

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：10103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K15976

研究課題名(和文) Quality of Green (QoG), Quality of Experience (QoE) and Quality of Protection (QoP) for Mobile Cloud Networking

研究課題名(英文) Quality of Green (QoG), Quality of Experience (QoE) and Quality of Protection (QoP) for Mobile Cloud Networking

研究代表者

太田 香 (Ota, Kaoru)

室蘭工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：50713971

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年、モバイルデバイスの爆発的な普及により、モバイルデバイスとクラウドコンピューティングの融合が進み、モバイルクラウドという新しいコンピューティング技術が注目を集めている。本研究はモバイルクラウドの3つの主要課題であるQoG(エネルギー効率)、QoE(ユーザ体感品質)、QoP(セキュリティとプライバシー)に着目し、最適なアルゴリズム、モデル、プロトコル、アーキテクチャを学術的に設計し、既存手法と比較を行いその有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：With penetration of mobiles and advance of cloud computing, mobile cloud computing is emerging to complement and enhance mobile devices whose recourse is limited such as computation power, memory space, battery-powered, and so on. In this research, we focus on the following three of key research issues: QoG (energy efficiency), QoE (user experience), and QoP (security and privacy). To solve the issues, we design novel algorithms, models, protocols, and architectures and show efficacy of our proposed methods comparing to existing solutions.

研究分野：情報通信ネットワーク

キーワード：モバイルクラウド エネルギー効率 ユーザ体感品質 セキュリティ プライバシー

## 1. 研究開始当初の背景

近年、スマートフォン・タブレットを始めとするモバイルデバイスの普及が目覚ましい勢いを示している。2013年のコンピューティングデバイスの出荷台数のうち、パソコンが占める割合はわずかに13%にとどまり、ノートパソコンを除くと割合はさらに小さい統計が出ている。また、4Gの普及と5Gへのシフトが軌道に乗っていることも、モバイルインターネットの時代に突入したと言える。

このような背景の中で、モバイルクラウドという新しいパラダイムが頭角を表している。米 IEEE Computer Society は2013年末、2014年の技術トレンド予測のトップ10の1つとしてモバイルクラウドを挙げ、次のように述べている。「モバイルデバイスは、メモリ、処理能力、バッテリー駆動時間に制約がある。だが、クラウドコンピューティングと組み合わせれば、データ処理やストレージをモバイルデバイスの外側に移すことができる。」

それ故に、モバイルクラウドは政府、学界、産業界から大変注目を集めている。例えば、米国の国立科学財団(NSF)は多額の資金をかけ、2014年から助成がスタートするモバイルクラウドと関連する Grant だけでも86件にのぼる[4]。学界では、本研究分野で大きな影響力をもつ IEEE Transactions on Cloud Computing (TCC), IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC) はそれぞれ、Mobile Clouds, Advances in Mobile Cloud Computing という特集号を2015年に組んでいる。更には、産業界においては、国内携帯キャリア3社もスマートフォンとクラウドの連携アプリの開発に精力を注いでいる。これらの動向により、モバイルクラウドは官・学・民において大変盛んな研究テーマと言える。

図1にモバイルクラウドのモデル図を示す。モバイルデバイスは、WiFiアクセスポイントや携帯回線を通じて、クラウド上の様々なデータ(アプリケーション、サービス、OS等)にアクセスできる。ここでクラウドは元のコンテンツを提供するプロバイダとモバイルデバイスとの間を取り持つ「エージェント」の役割を果たしている。個々のモバイルデバイスがアプリケーションを実行したり、プロバイダから直接データをダウンロードしたりする代わりに、クラウドが保有する十分なリソース(計算能力、メモリ領域等)を活かして、モバイルデバイスが必要とするデータを収集、保存、処理をすることで、モバイルデバイスの負荷を軽減できるようになった。実際、スマートフォンのストレージは一般に8G~16Gバイト程度であり、内蔵するストレージ容量が大きな制約となっている。一方クラウドなら、Dropboxなどのクラウドストレージサービスを利用すれば、容量をギガバイト単位やテラバイト単位で追加でき、ストレージ容量はほぼ無限大となる。



図1：モバイルクラウドのモデル

## 2. 研究の目的

本研究はモバイルクラウドの学術的な問題を解決しながら、実用化のためにモバイルクラウドにおける Quality of Green (QoG)、Quality of Experience (QoE)、Quality of Protection (QoP) の3つの根幹技術の研究を行う。具体的には、以下の通りである。

### (1) モバイルクラウドにおける QoG

QoG は、エネルギー効率性を表す尺度である。無線ネットワーク間の通信は帯域やシグナルの強さによりのみ影響されるのではなく、天気、ビルディング、モビリティなど様々な要素に影響される確率的な性質を持つ。この特性から、モバイルデバイスとWiFiアクセスポイント(AP)及び携帯基地局の通信に係るエネルギー消費は予測できない場合がある。また、一定のデータ量を転送するのに、帯域とエネルギー消費の関係は指数的に増えるという既存の研究結果があるため、悪い通信状況でデータを転送する場合は多大なエネルギー消費を要するものである。モバイルデバイスにとってエネルギー消費は根幹的で、これではモバイルデバイスとクラウドコンピューティングの融合の最大メリットの一つである、モバイルデバイスのリソースのオフロードの意味はなくなってしまう。

以上の観点から、QoG保証なモバイルクラウド間通信のため、本研究はまず、モバイルデバイスにおける動的なアプリケーション(データ)の選別アルゴリズムを設計する。また、クラウドストレージのような、遅延耐性なアプリの場合、使用頻度の高いデータをプリフェッチするアルゴリズムについて確率論のアプローチで研究する。

### (2) モバイルクラウドにおける QoE

QoE は、ユーザ体感品質を表す尺度である。スマートフォンネットワークを代表とするモバイルネットワークは既存のネットワークと異なり、人々との親密性はこれまでのネットワークに無い特徴を持つ。よって、これまでのマシンのみで構成されるネットワークの定性的なシステムの評価基準(例えばQoS)はユーザの体感品質の測定には適さない。モバイルデバイスとクラウドの間の経路は基地局とISPなど様々な経路を有し、遅延

という体感はユーザによって異なる。

よって、本研究はモバイルクラウド固有の特徴に着眼し、QoE 保証なアルゴリズムを研究する。

### (3) モバイルクラウドにおける QoP

QoP は、セキュリティとプライバシーに関する尺度である。モバイルクラウドにおいてユーザは居場所を正確に更新することによってより細かなサービスを楽しむ一方、プライバシーが漏洩する可能性がある。また、モバイルクラウドにおける認証について、端末のリソースの制限から、処理の重い暗号化などは向いていない。

本研究は、ユーザのセキュリティ保護に関するアルゴリズムを研究する。また、正確性とプライバシーのトレードオフの関係を研究し、さらにセキュリティの要素を考慮しながら、包括的に QoP の課題に取り組む。

## 3. 研究の方法

### (1) モバイルクラウドにおける QoG

モバイルクラウドにおける動的なデータ選別アルゴリズム及び遅延耐性なアプリのための使用頻度の高いデータのプリフェッチアルゴリズムの研究開発を行った。より優れたアルゴリズムを設計するため、これまで提案されてきた様々な既存のアルゴリズムについて網羅的に調査を行った。学術論文誌、書籍、IEEE 及び電気電子情報通信学会などの各学会誌などを調査対象とした。既存のアルゴリズムの長所と短所を分析することで、新たなアルゴリズムを設計した。数式によるモデル化や数値解析により、考案したアルゴリズムを検証した。

### (2) モバイルクラウドにおける QoE および QoP

モバイルクラウド固有の特徴に着眼し、新たな評価基準を定義して、QoE を保証するシステムを提案した。また、その特徴を応用し、ユーザのセキュリティの保護に応用できるアルゴリズムの設計、そしてデータの正確性とプライバシーのトレードオフの関係について研究した。

提案アルゴリズムやシステムが完成した後は、シミュレーションによる本格的な性能評価を行った。この時、各要件に係るパラメータの調節は、シミュレータによる実験を繰り返し行い、その結果を反映させながら改良を重ねた。得られた研究成果を論文としてまとめて、国際的な学術論文誌および国際会議へ投稿し、発表した。

## 4. 研究成果

### (1) エッジコンピューティングを用いた QoG および QoE 保証なモバイルクラウドシステム

エッジコンピューティングは、これまで一極集中していたクラウドサーバをネットワークの周縁部（エッジ）である街角や住宅内にエッジサーバとして配置し、近隣で発生す

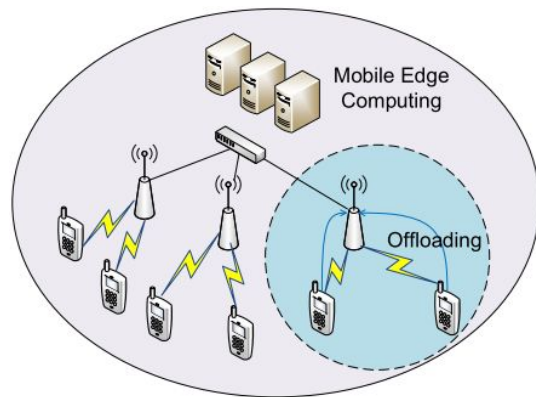


図 2：エッジコンピューティングを適用したモバイルクラウドシステム

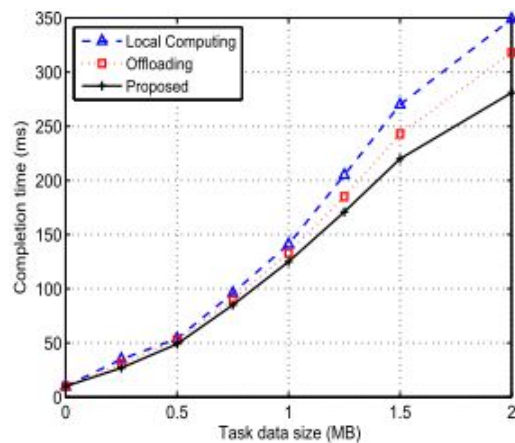


図 3 (a)：性能評価比較：エネルギー消費量

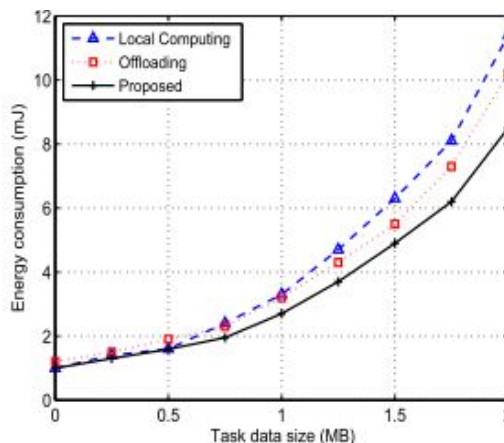


図 3 (b)：性能評価比較：タスク処理時間

るデータを各自で分散処理する技術である。

本研究では、モバイルデバイスの省エネを目的とし、エッジコンピューティングを適用した[J8]。エッジサーバの導入により、物理的な通信距離に起因するモバイルデバイスのエネルギー消費を削減することができる。さらに、本来モバイルデバイスで処理すべきタスクをエッジサーバが一部負担する(オフローディング)ことによって、計算負荷に起因するエネルギーの消費も抑えることができる。



本研究では、エッジサーバ下に複数のアクセスポイント (AP) を配置し、複数のモバイルデバイスに対応するシステムを想定した (図 2)。エッジサーバは通常のクラウドサーバと比較して計算能力が非力であるうえ、配下の AP も通信帯域に制約があるため、モバイルデバイスの数の増加と共に、デバイス間で計算・通信資源の競争が発生する。そこで本研究では、モバイルデバイスのエネルギー消費および、それぞれのタスク完了時間が最小限となるよう、資源割当の最適化を行った。図 3 は、数値解析による性能評価の結果である。提案手法 (Proposed) は、オフローディングせずにモバイルデバイスですべてのタスク処理をする方法 (Local Computing) とすべてのタスクをエッジサーバで処理させる方法 (Offloading) と比較した。提案手法は、2 つの手法と比較して、モバイルデバイスのエネルギー消費を抑えながら (図 3 a) 処理すべきタスクの完了時間の削減に成功した (図 3 b)。

以上により、エッジコンピューティングを用いて、QoG および QoE を保証するモバイルクラウドシステムの構築が可能であることがわかった。この研究成果の一部は論文としてまとめ、国際的な学術論文誌で影響力の高い IEEE Wireless Communications Letters (Impact Factor = 2.449) に掲載された [J8]。

## (2) IoT のための QoE 保証なクラウドシステム

IoT 社会では、モバイルデバイスだけでなく、あらゆるモノがインターネットに接続され、膨大なデータが生み出される。クラウドコンピューティングを用いて、それらのデータを保存、分析することが効率的であるが、実際の運用には、サービスを提供する側とされる側の利益を考慮する必要がある。例えば、サービス提供側は、高性能な GPU を用いることでデータを素早く正確に分析することができるため、高品質なサービスを提供できる。一方、設備投資を回収するために利用料を高く設定する必要がある。サービス利用者は、できる限り高品質で安価なサービスを求めるのが常である。

本研究では、サービス提供者と利用者双方にとって利益が最大となるような最適化手法を提案した [J3, J14]。図 4 は、Cloud Broker を導入したクラウドシステムのモデルである。Cloud Broker がサービス提供者と利用者のマッチングを行う。本研究では、それぞれの利益を、サービス提供者はサーバのエネルギー消費量の削減、サービス利用者はサービス応答時間の短縮として、マッチングの最適化を行った。性能評価はシミュレーションにより行い、提案手法は既存手法と比較して、それぞれの利益を最大化できることがわかった。図 5 は利用者の利益に関する性能評価結果で、提案手法 (MOPSO) が最もサービス応答時間が短いことを示している。

以上により、サービス提供側の利益も考慮

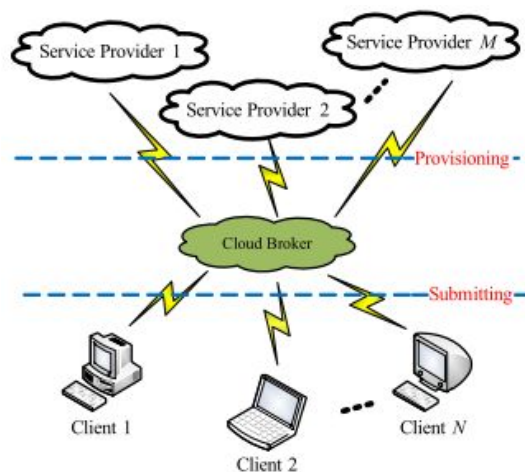


図 4 : IoT のためのクラウドシステム

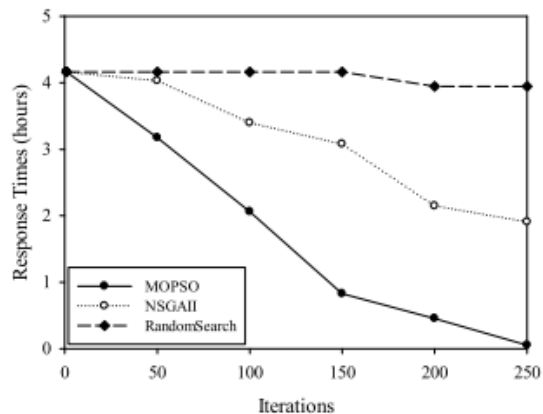


図 5 : 性能評価比較 : サービス応答時間

しながら、QoE を保証するクラウドシステムの構築が可能であることがわかった。この研究成果の一部は論文としてまとめ、国際的な学術論文誌で影響力の高い IEEE Transactions on Cloud Computing (TCC) [J3] および IEEE Internet of Things Journal (Impact Factor = 7.596) [J14] に掲載された。

## (3) QoP 保証かつ軽量なモバイルクラウドシステム

モバイルデバイスのデータ容量の制約は、クラウドを利用することで解消することができる一方、データの安全性の観点から課題が残る。クラウドサーバのデータは、他ユーザと共有する目的でアップロードされることも多々あり、悪意のあるユーザがウィルスや偽データを故意にアップロードする危険があるため、データの所有者を明らかにする必要がある。そのため、アップロードする全てのデータに対して、ユーザの認証情報を付加することが考えられるが、モバイルデバイスの資源制約 (計算能力やバッテリー) から現実的な解決策ではない。

本研究では、クラウドに認証権限を委任するためのプロトコル MEDAP (Multi-Entities Delegated Authentication Protocol) を提案し、上述の問題を解決した [J16]。図 6 は、MEDAP を適用したモバイルクラウドシステムのモデルであり、複数のクラウドサーバがデ

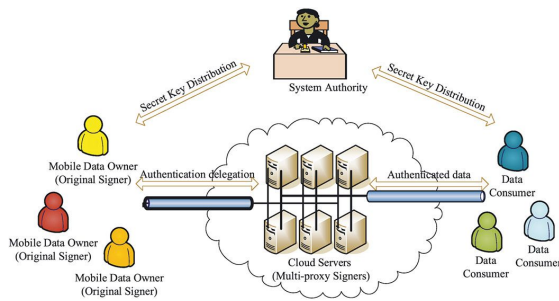


図 6 : MEDAP (Multi-Entities Delegated Authentication Protocol)

ータ所有者の代わりにデータの認証と、データ使用者へのデータ配布を行う。提案プロトコルは、数式によるモデル化および数値解析によって、安全性を証明した。また、提案手法は従来のペアリング暗号方式と比較してより効率的であり、通信オーバーヘッドもサーバ数に対して一定である。

以上により、QoS を保証し、かつ軽量に動作するクラウドシステムの構築が可能であることがわかった。この研究成果の一部は論文としてまとめ、国際的な学術論文誌で影響力の高い Wiley Security and Communication Networks ( Impact Factor = 1.067 ) [J16] に掲載された。

#### 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 82 件 )

- [J1] Zijian Zhang, Mianxiong Dong, Liehuang Zhu, Zhitao Guan, Ruoyu Chen, Rixin Xu, Kaoru Ota, "Achieving Privacy-friendly Storage and Secure Statistics for Smart Meter Data on Outsourced Clouds," *IEEE Transactions on Cloud Computing (TCC)*, DOI: 10.1109/TCC.2017.2685583, In Press.
- [J2] Ming Tao, Kaoru Ota, Mianxiong Dong, "Dependency-aware Dependable Scheduling Workflow Applications with Active Replica Placement in the Cloud," *IEEE Transactions on Cloud Computing (TCC)*, DOI: 10.1109/TCC.2016.2628374, In Press.
- [J3] He Li, Kaoru Ota, Mianxiong Dong, Athanasios Vasilakos, Koji Nagano, "Multimedia Processing Pricing Strategy in GPU-accelerated Cloud Computing," *IEEE Transactions on Cloud Computing (TCC)*, DOI: 10.1109/TCC.2017.2672554, In Press.
- [J4] Jin He, Kaoru Ota, Mianxiong Dong, Laurence T. Yang, Minyu Fan, Guangwei Wang, Stephen S. Yau, "Customized Network Security for Cloud Service," *IEEE Transactions on Services Computing (TSC)*, DOI: 10.1109/TSC.2017.2725828, In Press.
- [J5] Weiyang Wang, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Jun Wu, Jianhua Li, Gaolei Li, "CDLB: A Cross-Domain Load Balancing Mechanism for Software Defined Networks in Cloud Data Center," *International Journal of Computational Science and Engineering*, In Press.
- [J6] Kaoru Ota, Mianxiong Dong, Jinsong Gui, Anfeng Liu, "QUOIN: Incentive Mechanisms for Crowd Sensing Networks," *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 114-119, DOI: 10.1109/MNET.2017.1500151, March-April 2018.
- [J7] Ming Tao, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Zhimin He, "Multiobjective Network Opportunistic Access for Group Mobility in Mobile Internet," *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 1024-1033, DOI: 10.1109/JSYST.2016.2569568, March 2018.
- [J8] Xiaoyi Tao, Kaoru Ota, Mianxiong Dong, Heng Qi, Keqiu Li, "Performance Guaranteed Computation Offloading for Mobile-Edge Cloud Computing," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 6, pp. 774-777, DOI: 10.1109/LWC.2017.2740927, December 2017.
- [J9] Ming Tao, Kaoru Ota, Mianxiong Dong, "Ontology-based Data Semantic Management and Application in IoT- and Cloud-Enabled Smart Homes," *Future Generation Computer Systems (Elsevier)*, vol. 76, pp. 528-539, DOI: 10.1016/j.future.2016.11.012, November 2017.
- [J10] Kaoru Ota, Teerawat Kumrai, Mianxiong Dong, Jay Kishigami, Minyi Guo, "Smart infrastructure design for Smart Cities," *IEEE IT Professional*, vol. 19, no. 5, pp. 42-49, DOI: 10.1109/MITP.2017.3680957, October 2017.
- [J11] Kaoru Ota, Minh Son Dao, Vasileios Mezaris, Francesco G. B. De Natale, "Deep Learning for Mobile Multimedia: A Survey," *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, Vol. 13, Issue 3s, Article No. 34, DOI: 10.1145/3092831, July 2017.
- [J12] He Li, Kaoru Ota, Mianxiong Dong, Minyi Guo, "Mobile Crowdsensing in Software Defined Opportunistic Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 140-145,

- DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600719, 2017.
- [J13] Guangqian Xie, Kaoru Ota, Mianxiong Dong, Feng Pan, Anfeng Liu, "Energy-Efficient Routing for Mobile Data Collectors in Wireless Sensor Networks with Obstacles," *Peer-to-Peer Networking and Applications (Springer)*, Vol. 10, Issue 3, pp.472-483, DOI:10.1007/s12083-016-0529-1, May 2017.
- [J14] Teerawat Kumrai, Kaoru Ota, Mianxiong Dong, Jay Kishigami, Dan Keun Sung, "Multi-objective Optimization in Cloud Brokering Systems for Connected Internet of Things," *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 4, Issue. 2, pp. 404-413, DOI: 10.1109/JIOT.2016.2565562, April 2017.
- [J15] Ming Tao, Kaoru Ota, Mianxiong Dong, "Foud: Integrating Fog and Cloud for 5G-Enabled V2G Networks," *IEEE Network*, Vol. 31, no. 2, pp. 8-13, DOI: 10.1109/MNET.2017.1600213NM, March/April 2017.
- [J16] Lei Zhang, Lifei Wei, Dongmei Huang, Kai Zhang, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, "MEDAPs: Secure Multi-Entities Delegated Authentication Protocols for Mobile Cloud Computing," *Wiley Security and Communication Networks*, Vol. 9, Issue 16, pp. 3777-3789, DOI: 10.1002/sec.1490, November 2016.
- [J17] Yanliang Hu, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Anfeng Liu, Minyi Guo, "Mobile Target Detection in Wireless Sensor Networks with Adjustable Sensing Frequency," *IEEE Systems Journal*, Vol. 10, Issue 3, pp.1160-1171, DOI: 10.1109/JSYST.2014.2308391, September 2016. (ESI Highly Cited Paper)
- [J18] Huaqun Wang, Keqiu Li, Kaoru Ota, Jian Shen "Remote Data Integrity Checking and Sharing in Cloud-Based Health Internet of Things," Invited paper, *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol. E99.D, No. 8, pp. 1966-1973, DOI: 10.1587/transinf.2015IN10001, August 2016.
- [J19] Zhenyu Zhou, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Guojun Wang, Laurence T. Yang, "Energy-Efficient Resource Allocation for D2D Communications Underlying Cloud-RAN based LTE-A Networks," *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 3, Issue 3, pp. 428-438, DOI: 10.1109/JIOT.2015.2497712, June 2016.
- [J20] He Li, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Minyi Guo, "Pricing and Repurchasing for Big Data Processing in Multi-clouds," *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC)*, Vol. 4, No. 2, pp. 266-277, DOI: 10.1109/TETC.2016.2517930, April-June 2016.
- [J21] Jin He, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Minyu Fan, Guangwei Wang, "NetSecCC: A scalable and fault-tolerant architecture for cloud computing security," *Peer-to-Peer Networking and Applications (Springer)*, Vol. 9, Issue 1, pp. 67-81, DOI: 10.1007/s12083-014-0314-y, January 2016.
- [J22] He Li, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, "Radio Access Network Virtualization for the Social Internet of Things," *IEEE Cloud Computing*, vol.2, no.6, pp.42-50, DOI: 10.1109/MCC.2015.114, November-December 2015.
- 〔学会発表〕(計 22 件)
- [C1] Weiyang Wang, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Jun Wu, Jianhua Li, Gaolei Li, "An Instant Message Scheme for Cross-Domain SDN Controllers in Cloud Data Center," *The 2016 International Conference on Smart X (Smart X 2016)*, Dailian, China, July 29-31, 2016
- [C2] He Jin, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Mingyu Fan, Guangwei Wang, "PNSICC: A Novel Parallel Network Security Inspection Mechanism based on Cloud Computing," *15th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP 2015)*, Zhangjiajie, China, November 18-20, 2015.
- [C3] Jun Long, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Anfeng Liu, "A Green TDMA Scheduling Algorithm for Prolonging Lifetime in Wireless Sensor Networks," *The 10th International Conference on Green, Pervasive and Cloud Computing (GPC 2015)*, Plantation Island, Fiji, 4-6 May 2015 (Best Paper Award).
- 〔その他〕  
ホームページ：  
<http://www3.muroran-it.ac.jp/wmlab/~ota/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

太田 香 (OTA, Kaoru)  
室蘭工業大学・工学研究科・助教  
研究者番号：5 0 7 1 3 9 7 1