

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330104

研究課題名(和文) 携帯端末を用いたセンサ情報収集手法の開発に関する研究

研究課題名(英文) Studies on Gathering Methods of Sensing Information by Mobile Terminals

研究代表者

伊藤 実 (ITO, Minoru)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90127184

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：スマートフォン等に内蔵されたセンサを用いて環境情報が取得できれば、特別なインフラの設置は不要であるが、人は自律的に行動しており、必ずしも都合よく必要なデータが得られるとは限らない。また、データ収集のために無線通信を利用するが、無線通信範囲、利用可能帯域幅、センシング範囲、携帯端末のバッテリー量の制約などを考慮すると、データ収集のために適切なセンサを選定することは非常に困難な問題である。

本研究では、センサ情報要求クエリが与えられたとき、指定された制約条件を満たしつつ、データを効率的に収集する手法の開発を目的とし、計算機シミュレーションにより手法の有効性を評価した。

研究成果の概要(英文)：If environmental information can be obtained by sensors in mobile terminals such as smartphones, then preparing specific infrastructure for gathering sensing information would be unneeded. But since people with smartphones should move autonomously, necessary information cannot always be obtained. Wireless communication is used for gathering information. Then selecting appropriate mobile terminals is quite difficult, since we should take into account constraints such as communication area, available band width, sensing area, and available battery power of terminal.

In this research, given a query for sensing information, we have developed an efficient method for gathering necessary information, under satisfying specified constraints. We have evaluated usefulness of the method through computer simulation.

研究分野：情報工学

キーワード：センサネットワーク スマートフォン DTN

### 1. 研究開始当初の背景

近年急速に普及してきた iPhone などのスマートフォンは、WiMax による基地局とのデータ通信、WiFi や Bluetooth による近距離データ通信、GPS による位置測定の機能に加えて、加速度センサ、照度センサなどのセンサを搭載しており、非常に高機能な無線センサノードとみなすことができる。都市部において、それらのノードは相当高密度に分布しており、センサネットワークのための専用のインフラを設置しなくても、地域、時間帯が指定されたセンサ情報を要求するクエリが与えられたとき、必要なセンサ情報を取得することは原理的に可能である。しかし、人は自律的に行動しており、システムがそれらの移動を制御することはできず、無線通信範囲、利用可能な帯域幅の制約があり、センシング対象領域を被覆することは困難であるなど、通常の無線センサネットワークの設計とは違った解決すべき課題が数多く存在する。また、災害時にそれらのノードから被災地域の正確な情報が迅速に収集できれば、非常に意義深い。しかし、災害時には通信インフラが利用できないことが予想され、近距離通信によるアドホックネットワークを用いざるを得ず、通信の頻繁な分断や通信容量の制限に対処する必要が生じる。

これまで、携帯端末向けのセンサネットワークサービスに関するシステムが幾つか提案されている。CitySense は、都市の各地に設置されたセンサから利用者の行動を収集し、その情報および当該利用者の行動履歴に基づき、当該利用者の嗜好に合った情報をリアルタイムに提示する。Bubble-sensing は、利用者がある地点とそこで得たい情報（例えば、写真や環境音）をくくり付け、他の利用者がその地点を通ったときにイベントを発生させることにより、必要な情報を取得する。PriSense では、利用者から収集される情報から個人が特定されないよう、統計的な処理を施す手法が提案されている。Anonymsense も同様に、利用者のプライバシーを保護するためのデータ収集手法を提案している。しかし、上記の研究では、自律的に移動するノードの時間空間的なセンシングに基づく領域、時間帯の被覆について考慮されていない。次に、災害時のように頻繁に通信が分断する環境では、store-carry-and-forward 方式に基づく DTN (disruption tolerant network) 技術を利用することが考えられる。通信遅延を抑えるため、メッセージフェリーを用いる方式 (EURASIP 2010)、通信の輻輳を防ぐため一部集中制御を用いる方式 (ACWR 2011)、ネットワークポロジを工夫する方式 (IEEE Communications Magazine 2010) などが提案されているが、災害地の状況を考えると、特別な機器を利用せず、集中管理の不要な分散制御に基づく手法が望まれる。

### 2. 研究の目的

本研究では、センシングすべき領域および時間帯がセンサ情報要求クエリとして与えられたとき、(a) スマートフォンを携帯する人を移動センサノードとみなし、クエリに対して必要な情報を収集する手法を開発し、さらに、(b) 災害時のように通信インフラが利用できない環境での対処法を考案する。これら 2 点を研究期間内の目標とした。

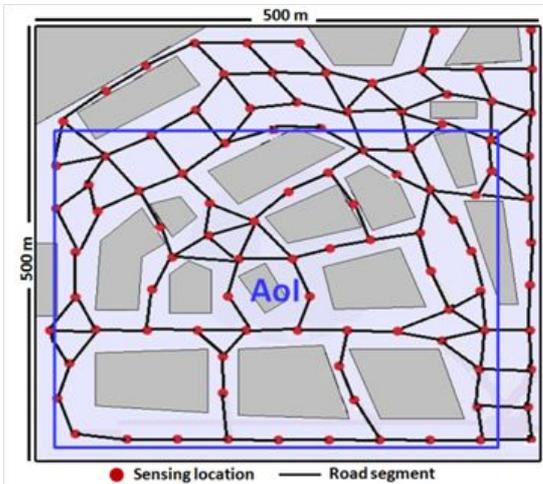
### 3. 研究の方法

上記(a)に関して、人の移動をシステム側でコントロールすることはできないので、センシング対象領域の 100%被覆を実現することは不可能である。そのため、確率的な被覆の概念を導入する。具体的には、対象領域を離散的な点集合として表現し、確率  $P$  での被覆を、指定された時間帯において、領域内のどの点も確率  $P$  で少なくとも 1 つの移動センサノードによりセンシングされることと定義する。確率  $P$  は、利用者がクエリ中で与えるものとする。各ノードは、システムからセンサ情報の送信要求があれば、WiMax 等の通信により基地局へ自分の持つセンサ情報を直接送信する。移動ノードの位置情報を常時システムが確認できるならば、その時間帯に対象領域を移動するすべてのノードを求めることは可能である。しかし、処理コストおよび通信帯域の制約を考慮すれば、確率的な被覆という条件を満たし、センシングのためにできる限り少ないノードを選定し、通信回数もできる限り少なくすることが望ましい。

本手法を利用したシステムの具体例として、都市部でのある道路の現在の混雑度合いが知りたい場合、GPS 情報を用いてその道路を現在歩行している人（移動ノード）を何名か選定する。その歩行者の加速度センサのセンシング情報から単位時間当たりの歩行数が算出でき、おおよその歩行速度が見積もられる。選定した人の平均歩行速度から道路のだいたいの混雑度が推測できる。ここで、選定された人が全く意識することなく端末が自動的に必要な情報をセンシングできることは重要な点である。このように、特別なインフラを設置しなくても、携帯端末だけでセンサネットワークが構築できる。サービスが利用可能な全体領域は決められているとし、クエリにおいて情報が知りたい部分領域 (AoI: area of interest) を指定する。また、その全体領域中には、センシング範囲などで決まる間隔で（センシング）ポイントが一様に存在すると仮定する。AoI 中の各ポイントがセンサによりセンシングされることで、AoI の被覆が実現されるとみなす。次図の例では、500m 四方の区画内の道路部分が全体領域で、道路沿いにポイントが分布し、その一部が AoI として指定されている。クエリとしては、AoI に加えて、時間帯  $T$  および被覆確率  $P$  が与えられる。このとき、クエリを処理するために、次の確率的被覆条件を満たす移動ノードの集合  $S$  を求める。

**確率的被覆条件**：時間帯 T の間に、AoI 中のどのポイントも集合 S に属する少なくとも 1 つの移動ノードにより確率 P 以上でセンシングされる。

AoI 中のポイント数を  $n$  個とすると、上記の条件は、時間帯 T の間に集合 S に属する移動ノードがセンシングした AoI 中のポイント数は  $P \cdot n$  個以上であると言い換えることができる。明らかに、集合 S のサイズは小さい方が望ましい。ここでの目的は、そのような集合 S を求める効率的なアルゴリズムを考案することである。しかし、この問題は、集合の最小被覆問題の一般化であり、NP 困難な組合せ最適化問題である。従って、性能の良い近似解を求める効率的なヒューリスティックアルゴリズムを開発することが現実的である。



上記(b)に関して、移動ノードによるアドホックネットワーク(MANET)を用いた通信を行うことになるが、ノードの移動に伴い、ネットワークの分断やトポロジの変化が頻発する。そこで、DTN 技術に基づく通信を考える。直観的には、各ノードは、周囲に通信相手が存在しない場合、情報を保持したまま移動する。通信相手が存在する場合、自ノードと相手ノードの移動速度と移動方向から情報の目的地（通常はクエリ発信者）への「距離」を計算し、相手ノードの距離が近ければ、自ノードの情報を相手ノードに送信する。このように、各ノードからのセンサ情報を目的地に収集する。しかし、DTN では通信容量は非常に限られており、また、各ノードの記憶容量や利用可能なバッテリー量も限られている。従って、単純に上記手法を適用するだけでは、通信の輻輳による遅延、保持すべき情報のオーバーフロー、あるいは、バッテリーの枯渇等に対処できない。すなわち、DTN を用いて情報を迅速に収集しようとする場合、通信容量と記憶容量の面から、すべての情報をそのままの形で保持するのは困難である。そこで、情報の集約化を図る。具体的には、各情報に位置に基づく有効範囲を定義する（例えば、ある地点の半径 10m の円内の状況は基本情報として正確に保持できると考える）。また、情報の最大粒度（例えば、半径 100m）

をクエリで指定する。直観的に、粒度が小さければそれだけ詳細な情報が得られるが、情報量は増加するため、通信の輻輳のため遅延が発生する、記憶容量の限界により情報の欠落が生じる、等のマイナス面が増える。2 つの移動ノードが出会ったとき、目的地への距離が近いノードへ他ノードの情報を転送するが、その際、最大粒度内に収まっている情報があれば、それらの情報をマージすることで、情報量の増加を抑える。しかし、移動ノードはそれぞれ近隣の情報を収集しており、単純に情報をマージすれば、同じ内容の情報を重複する可能性がある（例えば、重複したカウントで被災者数を多く見積もってしまう）。そこで、ハッシュに基づくデータ構造である Bloom フィルタを用いて集合を表現することで、情報の重複をできる限り抑える。次に、どちらのノードに情報を転送するのかが選ばれる基準として、ノードの移動速度、移動方向、および、目的地からの距離に基づき、期待到着時間を定義する。その時間が早いノードに情報を持たせることで情報の増加を抑える。

#### 4. 研究成果

上記(a)に関して、どのノードを選択するかを基準として、(1)初期位置ができる限り離れているものを選ぶ ILB 手法と(2)ノード同士が初めて合流するまでの期待時間ができる限り長いものを選ぶ IMTB 手法を考案した。それらの手法の有効性を確認するために、選択されるノード数、および、センシング領域被覆の達成率を計算機シミュレーションにより評価した。ランダムにノードを選ぶ手法を比較対象とした。ノード数は 25 ~ 500 とし、500m x 500m のフィールド上を東西南北の方向に秒速 1 m で移動するとした。被覆率は 20 ~ 90% の範囲内で 5 段階設定した。AoI のポイント数は 4 ~ 99 までの範囲内で 6 段階設定した。

まず、各ノードの 4 方向への移動確率が同じ場合、選択されるノード数は、ランダムに比べて、ILB では約 75%、IMTB では約 80% 減らせることが確認できた。AoI のポイント数が少ないとき ILB が最も良く、ポイント数が多いとき IMTB が最も良いことが確認できた。従って、指定される AoI サイズにより手法を変えることが有効である。また、どちらの手法でも要求された被覆率は達成された。ただし、IMTB が最も分散が小さかった。次に、各ノードの 4 方向への移動確率が偏っている場合、等確率のときとほぼ同じ傾向を示したが、選択されるノード数は全体として増加した。これは、ノードの移動の偏りにより特定の場所をセンシングするノードも偏ることによる。最後に、より現実的な設定でシミュレーションを行った。その結果、選択されるノード数は増加傾向になった。この原因として、上と同様、特定のセンシング領域を移動するノード数が少ないことによる。

結論として、ILB、IMTB のどちらの手法も、クエリの要求に対して選択すべきノード数を大きく減らせることが確認できた。

上記(b)に関して、計算機シミュレーションにより手法の有効性を評価した。大学近辺の実際の地図を基にして 3km×3km のフィールド上に 200~1000 の範囲内で 5 段階の(人を仮定した)ノードを配置した。無線ネットワークの帯域幅を 1 Mbps、到達域を 50m、バッファサイズを 100~500KB とした。また、メッセージサイズを 5KB、Bloom フィルタのサイズを 256bit、集約の範囲を 0~100m とした。比較のため、ノード同士が通信範囲内に入ったときある一定の確率で情報交換をするエピデミックルーティングを対象とした。その結果、メッセージ配送に関して、どの状況においても、本手法はエピデミックルーティングに比べて 5~10% 程度配送遅延の時間を減少できることを確認した。また、エピデミックルーティングでは早期にバッファ溢れが発生したが、本手法ではバッファが溢れることはなかった。結論として、本手法はエピデミックルーティングと比べて、少ないメッセージ交換(従って、少ない無線通信)でより早く情報を伝達できることを確認した。

#### 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 10 件) すべて査読有

脇坂洋祐, 柴田直樹, 北道淳司, 安本慶一, 伊藤実: マルチコア計算機のためのターボブースト・ハイパースレッディングを考慮したタスクスケジューリング, 情報処理学会論文誌, 採録決定 (2016).

徐家興, 孫為華, 柴田直樹, 伊藤実: GreenSwirl: 交通渋滞の緩和を目指した信号制御および経路案内方式の提案と性能評価, 情報処理学会論文誌, 採録決定 (2016).

孫為華, 柴田直樹, 稲葉健吾, 伊藤実: VANET における複数無線チャネルを用いた大容量データ配信手法の提案と性能評価, 情報処理学会論文誌, 56, 9, pp.1916-1928 (2015).

W. Sun, N. Shibata, K. Kenmotsu, K. Yasumoto, and M. Ito: A Method for Navigating Cars in Multilevel Parking Facility, Journal of Information Processing, 23, 4, pp.488-496 (2015).

木谷友哉, 澤悠太, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤実: 運転者に対する交通安全支援のための指向性アンテナおよび車車間通信を用いた歩行者の位置推定手法, 情報処理学会論文誌「数理モデル化と応用」, 7, 2, pp.74-85 (2014).

松尾真也, 孫為華, 柴田直樹, 木谷友哉, 伊藤実: BalloonNet: 無線ネットワークを用いた建物包囲型三次元配置手法, 情報処理学会論文誌, 55, 8, pp.1743-1752 (2014).

柴田直樹, 後藤田祥平, 伊藤実: 単一ノ

ード故障時におけるマルチコアプロセッサシステムの回復時間を最小化するタスクスケジューリング, 情報処理学会論文誌, 55, 2, pp.575-586 (2014).

勝間亮, 松本啓司, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤実: 移動アンカノードを用いた三辺測量による水中センサノードの低コスト位置推定手法, 情報処理学会論文誌, 55, 2, pp.790-800 (2014).

J. Fajardo, K. Yasumoto, N. Shibata, W. Sun and M. Ito: Disaster Information Collection with Opportunistic Communication and Message Aggregation, Journal of Information Processing, 22, 2, pp.10-21 (2014).

N. Shibata and S. Yamamoto: GPGPU-Assisted Subpixel Tracking Method for Fiducial Markers, Journal of Information Processing, 22, 1, pp.19-28 (2014).

[学会発表](計 29 件)

B. Ojetunde: An Enhanced Endorsement Chain Using Endorsement Delegation on MANETs Based Mobile Payment System in a Disaster Area, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会, 明治大学駿河台キャンパス (東京都), 2016 年 3 月 3 日~4 日.

J. Gao: Residual Inter-Contact Time for Opportunistic Networks with Pareto Inter-Contact Time: Two Nodes Case, International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, Las Vegas, Nevada, USA, 2015 年 7 月 27 日~30 日.

B. Ojetunde: Simulation-Based Evaluation of a Mobile Payment System Utilizing MANETs for a Disaster Area, DICOMO 2015 シンポジウム, ホテル安比グランド(岩手県八幡平市), 2015 年 7 月 8 日~10 日.

J. Gao: A Study for Residual Inter-Contact Time in Homogeneous Opportunistic Networks, DICOMO 2015 シンポジウム, ホテル安比グランド(岩手県八幡平市), 2015 年 7 月 8 日~10 日.

B. Ojetunde: An Endorsement Based Mobile Payment System for a Disaster Area, 27th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Gwangju, South Korea, 2015 年 3 月 25 日~27 日.

B. Ojetunde: A Proposal of an Endorsement Based Mobile Payment System for a Disaster Area, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, ホテル玉泉(島根県出雲市), 2014 年 12 月 8 日~10 日.

徐家興: 大都市における車両走行時間を短縮する交通信号制御および経路案内方式の提案, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, ホテル玉泉(島根県出雲市), 2014 年 12 月 8 日~10 日.

富永拓也: 停電した地下街向けのスマートフォンを用いた避難誘導方式の提案,

マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, ホテル玉泉(島根県出雲市), 2014年12月8日~10日.

阪口紘生: 道路交通網上でパケット配送を実現する車々間通信を併用した距離ベクトルルーティング, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, ホテル玉泉(島根県出雲市), 2014年12月8日~10日.

J. Xu: GreenSwirl: Combining Traffic Signal Control and Route Guidance for Reducing Traffic Congestion, IEEE Vehicular Networking Conference 2014, Paderborn, Germany, 2014年12月3日~5日.

徐家興: GreenSwirl 信号制御および経路案内方式の提案と性能評価, 情報処理学会高度交通システム研究会, 福岡大学(福岡県福岡市), 2014年11月20日~21日.

N. Shibata: Task Scheduling Algorithm for Multicore Processor Systems with Turbo Boost and Hyper-Threading, International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, Las Vegas, Nevada, USA, 2014年7月21日~24日.

徐家興: GreenSwirl: 車両走行効率向上を目指した信号制御および経路案内方式, DICOMO 2014 シンポジウム, ホテル泉慶(新潟県新発田市), 2014年7月9日~11日.

富永拓也: 地下街におけるスマートフォンの光を利用した避難誘導方式の提案, DICOMO 2014 シンポジウム, ホテル泉慶(新潟県新発田市), 2014年7月9日~11日.

B. Ojetunde: Consideration of a Mobile Payment System Using Endorsement in MANETs for a Disaster Area, 情報処理学会コンピュータセキュリティ研究会, サン・リフレ函館(北海道函館市), 2014年7月3日~4日.

稲葉健吾: VANET における複数チャネルを用いた大容量データ配信手法の提案, 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研究会, 明治大学中野キャンパス(東京都), 2014年3月6日~7日.

上田知幸: EVTour: 電気自動車の乗換スケジュールリング法の提案, 情報処理学会数理モデル化と問題解決研究会, タウンプラザしまね(島根県松江市), 2014年3月3日~4日.

孫為華: 待ち時間を短縮する駐車ナビゲーション, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, ホテル櫻井(群馬県草津町), 2013年12月4日~6日.

阪口紘生: 道路交通網上でパケット配送を実現する交通量を考慮した距離ベクトルルーティング, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, ホテル櫻井(群馬県草津町), 2013年12月4日~6日.

松尾真也: BalloonNet: 災害復旧のための建物包囲型無線ネットワークノード配置法, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会, 館山寺サゴロイヤルホテル(静岡県浜松市), 2013年10月17日~18日.

〔その他〕

ホームページ等

<http://ito-lab.naist.jp/mediawiki/index.php/Publication>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 実 (MINORU ITO)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号: 90127184

### (2) 研究分担者

柴田 直樹 (NAOKI SHIBATA)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号: 40335477