

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22650011

研究課題名（和文） 自律移動困難な移動センサネットワークのための
通信スケジューリング方式の開発研究課題名（英文） Development of communication scheduling schemes for mobile sensor
networks consisting of nodes without autonomous mobility

研究代表者

石原 進 (ISHIHARA SUSUMU)

静岡大学・創造科学技術大学院・准教授

研究者番号：10313925

研究成果の概要（和文）：

下水路等の監視のため、多数の無線通信可能なセンサを水路に流し、水路の形状把握や故障発見を行うことを目指した In-Pipeline Flowing Wireless Sensor Network(PFWSN)のためのセンサノード動作スケジューリング手法、データ回収方法を設計し、シミュレーション評価により改良 HEED 方式による代表ノード選出と起動・休眠スケジューリング並びに RandomDrop に基づく転送バッファ管理方式が有効であることを確かめた。

研究成果の概要（英文）：

Aiming for detecting the shape or failure points of water pipes such as sewerage pipes using multiple wireless sensor nodes thrown into the pipes, we designed architecture of In-Pipeline Flowing Wireless Sensor Networks (PFWSN) and scheduling schemes and data collecting schemes for the networks. We confirmed that active node selection and wake-up/sleeping schedule of based on our improved HEED algorithm and RandomDrop-based transmission buffer management algorithm is effective for the network through simulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 22 年度	1,700,000	0	1,700,000
平成 23 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	2,900,000	360,000	3,260,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：モバイルネットワーク技術、ネットワーク、センサネットワーク、水路故障発見、間欠的通信機会、省電力制御、拡張 HEED

1. 研究開始当初の背景

施設の老朽化や地震等災害による都市インフラの損傷を確認することは、都市生活環境を維持する上で重要である。なかでも下水管の損傷の確認方法は、下水管内に移動カメラや、ファイバースコープを通したり、下水管内に監視情報のための通信路を設けるアプローチなどがあるが、ファイバースコープを用いたとしても、長距離管の目視による監

視は人的コストが高い。また、情報通信用の通信路敷設コストも甚大である。そこで、下水路の観察を、水路に流された小型無線センサノード群を使って行う事を考える。各センサノードは、管壁の写真を撮影するほか、水位、温度等のセンシング情報を収集する。さらに、各センサに基地局との通信によって自身の位置を報告させ、それらの位置、数、時刻を調べることで、水流の分岐の割合、流速

の調査、管路の故障点の位置の検出などが短期間かつ少ない人的コストで可能となると考えられる。

上水道の場合、水路に圧力がかかっているため、その圧力の変化で管路の故障を見極める試みが行われている。しかし、下水道の場合、水路には圧力がかからないので、圧力の変化で管路の故障を検出することは難しい。加えて、下水道の故障は、上水道に較べてその影響が甚大である。汚濁した水が市民生活の場に広がった場合、その清掃には非常に高いコストがかかる。このため、経済的、かつきめ細やかに下水道の状態を監視し、障害の早期発見を可能とする手法が渴望されている。例えば、非破壊構造モニタリング用のセンサを管壁に取り付け、管路と平行して走るネットワークケーブル経由でモニタリングする方法や、マンホールからケーブルを伸ばし数百 m の範囲で、カメラを使った管内のモニタリングを可能とするロボットの開発など様々な取り組みが行われている。また測定対象を下水管としているわけではないが、洪水などでの水流の広がりや水質をモニタリングするための取り組みとして UCB で、**Floating Sensor Network (FSN) Project** が行われている。このプロジェクトでは浮遊のみならず遠隔制御で自律的に移動可能なドリフタと呼ばれる無線センサノードを開発しているが、センサと外部の通信は個々のセンサノードに搭載された携帯電話端末を用いている。

2. 研究の目的

本研究では、下水道等の監視のため、多量の無線通信可能なセンサを水路に流し、各センサの移動経路を収集することで、水路の形状把握や故障発見を行うことを目指して、これら管路内を流れるセンサノードによるネットワーク (In-Pipeline Flowing Wireless Sensor Network (PFWSN)) におけるセンサノードの起動・通信スケジュール手法と通信経路制御手法を開発した。

図 1 に本研究での想定環境を示す。下水管路へのアクセス、および通信機器の管理の利便性を考えると、センサノードからのデータ収集のための基地局 (アクセスポイント) の場所はマンホールの蓋の下地上近く部分になると想定される。縦坑の長さ (数~10m) を考えると、管路内を水の流れに乗って流れるセンサノードがアクセスポイントと通信できるのは、マンホール直下通過時に限られる。また、センサがその現在位置を知るヒントとなる情報もこのマンホール直下での通信でのみ得られる。一方センサノード間の通信は比較的長い距離で可能である (図 1 中センサノード間通信可能距離 r < センサ・アクセスポイント間通信可能距離 r_{AP})。そこで、

本研究では、このような環境で小型軽量のセンサノードに搭載可能な少量量の電池のみを用いて下水道の終端までセンシング可能かつそれらのデータをアクセスポイントを介して回収可能とするため、センサノードが休眠状態と通信可能状態を切り替えつつもアクセスポイントとの間欠的通信機会を捉え、データをアクセスポイントに転送できるような動作スケジュールの設計ならびにセンサネットワーク上での経路制御方式、データ回収方法の設計を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、対象とする下水道センサネットワーク (In-Pipeline Flowing Wireless Sensor Network (PFWSN)) について、以下の条件で複数台のセンサノードが測定したセンサデータ、およびセンサの現在推測位置をアクセスポイントに報告することを想定し、これに基づいて、センサノードの動作スケジュールと経路制御方式の開発、シミュレーション評価、並びにその理論モデルの構築と検証を行うほか、移動ロボットを用いたテストベッドを用いた実環境実験を行うこととした。また、GPGPU (General-purpose computing on graphics processing units) による移動ネットワークのシミュレーションの高速化を行い、一連のシミュレーションの高速化を図った。

●本研究での仮定

- 複数のセンサノードが水流等によって非自律的な移動をする。
- 中継器との通信可能性による判定により、センサノードの位置の推定は可能であるものの、高い精度での推定は困難である。
- 各センサノードは、中継器との通信によって、不定期にアクセスポイントへの通信機会がある。通信には他のセンサノードを介したマルチホップ通信を行ってもよい。
- 管路の分岐や故障によってノード数が急激に減少する可能性がある。
- センサノードの電源容量は少なく、間欠的な通信をしない限り、管路の終端まで稼働状態を維持することはできない。
- センサノードの電力消費のうち、通信処理が支配的である。

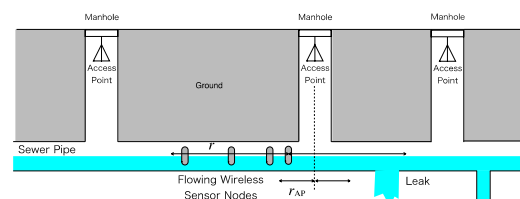


図 1. 想定環境

4. 研究成果

(1) PFWSN におけるセンサノードの休眠スケジュールリングと経路制御アルゴリズムの開発

①PFWSN でのデータ回収戦略の検討

PFWSN でセンサノードが測定したデータを、接続機会が限定されるアクセスポイントを介して確実に転送するための戦略を検討し、以下の戦略を得た(発表(7)(10))。この戦略では、近接するセンサノードのうち自律的に選出された代表ノードが無線通信インタフェースを常時稼働状態としておく。他のノードは測定時のみ起動し、観測したデータを代表ノードに転送する。代表ノードはノードからのデータを預かるほか、不定期に訪れるアクセスポイントとの接続機会を待ち続ける。代表ノードはアクセスポイントとの接続機会を捉えると、直ちに他のノードから預かった観測データをアクセスポイントに転送する。こうした動作を行う代表ノードの交代・選出処理をすべてのセンサノードが繰り返すことで、各ノードの電力消費を均一化し、小型軽量の電池を搭載したセンサノードを用いた場合でも管路全体の観測を可能とする。すべてのノードが代表ノードと同じように無線通信インタフェースを起動状態のままとすると、電力消費が大きくなるが、本戦略を用いることで、システム全体の消費電力を低減させながらもアクセスポイントとの接続性を高く維持することができる。

なお、この戦略ではデータの転送経路は、個々のセンサノード→代表ノード→アクセスポイントと単純なものとなる。

②PFWSN での代表ノード選出方法の検討

上記の戦略を PFWSN に適用した場合の性能は、代表ノードの選択方法に依存する。そこ

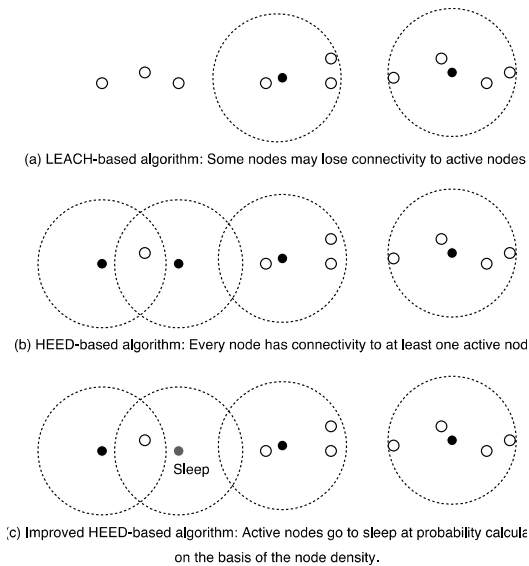


図 2. 代表ノード選出手法

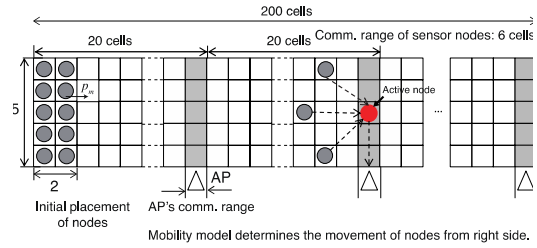


図 3. シミュレーションモデル

で、既存の固定センサネットワークにおける代表的な代表ノード選択手法(センサネットワーク研究におけるクラスタリング手法におけるクラスタヘッドの選出と同じ)である Heinzelman らによる LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) と Younis らによる HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering) を用いた場合についてシミュレーション評価を行った(発表(6))。さらに、HEED を改良した改良 HEED 方式を設計した(図 2(c), 論文(1))。

LEACH では、ネットワークにあらかじめ与えられた代表ノードの割合に基づいて、各ノードが自律的に自ら代表ノードとなることによって代表ノードが決められるが、HEED ではすべてのノードが少なくとも 1 台の代表ノードと接続可能となるように自律的処理で代表ノードが選出される。改良 HEED 方式では、HEED に基づく代表ノードの決定処理を行う一方で、代表ノードであっても周辺のノード数に応じ、確率的に短い期間だけ休眠し電力消費を低減させる。

下水管内の水流によって流れる浮遊体の挙動を正確にシミュレーションで再現するのは容易ではないので、本研究では、ノードの移動をセルラオートマトンで単純化してモデル化した(図 3)。このモデルでは各セルが水路の位置を示す。各セルに位置するノードは、各時間ステップで右隣に他のノードがいなければ確率 p_m で移動可能としている。さらに無線センサネットワークでの MAC 層以下のモデルを簡略化したパケットレベルでのシミュレーションを行い、これらの性能を評価した。この結果、図 4 に示すように LEACH では、水流に乗った移動の結果ノード間の距離が広がりやすい場合(図 4 の p_m が小さい場合(b)~(c))にセンサノードが回収したデータがアクセスポイントに転送できない頻度が高くなる一方で、ネットワークを構成するノードの電力消費は抑えられることがわかった。一方 HEED の場合、各ノードは確実に代表ノードを介してアクセスポイントにデータを転送できるものの、ノードの位置が広がるにつれて代表ノードの数が増え、ノードの電力消費が大きくなり、広い範囲にわたってセンシングデータの回収を行うことが困

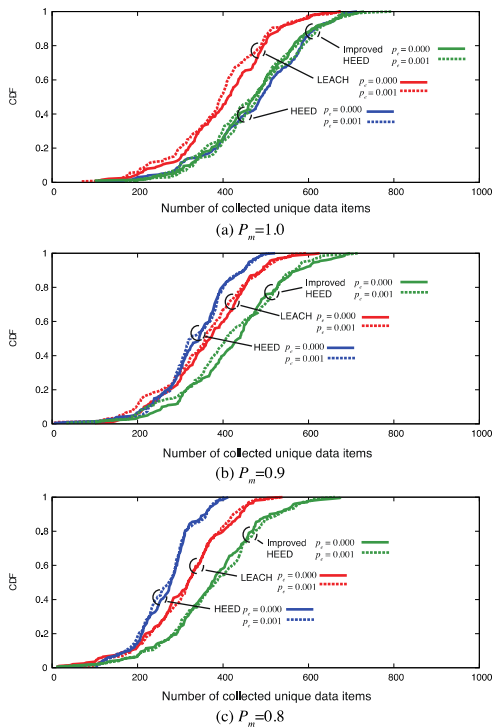


図 4. シミュレーション結果

難になることが確かめられた。一方、我々が開発した改良 HEED 方式では、代表ノードであっても、周辺の端末密度が低くより高い確率で代表ノードになる場合には、高い頻度で休眠を行うように動作するため、ノード間の距離が広がった場合でも代表ノードでの電力消費が低減されている。これによってアクセスポイントへのデータ転送機会が減少するものの、個々のノードでのデータ消費量が減少しているため、より長い時間ノードが稼働でき、結果としてより広い範囲の観測データ収集が可能となる。

さらに、上記 PFWSN における適切なデータ転送バッファ管理手法について、検討した (発表(2))。アクセスポイントとの接続時間が短い場合、アクセスポイントへ未転送へのデータが多くあるときには単純な FIFO (First in First out) の方式でデータを処理すると、初期に代表ノードに転送されたデータのみがアクセスポイントに転送されてしまい、後から観測・転送されたデータがアクセスポイントには転送されず、最終的にデータを回収できる観測地点に地理的な偏りが生じる可能性がある。これを避けるためには、転送可能なデータ量の見込みに応じて、アクセスポイントへの転送を依頼されたデータから適当なものを破棄するべきである。

シミュレーションの結果、単純な DropTail 方式や RED (Random Early Detection) 方式に基づくデータ廃棄方法よりも、RandomDrop 型の方式が適当であることを確認した。特にアクセスポイントとの接続機会が限定され、

代表ノード上にアクセスポイントへ未転送のデータが長期間滞留する場合に有効である。同方式では、規定容量以上がバッファに格納された場合に、新規到着データも含めてランダムにデータを選択して廃棄する。

以上の検討により、電池容量が非常に小さくアクセスポイントとの接続機会が限定される PFWSN でのノード起動 (休眠) スケジュール、データ転送バッファ管理方式設計の基本指針を得ることが出来た。こうした設計指針に基づくシステムは、下水管の監視のみならず、広域にわたって河川や海流等を観測する無線センサネットワークにも応用できると考えられる。

なお、我々の PFWSN の仮定・設計に基づく研究発表を行う中で、我々の仮定 (アクセスポイントとの接続機会が限定的) とは外れるが実用的な「流れるセンサネットワーク」の設計方針も多くの研究者と議論している。例えば、マンホールの蓋付近にアクセスポイントを設置するがアンテナを縦坑に長く垂らすことで、下水管炉内のセンサノードとアクセスポイントとの通信可能範囲大きくする方法や、RFID 技術を応用した方法が議論されている。今後、我々の仮定が当てはまらないケースについても、理論面、実装面両面から研究を展開が可能であると考える。

(2) PFWSN のデータ回収率に関する理論モデルの構築

セルラオートマトンを用いた水路上のノード移動モデルに基づいて、アクセスポイントを用いない回収可能な電池駆動の複数のセンサノードをランダムに起動させながら水流上で測定したセンサデータの回収可能性について、理論モデルを構築し、最終的なデータ回収率について理論式を導出した (発表(5))。さらに、アクセスポイントを用いて各センサノードからアクセスポイントを介してデータを転送してデータを回収する場合についても理論式を導出し、アクセスポイントの配置と、必要なセンサノード数と起動頻度に関する指針を得た (発表(1))。これらの理論値に関しては、同様の移動モデルに基づくシミュレーション結果との照合によって妥当性があるものであることを確認している。

以上の理論モデルは、周辺ノードの振舞いや通信可能性から常時起動ノードを選定してデータ中継用に動作させる本報告書 4 (1) で示した動作スケジューリング手法の評価には直接適用することは困難であるが、今後、常時起動ノードと他のノードの通信可能性を考慮するようモデルを拡張することで、適用できる可能性がある。

(3) 複数の移動ノードを使った省スペース

無線センサネットワークテストベッドの構築

移動体を含む無線センサネットワークのシステムを実環境で評価するためには、広大な場所の確保や多数の移動体の制御が必要になることが考えられる。そこで、複数の移動ノードを使用する無線センサネットワークのシステムを比較的狭いスペースで安価に実環境評価するためのテストベッドを構築した(発表(3)(4))。

テストベッドの設計に当たっては、省スペース性、製作の容易性、設定の容易性、ネットワークトポロジを意図的に制御可能なこと、再実験の容易性をその達成要件とした。このテストベッドを使えば、狭い範囲でマルチホップの通信を行う移動無線ネットワークの実験を、すべてのノードに対する移動・ネットワーク動作の指示を一つの制御用 PC を用いて容易に行うことができ、かつそれを繰り返し実行することが出来る。

テストベッドは、設定・制御用の Windows PC と移動ノード群によって構築されている。移動ノードは移動制御部と評価対象部から構成されている。移動制御部はノードの移動を制御している部分であり、評価対象部は評価対象のシステムに従って通信を行う部分である。本研究で試作したの移動ノードは直径 55mm、幅 3mm のタイヤを持つ 4 輪車であり、3×2×2cm の小型 DC モーターで移動する。移動ノードの移動範囲を制限することと評価対象部の通信範囲を数 m 単位まで抑制することで、評価対象のシステムが想定するネットワークトポロジを構築可能とする。

移動ノードの設定などの処理を省力化するために PC 上にスケジュール生成プログラム、スケジュール送信プログラム、動作開始時刻同期プログラムを PC 上に実装した。移動ノードは、その制御に ArduinoFio マイコンを、通信に IEEE802.15.4 無線通信をサポートした XBee モジュールを使用している。

実装システムでの検証実験により、同テストベッドで 8m 程度の 1 ホップ通信通信距離を実現でき、かつ 5 台程度の規模であれば 30m×30m 程度の広さを持つ体育館等の場所で魔窟ホップ通信を含むネットワークの評価に用いることが出来るという見通しを得た。研究期間内では、このテストベッドでの実環境評価を行うには至らなかったが、今後、これまでに開発したプロトコルについて当テストベッドへの適用を行い、実環境評価を行う予定である。

(4) GPGPU による移動ネットワークのシミュレーション高速化

大規模移動センサネットワークや車々間アドホックネットワークなどの移動無線ネットワークのシミュレーションでは、各ノ

ードがパケットを送信する際に、周辺のノードでの信号強度に基づいてパケットが届いたかどうかの到達判定を行っている。特に、車々間通信のように移動し続けるノードが定期的(例えば 1 秒間に 10 回)にブロードキャストでパケットを送信し続けるようなシステムの大規模なシミュレーションでは、これらの処理の頻度が高い。信号強度の計算は、送信ノードと他のノード間の距離に基づいて行われる。この 1 対 N 間の距離計算には互いに依存性がないので、並列処理による処理速度の向上が期待できる。近年、GPGPU によるシミュレーションの高速化の試みが多く行われているが、ネットワークシミュレーションにおいては、その事例は ns2 に関して数少ない事例がある程度である。本研究では、Java ベースのネットワークシミュレータ JiST/SWANS (Java in Simulation Time / Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator)におけるノード間の距離計算に伴う処理を GPGPU の統合開発環境 CUDA (Compute Unified Device Architecture) を用いて並列化した(発表(8)(9))。

JiST/SWANS は、米 Cornell 大で開発されたシミュレータであるが、現在では Ulm 大の研究グループによって高速化のために拡張されている。本研究では Ulm 大学で拡張された JiST/SWANS をベースに GPGPU による拡張を行った。JiST/SWANS は Java のみで作成されているため、C 言語をベースとした CUDA を直接利用することができない。そこで、CUDA を Java に対応させた jCuda (Java bindings for CUDA) を用いて JiST/SWANS を GPGPU に対応させるようにした。jCuda は別途作成した GPU バイナリを呼び出して利用するためのラッパーと CUDA が提供する各種ライブラリ (CUBLAS, CUFFT など) を呼び出すための API によって構成されている。

JiST/SWANS でのパケット到達判定は、以下の手順で行われている。まず、送信ノードと判定対象の相手ノードの位置座標に基づいて 2 ノード間の距離を計算し、その距離に基づいてパスロスを求める。さらにフェージングによる減衰を求め、これらと送受信側のアンテナゲインに基づいて、受信強度を求め、最小受信強度と比較することで信号到達の成否を判定する。これらの処理のうち、最小受信強度との比較部分以外を GPU 内部で実行する手続き(カーネル)として実装した。JiST/SWANS で実際にパケット到達判定処理が行われているクラス(jist.swans.field.Field)内での処理で jCuda の機能を介してパケット到達判定処理を行う GPU カーネルを呼び出すようにした。また同クラスのコンストラクタで、GPU・ホスト間でのデータ交換用の配列を格納するメモリ領域の確保、カーネルの GPU への転送処理の他、GPU 内での

フェージングの計算のための乱数生成器の初期化を行うカーネルの呼び出しを行うようにした。また今回の実装では、対地反射 2 波モデルによるパスロスとレイリーフェージングを想定した。なお、JiST/SWANS では、用意されたパスロスとフェージングモデルのクラスを自由に選択可能であるが、今回の実装では、特定のパスロスとフェージングモデルを組み合わせて受信電力強度を計算する処理を一つの関数としてまとめてカーネルに実装した。カーネルでは送信元のノードとフィールド内の全ノード N 台との間の到達判定処理を N 本のスレッドで並列計算する。

JiST/SWANS がもつ最も単純なノード管理方式 LinearList にたいして上述の GPGPU による並列化を導入した結果、5000m 四方の領域での IEEE802.11b での通信を想定したシミュレーションにおいて、ノード数 500 台の場合で約 3.4 倍、ノード数 1000 台の場合に約 4.9 の速度向上を確認できた。また、JiST/SWANS がもつ効率的なノード管理方式 Grid および HierGrid を用いた場合に比べても、単純な LinearList を並列化した方法ながらノード数 1000 台以上の場合に優位性を確認できた。なお、本シミュレータの拡張は、その優位性が顕著となるのはノード数が数百台レベルの時であり、管路を流れるセンサネットワークのシミュレーションの高速化には、直接適用困難であったが、車々間通信等での応用に効果が期待できる。

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 1 件)

1. Susumu Ishihara and Daisuke Sato: Active node selection in flowing wireless sensor networks, in proc. The 6th international conference on mobile computing and ubiquitous networking (ICMU2012), pp. 8-15 (May 2012) 査読有

[学会発表] (計 10 件)

1. 三竹一馬, 石原進: 流れるセンサネットワークにおけるデータ回収率に関する基礎検討, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) (2012/7/4, ホテル百万石 (加賀市), 発表決定) 査読有
2. 石原進, 佐藤大輔: アクセスポイントとの間欠的通信機会を持つ流れるセンサネットワークのための優先度を考慮したデータ回収方法, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) (2012/7/4, ホテル百万石 (加賀市), 発表決定) 査読有

3. 前川寛, 石原進: 複数移動ノードを使った省スペース無線センサネットワークテストベッドの構築, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) (2012/7/4, ホテル百万石 (加賀市), 発表決定) 査読有
4. 前川寛, 石原進: 複数の移動ノードを含む統合センサネットワークのテストベッド, 情報処理学会第 74 回全国大会, 4Y-2 (2012/3/7, 名古屋工業大学 (名古屋市)).
5. 三竹一馬, 石原進: 流れるセンサネットワークのノード群分断を考慮した通信方法に関する考察, 情報処理学会第 74 回全国大会, 4Y-3 (2012/3/7, 名古屋工業大学 (名古屋市)).
6. 佐藤大輔, 石原進, アクセスポイントとの間欠的通信機会を持つ流れるセンサ群からの情報収集に関する基礎的評価, 電子情報通信学会技術研究報告, ユビキタスセンサネットワーク研究会, USN2011-74, Vol.111, No.386, pp.101-106 (2012/1/20, 戸田家 (鳥羽市)).
7. 佐藤大輔, 石原進: 基地局との接続機会が限定された流れるセンサネットワーク向けのクラスタリングアルゴリズムの検討, 電気関係学会東海支部連合大会, B2-6 (2011/9/26, 三重大学 (津市)).
8. 石原進, 中島和樹: GPGPU による無線ネットワークシミュレータ JiST / SWANS の高速化, 情報処理学会研究報告, モバイルコンピューティングユビキタス通信研究会, Vol.2011-MBL-58, No.17, pp.1-7 (2011/6/3, 岡山大学 (岡山市)).
9. 中島和樹, 石原進: GPGPU による並列処理を用いたモバイルアドホックネットワークシミュレーションの高速化, 情報処理学会第 73 回全国大会, 4J-8 (2011/3/3, 東京工業大学 (東京都)).
10. 石原進: 間欠通信を行う流れるセンサ群からの情報収集に関する一考察, 情報処理学会研究報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, Vol.2010-ITS-43 (2010/11/12, 神戸大学 (神戸市)).

[その他]

研究者 Web ページ

<http://www.ishilab.net>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原 進 (ISHIHARA SUSUMU)

静岡大学・創造科学技術大学院・准教授
研究者番号: 10313925