

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21220002

研究課題名(和文) モバイルセンサネットワークのための効率的なデータ処理機構に関する研究

研究課題名(英文) Studies on Efficient Data Processing Techniques for Mobile Sensor Networks

研究代表者

西尾 章治郎(NISHIO, Shojiro)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：50135539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 121,000,000円、(間接経費) 36,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人が持ち歩くスマートフォンなどの動くセンサノードで構成されるモバイルセンサネットワークにおいて、通信環境に応じて柔軟かつ効率的にデータ処理を行うための基盤技術確立することを目的として研究開発を推進した。本研究の成果を論文誌および学会発表等で学术界向けに積極的に公表し、国際ワークショップにおいて成果報告会を開催した。これらには、モバイル分野で最高峰の論文誌や多数の著名な国際会議が含まれており、複数の国際会議において優秀論文賞を受賞するなど、非常に優れた成果を挙げている。さらに、一般向けの展示をグランフロント大阪で行い、成果を国民向けに発信することにも努めた。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we have aimed to establish flexible and effective techniques for data processing in mobile sensor network environments, which consist of mobile sensor nodes such as in-vehicle systems and human-carried smart phones. We have publicize our research achievements in the academic communities through research papers published in journals and conferences, and also held an event for reporting the entire view of our achievements in an international workshop. Our published papers include top-tier journals and conferences, and received best-paper awards at some conferences. We have also tried to make our achievement open to the general public, and held an exhibition at Grand Front Osaka, Osaka, Japan.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：センシングシステム スマートセンサ情報システム 移動体通信 情報システム ネットワーク 情報通信工学

## 1. 研究開始当初の背景

本研究を開始した当時、温度や湿度といったセンサを持つ端末(センサノード)がネットワークを形成してセンサデータを処理するセンサネットワークに対する注目が非常に高まっており、国内外の様々な研究機関・企業において盛んに研究開発が行われていた。研究代表者らも、X-Sensor と呼ぶ複数の拠点に設置したセンサネットワークを統合利用できる環境の構築を進めていた。ちょうどその頃、センサが搭載されたスマートフォンなどが普及しつつあり、動く(モバイル)センサノードとして注目されつつあった。

モバイルセンサノードで構成されるセンサネットワーク(モバイルセンサネットワーク)を活用することで、さらに柔軟かつ効率的にセンシングを行えるようになる。しかし、従来のセンサネットワークの研究のほとんどは、固定されたセンサノードからデータをいかに効率よく収集するか注力していた。そのため、モバイルセンサネットワークのための効率的なデータ処理機構が学術的に見て推進すべき重要な研究課題であった。

研究代表者らは、永年に亘りセンサネットワークに関する先駆的な研究を推進しており、本研究はさらに進化したモバイルセンサネットワークに取り組む挑戦的なプロジェクトである。研究開始当時、モバイルセンサネットワークに関する研究は国内外を通じてほとんど行われておらず、本研究は、先駆的な研究として注目されている。

## 2. 研究の目的

モバイルセンサネットワークでは、各センサが時々刻々と変化する個人状況や周辺情報などをセンシングし続ける。例えば、以下のケースが考えられる。

ケース 1: 遊園地で複数の調査員が各アトラクションを周りながら混雑状況を入力する。一部の場所では電波状況が悪く、通信できない場合がある。

ケース 2: 気象予測のため、街中に設置された気象センサから、移動しながらセンサデータを定期的に取り得する。通信時間が不足してすべてのデータを取得できない場合がある。

これらのケースのように、モバイルセンサネットワークでは、移動に伴って変化する環境に応じて柔軟かつ効率的にセンサデータを処理することで様々な応用が可能になるため、従来のセンサネットワークの枠組みとは異なる新たなデータ管理技術が必要となる。そこで本研究では、モバイルセンサネットワークにおいて柔軟かつ効率的にデータ処理を行うためのデータ処理機構の構築を目的とし、下記3つの課題(サブテーマ)について研究開発を推進する。

(1)モバイルセンサネットワークのための柔軟かつ効率的なデータ配信技術

モバイルセンサノードにセンサデータを配置して所望の情報のみを取得することで、

効率的にセンサデータを取得できる。例えばケース1において、あるユーザが現在位置から最も近い3つのアトラクションの混雑状況を調べる場合、混雑状況を実際に調査した調査員のセンサノードではなく、各アトラクションの位置付近のセンサノードにデータを再配置することで、検索が容易となる。また、所望のデータを保持するモバイルセンサノードへの通信経路が確保できなくてもデータを収集できるように、データの複製を他のノードに配置しておくことが考えられる。本サブテーマではこのような動作を柔軟かつ効率的に行えるデータ配信技術を研究する。

(2)モバイルセンサネットワークのための柔軟かつ効率的なデータ配信技術

モバイルシンクノードと呼ぶ端末が移動しながらセンサデータを収集する場合、各センサノードとの通信時間を公平化することで偏りなくデータを収集できる。例えばケース2の場合、街中の気象センサから均一にデータを収集して全体的に気象予測を行える。また、予測値との差が大きいセンサデータのみ配信して収集効率を上げることも可能である。本サブテーマでは、このような柔軟かつ効率的なデータ配信技術を研究する。

(3)モバイルセンサネットワークのための柔軟かつ効率的な通信技術

モバイルセンサノードは移動しながらセンシングするため、通信環境が変化しやすい。例えば、ケース1の遊園地で電波状況の良い場所や悪い場所があったり、ケース2で障害物があってセンサノードとの通信時間が短くなったりすることが考えられる。センサデータ収集時の電波状況やモバイルセンサノードの配置情報を考慮して通信することで、多くのセンサデータを収集できる。そこで本サブテーマでは、これらを柔軟かつ効率的に実現する通信技術を研究する。

## 3. 研究の方法

本研究では、モバイルセンサネットワークにおいて柔軟かつ効率的にデータを処理することを目的とし、2章で説明した3つのサブテーマに分けて研究を推進する。具体的には、まず各サブテーマにおいて、担当領域における技術課題を詳細に検討し、選定した主要な課題について解決手法の設計を行う。設計した手法(提案手法)は、高速な計算機上で詳細なシミュレーション実験を行い、その有効性と問題点の検証を行う。これを繰り返し、手法の拡張、改善を進める。最終的には、すべてのサブテーマを横断的に統合させたデータ処理機構を実現する。

研究成果の公表は、学会等における論文発表として積極的に行い、学术界への周知を行う。さらに、広く国民に向けて発信するために、一般向けの展示等を行う。

## 4. 研究成果

本研究では、研究開始当初の目的を達成し、

モバイルセンサネットワークにおける柔軟かつ効率的なデータ管理基盤の構築に成功した。まずは、各サブテーマにおける研究成果について概要を報告する。さらに、研究成果の国内外における公表活動、学術的なインパクト、および今後の展開について述べる。(1)モバイルセンサネットワークのための柔軟かつ効率的なデータ配置技術

本サブテーマでは、特にモバイルセンサのみで構成されるアドホックネットワーク上のセンサネットワークを想定し、効率的なデータ共有のための検索方法を検討し、それを支援するためのデータ配置技術(特にデータ複製配置技術)について研究を推進した。

Top-k 検索のためのデータ複製配置技術  
ネットワーク帯域やバッテリーに制限のあるモバイルセンサネットワークでは、条件に合致するセンサデータを効率的に収集する必要がある。そのための検索方法として、条件に合致する上位k個のデータのみを取得する Top-k 検索が有効である。Top-k 検索の単純な方法として、検索要求を全センサノードに送信し、受信した各ノードが自身の持つ上位k個のデータを返信することが考えられるが、不要なデータも多く返信されてしまう。

本研究では、これを抑制するために、まず効率的な Top-k 検索手法を考案した。この手法では、検索条件への合致度をスコアとして計算し、検索要求メッセージをネットワーク内に伝播する際に、中継する各ノードにおいてスコアの一部(基準値)をメッセージに添付する。基準値は、ネットワーク全体の上位k番目のスコアを予測するために用いられる。データを返信する際には、この予測値(しきい値)以上のデータのみを返信することで、不要なデータ返信を大幅に抑制できる(図1)。

さらに、この検索手法をより効率化するために、効果的にデータの複製を配置する手法を提案した。この手法では、データ返信の際に、各中継ノードにおいてスコアの高い返信データを優先的に複製として保存する。複製を配置することで、次回以降の検索の際に、例えばネットワークが分断していても上位k個のデータを高確率で取得できる。また、検索要求を行ったノードの周辺ノードからのデータ返信のみで結果を取得できる可能性も高くなり、通信量の削減(バッテリーや通信帯域の有効利用)を実現できる。

位置依存検索のためのデータ配置技術  
モバイルセンサネットワークにおけるもう一つの効率的な検索方法として、検索条件として指定する位置に近い場所に関連付けられた上位k個のデータを取得するk最近傍検索がある。モバイルセンサネットワークでは、データを所持するセンサノード自体が移動するため、指定位置に近い場所で観測されたk個のセンサデータを検索する際も、単純にはネットワーク全体を探す必要がある。

これを防ぐために、本研究ではデータの複製を利用したk最近傍検索手法を提案した。

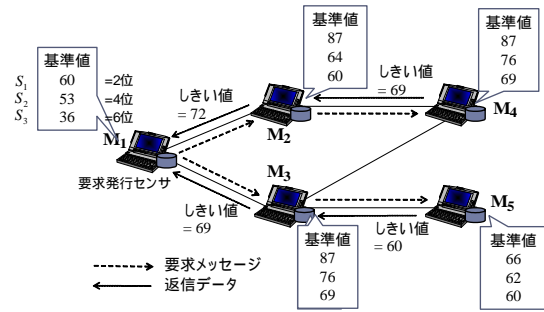


図1 Top-k 検索手法

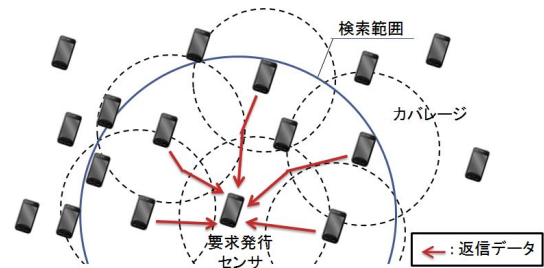


図2 k最近傍検索手法

提案手法ではまず、各ノードがあるタイミングで、自身の現在位置から近い位置で観測された上位C個(Cは記憶領域のサイズ)のデータを複製として保存する。その後、その位置から距離dだけ離れるごとに、同様の処理(複製の再配置)を行う。これにより、各ノードは常に、距離d以内の誤差内で、ある位置からC個分の最近傍データを所持している。

検索の際には、要求発行ノードは、まず自身の所持データからネットワーク内のデータ密度を見積もり、検索すべき地理的範囲を決定する。そして検索要求を周辺センサに送信し、それを受信した各ノードは、データが重複返信されないように、各ノードのデータの関連領域(カバレッジ)を意識しながらデータ返信を行う(図2)。これにより、通信量を削減しつつ、高い精度で検索を実行できる。

(2)モバイルセンサネットワークのための柔軟かつ効率的なデータ配信技術

センサデータ収集量の公平性を確保するためのデータ配信技術

モバイルシンクノードを用いたセンシングシステムでは、図3に示す通り、定期的にセンシング領域を巡回するモバイルシンクノードにセンサノードがセンサデータを配信する。収集したセンサデータは基地局でセンサデータベースに保存される。これまでに、センサデータ収集量を向上させる幾つかの手法が提案されているが、各センサノードのデータ収集量に偏りが生じていた。

そこで本サブテーマでは、センサデータ収集量の公平性を確保するためのデータ配信方式を提案した。提案手法では、データ収集量の公平性を確保するために、初回通信時に通信時間に上限を設定し、上限に達すると他のセンサノードを探索する。探索時に他のセンサノードを発見できた場合、そのセンサノ

ードからデータを収集する。他のセンサノードを発見できなかった場合、既にデータ収集したセンサノードと再通信してさらにデータを収集する。このようにすることで、既存手法と比べて公平性を確保しつつデータ収集量を向上できる。

#### 通信量削減のためのデータ配信技術

モバイルシンクノードを用いたほとんどの従来手法では、通信可能な全センサノードからデータを収集しており、通信量が多くなり他の通信の妨げになるという問題があった。ここで、モバイルシンクノードが巡回して同じセンサノードから定期的にデータを収集する場合、過去に収集したデータから今後のデータを予測できる場合が多い。このとき、予測値が許容誤差以上外れているセンサノードのみデータを配信することで冗長な通信を削減できる。例えば、気象予測では0.1度迄の誤差を許容できることが考えられる。

そこで、予測値配信を用いた通信量削減方式を提案した。提案手法では、センサデータベースに保存されている過去に収集したデータから次の巡回時に各センサノードが観測している値を予測する。モバイルシンクノードが予測値を配信し、予測値と観測値の差が、事前に設定された誤差の許容できる範囲から外れているセンサノードのみデータを配信する。さらに、図4のように、ある範囲の予測値を示す予測値平面を一定距離毎に作成する。モバイルシンクノードは予測値平面の係数のみを、複数のセンサノードにまとめて配信できるため、そのための配信時間を短縮でき、センサデータ収集にかかる時間を長くできる。このようにすることで、単純にすべてのセンサノードからデータを収集する方式と比べて、通信量を削減しつつ、センサデータ収集量を向上できる。

#### (3)モバイルセンサネットワークのための柔軟かつ効率的な通信技術

##### 電波状況を考慮した通信技術

前述したケース1の遊園地のような環境では、混雑状況を調査するアトラクション数に対し、十分な数の調査員を配置できないことがある。このような場合、センサノードの設置等にかかるコストが非常に大きく、観測対象となる領域に対して設置できるセンサノード数が少なくなり、データ収集のための通信が満足に行えなくなることがある。

このような環境においても効率的なセンシングを実現するため、モバイルセンサノードの挙動を制御する手法を提案した。この手法では、モバイルセンサノードがセンシングしたデータは、観測地点の近くに位置する固定ノードに運搬され、固定ノードは受信したデータを一時的に蓄積する(図5右部)。また、固定ノードに蓄積されたデータ量が一定値を超えると、複数のモバイルセンサノードを用いた通信経路を構築し、蓄積したデ

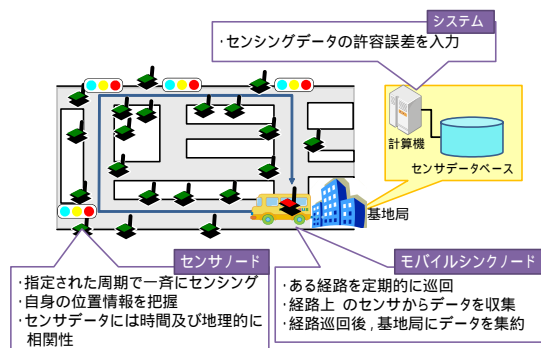


図3 モバイルシンクノードを用いたセンシングシステム

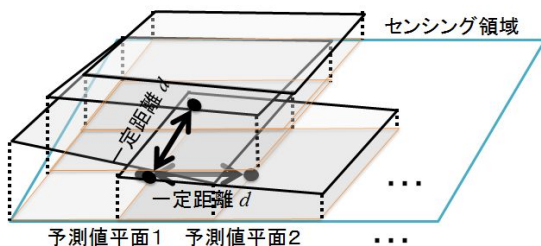


図4 予測値平面と作成間隔

ータをまとめて転送する(図5左部)。これらにより、ある観測地点のセンシングや、データ転送のために必要なモバイルセンサノードの移動距離を削減し、対象領域全体の効率的な観測を実現する。

#### モバイルセンサノードの地理的粒度を考慮した通信技術

前述したケース2のように街中で気象情報を取得する場合、一般ユーザが持つスマートフォンなどのモバイルセンサノードを気象センサとして扱うことが考えられる。一般ユーザが多数存在する繁華街などでは、対象領域内の任意の地点を観測できるモバイルセンサノードが常に多数存在する。一方、アプリケーションの観点からは、例えば100[m]×100[m]の矩形領域ごとといった、地理的にある一定粒度のデータを要求することが一般的である。この場合、すべてのデータを収集すると通信量が多くなる問題がある。

そこで、必要最小限のデータのみを収集し、通信量を抑制する手法を提案した。提案手法では、ノード上で自律的に動作し、ノード間を移動するアプリケーションであるモバイルエージェントを利用する。具体的には図6のように、要求されている地理的粒度に応じてモバイルエージェントをセンサノードに配置する。各モバイルエージェントは、ノードの移動を受けて観測位置に最も近い別のノードへの移動し、観測位置付近に留まり続ける。データ取得の際は、エージェントが動作しているノードのみがセンシングを行い、データを基地局へ送信する。これにより、観測位置付近のノードを毎回探索する単純な方法と比較して、通信量を大幅に削減できる。



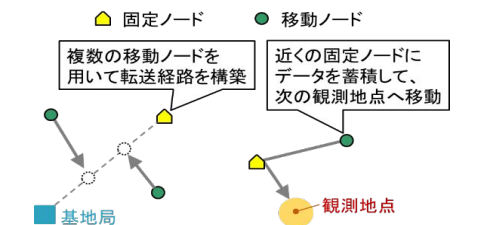


図5 固定ノードを用いたセンシングとデータ転送

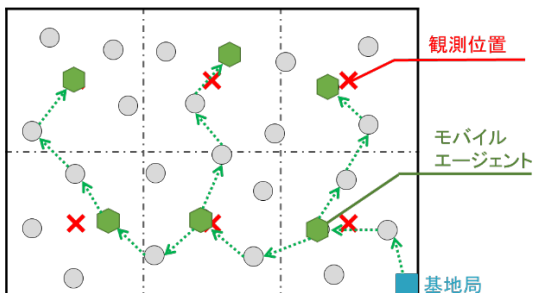


図6 モバイルエージェントの配置例

(4) 研究成果の公表活動、インパクト  
研究成果の統合と国民向けの公表活動

上述の各サブテーマの研究成果を部分的に統合し、いくつかの応用システムを構築した。例えば、スマートフォンなどを所持する一般ユーザからセンサデータを効率的に収集し、統合管理してユーザ間で共有可能とする基盤システム SmaSense などを開発した。

これらのシステムを国民に向けて公表し、国民目線の感想・意見を収集するために、一般向けの展示を実施した。具体的には、大阪の中心地である梅田に位置するグランフロント大阪のナレッジキャピタル (The Lab) において、Smasense を含む 3 つのシステムを 2013 年 9 月 9 日 ~ 20 日の期間で公開した (図 7)。この展示は大盛況であり、期間中に 1,911 名の訪問者に対してシステムの説明と討論を行うことができた。この結果、一般の方にも本研究の重要性を十分に理解してもらえ、高評価を受けたため、本研究の方向性の正しさと重要性を確認することができた。なお、本展示は、毎日新聞において報道された。

学術界向けの公表活動

本研究の成果は、国内外の論文誌および学会等で積極的に公表した。その結果、論文誌 33 編、学会発表 88 件、著書 (章執筆を含む) 5 編と大きな業績を達成することができた。これらの中には、モバイル分野で世界最高峰の論文誌である IEEE Trans. on Mobile Computing や、通信分野およびデータ管理分野で権威のある国際会議 IEEE Globecom, ICC, MDM (採択率 25% 程度) などが多数含まれている。また、MDM の優秀論文賞を始めとして、複数の国際会議の優秀論文賞を受賞し、国際論文誌への推薦等も複数受けた。国内の学会においても、多数の研究賞を受賞した。さらに、国際的に著名な出版社である Springer 社からセンサネットワークに関する著書を出している。これらの重要な成果は、研究



図7 グランフロント大阪における成果展示

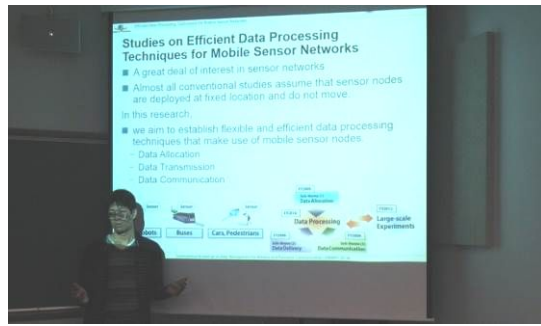


図8 国際ワークショップでの成果報告会

開始当初の予想を上回っており、本研究が計画以上の成果を達成したことを示している。

さらに、最終年度の完了後、2014 年 5 月 14 日には、通信分野で著名な大規模国際会議である IEEE AINA 2014 の併設ワークショップにおいて、本研究の成果報告会を実施した (図 8)。これにより、本研究の全体的な成果を国際的に周知することができた。

研究成果のインパクト・展望

本研究は、モバイルセンサネットワークにおけるデータ管理について取り組んだ、世界初の研究プロジェクトの一つである。そのため、本研究の成果は、国内外を通じて高い評価を得ており、公表論文、受賞歴等で非常に顕著な業績を達成した。

本研究で提案した一連のデータ管理技術は、モバイルセンサネットワークのデータ管理のための先駆的研究成果として、今後の当該分野の指標となり、学术界に大きなインパクトを与えるものと考えられる。さらに、社会的には、今後のビッグデータ時代におけるセンサデータ収集・管理のための重要な核技術になることが期待される。研究代表者らは、本研究で開発したデータ管理技術および統合システム等の拡張・改良を進め、今後も当該分野の発展に尽力する所存である。

5. 主な発表論文等  
〔雑誌論文〕(計 33 件)

- Yuka Komai, Yuya Sasaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, KNN Query Processing Methods in Mobile Ad Hoc Networks, IEEE Trans. on Mobile Computing, 査読有, 2014, 掲載決定
- Akimitsu Kanzaki, Yasuhiro Nose, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, Dynamic Route Construction Based on Measured Characteristics of Radio Propagation in

Wireless Sensor Networks, International Journal of Advanced Computer Science, 査読有, Vol. 2, No. 3, 2012, pp. 85-98

Wei Cai, Min Chen, Takahiro Hara, Lei Shu, Taekyoung Kwon, A Genetic Algorithm Approach to Multi-Agent Itinerary Planning in Wireless Sensor Networks, ACM/Springer Mobile Networks and Applications, 査読有, Vol. 16, No. 6, 2011, pp. 782-793

DOI: 10.1007/s11036-010-0269-z

Tomoki Yoshihisa, Shojiro Nishio, A Communication Protocol for Sensor Database Construction by Rounding Sink, Journal of Networks, 査読有, Vol.6, No. 3, 2011, pp. 343-354

DOI:10.4304/jnw.6.3.343-354

Takahiro Hara, Quantifying Impact of Mobility on Data Availability in Mobile Ad Hoc Networks, IEEE Trans. on Mobile Computing, 査読有, Vol. 9, No. 2, 2010, pp. 241-258

DOI: 10.1109/TMC.2009.112.

〔学会発表〕(計88件)

Takahiro Hara, Shojiro Nishio, Data Allocation Techniques for Mobile Sensor Networks, International Workshop on Data Management for Wireless and Pervasive Communications, 2014年5月14日, University of Victoria (Victoria, Canada)

Tomoki Yoshihisa, Shojiro Nishio, Data Transmission Techniques for Mobile Sensor Networks, International Workshop on Data Management for Wireless and Pervasive Communications, 2014年5月14日, University of Victoria (Victoria, Canada)

Akimitsu Kanzaki, Shojiro Nishio, Communication Techniques for Mobile Sensor Networks, International Workshop on Data Management for Wireless and Pervasive Communications, 2014年5月14日, University of Victoria (Victoria, Canada)

Daichi Amagata, Yuya Sasaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, A Robust Routing Method for Top-k Queries in Mobile Ad Hoc Networks, IEEE International Conf. on Mobile Data Management, 2013年6月4日, Università degli Studi di Milano (Milan, Italy)

Lekshmi Chidambaram, Sanjay Madria, Mark Linderman, Takahiro Hara, MELOC: Memory and Location Optimized Caching Model for Small Mobile Ad hoc Networks, IEEE International Conf. on Mobile Data Management, 2012年7月24日, Chancery Pavillion (Bengaluru, India)

Chunsheng Zhu, Laurance T. Yang, Lei Shu, Trung Q. Duong, Shojiro Nishio, Secured Energy-Aware Sleep Scheduling Algorithm in Duty-Cycled Sensor Networks, International Conf. on Communications, 2012年6月12日, Ottawa Convention Center (Ottawa, Canada)

Akimitsu Kanzaki, Yasuhiro Nose, Takahiro

Hara, Shojiro Nishio, A Dynamic Route Construction Method Based on Measured Characteristics of Radio Propagation in Wireless Sensor Networks, International Conf. on Advanced Information Networking and Applications, 2011年3月23日, Matrix building (Biopolis, Singapore)

Takahiro Hara, Sanjay Madria, Shojiro Nishio, Investigating Impact of Quorum Construction on Data Processing in Mobile Ad Hoc Networks, IEEE International Conf. on Advanced Information Networking and Applications, 2010年4月22日, Perth Exhibition and Convention Centre (Perth, Australia)

〔図書〕(計5件)

Kazuya Matsuo, Keisuke Goto, Akimitsu Kanzaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, Springer-Verlag, Book Chapter: Data Aggregation and Forwarding Route Control for Efficient Data Gathering in Dense Mobile Wireless Networks: Modelling and Processing for Next Generation Big Data Technologies and Applications, 2014, 掲載確定, 32

Tomoki Yoshihisa, Yuto Hamaguchi, Yoshimasa Ishi, Yuuichi Teranishi, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, Taylor and Francis, Book Chapter: A Sensor Data Aggregation System using Mobile Agents, Distributed Networks: Intelligence, Security, and Applications, 2013, 27

Takahiro Hara, Vladimir I. Zadorozhny, Erik Buchman (Eds.), Springer, Wireless Sensor Network Technologies for Information Explosion Era (Book Series: Studies in Computational Intelligence), 2010, 271

〔その他〕

<http://www-nishio.ist.osaka-u.ac.jp/mobile-sensor/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西尾 章治郎 (NISHIO, Shojiro)  
大阪大学・情報科学研究科・教授  
研究者番号: 50135539

### (2) 研究分担者

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

義久 智樹 (YOSHIHISA, Tomoki)  
大阪大学・サイバーメディアセンター・准教授  
研究者番号: 00402743

神崎 映光 (KANZAKI, Akimitsu)  
大阪大学・情報科学研究科・助教  
研究者番号: 80403038