

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01682

研究課題名(和文) 生物の進化速度の環境適応性に基づく大規模複雑情報ネットワークの設計制御手法

研究課題名(英文) Designing and Controlling Information Networks based on Evolution of Evolvability of Biological System

研究代表者

村田 正幸 (Murata, Masayuki)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：80200301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、まずSDI環境において適応性を向上するゆらぎ型VN制御手法を開発した。次に、生物学実験結果にもとづき、SDI環境における進化可能性を高める物理NW基盤設計手法を確立した。SDI環境における進化可能性とは、ゆらぎ型VN制御手法で用いる制御行列が、その変異を伴って新しいVN配置を発見できる能力である。これにより、ある時刻にゆらぎ型制御手法が有する制御行列では適応困難な環境変動が生じた際にも、制御行列の再構成によって新たな環境に適した制御行列への進化が可能となる。評価により、資源増強によりVN候補の多様性が増し、より多様な環境変動への適応可能性を持つことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this work, we develop a design method for physical infrastructure of SDI environments to enhance the evolution of evolvability, which is also observed in biological systems. Our method is based on a biological evolution model and provides both evolvability and adaptability under various patterns of traffic fluctuation and traffic growth. Our method determines the set of nodes to which physical resources should be added based on the possibility of evolution of a control matrix suitable for a new environment. Our results show that our method accommodates more patterns of traffic fluctuation than ad-hoc design methods do.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：仮想ネットワーク ネットワークアーキテクチャ 環境適応 進化適応 ネットワーク設計 資源増強

## 1. 研究開始当初の背景

インターネットは今、経済活動/社会活動や日常生活の社会基盤としてなくてはならない存在である。しかし、その信頼性は他のクリティカル社会基盤に比して極めて低いレベルに留まっている。問題は (1) ネットワークがこれまでの人口システムに見られない大規模かつ複雑なシステムであること、(2) さまざまな通信要求に適応する必要のある開放系であること、(3) 日々生み出される新しいサービスの中にはネットワーク設計時の想定を超えたものが数多くあり、情報流の急激な変化を引き起こすこと、に起因する。

しかし、これまでネットワーク運用現場では光ファイバ/無線通信の大容量化技術に支えられ、いわば物量作戦による対策がとられてきた。すなわち、情報流の大きい変化に対応するため、利用率の逼迫している箇所にリンクやノードの設備投資を行うという「場当たりの手法」が採られてきた。ところが、このような方法によると、逆に導入済みの設備が無駄になることもあり、設備投資コストや運用管理コストの問題は大きく、「物量作戦」による手法ももはや限界に近づきつつある。

最近、10~20年後の実現を目指した新しいネットワークアーキテクチャの探索が、(独)情報通信研究機構の他、米国 NSF や欧州 EU などを中心に取り組みされている。もちろん、インターネットが社会基盤になりつつある今、その仕組を根本的に変更し、まったく新しいネットワーク基盤を導入することは現実的ではない。事実、上述の研究開発においても、ネットワークの仮想化、すなわち物理ネットワーク (以下、物理 NW) 基盤上に、ソフトウェア制御による仮想ネットワーク (仮想 NW) をその通信要求に応じて柔軟に構築することが有効な手段として合意されつつある。しかし、その構築手法については相変わらず既存の設計手法、すなわち、ある時点での情報流量やネットワーク構造を与条件として情報流の性能最適化を目的とする「全体最適化」に関する研究が取り組まれており、上述の運用現場における「場当たりの手法」との乖離は大きい。

本研究では、既存手法とはまったく異なる発想によって上述の問題を扱う。すなわち、短期的な外的環境 (情報流の変動) や内的環境 (ノードやリンクの故障など) の変化に対する適応性によって故障耐性を確保すると同時に、ネットワークの規模的成長、さらに、将来の未知の利用形態による情報流の変化に対しても適応性のある情報ネットワーク設計制御法を創出する。

## 2. 研究の目的

環境適応性を維持しながら進化発展可能な情報ネットワーク、すなわち外部環境 (情報流) や内部環境 (ノードやリンク故障) などの短期的変動に適応し優れた故障耐性を有しつつ、同時に、ネットワーク利用の増大や多様化、

偏在化などによる情報流の長期的変動によるノードやリンクの設備変更にも適応可能な情報ネットワークの設計手法に取り組む。そのために、生物が持つ環境の変化に応じた進化速度の調整機構を進化生物学の観点から明らかにし、その原理を仮想化ネットワーク設計制御に適用し、最適化による進化の袋小路に陥ることなく、さまざまな環境変化に適応する情報ネットワークの設計制御の原理を確立する。

## 3. 研究の方法

これまでに発見した生物の遺伝子発現における環境適応性 (ゆらぎ原理) およびそれを光通信基盤に応用することによって達成してきた故障耐性のある制御機構 (ゆらぎ制御) に基づいて、まず「課題1: 環境変動に対する適応能力を有する仮想 NW 構成手法」に取り組む。また、「課題2: 生物システムにおける環境変動の大きさに対する進化速度調節機構」を進化生物学の観点から解明し、理論構築を行うとともに生物学実験によって実証する。さらに、それらの成果に基づいて「課題3: 生物システムの進化速度調節機構に基づく物理 NW 基盤設計手法」に取り組み、短期的環境変動だけでなく、長期的環境変動に対しても適応性を有する、すなわち、故障耐性だけでなくコスト性能にも優れた情報ネットワーク設計制御手法を実現する。

## 4. 研究成果

### 課題1: 環境変動に対する適応能力を有する仮想 NW 構成手法

本課題では、SDN (Software Defined Networking) 技術および NFV (Network Function Virtualization) 技術を用いた仮想化基盤において、ユーザー等が送出する仮想ネットワーク要求の変化やトラフィック状況の変化に応じて適応的に仮想ネットワークを埋め込む VNE (Virtual Network Embedding) 手法を考案し、計算機シミュレーションにより有効性を示した。

考案した VNE 手法は、レイテンシなどの仮想ネットワークの性能品質のみを観測し、性能品質が不十分であれば即座に新たな VNE の解を探索し、適切な性能品質を有する VNE を得る。これは、従来の数理計画法等にもとづく最適化アプローチと比較して、以下の特徴を持つ。

1. VN の再構成を短い周期で実施することが可能となり、仮想化基盤上で行われる通信内容の変化に対して短い時間で適応できる。
2. 通信内容の仔細を把握する必要がない。
3. 性能指標の最適化を目指すものではないため、結果として VN の再構成の量、回数が抑制される。
4. 性能品質の評価尺度が非線形関数

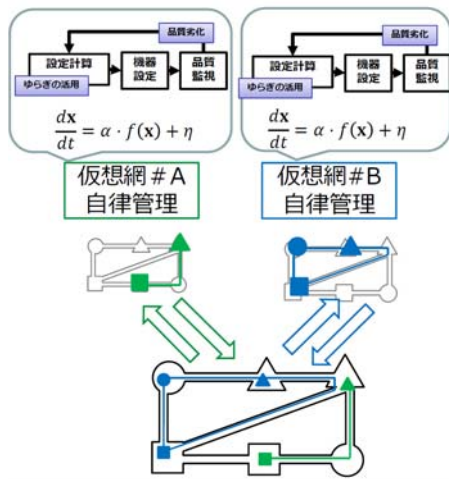


図 1: ゆらぎ原理に基づく VNE

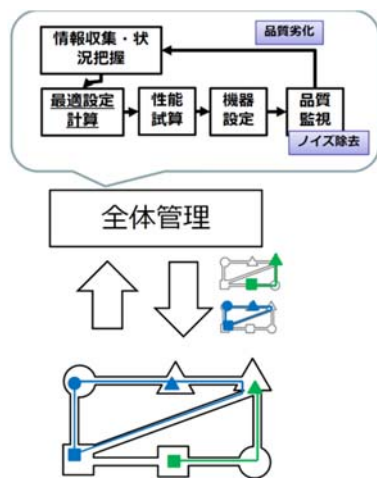


図 2: 集中管理に基づく VNE

であっても動作する。従来のネットワーク設計やネットワーク制御の研究においては、最適化アプローチによる性能指標の最良化が図られてきた。これは、制御コントローラ等がネットワーク全体のトラヒック状況（需給状況）ならびに制御状態を集中管理し、収益や資源利用率などの性能最適化を施すものである。しかし、仮想ネットワーク要求の個数が増大し、膨大な数のユーザーにカスタム化したサービスを提供することが求められるとともに、このような最適化アプローチを採用することが困難となるケースが想定される。考案した VNE 手法は、脳科学や生物学の分野で観測される「ゆらぎ」を活用し、ネットワーク全体の状況を詳細に把握することなく VNE を得る手法となっている。

ゆらぎにもとづく VNE 手法と最適化アプローチにもとづく VNE 手法の動作概要を図 1 および図 2 に示す。最適化アプローチにもとづく従来の VNE 手法は全体管理を前提としており、その結果、ネットワークの状況把握ならびに把握した状況を入力とする最適化計算が必須となる。ここで重要な点は、最適化アプローチでは全体状況を正確に把握し入

念な計算の下に適切な VNE を得ようとするため、計算中の状況変化や状況把握の正確性が損なわれるシチュエーションに対応できないことである。一方、ゆらぎにもとづく VNE 手法は性能品質のみを計測し品質が不十分であれば即座に設定を変更するため、品質劣化のバックエンドで生じる状況変化の詳細を把握することなく機敏に適切な VNE を得ることが可能となる。

ゆらぎにもとづく VNE 手法では、ノード属性  $k (=1, 2, \dots, K)$ 、物理ノード  $n (=1, 2, \dots, N)$  とし、属性  $k$  の仮想ノード要求をどの物理ノード  $n$  に埋め込むかを表す変数  $x_{kn}$  を遺伝子発現量とみなし、決定する。遺伝子  $kn$  を遺伝子  $i (1, \dots, KN)$  と展開し、単一の添字  $i$  を用いた表記に変換する。アトラクター選択モデルにもとづき、変数  $x_{kn}$  を以下の式で決定する。

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \left\{ \sigma \left( \sum_j W_{ij} \cdot x_j \right) - x_i \right\} + \eta$$

右辺第 1 項は、システムの安定状態であるアトラクターを持つ制御構造に、システム状態の良さを表すスカラー値  $\alpha$  を乗じた式となっている。なお、システム状態の良さを表すスカラー値  $\alpha$  の定義は様々なものが考えられるが、本研究では遅延性能を用いた [学会発表 3, 5]。関数  $\sigma(z)$  は、シグモイド関数である。課題 1 では  $W_{ij}$  は事前に与えるものと考えているが、課題 3: 生物システムの進化速度調節機構に基づく物理 NW 基盤設計手法において、 $W_{ij}$  の進化を考える。右辺第 2 項は、ゆらぎ項  $\eta$  であり、ガウスノイズを与える。上記式において、 $x_i$  の値域は  $[-1, 1]$  とする。 $x_i$  の閾値を 0 とし、 $x_i \geq 0$  のとき遺伝子  $i$  が発現し、 $i$  に対応する  $kn$  に仮想ノードを置く。 $x_i < 0$  のとき、遺伝子  $i$  は発現せず、 $i$  に対応する  $kn$  には仮想ノードを置かないと解釈する。ただし、ノード属性制約により物理ノード  $n$  がノード属性  $k$  の仮想ノードを埋め込み不能の場合、微分方程式を計算せずに  $x_{nk} = -1$  と固定する。

上述のゆらぎにもとづく VNE 手法の挙動を、計算機シミュレーションを用いて確認した。基盤ネットワークを 50 ノード、600 リンクのランダムネットワークとし、VN 要求を仮想ノード数 2~5、属性数 4 の要求とし、仮想ノード容量として CPU/メモリ/ストレージの要求量を一様分布で与え、また、仮想リンク容量として帯域幅の要求量を一様分布で与えた。各 VN 要求の仮想ノード容量および仮想リンク容量の要求量は 10 制御ステップごとに変動するものとし、ここでは毎周期に、各要求量を平均 0、分散 1 の正規分布に従う乱数値だけ増減させる。さらに、100 制御ステップごとに 20 個すべての VN 要求のトポロジーを再生成する。

仮想ノードの各属性の利用効率から求まる計算遅延およびリンク利用率から求まるデータの転送遅延をそれぞれ M/M/1 モデルならびに

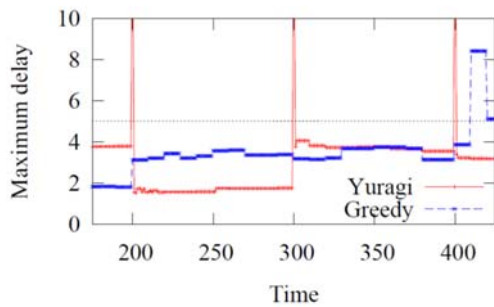


図 3: 最大遅延 (VN 要求 0)

遅延プロファイルで与えられるものとし、その和を通信遅延として用いた時の、最大遅延、埋め込み成功率、埋め込み位置を移行した VN 数を評価した。その一例を図 3 に示す。図 3 は VN 要求 0 の最大遅延を、各制御時間に対してプロットした結果である。比較のため、集中管理を前提とした発見的的手法 (Greedy) の結果も示している。なお、発見的的手法は、ネットワークのすべての情報を瞬時に取得できるものと仮定している。図を見ると、ゆらぎ手法は同様に制御目標である閾値 5.0 以下の遅延を概ね達成しているのに対し、Greedy 手法は 5.0 を超える大きい遅延が生じることがあり、リンク遅延が大きい状況では遅延性能の劣化が生じることがわかった。

以上の評価を通して、課題 1 では、ゆらぎにもとづく VNE 手法は様々な遅延特性に対応可能であり、かつ、要求の変動に対しても低遅延な仮想ネットワーク埋め込みを実現すること、並びに、仮想ネットワークの移行回数を削減しつつヒューリスティック手法と同程度の埋め込み成功率を達成することを示した。

### 課題 2: 生物システムにおける環境変動の大きさに対する進化速度調節機構

課題 2 では、生物実験により、DNA 修復遺伝子が欠損した複数の大腸菌変異体の変異率を測定した。その結果、野生型大腸菌に対して変異率が 100~1000 倍の範囲で増加していることが確認できた。これら的高変異性変異体を、栄養条件が異なる複数の培養条件で培養し、その増殖速度を計測した。その結果、ある閾値となる変異率を超えた際に、増殖速度が低下することが分かった。また、増殖速度の低下具合が、栄養条件に依存していることが分かった。すなわち、高い変異率を持つことでより不利に作用する環境条件が明らかとなり、持続的な進化が生じる検証実験の培養条件を定めることができた。また、高変異性大腸菌の変異率と増殖率を異なる栄養環境条件で測定した。実験データと数理モデルを用いた解析から、変異率だけでなく、変異率上昇をもたらす有害作用も、環境依存的に変化することを発見した。また、変異率が上昇した状態で長期間培養すると、修復系遺伝子群への変異蓄積などによって元の低い変異率へ容易に戻れなくなることが分かった。これらの結果

は、生物が一定の条件で増殖への負荷を低減しつつ変異率を切り替えられることを示唆している。

以上の生物実験の結果にもとづき、課題 3 では、生物の進化速度調整機構として変異に着目し、変異によるシステムの進化適用性向上を最大化する物理 NW 基盤設計手法を考案した。

### 課題 3: 生物システムの進化速度調節機構に基づく物理 NW 基盤設計手法

ネットワーク資源の増強指針として、増強時点の需要または予測に基づく将来需要に対して性能最適化を図るのが一般的である。これは、現環境における遅延性能を追求して資源増強した場合、増強時点のデマンドに対する遅延性能は最良となり、その結果、軽微な変化であれば、多少の遅延増大は生じるものの、十分に許容範囲に収まるという考え方もとづくものである。しかし、このようなキャパシティ設計と従来の集中管理型の最適化アプローチによる VNE では、大きなデマンド変動や環境変化への対応は困難である。仮想ネットワーク要求の個数が増大し、膨大な数のユーザーにカスタム化したサービスを提供することが求められる場合には、変動が生じることを想定し変動に即応する制御アプローチおよび、制御の適応性を促進する物理資源増強が必要である。

本課題では、SDI 環境における物理ネットワーク基盤のノード計算資源のキャパシティ設計手法を検討する。資源増強の指針として、現在の最良の性能よりも、将来にわたって良好な性能を維持することを目指す。生物が、遺伝型の変異がもたらす表現型の多様性によって未知なる環境変動に対する進化適応性を高めるという知見に着目し、ゆらぎ VNE 手法において、アトラクター構造の変異に伴う新環境への適応能力が最大化されるように物理計算資源を増強する。本課題の物理 NW 基盤設計手法には以下のような特性が期待される。

- ・ 増強箇所を決定する際に正確なデマンド予測を必要としない。
- ・ アトラクター構造の微小な修正で多種類の解候補へのアクセスが可能であり、適解の探索が促進され素早く適応を図ることができる。
- ・ より多様な環境変動への適応可能性を持つ。VN 候補の多様性を増すためである。

遺伝型の進化 (変異) の過程で大きな環境変動が起こった際に、生物は表現型の分散を増加させることによって、Fitness の早期回復が可能となる。表現型の分散は遺伝型  $W_{ij}$  の変化、ノイズ項  $\eta$  の 2 つの要因によってもたらされる。特に、環境変化直後に遺伝子変化 (Genetic variation) による表現型の分散が小さく表現型が十分にばらつかない場合、環境適応の回復が難航する。一方、分散が十



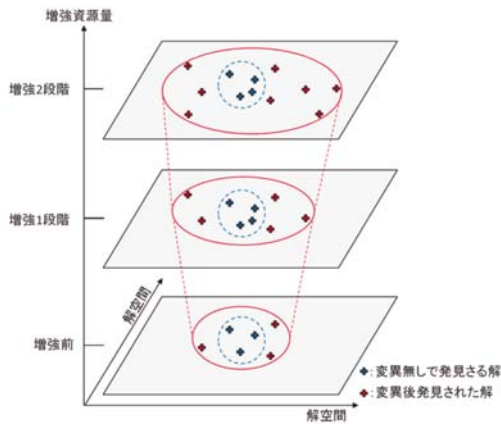


図 4: 進化適応性の概念図

分大きく多様な表現型が出現する場合、新環境に適した形質の獲得が促進され、遺伝型の進化適応性 (Genotypic evolvability) が向上する。つまり、分散は進化適応性を示す指標とみなされる。以上より、進化適応性を高める物理 NW 基盤設計手法がもたらす特性を図 4 にまとめる。図中のマーク (+) は環境変動に応じて、ゆらぎにもとづく VNE 手法により発見される解 (VNE) を表している。厳密には初期アトラクターセットに含まれる解と、それらの変異によって初めて発見される解に分けられるが、より広範な探索範囲をもって多種類の解に到達できる場合に進化適応性が高いと言える。物理基盤設計により進化適応性を高められる場合、解空間内で発見される解の種類が増える。以上を踏まえ、ここでは SDI 環境における進化適応性を次のように解釈する：“制御行列の変異を伴うゆらぎ制御が、新しい解 (VN 配置) を発見できる能力。また、解探索の障害にならぬよう物理資源が備わっていること。” さらに、本研究では、遺伝型変異に係る表現型の多様性指標として、エントロピーによる多様性尺度  $H(G)$  を導入している。

計算機シミュレーションによる評価では、物理 NW 基盤中のどこのリソース、すなわち CPU やメモリなどの計算資源量を増強すべきか、を求める際の方針として、生物が環境適応および可塑性を獲得するための戦略に倣い、 $H(G)$  の増加可能性をオフラインシミュレーションにより試算し、それらが大きくなる箇所に資源を追加する増強方針を考案した。 $H(G)$  を大きくしておくことで、制御行列の軽微な更新に関わらず、より多種類の VN 配置それぞれの使われる機会が増し、新環境に適したアトラクターを構築しやすくなる。資源追加位置の決定は、ADD アルゴリズムを用いた。オフラインシミュレーション開始時点の制御行列  $W$  を基準とし、 $W$  から  $A$  個の制御行列に変異させる。ここで、変異とはアトラクターとして記憶している仮想ネットワーク配置の 1 つをランダムに選択し、その配置状態を部分的に変更する。評価では、仮想スライス  $y$  の属性  $k$  を埋め込む物理ノードを  $m$  から  $m'$  に変更することとした。更に、変異後のそ

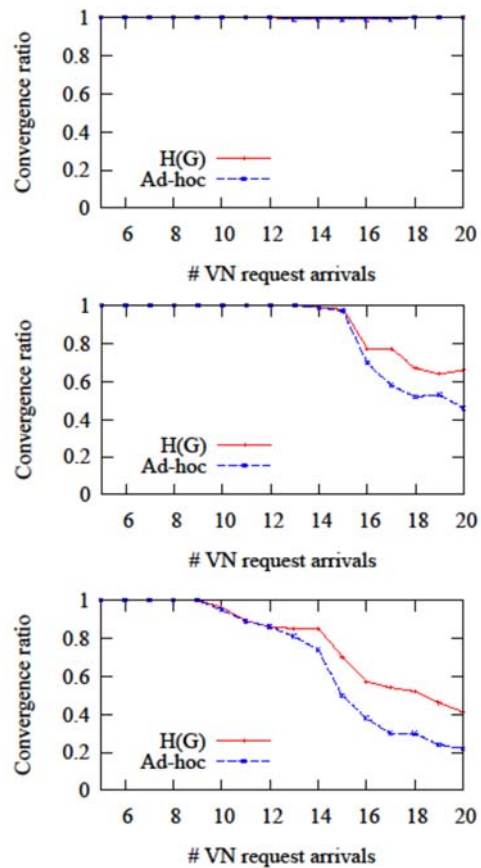


図 5: ゆらぎ VNE 制御収束率

れぞれの制御行列  $a$  に対して想定デマンド変動を与え、発見ダイナミクスの試算を行う。制御行列  $a$  における仮想ネットワークのマッピング位置の決定状態を  $X^a = \{\text{Sign}(x_i^a)\}$  とし、決定状態の出現頻度にもとづきエントロピー  $H(G)$  を求めた。

$H(G)$  が高まるように物理ノードのメモリ資源を増強した上で、当該 VN のデマンド変動を与えた。また、バックグラウンド負荷として、新規に到着する VN リクエストをヒューリスティック VNE 手法 (Greedy VNE) により収容している。比較として、遅延性能が最も改善されるノードの資源を増強するアドホック手法を用いている。図 5 に評価結果を示す。図 5 では、上から順に、デマンド変動の変化率を大きくしている。両手法ともに、新規 VN の収容が蓄積するにつれ収束率に低下が見られるが、VN 到着数 13, 14 時点で、 $H(G)$  にもとづく増強手法は収束率 85% を維持していることがわかる。

以上より、生物の進化速度の調整機構として変異に着目し、さまざまな環境変化に適応する情報ネットワークの設計制御の原理を確立した。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. T. Ohba, S. Arakawa, and M. Murata, "Virtual network reconfiguration in elastic optical path networks for future bandwidth allocation," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, pp. 633-644, September 2016.
  2. S. Takano, B. Pawlowski, I. Gudelj, T. Yomo, S. Tsuru, "Density-Dependent Recycling Promotes the Long-Term Survival of Bacterial Populations during Periods of Starvation," *mBio*, pp. 1-14, vol. 8, 2017.
  3. K. Inoue, S. Arakawa, and M. Murata, "A biological approach to physical topology design for plasticity in optical networks," *Optical Switching and Networking*, vol. 25, pp. 124-132, July 2017.
  4. O. Alparslan, S. Arakawa and M. Murata, "Designing VNT candidates robust against network failures," *Journal of Internet Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 279-288, Jan. 2018.
- [学会発表] (計 10 件)
1. 大場 斗士彦, 荒川 伸一, 村田 正幸, "エラスティック光ネットワークにおけるアトラクター選択にもとづく仮想網制御手法の提案と評価," *電子情報通信学会技術研究報告 (PN2015-33)*, vol. 115, pp. 55-60, November 2015.
  2. S. Ishikura, D. Kominami, and M. Murata, "Evaluation of the degree correlation's impact on information diffusion in modular networks," in *Proceedings of the 4th Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Science (KJCCS)*, January 2016.
  3. 井上 昂輝, 荒川 伸一, 今井 悟史, 片桐 徹, 関屋 元義, 村田 正幸, "遅延プロファイルを用いたゆらぎ原理にもとづくSDI 仮想化基盤制御手法の提案と評価," *電子情報通信学会技術研究報告 (IN2015-148)*, vol. 115, no. 484, pp.235--240, March 2016.
  4. O. Alparslan, S. Arakawa, and M. Murata, "Designing VNT candidates robust against congestion due to node failures," in *Proceedings of IEEE International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR 2016)*, pp. 182-187, June 2016.
  5. K. Inoue, S. Arakawa, S. Imai, T. Katagiri, and M. Murata, "Adaptive VNE method based on Yuragi principle for software defined infrastructure," in *Proceedings of IEEE International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR 2016)*, pp. 188-193, June 2016.
  6. 坂本昂輝, 大場斗士彦, 荒川伸一, 村田正幸, "ゆらぎ原理を用いた VNT 制御におけるアトラクター集合の更新手法の提案," *電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会 (PN2016-10)*, vol. 116, pp. 27-32, June 2016.
  7. 大場斗士彦, 荒川伸一, 村田正幸, "エラスティック光ネットワークにおけるレイズ推定にもとづく仮想ネットワーク再構成手法," *電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会 (PN2016-33)*, vol. 116, pp. 45-50, November 2016.
  8. K. Sakamoto, T. Ohba, S. Arakawa, and M. Murata, "A method for updating attractor sets in noise-induced virtual network topology control," in *Proceedings of IEEE Consumer Communications and Networking Conference (IEEE CCNC 2017)*, January 2017.
  9. T. Ohba, S. Arakawa, and M. Murata, "A Bayesian-based approach for virtual network reconfiguration in elastic optical path networks," in *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference*, March 2017.
  10. 井上昂輝, 荒川伸一, 村田正幸, "SDI における仮想網制御の進化適応性を高める計算資源増強手法," *電子情報通信学会技術研究報告 (NS2017-160)*, vol. 117, pp. 93-98, Jan. 2018.
- [図書] (計 0 件)
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)
- [その他]
- 該当なし
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
村田 正幸 (Murata, Masayuki)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号： 8 0 2 0 0 3 0 1
- (2) 研究分担者  
荒川 伸一 (Arakawa, Shinichi)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号： 2 0 3 2 4 7 4 1
- 小南 大智 (Kominami, Daichi)  
大阪大学・大学院経済学研究科・助教  
研究者番号： 0 0 7 0 9 6 7 8
- 津留 三良 (Tsuru, Saburo)  
東京大学・理学系研究科・特任助教  
研究者番号： 8 0 5 9 4 5 0 6
- (3) 連携研究者  
なし
- (4) 研究協力者  
なし