

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25年 3月 31日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22700076

研究課題名（和文）

広域疎密センサーネットワークを実現するためのハイブリッド型データ収集基盤の研究

研究課題名（英文）

Hybrid Data Aggregation Platform for Wide and Sparse Wireless Sensor Network

研究代表者

荒川 豊（ARAKAWA YUTAKA）

九州大学・大学院システム情報科学研究所・助教

研究者番号：30424203

研究成果の概要（和文）：

農場や牧場といった広大なエリアをセンサーネットワークでセンシングしようとする場合、コストの兼ね合いからシミュレーションのように多数のノードを配置することはできず、ノードに配置間隔が大きな疎密なセンサーネットワークになる。そこで、本研究では、人や自動車を媒介したセンサーネットワークを検討し、特に超音波センサーによるアクティブウェイクアップ型のすれちがい通信プロトコルについて研究と実装を行った。

研究成果の概要（英文）：

In this research, I focus on Sparse Wireless Sensor Network for an agricultural environment, in which only a few sensors are set on a wide field. Especially, I propose a new encounter data transmission protocol with ultra-sonic sensor-based active wake-up mechanism.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：計算機システム・ネットワーク

キーワード：ユビキタスコンピューティング、農業情報工学、センサーネットワーク

1. 研究開始当初の背景

近年、気温や水位などの環境測定と農作業者の行動管理といった農業の高度情報化は、収穫量の安定と増大、経験の乏しい若手従事者の支援などが可能になるとして、高い期待が寄せられている。

農業情報化の1つとして、農場の環境情報を蓄積するフィールドモニタリングがあり、これまで多数の研究がなされている。フィー

ルドモニタリングで重要となるのは、1) 電源（農場には電源がない）と、2) データ回収（人手で回収するかネットワーク化するか）、であり、この両方を解決するものとして、無線センサーネットワークが注目されている。

ただし、これまでの無線センサーネットワークと異なり、農場はセンシング対象面積に対する設置ノード数が極端に少ない。これは

実際に農家にヒアリングした結果であるが、設置コストを鑑みた（1台1～2万円だったとしても）場合、2km四方の農場に4～5つで十分とのことである。元来センサーネットワークとは、高密度に配置されたノード間をアドホック通信によって繋ぐものであるため、このような疎な環境において、前述の1)と2)を満たすモニタリングシステムへの良急が高まっている。

これまで疎密環境下におけるセンサーネットワークとしては、Data Mules¹が有名である。この手法は、マルチホップ通信の代わりに、シンクノードあるいはデータ収集ノード（以降、移動ノードと表記）が能動的に移動することによって、センサーデータの収集するものである。これらの方式は、遅延が増大する反面、移動ノードを用いることで耐障害性や柔軟度があがるという特徴があり、遅延が許容されるアプリケーションであれば非常に有用な方式である。

しかしながら、移動ノードが各センサーを巡回する必要があるため、適用範囲として、道路沿いの交通情報収集などが大半であり、移動ノードの巡回が困難な農場のような広大なエリアへの例は少ない。また、省電力化のために起動と停止を繰り返しているセンサーノードの場合、移動ノードが通過するときちょうど起動しておく必要があり、そのスケジューリング方式や収集ノードの適切な移動速度、センサーにおける最適なバッファリングの仕組みなど、実用化に向けては、個別技術の統合的連携を含め、まだ多くの課題が残されているのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、センサーネットワークを実際に農場に導入することを想定し、ノード数が疎かつ移動ノードの巡回も疎、という疎密環境下でのデータ通信を実現することである。

ノード数が疎という問題に対しては、人や車に取り付けたデータ収集用の移動ノードを用いて、農場に固定されたセンサーノードからデータを回収する。その際に、可能な限り従来のマルチホップ通信も組み合わせることにより、移動ノードを用いつつ遅延を抑制する手法を提案する。

また、この移動ノードが疎という問題に対しては、移動ノードと固定ノードの通信手法を改善する。周期的に On/Off を繰り返す従来手法の場合、移動ノードの巡回が疎な場合、無駄な On が増えるため、提案手法では本体回路とは別に本体を起動するための低消費

電力な起動回路を作成し、移動ノードが近づいた時のみ起動する。本研究では、その通信方式や消費電力見積もりを行い、ハードウェアの実装まで行う。

3. 研究の方法

まず、移動ノードを用いたデータ回収手法で問題となる遅延に対して、(1)許容遅延時間を考慮したデータ収集手法、を提案し、計算機シミュレーションによって評価する。

次に、固定ノードの消費電力を抑制するために、(2)超音波センサーを用いたアクティブウェイクアップ型ノードを用いたすれちがい通信方式、を提案し、最後にノードの実装し、評価実験を行う。

4. 研究成果

1) 許容遅延時間を考慮したデータ収集手法

移動シンクを利用したデータ収集手法では、移動シンクがセンシング領域内を巡回し、センサーノードの通信範囲内まで移動することで、マルチホップ通信をすることなく、センサーノードが生成したデータを直接収集する。そのため、マルチホップ通信に中継に必要なデータの送受信量を削減し、センサーノードにおける消費電力を抑制することができる。しかし、センサーノードは移動シンクの到来を待つ必要があり、センサーノードがデータを生成してから移動シンクがデータを収集するまでに遅延時間が生じる問題がある。

本研究、複数の移動シンクが固有の行動特性でセンシング領域内を巡回し、異なる遅延制約を有する複数種類のデータを収集するセンサーネットワークを想定する。このような環境において、遅延期限内にデータを収集しつつ、マルチホップ通信での中継通信量を削減する省電力なデータ収集手法を提案する。

提案手法の基本的なアプローチは、移動シンクの巡回経路周辺に存在するセンサーノードに、観測したデータをマルチホップ通信で集めて、移動シンクが到来した際に、集めたデータを一気に転送することである。提案手法では、一時的にデータを蓄積するセンサーノードとして、次に移動シンクと接触した際に遅延期限を満たすことができると考えられるセンサーノードを選択する。その選択は、経路表に記録された予測巡回周期を基に行う。さらに、消費電力を削減するために、最終的に選択されたセンサーノードの中から最も少ないホップ数で到達できるノードへデータをマルチホップ通信で転送する。以降では、移動ノードの巡回経路周辺ノードを MN (Mobilesinks-path Neighbor) ノードと呼び、さらにその中で最も少ないホップ数で到達できるノードを最短 MN ノードと呼ぶ。

¹ Shah, R.C. and Roy, S. and Jain, S. and Brunette, W., "Data mules: Modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks," Ad Hoc Networks, Vol.1, No.2-3, pp.215-233, 2003

Entry number	Mobile sink	Cycle period	Destination node	Next hop node	Hop count
1	M1	T1	D1	A	H1
2	M2	T2	D2	B	H2

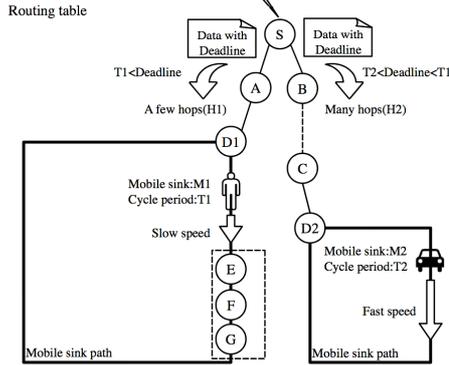


図1 提案手法の概要

提案手法の例を図1に示す。例では、巡回周期 $T1$ を持つ移動シンク $M1$ と巡回周期 $T2$ を持つ移動シンク $M2$ の二つの移動シンクが存在する。ただし、 $T2 < T1$ とする。センサーノード S が遅延期限 $Deadline$ をもつ観測データを転送する場合を考える、 $Deadline$ が $T2$ よりも長いデータは、到達ホップ数 $H1$ が小さい $D1$ を宛先ノードとして A へ、 $Deadline$ が $T2$ よりも短く、 $T1$ よりも長いデータは、到達ホップ数 $H2$ が大きい $D2$ を宛先ノードとして B へ転送される。

このときの経路構築法として、本研究では、MIPR (Mobilesink-Initiated Proactive Routing) 法と、MIPR法の経路構築にかかる通信コストを削減する MIPR-LC (Mobilesink-Initiated Proactive Routing with Low Cost) 手法を提案する。

MIPR法は、移動シンク主動のプロアクティブ型経路構築プロトコルである。すなわち、巡回する移動シンクが定期的トリガメッセージを通信範囲内のセンサーノード (MN ノード) に送信する。そして、受信した MN ノードがセンサーネットワーク全体に対して制御メッセージをフラッディングし、各センサーノードの経路表を事前に構築する。この手法の利点は、移動シンクによる経路表の維持管理が容易になること、および大規模なセンサーネットワークの経路表の構築に迅速に対応できる点である。しかしながら、経路構築にフラッディングを用いるため、制御メッセージの送信に関わる消費電力が大きいという欠点がある。

そこで、MIPR-LC法では、MIPR法と同様に、すべての MN ノードが制御メッセージをフラッディングするが、既に同一の移動シンクのための MN ノードの経路が存在し、かつ、その経路が現在の制御メッセージが経由したホップ数より短い場合は、その受信した制御メッセージを再送信しないことによって、制御メッセージを抑制する。

これは、提案システムでは、すべての MN

ノードまでの経路を確立する必要はなく、各センサーノードにおいてそれらの MN ノードの中で最もホップ数が短い最短 MN ノードまでの経路が確立されていれば良いからである。

本手法の有効性を検証するために、無線ネットワークシミュレータ QualNet を用いたシミュレーションにより評価を行った。評価は、経路構築手法に関する評価とデータ収集手法に関する評価を行った。経路構築手法に関する評価では、各センサーノードがすべての移動シンクの最短 MN ノードまでの経路を構築するために必要な制御メッセージの送受信量 (消費電力) を評価し、データ収集手法に関する評価では、想定環境における遅延期限内の収集データ量とセンサーノードの送受信消費電力を評価した。

その結果、MIPR-LC法は、MIPR法と比較して、センサーノードの送受信電力を 23%以下に抑制できることを示すと同時に、移動ノードが許容遅延時間以内にすべてのデータを収集可能であることを示した。

2) 超音波センサーを用いたアクティブウェイクアップ型すれちがい通信

センサーノードは消費電力を低減するために Low Duty Cycle と呼ばれる動作モードで動いており、大半をスリープ状態で過ごしている。そのため、移動ノードが近づいた際に、スリープを解除する仕組みが必要であるが、そこで多くの電力を消費する訳にはいかないため、センサーノードよりも低消費電力で駆動するウェイクアップモジュールが必要である。そのため、本研究では、まずこのウェイクアップモジュールの選定から行う必要があった。

図2は、従来方式 (Low Duty Cycle 方式) と提案方式 (アクティブウェイクアップ方式) を電力消費の観点から比較したものである。従来方式では、周期的に電力を消費し、

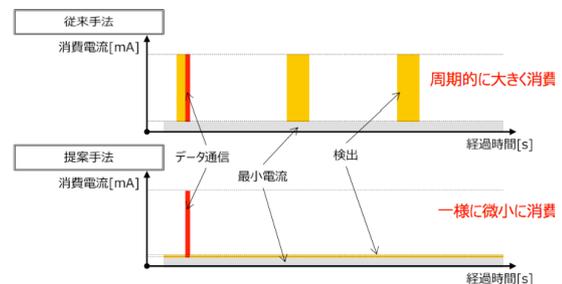


図2 提案と従来の電力消費イメージ

もし移動ノードが到来しない場合は無駄な電力消費となる。一方、提案方式では、移動ノードの検出用に常時電力を消費するもの

の通信は、実際に移動ノードが到来した時のみとなる。そこで、ウェイクアップモジュールに対する要件は、常時駆動時の消費電力が低いということになる。

表1は、ウェイクアップモジュールの候補として検討した比較した消費電力が低いモジュールについて示す。消費電力的にはRFIDやRF レシーバが好ましいが、欠点として現

表1 モジュールの比較

検出手法	消費電流 [μ A]	検出範囲	欠点
超音波センサ	$O(10^4)$	Close	外乱。消費電流やや大。
赤外線センサ	$O(10^4)$	Close	指向性がある。
RF レシーバ	$O(10^1)$	Close	コスト大。
Active RFID	0 (電池内蔵)	Medium	コスト大。電池交換が必要。
Passive RFID	0	Closer	コスト大。指向性がある。

段階では初期コストが高いということがある。これは、これらがまだ一般的ではなく運用レベルでの実用化がなされていないためであり、今後の技術革新でこれらによる移動ノード近接の検知が容易に可能となると予想できるが、現段階では超音波などのモーションセンサが適していると判断した。さらにモーションセンサの中でも、今回の実験環境が屋外であることを考慮すると、太陽光の外乱を受ける可能性が大きい赤外線センサではなく、超音波センサを採用した。

次に、この超音波センサを用いてどのようにウェイクアップとすれ違い通信を実現するかについて説明する。超音波センサを用いたすれちがい通信の検出における主な処理は、センサの値が閾値を下回るか否かを判定することである。この検出を繰り返し行うことですれちがいの検出が常時可能となる。この点において重要なポイントは、検出の閾値と周期である。

閾値は事前に決定しておかなければならないが、超音波は気温や湿度の影響を受けるため、厳しい閾値を設定すると、時として検知できない可能性がある。また超音波から得られる情報が雑音を含むことがあるが、雑音はローパスフィルタによって除去が可能である。しかし、すれちがいの速度が大きい時に正しい値も除去してしまう恐れがあるため、事実上反射面が凹凸であるに発生する乱反射した値は対策不可能である。一般的に超音波センサは検出可能な物体との距離を返し、そのような物体が存在しないときは最大検出距離を返す。例えば6m先までの検出が可能なら超音波センサならば、2m地点に物体があれば2mを、何もなければ6mを返すことになる。この閾値の決定は、適用環境の事前調査から得たすれちがい時の超音波センサの値、雑音の程度、すれちがいの速度等を判断基準に基づいて行うべきである。また、周期の決定では超音波センサのデータの

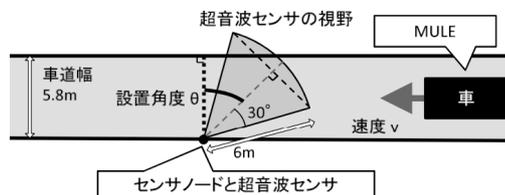


図3 実験環境の幾何学的モデル

取得間隔を考慮しなければならない。超音波センサは反射した超音波の帰ってくる時間で距離の測定を行なっているため、値の出力は周期的、例えば100ms毎となる。

設置角度に関する検証では、図3に示すような環境を構築し、 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ について超音波センサの信号について分析した。また、車速 v は、10km/h と 20km/h について検証した。その結果を図4と図5に示す。

図より、 $v=10$ の時で、かつ θ が0でない時、値が乱反射していることがわかる。乱反射した値が本来の値を下回る値となるのは、ドップラー効果の影響が大きいと推測している。

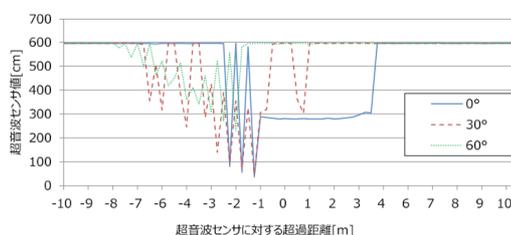


図4 設置角 θ と超音波センサの値 (10km/h)

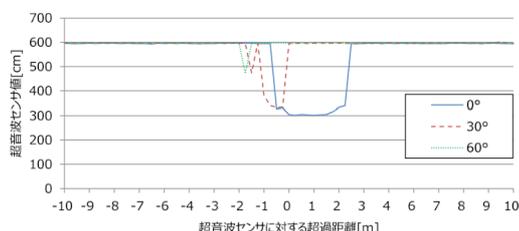


図5 設置角 θ と超音波センサの値 (20km/h)

ここでのドップラー効果の影響とは、反射波は単純に音速ではなく車の速度の影響を受けた速度となるため、超音波センサがより近くにあると判断してしまっていることである。また、 $\theta=30$ の時が最も乱反射しているのは、車の前面と左側面のどちらも超音波をセンサ方向に反射できない相対位置関係にあるからである。逆に $v=20$ のときほとんど乱反射していないのは、速度の影響が大きく、乱反射だと判断するほどデータ数が無いためだと分析している。この結果から、 θ は 0° (道路に対して直角) が適していると考えられる。また、閾値に関しては、400cmあたりが妥当であると考えられる。

また、すれ違い検知後の通信路確立に関しては、Zigbeeをそのまま利用する。具体的には、超音波センサを用いて移動ノードの近

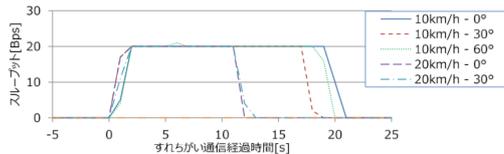


図6 すれ違い通信のスループット

接を感知した固定センサーノードは、ただちに SYN パケットを送信し、通信路の確立を行う。移動ノードはセンサー層からの SYN パケットを常に受信できるようにシステムの状態を設定しておく。そして、SYN パケットを受信したら ACK を返し、データ受信待機状態に遷移する。固定センサーノードは、移動ノードからの ACK が帰ってきた場合、データ通信を開始する。

この時の通信性能を実際に評価したものが図6である。図より、10km/h では約 20 秒、20km/h では約 10 秒の通信時間を確保可能であることがわかる。この時、通信の終了は、車が離れたことによる通信不能によるものに限定しており、速度と通信時間が反比例していることから、この値は正確であると判断できる。

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)

[学会発表] (計 9 件)

1. 阿部竜弥, 荒川豊, 田頭茂明, 福田晃, “移動シンクを利用した無線センサネットワークにおける許容遅延時間を考慮したデータ収集方式,” 電子情報通信学会総合大会, No. B-6-57, 2011 年 3 月 16 日.
2. 阿部竜弥, 荒川豊, 田頭茂明, 福田晃, “2 許容遅延時間を考慮した省電力なセンサデータ収集方式,” 電子情報通信学会技術研究報告, モバイルマルチメディア通信研究会, Vol. 111, No. 133, MoMuC2011-15, pp. 13-17, 2011 年 7 月 14 日.
3. 阿部竜弥, 荒川豊, 田頭茂明, 福田晃, “移動ノードを用いた無線センサネットワークにおけるすれ違い通信方式の検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-15-14, 2011 年 9 月 14 日.
4. 阿部竜弥, 荒川豊, 田頭茂明, 福田晃, “遅延制約を有するセンサデータの省電力な収集経路構築手法,” 電子情報通信学会技術研究報告, モバイルマルチメディア通信研究会, Vol. 111, No. 384, MoMuC2011-43, pp. 37-42, 2012 年 1 月 20 日.
5. Tatsuya Abe, Yutaka Arakawa, Shigeaki Tagashira, and Akira Fukuda, “A Mobile sink-initiated Proactive Routing Protocol for Deadline-Aware Data Aggre-

gation Method in Energy-Efficient Wireless Sensor Networks,” ARCS Workshop on Architectures for Self-Organizing Private IT-Spheres 2012 (ASPRIT 2012), February 28, 2012.

6. 中野達彦, 阿部竜弥, 荒川豊, 田頭茂明, 福田晃, “移動シンクを利用した省電力センサネットワークにおける超音波センサを用いたすれちがい通信の実験的評価,” 電子情報通信学会総合大会, No. B-15-9, 2012 年 3 月 21 日.
7. 中野達彦, 田頭茂明, 荒川豊, 福田晃, “疎密センサネットワークにおける超音波センサを用いたアクティブウェイクアップ型すれ違い通信システムの展示,” 第 20 回 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2012), Vol. 2012, No. 4, pp. 108--109, 2012 年 10 月 18 日.
8. 中野達彦, 田頭茂明, 荒川豊, 福田晃, “疎密センサネットワークにおける超音波センサを用いたアクティブウェイクアップ型すれ違い通信の提案と実装,” 第 20 回 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2012), Vol. 2012, No. 4, pp. 1--8, 2012 年 10 月 18 日.
9. Tatsuhiko Nakano, Shigeaki Tagashira, Yutaka Arakawa, Akira Fukuda, Riadh Dhaou, “Proposal and Implementation of Encounter Data Transmission with Ultrasonic Sensor-based Active Wakeup Mechanism for Energy Efficient Sparse Wireless Sensor Network,” Proceedings of ninth International Workshop on Heterogeneous Wireless Networks (HWIS E) in conjunction with the 27th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA) 2013, March 25-28, 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒川豊 (ARAKAWA YUTAKA)

九州大学・大学院システム情報科学研究
院・助教

研究者番号：30424203

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし