

平成22年6月1日現在

研究種目：若手研究(B)
研究期間：2008～2009
課題番号：20760245
研究課題名（和文） コンテキストに適応して活性化する省電力無線センサネットワークの研究
研究課題名（英文） Context-aware Wireless Sensor Networks

研究代表者
氏名 南 正輝 (Minami Masateru)
芝浦工業大学・工学部・准教授
研究者番号 70365550

研究成果の概要：

本研究では位置や時刻等のコンテキスト情報を利用した省電力無線センサネットワークの研究を行った。具体的には太陽電池で動作するセンサネットワークノード，および位置情報と時刻情報に基づいて省電力に実空間情報の収集が可能なプロトコルを設計・実装した。

Abstract：

A low-power wireless sensor network system was designed and implemented in this research. We developed solar-powered sensor network nodes and a time-synchronized location-aware routing protocol. The result showed that the designed system can successfully gather real-world oriented information at low-power consumption.

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 ・ 通信・ネットワーク工学

キーワード：コンテキスト情報，センサネットワーク，ユビキタスコンピューティング

1. 研究開始当初の背景

高齢者の病気や屋内での事故による孤独死，出産時や急病時の病院のたらい回しなどが社会問題となっている。必要とされる人に介護サービスや救急医療サービスを迅速に提供するためには，事故や急病の前兆を察知す

ることと，実際に事故や急病が発生した際の確実かつ迅速な情報収集と対応が重要となる。このような実空間におけるプロアクティブなサービスの実現において，実空間情報を収集するセンサネットワーク技術の果たす役割は大きい。高齢化社会の先進国である欧

州では、欧州技術研究枠組計画(FP6, FP7)において Ambient Intelligence 研究の一環として、無線通信技術、センサ技術、デバイス技術の統合化による高齢者支援サービスの研究が精力的に進められている。国内においては、携帯電話とセンサネットワークを連動させて子供や高齢者の見守りを行うサービスが研究されている。また、メタボリック症候群対策など予防医療的な観点からは、ボディセンサネットワークと携帯電話の連携などによるヘルスケアモニタリングの研究なども行われている。

このような背景に基づき、本研究ではセンサネットワークのより一層の省電力化が重要と考え、平常時は徹底的な省電力モードで動作し、緊急事態の前兆や緊急事態が実際に発生したときに高速に活性化し、迅速な状況判断・分析機能を実現する無線センサネットワーク技術について研究を行うこととした。

2. 研究目的

既存の見守りサービスや予防医療サービスで考えられているセンサネットワークはセンサデータのポストプロセスを前提とした定期モニタリング用通信システムとして設計されており、緊急事態の発生前後に迅速に情報収集・状況判断をして通報するような緊急イベント処理システムとしての設計がなされていない。そのようなシステムを実現するためには、徹底的な省電力化による長期運用を実現しながらも、緊急事態の前後のイベントに即座に反応し、状況推定をリアルタイムで行いながら救援保護活動等に有用な情報をフルパフォーマンスで提供可能なネットワーク技術が必要である。これに向けては以下の2つの技術課題が重要となる。

(1) 省電力性と応答性の両立

省電力化と応答性を両立させるためには、センサネットワークノードのパワーマネジメントアルゴリズムが重要である。低消費電力化においては無線アイドルリスニング時間を削減する技術がキーテクノロジーであることが知られており、T-MAC, S-MAC, IEEE802.15.4 ビーコンモードなどが開発されている。しかしながら、既存のパワーマネジメントアルゴリズムは固定的なスケジューリングを前提として設計がなされており、データの緊急性に応じてスケジュールを変更することはできない。このため、低消費電力を実現しようとしてビーコンチェックの間隔を長くすると緊急時の反応スピードが低下してしまう。また、事故や急病などの時は「躓いて倒れて机にぶつかりコンロが落下した」といったように、二次的・三次的なイベントが発生する。このようなイベント連鎖を検出する時も、固定のスケジューリングは

応答性の面で不利となる。したがって、パワーマネジメントにコンテキストに応じた制御を入れることで、イベント検出に必要なセンサを必要なタイミングで瞬時に起動し、興味のあるイベントのフォーカスとトラッキングを行えるような機構が必要となる。具体的には、起点となるイベントの早期検出とそのイベントに関連して起こり得る二次的・三次的イベントを予測し、関連するセンサノードをプロアクティブにウェイクアップさせる機構と緊急性に応じてセンシングやキャリアセンスのスケジュールを動的に変更するコンテキスト適応型パワーマネジメントアルゴリズムが必要となる。

(2) リアルタイム状況推定

状況推定は FFT 等の信号解析アルゴリズムとベイズ推定等の確率論的推定アルゴリズムの組合せにより行われる。緊急イベントの発生時には、そのイベントに起因して発生し得る事態を同時並行的に推定する必要がある。しかしながら、既存のセンサネットワークでは消費電力を抑える目的で、センサデータをシンクノードにいったん集約した後分析するためリアルタイム状況推定を行うことができない。しかしながら、緊急時には電力的な観点よりも応答性が重要であり、状況推定をインネットワークプロセッシングで高速に実現する手法が必要となる。

3. 研究方法

2.で述べた研究目的を実現するために、初年度はセンサネットワークシミュレータを用い、連鎖的高速ウェイクアップ機構、パワーマネジメントアルゴリズムおよび高速状況推定機構の設計を行うこととした。また、次年度はシミュレーションにより連鎖的高速ウェイクアップ機構、パワーマネジメントアルゴリズム、および高速状況推定機構の評価を電力面と応答性の観点から評価するとともに、IEEE802.15.4 準拠のマルチホップ無線通信モジュールと、位置および加速度センサをベースとしたコンテキストセンサを利用してプロトタイプシステムを構築し、緊急イベントを高速に検出・トラッキングできるセンサネットワークシステムを実装することとした。具体的には下記の7項目について研究を進めることとした。

(1) コンテキスト情報に基づくセンサノードの連鎖的高速ウェイクアップ機構の設計

連鎖的高速ウェイクアップ機構の設計では、まず、コンテキスト情報をセンサノード内に流通させるプロトコルを設計する。検出すべきコンテキストをシンクノードから末端のノードに流通させ、緊急イベントに対応するセンサをコンテキスト毎にグループ化できるようなテーブルをセンサノード内に構築できるようにする。次いで、コンテキス

ト情報に基づいてセンサノードを同期させるプロトコルを設計する。センサノードの同期はグループ毎に時刻同期されたビーコンメッセージにより実現し、特定のコンテキストを担当するセンサ群が常に同期している状態を実現する。さらに、連鎖的高速ウェイクアップを実現するプロトコルを開発する。グループが受け持つコンテキストに関連するセンサデータの変化が起きた際に、どのセンサノードがその変化を検出しても、グループ内のすべてのノードをビーコンメッセージの連鎖により高速起動できるような機構を設計する。

(2) 緊急性のモデル化とモデルに基づくパワーマネジメントアルゴリズムの設計

パワーマネジメントアルゴリズムの設計では、まず、実空間内のオブジェクトの地理的關係とポテンシャルの概念に基づいて緊急性の確率モデルを構築する。特定のコンテキストとオブジェクトが組み合わさった時の「危険な状態」を距離依存のポテンシャルとして表現可能な物理モデルを設計する。次に、ポテンシャルの地理的分布に基づいて、センサネットワークの各ノードのデューティサイクルを変化させるプロトコルを設計する。危険な状態であればあるほどセンサネットワークを活性化させるために、監視対象のコンテキストと対応する緊急イベントとの地理的相関関係を事前知識としてセンサノードに保持させるとともに、センサノードがポテンシャルを計算し、休眠→注意→警戒→連続監視のように無線インタフェース・センサ・マイクロプロセッサを動的にスケジューリングできるようなプロトコルを設計する。

(3) インネットワークプロセッシングによる高速状況推定機構の設計

インネットワークプロセッシングによる状況推定機構の設計では、イベントの特徴量抽出用信号処理アルゴリズムと確率論的状況推定アルゴリズムをセンサネットワーク内の資源にマッピングする手法について検討を行う。高速な状況推定を行うために信号処理および状況推定に要する計算量とノードの消費電力を考慮して、データアグリゲーションのツリーをセンサネットワークのノード群にマッピングする手法を開発する。また、各センサネットワークノードへの信号処理機能のダイナミックなマッピングを実現するための抽象化された信号処理機能の記述方式を開発する。さらに、記述に基づいて信号処理機能を発見し、信号処理機能の連携を行いながらシンクノードへのデータパスを構築する信号処理パス構築プロトコルを開発する。

(4) 連鎖的高速ウェイクアップ機構の評価

連鎖的高速ウェイクアップ機構における

コンテキスト情報流通プロトコルに関し、流通に要するパケット数から電力を見積もり、消費電力的な観点からグループ化に要するコストテーブル構築に要するコストをシミュレーションにより評価する。次いで、コンテキスト情報に基づいてセンサノードを同期させるプロトコルに関し、消費電力、同期誤差およびその偏差をシミュレーションにより評価する。さらに、これらプロトコルを統合化する形で連鎖的高速ウェイクアップを実現するプロトコルをモデル化し、ウェイクアップに要する時間を、単純なビーコンベースのウェイクアッププロトコルと比較して、有用性を示す。

(5) パワーマネジメントアルゴリズムの評価

緊急性に適応的なパワーマネジメントアルゴリズムに関し、センサノードのスリープ/アクティブのスケジュールをポテンシャルに基づいて変化させた際の消費電力と応答性について、定期的なビーコンチェックの手法との比較評価をシミュレーションにより行う。また、重要イベントの検出ミス率、コンテキスト推定精度と電力・応答性の関係を屋内における行動パターンを変化させながら評価する。また、消費電力と応答性を支配するキーパラメータを明らかにし、アルゴリズムの改良を行う。

(6) 高速状況推定機構の評価

高速状況推定機構に関し、消費電力と応答性の観点からマッピングアルゴリズムの評価をシミュレーションにより行う。具体的には様々な信号処理・推定処理に要する電力をマイクロプロセッサのステップ数に基づいて計算し、インネットワークプロセッシングによる状況推定の消費電力と応答性の関係を評価する。また、信号処理を行いながらシンクノードへとデータ配送する提案方式と、旧来のデータギャザリング型のセンサネットワークとの比較を行い、インネットワークプロセッシングによる緊急イベント処理の得失を明らかにする。

(7) プロトタイプ実装

連鎖的高速ウェイクアップ機構、緊急性に適応的なパワーマネジメントアルゴリズム、およびインネットワークプロセッシングによる高速状況推定機構を、IEEE802.15.4 準拠のマルチホップ無線モジュールを利用してプロトタイプ実装する。IEEE802.15.4 のノンビーコンモード上に上記機構を等価的に実装するとともに、位置および加速度センサを用いたコンテキスト情報検出システムを実装し、実機デバイス上でのウェイクアップ機構とパワーマネジメントアルゴリズムを消費電力と応答性の観点から評価する。また、シミュレーション結果との比較検討を行う。

4. 研究成果

2. で述べた研究目的に対し、本研究では同期型間欠通信方式、および電力と位置情報に基づく経路制御方式を設計し省電力センサネットワークの構築を行った。

(1) システムデザイン

本節では、コンテキストに応じて活性化するバッテリーレス無線センサネットワークのためのノード制御機構の設計について述べる。まずセンサネットワークにおいて重要となる点は如何にして無数に設置されたセンサノードを管理するかということである。これにむけて、センサネットワークのノード群を協調動作させる為の技術について議論する。まず、従来のバッテリー駆動のセンサネットワークで活用されている技術としてSMAC、クラスタリング技術について述べる。その後、バッテリーレスにおける観点から今回設計した協調動作のコンセプトについて述べる。

SMAC やクラスタリングに代表される階層構造を持たせるネットワーク構築の技術では、スケジューラやクラスタヘッドといった特殊なノードを各エリア内から適宜選出する必要が生じる。バッテリーレス化を意識した省電力センサネットワークにおいては、電力変化やトポロジ変化が激しいため、選出動作に伴う通信のオーバーヘッドの負荷は無視できない。またネットワーク管理を行うノードは概して、常時受信待機などの電力負担も、通常のセンサノードより高くなる。バッテリーレスのように安定した電力源の保障が無い状況ではこのようなノード動作は適していない。同時にネットワーク管理の情報は、クラスタヘッドやスケジューラのノードに集中しやすく、数台の特殊ノードの欠落によりネットワーク全体の動作に影響を及ぼすことが考えられる。

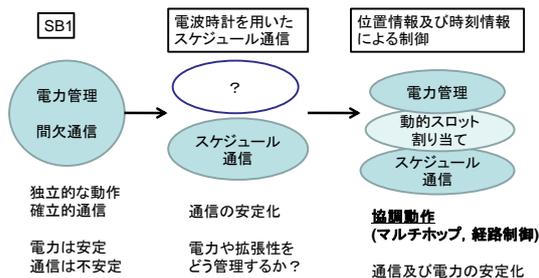


図1：設計したノードのコンセプト

本システムは広範囲をモニタリングする目的で時空間的に供給電力が変化する電源の特徴を考慮しつつ、各ノードとシンクノード間の接続性をできる限り確保できるように設計している。これに向けて、位置と時刻にもとづくスケジュール通信と、位置と電力にもとづくパケット転送を行う。

(2) 同期型間欠通信

本研究でSolarBiscuit2 (以下SB2) と呼ばれるセンサネットワークノードを部s-うにし、コンテキスト情報に位置と時刻を利用する。同期型間欠通信を行うために、ハードウェアに電波時計モジュールを実装し、スケジュール通信を行っている。スケジュール通信では予め通信を行う時間が静的に決められており、その時間帯のみ通信を行うことでデータ送信時の電波干渉やオーバーヒアリング等の問題が起こりにくい。

スケジュール通信を行うにはノードが現在時刻を保持していなければならないが、同期誤差やRTCの誤差などの要因でノード間にずれが生じてしまう。確実な通信を行うためにはこの誤差を考慮して通信の設計を行う必要がある。そのため、通信スロットはガードタイムを設け同期誤差の影響を防ぐ設計が行われている。

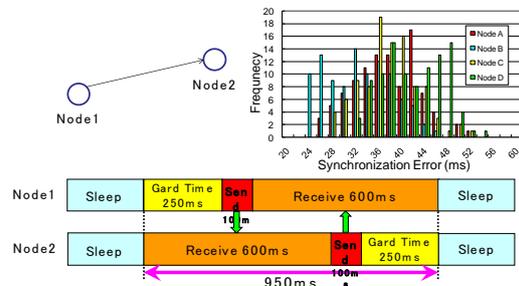


図2：同期型間欠通信

(3) 電力と位置情報に基づく経路制御

本システムでは経路制御にGPSRをベースとしたプロトコルを用いた。GPSRをベースとした設計を行った理由として各ノードが経路選択を行う際、自律的に判断を行いやすい為である。ネットワーク全体が不安定な電源で動作をしているため、各ノードが適宜、最低限の情報量で経路を選択できることが望ましい。また、座標を用いたルーティングを行っているため、複数シンクが存在した場合でも座標比較を行うことでマルチシンクに対応させることが可能である。

GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) は、基本的に各ノードが隣接するノードから座標情報を取得し、地理的にシンクまで近いノードにデータ転送を行っていく。隣接するノードのビーコンやピギーバックデータからの位置情報を用いて転送先ノードを決定する (図3)。GPSRは Greedy forwarding (送信ノードよりも目的ノードに近いノードを選択) と Perimeter forwarding (該当するノードが存在しない場合に「右手の法則」に従い、ノードを選択) の2つの動作からなる。

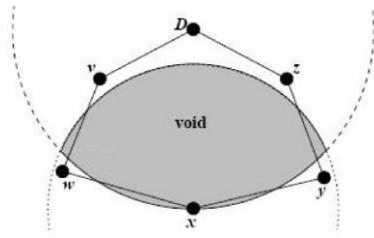


図 3 : GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)

本研究ではこの GPSR をベースに harvesting aware geo routing を設計した。隣接ノードテーブルによって管理された情報によって転送先の判断が行われる。テーブル内で管理される情報は、地理的にシンクに近いかを四段階 DST, NEAR, SAME, FAR で分類した近接情報、シンクからの経路上での最低電力値を示す経路電力情報、転送先の予約状況が過剰であるかを示す予約状況情報、データ転送先を決定する際は経路電力情報の良好なノードに決定される。基本的には GPSR 同様、シンクに近いノード群から選択される。進行方向に通信可能なノードが存在しない場合は、近接情報において近い順に経路電力情報の比較が行われ転送先が決定される。予約を行った隣接ノードが供給電力に対して予約過剰である場合、そのノードから予約過剰である通知を受け、送信ノードは電力余剰の隣接ノード群から優先的に経路検索を行う。

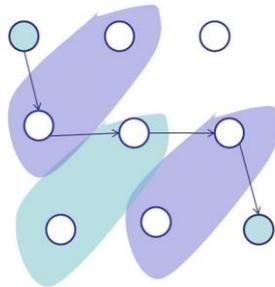


図 4 : 電力値に基づいた経路選択

(4) 実装・評価

本節では、前述の設計を元に行った実装についてハードウェア、ソフトウェアの面から述べる。

本システムのハードウェアは、太陽電池と電気二重層キャパシタが搭載された電源ボードとマイクロプロセッサ、無線モジュール、及び温湿度センサが搭載されたメインボードから構成される。太陽電池には 44mm × 44mm の単結晶シリコン太陽電池モジュールを用いた。この太陽電池の出力は低内部抵抗

型の 5 V, 1 F の電気二重層キャパシタ (FT0H105Z, NEC Tokin) にダイレクトに接続され一時的に蓄えられる。電波時計モジュール NRC01 及び高精度 RTC DS3231 を接続している。

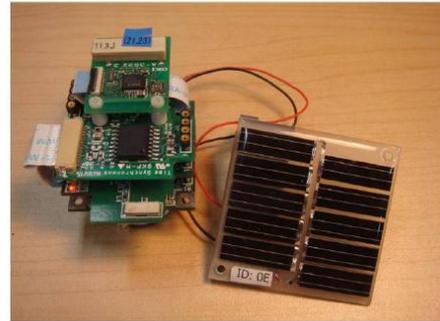


図 5 : ハードウェア

ソフトウェアの実装においては、東京大学森川研究室において開発された PAVENET を使用して行った。

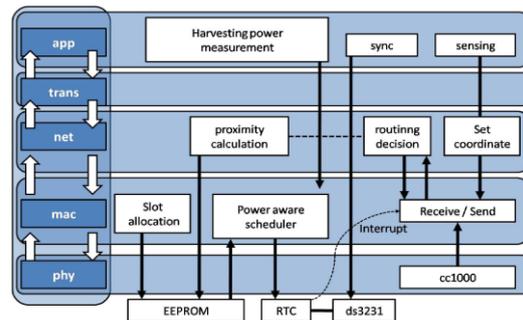


図 6 : ソフトウェアアーキテクチャ

まず、実装した電力管理機構の動作確認及び接続性の評価を行った。

まず、電力管理機構の確認を行った。各ノードは情報通知フェーズの前に利用可能な電力の更新を行う。Vmax 以上の場合は告知する電力情報を Pmax とし、太陽電池の記録上での最大出力の中で通信動作を行っている。Vmax 以下の場合は告知する電力情報を更新し新たな最適点として動作する。センサノードは 3.51V で電力供給を開始し、2.64V で電力供給を停止するため、キャパシタ電圧 3.3V を下回ると自身のセンシングと送信を 1 フレームに対し 1 度行うように実装している。500W の白熱電球を用い照度 6000lx ~ 30,000lx の変化を加えたところ、照度の変化ごとで電力値更新を行い、動作フレーム数を変動させた場合において安定したサンプリングが行われたことを確認した。

続いて、接続性のテストを行った。接続性

の評価として以下のような設定のもと、ネットワークにおけるパケット到達率の測定を行った。研究室内で9台の太陽電池を接続したSBノードを3×3のグリッド状に空間配置し、初期動作である充電による起動、時刻同期及び、シンク座標の伝達の為の待機後、安定したサンプリングを開始した事を確認してから、30分間のモニタリング動作からパケット到達率を測定した。電力状況の良い状態では2分間隔前後でのサンプリングが行えることを確認した。実装上では5分間隔でのデータ転送が維持されなければならない。測定の結果、電力状況の悪いノードからは接続性の良い状況で5分間隔程度の受信(6パケット)を断続的に行っていることを確認した。

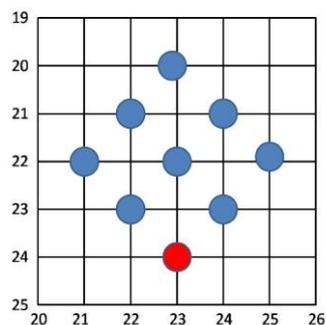


図7：ノード配置

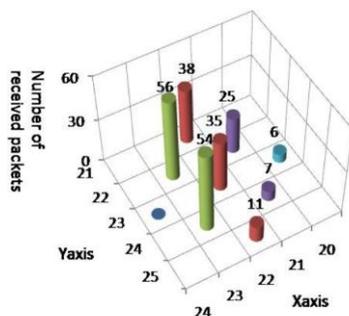


図8：到達パケット数

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 3件)

- [1] 南 正輝, 猿渡 俊介, アプリケーション指向センサネットワーク, 計測と制御, Vol. 48, No. 7, pp.548-553, July 2009.
- [2] 南 正輝, 川村 龍太郎, 森川 博之, 平原 正樹, 省電力志向新世代ネットワーク, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J92-B, No. 4, pp.605-614, April 2009.

- [3] 南 正輝, 森川博之, 位置・方向検出機能統合型面状通信システム, ヒューマンインタフェース学会誌, Vol. 10, No.4, pp.11-16, 2008.

[学会発表] (計 4件)

- [1] M. Minami, Eco-aware Networks, Eco Design 2009, Sapporo, Japan, December 2009.
- [2] T. Watanabe, K. Fujishige and M. Minami, Design and Implementation of a Wireless Metering Device for Context-aware Energy Management, 3rd East Asia Technical University Consortium Symposium, Malaysia, February 2009.
- [3] K. Sakakura and M. Minami, Magic Surfaces: A Surface Networking Technology for Indoor Ubiquitous Sensor Networks, 3rd East Asia Technical University Consortium Symposium, Malaysia, February 2009.
- [4] K. Sakakura and M. Minami, Prototyping a Surface Network System using Near Field Communication Technology, Asian Workshop on Ubiquitous and Embedded Computing, Taiwan, August 2009.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

南 正輝 (Minami Masateru)
芝浦工業大学・工学部・准教授
研究者番号：70365550

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし