

平成21年 5月 15日現在

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2005～2008

課題番号：17200006

研究課題名（和文） センサネットワークのための高度データ処理基盤に関する研究

研究課題名（英文） Studies on Advanced Data Processing Techniques for Sensor Networks

研究代表者

西尾 章治郎（NISHIO SHOJIRO）

大阪大学・大学院情報科学研究科・理事・副学長

研究者番号：50135539

研究成果の概要:無線通信機能をもつ小型センサノードで形成するセンサネットワークに対し、(1)センサネットワークノードのための動的機能交換ミドルウェア、(2)センサネットワークのためのデータ配置管理技術、(3)センサネットワークのためのデータ送受信技術の3テーマを中心に研究を推進し、センサネットワークのためのデータ処理基盤となる技術の研究開発を行った。本研究の成果は、多数の学術論文誌や国際会議録等に掲載され、国内外において高い評価を得ている。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2006年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2007年度	10,900,000	3,270,000	14,170,000
2008年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
年度			
総計	36,400,000	10,920,000	47,320,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：センサネットワーク、ミドルウェア、データ管理、データ配信

1. 研究開始当初の背景

近年の無線通信技術や半導体技術の発達により、近距離無線通信機能をもつセンサノードがネットワークを形成してデータを収集・利用するセンサネットワークに対する注目が高まっている。センサネットワークでは、環境中に数万・数十万といった莫大な数のセンサが存在し、各センサが時々刻々と変化する環境情報や個人の状況などをセンシングし続けるため、従来のモバイルコンピューティングの枠組みとは異なる新たなデータ管理技術が必要となる。

2. 研究の目的

本研究では下記の3点を要素技術とするセンサネットワークのための統合型プラットフォームを構築することを目的とする。

(1) センサネットワークノードのための動的機能交換型ミドルウェア

システム稼動中に機能の動的交換が可能なミドルウェアを開発する。状況に応じて必要な機能だけを格納することで、柔軟性の高いシステムを構築できる。また、利用していない領域をセンサデータ格納に利用できるためメモリの利用効率が高くなる。

(2) センサネットワークのためのデータ配置管理技術

センサデータへのアクセス信頼性を高めるため、格納データの移動・複製配置を行う。センサネットワークではネットワークの切断が頻繁に発生するが、提案アルゴリズムを用いることでセンサデータへのアクセス成功率が大幅に上昇する。

(3) センサネットワークのためのデータ送受信技術

従来のプル型データ要求ではなく、放送型・プル型をハイブリッドに組み合わせたセンサデータの送受信プロトコルを設計し、省電力・高効率のセンサデータ配信を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、「2. 研究の目的」で述べた各要素技術の確立をサブテーマとし、それぞれ下記に示すように研究開発を推進するものとした。

(1) センサネットワークノードのための動的機能交換型ミドルウェア

システム全体の動作基盤として、他のサブテーマで開発した技術を動作させるミドルウェアを開発する。具体的には、柔軟なシステムの動作変更を実現するために、軽量でありながら機能モジュールを変更可能なミドルウェアを構築する。このように必要な機能だけをシステムに格納できれば、不要な機能を削除することによる高速化や、さまざまなプロトコルを統合的に試せる柔軟性の実現だけでなく、空き領域をセンサデータの格納に割り当ててメモリ利用効率を高めることも可能となる。

本研究ではこのような基本的な機能に加え、接続されたセンサの組合せ情報を考慮しながら適切なセンサのみに電源を供給することによる低消費電力化や、移動型センサノードを取り扱う際に最適な経路を移動する仕組みなど、センサネットワークシステムがもつべき機能を基盤としてもつミドルウェアを構築する。さらに提案ミドルウェアをハードウェア上に実装し、その有効性を評価する。

(2) センサネットワークのためのデータ配置管理技術

本サブテーマは、プロトコル階層ではサブテーマ(1)の上位層、サブテーマ(3)の同位層に該当するものであり、センシングデータに対するデータ管理のための基盤技術について研究開発を推進する。

具体的には、まず、データ記憶領域の乏し

いセンサにおいて、ネットワーク全体でのデータ可用性の向上、および、データ操作（読出し、書込み）のための消費電力の低減の両方を実現する複製配置方式を考案する。この方式では、ネットワーク内で一部のセンサがもつ複製のみにデータ操作が集中しないように、複製の配置・削除を決定する。この際、ネットワーク全体で最適な配置を決定するのは、センサ数が大量であるため計算オーバーヘッドおよび通信オーバーヘッドが大きく非現実的である。そのため、この方式では、各センサが数ホップ先までの範囲に存在する周辺センサの情報および自身が中継したデータ操作のためのメッセージのみを監視し、自律的かつ動的に複製の再配置を決定する。

さらに、センサがデータ更新（書込み）を行った際に複製間のデータ操作の一貫性が損なわれることを防ぐため、効率的な複製間の一貫性管理方式を考案する。この方式では、データ更新のたびに複製を作成している全センサに更新内容を伝播するのは非現実的であることを考慮して、少ないメッセージ通信で一貫性を保持することを目的とする。

これらの考案方式の有効性を、詳細なシミュレーション実験によって多角的に検証する。

(3) センサネットワークのためのデータ送受信技術

本サブテーマは、サブテーマ(2)と同様、サブテーマ(1)の上位層に該当するものであり、センシングデータの収集・配信のための基盤技術についての研究開発を推進する。

具体的には、まず、十分なバッテリーを搭載することが困難なセンサにおいて、ネットワーク全体からの省電力なデータ収集するデータ収集方式を考案する。この方式では、基地局からプッシュ型放送を用いて提供される情報に基づいて、データを基地局へ転送するための動作を決定する。この際、各センサが、データ転送が可能で自身の現在位置から最も近い地点を決定し、他のセンサとも距離を一定に保ちながら行動することで、移動コストなどのデータ収集に必要な電力コストを低減する。

さらに、センサ間での情報交換が困難で、他のセンサの状況を知ることが不可能な環境でも、効率的なデータ収集を実現するための方式を考案する。この方式では、計算資源の豊富な基地局において各センサの動作をシミュレートし、状況を予測する。この予測結果をプッシュ型放送で各センサに配信することで、各センサが通信不可能な他のセンサの状況を考慮して行動を決定する。

これらの考案方式の有効性を、詳細なシミュレーション実験によって多角的に検証する。

さらに本研究では、各サブテーマの研究成果と統合した情報提供基盤の試作システムを構築し、実環境にてシステムを実装する際の問題点を洗い出す。これに基づき提案基盤の実現性について詳細に議論し、本研究のまとめとする。

4. 研究成果

本研究では、三つのサブテーマそれぞれについて、下記に示すような研究成果を達成した。

(1) センサネットワークノードのための動的機能交換型ミドルウェア

まず、動的機能交換型ミドルウェアとしては、安定性の高いデータベース技術であるアクティブデータベースを基盤とした簡易 OS、およびその上で動作するイベント駆動型ルールを基盤としたアプリケーション記述方式やネットワークトポロジ発見手法を提案した。また、センサネットワークの大きな目的であるセンサデータに基づく状況識別を低消費電力で行う枠組みを構築した。この枠組みでは、ノードに接続するセンサごとに個別に電源供給を行うことを可能にしており、状況識別精度を落とさない範囲で選択的に電源を供給することで、3割程度消費電力の少ないセンサシステムの構築を可能にした。これらの成果は、ユビキタスコンピューティング分野のトップカンファレンスである Pervasive2008 を含め、多数の学術論文誌および国際会議において発表している。また、これらの技術を応用したセンサシステム（図1）を実際に病院内に配置してデータ取得を行い、その解析結果を考察した論文が学術論文誌に掲載されるなど実践的なシステムを多数構築している。

また、センサネットワークの形態のひとつであり、センサノードが移動することを前提とするモバイルセンサネットワークの基盤システムの必要性から、モバイルセンサネットワークのための移動経路制御機構をもつセンサノードを構築した。提案する機構は、コストマップと呼ぶ仕組みを用いることで、移動モデルが異なるセンサノードを统一的に扱うことを可能とし、従来の経路制御手法と比較して効率の良い移動経路が構築できることを確認した（図2）。この成果は、センサネットワーク分野の重要会議である INSS2008 を含め、学術論文誌や国際会議で多数の成果となっている。

このように、本サブテーマで構築した基盤システムは学術的に重要な成果を挙げつつ、実践的な利用により多数の実績を挙げており、センサネットワークのデータ処理基盤確

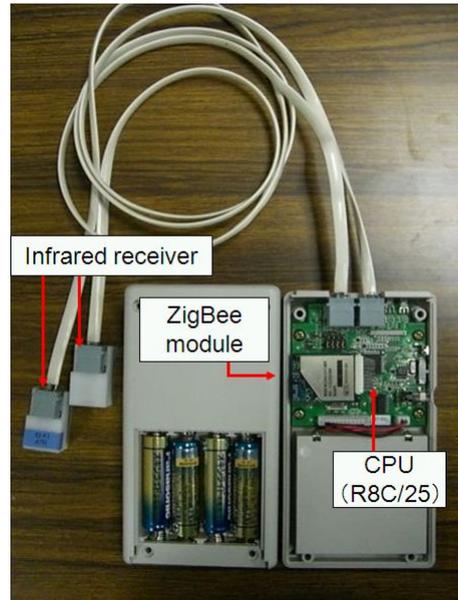


図1：作成したセンサノード

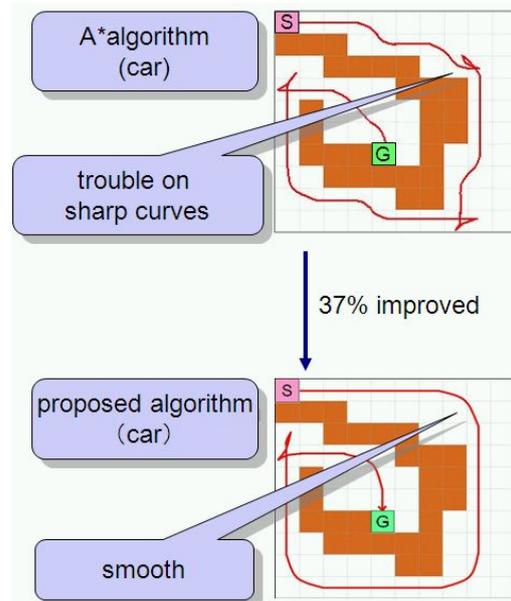


図2：提案手法で作成した経路

立において多くの貢献ができた。

(2) センサネットワークのためのデータ配置管理技術

まず、消費電力を考慮した複製配置方式としては、周辺センサからのみデータアクセス頻度と電力残量に関する情報を収集し、周辺センサからのアクセス頻度の高いデータの複製を電力残量の大きいセンサに優先的に配置する方式を提案した。シミュレーション実験の結果から、従来方式と比較して、データ可用性（データアクセス成功率）を10%程度向上しながら、最初に電力を使い果たすセンサが発生するまでの時間を10%程度長く

することを確認した。これらの研究成果は、学術雑誌や国際会議録に掲載されている。学術雑誌に掲載された論文のうち一つは、日本データベース学会の論文賞を受賞している。また、国際会議録掲載論文のうちの一つは、モバイルデータ管理で世界最高峰の国際会議 MDM において発表したものである。このように、これらの研究成果は国内外において非常に高く評価されている。

次に、複製間の一貫性管理の研究については、データ更新（書込み）時には特別な処理を行わず、データ読み出し時には任意の複製に暫定的にアクセスし、後にその複製が最新かどうかを確認する「楽観的一貫性管理」と、データ更新時およびデータ読み出し時に特別な処理を行い、データ操作時に一貫性を保証する「悲観的一貫性管理」の両方のアプローチで研究を実施した。楽観的アプローチでは、データの複製配置の際に、データアクセス頻度、ネットワークトポロジに加え、データ更新頻度を考慮する複製配置方式を考案した。シミュレーション実験の結果から、考案方式により、データ可用性が向上し、さらに、古い複製への無駄な暫定アクセスを削減できることを確認した。悲観的アプローチとしては、アプリケーションからの要求に応じて、ネットワーク全体、局所的なエリア、センサ単体など、異なる範囲で一貫性を保証する一貫性管理方式を考案した。例えば、ネットワーク全体で一貫性を保証する方式では、センサノードが存在する領域を複数のエリアに分割し、エリア内とエリア間で階層的に一貫性を管理する（図 3）。シミュレーション実験により、考案方式の性能を詳細に評価し、その特性を明らかにした。

これらの研究成果は、信頼性システム分野で世界最高峰の国際会議 SRDS の会議録に掲載されている。さらに、モバイルコンピューティング分野で世界最高峰の国際論文誌 IEEE Trans. on Mobile Computing に、日本人で初めて筆頭著者として論文が掲載（2 編）されている。このように、これらの研究成果は国際的に非常に高い評価を受けており、IEEE Computer Society Japan Chapter の Young Author Award を受賞した。

(3) センサネットワークのためのデータ送受信技術

まず、省電力なデータ収集方式としては、基地局と通信可能なセンサの情報のみを用いてセンサが自律的に移動し、移動コストやデータの送受信コストを低減しつつ基地局へデータを転送する方式を提案した。この方式では、常にセンサが単独で動作するのではなく、移動中に他のセンサと通信可能となった場合にはセンサ同士で協調して動作することにより、より効率のよい消費電力の削減

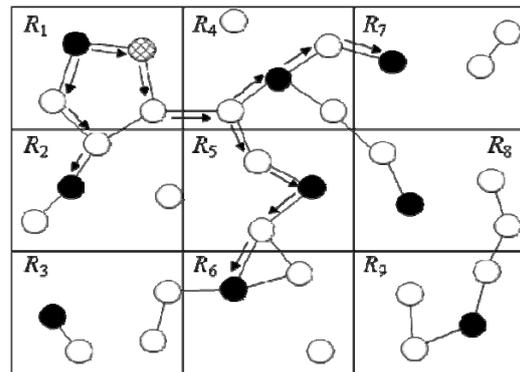


図 3：一貫性管理方式（ネットワーク全体）

を実現する（図 4）。シミュレーション実験の結果から、センサが協調動作することで、消費電力を 10%程度低減しつつ、10%程度データの収集効率を向上できることを確認した。これらの研究成果は、国際会議 MDM2008 のセンサネットワークに関するワークショップ SeNTIE をはじめとして、多数の学術論文誌や国際会議録に掲載されている。

次に、基地局がシミュレートした全センサの状況に基づいて、各センサが自律的に判断して行動する方式を提案した。アクチュエータを備えたセンサが自身で移動する場合やセンサの設置密度が低い場合、センサの通信範囲に他のセンサが存在しない状況が発生して、ネットワーク的に当該センサが孤立する。提案方式では、各センサが一時的なネットワークを形成するなど協調して動作するため、孤立したセンサの状況が不明な時には動作を決定できない。この方式では、センサの動作をシミュレートして、その結果から各センサが他センサの故障などを含む現在の状況を適応的に判断し、動作する。シミュレーション実験の結果から、センサに故障が発生する場合でも、データ収集効率を大きく下げることなく、基地局へのデータ転送が可能となることを確認した（図 5）。これらの研究成果は、複雑知能システムに関する重要国際会議である CISIS2009 のワイヤレスネットワークにおけるデータ管理に関するワークショップ DMIEW をはじめとして、多数の学術論文誌や国際会議録に掲載されている。

さらに本研究では、上記サブテーマで提案した方式を、実機や実環境を詳細に再現するシミュレータ上にてプロトタイプシステムを構築することで、実環境上で提案手法を動作させるための要件を洗い出した。その上で、全テーマを統合した情報提供基盤構築の実現性や、実現のために検討すべき課題について詳細に検討した。

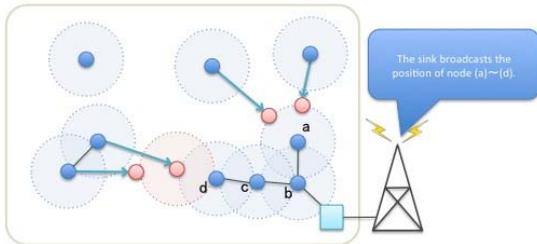
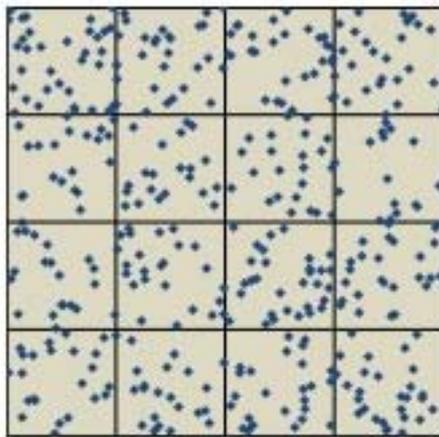
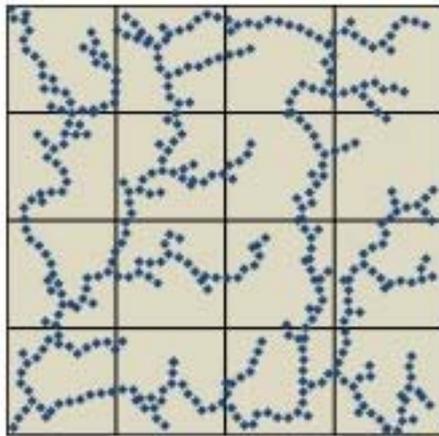


図4：放送型配信によるセンサの移動制御



Sensing position



Delivery mode

図5：提案手法で構築したネットワーク

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 27 件)

- ① T.Hara and S.K.Madria, Consistency

Management Strategies for Data Replication in Mobile Ad Hoc Networks, IEEE Trans. Mobile Computing, 2009 to appear, 査読有.

- ② K.Treeprapin, A.Kanzaki, T.Hara, and S.Nishio, An Effective Mobile Sensor Control Method for Sparse Sensor Networks, Sensors, Vol.9, No.1, pp.327-354, 2009, 査読有.
- ③ H.Sago, M.Shinohara, T.Hara, and S.Nishio, Effective Data Dissemination for Information Sharing Based on Inter-Vehicle Communication, Journal of Interconnection Networks (JOIN), Vol.8, pp.337-354, 2008, 査読有.
- ④ Y.Kishino, T.Terada, N.Villar, H.Gellersen, and S.Nishio, A Position Detection Mechanism enabling Location-aware Pin & Play, Int'l Journal of Smart Home (IJSH), Vol.1, pp.31-39, 2007, 査読有.
- ⑤ T.Hara and S.K.Madria, Data Replication for Improving Data Accessibility in Ad Hoc Networks, IEEE Trans. Mobile Computing, Vol.5, No.11, pp.1515-1532, 2006, 査読有.

[学会発表] (計 103 件)

- ① K.Murao et al., A Context-Aware System that Changes Sensor Combinations Considering Energy Consumption, Int'l Conf. on Pervasive Computing (Pervasive 2008), May 21, 2008, Sydney, Australia.
- ② S.Kitajima et al., On Query Processing Considering Energy Consumption for Broadcast Database Systems, Int'l Conf. on Database Systems for Advanced Applications (DASFAA 2007), April 12, 2007, Bangkok, Thailand.
- ③ M.Shinohara et al., Data Replication Considering Power Consumption in Ad Hoc Networks, Int'l Conf. on Mobile Data Management (MDM 2007), May 9, 2007, Mannheim, Germany.
- ④ T.Hara et al., Consistency Management among Replicas in Peer-to-Peer Mobile Ad Hoc Networks, Int'l Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS 2005), October 26, 2005, Orlando, FL, USA.
- ⑤ H.Hayashi et al., A Replica Allocation Method Adapting to Topology Changes in Ad Hoc Networks, Int'l Conf. on Database and Expert Systems

Applications (DEXA 2005), August 26,
2005, Copenhagen, Denmark.

〔図書〕(計 1 件)

- ① T.Hara, American Scientific Publishers, Data Replication and Update Management in Mobile Ad Hoc Networks, Book chapter, Handbook on Mobile Ad Hoc and Pervasive Communications, 2009, to be published.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西尾 章治郎 (NISHIO SHOJIRO)
大阪大学・大学院情報科学研究科・理事・
副学長
研究者番号：50135539

(2) 研究分担者

原 隆浩 (HARA TAKAHIRO)
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：20294043
寺田 努 (TERADA TSUTOMU)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：70324861
小川 剛史 (OGAWA TAKEFUMI)
東京大学・情報基盤センター・講師
研究者番号：60324860

(3) 連携研究者

なし