

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 19 日現在

機関番号：10103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26730056

研究課題名(和文) ユーザ参加型センシングにおけるアルゴリズムおよびインセンティブモデルに関する研究

研究課題名(英文) Research on Algorithms and Incentive Models in Participatory Sensing

研究代表者

董 冕雄 (DONG, Mianxiang)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20728274

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)：近年スマートフォンの普及により、ユーザ参加型センシング(Participatory Sensing、以下PS)というスマートフォンを利用して低コストかつ広範囲に渡るセンサデータを収集する技術が注目を集めている。本研究はPSの以下3つの根幹技術について研究を行った。モバイル・スマートフォンネットワークにおける様々なアルゴリズムの設計、PSにおけるユーザ激励型のインセンティブモデルの構築、PSのスケーラビリティに関する研究。これらの研究成果の一部は、国際会議や学術論文にて発表された。

研究成果の概要(英文)：With the wide proliferation of smartphones, as well as the ubiquitous availability of network services, participatory sensing (PS hereafter) has gained lots of attentions in recent years. It enables to broadly collect information via the smartphones with embedded sensors at lower cost than a traditional way of data collection using sensor networks. In this research, we address the following three challenges, 1) Design algorithms for mobile/smartphones networks, 2) Develop incentive models/mechanisms for PS, and 3) Study on scalability for PS. Achievements of this research have been published in international conferences as well as international journals.

研究分野：情報工学

キーワード：ユーザ参加型センシング インセンティブモデル アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

製作技術の進歩により、より小さく、より低コストのセンサデバイスが増加し、近年センサネットワークの学術的な研究が盛んに行われてきた。しかし、研究はある程度技術的には成功したものの、導入コストが高いため、商用にはまだ普及していない。一方、携帯端末の中でも多種のセンサを内蔵したスマートフォンの普及が進んでいる。2013年10月16日時点では、日本のスマートフォン加入者数は5000万台を突破している。このスマートフォンの普及効果により、携帯端末を利用して低コストかつ広範囲に渡るセンサデータを収集する Participatory Sensing(ユーザ参加型センシング、以下 PS)と呼ばれる技術が注目を集めている。実際に日本の産業界において、大手携帯キャリア3社がスマートフォンによる PS アプリケーションの開発に精力を注いでいる。

PS では、スマートフォンを持つ歩行者やセンサが組み込まれている自動車、ツイッターなどの Web データ等、センサとみなす媒体数が多く、またその種類も豊富であるため、広域かつ多様な情報を容易に収集できる利点がある。アプリケーションの応用例も多岐にわたるが、主に2つのカテゴリに分けることができる。ひとつは環境センシングである。例えば、交通量のモニタリング、PM2.5、騒音レベルといった環境データの観測である。もう一つは個人のモニタリングで、その例は医療と健康における応用である。活動量計などのウェアラブルデバイスの普及により、より手軽に健康維持や体調管理のためのセンシングが可能になっている。

2. 研究の目的

本研究は PS の学術的な問題を解決しながら、実用化のための主に以下の3つの根幹技術の研究を目標に掲げる。

(1) モバイル・スマートフォンネットワークにおける様々なアルゴリズムを設計する。PS において、往々にしてリアルタイム性が求められる場合は多い。携帯回線網の利用によりある程度のリアルタイム性は保てるが、近年の携帯回線網の飽和は深刻な問題となっている。また災害時のインフラ壊滅の状況下では、自立型スマートフォンネットワークが求められている。

以上の点から、まず本研究では、モバイル・スマートフォンネットワークの自立的なデータ転送アルゴリズムを設計する。送信端末から宛先端末へデータを送る際、転送アルゴリズムは、ルート上の各端末間でどのようにデータを受け渡しすれば最良かを決定する方法である。スマートフォンの可動性から端末間のリンクは非常に不安定であり、転送アルゴリズムは重要な要素技術である。次に、バッテリー消費の早いスマートフォンにとって消費電力が最も重要であるため、省エネ

アルゴリズムの設計が必要である。

(2) PS におけるユーザ激励型のインセンティブモデルを構築する。PS に参加することはユーザにとって、バッテリー消費や計算負荷を要するため、多くのユーザの参加を阻害している。さらに PS に参加することで、プライバシーが漏洩の懸念もある。そこで、ユーザを積極的に参加させる激励型のインセンティブモデルの構築が必須である。既存研究の多くは固定した奨励でユーザのインセンティブを引き出そうとするだけで、時間、状況についての動的対応ができていない。本研究はゲーム理論及び経済学の理論でユーザ参加の動機モデルを構築する。

(3) PS のスケーラビリティについて研究する。PS は正確性が求められながら、同時にスケーラビリティも満たさなければいけない。正確性を保った上で、参加するユーザを選別することは、システムの安定性に役立つのみでなく、ユーザ側のコスト削減、ユーザの積極性を上げるのにつながる。確率論のアプローチで、最適なユーザ参加数を算出し、PS ネットワークのスケーラビリティを保つ研究をする。

3. 研究の方法

研究目的で述べた(1)の課題については、以下の手順で研究を進めた。

(1) より優れたアルゴリズムを構築するために、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幅広い調査を行う。

(2) 既存のアルゴリズムの長所と短所を分析する。それぞれの利点を生かしつつ、お互いの欠点が補われるように融合させ、新たなアルゴリズムを構築する。

(3) 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の検証を行う。本研究が目的とする高効率性及び省エネ保証の実現が可能になるよう、必要に応じて再設計を行う。

研究目的の(2)・(3)の課題については、以下の手順で研究を進めた。

(1) 国内外のオープンデータを利用して、膨大な実データを分析し、ユーザの移動モデル(個別、複数、時間別)、スマートフォン間のコンタクトモデル、コンタクト密度の時間的および位置的な変化、などの特徴を抽出することで、考案するモデルに対する有用性について考察する。データからの特徴の抽出によって有用なモデルを設計できる可能性を明らかにする。

(2) 提案アルゴリズム・モデルが完成した後は、シミュレーションによる本格的な性能評価へと移る。この時、各要件に係るパラメ

ータの調節においては、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る。

(3)シミュレーションによって優位性が示されたアルゴリズムを実装したスマートフォンテストベッドによる検証を行う。

4. 研究成果

本研究で得られた主要な研究成果を中心に紹介する。

(1) モバイル・スマートフォンネットワークにおける様々なアルゴリズムの設計

[16]の論文では、非協力的なユーザを含むモバイルネットワークにおける端末間メッセージ転送アルゴリズムについて研究し、CAMF (Context-Aware Message Forwarding) を提案した。CAMF では、各端末の転送能力(他端末との出会い度、非協力度)及び受信能力(電力残量、メモリ容量)を総合的に算出し、その値を元に転送端末を選択するよう設計した。性能評価のためのシミュレーションは実データを用いて行い、メッセージ到達率(図1a)、伝送遅延(図1b)、消費電力(図1c)について検証した。従来のメッセージばら撒き型(Epidemic)と比較して、高到達率かつ低遅延を維持しつつ、スマートフォンの省エネに成功した。

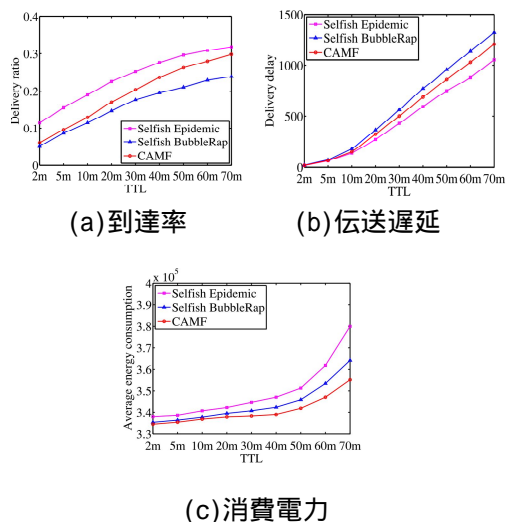


図1 CAMFの性能評価結果

(2) インセンティブモデルの構築

[11]の論文では、ユーザの提供する情報の被覆領域を考慮したインセンティブメカニズムを提案した。PSにおいて、ユーザはあらゆる場所でセンシングが可能であることから、「情報が収集された場所」というのもサービス提供者にとって重要な情報の特徴である。本論文では、サービス提供者が目的とする範囲の被覆率を考慮しながら、対象となるユーザに情報を提供してもらえらる仕組みを考案した(図2)。性能評価のシミュレーション実験では、提案手法は被覆率および参加ユーザ数を一定に保つことができること

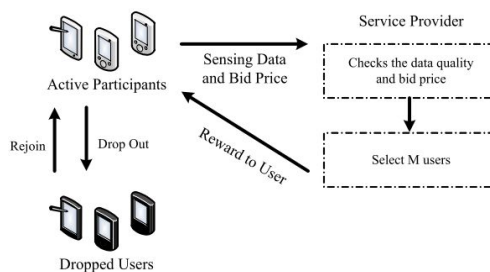


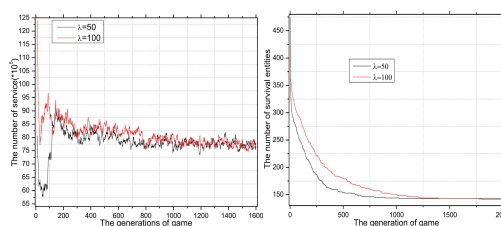
図2 サービス提供者と参加ユーザの関係

がわかった。

また[18]の論文では、サービス提供者とユーザ間の料金競争モデルについて研究し、ゲーム理論を用いてモデル化できることを明らかにした。また、提案モデルを用いてユーザを積極的に参加させる激励型のインセンティブメカニズムの構築も行い、シミュレーション実験では、提案手法が参加者数増加に繋がることを確認できた。

(3) スケーラビリティについての研究

[14]の論文では、(2)で提案されたインセンティブモデルに改良を加えて、スケーラビリティを考慮した Game based Services Price Decision (GSPD)モデルを考案した。GSPDでは、ユーザの提供する情報およびサービス提供者のサービスに対して、状況に応じて価格を変動させることで、ユーザのインセンティブを引き出す工夫をした。性能評価のシミュレーション実験では、提案手法のスケーラビリティについて検証を行った。ユーザから収集できる情報は時間が経過しても一定の割合を保つ事ができる(図3a)一方で、参加ユーザ数は時間とともに減少し、収束する(図3b)。以上のことから、提案手法は、適切なユーザを選択しながら、必要な情報を収集できることがわかった。



(a)収集情報量 (b)参加ユーザ数

図3 GSPDの性能評価結果

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52件)全て査読有り

- [1] M. Dong, K. Ota, A. Liu, "RMER: Reliable and Energy Efficient Data Collection for Large-scale Wireless Sensor Networks," *IEEE Internet of*

- Things Journal*, 印刷中, <http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2016.2517405>
- [2] H. Li, M. Dong, K. Ota, M. Guo, "Pricing and Repurchasing for Big Data Processing in Multi-clouds," *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC)*, 印刷中, <http://dx.doi.org/10.1109/TETC.2016.2517930>
- [3] T. Kumrai, K. Ota, M. Dong, J. Kishigami, D. Sung, "Multi-objective Optimization in Cloud Brokering Systems for Connected Internet of Things," *IEEE Internet of Things Journal*, 印刷中, <http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2016.2565562>
- [4] H. Li, M. Dong, K. Ota, "Control Plane Optimization in Software Defined Vehicular Ad-Hoc Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology (TVT)*, 印刷中, <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2016.2563164>
- [5] L. Kuang, L. Yang, J. Feng, M. Dong, "Secure Tensor Decomposition Using Fully Homomorphic Encryption Scheme," *IEEE Transactions on Cloud Computing (TCC)*, 印刷中, <http://dx.doi.org/10.1109/TCC.2015.2511769>
- [6] S. Chang, H. Zhu, M. Dong, K. Ota, X. Liu, X. Shen, "Private and Flexible Urban Message Delivery," *IEEE Transactions on Vehicular Technology (TVT)*, 印刷中, <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2015.2466651>
- [7] Z. Su, Q. Xu, M. Fei, M. Dong, "Game Theoretic Resource Allocation in Media Cloud with Mobile Social Users," *IEEE Transactions on Multimedia (TMM)*, 印刷中.
- [8] M. Dong, K. Ota, A. Liu, "RFL: Achieving Energy Efficient Privacy Preserving in Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC)*, 印刷中.
- [9] J. Long, M. Dong, K. Ota, A. Liu, "A Green TDMA Scheduling Algorithm for Prolonging Lifetime in Wireless Sensor Networks," *IEEE Systems Journal*, 印刷中, <http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2015.2448355>.
- [10] D. Li, M. Dong, Y. Tang, L. Yang, K. Ota, G. Zhao, "Triple-L: Improving CPS Disk I/O Performance in a Virtualized NAS Environment," *IEEE Systems Journal*, 印刷中, <http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2015.2456038>.
- [11] Y. Hu, M. Dong, K. Ota, A. Liu, M. Guo, "Mobile Target Detection in Wireless Sensor Networks With Adjustable Sensing Frequency," *IEEE Systems Journal*, 印刷中, <http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2014.2308391>
- [12] C. Zhang, M. Dong, K. Ota, M. Guo, "Social Network Optimized Taxi Sharing Service for Smart Cities," *IEEE IT Professional*, 印刷中.
- [13] M. Tao, M. Dong, K. Ota, Z. He, "Multi-objective Network Opportunistic Access for Group Mobility in Mobile Internet," *IEEE Systems Journal*, 印刷中, <http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2016.2569568>
- [14] Z. Liu, M. Dong, B. Gu, C. Zhang, Y. Ji, Y. Tanaka, "Fast-start Video Delivery in Future Internet Architectures with Inter-domain Caching," *ACM Springer Mobile Networks and Applications (MONET)*, 印刷中, <http://dx.doi.org/10.1007/s11036-016-0694-8>
- [15] Z. Zhou, M. Dong, K. Ota, G. Wang, L. T. Yang, "Energy-Efficient Resource Allocation for D2D Communications Underlying Cloud-RAN based LTE-A Networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, iss. 3, pp. 428-438, 2016, <http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2015.2497712>
- [16] M. Dong, K. Ota, L. T. Yang, A. Liu, M. Guo, "LSCD: A Low-Storage Clone Detection Protocol for Cyber-Physical Systems," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems (TCAD)*, vol. 35, iss. 5, pp. 712-726, 2016, <http://dx.doi.org/10.1109/TCAD.2016.2539327>
- [17] X. Liu, M. Dong, K. Ota, P. Hung, A. Liu, "Service Pricing Decision in Cyber-Physical Systems: Insights from Game Theory," *IEEE Transactions on Services Computing (TSC)*, vol. 9, iss. 2, pp. 186-198, 2016, <http://dx.doi.org/10.1109/TSC.2015.2449314>
- [18] M. Dong, K. Ota, A. Liu, M. Guo, "Joint Optimization of Lifetime and

- Transport Delay under Reliability Constraint Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS)*, vol. 27, iss. 1, pp. 225-236, 2016, <http://dx.doi.org/10.1109/TPDS.2015.2388482>
- [19] K. Wei, M. Dong, J. Weng, G. Shi, K. Ota, K. Xu, "Congestion-aware Message Forwarding in Delay Tolerant Networks: A Community Perspective," *Wiley Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 27, iss. 18, pp. 5473-5839, 2015, <http://dx.doi.org/10.1002/cpe.3647>
- [20] Z. Zhou, M. Dong, K. Ota, Z. Chang, "Energy-Efficient Context-Aware Matching for Resource Allocation in Ultra-Dense Small Cells," *IEEE Access*, vol.3, pp.1849-1860, 2015, <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2478863>
- [21] M. Dong, X. Liu, Z. Qian, A. Liu, T. Wang, "QoE-Ensured Price Competition Model for Emerging Mobile Networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no.4, pp. 50-57, 2015, <http://dx.doi.org/10.1109/MWC.2015.7224727>
- [22] K. Wei, M. Dong, K. Ota, K. Xu, "CAMF: Context-aware Message Forwarding in Selfish Mobile Social Networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS)*, vol.26, no.8, pp. 2178-2187, 2015, <http://dx.doi.org/10.1109/TPDS.2014.2346212>
- [23] M. Dong, H. Li, K. Ota, J. Xiao, "Rule Caching in SDN-Enabled Mobile Access Networks," *IEEE Network*, vol.29, no.4, pp.40-45, 2015, <http://dx.doi.org/10.1109/MNET.2015.7166189>
- [24] J. Long, M. Dong, K. Ota, A. Liu, "Reliability Guaranteed Efficient Data Gathering in Wireless Sensor Networks," *IEEE Access*, vol.3, pp.430-444, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpdc.2015.04.003>
- [25] Z. Zhou, M. Dong, K. Ota, R. Shi, Z. Liu, T. Sato, "Game-theoretic approach to energy-efficient resource allocation in device-to-device underlay communications," *IET Communications*, vol.9, no.3, pp.375-385, 2015, <http://dx.doi.org/10.1049/iet-com.2014.0337>
- [26] M. Dong, K. Ota, L. Yang, S. Chang, H. Zhu, Z. Zhou, "Mobile agent-based Energy-aware and User-centric Data Collection in Wireless Sensor Networks," *Computer Networks (Elsevier)*, vol. 74, Part B, pp.58-70, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2014.06.019>
- [27] M. Dong, K. Ota, M. Lin, S. Du, H. Zhu, "UAV-assisted data gathering in wireless sensor networks," *Journal of Supercomputing (Springer)*, vol. 70, iss. 3, pp.1142-1155, 2014, <http://dx.doi.org/10.1007/s11227-014-1161-6>
- [28] M. Dong, H. Li, K. Ota, L. Yang, H. Zhu, "Multicloud-Based Evacuation Services for Emergency Management," *IEEE Cloud Computing*, vol.1, no.4, pp.50-59, 2014, <http://dx.doi.org/10.1109/MCC.2014.85>
- [29] M. Dong, T. Kimata, K. Sugiura, K. Zettsu, "Quality-of-Experience (QoE) in Emerging Mobile Social Networks," *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol.97-D, no.10, pp.2606-2612, 2014, http://www3.muroran-it.ac.jp/enes/~mxdong/journal/e97-d_10_2606.pdf
- [30] Z. Zhou, M. Dong, K. Ota, J. Wu, T. Sato, "Energy Efficiency and Spectral Efficiency Tradeoff in Device-to-Device (D2D) Communications," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol.3, no.5, pp.485-488, 2014, <http://dx.doi.org/10.1109/LWC.2014.2337295>
- [31] M. Dong, K. Ota, H. Li, S. Du, H. Zhu, S. Guo, "RENDEZVOUS: Towards Fast Event Detecting in Wireless Sensor and Actor Networks," *Computing (Springer)*, vol.96, no.10, pp.995-1010, 2014, <http://dx.doi.org/10.1007/s00607-013-0364-7>
- [学会発表](計32件)全て査読有り
- [1] H. Li, K. Ota, M. Dong, "Network Virtualization Optimization in Software Defined Vehicular Ad-Hoc Networks," *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC2016-Fall)*, モントリオール(カナダ), 2016/9/18-21.
- [2] C. Zhang, K. Ota, M. Dong, "Energy-Efficient Cooperative Positioning in Mobile Social Networks," *2016 IEEE 84th Vehicular*

- Technology Conference (VTC2016-Fall), モントリオール (カナダ), 2016/9/18-21.
- [3] F. Lv, H. Zhu, H. Xue, Y. Zhu, S. Chang, M. Dong, M. Li, "An Empirical Study on Urban IEEE 802.11p Vehicle-to-Vehicle Communication," *The IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking (SECON 2016)*, ロンドン(イギリス), 2016/6/27-30.
- [4] Z. Liu, M. Dong, H. Zhou, X. Wang, Y. Ji, Y. Tanaka, "Device-to-device Assisted Video Frame Recovery for Picocell Edge Users in Heterogeneous Networks," *IEEE International Conference on Communications (ICC 2016)*, クアラルンプール(マレーシア), 2016/5/23-27.
- [5] C. Huang, J. Marshall, D. Wang, M. Dong, "Towards Reliable Social Sensing in Cyber-Physical-Social Systems," *The 1st IEEE Workshop on Parallel and Distributed Processing for Computational Social Systems In conjunction with IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, シカゴ(アメリカ), 2016/5/23-27.
- [6] X. Deng, Y. Wu, M. Dong, C. Li, Y. Pan, "A Weighted Network Model Based on Correlation Degree between Nodes," *11th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN 2015)*, 深セン (中国), 2015/12/16-18.
- [7] Z. Zhou, M. Dong, Z. Chang, B. Gu, "Combined Centralized and Distributed Resource Allocation for Green D2D Communications," *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC 2015)*, 深セン (中国), 2015/11/2-4.
- [8] M. Dong, K. Ota, A. Liu, "Preserving Source-Location Privacy Through Redundant Fog Loop for Wireless Sensor Networks," *13th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC-2015)*, リバプール (イギリス), 2015/10/26-28, (**Best Paper Award**)
- [9] J. Long, M. Dong, K. Ota, A. 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)*, プランテーションアイランド (フィジー), 2015/5/4-6, (**Best Paper Award**).
- [10] Z. Zhou, M. Dong, K. Ota, J. Wu, T. Sato, "Distributed Interference-Aware Energy-Efficient Resource Allocation for Device-to-Device Communications Underlying Cellular Networks," *IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2014)*, オースチン (アメリカ), 2014/12/8-12.
- [11] T. Kumrai, K. Ota, M. Dong, P. Champrasert, "An incentive-based evolutionary algorithm for participatory sensing," *IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2014)*, オースチン (アメリカ), 2014/12/8-12.
- [12] Z. Zhou, M. Dong, K. Ota, B. Gu, T. Sato, "Stackelberg-Game based Distributed Energy-Aware Resource Allocation in Device-to-Device Communications," *IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS) 2014*, マカオ (中国), 2014/11/19-21.
- [13] M. Dong, T. Kimata, K. Zettsu, "Service-Controlled Networking: Dynamic In-Network Data Fusion for Heterogeneous Sensor Networks," *The 1st International Workshop on Future Technologies for Smart Information Systems (FTSIS 2014) in conjunction with the 33rd IEEE Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS 2014)*, 奈良県・奈良市・東大寺総合文化センター, 2014/10/6-9.
- [14] G. Luo, Z. Qian, M. Dong, K. Ota, S. Lu, "Network-Aware Re-Scheduling: Towards Improving Network Performance of Virtual Machines in a Data Center," *In Proc. of 14th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing, (ICA3PP 2014)*, 大連 (中国), 2014/8/24-27, (**Best Paper Award**) **1 out of 285 submissions**
- [その他]
- [1] Welcome to Mianxiong Dong's Website, <http://www3.muroran-it.ac.jp/enes/~mxdong/index.html>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
董 冕雄 (DONG, Mianxiong)
室蘭工業大学・工学研究科・准教授
研究者番号：20728274