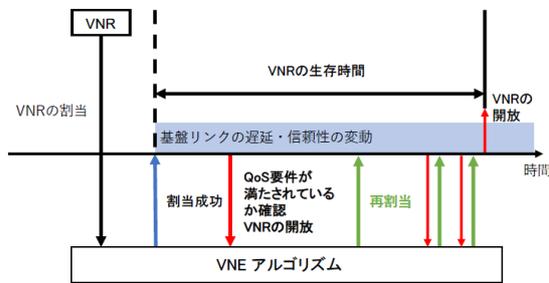


図6 アルゴリズム

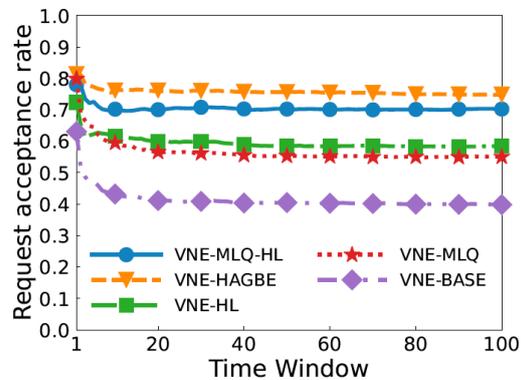


図7 性能評価

以上の成果から、本研究課題が目的としていた多数の通信規格が混在するヘテロジニアス環境において、効率的な通信を実現するための基盤技術構築を実現することができたと考えられる。しかし、本研究課題における検討は、対象ネットワークの一部の側面をとらえ、それに対応する方式の検討を行ったとも考えられる。つまり、本研究課題が対象としていたIoT/M2Mネットワークは、現時点では考えられていない様々な応用方法が考えられることや、利用されるアプリケーションもユーザの需要や他の通信需要によって時々刻々と変化することが想定される。そのため、本研究課題で应用的に実施した検討の一部ではその成果を十分に発揮することが難しい場面も想定される。しかし、本研究課題で検討をおこなってきた課題については、各課題が達成した目標に加え、その目標達成に必要なとなった各種技術も意味を成すものと考えており、適用できない場面が出現したとしても別の場面においてその考え方等を応用していくことが可能であると想定される。

今後の考え得る研究発展の方向としては、最終段階で検討を行っていた仮想ネットワーク埋込に関する技術検討が重要であると考えている。これは、多数の通信端末が存在する環境においては、全ての端末の状態、通信装置の状態を一元的に把握し、制御することが困難であることが一つの要因である。つまり、計算、通信資源がある状態であっても、それらをどのように利用していけばよいかを統合的に制御することはネットワーク規模の拡大に従って困難となる。そこで、物理的な端末を単純に資源として利用し、細かなネットワーク制御については仮想ネットワーク上で実現することで、ネットワーク制御部分を仮想ネットワークに参加する端末に委任することができるため、分散的なネットワーク運用によるスケーラビリティの向上なども実現することができる。

その他に必要な検討としては、一般的にIoT/M2Mネットワークは計算、通信資源が通常のコンピュータなどと比較して乏しいため、セキュリティに対するリスクが高いと想定される。実際に、IoTネットワークに対して攻撃を行うウイルスやボットなどが既に数多く出現していることから、これらのネットワークに対する攻撃需要が高いことが伺われる。そのため、安定的な通信を実現するためにも、異常の早期発見や攻撃からの早期回復など、システムとしての稼働率を高める方策についても十分な検討を行う必要がある。特に、一般ユーザが利用することの多いIoT機器などにおいては、情報リテラシーに依存しない攻撃対策が必要不可欠となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yamamoto Ryo, Yamazaki Taku, Ohzahata Satoshi	4. 巻 23
2. 論文標題 VORTEX: Network-Driven Opportunistic Routing for Ad Hoc Networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2893 ~ 2893
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s23062893	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 NGO Minh, OHZAHATA Satoshi, YAMAMOTO Ryo, KATO Toshihiko	4. 巻 E106.D
2. 論文標題 A Visual-Identification Based Forwarding Strategy for Vehicular Named Data Networking	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 204 ~ 217
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2022EDP7084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hosonuma Eri, Yamazaki Taku, Miyoshi Takumi, Yamamoto Ryo, Silverston Thomas	4. 巻 10
2. 論文標題 On treating asymmetric links in backoff-based opportunistic routing: problem and solution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 538 ~ 543
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021ETL0040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 大谷孟宏, 山本 嶺, 大坐島 智
2. 発表標題 IoTデバイスに適用可能な能動的侵入検知手法
3. 学会等名 電子情報通信学会通信ソサイエティコミュニケーションクオリティ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾優大, 山本 嶺, 大坐島 智, 山崎 託, 三好 匠
2. 発表標題 Opportunistic Routingにおける蟻コロニー最適化に基づく負荷分散手法
3. 学会等名 電子情報通信学会通信ソサイエティコミュニケーションクオリティ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高谷空飛, 山本 嶺, 大坐島 智, 細川元気, 国立忠秀
2. 発表標題 マルチチャネル車内無線通信における通信資源配分手法
3. 学会等名 電子情報通信学会通信ソサイエティコミュニケーションクオリティ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Eri Hosonuma, Taku Yamazaki, Takumi Miyoshi, Ryo Yamamoto, and Thomas Silverston
2. 発表標題 Handling Asymmetric Links in Backoff-based Opportunistic Routing
3. 学会等名 2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshihiko Kato, Shiho Haruyama, Ryo Yamamoto, and Satoshi Ohzahata
2. 発表標題 mpCUBIC: A CUBIC-like Congestion Control Algorithm for Multipath TCP
3. 学会等名 World Conference on Information Systems and Technologies (WorldCIST 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本 嶺
2. 発表標題 無線マルチホップネットワークにおける通信技術とその応用
3. 学会等名 電子情報通信学会CQ研専設立30周年に向けた特別企画ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤聡彦, アドヒカリ ディワカール, 山本 嶺, 大坐畠 智
2. 発表標題 不十分な送信ソケットバッファ下におけるマルチパスTCPの性能低下の改善
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Raihaanjan Kushiya, Ryo Yamamoto, and Satoshi Ohzahata
2. 発表標題 VNE-HAGBE: A Hybrid Approach to Improve VNR Request Acceptance Rate for Wireless Virtual Network Embedding
3. 学会等名 The 23rd Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takamichi Yamamoto, Ryo Yamamoto, Satoshi Ohzahata, and Toshihiko Kato
2. 発表標題 Delay-Based Task Offloading for Fog Computing in IoT Networks
3. 学会等名 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 智哉, 山本 嶺, 大坐島 智
2. 発表標題 無線センサネットワークにおける負荷適応形手法切替による時空間的負荷分散
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安武 智哉, 山本 嶺, 大坐島 智
2. 発表標題 Heterogeneous NetworkにおけるOpportunistic Routingによる収容トラヒック最大化に関する実験的検証
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木 健, 山本 嶺, 大坐島 智
2. 発表標題 エンドポイント間経路の近傍迂回経路を利用した中心性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本 高路, 山本 嶺, 大坐島 智
2. 発表標題 Fog Computingにおけるタブー探索を用いた高信頼なフォグノード配置最適化
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	大坐畠 智  (Ohzahata Satoshi)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授  (12612)	
研究協力者	三好 匠  (Miyoshi Takumi)	芝浦工業大学・電子情報システム学科・教授  (32619)	
研究協力者	山崎 託  (Yamazaki Taku)	芝浦工業大学・電子情報システム学科・准教授  (32619)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------