

令和元年6月13日現在

機関番号：17104  
 研究種目：基盤研究(C)（一般）  
 研究期間：2016～2018  
 課題番号：16K00130  
 研究課題名（和文）大規模データ収集・配布のためのネットワーク連携形データ圧縮・消失回復制御手法  
  
 研究課題名（英文）Network-assisted integration of data compression and forward erasure packet recovery for large-scale data collection and dissemination  
  
 研究代表者  
 鶴 正人（Tsuru, Masato）  
  
 九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授  
  
 研究者番号：40231443  
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：IoT環境での大規模なデータ収集・配布のために、データ圧縮と前方パケット消失回復を統合し、サーバ・中継・末端ノード連携によるネットワーク状態・特性を考慮した適応的最適化を目指した。符号化TCPの信頼性向上とトンネル化利用、複数経路マルチキャストファイル転送での受信者間転送と送信者符号化の導入、蓄積運搬形転送における優先制御や符号化グループ最適化、不均一なリンク帯域やメッセージ生成レートを持つ直列マルチホップ無線転送の最適化、センサ数値列の時間相関を利用した内挿圧縮に基づく圧縮・消失回復統合最適化、異常リンク同定のためのマルチキャスト形ネットワーク連携計測に関する成果を収めた。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

IoTと呼ばれる社会インフラは、様々な場所に置かれた、あるいは身につけた情報収集装置や情報表示装置、車、ロボットなどを接続して連携して動作させ、様々なサービスを提供するもので、これからの安全・安心で効率的な日常生活や生産活動を支えるために不可欠である。本研究において、データ圧縮と前方パケット消失回復をネットワーク全体の機能として統合し、大規模なデータ収集・配布における通信帯域不足の解消をすることで、この社会インフラを、場所や時間を問わず、コスト効率よく実現することができる。

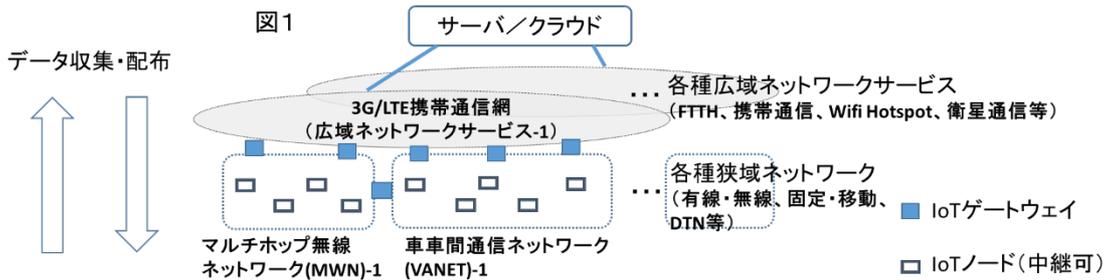
研究成果の概要（英文）：For widely-distributed large-scale data collection and dissemination on IoT environments, an integration of data compression and forward erasure packet recovery is optimized collaboratively by servers, relay nodes and end devices to adapt to network characteristics and conditions. The outcome included TCP/NC and its tunneling, multipath-multicast file transfer with recipient-side gossiping or sender-side coding, forwarding policy and coding on store-carry-forward messaging, scheduling on tandemly-connected multi-hop wireless sensors with heterogeneous link and message rates, joint data compression and erasure packet recovery for sensor data with interpolation-based structured compression, and deteriorated link location by network-assisted multicast probing.

研究分野：情報通信工学

キーワード：パケット消失回復 情報圧縮 ネットワーク符号化 無線ネットワーク OpenFlow

## 1. 研究開始当初の背景

Internet of Things (IoT) では、収集：地理的に分散したセンサが観測した状態を収集し、配布：分散したアクチュエータによる状態の操作やセンサの動作変更のために必要な指示やデータを配布する。つまり、分散して存在する多数のセンサやアクチュエータ（末端・中継ノード）と、収集した情報に基づき分析・判断・指示等を行うサーバ（十分な情報蓄積・計算能力を仮定）との間で、多様でしばしば不安定な狭域・広域ネットワークを介して多量かつ多様なデータを転送する（次図）。



ここで、データ量の爆発に伴ってボトルネックが末端ノードのバッテリー不足等から狭域・広域ネットワークの通信帯域不足へ移ると予想され、技術革新の必要性が警告されている。特に無線通信や電力線通信では、周波数帯域は限定的で環境により通信エラーも不可避である。そこで、通信帯域不足時にリンク上の転送データ量（パケット数）を減らす「圧縮」や通信エラー等によるパケット消失を救う「消失回復」が重要になる。しかし、ネットワークをブラックボックスとして送信者からデータの中身（コンテンツ）をエンド・ツー・エンドでそのまま保存して受信者に渡す方式では、帯域利用を効率化する工夫が限定的である。そこで、特に多対1や1対多の収集・配布において、実時間性の要求が緩やかな場合、圧縮・消失回復に関して、末端・中継ノード（ゲートウェイ含）・サーバの連携や異種複数ネットワークの適応的な活用による全体最適化の可能性が期待できる。

## 2. 研究の目的

そこで本研究課題では、多様かつ不安定な通信環境下に分散して存在する多数のノードとインターネット上のサーバとの間での大規模なデータ収集・配布において、許容される遅延時間を活用し、データ圧縮とパケット消失回復をネットワーク全体の機能として統合し、サーバ・中継・末端ノードを連携させ、時間空間的なコンテンツ間の関係性も利用し、多様なネットワークの状態・特性を考慮した適応的な圧縮・消失回復の全体最適化の実現を目指す。

転送ネットワーク上でのデータ消失がパケット単位で発生する点に着目し、データ圧縮と前方消失パケット回復を統合して、ネットワーク全体で連携する利点として、以下が期待できる。

- ・圧縮と消失回復の組み合わせ最適化。この2つは処理の適切な単位・地点・時点が異なり、必要な消失耐性強度やその不均一性（特定パケットの耐性強化等）も圧縮法に依存。
- ・ネットワーク連携による転送経路の利用可能帯域幅やパケット消失確率等に応じた経路と圧縮・消失回復の組み合わせ最適化。
- ・異なる時点・地点・コンテンツ間の収集・配布性能の公平性担保。

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、具体的には、以下の観点で、調査・検討、方式設計、シミュレーション評価、一部試作検証を行った：(i) サーバ・中継・末端ノードが連携して圧縮・消失回復を制御する基本モデル、(ii) 時間空間的なコンテンツ間の関係性も利用した圧縮・消失回復の具体的方式、(iii) 経路の通信帯域や消失確率等を考慮した多様な経路と圧縮・消失回復方式の適応的調整、(iv) 連携の実現に必要なサーバ・中継・末端ノード間の情報交換プロトコル。無線ネットワークのシミュレーションには Scenargie を用い、無線実験には Raspberry Pi と無線モジュールを用いる。また、柔軟で動的な経路制御のために OpenFlow を用い、Mininet 上でのエミュレーションや研究室内の OpenFlow ネットワーク上での実機検証を行う。

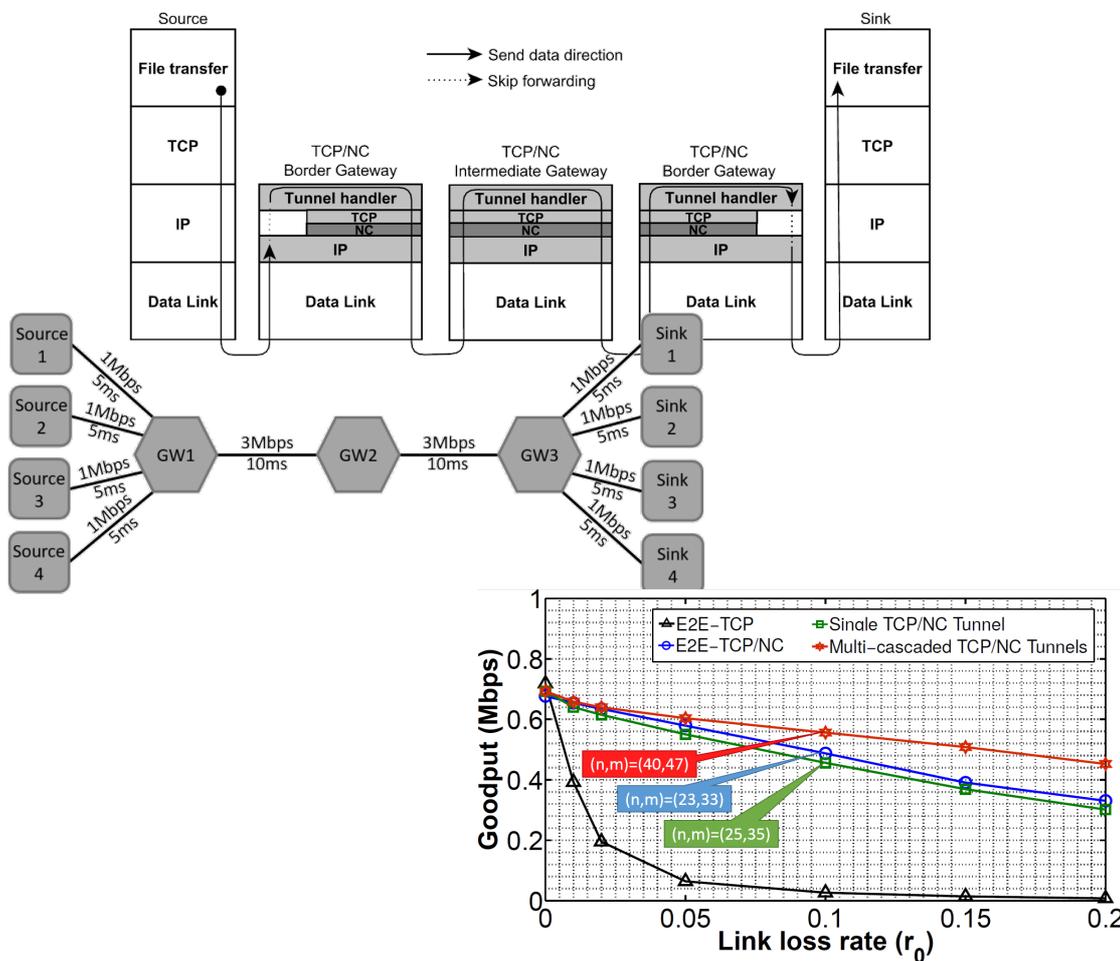
## 4. 研究成果

(i)に関しては、以前の研究の継続として、符号化 TCP (TCP/NC, TCP with Network coding) を IoT 環境に適用するために、機能を改良する（例えば、逆方向の ACK パケットロスやパケット順序逆転への耐性強化）と共に、TCP/NC tunnel を提案し、有効性を確認した（項目 a）。これは、エンドツーエンド TCP/NC の欠点、すなわち、端末での encode/decode 負荷、パケットレベルでのロスがない（または隠蔽された）リンク上の無駄な冗長パケットによる帯域消費、高

ロスリンクの手前での合流に起因する輻輳によるバッファ溢れ、を解決する。また、これも継続研究として複数経路マルチキャスト (MPMC, Multipath-Multicast) による OpenFlow の枠組みを使った高速高効率な 1 対多ファイル転送に関して、その理論的制約を明確にした上で、受信者間転送 (MPMC with Gossiping) や送信者符号化 (Coded-MPMC) を提案し、各受信の完了時間の理論下限値を達成することができた (項目 b)。

項目 a の成果は、雑誌論文[1, 5, 6, 10, 16, 17, 18, 22, 23]や学会発表で公開しており、[5]は Best paper award を獲得した。項目 b の成果は、雑誌論文[3, 9, 13, 21]で公開している。ここでは、項目 a の成果の一部を簡単に紹介する。

TCP/NC tunnel は、高ロスネットワーク (リンク) 区間の両端に置く TCP/NC 機能を持つゲートウェイによって実現される IP レベルの tunnel である。これにより、ロス率の高い劣悪なネットワークを通過する多数のエンドツーエンド TCP セッションを 1 本の TCP/NC セッション上で運び、ゲートウェイ間の NC 冗長化と TCP 再送によって、エンドツーエンドの TCP goodput を改善する。ロス率の異なる複数のネットワークを通過する場合はその切れ目において、カスケードすることが望ましい。また、ゲートウェイでのバッファ管理を工夫することで、エンドツーエンド TCP の輻輳制御との相性も改善できる。以下は 4 セッション競合時のエンドツーエンド goodput (1 セッション当、100 シミュレーション平均) を ns-3 でシミュレーション評価したものである。カスケード TCP/NC tunnel が、単段 TCP/NC tunnel, エンドツーエンド TCP/NC, エンドツーエンド TCP のすべてに勝っている。グラフ内の (n, m) は 1 符号化 window 内の原パケット個数と転送パケット個数であり、自動最適化の結果を表示している。



(ii)および(iii)に関しては、以前の研究の継続として、蓄積運搬形 (Store-carry-forward) 転送に基づく独立クラスタ (島等) 間のメッセージ転送手法を改良し、中継クラスタが存在する場合のメッセージコピーの優先制御手法およびネットワーク符号化を導入する際の符号化位置の最適化やメッセージ長・符号化グループの最適化手法を提案し、有効性を確認した (項目 c)。

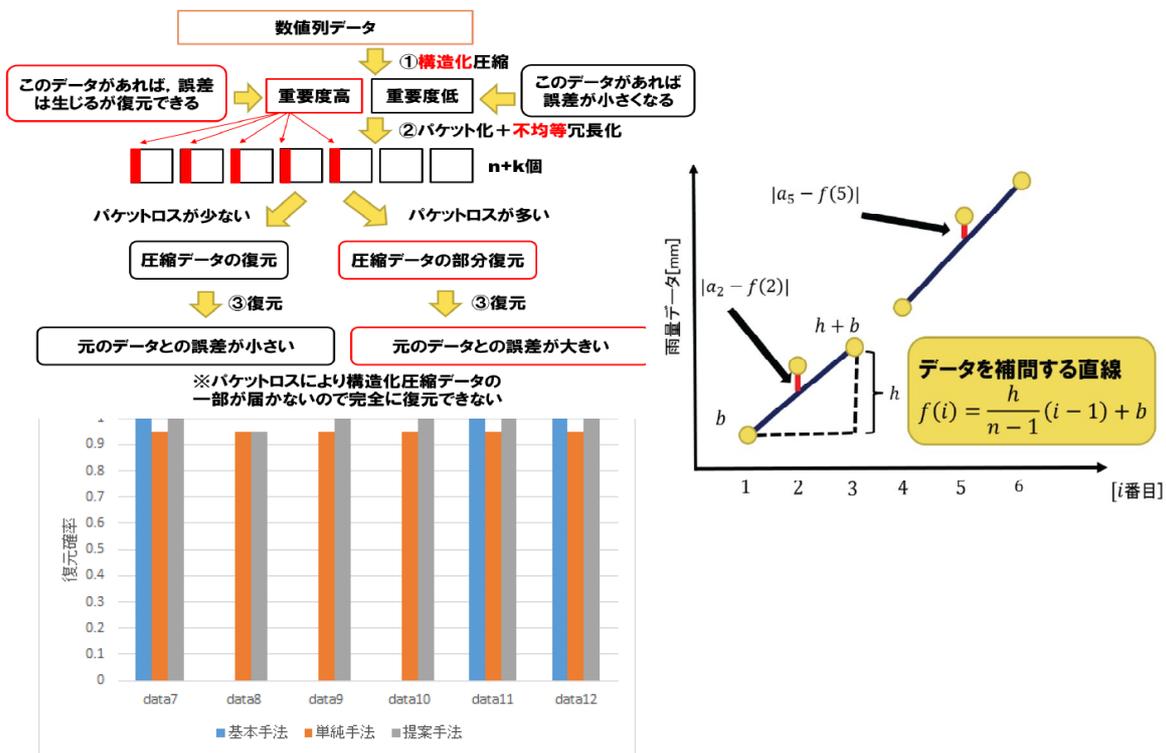
また、これも継続研究として、二方向直列マルチホップ無線ネットワーク (鉄塔や道路に沿った無線センサネットワーク等) の最適スケジュールに関して、より広い範囲の IoT 環境に適用するために、遠方干渉やリンク帯域の差異、ノード毎のメッセージ生成レートの差異等を考慮した最適スロット割当てや方向切り替え分離点決定を提案し、有効性を確認した (項目 d)。

一方、全く新規に取り組んだのは、情報圧縮の構造化と分離転送であり、センサ数値列の時間相関を利用した内挿圧縮に基づく転送経路の帯域幅とパケットロス率に応じた圧縮・消失回復統合処理に関して、クラスタリングによる部分近似や構造化情報のパケット詰め込み差別化・最適化や公平性を提案し、有効性を確認した。さらに、空間相関の利用への拡張 (クラスタリン

グの多次元化に基づく)を検討した(項目e)。

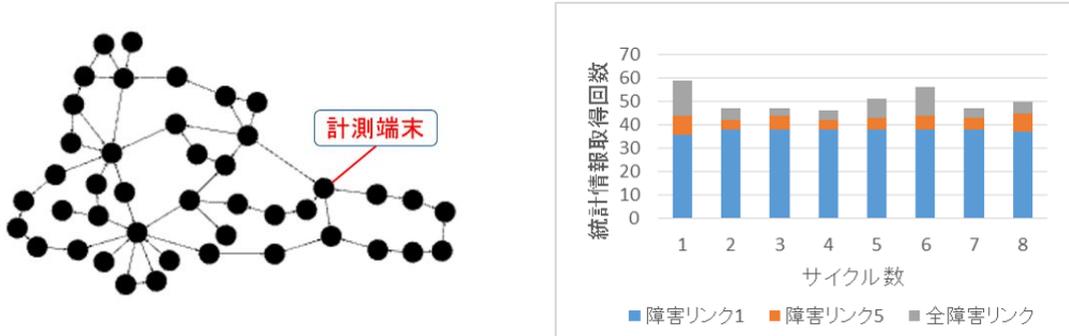
項目cの成果は、雑誌論文[12, 14, 19, 25]で公開しており、[14]は Best workshop paper award を獲得した。項目dの成果は、雑誌論文[8, 20]や学会発表で、項目eの成果は、雑誌論文[11, 15]や学会発表で公開しているが、ここでは、項目eの一部の内容を紹介する。

一般に屋外でのセンサーからの数値データ(雨量や気温等)の転送では、無線通信経路の帯域が狭く、ロス率が高く、かつ確認応答による再送を使わない片方向通信を使用する場合がある。一方センサから得られる数値データは必要な正確さが利用目的によって異なる。このような環境下で、復元誤差が許容値以下になる確率を最大化することを目指し、単調増加数値列に対する線形近似情報と差分情報からなる構造化圧縮を行い、構造化に応じて冗長化する。提案手法では k-means++法で数値データをクラスタリングし、クラスタ毎にデータを補間する直線を求め、直線構成データと直線とデータとの差分を送信する。リード・ソロモン符号を用いて直線構成データの確実な到達を図る。以下がその概念図とロス率0.4のとき、単純手法の復元確率と基本、提案手法が許容誤差0.0005を満たす確率の比較である。ロス率やデータパターンを変化させてシミュレーション評価し、ほぼすべてのロス率・データパターンにおいて有効性が確認された。



(iv)については、新規に、OpenFlow の枠組みを使った大規模ネットワークでの各リンクの状態監視(方向毎の特性)のための計測端末・中継スイッチ・サーバ(コントローラ)連携計測に取り組み、マルチキャスト計測パケットを用いて、パケットロス率やパケット遅延変動を対象として、それらを監視し、閾値より大きなリンクを、低負荷でかつすばやく検知し位置同定できる方式を提案し、有効性を確認した(項目f)。

項目fの成果は、雑誌論文[2, 4, 7, 24]や学会発表で公開しているが、その一部の内容を簡単に紹介する。



これは、OpenFlow 機能を用いて、ネットワークの全リンクに重複なしにあるマルチキャスト木(経路)に沿って計測パケットを通過させ、各スイッチでのそれらの計測パケットの通過情報をコントローラが収集することで、全リンクのロス率や遅延変動を計測する手法に関する

もので、統計情報を取得する順序を工夫することにより、取得回数を削減し、すべての障害リンクを低負荷で素早く検出する。本研究では、計測経路の最適化をめざし、計測経路木作成時の各リンクの重みを操作し、ロスが起きやすいリンクの計測経路上の位置をできるだけ終端に置く手法を提案した。上の図は、1.パケットロスを発生させるリンクを決定し、計測経路を作成、2.計測パケットを送信、3.劣化リンクを特定し、特定までの統計情報取得回数を記録、4.各リンクのコストを変更し、次のサイクルへ移行、というシミュレーション実験(8回の継続した計測)での全障害リンクを検知し終わるまでのポート情報取得回数である。スイッチ数:43、リンク数(各向き):112、計測パケット数:1000、計測サイクル数:8、劣化リンクの閾値:0.03、大口スのリンクの数は、固定の5本と追加の1~5本で変化させ、それらの障害リンクとした。2回目以降は、取得(ポートアクセス)回数が削減できており、全ポート数(112)の半分以下のアクセス回数で劣化リンクの位置同定が終了する。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計29件)

- [1] N. V. Ha, M. Tsuru, "Buffer Management for TCP/NC Tunnel in Lossy and Congested networks," The IEICE Communications Express (ComEX), 6 pages, accepted; to appear in Dec 2019. 査読有.
- [2] T. Nakamura, M. Shibata, M. Tsuru, "On Retrieval Order of Statistics Information from OpenFlow Switches to Locate Lossy Links by Network Tomographic Refinement," Proc. the 11th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS-2019), 10 pages, accepted; to appear in Sep 2019. 査読有.
- [3] M. Kurata, K. Heira, M. Shibata, Masato Tsuru, "Minimizing One-to-Many File Transfer Times using Multipath-Multicast with Reed-Solomon Coding," Proc. the 31th International Teletraffic Congress (ITC31), 2 pages, accepted; to appear in Aug 2019. 査読有.
- [4] N. M. Tri, M. Tsuru, "Locating Deteriorated Links by Network-Assisted Multicast Proving on Open Flow Networks," Proc. the 24th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC-2019), 6 pages, accepted; to appear in July 2019. 査読有.
- [5] N. V. Ha, M. Tsuru, "TCP with network coding performance under packet reordering," Proc. the 7th International Conference on Emerging Internet, Data and Web Technologies (EIDWT-2019), LNDECT 29, pp.552-563, 27 Feb 2019. (10.1007/978-3-030-12839-5\_51) 査読有.
- [6] N. V. Ha, M. Tsuru, "On the Characteristics of TCP/NC Tunneling in Heterogeneous Environments," Proc. the 10th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS-2018), LNDECT 23, pp.340-349, Sep 2018. (10.1007/978-3-319-98557-2\_31) 査読有.
- [7] 永田 隼也, 鶴 正人, "OpenFlow におけるリンク毎パケット遅延変動の監視と劣化リンク特定の効率化," 信学技報 ICM2018-19, pp.47-52, 2018年7月. 査読なし.
- [8] 木村 亮太, 鶴 正人, "伝送速度が不均一な直列センサーネットワークにおける転送スケジュールの最適化," 信学技報 ICM2018-23, pp.71-76, 2018年7月. 査読なし.
- [9] K. Heira, K. Ogawa, M. Tsuru, "One-to-many file transfer using multipath multicast with gossiping," Proc. the 4th IEEE International Conference on Network Softwarization (NetSoft 2018), pp.188-191, June 2018. (10.1109/NETSOFT.2018.8460123) 査読有.
- [10] N. V. Ha, K. Kumazoe, M. Tsuru, "TCP Network Coding with Adapting Parameters for bursty and time-varying loss," IEICE Trans. Communications E101-B(2):476-488, Feb 2018. (10.1587/transcom.2017EBP3010) 査読有.
- [11] 桑原佳久, 鶴 正人, "通信経路帯域とロス率を考慮したデータ圧縮と前方消失パケット回復," 信学技報 ICM2017-33, pp.1-6, 2018年1月. 査読なし.
- [12] Agussalim, M. Tsuru, A. Lawi, "The Impact of Message Transmission Scheduling in DTN Message Delivery Across Multiple Islands," Proc. 2017 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob'17), 7 pages, Nov. 2017. (10.1109/APWiMob.2017.8283997) 査読有.
- [13] 平良憲司, 鶴 正人, "複数経路マルチキャストを利用した一対多ファイル転送へのゴシップング導入," 信学技報 ICM2017-31, pp.57-62. 2017年11月. 査読なし.
- [14] R. A. Tsiory, M. Tsuru, Agussalim, "When Does Network Coding Benefit Store Carry and Forwarding Networks in Practice?," Proc. INCoS-2017, LNDECT 8, pp.434-444, Aug 2017. (10.1007/978-3-319-65636-6\_39) 査読有.
- [15] M. Koeppen, M. Tsuru, "Fairness Aspects of Secondary Radio Spectrum Access," Proc. INCoS-2017, LNDECT 8, pp.445-455, Aug 2017. (10.1007/978-3-319-65636-6\_40) 査読有.
- [16] N. V. Ha, K. Kumazoe, K. Tsukamoto, M. Tsuru, "Masking Lossy Networks by TCP Tunnel with Network Coding," Proc. ISCC-2017, pp.1292-1297, Jul 2017.

- (10.1109/ISCC.2017.8024702) 査読有.
- [17] N. V. Ha, K. Kumazoe, K. Tsukamoto, M. Tsuru, "Benefits of Multiply-cascaded TCP Tunnel with Network Coding over Lossy Networks," Proc. the 15th IFIP International Conference on Wired/Wireless Internet Communications (WWIC'17), LNCS 10372, pp.247-258, June 2017. (10.1007/978-3-319-61382-6\_20) 査読有.
- [18] N. V. Ha, K. Kumazoe, M. Tsuru, "TCP Network Coding with Enhanced Retransmission for heavy and bursty loss," IEICE Trans. Commu. E100-B(02):293-303, Feb. 2017. (DOI: 10.1587/transcom.2016EBP3101) 査読有.
- [19] M. Tsuru, M. Takai, S. Kaneda, Agussalim, R. A. Tsiory, "Towards practical store-carry-forward networking: examples and issues," IEICE Trans. Commu. E100-B(01):2-10, Jan. 2017. (DOI: 10.1587/transcom.2016CQI0001) 査読有.
- [20] 松原 尚平, 鶴 正人, "数珠つなぎセンサーネットワークのためのメッセージ転送スケジュールと前方消失訂正," 信学技報 NS2016-141, pp.1-6, 2017年1月. 査読なし.
- [21] K. Ogawa, T. Iwamoto, M. Tsuru, "One-to-many File Transfers Using Multipath-Multicast With Coding at Source," Proc. the 18th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC-2016), pp.687-694, December 2016. (DOI: 10.1109/HPCC-SmartCity-DSS.2016.0101) 査読有.
- [22] N. V. Ha, K. Kumazoe, M. Tsuru, "TCP with network coding meets loss burstiness estimation for lossy networks," Proc. the 11th International Conference On Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA-2016), pp.303-314, Nov 2016. (DOI: 10.1007/978-3-319-49106-6\_28) 査読有.
- [23] N. V. Ha, K. Kumazoe, M. Tsuru, "Making TCP/NC adjustable to time varying loss rates," Proc. INCoS-2016, pp.457-462, Sep 2016. (DOI 10.1109/INCoS.2016.77) 査読有.
- [24] 藤村悠樹, 月岡祐太, 鶴 正人, "OpenFlowにおける全リンクパケットロス率計測のための統計情報取得順序の最適化," 信学会 技術研究報告 CQ2016-45, pp.73-78, 2016年7月. 査読なし.
- [25] Agussalim, M. Tsuru, "Spray and Hop Distance Routing Protocol in Multiple-island DTN Scenarios," Proc. the 11th ACM Intl. Conf. on Future Internet Technologies (CFI-2016), pp.49--55, June 2016. (DOI: 10.1145/2935663.2935668) 査読有.

〔学会発表〕(計6件)

- [1] N. V. Ha, M. Tsuru, "On Buffer Management for TCP/NC Tunneling," 2019年電子情報通信学会 総合大会 BS-4-39. (2019年3月22日発表、東京都、早稲田大学)
- [2] 木村 亮太, 柴田 将弘, 鶴 正人, "直列無線センサーネットワークにおける逆方向通信干渉を考慮した転送スケジュール," 2019年電子情報通信学会 総合大会 B-6-61. (2019年3月21日発表、東京都、早稲田大学)
- [3] 後藤 卓, 柴田 将弘, 鶴 正人, "Openflow ネットワークでの全リンク監視のためのマルチキャスト計測経路の動的最適化," 2019年電子情報通信学会 総合大会 B-14-13. (2019年3月20日発表、東京都、早稲田大学)
- [4] N. M. Tri, S. Nagata, M. Tsuru, "Locating deteriorated links by optimal multicast proving on OpenFlow networks," 2019年電子情報通信学会 総合大会 BS-4-7. (2019年3月19日発表、東京都、早稲田大学)
- [5] M. Tsuru, "Fair and Effective Resource Sharing in Network Control," Invited key note lecture, The 2018 East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIconCIT-2018). (Nov 6, 2018, Makassar, Indonesia)
- [6] 任 開源, 鶴 正人, "Data Collection in Resource-limited Wireless Sensor Network using Node Collaboration," 2018年電子情報通信学会 総合大会 B-8-32. (2018年3月22日発表、東京都、東京電機大学)

〔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〕

研究室ホームページ <https://nmlab.cse.kyutech.ac.jp/>

## 6. 研究組織

研究代表者のみで実施。