

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26280035

研究課題名(和文) IoT分散サービス用SDN駆動ネットワークリソース制御方式の研究

研究課題名(英文) Research on SDN Driven Network Resource Control for IoT-oriented Distributed Services

研究代表者

山田 茂樹 (YAMADA, SHIGEKI)

国立情報学研究所・研究戦略室・特任教授

研究者番号：80332154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：IoT (Internet of Things)分散サービスをスケーラブルに実現するため、クラウドとSDN (Software Defined Networking)を連携した分散知的ネットワークアーキテクチャに基づいて、(1)ネットワーク制御機能と転送機能を分離したIoT向きSDN(Software Defined Network)制御技術 (IoT向きルーティング、トラフィックエンジニアリング等)及び(2) IoTデバイスの効率的な無線リソース割り当てを実現するSDR (Software Defined Radio)制御技術に関して種々の方式技術や無線帯域割り当てアルゴリズムの提案を行った。

研究成果の概要(英文)：Based on a distributed intelligent network architecture for IoT (Internet of Things)-oriented distributed services, we have proposed new IoT-oriented SDN (Software Defined Network) technologies that separate network control function and data forwarding function to implement efficient IoT-oriented routing and traffic engineering and new SDR (Software Defined Radio) technologies to allocate wireless network resources efficiently.

研究分野：情報学

キーワード：ネットワーク 移動体通信 インターネット高度化 先端的通信 スマートセンサ情報システム

1. 研究開始当初の背景

多様なセンシング / 計算 / 通信能力と固有な動的特性を有する IoT (Internet of Things) は、様々なレベルの計算、センシング、ネットワーク能力を持った多数の無線システムで構成され、それらを組み合わせた様々な IoT 活用サービスが実社会に導入されていくと予想される。しかし、現在の IoT 技術は、特定のプロトコルに依存したプログラム、他システムから隔離された IoT 閉域網、セントラルサーバによる IoT データの収集、収集後の IoT データの外部とのデータ非共有等の制約が多く、IoT の持つ潜在能力を十分生かしていない。また、現在のインターネットでは、豊富なリソースを保有する少数の巨大なコンテンツプロバイダがエンドユーザにサービスを提供する構造であるが、今後は、個々のリソースが必ずしも潤沢でないが、数が膨大な IoT デバイスがコンテンツプロバイダになって大量のデータを生成し、エンドユーザに IoT サービスを送り届ける構造に変化すると予想される。このような変化に対応して IoT の能力を十分に引き出し、様々な IoT サービスを実現するための基盤技術確立をしていくことが今後重要となる。

2. 研究の目的

本研究では、クラウドと SDN (Software Defined Network) を連携した分散知的アーキテクチャ 3DIA (Three-Tier Distributed Intelligence Architecture for IoT) を基本コンセプトに、IoT 向きルーティング、トラフィックエンジニアリング (トラフィックを迂回路に経由させる等トラフィックの分散を図り、輻輳を回避する技術)、ローカル / グローバルなシステム最適化を行う SDN 制御、及び SDR (Software Defined Radio) に基づく IoT デバイスの効率的な無線リソース割り当て手法等の要素技術を開拓し、膨大な数の IoT を用いた分散サービスをスケーラブルに実現する基盤技術確立する。

3. 研究の方法

本研究では、IoT 分散サービスを効率よく提供するための分散・集中ハイブリッド 3 階層ネットワークアーキテクチャ 3DIA を基本コンセプトに据える。3 階層の中で最上位のグローバル知的層 (GI 層) は、相互接続されたクラウドデータセンタから構成され、ユーザ (IoT 端末) からのサービス要求に対して計算、ストレージ、通信に関わるグローバルリソースを提供する。リージョナル知的層 (RI 層) は、IoT デバイスの物理的近辺で、計算、ストレージリソースを提供する小規模クラウド (Stratus Cloud) で構成される。各 Stratus Cloud は仮想マシン (VM) と複数種類のアクセスネットワークを含む。Stratus Cloud はネットワ

ークスライジング等の仮想化技術を使って、必要な量のアクセスネットワークリソースを動的に提供する。ローカル知的層 (LI 層) は、各 IoT デバイスやモバイルデバイスに埋め込まれた知的機能を実現する。

本研究では、このような 3DIA アーキテクチャの実現で最も重要な 2 つの要素技術、即ち、ネットワーク制御機能と転送機能を分離した IoT 向き「SDN 制御技術」と、IoT デバイスの効率的な無線リソース割り当てを実現する「SDR (Software Defined Radio) 制御技術」の要素技術に注力して研究を進める

(1) SDN 制御技術

3DIA では、クラウド上の SDN コントローラが IoT の制御プレーンを管理し、IoT デバイスがプログラマブルスイッチとなってデータプレーンを提供する。SDN コントローラ実現上の研究課題を以下に示す。

SDN コントローラの制御方式の検討

IoT デバイスの稼働状況に応じて 2 階層のクラウド (GI 層の Cloud と RI 層の Stratus Cloud) 間で SDN サービスをマイグレートするために、SDN コントローラが IoT サービスに関する知識や IoT デバイスに関するグローバルな知識をもとに、適切なアクセスネットワークを選択する手法等を検討する。

IoT ルーティングの検討

GI 層や RI 層のサービスソフトウェアと IoT デバイスが連携して、IoT デバイス間及びユーザとサービスソフトウェア間のルートを見つけ、データ転送経路を立ち上げるために、複数の SDN コントローラが協調してグローバルなネットワーク情報等を活用して最適なルートを計算する方法等を検討する。

トラフィックエンジニアリングの検討

GI 層の SDN コントローラが物理的に分散していてもネットワーク全体に関するグローバル情報を持ち、IoT サービス要求に応じて最大の性能が得られるようなトラフィックエンジニアリング手法等を研究する。

(2) SDR 制御技術

RI 層は無線周波数のような場所依存のリソースも管理する必要があるため、干渉と電力消費を抑えつつ、異なる無線アクセス技術間でシームレスに無線リソースを管理できるようにするためのプロトコルとその制御法を研究する。例えば、SDR プロトコルを使って無線周波数の最適な割り当てを行う方法を検討する。

4. 研究成果

本研究によって、以下のような要素技術新たに開拓した。これらを組み合わせ、統合化することにより、分散知的アーキテクチャ 3DIA を実現し、IoT 分散サービスを効率よく提供することができる。

(1) SDN 制御技術

IoT デバイスやデバイス間通信リンクが障害になった場合、SDN コントローラからの事前指示に基づき、SDN スイッチで通信ルートの高速切り替えを行う Local Fast Failover 方式を提案し、実装した。その結果、SDN スイッチ単体レベルの通信ルート切り替え時間は 20ms-40ms と高速に実現できることを実証した。また、既存 IP ルーティングプロトコル (OSPF, RIPv2) を SDN アーキテクチャ上に実装し、シミュレーションで評価した結果、通信ルート切り替え時間は OSPF プロトコルの単一障害時に 3.8-3.9sec、2-4 個の複数同時障害時に 4.1-5.4sec、RIPv2 プロトコルでは 15-60sec と低速であり、その要因は既存 IP ルーティングプロトコルの各種タイム値に起因することを明らかにした。

IoT 制御アプリケーションと SDN コントローラ間に粒度の高い North Bound API (Application Programming Interface) を提供する提案を行った。その結果、OpenFlow インタフェース方式に比較して制御トラフィック量とイベント処理時間は削減したが、イベント処理スループットが低下することが分かった。また、SDN による通信路高速切替メカニズム (Fast Failover 等) と、それらの広域バックボーンネットワークへの適用を検討し、実証実験とシミュレーションで高い適用性があることを確認した。

広域におけるネットワークリソースの管理方法については、大規模ネットワークトラフィックの最適経路制御手法として SDN と Source Routing 法を組み合わせた新しいルーティングとトラフィックエンジニアリング方式について検討を行った。経路制御のそのための計算複雑度を抑えるために、ネットワークの一部のノードをスキップして経路制御を行うノード数削減法を検討し、それをトラフィックエンジニアリングに適用した場合の性能を評価し、その有効性を示した。

(2) SDR 制御技術 :

IoT デバイス間をインターネットアクセスポイントまでを無線マルチホップで接続するツリー型アクセスネットワークを理論面と実装面から検討し、屋外実証実験により、IoT デバイス間距離が 15m で 20 ホップ程度、IoT デバイス間距離が 30m で 16 ホップ程度まで実現できることを実証した。

干渉と電力消費を抑えつつ、異なる無線アクセス技術間でシームレスに無線リソースを管理する制御法として、広エリアをカバーするマクロ基地局と小エリアをカバーするピコ基地局からなる Heterogeneous Network において無線リソース(帯域)を最適に割り付けるアルゴリズムを明らかにした。

IoT 分散サービスの無線リソース制御とし

てコグニティブ無線の周波数リソース借用及び動機づけの方策を検討し、サービス品質、安全性等を確保する制御フレームワークを提案し、周波数の利用効率を改善できることを確認した。

基地局を介さないデバイス間直接通信として車々間ネットワークや、その他一般的なデバイス間通信実現方法を検討し、無線チャネル間干渉を抑えるためのクラスタリングを行い、デバイス間で電力制御を最適化する方法を見出した。

ハイパーグラフを利用してセル範囲を超えたデバイス間通信を可能とするリソース割り当てアルゴリズムを提案した。

近隣区域内でシームレスに無線リソースを管理する制御法については、Vehicular Network(車載用ネットワーク)で移動車両(A)にビデオストリームサービスを効率よく提供するため、路側の無線設備(R)と移動車両(A)間の通信チャネル品質が劣化した時に、通信チャネルに余裕がある別の移動車両(B)が路側の無線設備からビデオストリームを受け取り、移動車両(A)にフォワードしてネットワーク全体で高性能を維持する協調型車載用ネットワークの構成を検討し、中継移動車両(B)の選択と、各移動車両に割り当てるべきビデオレイヤの数、無線チャネルリソースの無線設備-移動車両間通信(R-A 間通信)と移動車両間通信(A-B 間通信)における無線リソース配分方法を最適化問題として数式化し、その解決方法を提案した。

SDN に適用する無線リソースの仮想化について検討し、特に、SDN 技術を利用して、無線 LAN や無線モバイルネットワーク間における垂直的ハンドオーバーの方法について提案し、その有効性をシミュレーションによって示した。

ネットワークリソースの仮想化によって、異種無線ネットワーク上の異なるサービス間でのリソースの共有と配分方法の最適化を行い、トップジャーナルである IEEE/ACM Transaction on Networking にその成果を発表した。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 55 件 : すべて査読有)

- [1] Markov-Decision-Process-Assisted Consumer Scheduling in a Networked Smart Grid: Zhi Liu, Cheng Zhang, Mianxiong Dong, Bo Gu, Yusheng Ji, Yoshiaki Tanaka, IEEE Access, Vol. 5, pp. 2448-2458, March 2017.
- [2] eICIC configuration algorithm with service scalability in heterogeneous cellular networks: Hao Zhou, Yusheng Ji, Xiaoyan Wang Shigeki Yamada, The IEEE/ACM

- Transactions on Networking, DOI: 10.1109/TNET.2016.2588507 25(1) 520-535 2017 年 2 月
- [3] An Experimental Feasibility Study on Applying SDN Technology to Disaster-resilient Wide Area Networks: Kien Nguyen Shigeki Yamada, Annals of Telecommunications, Springer, DOI 10.1007/s12243-016-0502-2 71(11) 639-647 2016 年 11 月
- [4] (The Best Paper Award) Spatio-Temporal Data-Driven Analysis of Mobile Network Availability During Natural Disasters Lei Zhong, Kiyoshi Takano, Fangzhou Jiang, Xiaoyan Wang, Yusheng Ji, Shigeki Yamada, Proc. of the 3rd International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM 2016), Dec. 13th - 15th, 2016, DOI: 10.1109/ICT-DM.2016.78572 2016 年 12 月
- [5] QoS-aware resource allocation for multicast service over vehicular networks, Hao Zhou, Xiaoyan Wang, Zhi Liu, Yusheng Ji, Shigeki Yamada, Proc. of 8th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP 2016), , October 13-15, 2016, DOI: 10.1109/WCSP.2016.7752526 2016 年 10 月
- [6] A Novel Software-Defined Networking Approach for Vertical Handoff in Heterogeneous Wireless Networks: Li Qiang, Jie Li, Yusheng Ji, Changcheng Huang, Wireless Communications and Mobile Computing, Vol. 16, Issue 15, pp. 2374-2389, Oct. 2016.
- [7] Capacity-aware Cost-efficient Network Reconstruction for Post-Disaster Scenario: Xiaoyan Wang, Hao Zhou, Lei Zhong, Yusheng Ji, Kiyoshi Takano, Shigeki Yamada Guoliang Xue, Proc. of 27th annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'16) 4-7 September, 2016, DOI: 10.1109/PIMRC.2016.779491
- [8] On-site Configuration of Disaster Recovery Access Networks Made Easy: Quang Tran Minh, Yoshitaka Shibata, Cristian Borcea, Shigeki Yamada, Elsevier Ad-hoc Networks Journal, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157087051530007X>, DOI:10.1016/j.adhoc.2015.12.008 40(April 2016) 46-60 2016 年 4 月
- [9] Hypergraph Based Resource Allocation for Construct Local Disaster Recovery Networks: Matthias Herlich, Shigeki Yamada, The 30th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2016), March 23, 2016
- [10] Joint Spectrum Sharing and ABS Adaptation for Network Virtualization in Heterogeneous Cellular Networks: Hao Zhou, Yusheng Ji, Xiaoyan Wang, Shigeki Yamada, Proc. of IEEE GLOBECOM 2015 (Global Communications Conference 2015), 6-10 December 2015, DOI: 10.1109/GLOCOM.2015.7417165
- [11] Motivation for a Step-by-Step Guide to set up Wireless Disaster Recovery Networks: Matthias Herlich, Shigeki Yamada, Proc. of the 2nd International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM'2015) , November 30 - December 2, 2015, 1-8
- [12] Ryu: Using High Level Northbound API for Control Messages in Software Defined Network: Shaoyu Zhang, Matthias Herlich, Kien Nguyen, Yao Shen, Yusheng Ji, Shigeki Yamada, Proc. of the 17th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS2015), August 19-21, DOI: 10.1109/APNOMS.2015.7275412 115-120 2015 年 8 月
- [13] A Non-monetary QoS-aware Auction Framework towards Secure Communications for Cognitive Radio Networks: Xiaoyan Wang, Yusheng Ji, Hao Zhou, Jie Li, IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- [14] Power Control in D2D-Based Vehicular Communication Networks: Yi Ren, Fuqiang Liu, Zhi Liu, Chao Wang, Yusheng Ji, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 64, No. 12, 5547-5562, 2015.
- [15] Multi-user Computation Partitioning for Latency Sensitive Mobile Cloud Applications: Lei Yang, Jiannong Cao, Hui Cheng, Yusheng Ji, IEEE Transactions on Computers, Vol. 64, No. 8, pp.2253-2266, August 2015.
- [16] Incentivize Spectrum Leasing in Cognitive Radio Networks by Exploiting Cooperative ARQ Retransmission: Xiaoyan Wang, Yusheng Ji, Hao Zhou, Zhi Liu, Jie Li, EAI Transactions on Wireless Spectrum, Vol. 15, No.3, July 2015.
- [17] Joint Resource Allocation and User Association for SVC Multicast over Heterogeneous Cellular Networks: Hao Zhou, Yusheng Ji, Xiaoyan Wang, Baohua Zhao, IEEE Transactions on Wireless

- Communications, Vol. 14, No. 7, pp. 3673-3684, July 2015.
- [18] Joint spectrum sharing and ABS adaptation for network virtualization in heterogeneous cellular networks: Hao Zhou, Yusheng Ji, Xiaoyan Wang, Shigeki Yamada, Proc. of IEEE GLOBECOM 2015.
- [19] A Privacy Preserving Truthful Spectrum Auction Scheme using Homomorphic Encryption, Xiaoyan Wang, Yusheng Ji, Hao Zhou, Zhi Liu, Yu Gu, Jie Li, Proc. of IEEE GLOBECOM 2015..
- [20] Cooperative ARQ Retransmission based Spectrum Leasing for Cognitive Radio Networks: Xiaoyan Wang, Yusheng Ji, Jie Li, Proc. of IEEE VTC 2015 Spring.
- [21] ADMM based algorithm for eCIC configuration in heterogeneous cellular networks: Hao Zhou, Yusheng Ji, Xiaoyan Wang, Baohua Zhao, Proc. of IEEE INFOCOM 2015.
- [22] On-the-Fly Establishment of Multihop Wireless Access Networks for Disaster Recovery, Quang Tran Minh, Kien Nguyen, Cristian Borcea, Shigeki Yamada, IEEE Communications Magazine, 52(10) 60-66 2014 年 10 月
- [23] On the Resilience of Software Defined Routing Platform: Pengcheng Zeng, Kien Nguyen, Yao Shen, Shigeki Yamada, Proc. of APNOMS 2014 (The 16th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium), September 17-19, 2014, 4 pages
- [24] ERI-MAC: An Energy-Harvested Receiver-Initiated MAC Protocol for Wireless Sensor Networks: Kien Nguyen, Vu-Hoang Nguyen, Duy-Dinh Le, Yusheng Ji, Duc Anh Duong Shigeki Yamada, International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2014, Article ID 514169, 8 pages, 2014. doi:10.1155/2014/514169 2014 年 5 月
- [25] MDRAN: Multihop Disaster Recovery Access Network: Quang TRAN-MINH, Kien NGUYEN, Eiji KAMIOKA, Shigeki YAMADA, Journal of Mobile Multimedia (JMM), Rinton Press 10(1&2) 32-45 2014 年 5 月
- [26] Auction-based Spectrum Leasing for Secure Information Transfer in Cognitive Radio Networks, Xiaoyan Wang, Yusheng Ji, Hao Zhou, and Jie Li, Proc. of 11th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (IEEE MASS 2014) 2014 年 10 月
- [27] Joint mode selection, MCS assignment,

resource allocation and power control for D2D communication underlaying cellular networks, Hao Zhou, Yusheng Ji, Jie Li, Baohua Zhao, Proc. of IEEE WCNC 2014, 1690-1695 2014 年 4 月

〔学会発表〕(計 18 件)

- [1] Resilient Networking Solutions for Prompt Disaster Recoveries: Shigeki Yamada, APAN (Asia Pacific Advanced Network)/PRAGMA (The Pacific Rim Application and Grid Middleware Assembly) Disaster Management Workshop, Manila, Philippines 2016 年 1 月 27 日
- [2] (Keynote Speech) Resilient Networking Solutions for Prompt Disaster Recoveries, Shigeki Yamada, Quang Tran Minh, Kien Nguyen, Keynote Speech, International Conference on Advanced Computing and Applications 2015 (ACOMP2015) and The 2nd International Conference on Future Data and Security Engineering 2015 (FDSE2015), Ho Chi Minh City, Vietnam 2015 年 11 月 24 日

〔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〕

ホームページ等

山田 茂樹 : <http://researchmap.jp/keiusei/>

計 宇生 : <http://researchmap.jp/keiusei/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

山田 茂樹 (YAMADA, Shigeki)

国立情報学研究所・研究戦略室・特任教授
研究者番号 : 8 0 3 3 2 1 5 4

(2)研究分担者

計 宇生 (JI, Yusheng)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授

研究者番号 : 8 0 2 2 5 3 3 3

(3)研究協力者

BORCEA, Cristian

米国ニュージャージー工科大学・計算機科学科・教授