

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2017～2019  
課題番号：17H01734  
研究課題名（和文）フラクタル特性を有する仮想ネットワーク構成に基づくIoT情報流通基盤構築手法  
  
研究課題名（英文）Design and Control of IoT networks based on Fractal Virtual Topologies  
  
研究代表者  
荒川 伸一（Arakawa, Shin'ichi）  
  
大阪大学・情報科学研究科・准教授  
  
研究者番号：20324741  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では脳機能ネットワークにおいて観察されるトポロジーのフラクタル性に着目し、高い通信効率および高い頑健性を備えたフラクタル特性を有する仮想IoT-NW構成手法を示した。評価の結果、フラクタル仮想ネットワークは従来と比べて通信効率が30%以上改善されることを確認した。さらに、複数のIoTシステムが連携するNetwork of Networks (NoN)環境において、脳機能ネットワークの情報処理の振る舞いに基づく相互接続モデルを考案し、脳機能ネットワークに基づく相補的な依存性を応用した設計が仮想IoT-NW間の干渉を防ぎつつ、優れた可用性と通信効率を実現することを明らかにした。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

IoTは、あらゆる「モノ」の状態をセンサー等によって計測し、ネットワーク接続を介した情報交換や集約によって新たなサービス創発を促進するネットワークシステムである。しかし、IoT環境では莫大な数の機器がネットワークを構成するため、それら全ての接続関係を把握しネットワークを構成する従来のネットワーク構成手法の適用は困難である。本研究では、ネットワーク形状にフラクタル性の性質を持たせる仮想ネットワーク構成手法を考案・検証し、通信効率、頑健性等に優れたネットワーク構成管理が実現可能であることを示した。この手法を適用することで、社会システムとしての高信頼かつスケーラブルなIoT基盤が構築可能となる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a virtual IoT-NW configuration method with high communication efficiency and high robustness by incorporating the fractal nature of the topology observed in brain functional networks. Furthermore, for a Network of Networks (NoN) environment in which multiple IoT systems work together, we investigate methods to select interconnecting nodes and their interconnection. Our methods incorporate two basic topological properties: inter-modular connectivity and assortativity. Our results reveal that, with respect to inter-modular assortativity, topologies with high assortativity show high performance with regard to both robustness and communication efficiency.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：情報ネットワーク 仮想ネットワーク IoT フラクタル ネットワークトポロジー

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

インターネットの社会普及を背景に、ネットワークを基盤とする新しいサービスが急速に普及しつつある。特に、Internet of Things (以下、IoT) は、あらゆる「モノ」の状態をセンサー等によって計測し、ネットワーク接続を介した情報交換や集約によって新たなサービス創発を促進しようとするものである。現状においては、それぞれのサービス固有の通信形態（運用条件、利用形態など）に基づいて個別にサービス実現が行われる、いわゆる垂直統合型 IoT の開発が進められている。一方で、IoT サービス間の情報の相互利用を目的とした水平統合型の IoT 基盤の構想もあるが、直ちに垂直統合型 IoT 基盤が活用される状況にはない。

仮想化技術に関しては、国内外においてその研究開発が行われ、商用化も進められているが、その管理・運用方法についてはまだ十分に解決されていない。現状では、従来のネットワーク設計手法をそのまま用いて、仮想ネットワーク（仮想 NW）構成の要求帯域および資源に対して、物理ネットワーク（物理 NW）基盤全体のトポロジー構成、トラフィック量の状態を既知とし、全体性能を最適化する最適化問題として仮想 NW 構成手法（VNE (Virtual Network Embedding) 問題）が考えられている。しかし現実には、IoT を構成するセンサー機器が極めて多いため、現時点でのネットワーク状態を把握すること自体が困難であること、および、設計変数が膨大になるため最適化問題として扱うことは実質不可能である。

### 2. 研究の目的

仮想 IoT-NW 構成要求をモジュール分割しながら、物理資源を割り当て、それによって、最適化問題を分割し、計算複雑度を実用的な範囲に抑えながら所望の要求に応えることを可能とする仮想 IoT-NW 構成手法の確立を目的とする。仮想化技術は物理資源（通信資源としてのルータ、リンク、および、計算資源としてサーバ群）を論理的に分割することによって、利用者やシステムに対して個別に必要な資源を割り当て、利用目的が異なる場合であってもそれぞれの通信要求を満たすことが可能となる。IoT を対象とした仮想ネットワーク（以下、仮想 IoT-NW と略記）技術の確立することによって個別の仮想 IoT-NW の要求を満たしつつ、仮想 IoT-NW 間の相互接続によって仮想 IoT-NW 間の情報流通の活性化を促す。

### 3. 研究の方法

本研究では、上記の研究目的に対して、脳機能ネットワークのフラクタル特性に基づいた仮想ネットワーク構成手法を創出する。まず、仮想ネットワーク要求に対して、物理ネットワークの資源制約を考慮しながら、フラクタル特性を維持したモジュール分割手法を考案し、それに基づいた仮想ネットワーク構成手法に取り組む（研究課題 1: フラクタル特性を有する仮想 IoT-NW 構成手法）。次に、その仮想ネットワーク構成技術に基づき、仮想ネットワーク同士の相互接続関係に着目した、IoT 情報流通基盤の構成手法を確立する（研究課題 2: IoT のための仮想ネットワーク構成手法）。

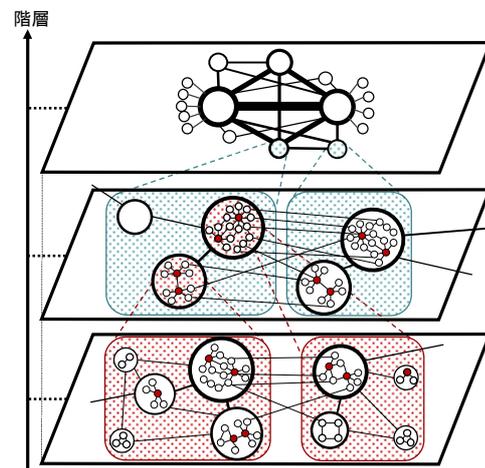
### 4. 研究成果

#### 研究課題 1: フラクタル特性を有する仮想 IoT-NW 構成手法

本課題では、脳機能ネットワークにおいて観察されるトポロジーのフラクタル性に着目し、高い通信効率および高い頑健性を備えたフラクタル特性を有する仮想 IoT-NW 構成手法を示した。評価の結果、フラクタル仮想ネットワークは従来と比べて通信効率が 30%以上改善されることを確認した。

脳機能ネットワークが有するフラクタル性の要因となる接続構造およびその構造によってもたらされる利点の明確化に取り組んでいる。まず、脳機能計測を行い 11420 ノード、44049 リンクのトポロジーを用いて、さらにネットワークトポロジーの全ノードをホップ長  $l_b$  未満で到達可能な集合に分割する際に必要となる最小の集合数  $N_B(l_b)$  について、フラクタル性を有することを確認した。次に、従来のグラフ分析手法を用いてトポロジーの次数相関、モジュールサイズとモジュール間リンク数の相関、モジュール間を接続するノードの次数とリンク数の相関を分析した。その結果、機能モジュールレベルにおいて、大域的にハブノードを介した効率の良い通信が可能になり、さらにはフラクタル性により、そのような高効率通信を局所的にも行うことが、脳機能ネットワークの通信効率性と頑強性を高めていることを突き止めている。

この結果にもとづき、効率性、頑健性、そして将来の規模増大に対応可能な仮想ネットワーク構成手法の一つとして、フラクタル性を有する仮想ネットワーク構成手法を考案した。階層モジ



フラクタル性を有するトポロジーの構造的特徴

ユール構造を有するトポロジーを生成可能な BHMN (Basic Hierarchical Modular Network) モデル利用している。BHMN モデルはある階層( $h-1$ )におけるトポロジーを 1 つのモジュールと見なし、階層 $h$ では階層( $h-1$ )のモジュール 2 つを接続することによってトポロジーを構築していく。本研究では、階層 $h$ で接続するモジュール数のパラメータ $m$ を導入している。 $m$ が小さい場合は階層数が高く、後述のモジュール間接続指針を導入することでフラクタル性が高め、また、 $m$ が大きい時には階層数が低くフラクタル性が低いトポロジーを得る。モジュール間接続指針については、脳機能ネットワークの分析結果に基づき、次数相関、特にハブノード間の接続関係に着目した 2 つの手法を検証した。1 つは、接続対象の 2 つのモジュールから 1 つずつ独立にノード  $i$  を選択し、ノード  $i$  に物理的に隣接するノード集合  $d_i$  に対して、 $(d_i)^\alpha / \sum_j (d_j)^\alpha$  の確率でノード間を接続する。パラメータ $\alpha$  に対して得られるトポロジーを  $C[\alpha]$  と表記する。もう 1 つは、連結するモジュールのハブノードの次数相関を最小化する手法であり、得られるトポロジーを  $MINSNG$  と表記する。フラクタル性の分析結果の一部を図に示す。図は  $m$  を 4 としている。 $C[1.0]$ 、 $C[2.0]$ 、 $C[3.0]$  は、 $l_b$  に対して  $N_B(l_b)$  が指数的に減少していることから Non-Fractal なトポロジーであるが、 $MINSNG$  と  $C[0.0]$  はフラクタル性が確認された。 $m$  が 2 もしくは 8 でも同様の傾向が見られた。なお  $m$  が 64 の場合は階層性が失われることから全てのトポロジーでフラクタル性が無いことも確認できた。

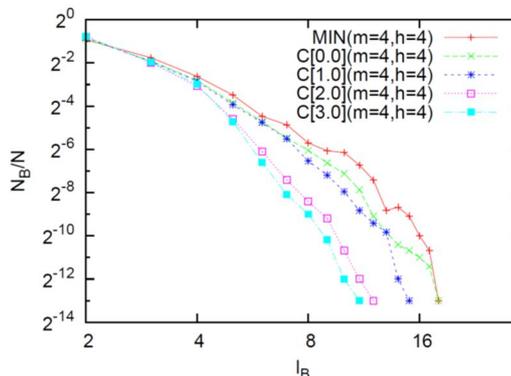
次に、上記の手法で生成されるフラクタルトポロジーとノンフラクタルトポロジーの性能評価を行い、フラクタルトポロジーが有する性能を明らかにする。評価指標としては、平常時(故障未発生時)の平均ホップ長・直径およびトラヒックの集中度合いの評価としてのノード媒介中心性、頑強性の評価として故障発生時のモジュール間の到達可能率を用いた。

平均ホップ長と直径の評価結果から、 $m$  の値が大きくなると、平均ホップ長、直径ともに短くなる傾向にあることがわかった。モジュール間がスター型になるように接続しているため、各階層のモジュールレベルでの平均ホップ長および直径は、 $m$  の値によって大きくは変わらない。一方で、 $m$  の値が大きいくほど、各階層が含むノード数は多くなる。よって、 $m$  の値が大きいくと、より多くのノードを同程度のホップ長で接続することになるため、最終的に平均ホップ長・直径ともに短くなることわかる。次に、接続方法ごと比較を行うと、 $MINSNG$  が最も大きな値になっており、次いで  $C[0.0]$ 、 $C[1.0]$ 、 $C[2.0]$ 、 $C[3.0]$  と続いた。これはモジュール間リンクに対するハブノードの寄与度合いが大きく影響しているためである。一方で、ノード媒介中心性については、 $MINSNG$  が最も優れることがわかった。評価結果を図に示す。この図を見ると、フラクタルトポロジーである  $MINSNG$  と  $C[0.0]$  がノード媒介中心性の値を小さく抑えられていることがわかる。最も負荷がかかるノードに着目すると、他のモジュール間リンク接続手法と比較して、 $MINSNG$  と  $C[0.0]$  は少なくともおよそ 3/4 の値に抑えることができていることがわかる。

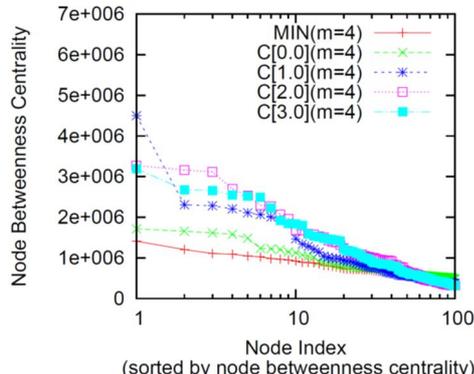
頑強性の評価では、故障パターンとして、次数が高い順にノードが故障するハブ故障と、無作為に選択されたノードが故障するランダム故障を与えた。故障は最下層トポロジーのノードで発生するものとし、ハブ故障については全体の 15%、ランダム故障については全体の 50% が故障するまで繰り返すものとして頑強性を評価した。 $C[0.1]$  かつ  $m = 8$  の場合が、ハブ故障とランダム故障の双方に対して高い頑強性を示すことがわかった。 $m = 8$  で高い頑強性を示したのは、モジュール間リンクの分散と集約のバランスが優れているものと考えられる。

評価結果をまとめると、本手法で構成されたフラクタル性を有するネットワークは、フラクタル性が無いネットワークと比較して、トポロジーの 10% のノードが故障した際の到達可能率を 17% 高く維持することができ、また最も負荷が集中するノードの負荷が約 45% 削減できることを明らかとなった。

次に、ネットワークの物理的制約を考慮した仮想ネットワーク構成手法を検討した。先行研究では、ノード間の物理的距離とフラクタル係数  $d_f$  には強い相関があり、定性的にも  $d_f$  が小さくなるとノード間の物理距離も小さくなる。そこで、ネットワークの物理的な側面(ノードの配置、リンク長)を考慮することで、任意のフラクタル次元を示すフラクタル仮想ネットワークの設計指針を示すと同時に、フラクタル次元と通信効率・頑健性の関係と、ネットワーク規模拡大に対する影響を明らかにした。フラクタル仮想ネットワーク構成手法として、物理リンク長分布に着目し、その分布がべき分布に従う手法を考案した。べき分布の指数をパラメータとして与えることでフラクタル次元をコントロールしている。1024 ノードのフラクタル仮想ネットワー



生成したトポロジーのフラクタル性の分析結果



ノード媒介中心性(ノード数: 8192)

クを生成し、ランダムグラフと比較した結果、フラクタル次元が大きいほど通信効率と頑健性は高く、ネットワーク規模増大に対してもフラクタルネットワークは高い通信効率と頑健性を維持できることを示した。

## 研究課題 2: IoT のための仮想ネットワーク構成手法

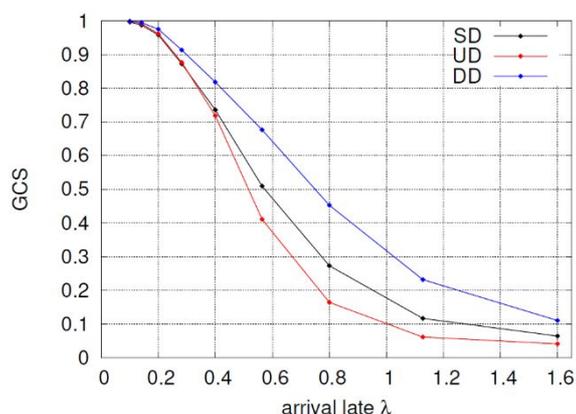
本課題では、モジュール構造を備えた脳機能ネットワークにおいて、記憶の想起のような情報処理がロバストに行われることを説明した Brain NoN モデルに着目し、仮想ネットワーク間の通信資源が相互依存する状況における効率的な仮想ネットワーク構成手法を示した。相互の依存関係を適切に設計することで、負荷の増加に対するロバスト性を備えつつ、通信効率も向上可能であることを確認した。

近年実用化が進んでいる IoT (Internet of Things) ネットワーク環境においては、ネットワークを通じて多種多様なサービスが高度利用のために相互接続される。このように想定される IoT 環境を実現する主要技術の一つとして、ネットワークスライシングが注目されている。ここでは、インフラ事業者が提供する物理資源からなるインフラネットワークの上に、異なるサービスを提供する複数のネットワークスライスがサービス事業者の要求に基づいて構築される。特に近年は、固定的に資源を分割しネットワークスライスを生成するのではなく、状況に応じてスライスに割り当てられた資源の動的再割当てを行うことで、資源の利用効率や柔軟性を高めるための研究も行われている。しかし、上記の仕組みには様々な利点がある一方で、物理資源の共有によりサービスネットワーク間の相互依存性が発生し、単一の仮想ネットワークで発生した変動が相互依存の状態によって他の仮想ネットワークへと波及するという問題も認識されている。そのため、ネットワーク間の依存性を考慮した、高信頼な相互接続ネットワーク (NoN; Network of Networks) の設計手法の検討が課題となっている。

ネットワーク間依存性を表現するネットワークモデルとして、社会インフラとしての電力網と通信制御網の相互接続ネットワークに基づく Catastrophic NoN (C-NoN) モデルが知られている。C-NoN モデルは電力網と通信制御網の間の強い依存性を再現しており、NoN 上の局所的なノードの変動が広域に影響を拡散する性質を明らかにした。他方で、Morone らは彼らの研究論文において、自然界に存在する複雑ネットワークは変動に弱いものだけではないと主張している。彼らは、近年の神経科学技術の発展の恩恵を受けて脳機能ネットワークの領野間依存性のモデル化に成功し、Brain NoN (B-NoN) モデルを提案した。そして、ネットワーク上の変動拡散の影響力の高いノード (インフルエンサー) を評価することで、B-NoN モデルは脳機能ネットワークの機能的な頑強性を再現し、ネットワーク上で生じた局所変動の拡散を抑止する仕組みを有していることを明らかにしている。しかしながら、先に述べた仮想ネットワーク環境を初めとする通信ネットワークでの NoN に対しては、NoN モデルの研究の知見が応用されるには至っていない。

本研究では、ネットワークスライシングが適用されたネットワーク環境を想定して、物理ネットワーク (PN) 及びその上で構築される仮想ネットワーク (VN) の相互関係をモデル化する、Physical-Virtual NoN (PV-NoN) モデルを提案する。本モデルは、トラフィック変動と、PN と VN 間の依存性を考慮して、NoN の可用性を表現するモデルである。本モデルでは、VN 間の依存性に応じて 3 つの異なるタイプを定義する。一つは、VN 毎に資源が静的に分割されているタイプ (type-SD: Statically Divided) である。最も基本的な分割手法であり、VN 毎に一定の資源が保証されているため VN 間に干渉は生じないが、利用効率性は最適でない。第二に、type-SD とは反対に VN 毎の資源の利用に制限がされないタイプ (type-UD: UnDivided) も考えられる。一部の VN の資源利用が PN の資源を占有する可能性があり、各 VN のサービス品質は保証されない。最後に、資源が動的に分割され、かつ最低の利用可能量が保証されるタイプ (type-DD: Dynamically Divided) を定義する。資源に余裕がある場合は一部の VN に多くの容量を割り当てることが許されるが、余裕がない場合は各 VN に均等に分割する。

シミュレーション評価を通じて、脳機能ネットワークにおいてみられる、相補的な依存性を応用したタイプである type-DD が、VN 間の干渉を防ぎつつ、最も優れた可用性と通信性能を実現することを示した。図は前述 3 つのタイプのそれぞれについて、トラフィック負荷 ( $\lambda$ ) が変化した際の、ネットワークの最大連結成分 (GCS) の変化を示している。ここで GCS は、仮想ネットワークトポロジーから、割り当てられた通信資源を負荷が超えるリンクを取り除い

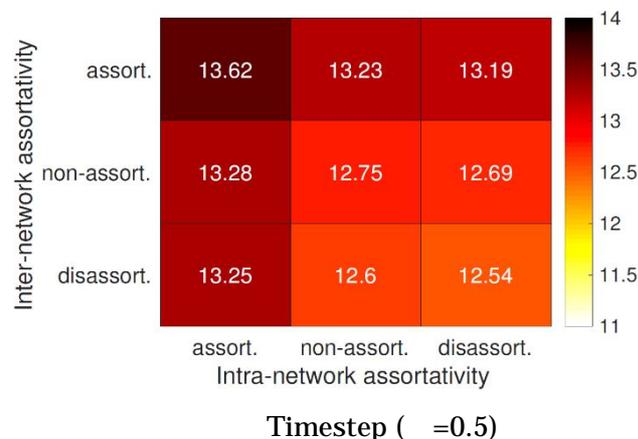
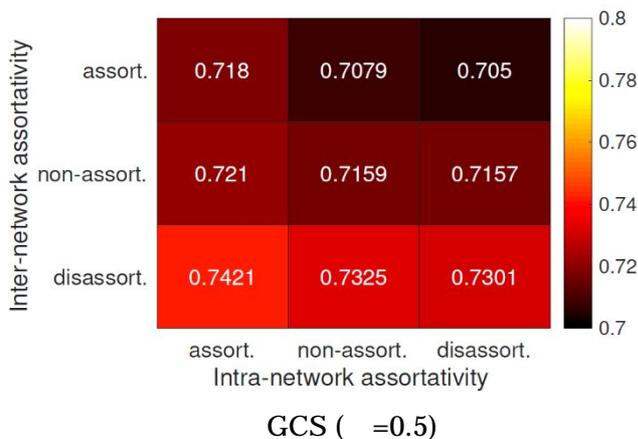
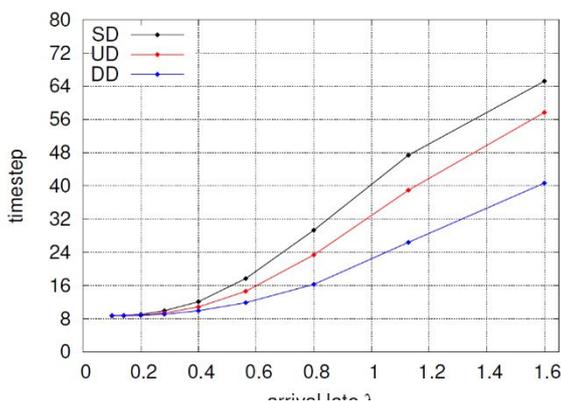


たトポロジーにおける、最大の連結成分である。

また、type-DD を用いることで、輻輳発生時にカスケード的な性能低下を抑制できることを示した。図は前述 3 つのタイプのそれぞれについて、トラフィック負荷 ( $\lambda$ ) が変化した際の、端末間の平均片道遅延 (タイムステップ数) の変化を示している。相互の依存関係を適切に設計した type-DD を用いることで、トラフィック負荷が増加した際の遅延の増加も抑制できている。

次に、本研究では PV-NoN モデルの type-DD を適用したネットワークにおける、適切なトポロジー構造の設計手法の検討も行った。先行研究から、仮想ネットワークのノードを物理ネットワークのどのノードに割り当てるのかについては、次数相関を指針とすることで、頑健性と通信効率が変わることが分かっている。そこで、type-DD を用いた PV-NoN モデルにおいて、ネットワーク内/間の次数相関 (アソータティビティ) を変えながら可用性と通信性能を評価した。

シミュレーションを行った結果が右図であり、ネットワーク内次数相関 (intra-network assortativity) がアソータティブである場合に可用性が向上し、ディスアソータティブである場合に通信性能が向上することを示した。また、ネットワーク間次数相関 (inter-network assortativity) については、ディスアソータティブな接続構造により可用性および通信性能が向上することを示した。



研究課題 1 における脳機能ネットワークのフラクタル特性に基づいた仮想ネットワーク構成手法にもとづく仮想ネットワークと、研究課題 2 における複数のサービスネットワークを相互接続する手法を用いることで、仮想 IoT-NW 構成要求をモジュール分割しながら、物理資源を割り当て、それによって、最適化問題を分割し、計算複雑度を実用的な範囲に抑えながら所望の要求に応えることを可能となった。さらに、複数の仮想 IoT-NW 構成を、ポテンシャル場を用いた自己組織的な動作によって構成する動的リソース制御手法を検討し、計算機シミュレーションを用いて有効性を評価した。動的リソース制御手法では、各エッジルータに発生する潜在的なリソース需要をポテンシャルとして表現する。エッジルータ間でポテンシャル値の情報交換による自己組織化と外部のコントローラを介したリソース競合の調停管理による管理型自己組織化を行い、ポテンシャル場を形成・更新する。エッジルータ上では複数のサービスが展開されるため、外部のコントローラは各サービスのリソース需要や時空間的特性に基づいて競合するリソースの調停を図る。評価では、交通実データを用いてポテンシャル場を形成および更新し、複数のサービス展開によるリソース競合に対する空間的リソース増強が行われることを明らかにした。また、管理型自己組織化による調停により、リソース不足となるエッジルータの割合が 32% 低減されることを示した。これらの取り組みにより、利用者やシステムに対して個別の仮想 IoT-NW に対して必要な資源を割り当て、利用目的が異なる場合であってもそれぞれの通信要求を満たすことが可能となった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Masaya Murakami, Daichi Kominami, Kenji Leibnitz, and Masayuki Murata	4. 巻 18
2. 論文標題 Drawing Inspiration from Human Brain Networks: Construction of Interconnected Virtual Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s18041133	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 荒川伸一, 荻野長生, 北原 武, 長谷川 剛, 村田正幸	4. 巻 118
2. 論文標題 証拠理論にもとづく相互接続ネットワークの構築手法の提案	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術報告	6. 最初と最後の頁 367-372
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 神田幸大, 荒川伸一, 村田正幸	4. 巻 119
2. 論文標題 実世界のポテンシャル場表現に基づく管理型自己組織化リソース制御手法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術報告	6. 最初と最後の頁 563-568
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Murakami Masaya, Kominami Daichi, Leibnitz Kenji, Murata Masayuki	4. 巻 9
2. 論文標題 Reliable Design for a Network of Networks with Inspiration from Brain Functional Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 3809 ~ 3809
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app9183809	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 坂本昂輝、荒川伸一、村田正幸	4. 巻 117
2. 論文標題 フラクタル性を有する仮想ネットワークポロジーク構成法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス研究会	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 杉浦満美、荒川伸一、今井悟史、片桐徹、関屋元義、村田正幸	4. 巻 1
2. 論文標題 API 評価者を取り入れた多面的市場モデルに基づくAPI エコシステムの効用分析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 第1回デジタルプラットフォーム研究会	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 荒川伸一
2. 発表標題 交通システムの高度化を支えるネットワークリソース制御技術
3. 学会等名 第34回OACISシンポジウム「ICTが拓く未来の交通/自動運転が拓く未来」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒川伸一
2. 発表標題 エッジコンピューティング利活用のための管理型自己組織化リソース制御手法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020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
研究分担者	滝根 哲哉  (Takine Tetsuya)  (00216821)	大阪大学・工学研究科 ・教授   (14401)	
研究分担者	小南 大智  (Kominami Daichi)  (00709678)	大阪大学・経済学研究科・助教   (14401)	
研究分担者	村田 正幸  (Murata Masayuki)  (80200301)	大阪大学・情報科学研究科・教授   (14401)	