

## 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 6 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21680008

研究課題名（和文）センサネットワークの設計支援技術

研究課題名（英文）A Study on Wireless Sensor Network Development Support

研究代表者 山口 弘純（YAMAGUCHI HIROZUMI）

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：80314409

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、ワイヤレスセンサネットワーク（WSN）プロトコルの設計開発を支援する技法を開発している。同技法では、特定のアーキテクチャや開発言語に依存しない抽象度の高い形でモデリング可能なWSN用システムモデル、設計開発を複雑化するファクターを開発者に意識させることなくセンサーノードの振舞いを規定することを可能とする自動設計アルゴリズム、さらにはそれを容易に性能評価可能なシミュレーションシステムなどを備える。プログラム設計が困難とされる協調型センサーシステムに着目し、アルゴリズムレベルの記述から NesCなどの実装言語で記述されたセンサーノードプログラムに変換するアルゴリズムを開発し、シミュレーションと実環境実験のシームレス連携機構の実現、シミュレーションシステムの効率化、WSNプロトコル設計開発試行による機能検証、設計したプロトコルの性能評価による自動設計アルゴリズムの評価と改善などを実施している。またこれらの手法やシステムを活用して位置情報や人の行動・環境センシングシステムの設計開発を行い、応用システムに対する提案技術の有効性を評価している。

## 研究成果の概要（英文）：

In this project, we have developed methodology and environment to support development of wireless sensor network applications and systems. In this method, we have provided (i) useful abstraction models that are designed independently of specific languages and architecture, (ii) an automated derivation algorithm to hide low-level primitives used in program codes of sensor nodes from developers, and (iii) performance verification systems that facilitate simulations and execution of developed WSN systems. Focusing on development of cooperative WSN applications which is known to be quite hard due to complex interactions of communication and event process primitives, we have testified the whole development process of such an application, and confirmed the benefit from our support functions such as algorithm level design, automated derivation of low level codes, and seamless evaluation between simulation and real environment. We have developed location estimation and management system to validate the proposed methodology and environment.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	9,600,000	2,880,000	12,480,000

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：ネットワークプロトコル，センサネットワーク 設計支援

## 1. 研究開始当初の背景

人々が真に安心して暮らせる，安全で利便性の高い次世代の社会システムにおいては，あらゆる環境において人やモノ，環境やサービスなどの情報を取得，集積および加工し，より高度なサービスに結びつける枠組みが必要となる．これに対し，センシングデバイスおよび近距離無線通信デバイスを備えたセンサノードが情報センシングを行い，センサノード間ネットワークを介してそれらの情報を収集・加工・散布するワイヤレスセンサネットワーク（以下WSN）が盛んに研究されている．現在ではプラントや環境の監視，ビル管理，ホームセキュリティなどの分野で実用化されつつあり，総務省の「ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会」においてもその重要性が論じられている．今後は，大規模災害時での救命救急や医療現場，障害者の移動支援のための経路ナビゲーション，児童の安全や犯罪抑止など安全安心のための行動把握および解析，車両搭載センサと歩行者の携帯電話の協調による路車間安全アプリケーションなど，ユビキタスアプリケーションの需要増加に伴い，WSNの需要も急増すると予想される．しかし，WSNでの設計開発過程では以下の課題が未解決である．(1) WSNでは，センサノードのプロセッサや通信デバイスが多様であり，ネットワークスケールやトポロジも対象領域ごとに異なる．また，収集するセンシングデータやその処理方法も異なるため，環境や機器に応じたプロトコル設計開発が必要になる場合が多い．一方，WSNは各センサノードがセンシング情報を自律的に処理・送受信する大規模な自律分散システムであるため，開発者はWSN全体の振舞いやトポロジ等を想定しながら各センサノードのメッセージ送受信タイミングや交換するデータを規定しなければならない．これに加え，通信性能や処理性能に関するハードウェア制約やアプリケーションにおける最大応答時間などの性能要求も考慮しなければならない．開発が著しく困難となる．(2) コード開発支援技法やツールが充実した一般的なソフトウェアとは異なり，WSNでは上位レベルでの設計を行った後に，ハードウェア制約を意識した低レベル言語でのコード実装を強いられる．また，性能評価用にテストベッドを構

築したり，ネットワークシミュレータ専用のコードや機能検証シナリオを別途実装するなど，性能評価や機能検証にかかる環境構築のコストが無視できない．

## 2. 研究の目的

これを踏まえ，本研究では，ワイヤレスセンサネットワーク（WSN）プロトコルの設計開発を支援する技法に関する研究を行っている．具体的には以下のアプローチによりWSNプロトコル設計開発過程における課題解決を図り，アルゴリズムレベルの上流設計段階からコード実装・機能検証などの下流設計段階までをシームレスに支援する．

まずWSNプロトコルの設計自動化手法を提案し，前述の(1)の解決を図る．センサノードが保持可能なデータ容量や通信容量などのアーキテクチャ，および送受信データの内容とそのタイミングなどの通信規約（プロトコル），さらにセンサノードの位置やトポロジなどの環境情報を，抽象度の高い形でモデリング可能なWSN用システムモデルを開発する．開発者はこのシステムモデルを用い，WSN全体として実現したい動作を指定するとともに，アーキテクチャ制約や実行時間などの性能要求，ならびに環境情報を指定するだけで，各センサノードの振舞いが規定されたプロトコルを自動で決定する技法を提案する．これにより，設計開発を複雑化するファクターを開発者に意識させることなくセンサノードの振舞いを規定でき，WSN開発者の負担を軽減できる．同時に，これまで開発者の勘と経験に頼ってきたWSNの性能を形式的に保証することも目的としている．

次にWSN実装および性能評価の支援手法を提案し，前述の(2)の解決を図る．(1)で自動設計された抽象度の高い動作仕様から，実装コードへの自動変換を実現することで，(1)で得られる抽象設計仕様と実装コードとのギャップを縮小し，開発者の負担軽減を図る．また，大規模WSNの性能評価は，計算機シミュレーションが主流であるが，その際シミュレーションコードやシナリオの開発コストが新たに生じるため，実装コードからシミュレータのコードへの自動変換技術も合わせて開発し，抽象レベルの動作仕様設計からのプロトタイプ開発，実証実験およ

びシミュレーション実験をスムーズかつ連携的に行えるようにする。

さらに上記の手法に基づくWSN設計開発支援システムを開発する。それを用いて位置推定アプリケーション開発を例題としたプロトコル設計開発実験を実施し、開発コストなどを評価することで提案する技法の有効性を実証する。

### 3. 研究の方法

まずプロトコル自動設計に必要なWSNシステムモデルならびにそれを用いた自動設計アルゴリズムの基本フレームワークを規定している。WSN全体の動作仕様を規定するWSN動作モデルを規定するため、例えばAODVなど既存のプロトコルの動作仕様から、送受信や変数アクセス、変数演算等の単位動作を抽出するとともに、Rumor Routing, LEACH, SPEED, GPSRなど多様なデータ通信プロトコルの解析とカテゴリ分類を行い、それぞれのカテゴリに固有なアクションも抽出しておくことで、様々なカテゴリのプロトコルに対応できるよう工夫する。次にアーキテクチャモデルを規定するためにモデル化すべき構成要素を抽出している。具体的にはセンサノードが保持可能なデータ保持領域や通信パラメータなどが相当する。これらのシステムモデルを用い、自動設計アルゴリズムの実現を図っている。まずアルゴリズムの入力として想定するWSN動作仕様の記述方式を定める。これにはWSNの特性であるデータセントリック方式にしたがい、個々のセンサノードの動作を指定するのではなく、WSNが全体として到達すべき目標状態の形式で指定可能としている。設計者からはWSNの具体的なアーキテクチャやネットワークポロジ（個々のセンサノードの具体的な配置関係）を隠蔽し、仮想ノードからなるリファレンスネットワーク上で目的状態を指定できる方法としている。次に基本アルゴリズム設計のためのWSN通信方式を設計している。各センサノードの振舞いは自由度が高いため、自動設計のためには通信パターンをあらかじめ規定しておき、それらの組み合わせでノードセントリックな振舞い（個々のセンサノードの動作仕様）を自動導出することが望ましい。このため、例えば1ホップブロードキャストとその確率的応答など、なるべく多くの通信パターンを想定しライブラリ化することで自動導出アルゴリズムから利用可能なようにしている。これらをもとに、個々のセンサノードがデータを交換しながら指定された目標状態に達するための通信パターンと単位動作の組み合わせを発見ならびに決定し、センサノードの動作仕様を決定するアルゴリズムを考案している。

これらをもとに、WSNの実装および性能評価支援手法の開発に取り組んでいる。まずWSN動作仕様からのコード導出を実現するため、自動設計アルゴリズムで用いた単位動作のAPI化を図っている。これに基づく変換システムを設計開発し、抽象度が高くアーキテクチャ非依存の動作仕様を実装用コードに自動変換する仕組みを実現している。

性能評価支援技法の実現では、性能評価や機能検証実験を支援するための機構を実現している。実機実験は通常、小規模WSNに限られることから、小規模WSNに対してはより現実性が高い実機実験を実施し、現実環境から得られる情報を用いて、大規模WSNの計算機シミュレーションの現実再現性を向上し、実環境とシミュレーション環境のシームレスな連携を可能とするアプローチを採用する。このため、実機実験で得られるログデータ等をシミュレータでも再現できるように工夫している。また、実環境で動作するWSNプロトコルのデバッグのため、各センサノード上にデバッグ用エージェントを組み込み、複数のセンサノードが連携する複雑なコードのデバッグを容易にする。

これらの手法に基づくWSN設計開発支援システムを開発している。基本コンポーネント設計と実装を行い、数十ノード規模のWSNにおける位置推定アプリケーション向けプロトコルの設計開発実験を実施し、その機能検証を行っている。

### 4. 研究成果

開発した支援法の基本技術や基礎性能評価は雑誌論文[1]および[2]に掲載されている。センサーネットワークや移動体ネットワークのシミュレーションおよび性能評価技術に関しては雑誌論文[3]および[5]に、応用システムとしてのロケーションベースシステムに関する設計開発については雑誌論文[4]および[6]に掲載し、計6件を査読付雑誌論文に掲載している。関連して国内学会で計8件（[7]～[14]）の発表を実施している。

### 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6件）

[1] 森 駿介, 梅津 高朗, 廣森 聡仁, 山口 弘純, 東野 輝夫, ワイヤレスセンサネットワークの設計開発支援環境 D-sense, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 10, pp. 2556-2567, 2009年

(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110007970536>)

[2] Kazushi Ikeda, Thilmee M. Baduge,

Takaaki Umedu, Hirozumi Yamaguchi and Teruo Higashino, ALMware: A Middleware for Application Layer Multicast Protocols, Computer Communications (Elsevier), Vol. 34, No. 14, pp. 1673-1684, 2011 (DOI: 10.1016/j.comcom.2011.03.004)

[3] Akihito Hiromori, Hirozumi Yamaguchi and Teruo Higashino, A Simple Mobility Model Realizing Designated Node Distributions and Natural Node Movement, Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS2011), pp. 302-311, 2011 (DOI:10.1109/MASS.2011.37)

[4] 樋口 雄大, 藤井 彩恵, 山口 弘純, 東野 輝夫, 断続的に移動する無線端末群の位置推定, 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 2, pp. 623-641, 2011年 (http://ci.nii.ac.jp/naid/110007891070)

[5] Akihito Hiromori, Hirozumi Yamaguchi and Teruo Higashino, A Comprehensive Test Strategy for Network Protocols in Diverse Environment, Proceedings of the 19th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS2011), pp. 188-196, 2011 (DOI:10.1109/MASCOTS.2011.69)

[6] Sae Fujii, Akira Uchiyama, Takaaki Umedu, Hirozumi Yamaguchi and Teruo Higashino, Trajectory Estimation Algorithm for Mobile Nodes using Encounter Information and Geographical Information, Pervasive and Mobile Computing (Elsevier), Vol. 8, No. 2, pp. 249-270, 2012 (DOI: 10.1016/j.pmcj.2011.11.002)

[学会発表] (計 8 件)

[1] 稲垣彰祐, 森 駿介, 梅津高朗, 山口 弘純, 東野 輝夫, センサノードのバッファ残量予測を用いたロスの少ないデータ収集プロトコルの提案, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02011) シンポジウム論文集, pp. 865-870, 2011年7月6日, 京都府宮津市

[2] 森 駿介, 梅津高朗, 山口 弘純, 東野輝夫, 無線センサノード群における協調データ処理プロセスの開発支援, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02011) シンポジウム論文集, pp. 466-482, 2011年7月6日, 京都府宮津市

[3] 廣森聡仁, 森 駿介, 山口 弘純, 東野輝夫, センサネットワークアプリケーションを対象とした統合型シミュレーション環境の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, pp. 81-86, 2011年1月21日, 広島市立大学(広島市)

[4] 森駿介, 稲垣彰祐, 梅津高朗, 廣森聡仁, 山口 弘純, 東野輝夫, 分散協調型無線センサノード群の実行コード自動生成, 情報処理学会研究報告 (情処技報), pp. 1-8, 2010年5月20日, 沖縄県那覇市

[5] 稲垣彰祐, 森 駿介, 梅津高朗, 山口 弘純, 東野輝夫, センサネットワークアプリケーションの実装支援 API の実装と評価, 情報処理学会研究報告 (情処技報), pp. 1-8, 2010年3月26日, 東京都八丈島

[6] 森 駿介, 梅津高朗, 廣森聡仁, 山口 弘純, 東野輝夫, 無線センサノード群による監視動作を実現するノードプログラムの自動生成, 情報処理学会第 70 回全国大会, 2010年3月13日, 筑波大学 (つくば市)

[7] 森 駿介, 梅津高朗, 廣森聡仁, 山口 弘純, 東野輝夫, 無線センサネットワークにおけるノード協調モニタリングの実現, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2009年9月15日, 新潟大学 (新潟市)

[8] 森 駿介, 梅津高朗, 廣森聡仁, 山口 弘純, 東野 輝夫, 無線センサネットワークにおけるノード協調型分散モニタリング, 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02009) シンポジウム論文集, pp. 341-348, 2009年7月8日, 大分県別府市

[その他]

ホームページ準備中

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山口 弘純 (YAMAGUCHI HIROZUMI)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号: 80314409