

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300037

研究課題名(和文) アドホックネットワークにおける協調作業支援のためのデータアクセス機構の研究

研究課題名(英文) Research on Data Access Mechanisms for Supporting Collaborative Works in Ad Hoc Networks

研究代表者

原 隆浩 (Hara, Takahiro)

大阪大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：20294043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、災害時などにおいてモバイル端末のみで一時的に構成されるアドホックネットワークを想定し、救助員などの複数のユーザが協調作業を行う場合のデータアクセスの支援を目的とした技術開発を行った。特に、Top-k検索(条件に合致する上位k個のデータの検索)やk最近傍検索(指定位置に近いk位までのユーザやデータを検索)などの高度な検索を実行するための技法を確立した。

本研究の成果は、論文誌8編、学会発表33件、図書1件で公表されており、モバイル分野で世界最高峰の論文誌などが含まれている。

本研究の考案技術は、災害時などの情報共有を飛躍的に向上する可能性があり、社会的な意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we have developed various data access technologies for supporting collaborative works of multiple users who construct a mobile ad hoc network such as rescue workers at a disaster site. In particular, we have proposed a number of techniques for efficiently processing top-k queries (retrieving k data items with the highest scores) and k-nearest neighbor queries (finding k users or data items closest to the query specified position).

The research achievements have been published in 8 journals, 33 conferences, and 1 book, including a paper published in a top-ranked journal in the mobile computing field.

The techniques proposed in this project have a possibility to significantly improve information sharing in situations without network infrastructure such as disaster situations, and thus, have a big social impact.

研究分野：データ工学

キーワード：モバイルシステム アドホックネットワーク データアクセス 問合せ処理

1. 研究開始当初の背景

近年の計算機の小型化と無線通信技術の発展により、無線通信機能をもつ小型計算機（モバイル端末）のみで一時的なネットワークを形成する（モバイル）アドホックネットワークに対する注目が高まっている。アドホックネットワークでは、モバイル端末自身が通信パケットを中継し、インターネットなどの固定インフラを必要としないことから、災害時の救助活動や子供も見守りなどの防犯活動といった社会性の高い応用への適用が期待されている。アドホックネットワークの応用には、複数のユーザによる協調作業の効率化のために、ユーザの作業状況や、ユーザおよびセンサが収集したデータの統計情報など、モバイル端末間でデータを共有するものが多い。そのため、モバイル端末間のデータアクセスを効率的に実行するための基盤技術が重要となる。

2000 年台以降、アドホックネットワーク上でデータアクセスを支援するための様々な研究が行われている。しかし、これらの研究のほとんどは、データ識別子を指定して一つのデータを取得するような単純なデータアクセスモデルを想定しており、実際の応用で頻繁に用いられるような、ある条件に最も合致している上位 k 件のデータを取得するという複雑なデータアクセスを想定していない。このような実応用を考慮したデータアクセスモデルを想定し、データアクセス性能を向上することが、学術的、社会的の両面から急務と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、災害時などにおいてモバイル端末のみで一時的に構成されるアドホックネットワークを想定し、救助員などの複数のユーザが協調作業を行う場合のデータアクセスの支援を目的とした技術開発を行う。特に、想定環境において頻繁に実行される Top- k 検索（条件に合致する上位 k 個のデータの取得）や k 最近傍検索（指定位置に最も近いユーザの情報やデータの取得）などを効率的に実行するために、当該分野における従来のネットワーク技術やデータ管理技術とは全く異なる新たな検索およびデータ複製配置の技法を考案する。考案技法では、モバイル端末の無線通信速度や通信容量、バッテリー制限などの物理制約を考慮し、昨今のグリーン IT に倣い低消費電力を維持しつつ、実用的なデータアクセスの成功率の達成を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、アドホックネットワークにおける Top- k 検索、 k 最近傍検索、および凸包検索という高度な検索技術について、それぞれ研究開発を推進した。具体的には、3 年間

の研究期間で、以下のように研究を進めた。

まず初年度の平成 24 年度は、返送データの効率的な絞込みを行う Top- k 検索手法、および、指定位置に近い k 台の端末を検索する k 最近傍端末検索手法について研究を推進した。平成 25 年度は、Top- k 検索のためのデータ複製配置手法、メッセージルーティング手法および複製配置を考慮した Top- k 検索手法について研究を行った。さらに、指定位置に近い k 個のデータを検索する k 最近傍データ検索手法を考案した。最終年度の 26 年度は、25 年度のメッセージルーティング手法を拡張すると共に、新たに、ネットワークを構成する全端末を包含するエリア（凸包）を検出する手法についても研究を行った。

これらの考案手法は、該当する各年度においてシミュレーション実験などで、その有効性を詳細に検証した。

4. 研究成果

本研究の主要な成果として、Top- k 検索および k 最近傍検索に関するものを概説する。

(1) Top- k 検索手法、複製配置手法

複製が存在する環境での Top- k 検索

まず、既存研究の手法[2]により、Top- k 検索中にデータの複製が配置される環境を想定する。ただし、この手法は、特に Top- k 検索を意識したものではない。データの複製を用いることによりデータの可用性（アクセス成功率）を向上する可能性はあるが、送信データの重複が起きるという欠点もある。検索処理のための通信量を削減するためには、重複返信を削減しつつ、必要なデータの返信を保証することが重要である。特に、想定するデータ複製手法では、スコアの大きいデータが優先して複製される。そのため、データの複製を考慮しない場合、多くの端末が同じデータの送信を開始してしまう。

そこで本研究では、既存手法[1]を拡張し、複製データを考慮した Top- k 検索手法を考案した。具体的には、Top- k クエリメッセージを受信した端末が、自身が把握しているデータ（複製を含む）の内、いくつかのデータのスコアをクエリメッセージに添付し、これを送信する。これにより、クエリメッセージの転送経路上に存在する端末が保持しているデータおよび複製から上位 k 番目のデータのスコアを推定でき、無駄なデータの送信を防ぐ。さらに、考案手法では、データ複製の存在により、全端末にクエリメッセージを送信しなくとも上位 k 個のデータを取得できる場合が多いことを考慮して、クエリメッセージの転送の必要性を自律的に判断し、検索時間の短縮も図る。

考案手法の性能評価を、詳細なシミュレーション実験により行った。その結果、考案手法は、複製を考慮しない方法よりも通信量および検索時間を削減しつつ、高い検索精度を達成することを確認した。

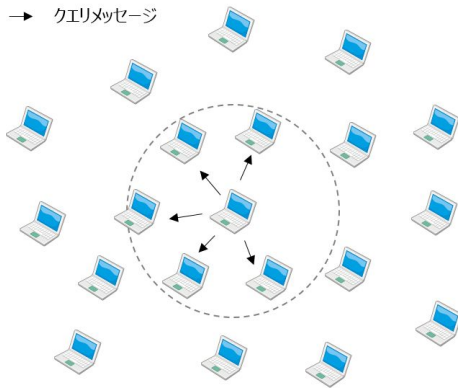


図 1 : Top-k 検索手法

Top-k 検索向けの複製配置、検索処理

Top-k 検索において通信量および遅延を削減するためには、近くの端末のみにアクセスすることで上位 k 個のデータを取得できるように、効果的にデータの複製を配置することが望ましい。また、端末の移動によるネットワークトポロジの変化に応じて、複製を再配置することはオーバーヘッドが大きいため、トポロジ変化に依存しない方法を実現することが望ましい。

そこで、本研究では、これらの要件を満たすデータの複製配置手法を考案した。さらに、このデータ複製配置手法に適した Top-k 検索手法を新たに考案した。この検索手法では、近くに存在している端末数を推定し、Top-k クエリメッセージの転送ホップ数を決定する。そのホップ数だけクエリメッセージを転送し、上位 k 個のデータを取得する。例えば図 1 では、中心に存在している端末が Top-k 検索を行っている。転送ホップ数を計算（この場合は 1）し、1 ホップ内の端末にのみクエリメッセージを送信する。これで上位 k 個のデータが揃わなかった場合、転送ホップ数を再計算し、同様の操作を繰り返す。

考案手法の有効性を、詳細なシミュレーション実験によって検証した。その結果、考案手法は検索精度を保ちつつ、通信量および遅延を大幅に削減できることを確認した。

(2) Top-k 検索のためのメッセージルーティング手法

Top-k 検索向けルーティング手法

本研究で考案した Top-k 検索手法は、検索を効率的に実行できるものの、ネットワーク内の全ての端末が Top-k クエリメッセージを受信し、データを返信していた。Top-k 検索をさらに効率化するためには、上位 k 個のデータの取得に必要な端末のみで検索処理を実行することが望ましい。

そこで本研究では、Top-k 検索のための経路表を用いたルーティング手法を考案した。考案手法では初期処理として、ネットワーク内のデータの順位表を作成し、各端末は、ど

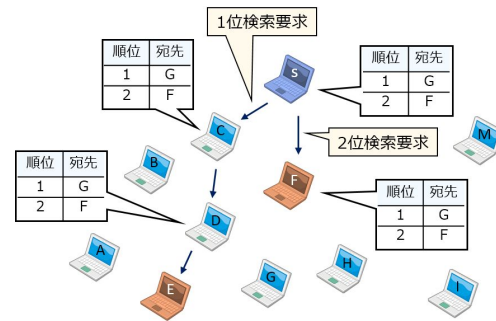


図 2 : Top-k 検索向けのルーティング手法

の隣接端末にアクセスすることで上位 k 個のデータを取得できるかを経路表により把握する。Top-k 検索では、自身の経路表をもとに Top-k クエリメッセージを転送し、自身が保持している上位 k 個のデータのみを返信する。これにより、検索に必要な端末のみによる Top-k 検索を実現している。

この手法では、Top-k クエリメッセージの転送経路がそれぞれのデータに対して単一となるようにクエリメッセージを送信している。例えば図 2 では、端末 E と F がそれぞれ 1 位と 2 位のデータを保持しており、端末 s が Top-k 検索を実行している。各端末は要求された順位のデータに対する宛先に向かってクエリメッセージを転送する。しかし、ネットワークトポロジの変化が頻繁に起こる場合、経路表の管理が困難となり、Top-k 検索の検索精度が低下してしまう問題がある。そこで、Top-k クエリメッセージの転送経路が複数となるようにメッセージの送信方法を拡張し、ネットワークトポロジの変化に対する耐性を向上した。

シミュレーション実験により、これらの考案手法の性能評価を行った。その結果、考案手法は既存手法と比較して、通信量を大幅に削減できることを確認した。さらに、拡張手法は、拡張前の手法よりもトポロジ変化に耐性があることを確認した。

クラスタを用いた拡張

上述の考案手法は、トポロジ変化に対する耐性の観点から、性能（検索精度）に改善の余地があった。そこで本研究では、Top-k 検索のためのクラスタを用いたルーティング手法を考案した。考案手法では、図 3 のように、順位が高いデータをもつ端末をクラスタヘッドとするクラスタリングを行い、各クラスタヘッドは高順位のデータまでのホップ数を管理する。クエリメッセージを受信したとき、そのメッセージを送信したクラスタヘッドよりも自身の方が近いデータのみを検索対象とすることにより、上位 k 個のデータを保持している端末の方向にのみクエリメッセージが転送される。また、経路表のように多くの端末ではなく、クラスタヘッドとの無線リンクのみを管理すれば良いため、ネットワークトポロジの変化に対して寛容となり、トポロジ変化が頻繁に生じる場合にも

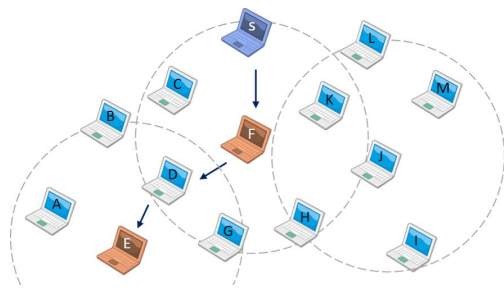


図 3: クラスタを用いたルーティング手法

Top-k 検索の検索精度が低下しにくい。

シミュレーション実験による性能評価を行い、クラスタを用いた手法は経路表を用いた手法よりも性能が高いことを確認した。

複数属性を考慮した拡張

上記の研究では、データは一意のスコアを持つことを想定しているが、データが複数の属性をもつ場合、スコアはそれらの集約値として計算されることが多い。その集約値の上位 k 個のデータを検索する場合、経路表やクラスタは各々の集約関数ごとに必要となり、効率的でない。そこで、集約関数が線形関数であることを想定し、複数属性を考慮した Top-k 検索のためのルーティング手法を考案した。考案手法では、隣接端末が保持する上位 k 個に含まれる可能性があるデータを把握し、検索に必要な端末へのクエリメッセージの転送を削減する。また、上位に含まれやすいデータを多く持つ端末をクラスタヘッドとするクラスタリングを行なうことにより、Top-k 検索に必要な端末へのクエリメッセージの転送を可能な限り削減する。

シミュレーション実験による性能評価を行い、考案手法は既存手法よりも通信量および遅延を大幅に削減できることを確認した。

(3) k 最近傍端末検索手法

EXP 法, SPI 法

指定した位置から k 最近傍となる端末は、指定位置の周辺に存在すると考えられる。そのため、指定位置の周辺のみメッセージを伝搬し、これを受信した端末が、自身に関する情報を検索要求端末に返信することにより、低トラヒックで効果的な検索を実現する。検索要求端末はまず、位置情報を用いたルーティング手法（ジオルーティング）により指定位置に最も近い端末まで検索メッセージを転送する。その後、指定位置周辺の端末の情報を取得する方法として、EXP 法および SPI 法の 2 種類の手法を考案した（図 4）。

EXP 法では、指定位置に最も近い端末が、指定位置を中心とした特定の円範囲に存在する端末に検索メッセージをフラディングし、そのメッセージを受信した端末はフラディングを開始した端末に自身の情報を返送する。SPI 法では、指定位置に最も近い端末を中心に螺旋を描くように、検索メッセージを伝搬し、k 個の端末（k 最近傍端末）の情報を取得できたら、返信を開始する。こ

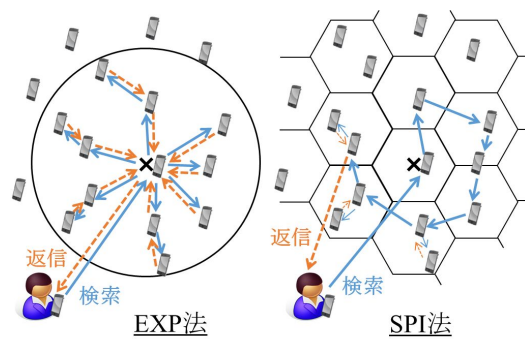


図 4: EXP 法と SPI 法

れらの方法では、各端末が検索時に受信したメッセージに含まれる情報のみから自律的に返信を行うため、事前に他の端末の情報を取得することなく検索を行うことができる。

シミュレーション実験を行い、提案手法は、トラヒックを削減しつつ、検索結果の取得精度を維持できることを確認した。ただし、SPI 法は、端末密度が疎な環境にはあまり適さないことがわかった。

EXP 法の拡張

EXP 法では、ネットワークを構成する端末の密度が未知の場合や疎密がある場合にも、メッセージ伝搬の円範囲を適切に設定する必要がある。そこで、円範囲を設定するために必要な情報を、クエリ処理中のメッセージ交換により取得し、指定位置に最も近い端末が円範囲を動的に設定するように EXP 法を拡張した。具体的には、円範囲の設定方法として、1 ホップの端末情報を用いる方法および過去のクエリ情報を用いる方法を考案した。

1 ホップの端末情報を用いる方法では、クエリを受信した指定位置に最も近い端末がクエリをブロードキャストし、これを受信した隣接端末からの返信により、指定位置周辺の端末の密度を取得し、円範囲を設定する。一方、過去のクエリ情報を用いる方法では、クエリの応答時に、クエリ実行時の端末の密度情報を中継端末に記録し、次のクエリ実行時にこの情報から指定位置付近の端末の密度を推定し、円範囲を設定する。考案手法により、ネットワークの情報を事前に取得することなく、さらに端末の密度に疎密がある場合にも円範囲を適切に設定することができる。その結果、無駄な端末からの返信を防ぎ、トラヒックを削減することができる。

シミュレーション実験により、提案手法は、円範囲を適切に設定することにより、取得精度を維持しつつトラヒックを削減できることを確認した。

(4) k 最近傍データ検索手法

k 最近傍検索の検索対象として、端末自身のみではなく、位置に関連するデータへの要求もある。ここで、アドホックネットワークにおけるデータ検索では、データの複製を利用することが有用である。各端末がデータの複製を効果的に保持することにより、狭い範

困の検索においても所望のデータを得ることができる。そこで、アドホックネットワークにおいてデータの複製を作成する環境を想定し、トラフィックおよび検索時間の低減を目的とするk最近傍データ検索手法（FA法）を考案した。FA法では、オリジナルデータは発生位置付近に留め、さらに各端末は、自身の位置の近傍データの複製を保持する。検索時には、検索範囲内へクエリをフラディングし、検索範囲内の各端末が自身の保持するデータの複製をクエリ発行端末へ返信する（図5）。このとき、自身の保持するデータの複製に関連する地理的範囲（担当領域）が大きいほど早く返信を行い、返信を傍受した端末が、返信済みのデータを返信しないことにより、できるだけ少ない端末による重複のないデータの返信を実現した。

シミュレーション実験により、提案手法は取得精度を維持しつつ、トラフィックおよび検索時間を低減できることを確認した。

(5) 研究成果の学術的重要性・インパクト

上記で示した本研究の考案手法は、アドホックネットワークにおける高度なデータ検索を支援するための効果的かつ実用的なアプローチとして、国内外で学術的に高い評価を得ている。これまでのアドホックネットワークの分野では、単純なデータアクセスを想定した研究ばかりであったが、アプリケーションにおいて頻繁に要求される高度なデータアクセスを支援する本研究は、今後の当該分野の方向性に大きな影響を与える可能性がある。

本研究では、5に示すように、論文誌に8編、国際会議に15編、国内学会に18編、図書1件(章執筆)の研究成果を公表している。これらの中には、モバイル分野および通信分野で世界最高峰の論文誌であるIEEE Transaction on Mobile Computingやモバイルデータ管理分野で著名な国際会議MDM(5編)も含まれており、本研究成果の学術的重要性の高さを表している。また、日本学術振興会賞を始めとして7件の研究賞を受賞している。雑誌論文[3]および[6]は、それぞれ研究賞[1]と[5]に伴う推薦論文である。

本研究で考案した緒技術は、災害時など通信インフラがない状況での情報共有を飛躍的に向上する可能性があり、社会的な意義が大きい。

以上のように、本研究成果は学術的および社会的にインパクトが大きく、基盤研究として、当初の目的以上の成果を達成したものと考える。

<引用文献>

[1] Ryo Hagihara, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, A Message Processing Method for Top-k Query for Traffic Reduction in Ad Hoc Networks, Proc. IEEE MDM 2009, pp.11-20, 2009.

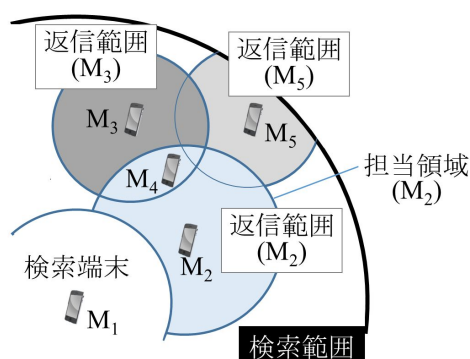


図4：EXP法とSPI法

[2] Takahiro Hara, Ryo Hagihara, Shojiro Nishio, Data Replication for Top-k Query Processing in Mobile Wireless Sensor Networks, Proc. IEEE SUTC 2012, pp.115-122, 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

[1] Keisuke Goto, Yuya Sasaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, Data Gathering Using Mobile Agents for Reducing Traffic in Dense Mobile Wireless Sensor Networks, Mobile Information Systems, Vol.9, No.4, pp.295-314, 2013年.

[2] 佐々木 勇和, 原 隆浩, 西尾 章治郎, モバイルアドホックネットワーク上のTop-k検索のための複製配置およびメッセージ処理手法, 日本データベース学会論文誌, Vol.12, No.1, pp.115-120, 2013年.

[3] 天方 大地, 佐々木 勇和, 原 隆浩, 西尾 章治郎, アドホックネットワークにおけるTop-k検索のためのルーティング手法, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.8, pp.2036-2047, 2013年.

[4] Yuka Komai, Yuya Sasaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, KNN Query Processing Methods in Mobile Ad Hoc Networks, IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol.13, No.5, pp.1090-1103, 2014年.

[5] Yuya Sasaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, Top-k Query Processing for Replicated Data in Mobile Peer to Peer Networks, Journal of Systems and Software, Vol.92, pp.45-58, 2014年.

[6] 天方 大地, 佐々木 勇和, 原 隆浩, 西尾 章治郎, モバイルアドホックネットワークにおけるクラスタを用いたTop-kクエリルーティング手法, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.5, pp.1555-1567 2014年.

[7] Yuka Komai, Yuya Sasaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, k-Nearest Neighbor Search Based on Node Density in MANETS, Mobile Information Systems, Vol.10,

No.4, pp.385-405, 2014 年.

- [8] Daichi Amagata, Yuya Sasaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, Efficient Multi-Dimensional Top-K Query Processing in Wireless Multi-Hop Networks, Mobile Information Systems, Vol.2015, Article ID 657431, 2015 年.

〔学会発表〕(計 33 件)

- [1] Daichi Amagata, Yuya Sasaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, A Routing Method for Top-k Query Processing in Mobile Ad Hoc Networks, IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2013), 2013 年 3 月 27 日, Catalonia Barcelona Plaza (Barcelona, Spain).
- [2] Yuka Komai, Yuya Sasaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, Searching K-nearest Neighbor Nodes Based on Node Density in Ad Hoc Networks, International Conference on Advances in Mobile Computing & Multimedia (MoMM 2012), 2012 年 12 月 3 日, Sanur Paradise Plaza Convention Center (Bali, Indonesia).
- [3] Daichi Amagata, Yuya Sasaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, A Robust Routing Method for Top-k Queries in Mobile Ad Hoc Networks, IEEE International Conference on Mobile Data Management (IEEE MDM 2013), 2013 年 6 月 4 日, Universita degli Studi di Milano (Milan, Italy).
- [4] Yuka Komai, Yuya Sasaki, Takahiro Hara, and Shojiro Nishio, Processing k Nearest Neighbor Queries for Location-Dependent Data in MANETs, International Conference on Database and Expert Systems Applications (DEXA 2013), 2013 年 8 月 28 日, University of Economics (Prague, Czech Republic).
- [5] Keisuke Goto, Yuya Sasaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, A Mobile Agents Control Scheme for Multiple Sinks in Dense Mobile Wireless Sensor Networks, International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services (MobiQuitous 2013), 2013 年 12 月 2 日, イタリア文化会館(東京都千代田区).
- [6] Takuji Tsuda, Yuka Komai, Yuya Sasaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, Top-k Query Processing and Malicious Node Identification against Data Replacement Attack in MANETs, IEEE International Conference on Mobile Data Management (IEEE MDM 2014), 2014 年 7 月 17 日, The University of Queensland's St. Lucia Campus (Brisbane, Australia).
- [7] Daichi Amagata, Yuya Sasaki, Takahiro

Hara, Shojiro Nishio, CTR: An Efficient Top-K Query Routing in Manets, International Conference on Advances in Mobile Computing & Multimedia (MoMM-2014), 2014 年 12 月 10 日, National University of Kaohsiung (Kaohsiung, Taiwan).

- [8] Yuka Komai, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, Processing Convex Hull Queries in MANETs, IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM 2015), 2015 年 6 月 15 日~18 日, Wyndham Grand Pittsburgh Downtown (Pittsburgh, PA, USA).

〔図書〕(計 1 件)

- [1] Kazuya Matsuo, Keisuke Goto, Akimitsu Kanzaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, Modelling and Processing for Next Generation Big Data Technologies and Applications (章執筆), Springer-Verlag, 2015 年(掲載決定).

〔その他〕(受賞 7 件)

- [1] 情報処理学会マルチメディア,分散,協調とモバイルシンポジウム(DICOMO 2012), 優秀論文賞, 2012 年 7 月.
- [2] 情報処理学会 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ(DPSWS2012), 奨励賞, 2012 年 10 月.
- [3] 情報処理学会 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ(DPSWS2012), 優秀論文賞, 2012 年 10 月.
- [4] データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム(DEIM 2013), 優秀インタラクティブ賞, 2013 年 3 月.
- [5] 情報処理学会マルチメディア,分散,協調とモバイルシンポジウム(DICOMO 2013), 最優秀論文賞, 2013 年 7 月.
- [6] 情報処理学会マルチメディア,分散,協調とモバイルシンポジウム(DICOMO 2013), 優秀論文賞, 2013 年 7 月.
- [7] 第 11 回(平成 26 年度)日本学術振興会賞, 2015 年 2 月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 隆浩(HARA, Takahiro)

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 20294043

(2) 研究協力者

Sanjay Kumar MADRIA

米国ミズーリ科学技術大学・教授